پژوهش های آبخیزداری
شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

تحلیل پیامدهای فرسایش بادی بر ویژگی‌های شیمیایی و میکروبی خاک بوم‌سازگان خشک در ایرانشهر استان سیستان و بلوچستان

مرتضی صابری *[۱]، **محمدرضا دهمرده‌قلعه‌نو** [۲]، **رسول خطیبی** [۳]
۱ و ۲- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران
۳- استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل. زابل، ایران

چکیدهٔ مبسوط

مقدمه و هدف

نابودی خاک ارتباط نزدیکی با افزایش فرسایش بادی دارد. فرسایش بادی یکی از چالش‌های زیست‌محیطی در سطح جهان و به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک آن است. زیرا، در این مناطق خاک‌ها چسبندگی کمی دارند و ساختار آنها ناپایدار است و پوشش‌گیاهی به‌شکل پراکنده دیده می‌شود. افزون بر اثرات گستردهٔ فرسایش بادی بر اقلیم، کیفیت هوا و سلامت انسان در مقیاس جهانی، ذرات ریز آلی موجود در سطح خاک به‌وسیلهٔ این پدیده جابه‌جاشده و از بین می‌رود. این فرایند موجب کاهش قابل‌توجه ذخایر مواد مغذی، کاهش حاصلخیزی و نابودی ساختار فیزیکی و زیستی خاک می‌شود. با توجه به شرایط اقلیمی خشک منطقه ایرانشهر در استان سیستان و بلوچستان و نقش مؤثر بادهای شدید در افزایش فرسایش بادی، بررسی پیامدهای این پدیده بر تغییرات ویژگی‌های خاک اهمیت ویژه‌ای دارد. ازاین‌رو، این پژوهش با هدف بررسی پیامدهای فرسایش بادی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و میکروبی خاک بوم‌سازگان خشک در ایرانشهر انجام شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، بر اساس بازدیدهای میدانی، مشاهده‌های صحرایی و نقشه‌های فرسایش منطقه، شدت فرسایش خاک به‌عنوان تیمار اصلی در چهار سطح بدون فرسایش، فرسایش کم، متوسط و شدید دسته‌بندی شد. برای بررسی اثر این تیمارها بر تغییرات ویژگی‌های خاک، نمونه‌برداری در آبخیز رحمت‌آباد ایرانشهر بر اساس طرح کاملاً تصادفی در خرداد ماه ۱۴۰۲ انجام شد.

نوع مقاله: پژوهشی
***مسئول مکاتبات:** mortezasaberi@uoz.ac.ir
استناد: صابری، م.، دهمرده‌قلعه‌نو، م.ر.، خطیبی، ر. ۱۴۰۴. تحلیل پیامدهای فرسایش بادی بر ویژگی‌های شیمیایی و میکروبی خاک بوم‌سازگان خشک در ایرانشهر استان سیستان و بلوچستان. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۹(۱): ۸۳-۶۴.
شناسهٔ دیجیتال: 10.22092/wmrj.2025.370497.1630
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱، **تاریخ بازنگری**: ۱۴۰۴/۰۶/۱۰، **تاریخ پذیرش**: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱، **تاریخ انتشار**: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱
پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۵، دورهٔ ۳۹، شمارهٔ ۱، شمارهٔ پیاپی ۱۵۰، بهار ۱۴۰۵، صفحه‌های ۶۴ تا ۸۳.
ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع‌طبیعی استان فارس
© نویسندگان
CC BY

در هر سطح فرسایش، چهار منطقه همگن با شرایط گیتاشناسی تقریباً مشابه انتخاب شد و از هر منطقه پنج نمونه خاک از ژرفای صفر تا ۳۰ سانتی‌متر برداشت شد. نمونه‌ها با روش مرکب ترکیب شدند. بخشی از نمونه‌ها بلافاصله پس از برداشت، برای اندازه‌گیری ویژگی‌های زیستی در ظروف دربسته و با حفظ رطوبت اولیه به آزمایشگاه انتقال یافت و در یخچال نگهداری شدند. بخش دیگر پس از خشک شدن در هوای آزاد و عبور از الک ۲ میلی‌متری برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آماده شد. ویژگی‌های فیزیکی شامل بافت خاک، جرم مخصوص ظاهری و تخلخل، ویژگی‌های شیمیایی شامل کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل دسترس، اسیدیته و هدایت الکتریکی و ویژگی‌های میکروبی شامل فعالیت آنزیم کاتالاز، تنفس پایه و برانگیخته میکروبی، کربن و نیتروژن زیست‌توده میکروبی و سهم میکروبی ارزیابی شد. داده‌ها با استفاده از تجزیه پراکنش یک‌طرفه (ANOVA) در نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ تحلیل شدند و میانگین‌ها نیز با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۹۵٪ مقایسه شدند. همچنین، همبستگی میان ویژگی‌های مطالعه‌شده با نرم‌افزار R بررسی شد.

نتایج و بحث

یافته‌های پژوهش نشان داد اثر شدت فرسایش بادی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و میکروبی خاک معنی‌دار بود. تحلیل داده‌ها نشان داد که با افزایش شدت فرسایش، کربن آلی و نیتروژن کل به‌طور قابل توجهی کاهش یافتند. کربن آلی خاک از ۰/۵۹٪ در مناطق بدون فرسایش به ۰/۱۶٪ و نیتروژن کل از ۰/۰۶۳ به ۰/۰۱۶٪ در مناطق با فرسایش شدید، کاهش یافت. همچنین، حساسیت پتاسیم و فسفر قابل دسترس به فرسایش خیلی زیاد بود، به‌طوری که پتاسیم از ۱۶۱/۳ به ۷۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم و فسفر قابل دسترس از ۸/۳۲ به ۳/۴۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کاهش یافتند که احتمالاً ناشی از جابه‌جایی ذرات ریز غنی از مواد مغذی به‌وسیلهٔ باد بود. هدایت الکتریکی خاک با افزایش شدت فرسایش از ۰/۵۴ دسی‌زیمنس بر متر در مناطق بدون فرسایش به ۰/۹۳ دسی‌زیمنس بر متر در مناطق با فرسایش شدید افزایش یافت. جرم مخصوص ظاهری خاک نیز از ۱/۳۶ به ۱/۵۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب افزایش و تخلخل از ۴۶/۶ به ۳۳/۲ ٪ کاهش یافت، که نشان‌دهنده تراکم بیشتر خاک و نابودی ساختار خاکدانه‌ها بود. کاهش فعالیت آنزیم کاتالاز، تنفس میکروبی پایه و برانگیخته، نیتروژن زیست‌توده و جمعیت میکروارگانیسم‌ها با افزایش شدت فرسایش معنی‌دار ($p<0.01$) بود. این یافته‌ها بیانگر محدودیت منابع غذایی و کاهش فعالیت متابولیکی میکروارگانیسم‌ها بود. با این حال، تغییرات نسبت کربن به نیتروژن زیست‌توده و سهم میکروبی خاک معنی‌دار ($p<0.05$) نبود. این یافته بیانگر پایداری نسبی برخی فرایندهای میکروبی حتی در شرایط فرسایش شدید بود. نتایج این پژوهش نشان داد فرسایش بادی هم کیفیت و کمیت عناصر غذایی و ماده آلی خاک را کاهش داد و هم روی ساختار و فعالیت میکروبی خاک به‌شدت تأثیرگذار بود. ازاین‌رو، می‌توان از این شاخص‌ها به‌عنوان معیارهای مناسب ارزیابی اثرات فرسایش بادی در بوم‌سازگان‌های خشک، به‌ویژه در ایرانشهر، استفاده کرد. تحلیل همبستگی نشان داد که اثر فرسایش خاک اثر بر ویژگی‌های میکروبی بسیار منفی بود. همبستگی فعالیت آنزیم کاتالاز (۰/۹۶-)، تنفس میکروبی (۰/۹۶-)، زیست‌توده کربن (۰/۹۵-) و نیتروژن (۰/۹۸-) و جمعیت میکروارگانیسم‌ها (۰/۹۸-) با شدت فرسایش بسیار زیاد و منفی بود. شاخص‌های زیستی به‌طور وابسته عمل کردند به‌طوری که رابطهٔ نسبت کربن به نیتروژن زیست‌توده با سهم میکروبی بسیار مثبت (۰/۹۲) بود. این یافته‌ها تأییدکنندهٔ کاهش عملکرد شبکه میکروبی خاک تحت تأثیر فرسایش بود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج پژوهش در ایرانشهر نشان داد که بهترین شرایط فیزیکی، شیمیایی و میکروبی خاک مربوط به تیمار بدون فرسایش بود. کمترین جرم مخصوص ظاهری، بیشترین تخلخل، بیشترین ظرفیت نگهداری آب و بیشترین فعالیت میکروبی خاک مربوط به تیمار نامبرده بود. با افزایش شدت فرسایش از کم تا شدید، کیفیت خاک به‌طور پیوسته کاهش یافت؛ به‌طوری که در شرایط فرسایش شدید، بیشترین نابودی ساختار خاک، کاهش کربن، نیتروژن، پتاسیم و فسفر قابل دسترس و افزایش هدایت الکتریکی مشاهده شد. این یافته‌ها بیانگر آن بود که پایداری بهینه ساختار و

عملکرد بوم‌سازگان‌های خشک در شرایطی که کمترین فرسایش رخ دهد یا وجود نداشته باشد، امکان‌پذیر است. ازاین‌رو، بر اساس نتایج این پژوهش برای جلوگیری از ورود خاک به مراحل پیشرفته فرسایش، حفاظت از پوشش گیاهی، کاهش چرای بیش از حد، کاهش شخم‌زنی و افزایش ماده آلی پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی

تنوع میکروبی، خاک‌های خشک، فرسایش بادی، فعالیت آنزیم کاتالاز، کربن آلی

مقدمه

خاک، به‌عنوان یکی از حیاتی‌ترین اجزای بوم‌سازگان‌های زمینی، نقشی اساسی در پایداری زیست‌کره، تولید غذا، تنظیم چرخه‌های زیست‌زمین‌شیمیایی و حفظ تنوع زیستی دارد. با این حال، فرسایش خاک، که عمدتاً ناشی از فعالیت‌های انسانی و تغییرات کاربری زمین است، سبب نابودی ساختار خاک، کاهش ماده آلی، عناصر غذایی و ژرفای خاک شده و بر تنوع میکروبی تأثیر منفی دارد (مای و همکاران ۲۰۲۴). اصطلاح فرسایش به فرآیند تدریجی نابودی و ساییدگی سطح زمین گفته می‌شود، که در آن ذرات خاک از سطح جداشده و به‌وسیلهٔ عامل‌های طبیعی همچون باد یا جریان‌های آبی به مکان‌های دیگر منتقل می‌شوند (تانر و همکاران ۲۰۲۳). این فرایند در بلندمدت موجب کاهش کیفیت خاک و کاهش توان بوم‌سازگان می‌شود و پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و حتی سیاسی قابل‌توجهی به‌همراه دارد (زایندین و همکاران ۲۰۲۴). اثرات فرسایش شامل فشردگی خاک، نابودی ساختار خاک، کاهش اندازهٔ مواد مغذی و افزایش شوری است که از جمله مهم‌ترین چالش‌های زمین‌بوم‌شناختی و محیط‌زیستی به‌شمار می‌آیند (ذوالفقاری و همکاران ۲۰۲۴). نابودی خاک به‌شدت با افزایش فرسایش بادی مرتبط است. فرسایش بادی یک مشکل زیست‌محیطی جهانی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که خاک‌ها چسبندگی کم، ساختار شل و پوشش گیاهی پراکنده دارند، به‌شمار می‌آید (خیرآبادی و همکارامن ۲۰۱۸). در فصل‌های خشک، بادهای پرسرعت به‌راحتی خاک سطحی را جداکرده و مشکلات پرشماری را برای تعادل بوم‌شناختی به‌وجود می‌آورند. افزون بر این، ذرات معلق در هوا باعث شکل‌گیری گرد و غبار و طوفان‌های شنی می‌شوند که دید را کاهش داده، منابع آب را آلوده کرده و سلامت انسان را تهدید می‌کنند (کولازو و بوشیازو و همکاران ۲۰۱۵). فرسایش بادی افزون بر اثرات گسترده‌ای که بر اقلیم، کیفیت هوا و سلامت انسان در مقیاس جهانی دارد (کریمن و همکاران ۲۰۱۳)، سبب جابه‌جایی و ازبین‌رفتن ذرات ریز آلی موجود در سطح خاک نیز می‌شود (دیالو و همکاران ۲۰۲۳). این فرایند موجب کاهش قابل‌توجه ذخایر مواد مغذی، کاهش حاصلخیزی و نابودی ساختار فیزیکی و زیستی خاک می‌شود (دو و همکاران ۲۰۲۲)، رشد گیاهان را محدود می‌کند و در نتیجه منجر به کاهش چشم‌گیر بهره‌وری خاک می‌شود (اونز ۲۰۲۰). با افزایش شدت فرسایش بادی و کاهش پوشش گیاهی هم ساختار جامعه میکروبی دگرگون می‌شود و هم کارکردهای مهمی مانند تنفس میکروبی، چرخه نیتروژن و فعالیت‌های آنزیمی، کاهش می‌یابند (مای و همکاران ۲۰۲۴). ازاین‌رو، با توجه به پیامدهای منفی فرسایش بادی بر سلامت، محیط‌زیست و کشاورزی، کاهش فرسایش بادی خاک‌های بیابانی در مناطق خشک اهمیت زیادی دارد. بر اساس نتایج پژوهش کیو و همکاران (۲۰۲۱)، فرسایش خاک موجب کاهش پیچیدگی شبکه‌های میکروبی، کاهش تنوع تاکسون‌ها و تغییر ترکیب جامعه میکروبی شد، که با کاهش عملکرد چندگانه خاک و محدود شدن فعالیت میکروبی همراه بود. این یافته‌ها اثرات منفی فرسایش

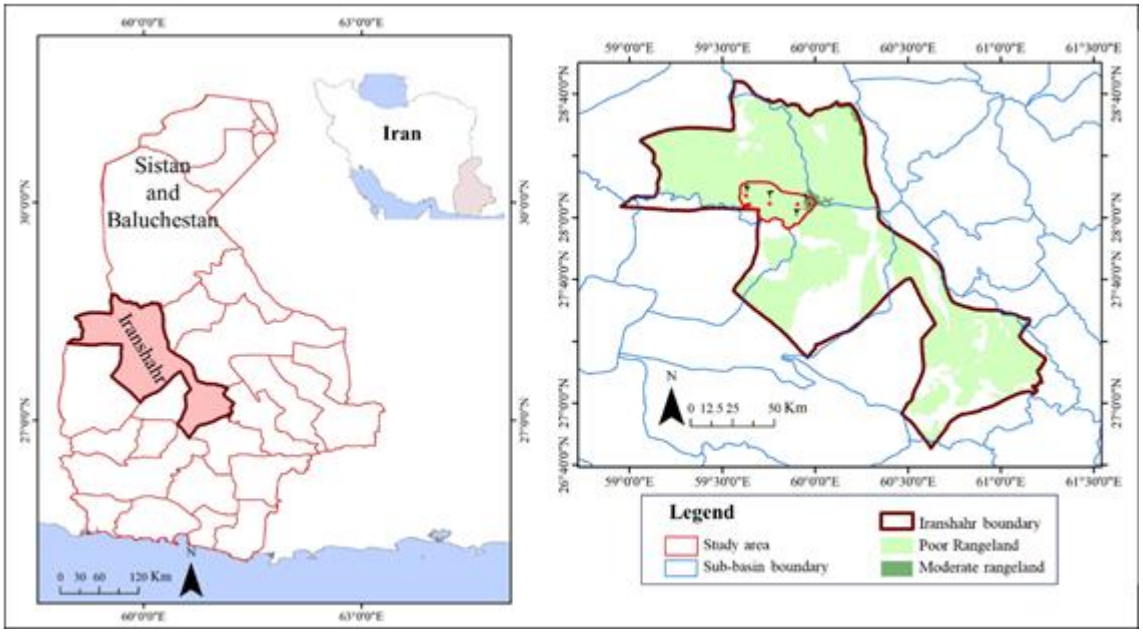
بر تنوع، عملکرد میکروبی و سلامت بوم‌سازگان خاک را تأیید می‌کند. پیمانتل و برگس (۲۰۱۳) گزارش کردند که افزایش شدت فرسایش باعث کاهش ظرفیت تبادل کاتیونی، عناصر غذایی و ماده آلی خاک شد و در نتیجه ساختار خاک و حاصل‌خیزی آن کاهش یافت. مرادی و همکاران (۲۰۲۴) نیز دریافتند کاهش ماده آلی خاک فقط ناشی از شستشوی سطحی نبود، بلکه اثر برداشت خاک سطحی و آشکار شدن افق‌های زیرین با محتوای کمتر ماده آلی نیز مهم بود. در نواحی خشک و نیمه‌خشک نتایج پژوهش ژائو و همکاران (۲۰۲۵) نشان داد فرسایش بادی شبیه‌سازی‌شده و رسوب‌گذاری گرد و غبار سبب اثرات قابل‌توجهی بر ساختار و عملکرد شبکه‌های غذایی میکروبی خاک شد. این فرآیندها با جابه‌جایی ذرات سطحی خاک و تغییر در دسترسی به منابع آلی، به‌طور مستقیم بر ترکیب جامعه میکروبی اثرگذارند و با کاهش تنوع عملکردی میکروارگانیسم‌ها، موجب کاهش پایداری عملکردهای زیستی خاک می‌شوند. میکروارگانیسم‌ها در محافظت خاک‌ها در برابر فرسایش نقش مهمی دارند و با تأثیر خود بر تجمع ماده آلی و پایداری خوشه‌های خاک، قابلیت فرسایش خاک را کاهش می‌دهند. ازاین‌رو، روش‌های مدیریتی که باعث افزایش زیست‌توده میکروبی خاک، محتوای کربن و ذخیره‌سازی آن شوند، به بهبود ساختار خاک و کاهش قابلیت فرسایش کمک می‌کنند (اکوستا و مارتینز ۲۰۱۵). به‌طور کلی، فرسایش بادی افزون بر پیامدهای فیزیکی و شیمیایی، موجب اختلال در فرآیندهای زیستی خاک شده و عملکرد پایدار بوم‌سازگان‌های خاکی را تهدید می‌کند. در پژوهشی ایتوری و بوشیازو (۲۰۲۳) تعامل میان فرسایش بادی و کربن آلی خاک را بررسی کردند و دریافتند فرسایش بادی سبب کاهش ذخایر کربن خاک شد و SOC حساسیت خاک به فرسایش بادی اثرگذار بود. زیرا، بر تجمع خاک اثرگذار بود. همچنین، این پژوهشگران تجمع کربن در رسوبات منتقل‌شده به‌وسیلهٔ باد با دو فرآیند حرکت جهشی و معلق‌سازی ذرات را بررسی کردند. نتایج این بررسی نشان داد فرسایش بادی هم خاک را جابه‌جا می‌کند و هم روی کربن آلی خاک و در نتیجه بر کیفیت خاک و چرخه کربن در محیط زیست نیز تأثیرگذار است. فرسایش بادی یکی از مهم‌ترین عامل‌های تهدیدکننده پایداری و بهره‌وری خاک‌ها است که در مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای و جهانی رخ می‌دهد. برآوردهای اقتصادی موجود اغلب تأثیرات زیست‌محیطی این پدیده، از جمله کاهش تنوع زیستی خاک و اختلال در عملکرد بوم‌سازگان‌ها، را در نظر نمی‌گیرند. افزون بر این، میکروارگانیسم‌های جابه‌جاشده به‌وسیلهٔ گرد و غبار نقش مهمی در فرآیندهای بوم‌سازگانی حیاتی از جمله چرخه زیست‌زمین‌شیمیایی مواد مغذی، ذخیره‌سازی کربن، تجمع خاک و تبدیل ترکیبات سمی در خاک مبدأ دارند (اکوستا و مارتینز ۲۰۱۵). این یافته‌ها بر اهمیت بررسی اثرات زیستی فرسایش بادی و ضرورت استفاده از روش‌های مدیریتی و تثبیت خاک با رویکردهای زیستی، تأکید دارند. با توجه به شرایط اقلیمی خشک منطقه ایرانشهر در استان سیستان و بلوچستان و نقش مؤثر بادهای شدید در افزایش فرسایش بادی، بررسی پیامدهای این پدیده بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و میکروبی خاک، اهمیت ویژه‌ای دارد. فرسایش بادی هم موجب کاهش مواد آلی، عناصر غذایی و نابودی ساختار خاک می‌شود و هم با تغییر در فرآیندهای زیست‌شیمیایی، پایداری بوم‌سازگان‌های مرتعی را تهدید می‌کند و بهره‌وری و تنوع زیستی را کاهش می‌دهد. از سوی دیگر، کمبود داده‌های علمی و بررسی‌های میدانی در این زمینه، به‌ویژه در مناطق کمتر بررسی‌شده‌ای چون ایرانشهر، ضرورت انجام این پژوهش را دوچندان می‌کند تا بتوان با شناخت دقیق اثرات فرسایش بادی، راهکارهای مدیریتی و حفاظتی کارآمد برای حفظ کارکردهای بوم‌شناختی خاک و پایداری منابع طبیعی ارائه داد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقهٔ مطالعه‌شده

منطقه مطالعه‌شده بخشی از مراتع خشک شهرستان ایرانشهر در آبخیز رحمت‌آباد بود. محدوده جغرافیایی آن میان ۲۷ درجه و ۵۶ دقیقه و ۲۱ ثانیه تا ۲۸ درجه

و ۱۱ دقیقه و ۵۰ ثانیه عرض شمالی و میان ۵۹ درجه و ۳۵ دقیقه و ۲۷ ثانیه تا ۶۰ درجه و ۰ دقیقه و ۲۴ ثانیه طول شرقی بود. مساحت این منطقه معادل ۱۱۶۸ کیلومتر مربع و در فاصله ۱۲۶ کیلومتری شمال‌غربی شهر بزمان است. مراتع منطقه شامل دو تیپ اصلی، مراتع با کیفیت متوسط که عمدتاً در بلندی‌های بیشتر (۱۶۲۱ تا ۳۲۱۹ متر از سطح دریا) و گونه‌های غالب آن شامل *Salsola rigida* و *Atriplex canescens* است و مراتع فقیر که در بلندی‌های کمتر (۸۸۱ تا ۱۶۲۱ متری از سطح دریا) و گونه‌های غالب آن شامل *Peganum harmala* و *Haloxylon persicum* است. میانگین سالانه بارندگی ۱۰۳/۳ میلی‌متر و میانگین سالانه دما ۲۷ درجه سانتی‌گراد است. میانگین بیشترین و کمترین به‌ترتیب ۳۴/۱ و ۱۹/۶ درجه سانتی‌گراد گزارش‌شده است (ایستگاه همدید ایرانشهر، دوره آماری ۳۰ ساله). بر اساس نقشه اقلیم‌شناسی زیستی ایران و طبقه‌بندی آمبرژه، اقلیم منطقه، بیابانی گرم شدید و میانگین تعداد روزهای خشک سالانه ۳۴۲ روز است (درودی و همکاران ۲۰۲۴). بر اساس داده‌های ایستگاه همدید ایرانشهر، باد غالب منطقه عمدتاً از سمت شمال‌غرب به جنوب‌شرق می‌وزد و بیشترین فراوانی آن در ماه‌های خرداد تا شهریور ثبت‌شده است. میانگین سرعت سالانه باد حدود ۵/۴ متر بر ثانیه گزارش‌شده و در دوره‌های اوج وزش، سرعت آن به بیش از ۱۰ متر بر ثانیه می‌رسد. این الگوی باد، عامل اصلی فعال بودن فرسایش بادی در منطقه به‌شمار می‌آید. با توجه به شرایط اقلیمی خشک و وزش بادهای شدید، فرسایش بادی در این منطقه بسیار فعال است و به نابودی تدریجی خاک‌های سطحی، کاهش مواد آلی و کاهش کیفیت مراتع منجر می‌شود. این روند موجب کاهش پوشش گیاهی مرتع، کاهش ظرفیت چرای دام و کاهش توان بازسازی طبیعی بوم‌سازگان می‌شود (شکل ۱).



شکل۱- موقعیت آبخیز رحمت آباد و پایگاه‌های مطالعه‌شده (۱: بدون فرسایش، ۲: فرسایش کم، ۳: فرسایش متوسط، ۴: فرسایش شدید).

Figure 1- Location of the Rahmat Abad watershed and the study sites (1: no erosion, 2: low erosion, 3: moderate erosion, 4: severe erosion).

روش پژوهش

در این پژوهش، بر اساس بازدیدهای میدانی، مشاهده‌های صحرایی و نقشه‌های فرسایش منطقه، شدت فرسایش خاک به‌عنوان تیمار اصلی در چهار سطح شامل: بدون فرسایش، فرسایش کم، متوسط و شدید دسته‌بندی شد. برای بررسی اثر این تیمارها بر تغییرات ویژگی‌های خاک، نمونه‌برداری در آبخیز رحمت‌آباد ایرانشهر بر اساس طرح کاملاً تصادفی در خرداد ماه ۱۴۰۲ انجام شد. در هر سطح فرسایش، چهار منطقه همگن با شرایط گیتاشناسی تقریباً مشابه انتخاب شد و از هر منطقه پنج نمونه خاک (یک نمونه در مرکز و چهار نمونه به‌شکل علامت بعلاوه در اطراف آن) از ژرفای صفر تا ۳۰ سانتی‌متر برداشت شد. برای هر منطقه فرسایشی، نمونه‌های برداشت‌شده از مناطق همگن با هم ترکیب و یک نمونه مرکب تهیه شد. بلافاصله پس از برداشت، نمونه‌های خاک به دو بخش تقسیم شدند. بخشی از نمونه‌ها که برای اندازه‌گیری ویژگی‌های میکروبی در نظر گرفته‌شده بود، بدون الک کردن و با حفظ شرایط رطوبتی اولیه، در ظروف دربسته و در مجاورت یخ خشک به آزمایشگاه انتقال یافت 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 ۲ میلی‌متری، استفاده شد (باستانی و همکاران ۲۰۲۳).

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

در این پژوهش، ویژگی‌های فیزیکی مانند بافت خاک با روش هیدرومتری تعیین شد (سچومن و همکاران ۲۰۰۲). جرم مخصوص ظاهری خاک با روش کلوخه‌ای، تخلخل با محاسبه بر اساس چگالی حجمی اندازه‌گیری شد (چن و همکاران ۲۰۲۲). ویژگی‌های شیمیایی مانند کربن آلی با روش والکی و بلاک اکسیداسیون دی‌کرومات و نیتروژن کل با استفاده از روش کجلدال تعیین شد. فسفر قابل‌دسترس خاک با روش اولسن و پتاسیم قابل‌دسترس با استفاده از استات آمونیوم خنثی استخراج و به‌وسیلهٔ دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد. اندازهٔ اسیدیته و هدایت الکتریکی با روش پتانسیومتری تعیین شد (باستانی و همکاران ۲۰۲۳).

ویژگی‌های میکروبی خاک

در این پژوهش برای تعیین ویژگی‌های میکروبی خاک از روش‌های استاندارد و مرجع استفاده شد. آنزیم کاتالاز با اضافه کردن هیدروژن پراکسید به‌وسیله اسپکتروفوتومتر UV با طول موج تقریبا ۲۴۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. تنفس پایه میکروبی با روش تیتراسیون، تنفس برانگیخته با روش انکوباسیون، کربن زیست‌توده میکروبی با استفاده از روش تدخین-استخراج، نیتروژن زیست‌توده میکروبی با روش تدخین با کلروفرم و انکوباسیون اندازه‌گیری شد. همچنین سهم میکروبی از نسبت کربن زیست‌توده میکروبی به کربن آلی کل محاسبه شد (چن و همکاران ۲۰۲۲).

تجزیه و تحلیل‌های آماری

تجزیه پراکنش یکطرفه (ANOVA) داده‌های ویژگی‌های خاک به‌وسیلهٔ نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شد. برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن (در سطح احتمال ۹۵٪) استفاده شد. در پایان همبستگی ویژگی‌های مطالعه‌شده در محیط نرم‌افزار R انجام شد.

نتایج و بحث

اثر فرسایش بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

بر اساس نتایج تجزیه پراکنش، اثر شدت فرسایش بادی بر اغلب ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله کربن آلی، نیتروژن کل، پتاسیم و فسفر قابل دسترس، هدایت الکتریکی، جرم مخصوص ظاهری و تخلخل بسیار معنی‌دار بود. بیشترین حساسیت به فرسایش بادی مربوط در عناصر غذایی پتاسیم و فسفر قابل دسترس مشاهده شد که احتمالاً ناشی از جابه‌جایی ذرات ریز و غنی از مواد مغذی در اثر باد است. فرسایش بادی بر کربن آلی و نیتروژن کل نیز به‌شدت تأثیرگذار بود که نشان‌دهنده کاهش کیفیت ماده آلی و اختلال در چرخه عناصر غذایی در مناطق با فرسایش شدید است. تغییرات هدایت الکتریکی خاک نیز با شدت فرسایش معنی‌دار بود که بیانگر تغییرات غلظت نمک‌های محلول در اثر برداشت

لایه‌های سطحی خاک است. از سوی دیگر، تغییرات اسیدیته خاک میان سطوح فرسایش معنی‌دار نبود. افزون بر این، با افزایش شدت فرسایش، تراکم خاک افزایش و تخلخل کاهش یافت که بیانگر اثرات مستقیم فرسایش بر ساختار خاک است. بر اساس این یافته‌ها می‌توان نتیجه گرفت اثرات فرسایش بادی هم بر کمیت و هم بر کیفیت خاک بوم‌سازگان خشک ایرانشهر معنی‌دار بود (جدول ۱).

جدول ۱- تجزیه پراکنش یک طرفه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در شدت‌های فرسایش.

Table 1– Analysis of variance of erosion intensity on soil physicochemical properties.

Soil parameters		df	Mean Squares	F
Organic Carbon (%)	Between Groups	3	0.1	298.3**
	Within Groups	16	000	
Total Nitrogen (%)	Between Groups	3	0.001	52.16**
	Within Groups	16	000	
Available Potassium (mg/kg)	Between Groups	3	4747.6	575.4**
	Within Groups	16	8.25	
Available Phosphorus (mg/kg)	Between Groups	3	17.12	217.2**
	Within Groups	16	0.07	
pH	Between Groups	3	0.004	0.51 ns
	Within Groups	16	0.008	
EC (dS/m)	Between Groups	3	0.09	29.9**
	Within Groups	16	0.003	
Bulk Density (g/cm^3)	Between Groups	3	0.03	34.65**
	Within Groups	16	0.001	
Porosity (%)	Between Groups	3	107.4	30.69**
	Within Groups	16	3.5	

**: معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد و ns: معنی‌دار نبودن.

**: significance at the 1% probability level, ns: non- significant.

با افزایش شدت فرسایش بادی، تغییرات بافت خاک نیز قابل توجه بود. در شرایط بدون فرسایش و فرسایش کم، خاک با بافت لومی‌رسی در ذرات و ظرفیت زیاد نگهداری آب و پایداری ساختاری تعادل مناسبی نشان داد. اما در فرسایش متوسط، با کاهش ذرات ریز و افزایش نسبی شن، بافت به لومی‌شنی تغییر یافت که موجب کاهش تخلخل و توان ذخیره آب شد. سرانجام، در فرسایش شدید، با غالب شدن ذرات شنی و کاهش قابل توجه رس و لای، توانایی خاک در حفظ آب، تخلخل و پایداری ساختاری به‌شدت کاهش یافت و شرایط نامناسبی برای رشد گیاهان و فعالیت میکروبی فراهم آورد (جدول ۲).

بررسی مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در شدت‌های زیاد فرسایش بادی، کاهش اندازه‌های کربن آلی، نیتروژن کل، پتاسیم و فسفر قابل‌دسترس معنی‌دار بود. به‌طوری که کربن آلی از ۰/۵۹٪ در مناطق بدون فرسایش به ۰/۱۶٪ در مناطق با فرسایش شدید و نیتروژن کل از ۰/۰۶۳ به ۰/۰۱۶٪ کاهش یافت. پتاسیم قابل دسترس از ۱۶۱/۳ به ۷۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم و فسفر قابل‌دسترس از ۸/۳۲ به ۳/۴۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کاهش یافت. از سوی دیگر، هدایت الکتریکی از ۰/۵۴ دسی‌زیمنس بر متر در مناطق بدون فرسایش به ۰/۹۳ در مناطق با فرسایش شدید، افزایش یافت. جرم مخصوص ظاهری از ۱/۳۶ به ۱/۵۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب افزایش و تخلخل از ۴۶/۶ به ۳۲٪/۲ کاهش یافت. تغییرات اسیدیته خاک در سطوح مختلف فرسایش معنی‌دار نبود (جدول ۲).

جدول ۲- مقایسه میانگین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در شدت‌های فرسایش.

Table 2 – Comparison of mean values showing the effect of erosion on soil physicochemical properties.

Soil parameters	Erosion intensity			
	No erosion	low	Moderate	intensity
Organic Carbon (%)	0.59^{a}	0.47^{b}	0.30^{c}	0.16^{d}
Total Nitrogen (%)	0.063^{a}	0.048^{b}	0.023^{c}	0.016^{c}
Available Potassium (mg/kg)	161.3^{a}	148.6^{b}	96.5^{c}	79.0^{d}
Available Phosphorus (mg/kg)	8.32^{a}	7.78b	4.55^{c}	3.45^{d}
pH	7.68^{a}	7.63^{a}	7.69^{a}	7.61^{a}
EC (dS/m)	0.54^{c}	0.60^{bc}	0.70^{b}	0.93^{a}
Bulk Density(g/cm^3)	1.36^{c}	1.41^{c}	1.49^{b}	1.58^{a}
Porosity (%)	46.6^{a}	42.5^{b}	35.9^{c}	33.2^{c}
Soil texture	Loamy clay	Loamy clay	Loamy sand	Sandy

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

Different letters in each row indicate significant differences ($p < 0.05$).

نتایج ضریب همبستگی پیرسون نشان داد رابطه میان فرسایش و بیشتر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک معنی‌دار بود. همبستگی فرسایش با جرم مخصوص ظاهری و هدایت الکتریکی مثبت و بسیار زیاد بود. همبستگی فرسایش با تخلخل، کربن آلی، نیتروژن کل، پتاسیم قابل جذب و فسفر قابل جذب منفی و بسیار زیاد بود که بیانگر کاهش مواد آلی و عناصر غذایی خاک در اثر افزایش فرسایش است. همچنین، رابطه جرم مخصوص ظاهری با بیشتر ویژگی‌های شیمیایی خاک به‌جز اسیدیته بسیار منفی بود. در این پژوهش، بیشترین همبستگی مثبت میان پتاسیم قابل جذب و فسفر قابل جذب مشاهده شد که نشان‌دهنده هم‌زمانی تغییرات این دو عنصر در خاک است. از سوی دیگر، رابطه اسیدیته با بیشتر ویژگی‌ها ضعیف بود، به‌جز پتاسیم قابل جذب که همبستگی مثبت و نسبتاً زیادی با آن نشان داد. این یافته‌ها بیانگر آن است که تغییرات فیزیکی ناشی از فرسایش، مستقیماً بر وضعیت حاصلخیزی و ویژگی‌های شیمیایی خاک اثرگذار است و کاهش کیفیت خاک را در پی دارد (جدول ۳ و شکل ۲).

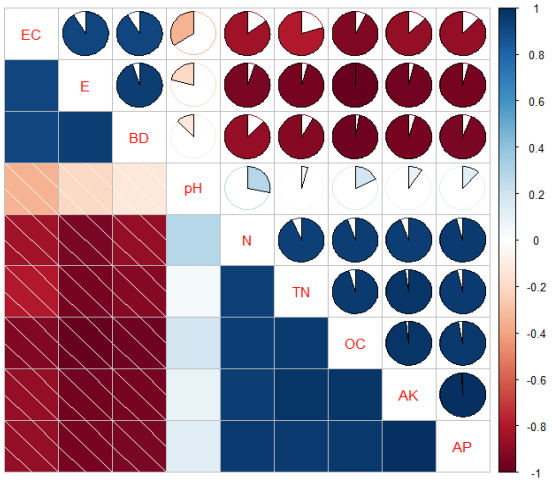
جدول ۳- نتایج تجزیه ضریب همبستگی پیرسون میان ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک.

Table 3 – Pearson correlation coefficients among soil physicochemical properties.

	E	BD	N	OC	TN	AK	AP	PH	EC
E	1								
BD	0.94^{**}	1							
N	-0.94^{**}	-0.87^{**}	1						
OC	-0.99^{**}	-0.97^{**}	0.94^{**}	1					
TN	-0.95^{**}	-0.91^{**}	0.93^{**}	0.95^{**}	1				
AK	-0.96^{**}	-0.95^{**}	0.94^{**}	0.97^{**}	0.97^{**}	1			
AP	-0.95^{**}	-0.94^{**}	0.95^{**}	0.96^{**}	0.95^{**}	0.99^{**}	1		
PH	-0.20^{ns}	-0.12^{ns}	0.28^{ns}	0.18^{ns}	0.04^{ns}	0.91^{**}	0.12^{ns}	1	
EC	0.91^{**}	0.91^{**}	-0.84^{**}	-0.92^{**}	-0.79^{**}	-0.87^{**}	-0.87^{**}	-0.34^{*}	1

فرسایش (E)، جرم مخصوص ظاهری (BD)، تخلخل (N) کربن آلی (OC)، نیتروژن کل (TN)، پتاسیم قابل جذب (AK)، فسفر قابل جذب (AP)، اسیدیته (pH)، هدایت الکتریکی (EC)، (**: معنی‌دار در سطح ۹۹٪، *: معنی‌دار در سطح ۹۵٪ و ns: معنی‌دار نبودن).

Erosion (E), Bulk Density (BD), Porosity (N) Organic Carbon (OC), Total Nitrogen (TN), Available Potassium (AK), Available Phosphorus (AP), Soil Acidity (pH), Electrical Conductivity (EC), (**: significant at the 99% confidence level, *: significant at the 95% confidence level, and ns: not significant).



شکل ۲- ماتریس همبستگی پیرسون برای ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک.

Figure 2– Pearson correlation matrix for soil physicochemical properties.

تأثیر فرسایش بر ویژگی‌های میکروبی خاک

نتایج جدول تجزیه پراکنش نشان داد اثر شدت فرسایش بادی بر بیشتر شاخص‌های زیستی خاک مانند فعالیت آنزیم کاتالاز، تنفس پایه و برانگیخته میکروبی، کربن و نیتروژن زیست‌توده میکروبی و جمعیت میکروارگانیسم‌ها، بسیار معنی‌دار بود و تغییرات این ویژگی‌ها در میان سطوح مختلف فرسایش زیاد بود. این یافته‌ها بیانگر حساسیت زیاد فرایندهای زیستی خاک به تغییرات ناشی از فرسایش و نابودی زیستگاه میکروبی است. از سوی دیگر، تغییرات نسبت کربن به نیتروژن زیست‌توده و سهم میکروبی خاک تفاوت در میان سطوح مختلف فرسایش معنی‌دار نبود، که نشان‌دهنده پایداری نسبی این نسبت‌ها در برابر فشار ناشی از فرسایش است. ازاین‌رو، می‌توان از شاخص‌هایی مانند فعالیت آنزیمی، تنفس میکروبی و زیست‌توده به‌عنوان معیارهای مناسب ارزیابی اثرات فرسایش بادی در خاک‌های مناطق خشک استفاده کرد (جدول ۴).

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

Table 4- Analysis of variance of wind erosion intensity on soil microbial properties.

Soil parameters		df	Mean Squares	F
Catalase Enzyme (µmol KMnO₄ g^{-1} dry soil)	Between Groups	3	146.7	83.8**
	Within Groups	16	1.75	
Basal Microbial Respiration (mg CO_2/g soil·day)	Between Groups	3	0.06	344.7**
	Within Groups	16	000	
Basal respiration (mg CO_2/g soil·day)	Between Groups	3	0.18	283.2**
	Within Groups	16	0.001	
Microbial Biomass Carbon (mg/kg)	Between Groups	3	8587.7	165.4**
	Within Groups	16	51.9	
Microbial Biomass Nitrogen (mg/kg)	Between Groups	3	42.7	333.7**
	Within Groups	16	0.12	
MBC/ MBN (mg/kg)	Between Groups	3	3.44	3.13 ns
	Within Groups	16	1.10	
Microorganism Population (CFU ×10^7 g^{-1} dry soil)	Between Groups	3	2.86	522.2**
	Within Groups	16	0.005	
Microbial Quotient (mg Cmic / g Corg)	Between Groups	3	25.3	3.28 ns
	Within Groups	16	7.71	

**: معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد و ns: معنی‌دار نبودن.

**: significance at the 1% probability level, ns: non- significant.

نتایج این پژوهش نشان داد با افزایش شدت فرسایش بادی، کاهش شاخص‌های زیستی خاک معنی‌دار بود. روند فعالیت آنزیم کاتالاز نزولی بود که بیانگر حساسیت زیاد این آنزیم به نابودی ساختار خاک است. همچنین، تنفس پایه و تنفس برانگیخته میکروبی در شدت‌های بیشتر فرسایش کاهش یافتند که نشان‌دهنده کاهش فعالیت متابولیکی و محدودیت توان تجزیه مواد آلی به‌وسیلهٔ میکروارگانیسم‌ها است. کاهش زیست‌توده کربن و نیتروژن میکروبی نیز چشم‌گیر بود. تغییرات نسبت کربن به نیتروژن زیست‌توده قابل توجه بود و نسبتاً پایدار باقی ماند. شدت فرسایش بر جمعیت میکروارگانیسم‌ها نیز به‌شدت تأثیرگذار بود و در شرایط فرسایش شدید کاهش آن محسوس بود. از سوی دیگر، تغییرات سهم میکروبی در میان سطوح مختلف فرسایش معنی‌دار نبود، هرچند در برخی شرایط سهم میکروبی خاک بیشتر بود. در نتیجه می‌توان گفت فرسایش بادی با کاهش کیفیت زیستگاه و محدودیت دسترسی به منابع غذایی، منجر به کاهش فعالیت‌های زیستی و کاهش کارکردهای بوم‌سازگان خاک می‌شود (جدول ۵).

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

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

Soil parameters	Erosion intensity			
	No erosion	low	Moderate	intensity
Catalase Enzyme (μmol $KMnO_4$ g^{-1} dry soil)	33^{a}	31^{a}	23^{b}	18^{c}
Basal Microbial Respiration (mg CO_2/g soil·day)	0.42^{a}	0.40^{b}	0.23^{c}	0.12^{d}
Basal respiration (mg CO_2/g soil·day)	0.73^{a}	0.69^{a}	0.42^{b}	0.20^{c}
Microbial Biomass Carbon (mg/kg)	163.6^{a}	155^{a}	102.6^{b}	48.0^{c}
Microbial Biomass Nitrogen (mg/kg)	12.1^{a}	10.3^{b}	6.7^{c}	3.7^{d}
MBC/ MBN (mg/kg)	13.4^{a}	14.9^{a}	15.1^{a}	13.0^{a}
Microorganism Population (CFU $\times 10^7$ g^{-1} dry soil)	3.43^{a}	2.99^{b}	1.87^{c}	1.31^{d}
Microbial Quotient (mg Cmic / g Corg)	27.5^{ab}	33.0^{ab}	33.4^{ab}	29.0^{ab}

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

Different letters in each row indicate significant differences ($p < 0.05$).

در این پژوهش نتایج بررسی ضریب‌های همبستگی پیرسون نشان داد افزایش فرسایش خاک با کاهش محسوس عملکردهای زیستی همراه بود (جدول ۶)، به‌طوری که همبستگی همه شاخص‌های مهم (فعالیت آنزیم کاتالاز، تنفس میکروبی پایه و برانگیخته، کربن و نیتروژن زیتوده میکروبی و جمعیت میکروارگانیسم‌ها)، با فرسایش منفی و بسیار زیاد بود. این یافته بیانگر آن است که نابودی فیزیکی خاک در اثر فرسایش، محیط زیست میکروبی را محدود و توان متابولیکی و تولید زیست‌توده میکروبی را کاهش می‌دهد. از سوی دیگر، رابطه مثبت و بسیار زیاد میان شاخص‌های زیستی نشان داد که این ویژگی‌ها به‌شکل یک شبکه عملکردی به هم وابسته‌اند و تغییر در یکی، به تغییر مشابه در دیگر شاخص‌ها منجر می‌شود. همبستگی نسبت کربن به نیتروژن زیتوده میکروبی با بیشتر شاخص‌ها ضعیف بود، اما با سهم میکروبی مثبت و زیاد بود که بیانگر نقش ساختار شیمیایی زیست‌توده در سهم نسبی میکروب‌ها است (شکل ۳).

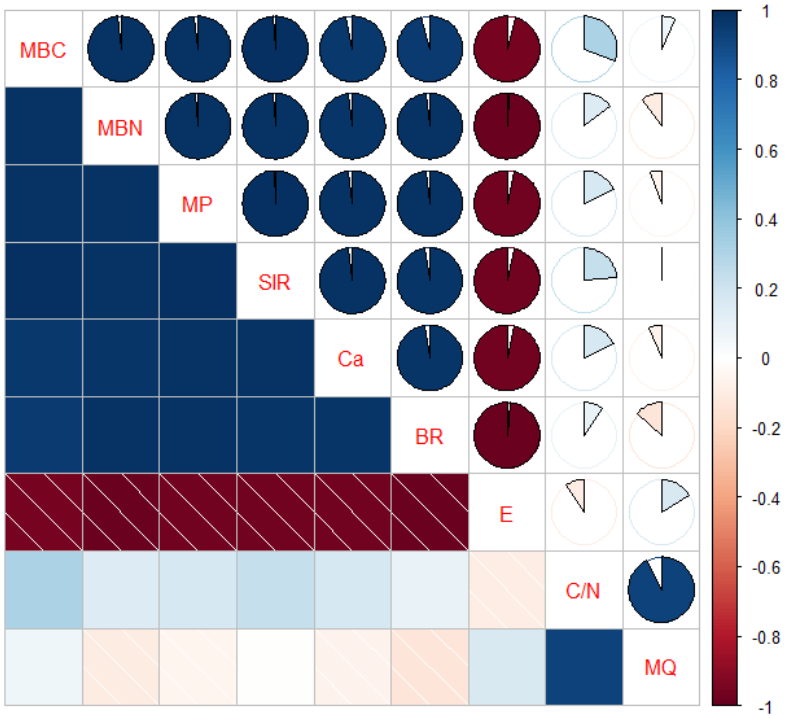
جدول ۶- نتایج تجزیه ضریب همبستگی پیرسون برای ویژگی‌های میکروبی خاک.

Table 6- Results of Pearson correlation analysis for soil microbial properties.

	E	Ca	MP	SIR	MBC	MBN	C/N	BR	MQ
E	1								
Ca	-0.96**	1							
MP	-0.96**	0.98**	1						
SIR	-0.96**	0.98**	0.99**	1					
MBC	-0.95**	0.96**	0.98**	0.99**	1				
MBN	-0.98**	0.97**	0.98**	0.98**	0.98**	1			
C/N	-0.95**	0.17ns	0.17ns	0.23ns	0.31*	0.14ns	1		
BR	-0.98**	0.97**	0.98**	0.97**	0.95**	0.98**	0.09ns	1	
MQ	0.16ns	-0.06ns	-0.05ns	-0.005ns	0.06ns	-0.10ns	0.92**	-0.13ns	1

فرسایش (E)، آنزیم کاتالاز (Ca)، تنفس میکروبی پایه (MP)، تنفس بر انگیخته (SIR)، کربن زیتوده میکروبی (MBC)، نیتروژن زیتوده میکروبی (MBN)، نسبت کربن به نیتروژن زیتوده میکروبی (C/N)، جمعیت میکروارگانیسم‌ها (BR)، سهم میکروبی (MQ)، (**: معنی‌دار در سطح ۰/۰۱، *: معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ ٪ و ns: معنی‌دارنبودن).

Erosion (E), Catalase enzyme (Ca), Basal microbial respiration (MP), Induced Respiration (SIR), Microbial Biomass Carbon (MBC), Microbial Biomass Nitrogen (MBN), Microbial Biomass C/N Ratio (C/N), Microorganism population (BR), Microbial Quotient (MQ), (**: significant at the 99% confidence level, *: significant at the 95% confidence level, and ns: not significant).



شکل ۳- ماتریس همبستگی پیرسون برای ویژگی‌های میکروبی خاک.

Figure 3- Pearson correlation matrix for soil microbial properties.

فرسایش بادی خاک یک فرآیند طبیعی در محیط‌های خشک و با پوشش گیاهی کم است که در سال‌های گذشته به‌دلیل تغییرات اقلیمی و دخالت‌های انسانی مانند شخم‌زنی، چرای بیش از حد و برداشت پوشش گیاهی شدت یافته است (سالاوو-روتیمی و همکاران ۲۰۲۱). در این پژوهش پیامدهای فرسایش بادی بر ویژگی‌های شیمیایی و میکروبی خاک در بوم‌سازگان خشک ایرانشهر بررسی شد و نتایج بیانگر آن بود که

چگونه این پدیده باعث تغییر شاخص‌های مهم خاک و ساختار میکروبی شد. فرسایش خاک تعادل زیستی و پایداری بوم‌سازگان را تهدید می‌کند. اثرات فرسایش بادی بر ویژگی‌های فیزیکی با تغییر بافت خاک همراه بود. فرسایش بادی با حذف ذرات ریز و افزایش ذرات درشت باعث سبک‌تر شدن خاک و کاهش پایداری ساختار آن شد. این تغییرات ظرفیت نگهداری آب و تخلخل خاک را کاهش داد و سبب کاهش ظرفیت خاک برای تغذیه پوشش گیاهی و فعالیت میکروبی شد. در نتیجه، بر اساس نتایج پژوهش ژو و همکاران (۲۰۲۴) می‌توان گفت افزایش شدت فرسایش باعث افزایش شکنندگی و کاهش عملکرد بوم‌سازگان می‌شود. از سوی دیگر، نتایج این پژوهش با یافته‌های سیرجانی و همکاران (۲۰۲۴) هم راستا است. همچنین، نتایج نشان داد با افزایش شدت فرسایش بادی، جرم مخصوص ظاهری خاک به‌طور پیوسته افزایش یافت. این افزایش احتمالاً ناشی از کاهش ماده آلی و تجزیه ذرات ریز خاک است. زیرا، ماده آلی سبک نقش مهمی در کاهش تراکم و حفظ ساختار متخلخل خاک دارد. افزایش جرم مخصوص ظاهری معمولاً باعث کاهش نفوذپذیری آب و تهویه خاک می‌شود (ابوحمده و ریدر ۲۰۰۰) و توانایی خاک در حمایت از جوامع میکروبی و تثبیت بوم‌سازگان را کاهش می‌دهد (اصغری و ارخزلو2020). نتایج دیگر پژوهش‌ها بیانگر آن است که افزایش جرم مخصوص ظاهری در خاک‌های فرسایش‌یافته، ناشی از نابودی و ازبین‌رفتن ساختار خاکدانه‌ای است (لیانگ و همکاران ۲۰۱۸). افزون بر این، افزایش جرم مخصوص ظاهری و کاهش ماده آلی در خاک‌های فرسایش‌یافته باعث افزایش هدایت حرارتی و کاهش ظرفیت گرمایی خاک می‌شود. همچنین، فرسایش تغییرات روزانه و فصلی دمای خاک را افزایش می‌دهد که این تغییرات حرارتی به‌طور غیرمستقیم موجب کاهش تنوع و عملکرد جوامع میکروبی می‌شود. زیرا، بسیاری از میکروب‌های خاک نسبت به تغییرات دمایی حساس هستند (گو و همکاران ۲۰۱۸).

در این پژوهش، با افزایش شدت فرسایش، کاهش تخلخل خاک قابل توجه بود، که بیانگر فشرده شدن خاک و ازبین‌رفتن فضای خالی میان ذرات است. این وضعیت باعث محدودیت جریان آب و هوا در خاک شده و محیط را برای فعالیت میکروبی و فرآیندهای زیستی نامناسب می‌کند (پلاتنیکووا و همکاران ۲۰۲۴). چنین تغییراتی در ویژگی‌های فیزیکی خاک هم کیفیت آن را کاهش می‌دهد هم پایداری بوم‌سازگان خشک را تهدید می‌کند. زیرا، خاک آب را کمتر جذب و ذخیره می‌کند و ظرفیت نگهداری پوشش گیاهی باقی‌مانده کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج پژوهش‌های پیشین ماده آلی نقش مهمی در تشکیل و تثبیت خاکدانه‌ها دارد و افزایش محتوای ماده آلی، موجب افزایش قابل توجه پایداری خاکدانه‌ها می‌شود (رزاچووا و همکاران ۲۰۲۱).

اثر فرسایش بادی بر ویژگی‌های شیمیایی خاک

بر اساس نتایج این پژوهش فرسایش بادی به‌طور مستقیم بر ویژگی‌های شیمیایی خاک اثرگذار بود که در نتیجه سبب تغییرات قابل توجهی بر فعالیت میکروبی خاک شد. با افزایش شدت فرسایش اندازه‌های کربن آلی، نیتروژن کل، و عناصر غذایی قابل‌دسترس از جمله پتاسیم و فسفر خاک کاهش یافت که نشان‌دهنده کاهش منابع غذایی میکروارگانیسم‌ها و کاهش ظرفیت خاک برای حفظ مواد مغذی است. این یافته‌ها با نتایج پیمنتال و بورگس (۲۰۱۳)، مندال و همکاران (۲۰۲۱) و مندال و همکاران (۲۰۲۳) هم راستا است. با افزایش شدت فرسایش، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، اندازهٔ عناصر غذایی و ماده آلی خاک کاهش یافت. این پدیده، ساختار خاک را ضعیف و کیفیت زیست‌محیطی آن را کاهش داد. کاهش ماده آلی خاک هم به‌دلیل شستشوی سطحی و هم به‌دلیل برداشت خاک سطحی و آشکار شدن افق‌های زیرین که از نظر مواد آلی فقیرتر هستند، رخ می‌دهد (مرادی و همکاران ۲۰۲۴). کاهش ماده آلی باعث اختلال در فعالیت‌های میکروبی خاک، کاهش ظرفیت نگهداری آب، کاهش پایداری خاکدانه‌ها و تغییر در pH خاک و

چرخه جذب و آزادسازی عناصر غذایی می‌شود (سان و همکاران ۲۰۲۱). فرسایش خاک، لایه سطحی خاک را که معمولاً بیشترین ظرفیت جذب و نگهداری آب را دارد، ازبین‌می‌برد و در نتیجه رطوبت کلی خاک کاهش می‌یابد. هم‌زمان، با نابودی خاکدانه‌های پایدار و ازبین‌رفتن ساختار مطلوب خاک، نفوذپذیری، تخلخل و ظرفیت نگهداری آب کاهش می‌یابد (گان و همکاران ۲۰۲۴). در اثر فرسایش ذرات ریز مانند رس و ماده آلی که نقش مهمی در نگهداری آب دارند، کاهش یافته و ظرفیت جذب آب خاک نیز کاهش می‌یابد. این فرآیند موجب کاهش رطوبت خاک در مناطق فرسایش‌یافته شده و شرایط نامطلوبی برای رشد گیاهان و فعالیت میکروبی فراهم می‌آید (نبی‌الهی و همکاران ۲۰۱۸). بر اساس نتایج پژوهش‌های پیشین تغییر کاربری زمین و فرسایش، به‌ویژه در بوم‌سازگان‌های خشک، موجب کاهش کیفیت شیمیایی خاک می‌شود. در این شرایط، کاهش عناصر غذایی و حذف خاک سطحی با تضعیف ساختار خاکدانه‌ها و کاهش ظرفیت نگهداری آب همراه است (وانگ و همکاران ۲۰۲۱). این تغییرات سبب کاهش فعالیت میکروبی خاک و کاهش توان بوم‌سازگان برای تثبیت خاک و نگهداری پوشش گیاهی می‌شود. همچنین، کاهش پتاسیم و فسفر قابل دسترس با افزایش فرسایش، به محدود شدن تغذیه گیاهان بومی و کاهش تنوع زیستی گیاهی منجر می‌شود. از سوی دیگر، افزایش هدایت الکتریکی خاک نشان‌دهنده تجمع نمک‌ها و تغییر ترکیب شیمیایی محیط است، که بر میکروارگانیسم‌ها اثرگذار بوده و در نتیجه ساختار جوامع میکروبی را تغییر می‌دهد (لوو و همکاران ۲۰۲۵). به‌طور همزمان این دو اثر، کاهش عناصر مغذی و افزایش شوری، بوم‌سازگان خشک را آسیب‌پذیرتر می‌کند و روند نابودی خاک و کاهش پایداری زیست‌محیطی را تسریع می‌کند (زمان و همکاران ۲۰۲۵).

نتایج این پژوهش نشان داد اثرات فرسایش بادی بر همه ویژگی‌های میکروبی خاک قابل توجه بود. در این پژوهش با افزایش شدت فرسایش، اندازهٔ تأثیرپذیری سنجه‌های بررسی‌شده نیز افزایش یافت. این یافته با نتایج کیو و همکاران (۲۰۲۱)، سلطانی طولارود و اصغری (۲۰۲۱) و لوو و همکاران (۲۰۲۵) هم راستا است. می‌توان نتیجه گرفت یکی از دلایل اصلی اثرات منفی شدت فرسایش بادی بر ویژگی‌های میکروبی خاک، کاهش ماده آلی و مواد مغذی است که منجر به کاهش تنوع و عملکرد جمعیت باکتری‌های خاک می‌شود. این کاهش باعث محدودیت دسترسی به منابع غذایی، کاهش فعالیت متابولیکی و تغییر ترکیب جمعیت باکتری‌ها شده و در نتیجه، کارکرد میکروارگانیسم‌های خاک و نقش آن‌ها در حفظ عملکرد خاک را مختل می‌کند (چن و همکاران ۲۰۲۰). کاهش آنزیم کاتالاز همراه با کاهش تنفس میکروبی پایه و تنفس برانگیخته با افزایش شدت فرسایش، نشان‌دهنده کاهش توان خاک در مقابله با فشار اکسیداتیو و کاهش فعالیت متابولیکی میکروارگانیسم‌ها است. این کاهش فعالیت‌های میکروبی، سبب محدودیت فرایندهای حیاتی چرخه‌های کربن و نیتروژن شده و ظرفیت خاک در تجزیه سریع مواد آلی و تثبیت مواد مغذی را کاهش می‌دهد و در نتیجه توانایی خاک برای نگهداری پوشش گیاهی و حفظ عملکرد بوم‌سازگان‌های خشک را مختل می‌کند (چائو و ژو ۲۰۲۵). بیشترین اندازهٔ فعالیت آنزیم کاتالاز در منطقه بدون فرسایش و با فرسایش کم مشاهده شد. شایان ذکر است آنزیم‌ها در عملکرد زیست‌شیمیایی خاک نقش بسیار مهمی دارند (لی و همکاران ۲۰۱۵). مواد آلی و عناصر غذایی در مناطق بدون فرسایش و یا با فرسایش کم باعث افزایش معنی‌دار فعالیت آنزیم کاتالاز می‌شود (ماکویی و نداکیمی ۲۰۰۸). برای معدنی شدن مواد آلی خاک به‌وسیلهٔ میکروارگانیسم‌های خاک، باید آنزیم‌هایی مانند کاتالاز هیدرولیز شوند. به این دلیل مناطق بدون فرسایش و مناطق رسوبی نقش مهمی در فرایند معدنی شدن کربن آلی دارند (کیرکلس و همکاران ۲۰۱۴). کاهش کربن و نیتروژن زیست‌توده میکروبی و جمعیت میکروارگانیسم‌ها با افزایش شدت فرسایش نشان‌دهنده کاهش تنوع و تراکم میکروبی است. این

کاهش عمدتاً ناشی از کاهش منابع آلی، کاهش تخلخل و رطوبت خاک، و کاهش ظرفیت جامعه میکروبی در ذخیره و بازچرخ نیتروژن در خاک‌های نابودشده است. افزون بر این، دسترسی محدود به کربن قابل مصرف و کاهش توان زیستی میکروارگانیسم‌ها بر این روند اثرگذار است (ژائو و همکاران ۲۰۲۵). در این پژوهش تغییرات سهم میکروبی خاک نسبت به کربن آلی قابل توجه نبود که بیانگر حفظ نسبتی از فعالیت زیستی میکروارگانیسم‌ها حتی در شرایط فرسایش شدید است. ازاین‌رو، با وجود کاهش مواد مغذی و فعالیت میکروبی، برخی فرایندهای حیاتی میکروبی در بوم‌سازگان‌های خشک همچنان فعال باقی می‌مانند (ژنگ و همکاران ۲۰۲۳). یافته‌های این پژوهش با نتایج مندل و جیری (۲۰۲۱)، ژائو و همکاران (۲۰۲۵) و کیو و همکاران (۲۰۲۱) هم راستا است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش در منطقه ایرانشهر نشان داد که فرسایش بادی اثرات گسترده و چندجانبه‌ای بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و میکروبی خاک در بوم‌سازگان‌های خشک دارد. افزایش شدت فرسایش باعث سبک‌تر شدن خاک، کاهش تخلخل و ظرفیت نگهداری آب و نابودی ساختار خاکدانه‌ها شد. در نتیجه سبب کاهش توانایی خاک در نگهداری پوشش گیاهی و فعالیت میکروبی شد. کاهش محسوس کربن و نیتروژن کل، پتاسیم و فسفر قابل دسترس، همراه با افزایش هدایت الکتریکی، نشان‌دهنده کاهش منابع غذایی میکروارگانیسم‌ها و تغییرات ترکیب شیمیایی محیط بود که سبب وارد آمدن فشار قابل توجهی بر جوامع میکروبی شد. این تغییرات با کاهش فعالیت آنزیم کاتالاز، کاهش تنفس میکروبی پایه و برانگیخته و کاهش جمعیت و زیست‌توده میکروبی همراه بود. با این حال، سهم میکروبی خاک نسبت به کربن آلی تا حدی حفظ شد که بیانگر آن بود که حتی در شرایط فرسایش شدید برخی فرایندهای حیاتی میکروبی ادامه دارند. یافته‌های این پژوهش بر اهمیت فرسایش بادی به‌عنوان عامل محدودکننده پایداری بوم‌سازگان‌های خشک در ایرانشهر تأکید دارد. ازاین‌رو، بر اساس نتایج این پژوهش اجرای اقدامات مدیریت جامع خاک و حفاظت از پوشش گیاهی و پیشنهاد می‌شود. افزون بر این، به‌منظور بهبود ساختار، فعالیت میکروبی خاک و عملکرد بوم‌سازگان‌های خشک، اعمال تدابیر حفاظتی شامل تثبیت خاک با پوشش گیاهی مقاوم به خشکی، جلوگیری از چرای بیش از حد، کاهش شخم‌زنی و افزایش ماده آلی خاک، پیشنهاد می‌شود.

سپاس‌گزاری

نویسندگان این مقاله از دانشگاه زابل به‌دلیل حمایت مالی (Grant code: IR-UOZ-GR-8721) در انجام این پژوهش سپاسگزاری می‌کنند.

تضاد منافع نویسندگان

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

دسترسی به داده‌ها

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

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری، نگارش نسخهٔ اولیهٔ مقاله
نویسنده دوم: ویرایش و بازبینی نتایج
نویسنده سوم: بازبینی متن مقاله

فهرست منابع

Abu-Hamdeh NH, Reeder RC. 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

Acosta-Martinez V, Van Pelt S, Moore-Kucera J, Baddock MC, Zobeck TM. 2015. Microbiology of wind-eroded sediments: Current knowledge and future research directions. Aeolian Research. 18: 99–113. https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2015.06.001

Bastani M, Sadeghipour A, Kamali N, Zarafshar M, Bazot S. 2023. How does livestock graze management affect woodland soil health?. Frontiers in Forests and Global Change, 6, 1028149. https://doi.org/10.3389

Cao Y, Zhu T. 2025. Changes in soil properties shape how microbes mediate soil carbon sequestration under nitrogen addition. Journal of Cleaner Production. 514: 45819.
https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145819

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

Chen Q, Dong J, Zhu D, Hu H, Delgado-Baquerizo M, Ma Y, He JZ, Zhu YG. 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

Colazo JC, Buschiazzo D. 2015. The impact of agriculture on soil texture due to wind erosion. Land Degradation and Development, 26(1): 62–70. https://doi.org/10.1002/ldr.2297

Creamean JM, Suski KJ, Rosenfeld D, Cazorla A, DeMott PJ, Sullivan RC, White AB, Ralph FM, Minnis P, Comstock JM, Tomlinson, JM, Prather KA. 2013. Dust and biological aerosols from the Sahara and Asia influence precipitation in the Western U.S. Science. 339(6127):1572–1578.
https://doi.org/10.1126/science.1227279

Diallo ID, Tilioua A, Darraz C, Alali A, Sidibe D. 2023. Study and analysis of seasonal soil degradation in Lower Guinea and Forest Guinea. Results in Engineering. 19: 101381. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101381

Dorudi H, Khosroshahi M, Shahabi M. 2024. Investigating of climatic elements affecting the sand dunes activity and sensitivity analysis using the Lancaster index (Case study: Iranshahr). Spatial Analysis Environmental Hazards. 11(3):1–20. (In Persian). https://doi.org/10.61186/jsaeh.11.3.2

Dou X, Ma X, Zhao C, Li J, Yan Y, Zhu J. 2022. Risk assessment of soil erosion in Central Asia under global warming. Catena. 212: 106056.
https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106056

Gan F, Shi H, Gou J, Zhang L, Dai Q, Yan Y. 2024. Responses of soil aggregate stability and soil erosion resistance to different bedrock strata dip and land use types in the karst trough valley of Southwest China. International Soil and Water Conservation Research. 12(3): 684–696. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.09.002

Guo X, Feng J, Shi Z, Zhou X, Yuan M, Tao X, Hale L, Yuan T, Wang J, Qin Y, Zhou A, Fu Y, Wu L, He Z, Nostrand J, Ning D, Liu X, Luo X, Tiedje J, Yang Y, Zhou J. 2018. Climate warming leads to divergent succession of grassland microbial communities. Nature Climate Change. 8(9): 813–818. https://doi.org/10.1038/s41558-018-0254-2

Iturri LA, Buschiazzo DE. 2023. Interactions between wind erosion and soil organic carbon. In Agricultural Soil Sustainability and Carbon Management. Academic Press. pp. 163–179. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95911-7.00005-0

Kheirabadi H, Mahmoodabadi M, Jalali V, Naghavi H. 2018. Sediment flux, wind erosion and net erosion influenced by soil bed length, wind velocity and aggregate size distribution. Geoderma. 323: 22–30. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.02.042

Kirkels FMSA, Cammeraat LHN, Kuhn J. 2014. The fate of soil organic carbon upon erosion, transport and deposition in agricultural landscapes: A review of different concepts. Geomorphology. 226: 94–105. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.07.023

Li Z, Xiao H, Tang Z, Huang J, Nie X, Huang B, Ma W, Lu Y, Zeng G. 2015. Microbial responses to erosion-induced soil physico-chemical property changes in the hilly red soil region of southern China. European Journal of Soil Biology. 71: 37–44. https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2015.10.003

Liang Y, Lal R, Guo S, Liu R, Hu Y. 2018. Impacts of simulated erosion and soil amendments on greenhouse gas fluxes and maize yield in Miamian soil of central Ohio. Scientific Reports. 8(1): 520. https://doi.org/10.1038/s41598-017-18922-6

Luo S, Yuan J, Song Y, Ren J, Qi J, Zhu M, Feng Y, Li M, Wang B, Li X, Song C. 2025. Elevated salinity decreases microbial

communities' complexity and carbon, nitrogen and phosphorus metabolism in the Songnen Plain wetlands of China. Water Research. 276: 123285.
https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123285

Mai Z, Chen Q, Wang L, Zhang J, Cheng H, Su H, Zhang S, Li J. 2024. Bacterial carbonic anhydrase-induced carbonates mitigate soil erosion in biological soil crusts. Journal of Environmental Management. 352: 120085. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120085

Makoi JH, Ndakidemi PA. 2008. Selected soil enzymes: Examples of their potential roles in the ecosystem. African Journal of Biotechnology. 7: 181–191. https://doi.org/10.4314/ajb.v7i3.58355

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

Mandal D, Giri N. 2021. Soil erosion and policy initiatives in India. Current Science. 120(6): 1007–1012. https://www.jstor.org/stable/27310319

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

Nabiollahi K, Golmohamadi F, Taghizadeh-Mehrjardi R, Kerry R, Davari M. 2018. Assessing the effects of slope gradient and land use change on soil quality degradation through digital mapping of soil quality indices and soil loss rate. Geoderma. 318: 16–28. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.024

Owens PN. 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. https://doi.org/10.1007/s11368-020-02815-9

Pimentel D, Burgess M. 2013. Soil erosion threatens food production. Agriculture. 3: 443–463. https://doi.org/10.3390/agriculture3030443

Plotnikova OO, Demidov VV, Farkhodov YR, Tsymbarovich PR, Semenkov IN. 2024. Influence of water erosion on soil aggregates and organic matter in arable Chernozems: Case study. Agronomy. 14(8):1607. https://doi.org/10.3390/agronomy14081607

Qiu L, Zhang Q, Zhu H, Reich 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

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. https://doi.org/10.1038/s41598-021-91653-x

Salawu-Rotimi A, Lebre PH, Vos HC, Fister W, Kuhn N, Eckardt FD, Cowan DA. 2021. Gone with the Wind: microbial communities associated with dust from emissive farmlands. Microbial Ecology. 82: 859–869. https://doi.org/10.1007/s00248-021-01717-8

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

Sirjani E, Sameni A, Mahmoodabadi M, Moosavi AA, Laurent B. 2024. In-situ wind tunnel experiments to investigate soil erodibility, soil fractionation and wind-blown sediment of semi-arid and arid calcareous soils. Catena. 241: 108011. https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108011

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

Sun J, Fu B, Zhao W, Liu S, Liu G, Zhou H, Shao X, Chen Y, Zhang Y, Dend Y. 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

Tanner S, Ben-Hur M, Argaman E, Katra I. 2023. The effects of soil properties and aggregation on sensitivity to erosion by water and wind in two Mediterranean soils. Catena. 221:106787.
https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106787

Wang BR, An SS, Liang C, Liu Y, Kuzyakov Y. 2021. Microbial necromass as the source of soil organic carbon in global ecosystems. Soil Biology and Biochemistry. 162: 108422. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108422

Zainuddin SNH, Ariffin EH, Taslin PN A, Dong WS, Ramli MZ, Abdul Maulud KN, Awang NA, Nadzri MI, Ibrahim MSI, Ratnayake AS. 2024. Sand dune restoration as sustainable natural architectural design for coastal protection along seasonal storm-prone beach. Results in Engineering. 22: 102149. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102149

Zaman W, Ayaz A, Puppe D. 2025. Biogeochemical cycles in plant–soil systems: significance for agriculture, interconnections, and anthropogenic disruptions. Biology. 14(4): 433. https://doi.org/10.3390/biology14040433

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

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. https://doi.org/10.1186/s13717-024-00574-w

Zolfaghari F, Shojaei S, Khosravi H, Bandak, I. 2024. Evaluation of the effect of the mixture of soil textural compounds on the strength of the soil crust: coding and optimization. Results in Engineering. 22: 101988. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101988

Zuo X, Zhang C, Zhang X, Wang R, Zhao J, Li W. 2024. Wind tunnel simulation of wind erosion and dust emission processes, and the influences of soil texture. International Soil and Water Conservation Research. 12(2): 455–466. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.08.005

Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

Watershed Management Research

ISSN: 2981- 2038

Agricultural Research, Education and Extension Organization

Analysis of the Impacts of Wind Erosion on the Chemical and Microbial Properties of Soil in the Dryland Ecosystem of Iranshahr, Sistan and Baluchestan Province

Morteza Saberi*[1], Mohammad Reza Dahmardeh Ghaleno[2], Rasool Khatibi[3]

1 and 2- Associate Professor, Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

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

Extended Abstract

Introduction and Goal

Soil degradation is closely related to the increased wind erosion, which is a major environmental challenge worldwide, especially in arid and semi-arid regions. Because, in these areas, soils have low cohesion and their structure is unstable and vegetation cover is sparse. In addition to the widespread effects of wind erosion on climate, air quality, and human health on a global scale, fine organic particles present on the soil surface are displaced and destroyed by this phenomenon. This process leads to a significantly reduces nutrient reserves, reduces fertility, and destroys the physical and biological structure of the soil. Considering the arid climatic conditions of the Iranshahr region in Sistan and Baluchestan Province and the effective role of strong winds in increasing wind erosion, investigating the consequences of this phenomenon on changes in soil properties is of particular importance. Therefore, this study aimed to investigate the consequences of wind erosion on the physical, chemical, and microbial properties of the soil of arid ecosystems in Iranshahr.

Materials and Methods

In the present study, based on field visits, field observations, and erosion maps of the region, the intensity of soil erosion as the main treatment was categorized into four levels: no erosion, low, moderate, and severe erosion. To investigate the effects of these treatments on soil property variations, sampling was conducted in the Rahmatabad watershed of Iranshahr using a completely randomized design in June 2023. At each erosion level, four homogeneous sites with approximately similar physiographic conditions were selected, and five soil samples were collected from each site at a depth of 0–30 cm. The samples were combined using a composite method. Some of the samples were transported to the laboratory immediately after harvest in sealed containers to measure biological properties, while maintaining the initial humidity, and stored in a refrigerator.

Article Type: Research Article
***Corresponding Authors' E-mail:** Mortezasaberi@uoz.ac.ir
Citation: Saberi, M., Dahmardeh Ghaleno, M.R., Khatibi, R. 2026. Analysis of the Impacts of Wind Erosion on the Chemical and Microbial Properties of Soil in the Dryland Ecosystem of Iranshahr, Sistan and Baluchestan Province. Watershed Management Research. 39(1): 64-83.
DOI: 10.22092/WMRJ.2025.370497.1630
Received: 23 August 2025, **Received in revised form:** 01 September 2025, **Accepted:** 22 September 2025
Published online: 21 March 2026
Watershed Management Research, Vol. 39, No.1, Ser. No: 150, Spring 2026, pp. 64-83.
Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center
©Author(s)

The other part was prepared for determination of physical and chemical properties after drying in the open air and passing through a 2 mm sieve. Physical properties including soil texture, bulk density, and porosity; chemical properties included organic carbon, total nitrogen, available phosphorus and potassium, pH, and electrical conductivity; and microbial properties included catalase enzyme activity, basal and induced microbial respiration, microbial biomass carbon and nitrogen, and microbial contribution were evaluated. Data were analyzed using one-way analysis of variance (ANOVA) in SPSS version 26, and mean comparisons were performed using Duncan's multiple range test at a 95% confidence level. Additionally, correlations among the studied properties were evaluated using R software.

Results and Discussion

The research findings showed that the effect of wind erosion intensity on the physical, chemical, and microbial properties of the soil was significant. Data analysis revealed that as erosion intensity increased, organic carbon and total nitrogen decreased significantly. Soil organic carbon decreased from 0.59% in non-eroded areas to 0.16% and total nitrogen decreased from 0.063 to 0.016% in severely eroded areas. Also, the sensitivity of available potassium and phosphorus to erosion was very high, with potassium decreasing from 161.3 to 79 mg/kg and available phosphorus decreasing from 8.32 mg/kg to 3.45 mg/kg, which was probably due to the movement of fine, nutrient-rich particles by the wind. Soil electrical conductivity of the soil increased with increasing erosion intensity from 0.54 dS/m in areas without erosion to 0.93 dS/m in severely eroded areas. Soil bulk density also increased from 1.36 to 1.58 g/cm³ and the porosity decreased from 46.6% to 33.2%, indicating greater soil compaction and degradation of soil aggregate structure. The decrease in catalase enzyme activity, basal and stimulated microbial respiration, biomass nitrogen, and microbial population was significant ($p< 0.01$) with increasing erosion intensity. These findings indicated limited food resources and reduced metabolic activity of microorganisms. However, change in biomass carbon to nitrogen ratio and soil microbial contribution were not significant ($p < 0.05$). This finding indicated the relative stability of some microbial processes even under severe erosion conditions. The results of this study showed that wind erosion reduced both the quality and quantity of soil nutrients and organic matter, and had a severe impact on soil structure and microbial activity. Therefore, these indices can be used as appropriate criteria for evaluating the effects of wind erosion in arid ecosystems, especially in Iranshahr. Correlation analysis showed that the effect of soil erosion on microbial characteristics was very negative. The correlation of catalase enzyme activity (−0.96), microbial respiration (−0.96), microbial carbon biomass (−0.95) and nitrogen (−0.98), and microorganism population (−0.98) with erosion intensity was very high and negative. Biological indicators functioned in a dependent manner, such that the relationship between the biomass carbon to nitrogen ratio and the microbial contribution was highly positive (0.92). These findings confirmed the reduction in the performance of the soil microbial network under the influence of erosion.

Conclusion and Suggestions

The results of the study in Iranshahr indicated that the best physical, chemical, and microbial soil conditions were observed in the treatment without erosion. The lowest specific gravity, highest porosity, highest water retention capacity, and highest soil microbial activity were related to the aforementioned treatment. As erosion intensity increased from low to high, soil quality steadily decreased; so that under conditions of high erosion, the greatest destruction of soil structure, reduction of available carbon, nitrogen, potassium, and phosphorus, and increase in electrical conductivity were observed. These findings indicated that optimal stability of the structure and function of dryland ecosystems is possible under conditions where minimal or no erosion occurs. Therefore, based on the results of this study, it is recommended to protect vegetation cover, reduce overgrazing, reduce plowing, and increase organic matter to prevent soil from entering advanced stages of erosion.

Keywords: **Catalase enzyme activity, drylands, microbial diversity, organic carbon, wind erosion**

Article Type: Research Article

Acknowledgement
The authors of this article would like to thank the University of Zabol for financial support (Grant code: IR-UOZ-GR-8721) in conducting this research.

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: Conceptualization, conducting qualitative/statistical analyses, drafting the initial version of the manuscript
Author 2: Editing and reviewing the results
Author 3: Reviewing the manuscript