

تحلیل آثار فرسایش آبی بر ویژگی‌های خاک و ساختار میکروبی در آبخیز سرسارو شهرستان خاش

- مرتضی صابری^{۱*}، وحید کریمیان^۲، محمدرضا دهمرده‌قلعه‌نو^۳، رسول خطیبی^۴، مهدی سرپرست^۵
- ۱ و ۳- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران
۲- استادیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران
۴- استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران
۵- دکتری بیابان‌زدائی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، کارشناس سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

فرسایش آبی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عامل‌های ویرانی خاک، تأثیر قابل‌توجهی بر کیفیت و عملکرد خاک در بوم‌سازگان‌های گوناگون دارد. آبخیز سرسارو در شهرستان خاش به‌دلیل شرایط اقلیمی خاص و دخالت‌های انسانی از جمله چرای بی‌رویه و از بین رفتن پوشش گیاهی، از مناطق آسیب‌پذیر نسبت به فرسایش آبی به‌شمار می‌آید. با وجود اهمیت موضوع، بررسی‌های جامعی که به‌طور هم‌زمان ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در این منطقه را نشان دهد، انجام‌نشده است. از این‌رو، این پژوهش با هدف ارزیابی اثرات فرسایش آبی بر تغییرات خاک و ساختار میکروبی در آبخیز سرسارو انجام شد تا با شناخت بهتر اثرات فرسایش، راهکارهایی برای مدیریت پایدار منابع طبیعی ارائه شود.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، نمونه‌برداری خاک به‌شکل 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 منطقه فرسایشی، چهار منطقه همگن با شرایط گیاهشناسی تقریباً مشابه انتخاب شد و در هر کدام از آن‌ها، پنج نمونه خاک (یک نمونه در مرکز و چهار نمونه به‌شکل علامت بعلاوه در پیرامون آن) برداشت شد.

نوع مقاله: پژوهشی

*مستول مکاتبات: mortezasaberi@uoz.ac.ir

استناد: صابری، م.، کریمیان، و.، دهمرده‌قلعه، م.، ر.، خطیبی، ر.، سرپرست، م. ۱۴۰۴. تحلیل آثار فرسایش آبی بر ویژگی‌های خاک و ساختار میکروبی در آبخیز سرسارو شهرستان خاش. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۸(۴): ۱۶۴-۱۴۶.

شناسه دیجیتال: 10.22092/wmrj.2025.370181.1628

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۴، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۲۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۱۱
پژوهش‌های آبخیزداری، ۱۴۰۴ سال، دوره ۳۸، شماره ۳، شماره پیاپی ۱۴۹، زمستان ۱۴۰۴، صفحه‌های ۱۴۶ تا ۱۶۴.

© نویسندگان

ناشر: مرکز پژوهش و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



نمونه‌برداری از خاک از ژرفای صفر تا ۳۰ سانتی‌متر انجام شد. برای هر جایگاه فرسایشی، نمونه‌های برداشت‌شده از مناطق همگن باهم ترکیب شدند 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 بودند، بدون الک کردن و با حفظ شرایط رطوبتی اولیه، در ظروف دربسته و در مجاورت یخ خشک به آزمایشگاه منتقل شدند و تا زمان انجام آزمایش‌ها در یخچال نگهداری شدند. بخش دیگر نمونه‌ها، برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، پس از خشک شدن در هوای آزاد و عبور از الک دو میلی‌متری، استفاده شد. تجزیه پراکنش یک‌طرفه (ANOVA) داده‌های مربوط به ویژگی‌های خاک با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد. مقایسه میانگین‌ها، با استفاده از آزمون دانکن با سطح اطمینان ۹۵٪ انجام شد. همچنین، تحلیل همبستگی میان سنجه‌های بررسی‌شده در محیط نرم‌افزار R انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تحلیل پراکنش نشان داد که شدت اثرات فرسایش بر ویژگی‌های فیزیکی خاک معنادار ($p < 0.01$) بود. اندازه‌شن از ۲۵٪ در خاک‌های بدون فرسایش به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت. همبستگی سیلت و رس با شدت فرسایش منفی و به‌ترتیب (۰/۹۶-) و (۰/۹۵-) بود و اندازه‌هر دو کاهش یافت. رطوبت خاک در زمین بدون فرسایش ۱۲/۵٪ بود که در فرسایش شدید به ۶/۰۹٪ کاهش یافت ($p < 0.01$). همچنین، تخلخل کاهش (همبستگی منفی ۰/۹۷-) و جرم‌مخصوص‌ظاهری (همبستگی مثبت) افزایش یافت. سنجه‌های شیمیایی خاک نیز مانند کربن آلی از ۲/۲۳٪ به ۰/۹۳٪، نیتروژن کل از ۰/۳۱٪ به ۰/۰۸٪، پتاسیم قابل‌جذب و فسفر قابل‌جذب به‌طور معناداری کاهش یافتند ($p < 0.01$). هدایت الکتریکی به‌طور معناداری (همبستگی مثبت ۰/۹۲) افزایش یافت. تغییرات اسیدیته چندان چشمگیر نبود ($p > 0.05$). ویژگی‌های زیستی خاک به‌شدت کاهش یافتند؛ فعالیت آنزیم کاتالاز از ۲۸/۰۵ واحد در خاک‌های بدون فرسایش به ۳/۵۷ واحد در خاک‌های با فرسایش شدید کاهش یافت ($p < 0.01$). کربن زی‌توده میکروبی از ۲۲۳/۶ میلی‌گرم به ۹۳/۳ میلی‌گرم، نیتروژن زی‌توده میکروبی از ۳۱/۶ به ۷/۸ میلی‌گرم و جمعیت میکروارگانیزم‌ها و تنفس میکروبی پایه نیز به‌طور معناداری کاهش یافتند ($p < 0.01$). سهم میکروبی خاک نیز کاهش یافت و همبستگی آن با شدت فرسایش زیاد و منفی (بیش از ۰/۹۶-) بود. این داده‌ها بیانگر اثرات منفی و شدید فرسایش آبی بر کیفیت فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک و کاهش سلامت و ظرفیت تولیدی بوم‌سازگان‌ها است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که اثرات فرسایش آبی بر کیفیت فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در آبخیز سرسارو شدید و منفی بود. فرسایش با حذف لایه‌های سطحی، کاهش ماده آلی، ویرانی ساختار خاک، کاهش عناصر غذایی و تضعیف جامعه‌های میکروبی، سلامت و عملکرد بوم‌سازگان‌های خاک را به مخاطره می‌اندازد و توان تولیدی آن را کاهش می‌دهد. از این‌رو، برای جلوگیری از ویرانی بیشتر خاک و کاهش عملکرد زیستی آن، مهار فرسایش و مدیریت جامع منابع خاک از اولویت‌های مهم در مناطق آسیب‌پذیر مانند آبخیز سرسارو است. برپایه نتایج این پژوهش پیشنهاد می‌شود شاخص‌های زیستی به‌عنوان ابزارهای مؤثر در پایش سلامت خاک‌های فرسایش‌یافته در نظر گرفته شوند تا بستر مناسبی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی فراهم آید.

واژگان کلیدی

آنزیم کاتالاز، پایداری خاک، شاخص‌های زیستی، مناطق خشک و نیمه‌خشک، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی

مقدمه

آبخیزها به‌عنوان واحدهای بنیادی مدیریت منابع آب و خاک، در پایداری بوم‌سازگان نقش اساسی دارند. از سوی دیگر، فرسایش آبی به‌عنوان یکی از گسترده‌ترین و مهم‌ترین عامل‌های ویرانی خاک، در تغییر کیفیت و عملکرد خاک در بوم‌سازگان‌های گوناگون نقش بسزایی دارد. این فرایند که ناشی از اثرات بارش و جریان آب سطحی بر لایه‌های سطحی خاک است، باعث جابجایی ذرات خاک، کاهش ژرفای خاک و به‌تبع آن ویرانی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی آن می‌شود (لال ۲۰۰۱). فرسایش آبی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که خاک‌ها و پوشش گیاهی حساس‌تری دارند، می‌تواند پیامدهای زیان‌باری برای سلامت خاک و بوم‌سازگان داشته باشد. این پدیده به‌طور مستقیم بر ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند نفوذپذیری، تخلخل و ساختار آن اثرگذار است و موجب ویرانی لایه‌های سطحی خاک می‌شود که معمولاً غنی از مواد آلی و مواد مغذی هستند (کیو و همکاران ۲۰۲۱). نتایج پژوهشی نشان داد که فرسایش آبی باعث کاهش ماده آلی خاک شد و این کاهش بر فعالیت‌های میکروبی، ظرفیت نگهداری آب و فرآیندهای بیوشیمیایی خاک اثرات گسترده‌ای داشت (لیو و همکاران ۲۰۲۳). همچنین، تغییرات شیمیایی خاک مانند کاهش اسیدیته و کاهش عناصر مغذی مانند فسفر و نیتروژن از پیامدهای فرسایش است که چرخه‌های تغذیه‌ای خاک را مختل می‌سازد (ژانگ و همکاران ۲۰۲۳). میکروارگانیسم‌های خاک، به‌ویژه باکتری‌ها و قارچ‌ها، به‌عنوان مؤلفه‌های حیاتی حفظ کیفیت خاک و پایداری بوم‌سازگان شناخته می‌شوند (کیو و همکاران ۲۰۱۹)، و در تجزیه مواد آلی، تثبیت نیتروژن و تسهیل جذب مواد مغذی نقش مهمی دارند (کندی و استیوبس ۲۰۰۶؛ نیمو و همکاران ۲۰۱۳). نتایج پژوهش‌های پرشماری نشان داده است که فرسایش، با کاهش کربن آلی و تغییرات اسیدیته، موجب کاهش تنوع و تغییر ساختار جامعه‌های میکروبی خاک می‌شود (کیو و همکاران ۲۰۲۱).

یک شاخص مهمی برای پایداری زیستی خاک، نسبت قارچ به باکتری است، که تحت تأثیر فرسایش کاهش می‌یابد، چرا که قارچ‌ها در تثبیت ساختار خاک و تجزیه مواد آلی نقش مهمی دارند. در پژوهشی کیو و همکاران (۲۰۲۱)، کاهش تعداد گونه‌های میکروبی و تغییر ترکیب گونه‌ای به سمت گروه‌های مقاوم‌تر را گزارش کردند. افزون بر این، کاهش فعالیت آنزیم‌های خاک مانند دفسفاتاز و اوره‌آز در اثر فرسایش شدید را نیز گزارش کردند و دریافتند که این موضوع بر چرخه نیتروژن و فسفر اثرات منفی دارد (ژانگ و همکاران ۲۰۲۳). نتایج پژوهش لیو و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد کاهش کربن آلی فعال خاک موجب کاهش فعالیت‌های میکروبی و عملکرد چرخه‌های زیستی شد. در پژوهشی در آبخیز منزالاب شهرستان زاهدان، صابری و همکاران (۲۰۲۵) دریافتند که شدت فرسایش آبی موجب کاهش معنادار کربن آلی، نیتروژن کل، پتاسیم، فسفر و تخلخل خاک شد. از سوی دیگر، سنجه‌هایی مانند اسیدیته، هدایت الکتریکی، آهک و جرم‌مخصوص‌ظاهری خاک افزایش یافتند. این تغییرات فیزیکی و شیمیایی به کاهش شاخص‌های زیستی خاک و کاهش کیفیت زیستی و فعالیت میکروبی خاک منجر شد. نتایج پژوهش مشابه صابری و همکاران (۲۰۲۵) در آبخیز دهبکری استان کرمان نشان داد افزایش شدت فرسایش باعث کاهش محتویات رطوبت، نیتروژن آلی، کربن آلی، فسفر کل، پتاسیم قابل‌دسترس و فعالیت زیستی خاک شد. تغییرات مهم در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، اثرات مستقیمی بر تنوع و عملکرد میکروبیوتای خاک داشته و سبب کاهش عملکرد چندگانة خاک می‌شود. نتایج دیگر پژوهش‌ها نیز بر اثرات گسترده فرسایش آبی بر ویژگی‌های خاک تأکید دارند. در این راستا، لی و همکاران (۲۰۱۵) در جنوب چین نشان دادند که نواحی رسوب‌گذاری به‌دلیل تجمع ذرات ریز و کربن آلی، زیست‌توده میکروبی و فعالیت آنزیمی بیشتری در مقایسه با مناطق فرسایش‌یافته، داشتند. همچنین، دانگیت و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که

فرسایش آبی، خاک سطحی غنی از کربن را جابه‌جا کرده و ذرات ریزتر و کربن آلی را از مناطق فرسایش‌یافته به نواحی رسوبی منتقل می‌کند. این انتقال نه‌فقط موجب کاهش کیفیت خاک در مناطق فرسایش‌یافته می‌شود بلکه باعث تغییراتی در بوم‌سازگان‌های رسوبی نیز می‌شود. صادقی و همکاران (۲۰۲۳) با تحلیل جامعه‌های میکروبی خاک تحت مدیریت‌های مختلف نشان دادند که ترکیب و ساختار میکروبی خاک به‌شدت با ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی آن، به‌ویژه اسید چرب فسفولیپید کل که شاخص مهمی از میکروارگانیسم‌های خاک است، مرتبط بود. سوو و همکاران (۲۰۲۱) تأکید کردند که تنوع و ساختار میکروارگانیسم‌ها در خاک‌های جنگلی تحت تأثیر عامل‌هایی همچون کربن آلی، اسیدیته و فسفر خاک بود. نتایج بررسی ژانگ و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد که افزایش شدت فرسایش خاک باعث کاهش کربن میکروبی در ژرفای ۵ تا ۲۰ سانتی‌متری خاک شد. از سوی دیگر، تغییرات قابل‌توجهی در لایه سطحی ۰ تا پنج سانتی‌متری خاک مشاهده نشد. از این‌رو، تنفس میکروبی با افزایش سرعت فرسایش، افزایش یافت که این موضوع بیانگر فعالیت میکروبی متفاوت در شرایط فرسایشی بود. نتایج پژوهش یانگ و همکاران (۲۰۲۴) نشان داد که فرسایش خاک باعث کاهش پایداری خاکدانه‌ها، فعالیت آنزیمی و تنوع میکروبی شد و این اثرات منفی، چند عملکردی بودن خاک را کاهش داد و به‌شدت بر توان بوم‌سازگان خاک تأثیرگذار بود. نتایج پژوهش‌های پرشماری بیانگر آن است که فرسایش آبی موجب کاهش کربن آلی، نیتروژن، فعالیت آنزیمی و تنوع میکروبی خاک می‌شود و سرانجام منجر به کاهش کیفیت و عملکرد خاک می‌شود. همچنین، فرسایش باعث انتقال ذرات ریز و مواد مغذی از مناطق فرسایش‌یافته به مناطق رسوب‌گذاری می‌شود در نتیجه در این نواحی تغییرات متفاوتی در خواص خاک و فعالیت‌های میکروبی رخ می‌دهد (محسنی ۲۰۱۹؛ پلونیکووا ۲۰۲۴). کیو و همکاران (۲۰۲۱) در استان هیلونگیانگ چین، گزارش کردند فرسایش آبی موجب کاهش تنوع میکروبی و تغییر در ترکیب جامعه

میکروبی شد. این تغییرات بیانگر اثرات منفی فرسایش بر عملکرد زیستی خاک بود. نتایج پژوهش سلطانی‌طولارود و اصغری (۲۰۲۱) در شهرستان آستارا نشان داد که اندازه سنجه‌های زیستی خاک در زمین‌های جنگلی به‌طور معناداری بیشتر از زمین مرتعی بود و اثرات شیب و جهت زمین نیز بر شاخص‌های میکروبی خاک قابل‌توجه بود. نتایج بررسی صادقی و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد که ترکیب، تنوع و فراوانی جامعه‌های میکروبی خاک به‌شدت تحت تأثیر تغییرات ناشی از فرسایش در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بود و میکروارگانیسم‌ها در فرایندهای بیوشیمیایی خاک نقش اساسی دارند که شامل تجزیه و تثبیت مواد غذایی، تنظیم چرخه کربن و نیتروژن و حفظ پایداری بوم‌سازگان است (فرانتس لوبرز ۲۰۲۰؛ کیو و همکاران ۲۰۲۱). از این‌رو، تغییرات در ویژگی‌های خاک، به‌ویژه کربن آلی، اسیدیته و فسفر می‌تواند به‌طور مستقیم بر ساختار و عملکرد میکروبی خاک اثرگذار باشد. نتایج پژوهش‌های پرشماری نشان داد که فرسایش آبی با جابه‌جایی ذرات ریز و مواد آلی، منجر به کاهش کیفیت فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک می‌شود. این فرآیند موجب کاهش کربن آلی، نیتروژن، تنوع میکروبی و فعالیت آنزیمی شده و عملکردهای بوم‌سازگان خاک را به‌طور چشمگیری مختل می‌سازد. همچنین، در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌ویژه ترکیب و ساختار جامعه میکروبی خاک به‌شدت تحت تأثیر تغییرات ناشی از فرسایش است. آبخیز سراسرو در شهرستان خاش یکی از مناطق آسیب‌پذیر به فرسایش آبی است. با توجه به گزارش‌ها و بازدیدهای میدانی و مشاهده نشانه‌ها و شواهد، فرسایش آبی به شکل‌های سطحی، شیری، آبراهه‌ایی و کناری در منطقه مشاهده شد که به‌دلیل شرایط اقلیمی و دخالت‌های انسانی، نیاز به بررسی دقیق است. با وجود اهمیت این موضوع، تاکنون پژوهش جامعی که به‌طور هم‌زمان ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و میکروبی خاک را در این منطقه بررسی کند، انجام نشده است. این کمبود، بر ضرورت انجام پژوهشی کاربردی در این زمینه می‌افزاید. از این‌رو، این پژوهش با هدف ارزیابی

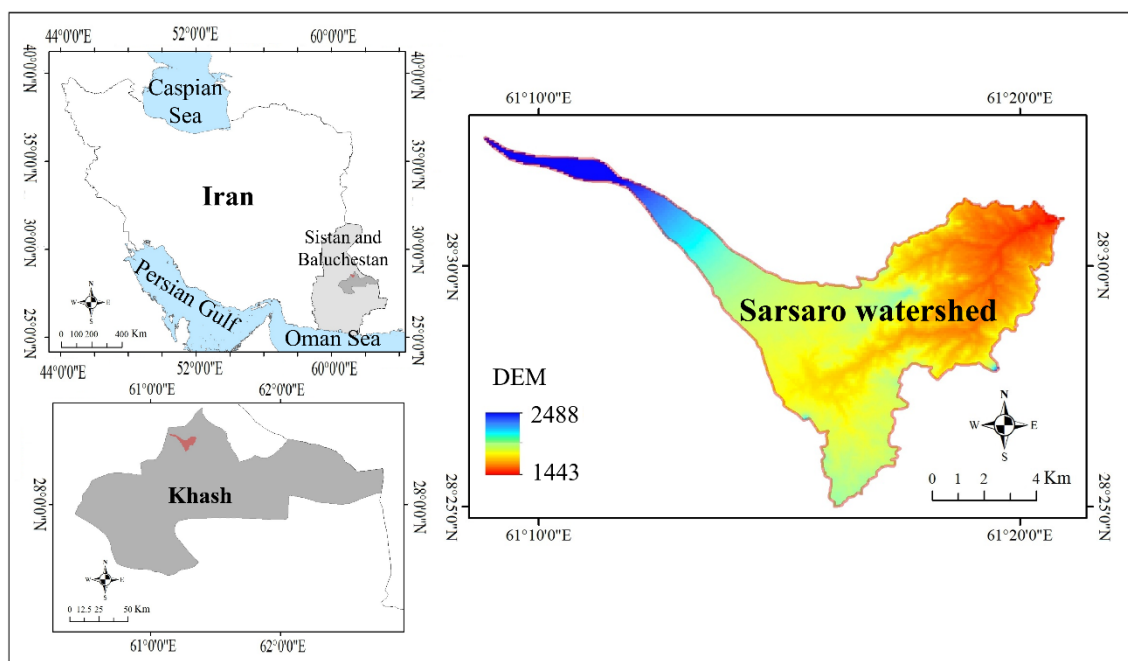
آبخیز سرسارو به‌ترتیب ۲۴۸۷/۶ و ۱۴۳۹ متر است. آب و هوای این آبخیز بر اساس روش آمبرژه بیابانی گرم و ضعیف و بر اساس روش دومارتن خشک و معتدل است. میانگین سالانه بارندگی منطقه پژوهش‌شده ۱۴۹/۶ میلی‌متر و میانگین سالانه دما ۱۸/۶ درجه سانتی‌گراد است. فلور گیاهی آبخیز در فلور بلوچ است. با توجه به بارندگی کم، پراکنش نامنظم بارش، فقدان خاک مناسب، مدیریت چرای نامناسب، درصد پوشش گیاهی آبخیز کمتر از حد بالقوه آن بود.

اثرات فرسایش آبی بر تغییرات خاک و ساختار میکروبی در آبخیز سرسارو انجام شد تا با شناخت بهتر اثرات فرسایش، راهکارهایی برای مدیریت پایدار منابع طبیعی ارائه شود.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه پژوهش شده

آبخیز سرسارو، در استان سیستان و بلوچستان و ۳۰ کیلومتری شمال شهرستان خاش است. مساحت کل این آبخیز ۶۶/۷۸۹ کیلومترمربع، معادل ۶۶۷۸/۹ هکتار است که بیشترین و کمترین بلندی در خروجی



شکل ۱- موقعیت آبخیز سرسارو در استان و کشور.

Figure 1- Location of the Sarsaro Watershed in the Province and Country.

روش پژوهش

(یک نمونه در مرکز و چهار نمونه به‌شکل علامت + در پیرامون آن) برداشت شد. نمونه‌برداری خاک از ژرفای صفر تا ۳۰ سانتی‌متر انجام شد. برای هر جایگاه فرسایشی، نمونه‌های برداشت‌شده از مناطق همگن باهم ترکیب‌شده 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 گرفته‌شده بود، بدون الک

در این پژوهش نمونه‌برداری خاک در سال ۱۴۰۰ به‌شکل 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 منطقه فرسایشی، چهار منطقه همگن با شرایط گیتاشناسی تقریباً مشابه انتخاب شد و در هر کدام از آن‌ها، پنج نمونه خاک

میکروبی با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (کیو و همکاران ۲۰۲۰).

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

Ec: تفاوت کربن آلی تدخین‌شده به کربن آلی نمونه‌های تدخین‌نشده، K_{Ec} : ضریب تبدیل Ec به MBC است که ۰/۴۵ در نظر گرفته شد.

این رابطه برای محاسبه نیتروژن زی‌توده میکروبی نیز کاربرد دارد. با این تفاوت که نیتروژن آلی تدخین‌شده و نیتروژن آلی نمونه‌های تدخین‌نشده در این رابطه مد نظر بود و ضریب تبدیل ۰/۵۴ در نظر گرفته شد (کیو و همکاران ۲۰۲۰). جمعیت میکروارگانیسم‌ها با روش بیشترین تعداد احتمالی محاسبه شد. تنفس میکروبی با جمع‌آوری دی‌اکسیدکربن رهاشده در هیدروکسید سدیم و روش تیتراسیون اندازه‌گیری شد (اندرسون ۱۹۸۲). همچنین، با تقسیم کربن آلی زی‌توده میکروبی به کربن آلی خاک سهم میکروبی خاک تعیین شد (مارتنز ۱۹۹۵).

تجزیه و تحلیل‌های آماری

تجزیه پراکنش یک‌طرفه (ANOVA) داده‌های مربوط به ویژگی‌های خاک با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شد. مقایسه میانگین‌ها، با استفاده از آزمون دانکن با سطح اطمینان ۹۵٪ انجام شد. همچنین، تحلیل همبستگی میان سنج‌های بررسی‌شده در محیط نرم‌افزار R انجام شد.

نتایج و بحث

اثرات فرسایش بر ویژگی‌های فیزیکی خاک

نتایج تحلیل پراکنش نشان داد که اثرات فرسایش با شدت‌های متفاوت بر ویژگی‌های فیزیکی خاک معنادار بود ($p < 0/01$). بیشترین تغییرات مربوط به درصد شن، سیلت، رطوبت و تخلخل بود. با افزایش شدت فرسایش، درصد ذرات درشت‌تر (شن) افزایش و ذرات ریزتر (سیلت و رس)، رطوبت و تخلخل کاهش یافت. این پدیده سبب افزایش جرم‌مخصوص‌ظاهری و کاهش کیفیت فیزیکی خاک می‌شود (جدول ۱).

کردن و با حفظ شرایط رطوبتی اولیه، در ظروف دربسته و در مجاورت یخ خشک به آزمایشگاه منتقل شد و تا زمان انجام آزمایش‌ها در یخچال نگهداری شد. بخش دیگر نمونه‌ها، برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، پس از خشک شدن در هوای آزاد و عبور از الک دو میلی‌متری، استفاده شد (کمالی و همکاران ۲۰۲۲؛ باستانی و همکاران ۲۰۲۳).

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

در این پژوهش، ویژگی‌های فیزیکی بافت خاک با استفاده از روش هیدرومتری تعیین شد که شامل اندازه‌گیری درصد شن، رس و سیلت بود و نتایج به کاربرد مثلث بافت خاک (شومان و همکاران ۲۰۰۲) طبقه‌بندی شد. جرم‌مخصوص‌ظاهری خاک با استفاده از روش کلوخه و تخلخل با محاسبه چگالی حجمی ارزیابی شد (چن و همکاران ۲۰۲۲). سنج‌های شیمیایی خاک شامل کربن آلی و نیتروژن کل به‌ترتیب با روش اکسیداسیون دی کرومات والکی و روش کج‌لدال اندازه‌گیری شدند. فسفر قابل‌دسترس با روش اولسن و پتاسیم قابل‌دسترس با استخراج استات آمونیوم خنثی و اندازه‌گیری با روش فلیم فتومتری تعیین شد. افزون بر این، اسیدیته خاک با استفاده از pH متر و هدایت الکتریکی نیز با استفاده از هدایت‌سنج الکتریکی اندازه‌گیری شد و رطوبت خاک با روش وزنی تعیین شد (کمالی و همکاران ۲۰۲۲؛ کیو و همکاران ۲۰۲۰؛ باستانی و همکاران ۲۰۲۳).

ویژگی‌های زیستی خاک

در این پژوهش، ویژگی‌های زیستی بررسی‌شده شامل فعالیت آنزیمی خاک (آنزیم کاتالاز)، کربن زی‌توده میکروبی، نیتروژن زی‌توده میکروبی، جمعیت میکروارگانیسم‌ها، سهم میکروبی خاک و تنفس میکروبی پایه بودند. به‌منظور ارزیابی اثرات فرسایش خاک بر فعالیت‌های آنزیمی خاک، آنزیم کاتالاز خاک با اضافه کردن هیدروژن پراکسید به‌وسیله اسپکتروفوتومتر با طول‌موج تقریباً ۲۴۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. کربن زی‌توده میکروبی با استفاده از روش استخراج پس از گازدهی با کلروفرم اندازه‌گیری شد (بروکس و همکاران ۱۹۸۵). کربن زی‌توده

جدول ۱- تجزیه پراکنش شدت فرسایش بر ویژگی‌های فیزیکی خاک.

Table 1- Analysis of variance of erosion intensity effects on soil physical properties.

Soil parameters		df	Mean Squares	F
Sand	Between Groups	3	142.8	142.8**
	Within Groups	8	1.0	
Silt	Between Groups	3	32.7	98.2**
	Within Groups	8	0.33	
Clay	Between Groups	3	44.08	52.9**
	Within Groups	8	0.83	
Moisture	Between Groups	3	22.6	98.7**
	Within Groups	8	0.23	
Bulk Density	Between Groups	3	0.1	76.9**
	Within Groups	8	0.00	
Porosity	Between Groups	3	155.6	84.9**
	Within Groups	8	1.8	

** معناداری در سطح احتمال یک درصد.

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

با یافته‌های این پژوهش هم‌راستا نیست. در این پژوهش، تخلخل خاک کاهش و جرم‌مخصوص ظاهری افزایش یافت که نشان‌دهنده فشردگی بیشتر خاک و کاهش فضای خالی برای تبادل آب و هوا است. این تغییرات فیزیکی در اثر فرسایش منجر به کاهش کیفیت فیزیکی خاک شده و ساختار خاک را به شدت مختل می‌کند. این تغییرات ناشی از ویرانی ساختار خاکدانه‌ای، کاهش مواد آلی و کاهش ظرفیت خاک در حفظ فضاهای خالی است (پلاتیکووا و همکاران، ۲۰۲۴). در نتیجه، با افزایش فشردگی خاک، نفوذپذیری آب و هوادهی کاهش یافته و رشد ریشه گیاهان و فعالیت‌های میکروبی با محدودیت مواجه می‌شود (اصغری و ارخلو ۲۰۲۰). یافته‌های این پژوهش با نتایج صابری و همکاران (۲۰۲۵) و سان و همکاران (۲۰۲۱) هماهنگی دارد.

برپایه نتایج جدول ۱، با افزایش شدت فرسایش، ویژگی‌های فیزیکی خاک به‌طور معناداری تغییر یافت. درصد شن به‌طور پیوسته افزایش یافت، درحالی‌که درصد سیلت و رس کاهش یافت. کاهش رطوبت خاک نیز در شرایط فرسایش شدید، محسوس بود و از ۱۲/۵٪ در زمین بدون فرسایش به ۶/۰۹٪ کاهش یافت. نتایج مقایسه میانگین اثر فرسایش بر ویژگی‌های فیزیکی خاک در جدول ۲ ارائه شده است. تغییرات قابل‌توجه درصد شن، سیلت، رطوبت و تخلخل بیانگر حذف ذرات ریزتر و باقی‌ماندن ذرات درشت‌تر در اثر فرسایش است. این موضوع منجر به کاهش پایداری خاک می‌شود. در این راستا، ترنان و همکاران (۱۹۹۶) و راسیا و کی (۱۹۹۴) دریافتند که افزایش رس به‌عنوان ملات میان ذرات خاک، موجب افزایش پایداری خاکدانه‌ها شد. نتایج این پژوهشگران

جدول ۲- مقایسه میانگین اثر فرسایش بر ویژگی‌های فیزیکی خاک.

Table 2- Mean comparison of erosion effects on soil physical properties.

Soil parameters	Erosion intensity			
	No erosion	low	Moderate	intensity
Sand (%)	52 ^b	58.3 ^c	62.6 ^b	68.3 ^a
Silt (%)	30.6 ^a	27.6 ^b	26.6 ^b	22.6 ^c
Clay (%)	17.3 ^a	14.0 ^b	10.0 ^c	9.0 ^c
Moisture (%)	12.5 ^a	9.7 ^b	7.8 ^c	6.09 ^d
Bulk Density (g/cm ³)	1.26 ^c	1.36 ^d	1.53 ^b	1.67 ^a
Porosity (%)	42 ^a	34 ^b	30 ^c	25 ^d

همبستگی ویژگی‌های فیزیکی خاک

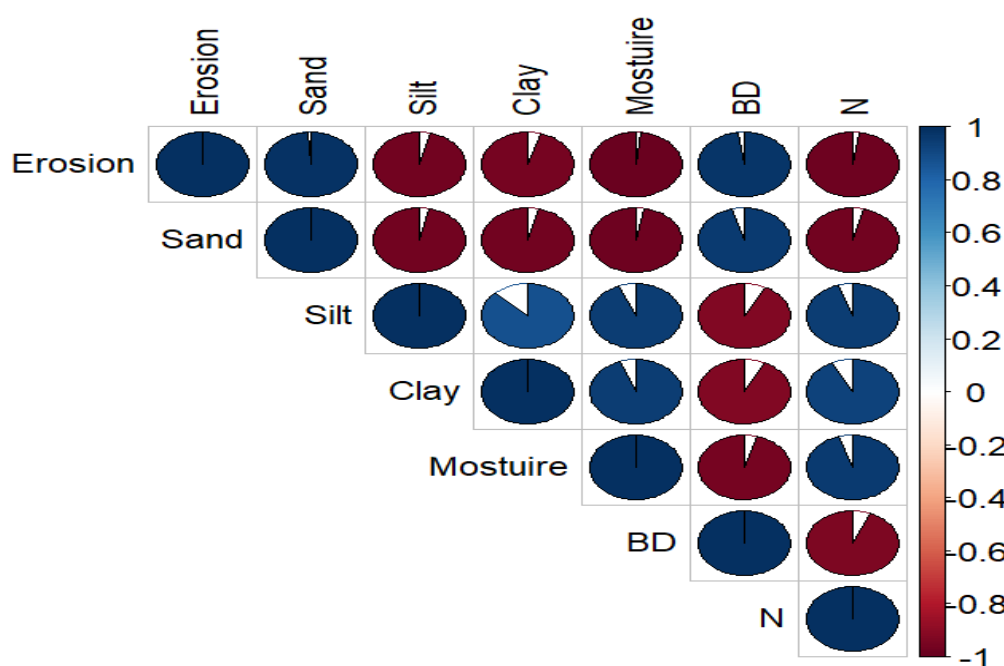
نتایج همبستگی پیرسون میان ویژگی‌های فیزیکی خاک نشان داد که رابطه شدت فرسایش با بافت خاک، رطوبت، جرم مخصوص ظاهری (BD) و نیتروژن کل (N) معنادار و قوی بود. همبستگی میان فرسایش و درصد شن مثبت و بسیار زیاد (۰/۹۸) بود. از سوی دیگر، همبستگی شدت فرسایش با سیلت (۰/۹۶-) و رس (۰/۹۵-) منفی بود. افزون بر این، همبستگی میان فرسایش با رطوبت خاک (۰/۹۸-) و تخلخل (۰/۹۷-) منفی بود و سبب کاهش قابل توجه هر دو شد.

همبستگی میان فرسایش و جرم مخصوص ظاهری مثبت (۰/۹۷) بود و فرسایش سبب افزایش آن شد (جدول ۳ و شکل ۲). فرسایش آبی یکی از مهم‌ترین فرآیندهای ویرانی خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌شمار می‌آید و بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک اثرگذار است. این فرآیند با حذف لایه‌های سطحی خاک که سرشار از مواد آلی و مغذی هستند، ظرفیت بوم‌سازگان خاک را کاهش می‌دهد.

جدول ۳- نتایج تجزیه ضریب همبستگی میان ویژگی‌های فیزیکی خاک

Table 3 – Results of correlation coefficient analysis among soil physical properties

	Erosion	Sand	Silt	Clay	Mostuire	BD	N
Erosion	1						
Sand	0.98	1					
Silt	-0.96	-0.96	1				
Clay	-0.95	-0.96	0.87	1			
Mostuire	-0.98	-0.97	0.94	0.94	1		
BD	0.97	0.95	-0.92	-0.92	-0.95	1	
N	-0.97	-0.96	0.94	0.92	0.95	-0.93	1



شکل ۲- همبستگی پیرسون میان متغیرهای فیزیکی خاک.

Figure 2-Pearson correlation coefficients among soil physical properties.

اثرات فرسایش بر ویژگی‌های شیمیایی خاک

بر پایه نتایج جدول ۴، اثرات شدت فرسایش بر بیشتر ویژگی‌های شیمیایی خاک معنادار بود. نتایج مقایسه میانگین مربعات و آزمون F بیانگر وجود تفاوت بسیار (در سطح ۱٪) میان شاخص‌هایی مانند کربن آلی، نیتروژن کل، پتاسیم قابل جذب، فسفر قابل جذب و هدایت الکتریکی (EC) بود. از سوی دیگر، شدت فرسایش بر اندازه pH بی‌تأثیر بود و از دیدگاه آماری میان گروه‌ها تفاوت معنادار مشاهده نشد (جدول ۴).

جدول ۴- تجزیه پراکنش شدت فرسایش بر ویژگی‌های شیمیایی خاک.

Table 4 – Analysis of variance of erosion intensity on soil chemical properties

Soil parameters		df	Mean Squares	F
Organic Carbon	Between Groups	3	10.87	237.2**
	Within Groups	8	0.04	
Total Nitrogen	Between Groups	3	0.15	180.3**
	Within Groups	8	0.00	
Available Potassium	Between Groups	3	12943.8	374.2**
	Within Groups	8	34.5	
Available Phosphorus	Between Groups	3	13.5	66.8**
	Within Groups	8	0.20	
pH	Between Groups	3	0.02	2.84 ^{ns}
	Within Groups	8	0.00	
EC	Between Groups	3	2.6	121.02**
	Within Groups	8	0.02	

** و * : به ترتیب معناداری در سطح احتمال یک و پنج درصد.

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

بر پایه نتایج جدول ۵، افزایش شدت فرسایش سبب کاهش ویژگی‌های شیمیایی خاک (کربن آلی، نیتروژن کل، پتاسیم و فسفر قابل جذب) شد. از سوی دیگر، هدایت الکتریکی (EC) با افزایش شدت فرسایش به‌طور معناداری افزایش یافت. تغییرات pH در میان تیمارها نسبتاً ناچیز بود و فقط در شدت زیاد فرسایش کمی کاهش یافت (جدول ۵).

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر فرسایش بر ویژگی‌های شیمیایی خاک.

Table 5 – Mean comparison of erosion effects on soil chemical properties.

Soil parameters	Erosion intensity			
	No erosion	low	Moderate	intensity
Organic Carbon (g/kg)	5.51 ^a	4.12 ^b	2.59 ^c	1.10 ^d
Total Nitrogen (g/kg)	0.68 ^a	0.53 ^b	0.33 ^c	0.17 ^d
Available Potassium (mg/kg)	230.3 ^a	185.6 ^b	132.3 ^c	78.6 ^d
Available Phosphorus (mg/kg)	7.02 ^a	5.49 ^b	3.49 ^c	2.2 ^d
pH	8.0 ^a	7.99 ^a	7.93 ^{ab}	7.8 ^b
EC (dS/m)	0.56 ^c	0.85 ^c	1.34 ^b	2.68 ^a

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

Different letters within each column indicate a significant difference ($p < 0.01$).

همبستگی ویژگی‌های شیمیایی

در این پژوهش نتایج نشان داد که همبستگی شدت فرسایش با بیشتر ویژگی‌های شیمیایی خاک بسیار منفی و معنادار بود و موجب کاهش شدید حاصلخیزی و ظرفیت تولیدی خاک شد. به‌طوری‌که با افزایش فرسایش، اندازه کربن آلی (-0.99)، نیتروژن کل (-0.99)، پتاسیم قابل جذب (-0.99) و فسفر قابل جذب (-0.97) به‌شدت کاهش یافت. این روند بیانگر کاهش حاصلخیزی و تخلیه عناصر غذایی مهم در اثر فرسایش است. همبستگی هدایت الکتریکی (EC) با فرسایش مثبت (0.92) بود که احتمالاً ناشی از تجمع نمک‌ها در لایه‌های سطحی خاک بر اثر کاهش پوشش گیاهی و آبشویی مواد آلی است. رابطه میان فرسایش

به‌عنوان یکی از شاخص‌های مهم کیفیت شیمیایی و زیستی خاک، در بهبود خواص شیمیایی، تثبیت ساختار خاک و فعالیت‌های زیستی است (مرادی و همکاران ۲۰۲۴). کاهش کربن آلی خاک از اثرات زیان‌بار فرسایش است، چرا که ذرات ریز و غنی از کربن آلی به‌طور انتخابی به‌وسیله فرسایش جابه‌جا شده و در مناطق رسوبی ته‌نشین می‌شوند (مرادی و همکاران ۲۰۲۴). حذف خاک سطحی غنی باعث می‌شود خاک زیرین که کربن آلی کمتری دارد، در سطح باقی بماند که به کاهش ظرفیت نگهداری آب و مواد مغذی منجر می‌شود (سان و همکاران ۲۰۲۱). کاهش ماده آلی خاک، فعالیت میکروبی و چرخه‌های تغذیه‌ای خاک را مختل می‌کند که پیامد آن کاهش حاصلخیزی خاک است (بانجری و همکاران ۲۰۲۰). می‌توان گفت کاهش معنادار کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل دسترس ناشی از فرسایش شدید نه فقط کیفیت شیمیایی خاک را کاهش می‌دهد بلکه بر توان بوم‌سازگان خاک در حفظ پایداری عملکرد زیستی و بوم‌سازگانی نیز اثرگذار است.

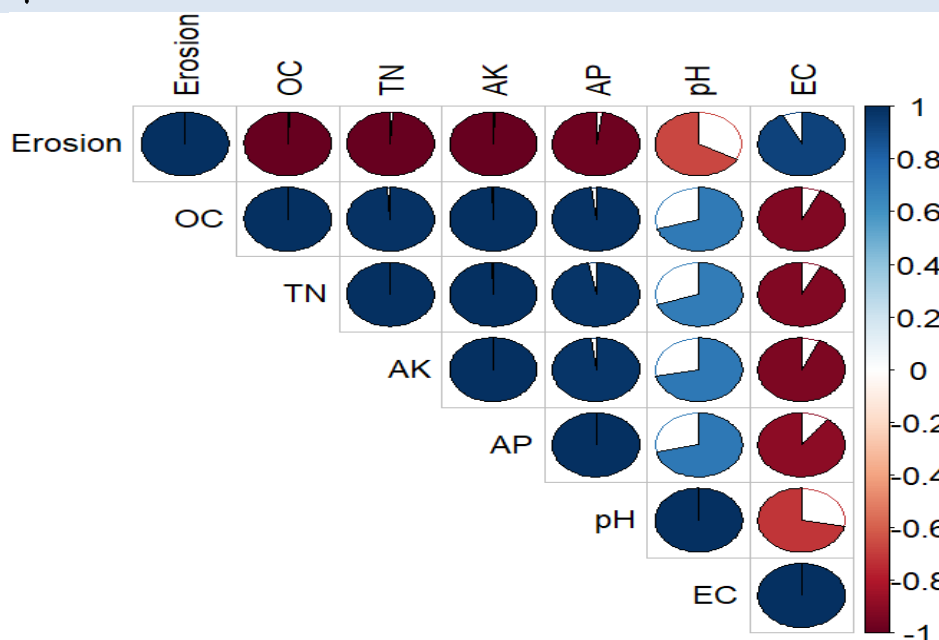
pH (۰/۶۶-) ضعیف‌تر بود. دلیل این یافته آن است که شدت فرسایش بر pH خاک در مقایسه با دیگر ویژگی‌ها کمتر بود. این الگوها گویای اثرات منفی فرسایش بر کیفیت شیمیایی خاک و کاهش ظرفیت تولیدی آن است (جدول ۶ و شکل ۳). تحلیل داده‌ها نشان داد که اثرات شدت فرسایش بر اغلب ویژگی‌های شیمیایی خاک چشمگیر بود و موجب کاهش قابل توجه اندازه کربن آلی، نیتروژن کل، پتاسیم و فسفر قابل جذب شد (جدول‌های ۴ و ۵). کاهش این عناصر عمدتاً به دلیل حذف لایه‌های سطحی غنی از مواد آلی و مغذی در اثر فرسایش بود. اگرچه تغییرات اسیدیته خاک معنادار نبود، اما هدایت الکتریکی به شدت تحت تأثیر فرسایش، افزایش یافت. دلیل این پدیده احتمالاً تجمع نمک‌ها در لایه‌های سطحی خاک است. نتایج پژوهش‌های لال و همکاران (۲۰۰۴)، ماندال و همکاران (۲۰۲۱، ۲۰۲۳) و دانگیت و همکاران (۲۰۱۳) نیز بیانگر نقش مهم کاهش عناصر غذایی و مواد آلی در تضعیف حاصلخیزی و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک‌های فرسایش‌یافته است. افزون بر این، نتایج دیگر پژوهش‌ها بیانگر نقش مهم ماده آلی

جدول ۶- نتایج تجزیه ضریب‌های همبستگی ویژگی‌های شیمیایی خاک.

Table 6 – Results of correlation coefficient analysis of soil chemical Properties.

	Erosion	OC	TN	AK	AP	pH	EC
Erosion	1						
OC	-0.99	1					
TN	-0.99	0.98	1				
AK	-0.99	0.99	0.98	1			
AP	-0.97	0.98	0.96	0.97	1		
pH	-0.66	0.70	0.38	0.71	0.71	1	
EC	0.92	-0.92	-0.95	-0.93	-0.89	-0.71	1

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



شکل ۳- همبستگی پیرسون میان متغیرهای شیمیایی خاک.

Figure 3- Pearson correlation coefficients among soil chemical properties.

اثرات فرسایش بر ویژگی های زیستی خاک

میکروبی، تنفس پایه میکروبی، جمعیت میکروارگانیسم ها و ضریب میکروبی همگی به طور محسوسی با سطوح مختلف شدت فرسایش متفاوت بودند (جدول ۷).

نتایج تحلیل پراکنش نشان داد که اثرات شدت فرسایش بر تمام شاخص های زیستی خاک بسیار معنادار ($p < 0.01$) بود (جدول ۷). شاخص هایی مانند فعالیت آنزیم کاتالاز، کربن و نیتروژن زی توده

جدول ۷- تجزیه پراکنش شدت فرسایش بر ویژگی های زیستی خاک.

Table 7 – Analysis of variance of erosion intensity on soil biological properties.

Soil parameters		df	Mean Squares	F
Catalase Enzyme	Between Groups	3	350.7	1065.8**
	Within Groups	8	0.32	
Microbial Biomass Carbon	Between Groups	3	9760.8	208.7**
	Within Groups	8	46.7	
Microbial Biomass Nitrogen	Between Groups	3	307.1	367.5**
	Within Groups	8	0.83	
Basal Microbial Respiration	Between Groups	3	0.27	67.2**
	Within Groups	8	0.00	
Microorganism Population	Between Groups	3	8.2	531.9**
	Within Groups	8	0.01	
Microbial Quotient	Between Groups	3	3.9	228.5**
	Within Groups	8	0.01	

**وجود تفاوت معنادار میان تیمارها در سطح ۱٪.

Significant difference between treatments at the 1% level.

خاک های بدون فرسایش به ۳/۵۷ در شرایط فرسایش شدید کاهش یافت. این یافته نشان دهنده کاهش شدید فعالیت آنزیمی و اختلال در عملکرد زیستی

مقایسه میانگین ها نشان داد با افزایش شدت فرسایش، تمام شاخص های زیستی خاک به طور معناداری کاهش یافتند. فعالیت آنزیم کاتالاز از ۲۸/۰۵ در

(MQ) که به‌عنوان نسبت کربن زی‌توده میکروبی به کربن آلی کل خاک تعریف می‌شود، با افزایش شدت فرسایش کاهش یافت. این کاهش نشان‌دهنده کاهش سهم زی‌توده میکروبی در کربن آلی کل خاک بود (جدول ۸).

خاک است. به‌طور مشابه، اندازه کربن و نیتروژن زی‌توده میکروبی به‌ترتیب از ۲۲۳/۶ و ۳۱/۶ در خاک‌های بدون فرسایش به ۹۳/۳ و ۷/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم در خاک‌های با فرسایش شدید، کاهش یافت. همچنین، کاهش نرخ تنفس میکروبی و جمعیت میکروارگانیسم‌ها قابل‌توجه بود. نسبت سهم میکروبی

جدول ۸- مقایسه میانگین اثر فرسایش بر ویژگی‌های زیستی خاک.

Table 8 – Mean comparison of erosion effects on soil biological properties.

Soil parameters	Erosion intensity			
	No erosion	low	Moderate	intensity
Catalase Enzyme ($\mu\text{mol KMnO}_4 \text{ g}^{-1} \text{ dry soil}$)	28.05 ^a	18.6 ^b	8.9 ^c	3.57 ^d
Microbial Biomass Carbon (mg/kg)	223.6 ^a	201.0 ^b	160.3 ^c	93.3 ^d
Microbial Biomass Nitrogen (mg/kg)	31.6 ^a	22.6 ^b	15.7 ^c	7.8 ^d
Basal Microbial Respiration ($\text{mg CO}_2/\text{g soil} \cdot \text{day}$)	1.04 ^a	0.78 ^b	0.49 ^c	0.37 ^d
Microorganism Population ($\text{CFU} \times 10^7 \text{ g}^{-1} \text{ dry soil}$)	4.52 ^a	3.55 ^b	1.54 ^c	1.01 ^d
Microbial Quotient ($\text{mg Cmic} / \text{g Corg}$)	3.97 ^a	3.03 ^b	2.15 ^c	1.28 ^d

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

Different letters within each column indicate a significant difference ($p < 0.01$).

همبستگی ویژگی‌های زیستی خاک

(۲۰۲۲) و گایان و همکاران (۲۰۲۳) نقش میکروارگانیسم‌های خاک در چرخه مواد مغذی، تولید محصول، مقاومت زیستی و پایداری عملکرد خاک را گزارش کرده‌اند. ارتباط زیاد میان شاخص‌های زیستی نشان داد که این سنج‌ها هم‌راستا و تحت تأثیر شرایط محیطی و کیفیت خاک تغییر می‌کنند. کاهش هم‌زمان این شاخص‌ها بیانگر تضعیف عملکرد زیستی خاک و اختلال در چرخه‌های بوم‌سازگان آن است. در پژوهش‌های پرشماری گزارش شده است که تغییرات در اسیدیته، ماده آلی، عناصر غذایی و ساختار خاک، به‌طور مستقیم ساختار و فعالیت جامعه‌های میکروبی را تغییر داده و عملکرد آنزیمی خاک را دچار اختلال می‌کند (سو و همکاران ۲۰۲۱، راجوال و همکاران ۲۰۲۱ و بانرجی و همکاران ۲۰۲۰). نتایج پژوهش سلطانی‌طولارود و اصغری (۲۰۲۱)، بیانگر تفاوت معنادار میان شاخص‌های زیستی در کاربری‌ها و شیب‌های گوناگون بود که بیانگر اثر عامل‌های محیطی بر جامعه‌های میکروبی است. این یافته‌ها بیانگر آن است که فرسایش، افزون بر اثرات مستقیم، به‌واسطه تغییر در غلظت و ذخیره کربن آلی خاک، جرم‌مخصوص‌ظاهری و کاهش ژرفای خاک سطحی

نتایج به‌دست آمده از ماتریس همبستگی نشان داد که همبستگی فرسایش خاک با شاخص‌های زیستی شامل فعالیت آنزیم کاتالاز (۰/۹۹-)، کربن زی‌توده میکروبی (۰/۹۶-)، نیتروژن زی‌توده میکروبی (۰/۹۹-)، جمعیت میکروارگانیسم‌ها (۰/۹۶-)، تنفس میکروبی پایه (۰/۹۷)، سهم میکروبی (۰/۹۹-)، منفی و معنادار بود (جدول ۹ و شکل ۴). برپایه نتایج جدول ۸، اثرات فرسایش بر شاخص‌های زیستی خاک ازجمله فعالیت آنزیم کاتالاز، کربن و نیتروژن زی‌توده میکروبی، تنفس پایه میکروبی، جمعیت میکروارگانیسم‌ها و ضریب میکروبی منفی و شدید بود. افزایش شدت فرسایش، به‌دلیل کاهش ماده آلی، ویرانی ساختار فیزیکی و شرایط نامناسب زیست‌محیطی، موجب کاهش فعالیت زیستی خاک شد. این شاخص‌ها به‌عنوان نشانگرهای حساس و زودبازده، وضعیت سلامت زیستی خاک را به‌خوبی نمایان ساختند. صابری و همکاران (۲۰۲۵)، کیو و همکاران (۲۰۲۰)، سلطانی‌طولارود و اصغری (۲۰۲۱)، دریافتند که فرسایش با کاهش ماده آلی و رطوبت، ساختار و تنوع جامعه‌های میکروبی خاک را مختل می‌کند. افزون بر این، گیو و همکاران (۲۰۲۲)، داس و همکاران

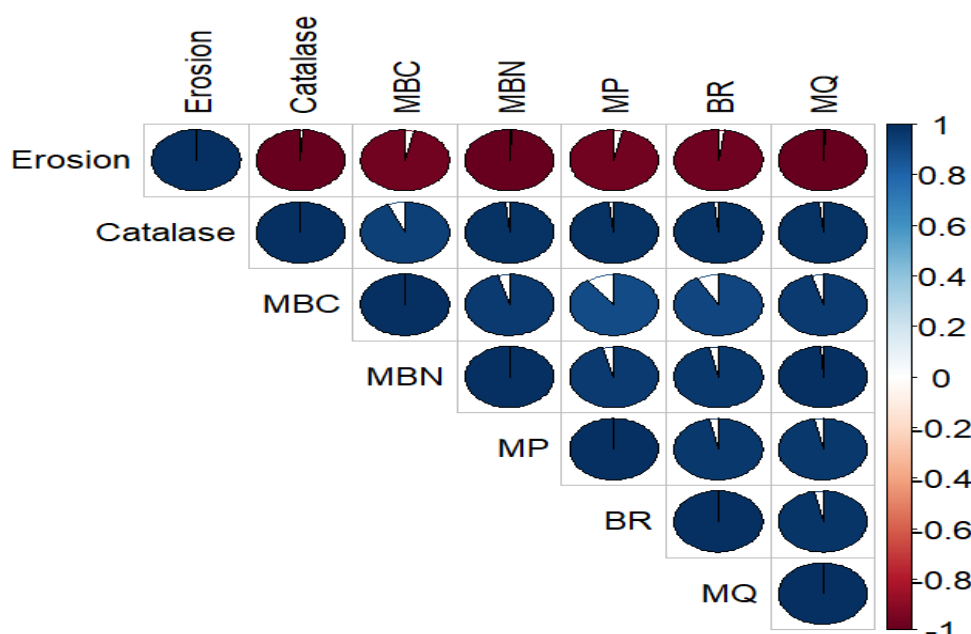
می تواند بر ساختار خاک و عملکرد میکروارگانیسم ها
نیز به طور قابل توجهی اثرگذار باشد (گونزالس و روسادو و همکاران ۲۰۲۱؛ ژانگ و همکاران ۲۰۲۳).

جدول ۹- نتایج تجزیه ضریب های همبستگی ویژگی های زیستی خاک.

Table 9 – Results of correlation coefficient analysis among soil biological properties.

	Erosion	Catalase	MBC	MBN	MP	MR	MQ
Erosion	1						
Catalase	-0.99	1					
MBC	-0.96	0.93	1				
MBN	-0.99	0.98	0.95	1			
MP	-0.96	0.98	0.89	0.95	1		
MR	-0.97	0.98	0.91	0.96	0.96	1	
MQ	-0.99	0.98	0.95	0.99	0.96	0.97	1

فرسایش (Erosion)، آنزیم کاتالاز (Catalase)، کربن زی توده میکروبی (MBC)، نیتروژن زی توده میکروبی (MBC)، جمعیت میکروارگانیسم ها (MP)، تنفس میکروبی پایه (MR)، سهم میکروبی (MQ).



شکل ۴- همبستگی پیرسون میان متغیرهای زیستی خاک.

Figure 4- Pearson correlation coefficients among soil biological properties.

نتیجه گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش به خوبی نشان داد که اثرات فرسایش آبی بر کیفیت فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در آبخیز سرسارو به شدت منفی بود. فرسایش با حذف لایه های سطحی، کاهش ماده آلی، ویرانی ساختار خاک، کاهش عناصر غذایی و تضعیف جامعه های میکروبی، سلامت و عملکرد بوم سازگان خاک را به مخاطره می اندازد و توان تولیدی آن را کاهش می دهد. از این رو، برای جلوگیری از ویرانی بیشتر خاک و کاهش عملکرد زیستی آن، مهار

فرسایش و مدیریت جامع منابع خاک از اولویت های مهم در مناطق آسیب پذیر مانند آبخیز سرسارو است. برپایه نتایج این پژوهش پیشنهاد می شود شاخص های زیستی به عنوان ابزارهای مؤثر در پایش سلامت خاک های فرسایش یافته در نظر گرفته شوند تا بستر مناسبی برای تصمیم گیری های مدیریتی فراهم آید. در این پژوهش فرصت شناسایی گونه های میکروبی وجود نداشت تا ارتباط گونه میکروبی با تغییرات خاک ناشی از فرسایش مشخص شود. از این رو، پیشنهاد می شود همگام با بررسی جامعه های میکروبی خاک

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده‌شده در این پژوهش، با مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار مخاطب قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله
نویسنده دوم: ویرایش و بررسی نتایج
نویسنده سوم: بازبینی متن مقاله
نویسنده چهارم: بازبینی متن مقاله
نویسنده پنجم: تحلیل‌های آماری

ارتباط آنها با تغییرات ویژگی‌های خاک در شرایط فرسایش بررسی شود و اندازه رسوب در شدت‌های مختلف فرسایش ارزیابی شود.

سپاس‌گزاری

نویسندگان این مقاله از دانشگاه زابل به‌دلیل حمایت‌های مالی (Grant code: IR-UOZ-GR-) (8721) برای انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌کنند.

تضاد منافع نویسندگان

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

فهرست منابع

- Anderson JP. 1982. Soil respiration. Methods of soil analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties. 9: 831-871. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c41>
- Asghari SH, Arkhazloo HS. 2020. Effects of land use and slope on soil physical, mechanical and hydraulic quality in Heyran neck, Ardabil Province. Journal of Environmental Erosion Research. 37: 79-91. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22517812.1399.10.1.6.7>
- Banerjee S, Misra A, Sar A, Pal S, Chaudhury S, Dam B. 2020. Poor nutrient availability in opencast coalmine influences microbial community composition and diversity in exposed and underground soil profiles. Applied Soil Ecology. 152:103544. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103544>
- 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. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1028149>
- Brookes PC, Landman A, Pruden G, Jenkinson DS. 1985. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. Soil Biology and Biochemistry. 17(6):837-842. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(85\)90144-0](https://doi.org/10.1016/0038-0717(85)90144-0)
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108470>
- Das PP, Singh KRB, Nagpure G, Mansoori A, Singh RP, Ghazi IA, Kumar A, Singh J. 2022. Plant-soil-microbes: A tripartite interaction for nutrient acquisition and better plant growth for sustainable agricultural practices. Environmental Research. 214:113821. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113821>
- Dungait JA, Ghee C, Rowan JS, McKenzie BM, Hawes C, Dixon ER, Paterson E, Hopkins DW. 2013. Microbial responses to the erosional redistribution of soil organic carbon in arable fields. Soil Biology and Biochemistry. 60:195-201. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.01.025>
- Franzluebbers A. J. 2020. Soil mass and volume affect soil-test biological activity estimates. Soil Science Society of America Journal. 84(2):502-511. <https://doi.org/10.1002/saj2.20038>
- Gayan A, Borah P, Nath D, Katagi R. 2023. Soil microbial diversity, soil health and agricultural sustainability. In: Sustainable agriculture and the environment. Elsevier. pp. 107-126. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90500-8.00006-3>

- González-Rosado M, Parras-Alcántara L, Aguilera-Huertas J, Lozano-García B. 2021. Soil productivity degradation in a long-term eroded olive orchard under semiarid Mediterranean conditions. *Agronomy*. 11(4):1-17. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040812>
- 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):1-21. <https://doi.org/10.3390/pr10102013>
- Kamali N, Sadeghipour A, Souri M, Mastinu M. 2022. Variations in soil biological and biochemical indicators under different grazing intensities and seasonal changes. *Land*. 11:1-18. <https://doi.org/10.3390/land11091537>
- Kennedy AC, Stubbs TL. 2006. Soil microbial communities as indicators of soil health. *Annals of Arid Zone*. 45:287-308.
- Lal R. 2001. Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development*. 12(6):519-539. <https://doi.org/10.1002/ldr.472>
- Lal TN, Hinterberger T, Widman G, Schröder M, Hill NJ, Rosenstiel W, Elger CE, Scholkopf B, Birbaumer N. 2004. Methods towards invasive human brain computer interfaces. In: Saul LK, Weiss Y, Bottou L (eds.), *Advances in Neural Information Processing Systems* 17. MIT Press.
- Li S, Shi Z, Liu WH, 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*. 16:1-13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1510676>
- Liu L, Sayer EJ, Deng M, Li P, Liu W, Wang X, et al. 2023. The grassland carbon cycle: Mechanisms, responses to global changes, and potential contribution to carbon neutrality. *Fundamental Research*. 3:209-218. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2022.09.028>
- Mandal D, Chandrakala M, Alam NM, Roy T, Mandal U. 2021. Assessment of soil quality and productivity in different phases of soil erosion with the focus on land degradation neutrality in tropical humid region of India. *Catena*. 204:105440. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105440>
- Mandal D, Patra S, Sharma NK, Alam NM, 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>
- Martens R. 1995. Current methods for measuring microbial biomass C in soil: Potentials and limitations. *Biology and Fertility of Soils*. 19(2-3):87-99. <https://doi.org/10.1007/BF00336303>
- Mohseni N. 2019. Impact of water erosion on soil biological diversity in arid ecosystems. *Researches in Earth Sciences*. 10(2):21-33. (In Persian). <https://doi.org/10.52547/esrj.10.2.21>
- Moradi HR, Rezaei V, Erfanian M. 2024. Investigation of physicochemical characteristics of soil in badland areas formation. *Researches in Earth Sciences*. 15(3):91-105. (In Persian). <https://doi.org/10.48308/esrj.2021.101282>
- Nimmo J, Lynch DH, Owen J. 2013. Quantification of nitrogen inputs from biological nitrogen fixation to whole farm nitrogen budgets of two dairy farms in Atlantic Canada. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 96:93-105. <https://doi.org/10.1007/s10705-013-9587-z>
- Plotnikova OO, Demidov VV, Farkhodov YR, Tsymbarovich PR, Semenov IN. 2024. Influence of water erosion on soil aggregates and organic matter in arable Chernozems: Case study. *Agronomy*. 14(8):1-15. <https://doi.org/10.3390/agronomy14081607>
- Qiu L, Zhang Q, Zhu H, Reich PB, Banerjee S, van der Heijden MG, Wei X. 2021. Erosion reduces soil microbial diversity, network complexity and multifunctionality. *The ISME Journal*. 15(8):2474-2489. <https://doi.org/10.1038/s41396-021-00946-4>
- Qu K, Guo F, Liu X, Lin Y, Zou Q. 2019. Application of machine learning in microbiology. *Frontiers in Microbiology*. 10:827. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00827>
- Qu Y, Tang J, Li Z, Zhou Z, Wang J, Wang S, Cao Y. 2020. Soil enzyme activity and microbial metabolic function diversity in soda saline-alkali rice paddy fields of northeast China. *Sustainability*. 12(23):1-15. <https://doi.org/10.3390/su122310095>
- Rachwał K, Gustaw K, Kazimierczak W, Waśko A. 2021. Is soil management system really important? Comparison of microbial community diversity and structure in soils managed under organic and conventional regimes with some view on soil properties. *Plos one*. 16: 1-21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256969>
- Rasiah V, Kay BD. 1994. Characterizing changes in aggregate stability subsequent to introduction of forages. *Soil Science Society of America Journal*. 58:935-942. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800030029x>
- Saberi M, Dahmardeh Ghaleno MR, Khatibi R, Karimian V. 2025. Assessment of the effects

of water erosion on changes in soil physical, chemical, and biological properties in the Monzelab Watershed, Zahedan County. Iranian Journal of Soil and Water Research. Advance online publication. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.395713.669> 946

Saberi M, Nori M, Ebrahimi M. 2025. Microbial diversity response to changes in physical and chemical properties of soil caused by water erosion in the Dehbakari Watershed, Kerman province. Journal of Natural Environmental Hazards. Advance online publication. (In Persian). <https://doi.org/10.22111/jneh.2025.51723.2110>

Sadeghi S, Petermann J, Steffan B, Brevik J, Gedeon G. 2023. Predicting microbial responses to changes in soil physical and chemical properties under different land management. Applied Soil Ecology. 188:104878. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.104878>

Schuman GE, Janzen HH, Herrick JE. 2002. Soil carbon dynamics and potential carbon sequestration by rangelands. Environmental Pollution. 116:391–396. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00215-9](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00215-9)

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. (In Persian). <http://dx.doi.org/10.52547/jeer.11.1.58>

Sui X, Zhang R, Frey B, Yang L, Liu Y, Ni H, Li MH. 2021. Soil physicochemical properties drive the variation in soil microbial communities along a forest successional series in a degraded wetland in northeastern China. Ecology and Evolution. 11:2194–2208. <https://doi.org/10.1002/ece3.7179>

Sun J, Fu B, Zhao W, Liu S, Liu G, Zhou H, et al. 2021. Optimizing grazing exclusion practices to achieve Goal 15 of the sustainable development goals in the Tibetan Plateau. Science Bulletin. 66:1493–1496. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2021.03.014>

Ternan JL, Williams AG, Elmes A, Hartley R. 1996. Aggregate stability of soils in central Spain and the role of land management. Earth Surface Processes and Landforms. 21:181–193. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199602\)21:2](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199602)21:2)

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 and Development. 35(11):3714–3726. <https://doi.org/10.1002/ldr.5163>

Zhang X, Pei G, Zhang T, Fan X, Liu Z, Bai E. 2023. Erosion effects on soil microbial carbon use efficiency in the mollisol cropland in northeast China. Soil Ecology Letters. 5(4): 230176. <https://doi.org/10.1007/s42832-023-0176-4>



Analysis of the effects of water erosion on soil properties and microbial structure in the Sarsaro Watershed, Khash County

Morteza Saberi^{*1}, Vahid Karimian², Mohammad Reza Dahmardeh Ghaleno³,
Rasool Khatibi⁴, Mehdi Sarparast⁵

1 and 3- Associate Professor, Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

2- Assistant Professor, Nature Engineering of Department, Faculty of Natural Resources, Yasouj University, Yasouj, Iran

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

5- Ph.D. in Natural Resources, Combating Desertification Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources Gorgan, Natural Resources and Watershed Management Organization, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Water erosion, as one of the most important factors of soil degradation, has a significant impact on soil quality and performance in various ecosystems. The Sarsaro watershed in Khash County is considered a vulnerable area to water erosion due to specific climatic conditions and human interventions such as over grazing and loss of vegetation cover. Despite the importance of the issue, comprehensive studies that simultaneously show the physical, chemical, and biological properties of the soil in this region have not been conducted. Therefore, this study aimed to evaluate the impact of water erosion on soil changes and microbial structure in the Sarsaro watershed in order to provide strategies for sustainable natural resource management through better understanding of erosion effects.

Materials and Methods

In this study, soil sampling was carried out in a completely randomized design. First, erosion and sediment map 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 almost similar physiographic conditions were selected, and in each of them, five soil samples were taken (one sample in the center and four samples in the form of a plus sign around it). Soil sampling was carried out from a depth of 0 to 30 cm. For each erosion site, samples taken from homogeneous areas were mixed to prepare a composite sample. Immediately after collection, the soil samples were divided into two parts.

Article Type: Research Article

***Corresponding Authors' E-mail:** mortezasaberi@uoz.ac.ir

Citation: Saberi, M., Karimian, V., Dahmardeh Ghaleno, M. R., Khatibi, R., Sarparast, M. 2026. Analysis of Changes in Soil Properties and Microbial Structure Due to Water Erosion in the Sarsaro Watershed, Khash County. Watershed Management Research. 38(4):146-164.

DOI: 10.22092/wmrj.2025.370181.1628

Received: 26 July 2025, **Received in revised form:** 18 August 2025, **Accepted:** 22 September 2025

Published online: 01 January 2026

Watershed Management Research, Vol. 38, No.4, Ser. No: 149, Winter 2026, pp.146-164.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)



Some of the samples intended for measuring biological properties were transported to the laboratory in sealed containers in the vicinity of dry ice without sieving and while maintain the initial humidity conditions, 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. One-way analysis of variance (ANOVA) of soil properties data was performed using SPSS software. Comparison of means was performed using Duncan's test with a 95% confidence level. Also, the correlation analysis between the studied investigated measures was performed in the R software.

Results and Discussion

The results of the analysis of variance showed that intensity of erosion effects on soil physical properties was significant ($p < 0.01$). The sand size increased significantly from 25% in non-eroded soils. The correlation of silt and clay with erosion intensity was negative (-0.96) and (-0.95), respectively, and the amount of both decreased. Soil moisture in non-eroded lands was 12.5%, which decreased to 6.09% in severely erosion ($p < 0.01$). Also, porosity decreased (negative correlation -0.97) and apparent specific gravity increased (positive correlation). Soil chemical parameters such as organic carbon from 2.23% to 0.93%, total nitrogen from 0.31% to 0.08%, absorbable potassium and absorbable phosphorus decreased significantly ($p < 0.01$). Electrical conductivity increased significantly (positive correlation of 0.92). Changes in pH were not significant ($p > 0.05$). Soil biological properties were severely reduced: catalase enzyme activity decreased from 28.05 units in non-eroded soils to 3.57 units in severely eroded soils ($p < 0.01$). Microbial biomass carbon decreased from 223.6 mg to 93.3 mg, microbial biomass nitrogen from 31.6 mg to 7.8 mg, and the population of microorganisms and basal microbial respiration also showed significant decreases ($p < 0.01$). The soil microbial contribution also decreased and its correlation with erosion intensity was high and negative (greater than -0.96). These data indicate the severe and negative effects of water erosion in the physical, chemical, and biological quality of the soil, and the reduction in the health and productive capacity of ecosystem.

Conclusion and Suggestions

The results of this study demonstrated that the effect of water erosion on the physical, chemical, and biological quality of soils in the Sarsaru watershed were severe and negative. Erosion, through the removal of surface layers, reduction of organic matter, degradation of soil structure, depletion of essential nutrients, and weakening microbial communities, jeopardized the health and function of soil ecosystems and reduces their productive capacity. Therefore, to prevent further soil destruction and reduction in its biological function, controlling erosion and comprehensive management of soil resources are important priorities in vulnerable areas such as the Sarsaru watershed. Based on the results of this study, it is suggested that biological indicators be considered as effective tools in monitoring the health of eroded soils to provide a suitable basis for management decisions.

Keywords: Arid and semi-arid regions, biological indicators, Catalase enzyme, physical and chemical properties, soil stability

Article Type: Research Article

Acknowledgement

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

Conflicts of interest

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

Data Availability Statement

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

Authors' Contribution

Author 1: Conceptualization, conducting qualitative/statistical analyses, drafting the initial version of the manuscript

Author 2: Editing and reviewing the results

Author 3: Reviewing the manuscript

Author 4: Reviewing the manuscript

Author 5: Statistical analyses