

Comparison of Soil Biological Indicators under Different Agricultural Land-Uses

Ahmed Abdulhamza Khamees and Hojat Emami*

Department of Soil Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

* Corresponding author, Email: hemami@um.ac.ir

Abstract

Background and Objective: Soil biological indicators are sensitive to changes in land use and management practices, and are valuable for assessing agricultural soils. Despite their importance, the responses of them to different agricultural land uses in arid environments remains limited. Therefore, this research was performed to evaluate the effects of four agricultural land-uses on soil biological indicators -especially those associated to microbial activity and carbon and nitrogen dynamics- in arid conditions.

Materials and Methods: This research was performed in the Al-Yousifiya area (45 km south of Baghdad, Iraq) in April 2025. Soil samples were collected from depth 0–20 cm of four agricultural land-uses with three replicates. 11 biological indicators associated with soil carbon and nitrogen dynamics and microbial activity were measured including organic carbon, total nitrogen, bacterial abundance, particulate organic matter, active carbon, basal respiration, microbial biomass carbon and nitrogen, potential mineralizable nitrogen, microbial quotient, and metabolic quotient. The data were analyzed using analysis of variance (ANOVA), followed by mean comparisons using Tukey's HSD at $p < 0.05$.

Results: Land-use type significantly influenced soil biological indicators. The apple orchard had the highest soil organic carbon, particulate organic matter, active carbon, microbial biomass carbon, total nitrogen, microbial biomass nitrogen ($15.2 \mu\text{gN g}^{-1}$), basal respiration ($0.74 \text{ mgCO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$), and microbial quotient ($48.73 \text{ mgC}_{\text{mic}} \text{ mg}^{-1}\text{C soil}$), and the potato field exhibited the lowest values for most biological indicators and the highest metabolic quotient.

Conclusion: Land-use type and management practices significantly influenced soil biological indicators and carbon and nitrogen cycling in Al-Yousifiya area. Among the studied land-uses, the apple orchard showed the most favorable biological condition. Intensive cultivation, particularly cultivation of potato (twice a year) field under conventional tillage practice, was associated with lower biological activity.

Keywords: Land use, soil biological indicators, soil respiration, microbial biomass, potentially mineralizable nitrogen.

مقایسه شاخص‌های زیستی خاک در کاربری‌های مختلف کشاورزی

احمد عبدالحمزه خمیس و حجت امامی*

گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: hemami@um.ac.ir

چکیده

پیشینه پژوهش و اهداف: شاخص‌های زیستی خاک به تغییرات کاربری زمین و شیوه‌های مدیریتی حساس بوده و برای ارزیابی خاک‌های کشاورزی ارزشمند هستند. با وجود اهمیت این شاخص‌ها، پاسخ آن‌ها به کاربری‌های مختلف کشاورزی در محیط‌های خشک محدود است. این پژوهش برای ارزیابی اثرات چهار نوع کاربری کشاورزی بر شاخص‌های زیستی خاک منتخب مرتبط با فعالیت میکروبی و پویایی کربن و نیتروژن در شرایط خشک انجام شد.

مواد و روش‌ها: این پژوهش در منطقه الیوسفیه (۴۵ کیلومتری جنوب بغداد، عراق) عراق، در اواخر فروردین ۱۴۰۴ انجام شد و نمونه‌های خاک از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری چهار نوع کاربری در سه تکرار جمع‌آوری شدند. بارده شاخص بیولوژیکی مرتبط با پویایی کربن و نیتروژن خاک و فعالیت میکروبی شامل کربن آلی، نیتروژن کل، فراوانی باکتری‌های قابل کشت، ماده آلی ذره‌ای، کربن فعال، تنفس پایه، کربن و نیتروژن زیست‌توده میکروبی، پتانسیل معدنی شدن نیتروژن، بهره میکروبی و ضریب متابولیکی جامعه میکروبی اندازه‌گیری شد. داده‌ها با استفاده از آنالیز واریانس تجزیه شدند و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون توکی در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث: نوع کاربری زمین تأثیر معنی‌داری بر شاخص‌های بیولوژیکی خاک داشت. کاربری باغ‌داری بیشترین مقادیر کربن آلی خاک، ماده آلی ذره‌ای، کربن فعال، کربن زیست‌توده میکروبی (6.26 mgC g^{-1})، نیتروژن کل، نیتروژن زیست‌توده میکروبی ($15.2 \text{ } \mu\text{gN g}^{-1}$)، تنفس پایه ($0.74 \text{ mgCO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) و بهره میکروبی ($48.73 \text{ mgC}_{\text{mic}} \text{ mg}^{-1} \text{ C soil}$) و مزرعه سیب‌زمینی دارای کمترین مقادیر اکثر شاخص‌های بیولوژیکی و بالاترین ضریب متابولیکی جامعه میکروبی بود.

نتیجه‌گیری: نوع کاربری زمین و شیوه‌های مدیریتی به‌طور قابل توجهی بر شاخص‌های بیولوژیکی خاک و چرخه کربن و نیتروژن در منطقه الیوسفیه تأثیر داشت. در میان انواع کاربری‌های مورد مطالعه، باغ سیب دارای شرایط مطلوب و کشت فشرده، به‌ویژه کشت سیب‌زمینی دو بار در سال با شخم مرسوم، با کاهش فعالیت زیستی خاک همراه بود.

واژه‌های کلیدی: کاربری اراضی، شاخص‌های زیستی خاک، تنفس پایه میکروبی، زیست‌توده میکروبی، کربن آلی.

می‌کنند (Blanco-Canqui & Ruis, 2018; Owliaie et al., 2025).

شاخص‌های زیستی خاک از جمله کربن و نیتروژن زیست‌توده میکروبی (MBC و MBN) تنفس پایه میکروبی (BR)، نیتروژن بالقوه قابل معدنی‌شدن (PMN)، کربن فعال (AC)، بهره میکروبی (qMic) و ضریب متابولیسی جامعه میکروبی (qCO₂)، اطلاعات ارزشمندی درباره جامعه میکروبی، فعالیت آن و نحوه گردش کربن و نیتروژن در خاک فراهم می‌کنند (Anderson & Domsch, 1990; Bhaduri et al., 2022). زیست‌توده میکروبی نشان‌دهنده بخش فعال جامعه میکروبی است، درحالی‌که تنفس میکروبی بیانگر شدت فعالیت و تجزیه ترکیبات آلی می‌باشد (Menta et al., 2018). همچنین، شاخص‌های qCO₂ و qMic بیانگر چگونگی تخصیص کربن بین رشد میکروبی و اتلاف آن از طریق تنفس هستند و برای ارزیابی کارایی عملکردی جامعه میکروبی اهمیت دارند. این شاخص‌های زیستی به شدت تحت تأثیر نوع کاربری زمین و شیوه‌های مدیریت قرار می‌گیرند؛ به‌طوری‌که سیستم‌های زراعی فشرده با کاهش ورودی مواد آلی و افزایش اختلال خاک، می‌توانند موجب کاهش فعالیت میکروبی و تغییر در پویایی چرخه عناصر شوند، درحالی‌که سیستم‌های دارای پوشش گیاهی دائمی با افزایش منابع آلی، شرایط مناسب‌تری برای حفظ فعالیت زیستی خاک فراهم می‌کنند (Tian et al., 2023; Blanco-Canqui & Ruis, 2018). با وجود مطالعات متعدد درباره کاربرد شاخص‌های زیستی برای ارزیابی کیفیت خاک، هنوز مشخص نیست که شاخص‌های مختلف زیستی در مواجهه با سیستم‌های متفاوت کاربری و مدیریت اراضی تا چه اندازه الگوهای پاسخ مشابه یا متفاوتی نشان می‌دهند. این موضوع به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک اهمیت دارد، زیرا محدودیت رطوبت، ورودی پایین ماده آلی و شدت بالای بهره‌برداری می‌تواند نحوه پاسخ جامعه میکروبی و فرایندهای مرتبط با چرخه کربن و نیتروژن را تغییر دهد. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که شاخص‌هایی مانند زیست‌توده میکروبی، تنفس و qCO₂ می‌توانند حساسیت متفاوتی به تغییرات کاربری

خاک به‌عنوان یک سامانه زنده، پیچیده و پویا، نقش اساسی در پایداری نظام‌های کشاورزی و زیست‌محیطی ایفا می‌کند و از طریق تنظیم چرخه عناصر غذایی، ذخیره کربن، تصفیه آب و حمایت از تنوع زیستی، عملکردهای مهم اکولوژیکی را در اکوسیستم‌های خشکی فراهم می‌سازد (Sharma et al., 2025). نقش خاک تنها به تولید محصولات کشاورزی محدود نمی‌شود، بلکه شامل حفظ تعادل اکولوژیکی و پایداری استفاده از اراضی و منابع طبیعی نیز می‌گردد (Yakovlev et al., 2009). در دهه‌های اخیر، توجه به ویژگی‌ها و شاخص‌های زیستی خاک به‌عنوان ابزارهای حساس برای ارزیابی تغییرات ناشی از مدیریت اراضی افزایش یافته است؛ زیرا این شاخص‌ها ارتباط مستقیمی با فعالیت میکروبی، تجزیه ماده آلی و چرخه عناصر غذایی دارند (Karlen et al., 2003; Samaei et al., 2022; Azarmi-Atajan & Rostampour, 2025). افزایش فشارهای ناشی از توسعه کشاورزی و بهره‌برداری شدید از زمین، موجب تغییر در ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک شده و می‌تواند عملکرد بلندمدت سامانه‌های کشاورزی را تحت تأثیر قرار دهد (Arshad & Martin, 2002; Jafarnejhadi & Meskini- vishkaee, 2024). مدیریت‌های غیرپایدار کشاورزی، به‌ویژه شخم مکرر و کاهش ورودی‌های آلی با کاهش ماده آلی، افزایش اختلال خاک و کاهش فعالیت زیستی همراه هستند (Andrews et al., 2002; Tian et al., 2023). کاربری‌های مختلف اراضی کشاورزی به دلیل تفاوت در مدیریت، میزان ورودی مواد آلی و شرایط رشد گیاه، تأثیر متفاوتی بر ویژگی‌های زیستی خاک دارند. سیستم‌های زراعی مانند گندم و سیب‌زمینی، از نظر شدت عملیات خاک‌ورزی و مدیریت بقایای گیاهی، با سیستم‌های دائمی مانند باغات و همچنین اراضی آیش تفاوت دارند (Maghami Moghim et al., 2024). مطالعات نشان داده‌اند که سیستم‌های کشاورزی فشرده می‌توانند سبب کاهش ذخایر کربن آلی و تغییر شرایط زیستی خاک شوند، درحالی‌که سیستم‌های دائمی، به‌ویژه باغات، با افزایش ورودی بقایای گیاهی و کاهش اختلال خاک، محیط مناسب‌تری برای فعالیت میکروبی فراهم

و مدیریت داشته باشند (Mganga et al., 2024; Okolo et al., 2020). با این حال، ارزیابی همزمان شاخص‌های مرتبط با ذخیره و فعالیت میکروبی کربن و نیتروژن و شاخص‌های مشتق شده از آن‌ها در سیستم‌های کشاورزی متداول مناطق خشک عراق کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو، یک رویکرد چند شاخصی می‌تواند مشخص کند که آیا تفاوت‌های کاربری اراضی صرفاً با تغییر در اندازه زیست‌توده میکروبی همراه هستند یا اینکه به تغییر در فعالیت متابولیکی، پویایی کربن و نیتروژن و نسبت بین زیست‌توده و فعالیت میکروبی نیز منجر می‌شوند. بنابراین، هدف این پژوهش مقایسه جامع پاسخ شاخص‌های زیستی خاک در چهار سیستم متفاوت کاربری و مدیریت اراضی شامل باغ سیب، کشت گندم، کشت سیب‌زمینی و اراضی آیش در منطقه الیوسفیه در جنوب بغداد بود. به‌طور مشخص، این مطالعه با هدف تعیین الگوی پاسخ شاخص‌های مرتبط با زیست‌توده و فعالیت میکروبی، بررسی تغییرات مرتبط با پویایی کربن و نیتروژن، و شناسایی شاخص‌هایی انجام شد که بیشترین حساسیت را به تفاوت‌های کاربری و مدیریت اراضی در شرایط خشک تا نیمه‌خشک نشان می‌دهند.

مواد و روش‌ها

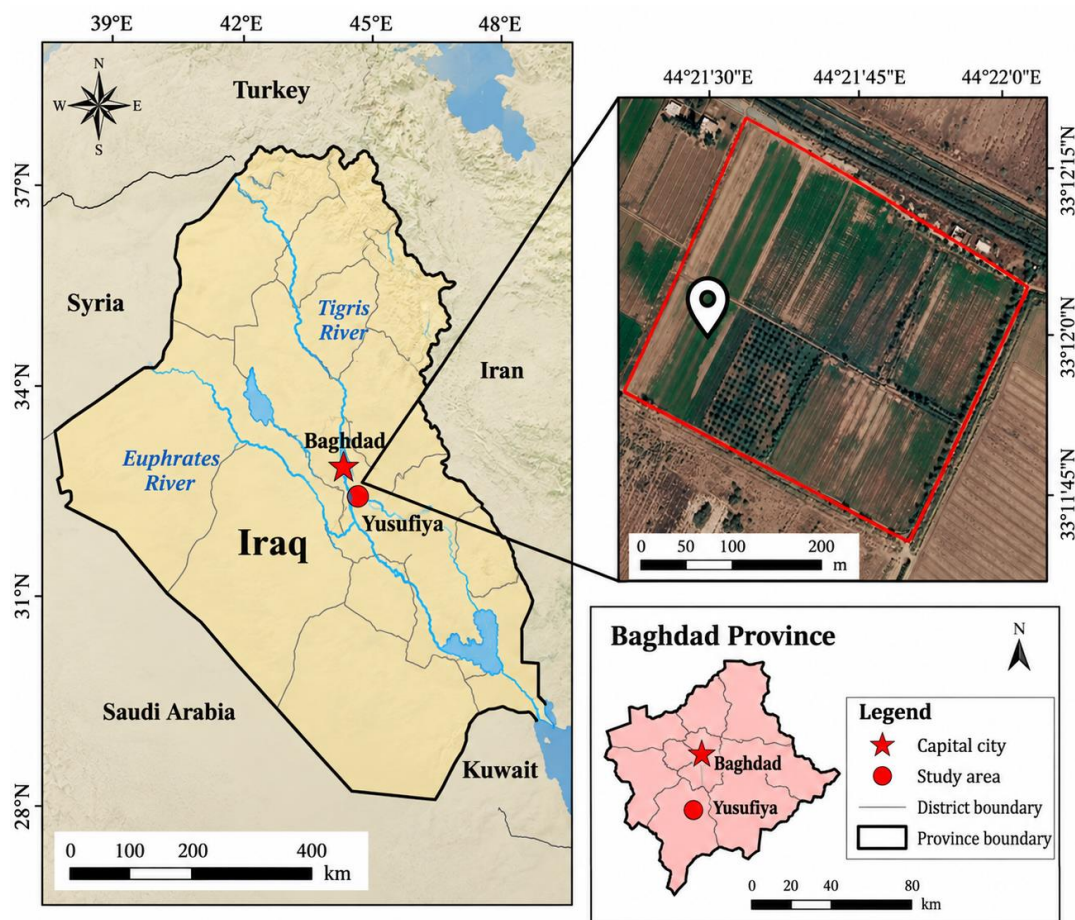
منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در اراضی کشاورزی شهر الیوسفیه، واقع در ۴۵ کیلومتری جنوب بغداد، عراق انجام شد. مساحت منطقه مورد مطالعه حدود ۱۲ هکتار است. این منطقه در مختصات جغرافیایی $33^{\circ}11'45''$ شمالی و $44^{\circ}21'30''$ شرقی و در ارتفاع متوسط $34/1$ متر از سطح دریا قرار دارد. خاک‌های منطقه مورد مطالعه عمدتاً دارای بافت رسی هستند. بر اساس داده‌های اقلیمی مربوط به دوره ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۵، منطقه دارای اقلیم خشک است. میانگین دمای سالانه $23/28$ درجه سانتی‌گراد بوده و میانگین دمای ماهانه از $9/8$ درجه سانتی‌گراد در ژانویه تا $35/5$ درجه سانتی‌گراد در ژوئیه متغیر است. همچنین، میانگین بارندگی سالانه $119/65$ میلی‌متر گزارش شده است و بارندگی ماهانه از $1/0$ میلی‌متر در

سپتامبر تا $24/5$ میلی‌متر در ژانویه متغیر است (Al-Dabbas & Razzaq, 2017).

طرح آزمایشی و نمونه‌برداری

این پژوهش به‌صورت یک مطالعه مقایسه‌ای با چهار کاربری اراضی در آوریل ۲۰۲۵ انجام شد. در این طرح، چهار نوع کاربری اراضی رایج در منطقه در نظر گرفته شد. کاربری‌های مورد مطالعه شامل مزرعه گندم، مزرعه سیب‌زمینی، باغ سیب و زمین آیش بود. کاربری زراعی گندم شامل مزرعه‌ای بود که طی سه سال متوالی در آن گندم کشت شد و کشت قبلی آن سیب‌زمینی بود. در این مزرعه عملیات آماده‌سازی زمین با استفاده از سیستم شخم مرسوم انجام شده و کشت محصول به‌صورت سالانه تکرار شده است. در سال انجام نمونه‌برداری، مقدار 120 کیلوگرم در هکتار اوره و 200 کیلوگرم در هکتار دی‌آمونیم فسفات در مزرعه گندم استفاده شد. میزان برداشت محصول در سال انجام نمونه‌برداری $3/6$ تن در هکتار بود. کاربری زراعی سیب‌زمینی شامل مزرعه‌ای است که طی سه سال متوالی زیر کشت سیب‌زمینی قرار داشت و کشت قبلی آن کاهو بود. در این مزرعه نیز عملیات خاک‌ورزی بر پایه سیستم شخم مرسوم انجام شد و کشت محصول دو بار در سال (بهار و پاییز) صورت گرفته بود. در سال انجام نمونه‌برداری، مقدار 200 کیلوگرم در هکتار اوره و 400 کیلوگرم در هکتار دی‌آمونیم فسفات در کاربری سیب‌زمینی استفاده شد. میزان برداشت محصول در کشت بهاره 40 تن در هکتار و در کشت پاییزه 36 تن در هکتار بود. کاربری باغی شامل باغ سیب ۶ ساله با پوشش گیاهی دائمی و فاصله هر درخت ۵ متر بود. در این کاربری عملیات خاک‌ورزی انجام نشده و مدیریت آن به‌صورت بدون شخم بود. در سال انجام نمونه‌برداری، مقدار 15 کیلوگرم کود دامی به‌ازای هر درخت و 500 گرم به‌ازای هر درخت دی‌آمونیم فسفات در کاربری سیب‌زمینی استفاده شد. و کاربری آیش که در آن زمین به‌مدت سه سال متوالی بدون کشت و بدون انجام عملیات خاک‌ورزی بود. از آنجاکه کاربری‌های مورد مطالعه سیستم‌های مدیریتی



شکل ۱. موقعیت مکانی کاربری‌های اراضی مورد مطالعه

Figure 1. Location of the studied land-use types

فیزیکی و شیمیایی هوا خشک شده و پس از کوبیدن، از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. بخش دیگر برای تعیین شاخص‌های زیستی خاک، پس از عبور اولیه از الک ۲ میلی‌متری تا زمان اندازه‌گیری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد در یخچال نگهداری شدند.

اندازه‌گیری ویژگی‌های زیستی خاک

در این پژوهش ۱۱ ویژگی زیستی خاک اندازه‌گیری یا محاسبه شد. مقدار کربن آلی خاک (OC) با استفاده از روش والکلی-بلاک (Walkley & Black, 1934) و نیتروژن کل خاک (TN^1) با استفاده از روش کج‌لدال اندازه‌گیری شدند (Bremner &

موجود در شرایط واقعی بودند، نمی‌توان اثر عوامل مدیریتی و محیطی همراه با هر کاربری را به‌طور کامل از اثر نوع کاربری تفکیک کرد. بنابراین، نتایج این مطالعه بیانگر تفاوت ویژگی‌های خاک بین سیستم‌های مختلف کاربری و مدیریت اراضی است و نمی‌توان صرفاً ناشی از تغییر کاربری تفسیر نمود.

در هر یک از کاربری‌های اراضی، از سه نقطه (به‌عنوان تکرار) نمونه‌برداری شد. در هر نقطه، پنج زیرنمونه به‌صورت تصادفی و در امتداد مسیر زیگزواگی از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری خاک برداشت و پس از اختلاط کامل، به‌عنوان یک نمونه مرکب در نظر گرفته شد. پس از انتقال به آزمایشگاه، نمونه‌ها به دو بخش تقسیم شدند. بخشی از نمونه‌ها برای اندازه‌گیری ویژگی‌های

(Mulvaney, 1983). کربن فعال خاک (AC^2) با روش پرمنگنات پتاسیم با استفاده از اسپکتروفتومتر تعیین شد (Weil et al., 2003). برای تعیین ماده آلی ذره‌ای خاک (POM^3)، ۱۰ گرم خاک هوا خشک کوچکتر از ۲ میلی‌متر با محلول ۵ درصد هگزامتافسفات سدیم به مدت ۱۸ ساعت شیک شده و سپس از الک ۵۳ میکرومتر عبور داده شد. سپس مواد باقی‌مانده ابتدا در ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک و در ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد خاکستر شد، و در نهایت مقدار POM بر اساس کاهش وزن بر حسب گرم بر کیلوگرم خاک محاسبه گردید (Cambardella & Elliott, 1993).

فراوانی باکتری‌های قابل کشت (BA^4) با استفاده از روش شمارش واحدهای تشکیل‌دهنده کلنی (CFU^5) به روش گشت در پلیت با استفاده از محیط کشت عمومی نوترینت آگار تعیین شد (Lorch et al., 1998). تنفس میکروبی پایه (BR^6) بر اساس مقدار دی‌اکسیدکربن (CO_2) تولید شده طی ۷۲ ساعت و با روش تیتراسیون اندازه‌گیری گردید (Isermeyer, 1952). کربن و نیتروژن زیست‌توده میکروبی (MBC^7 و MBN^8) با استفاده از روش تدخین-استخراج تعیین شدند (Vance et al., 1987). برای اندازه‌گیری MBC ، نمونه‌های خاک با کلروفرم ($CHCl_3$) به مدت ۲۴ ساعت تدخین شدند و نمونه‌های تدخین‌شده و تدخین‌نشده با محلول ۰/۵ مولار K_2SO_4 استخراج شدند. کربن آلی استخراج شده پس از استخراج، با روش تیتراسیون دی‌کرومات اندازه‌گیری شد. MBC از اختلاف کربن استخراج‌شده از نمونه‌های تدخین‌شده و تدخین‌نشده و با استفاده از ضریب استخراج (KE) برابر با ۰/۳۸ محاسبه شد. این روش و ضریب مذکور با روش ارائه شده توسط Vance et al. (1987) و کالبراسیون بعدی Jenkinson (1988) مطابقت دارد. (Vance et al., 1987) نیز استخراج کربن پس از ۲۴ ساعت تدخین با کلروفرم را مبنای برآورد کربن زیست‌توده میکروبی قرار داده‌اند. برای MBN نیز

نمونه‌های تدخین‌شده و تدخین‌نشده با K_2SO_4 استخراج شدند و نیتروژن استخراج‌شده با روش کج‌لدال اندازه‌گیری شد. MBN بر اساس اختلاف نیتروژن استخراج‌شده از نمونه‌های تدخین‌شده و تدخین‌نشده و با استفاده از ضریب استخراج مربوط به نیتروژن (KE برابر با ۰/۵۸) محاسبه شد (Jenkinson, 1988). پتانسیل معدنی شدن نیتروژن (PMN^9) به روش بی‌هوازی و با استفاده از ایندوفنول-آبی و دستگاه اسپکتروفتومتر تعیین شد (Burket & Dick, 1998). بهره میکروبی ($qMic^{10}$) از نسبت کربن زیست‌توده میکروبی به کربن آلی خاک و ضریب متابولیکی جامعه میکروبی (qCO_2^{11}) از نسبت تنفس میکروبی پایه به کربن زیست‌توده میکروبی محاسبه شد (Anderson & Domsch, 1990).

مقایسه میانگین بین کاربری‌های مورد بررسی با استفاده از آزمون Tuckey's HSD در سطح احتمال ۵ درصد در نرم افزار SPSS انجام شد. همبستگی بین متغیرهای مورد بررسی با استفاده از ۱۲ مشاهده (سه نمونه مرکب برای هر یک از چهار کاربری اراضی) محاسبه شد.

نتایج و بحث

مقایسه میانگین ویژگی‌ها بین کاربری‌های مورد مطالعه

نتایج (جدول ۱) نشان داد که کاربری‌های مختلف اراضی تأثیر قابل توجهی بر پویایی کربن آلی و مؤلفه‌های آن داشتند. بیشترین مقدار کربن آلی (OC) در خاک کاربری باغ سیب مشاهده شد (۱۲/۹ گرم در کیلوگرم خاک)، پس از آن خاک زیر کشت گندم (۱۲/۱ گرم در کیلوگرم خاک) و سیب‌زمینی (۱۰/۵ گرم در کیلوگرم خاک) و در نهایت اراضی آیش با کمترین مقدار (۹/۴ گرم در کیلوگرم خاک) قرار گرفتند. همچنین، ماده آلی ذره‌ای (POM) در خاک باغ سیب بالاترین مقدار را نشان داد (۱/۵۱ گرم

7- Microbial Biomass Carbon

8- Microbial Biomass Nitrogen

9- Potential Minerazilable Nitrogen

10- microbial quotient

11- metabolic quotient

2- Aeration Capacity

3- Particulate Organic matter

4- Bacterial abundance

5- Colony Forming Unit

6- Basal respiration

جدول ۱. مقایسه میانگین* ($\pm$ انحراف معیار) ویژگی‌های زیستی در کاربری‌های اراضی مختلف

Table 1. Mean Comparison* of soil biological characteristics in different land uses

ویژگی‌های خاک	واحد	گندم	سیب‌زمینی	باغ	آیش
Soil Properties	Unit	Wheat	Potato	Orchard	Fallow
کربن آلی	g kg ⁻¹ soil	12.1 $\pm$ 0.1 ^a	10.5 $\pm$ 0.3 ^b	12.9 $\pm$ 0.4 ^a	9.4 $\pm$ 0.6 ^c
Organic Carbon					
نیتروژن کل	g kg ⁻¹ soil	1.1 $\pm$ 0.0 ^a	0.0 $\pm$ 0.0 ^b	1.2 $\pm$ 0.0 ^a	.8 $\pm$ 0.0 ^c
Total Nitrogen					
فراوانی باکتری‌ها قابل کشت	CFU g ⁻¹ fresh soil	1.03 $\times$ 10 ⁵ ^b	6.89 $\times$ 10 ⁴ ^b	2.61 $\times$ 10 ⁵ ^b	2.29 $\times$ 10 ⁷ ^a
Bacterial abundance					
ماده آلی ذره‌ای	g kg ⁻¹	1.14 $\pm$ 0.10 ^b	1.15 $\pm$ 0.07 ^b	1.51 $\pm$ 0.12 ^a	1.00 $\pm$ 0.01 ^b
Particulate Organic Matter					
کربن فعال	mg kg ⁻¹	832.8 $\pm$ 60.1 ^b	760.7 $\pm$ 17.2 ^b	1303 $\pm$ 109 ^a	790.0 $\pm$ 34.3 ^b
Active carbon					
تنفس میکروبی پایه	mg CO ₂ g ⁻¹ h ⁻¹	0.35 $\pm$ 0.04 ^d	0.47 $\pm$ 0.03 ^c	0.74 $\pm$ 0.02 ^a	0.60 $\pm$ 0.03 ^b
Basal respiration					
کربن زیست توده میکروبی	mg C g ⁻¹	2.23 $\pm$ 0.08 ^b	1.21 $\pm$ 0.13 ^c	6.26 $\pm$ 0.28 ^a	2.11 $\pm$ 0.13 ^b
Microbial Biomass Carbon					
نیتروژن زیست توده میکروبی	mg N g ⁻¹	0.321 $\pm$ 0.80 ^c	0.277 $\pm$ 0.21 ^c	1.52 $\pm$ 1.06 ^a	0.520 $\pm$ 0.31 ^b
Microbial Biomass Nitrogen					
پتانسیل معدنی شدن نیتروژن	μg N g ⁻¹ d ⁻¹	2.78 $\pm$ 0.32 ^b	1.52 $\pm$ 0.24 ^b	7.80 $\pm$ 1.37 ^a	7.89 $\pm$ 1.80 ^a
Potential Minerazilable Nitrogen					
بهره میکروبی	mg C _{mic} mg ⁻¹ C soil	18.47 $\pm$ 0.81 ^b	11.46 $\pm$ 0.98 ^c	48.73 $\pm$ 2.98 ^a	22.41 $\pm$ 0.22 ^b
microbial quotient					
ضریب متابولیکی جامعه میکروبی	mg CO ₂ -C mg ⁻¹ C _{mic}	0.15 $\pm$ 0.02 ^c	0.40 $\pm$ 0.07 ^a	0.12 $\pm$ 0.00 ^c	0.28 $\pm$ 0.02 ^b
metabolic quotient					

* مقایسه میانگین بین کاربری‌های مورد بررسی با استفاده از آزمون Tukey's HSD در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. حروف مشترک در هر سطر نشان‌دهنده غیرمعنی دار بودن میانگین‌هاست.

* Mean comparisons among land-uses were made using Tukey's HSD test at $p < 0.05$. Similar letters in each row represent the non significant difference of means.

مقدار کربن آلی تأثیر نداشته، بلکه بخش‌های فعال‌تر آن را نیز تحت تأثیر قرار داده است به ویژه بخش‌هایی که حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات مدیریتی خاک دارند. به نظر می‌رسد پوشش گیاهی دائمی در کاربری باغ سیب، همراه با تجمع برگ‌ها، ریشه‌ها و ترشحات ریشه‌ای و همچنین کاهش شدت خاک‌ورزی، شرایط مناسبی را برای تجمع ماده آلی و حفظ کربن آلی و بخش‌های قابل تجزیه آن فراهم کرده است (Khanmohammadi & Matiniazadeh, 2023). در مقابل، عملیات کشاورزی مکرر، به‌ویژه شخم، موجب افزایش اکسیداسیون ماده آلی و تسریع تجزیه آن شده و در نتیجه کاهش

در کیلوگرم خاک)، درحالی‌که مقادیر آن در خاک زیر کشت سیب زمینی (۱/۱۵ گرم در کیلوگرم خاک) و گندم (۱/۱۴ گرم در کیلوگرم خاک) نزدیک به هم بود و اراضی آیش کمترین مقدار را ثبت کردند (۱/۰۰ گرم در کیلوگرم خاک). به‌طور مشابه، کربن فعال (AC) در خاک باغ سیب بیشترین مقدار را داشت (۱۰۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، درحالی‌که مقادیر آن در خاک زیر کشت گندم، اراضی آیش و سیب‌زمینی به‌ترتیب ۷۳۴/۳، ۶۰/۱ و ۱۷/۲ میلی‌گرم کیلوگرم) بود و بین این سه کاربری از نظر AC و POM اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. این نتایج نشان می‌دهد که تفاوت در کاربری اراضی تنها بر

مقدار کربن و مؤلفه‌های فعال آن را به همراه داشته است (Tadayonnejad & Shahmansouri, 2025). این نتایج با مطالعاتی که نشان داده‌اند سیستم‌های کشاورزی دائمی یا حفاظتی، به‌ویژه باغ‌ها، در مقایسه با سیستم‌های کشاورزی فشرده دارای مقادیر بیشتری کربن آلی هستند، مطابقت دارد؛ زیرا افزایش ورودی‌های آلی، بهبود محیط ریشه‌ای و کاهش خاک‌ورزی موجب تقویت پویایی کربن و حفظ عملکردهای زیستی خاک می‌شود (Kubar et al., 2024; Liu et al., 2024; Sharma et al., 2025; Wang et al., 2026). همچنین (Ademe et al., 2017) گزارش کردند که مدیریت حفاظتی خاک و آب با کاهش فرسایش و افزایش پایداری خاک، از کاهش ماده آلی جلوگیری کرده و تجمع کربن آلی را افزایش می‌دهد. پاسخ بخش‌های فعال ماده آلی نسبت به تغییرات کاربری اراضی، آشکارتر از کربن آلی کل بود. به‌طوری‌که ماده آلی ذره‌ای و کربن فعال به‌عنوان شاخص‌های حساس تغییرات ناشی از کاربری اراضی عمل کردند. افزایش این مؤلفه‌ها در خاک باغ سیب با تجدید مداوم بقایای گیاهی و بهبود شرایط محیط ریشه‌ای مرتبط است که منبع پیوسته‌ای از کربن با گردش سریع فراهم می‌کند. با این‌حال، این موضوع به معنای نبود ورودی‌های آلی در سیستم‌های زراعی نیست؛ زیرا گیاهان یک‌ساله نیز از طریق رشد و مرگ ریشه‌ها، ترشحات ریشه‌ای و بازگشت بقایای گیاهی، کربن را به خاک وارد می‌کنند (Pausch & Kuzyakov, 2018). بنابراین، تفاوت میان کاربری‌ها احتمالاً بیشتر به تفاوت در مقدار، کیفیت، زمان‌بندی و مسیر ورود این ترکیبات آلی و همچنین نحوه مدیریت خاک مربوط است (Li et al., 2024). در مقابل، خاک‌ورزی شدید در برخی سیستم‌های زراعی می‌تواند موجب تسریع گردش و کاهش ماندگاری برخی از بخش‌های فعال ماده آلی شود (Liu et al., 2024). مطالعات اخیر نیز نشان داده‌اند که ماده آلی ذره‌ای یکی از حساس‌ترین شاخص‌های کربن نسبت به تغییرات کاربری اراضی است، درحالی‌که کربن فعال به دلیل ارتباط نزدیک با پویایی کربن و فعالیت میکروبی، یکی از شاخص‌های حساس برای تشخیص تغییرات ماده آلی و پاسخ

سریع بخش‌های فعال آن به مدیریت‌های مختلف خاک محسوب می‌شود (Schiebelbein et al., 2023; Zhao et al., 2025). افزایش کربن آلی و بخش‌های فعال آن، همراه با بیشترین مقدار کربن زیست‌توده میکروبی (MBC) در خاک باغ سیب مشاهده شد (۶/۲۶ میلی‌گرم C بر گرم). پس از آن خاک زیر کشت گندم (۲/۲۳ میلی‌گرم C بر گرم)، اراضی آیش (۲/۱۱ میلی‌گرم C بر گرم) و خاک زیر کشت سیب‌زمینی با کمترین مقدار (۱/۲۱ میلی‌گرم C بر گرم) قرار گرفتند. همچنین، خاک باغ سیب بیشترین بهره میکروبی ($qMic=48.73 \text{ mgC}_{mic} \text{ mg}^{-1}\text{C}$) را نشان داد، درحالی‌که این مقدار در اراضی آیش، گندم و سیب‌زمینی به‌ترتیب ۲۲/۴۱، ۱۸/۴۷ و ۱۱/۴۶ بود. تطابق بین افزایش شاخص‌های کربن، MBC و $qMic$ و همچنین پایین‌تر بودن qCO_2 در خاک باغ سیب نشان می‌دهد که در این کاربری، بخش بیشتری از کربن آلی خاک با زیست‌توده میکروبی همراه بوده و میزان تنفس به ازای واحد زیست‌توده میکروبی نیز کمتر بوده است. این الگو می‌تواند نشان‌دهنده وضعیت متابولیکی مطلوب‌تر و فشار متابولیکی کمتر جامعه میکروبی در خاک باغ سیب باشد. از این منظر، افزایش MBC و $qMic$ همراه با qCO_2 پایین‌تر با استفاده کارآمدتر منابع کربنی توسط جامعه میکروبی سازگار است. این نتیجه با مطالعاتی که رابطه مثبت بین افزایش ورودی‌های آلی، زیست‌توده میکروبی و کارایی مصرف کربن را، به‌ویژه در سیستم‌های درختی یا مدیریت حفاظتی، گزارش کرده‌اند، همخوانی دارد (Yuan et al., 2021; Putra et al., 2025; Babur et al., 2025). در مقابل، کاهش MBC و $qMic$ در خاک زیر کشت سیب‌زمینی می‌تواند با تفاوت در میزان و نوع ورودی‌های آلی، الگوی توسعه ریشه و شدت اختلال خاک در این سیستم زراعی مرتبط باشد. تولید سیب‌زمینی معمولاً با عملیات متعدد آماده‌سازی بستر، خاک‌ورزی و عملیات مربوط به برداشت همراه است و در مقایسه با سیستم‌های کم‌خاک‌ورزی، می‌تواند اختلال بیشتری در محیط فیزیکی خاک ایجاد کند (Ghosh & Daigh, 2020; Stalham et al., 2026). همچنین، مدیریت بقایا و مقدار کربن ورودی به خاک از عوامل مهم مؤثر

بر زیست‌توده میکروبی هستند و در سیستم‌های کشت سیب‌زمینی، افزایش ورودی‌های آلی و کاهش شدت خاک‌ورزی با بهبود شاخص‌های زیستی خاک، از جمله MBC، همراه بوده است (Henzel et al., 2025; Larkin et al., 2021). بنابراین، تفاوت مشاهده‌شده بین خاک زیر کشت سیب‌زمینی و گندم ممکن است حاصل ترکیبی از تفاوت در ورودی بقایای گیاهی، الگوی رشد ریشه، مدیریت خاک و شدت اختلال ناشی از عملیات زراعی باشد. با این حال، از آنجا که در مطالعه حاضر شدت واقعی خاک‌ورزی، مقدار بقایای بازگشتی و میزان اختلال ناشی از برداشت به‌طور کمی اندازه‌گیری نشدند، نمی‌توان کاهش MBC و q_{mic} را به‌طور قطعی به یکی از این عوامل نسبت داد. در مجموع، این نتایج نشان می‌دهد که بهبود ذخیره کربن آلی در خاک تنها به افزایش مقدار آن محدود نمی‌شود، بلکه شامل تقویت بخش‌های فعال ماده آلی و افزایش توانایی جامعه میکروبی در استفاده از این منابع نیز می‌باشد؛ فرآیندی که به‌طور مستقیم بر فعالیت متابولیکی جامعه میکروبی و چرخه نیتروژن تأثیر می‌گذارد، که در بخش بعدی بررسی خواهد شد.

پاسخ شاخص‌های چرخه نیتروژن و فعالیت میکروبی به کاربری‌های مختلف اراضی

نتایج نشان داد که کاربری‌های مختلف اراضی تأثیر قابل‌توجهی بر شاخص‌های چرخه نیتروژن و فعالیت متابولیکی جامعه میکروبی داشتند (جدول ۱). بیشترین مقدار نیتروژن کل (TN) در خاک باغ سیب مشاهده شد ($0/12$ گرم در 100 گرم خاک)، پس از آن خاک زیر کشت گندم ($0/11$ گرم در 100 گرم خاک) قرار داشت، درحالی‌که خاک زیر کشت سیب‌زمینی ($0/09$ گرم در 100 گرم خاک) و اراضی آیش ($0/08$ گرم در 100 گرم خاک) کمترین مقادیر را نشان دادند. همچنین، بیشترین مقدار تنفس پایه میکروبی در خاک باغ سیب ثبت شد ($0/74$ میلی‌گرم CO_2 بر گرم در ساعت)، پس از آن اراضی آیش ($0/60$)، سیب‌زمینی ($0/47$) و گندم با کمترین مقدار ($0/35$) قرار داشتند. به‌طور مشابه، نیتروژن زیست‌توده میکروبی (MBN) در خاک باغ

سیب بیشترین مقدار را داشت ($1/52$ میکروگرم N بر گرم)، پس از آن اراضی آیش ($0/52$ میکروگرم N بر گرم)، گندم ($0/321$ میکروگرم N بر گرم) و سیب‌زمینی با کمترین مقدار ($0/277$ میکروگرم N بر گرم) قرار گرفتند. نیتروژن بالقوه قابل معدنی‌شدن نیز بیشترین مقادیر را در خاک باغ ($7/80$ میکروگرم N بر گرم در روز) و اراضی آیش ($7/89$ میکروگرم N بر گرم در روز) نشان داد، به‌طوری‌که بین این دو کاربری اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد، درحالی‌که مقادیر آن در خاک زیر کشت گندم ($2/78$) و سیب‌زمینی ($1/52$ میکروگرم N بر گرم در روز) کاهش یافت. در مقابل، ضریب متابولیکی جامعه میکروبی (q_{CO_2}) کمترین مقدار را در خاک باغ ($0/12 \text{ mg } CO_2\text{-C g}^{-1} \text{ soil}$) و سپس گندم ($0/15 \text{ mg } CO_2\text{-C g}^{-1} \text{ soil}$) نشان داد، درحالی‌که در اراضی آیش ($0/28 \text{ mg } CO_2\text{-C g}^{-1} \text{ soil}$) افزایش یافت و بیشترین مقدار آن در خاک زیر کشت سیب‌زمینی ($\text{mg } CO_2\text{-C g}^{-1} \text{ soil}$) ($0/40$) مشاهده شد. مقدار بالاتر q_{CO_2} در خاک زیر کشت سیب‌زمینی نشان‌دهنده مصرف بیشتر کربن به‌صورت تنفس به‌ازای واحد زیست‌توده میکروبی است و می‌تواند با شرایط نامطلوب‌تر یا تنش و اختلال بیشتر در زیستگاه میکروبی خاک سازگار باشد. در سیستم‌های کشت سیب‌زمینی، عملیات متعدد آماده‌سازی بستر و خاک‌ورزی و همچنین عملیات برداشت می‌تواند موجب اختلال فیزیکی بیشتری در خاک شود (Ghosh & Daigh, 2020; Stalham et al., 2026). بنابراین، اختلال مکرر در محیط خاک می‌تواند یکی از عوامل احتمالی مرتبط با q_{CO_2} بالاتر مشاهده‌شده در این کاربری باشد.

این نتایج نشان می‌دهد که کاربری‌های مختلف اراضی بر شاخص‌های مرتبط با چرخه نیتروژن و وضعیت متابولیکی جامعه میکروبی تأثیر گذاشته‌اند. با این حال، الگوی تغییرات این شاخص‌ها یکسان نبود؛ به‌طوری‌که افزایش برخی شاخص‌های مرتبط با وضعیت نیتروژن میکروبی، مانند MBN و PMN، الزاماً مطابق با تغییرات q_{CO_2} نبود. این موضوع نشان می‌دهد که شاخص‌های نیتروژن و شاخص‌های متابولیکی، جنبه‌های متفاوتی از عملکرد و وضعیت جامعه میکروبی خاک را منعکس می‌کنند.

به نظر می‌رسد تفاوت در ذخیره کربن آلی و مؤلفه‌های فعال آن، همراه با تفاوت در میزان دسترسی به منابع آلی، شرایط متفاوتی را برای فعالیت میکروبی فراهم کرده و در نتیجه بر توانایی خاک در نگهداری و چرخه نیتروژن اثر گذاشته است. افزایش نیتروژن کل در خاک باغ سیب همراه با افزایش تنفس پایه، نیتروژن زیست‌توده میکروبی و نیتروژن قابل معدنی‌شدن مشاهده شد، درحالی‌که بیشتر این شاخص‌ها در سیستم‌های زراعی با اختلال بیشتر کاهش یافتند. این الگو نشان‌دهنده ارتباط نزدیک بین پایداری ماده آلی و کارایی فرآورده‌های میکروبی مرتبط با چرخه نیتروژن است. این نتایج با مطالعاتی که نشان داده‌اند سیستم‌های کشاورزی دائمی یا دارای اختلال کمتر، به دلیل بهبود بازگشت بقایای گیاهی و پایداری چرخه ماده آلی، قادر به حفظ مقادیر بالاتری از نیتروژن کل هستند، مطابقت دارد؛ درحالی‌که تشدید فعالیت‌های کشاورزی موجب افزایش تلفات نیتروژن و کاهش توانایی خاک در حفظ آن می‌شود (Deche et al., 2022; Naasko et al., 2024; Pareja-Sánchez et al., 2026). همچنین مطالعات دیگر نشان داده‌اند که افزایش ماده آلی خاک به‌طور مستقیم فعالیت میکروارگانیسم‌ها را افزایش داده و با افزایش تنفس پایه و زیست‌توده میکروبی، تجزیه ماده آلی و چرخه عناصر غذایی را تقویت می‌کند (Sarkar et al., 2024; de Sousa Almeida et al., 2026). افزایش MBN و PMN در خاک باغ سیب، همراه با نزدیک بودن مقادیر PMN در باغ سیب و اراضی آیش، نشان می‌دهد که شرایط پایداری محیط خاک موجب افزایش توانایی زیست‌توده میکروبی در حفظ و بازچرخش نیتروژن شده و ظرفیت خاک برای تأمین پیوسته نیتروژن معدنی را افزایش می‌دهد. همچنین این نتایج نشان می‌دهد که این دو شاخص بیشتر بیانگر کارایی جامعه میکروبی در چرخه نیتروژن هستند تا صرفاً مقدار نیتروژن موجود در خاک. مطالعات متعددی نیز تأکید کرده‌اند که MBN و PMN ارتباط نزدیکی با مقدار ماده آلی و اندازه جامعه میکروبی دارند و از شاخص‌های حساس برای ردیابی تغییرات چرخه نیتروژن تحت تأثیر کاربری‌های مختلف اراضی محسوب می‌شوند (Jat et al., 2020; Du et al., 2023).

(Tan et al., 2025; Singh et al., 2026). در مقابل، خاک زیر کشت سیب‌زمینی بیشترین مقدار qCO_2 را نشان داد، درحالی‌که خاک باغ کمترین مقدار این شاخص را داشت؛ موضوعی که بیانگر تفاوت در کارایی فیزیولوژیکی جامعه میکروبی بین کاربری‌های مختلف اراضی است. افزایش qCO_2 نشان‌دهنده مصرف بیشتر کربن در فرآیندهای نگهداری و تنفس نسبت به تبدیل آن به رشد میکروبی است و بیانگر کاهش کارایی استفاده از منابع آلی و افزایش فشار محیطی بر میکروارگانیسم‌ها می‌باشد. در مقابل، مقدار پایین qCO_2 در خاک باغ سیب نشان‌دهنده استفاده کارآمدتر از کربن و پایداری بیشتر جامعه میکروبی است. این نتایج با مطالعاتی که کاهش qCO_2 را در سیستم‌های پایدار و غنی از ماده آلی و افزایش آن را در شرایط اختلال بیشتر خاک و کاهش کارایی جامعه میکروبی گزارش کرده‌اند، همخوانی دارد. بنابراین، qCO_2 می‌تواند شاخص مناسبی برای تفسیر پاسخ فعالیت متابولیکی میکروارگانیسم‌ها به تغییرات کاربری اراضی باشد (Pabst et al., 2013; Moradi et al., 2026). در مجموع، این نتایج نشان می‌دهد که پایداری چرخه نیتروژن ارتباط نزدیکی با توانایی جامعه میکروبی در استفاده از منابع آلی دارد و تفسیر پاسخ خاک به تغییرات کاربری اراضی زمانی جامع‌تر خواهد بود که شاخص‌های کربن آلی، فعالیت متابولیکی و چرخه نیتروژن به‌صورت یکپارچه مورد بررسی قرار گیرند. این موضوع ارتباط متقابل بین پویایی کربن آلی و چرخه نیتروژن در خاک را تأیید می‌کند.

پاسخ جامعه باکتریایی به کاربری‌های مختلف اراضی

نتایج نشان داد که بین کاربری‌های مختلف اراضی از نظر فراوانی باکتری‌های قابل کشت تفاوت قابل توجهی وجود داشت (جدول ۱). بیشترین فراوانی باکتری‌های قابل کشت در اراضی آیش مشاهده شد که مقدار آن به $(2.29 \times 10^7 \text{ CFU/g fresh soil})$ رسید، درحالی‌که این مقدار در خاک باغ به‌طور محسوسی کاهش یافت $(2.61 \times 10^5 \text{ CFU/g fresh soil})$ ، پس از آن خاک گندم $(1.03 \times 10^5 \text{ CFU/g fresh soil})$ قرار گرفت و کمترین مقدار

در خاک سیب‌زمینی مشاهده شد (10^4 CFU/g fresh soil) × 6.89). این نتایج نشان می‌دهد که کاربری و شرایط محیطی خاک می‌تواند بر بخش قابل کشت جامعه باکتریایی تأثیرگذار باشند. با این حال، افزایش تعداد باکتری‌های قابل کشت لزوماً نشان‌دهنده افزایش زیست‌توده یا فعالیت متابولیکی کل جامعه میکروبی نیست (Blagodatskaya & Kuzyakov, 2013; Diaz-Raviña et al., 1988). زیرا روش CFU تنها بخشی از میکروارگانیسم‌هایی را نشان می‌دهد که در شرایط کشت قادر به رشد هستند (Blagodatskaya & Kuzyakov, 2013). شایان توجه است که در مطالعه حاضر، با وجود تعداد کمتر باکتری‌های قابل کشت در خاک باغ سیب، این کاربری بیشترین مقدار MBC و تنفس پایه را نشان داد. این الگو نشان می‌دهد که تعداد باکتری‌های قابل کشت به‌تنهایی نمی‌تواند وضعیت زیستی یا فعالیت کل جامعه میکروبی خاک را توصیف کند. افزایش قابل توجه فراوانی باکتری‌های قابل کشت در اراضی آیش را می‌توان به کاهش شدت اختلال ناشی از عملیات کشاورزی نسبت داد؛ شرایطی که فرصت بازسازمان‌دهی و استقرار تدریجی این گروه از باکتری‌ها را فراهم می‌کند. همچنین، تجمع بخشی از بقایای گیاهی در سطح خاک می‌تواند منابع کربنی مناسبی برای رشد و فعالیت برخی گروه‌های میکروبی فراهم کند. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که تغییرات کاربری اراضی موجب تغییر در فراوانی و ترکیب جامعه باکتریایی می‌شود که این تغییرات به تفاوت در مقدار ماده آلی، ویژگی‌های خاک و روش‌های مدیریتی وابسته است. همچنین دوره‌های استراحت زمین می‌توانند رشد برخی گروه‌های باکتریایی مرتبط با تجزیه بقایای گیاهی و تثبیت نیتروژن را تقویت کنند (He et al., 2024; Arunrat et al., 2025). در مقابل، اگرچه خاک باغ سیب بیشترین فراوانی باکتری‌های قابل کشت را نشان نداد، اما بالاترین مقادیر بیشتر شاخص‌های زیستی عملکردی، شامل کربن و نیتروژن زیست‌توده میکروبی، تنفس پایه، کارایی مصرف کربن و همچنین مقادیر بالاتر کربن آلی و مؤلفه‌های فعال آن را دارا بود؛ همان‌گونه که در نتایج مربوط به پویایی کربن آلی و چرخه نیتروژن مشاهده شد. این موضوع

نشان می‌دهد که توانایی جامعه میکروبی در انجام عملکردهای زیستی، شاخص مناسب‌تری برای تفسیر پاسخ خاک به تغییرات کاربری اراضی نسبت به تعداد صرف سلول‌های باکتری قابل کشت است، زیرا این کارایی با توانایی میکروارگانیسم‌ها در چرخه کربن و نیتروژن و استفاده مؤثر از منابع آلی ارتباط دارد. این مشاهدات با نتایج مطالعاتی که تأکید کرده‌اند فراوانی میکروارگانیسم‌ها باید در کنار شاخص‌های عملکردی تفسیر شود، همخوانی دارد؛ زیرا افزایش تعداد میکروارگانیسم‌ها الزاماً به معنی افزایش فعالیت یا کارایی زیستی آن‌ها نیست، بلکه ممکن است تنها نشان‌دهنده پاسخ جامعه میکروبی به شرایط محیطی یا مدیریتی خاص باشد (James et al., 2020; Lawal et al., 2020). نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تفسیر پاسخ جامعه میکروبی به تغییرات کاربری اراضی نیازمند استفاده همزمان از مجموعه‌ای از شاخص‌های زیستی است و نمی‌توان تنها بر اساس فراوانی باکتری‌های قابل کشت قضاوت کرد. در این پژوهش، خاک باغ سیب بیشترین فعالیت و کارایی عملکردی جامعه میکروبی را نشان داد. درحالی‌که بیشترین فراوانی باکتری‌های قابل کشت در اراضی آیش مشاهده شد. بنابراین، شاخص‌های عملکردی مانند زیست‌توده میکروبی، تنفس پایه و کارایی مصرف کربن، تصویر دقیق‌تری از پویایی فرآیندهای زیستی و چرخه کربن و نیتروژن در خاک تحت تأثیر کاربری‌های مختلف اراضی ارائه می‌دهند. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، بیشتر ویژگی‌های زیستی مورد مطالعه همبستگی مثبت و معنی‌داری با یکدیگر داشتند که بیانگر پاسخ هماهنگ ویژگی‌های زیستی خاک به کاربری‌های مختلف اراضی است. بیشترین همبستگی بین BR با MBC و MBN ($r=0.96$) و همچنین با qMic ($r=0.97$) مشاهده شد که بیانگر ارتباط نزدیک بین زیست‌توده میکروبی، فعالیت تنفسی و کارایی استفاده از کربن در خاک است. همچنین، کربن فعال (AC) و نیتروژن بالقوه قابل معدنی‌شدن نیز با بیشتر شاخص‌های عملکردی همبستگی مثبت داشتند که نقش آن‌ها را در پویایی کربن، چرخه نیتروژن و حفظ فعالیت میکروبی خاک تأیید می‌کند. در مقابل، qCO_2 با اغلب ویژگی‌های زیستی، به‌ویژه

	CFU	POM	AC	BR	MBC	MBN	PMN	qMic	qCO ₂
CFU	1								
POM	-0.20	1							
AC	0.91	-0.55	1						
BR	0.72	0.56	0.72	1					
MBC	0.75	-0.24	0.85	0.96	1				
MBN	0.97	-0.15	0.82	0.96	0.83	1			
PMN	0.63	0.53	0.71	0.53	0.63	0.63	1		
qMic	0.62	-0.12	0.79	0.81	0.99	0.97	0.62	1	
qCO ₂	-0.72	-0.37	-0.66	-0.21	-0.74	-0.63	-0.72	-0.37	1

شکل ۲. ضریب همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های بیولوژیکی مورد مطالعه. جعبه‌های رنگی نشان‌دهنده همبستگی معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد ($P < 0.05$) هستند، درحالی‌که جعبه‌های سفید نشان‌دهنده عدم وجود همبستگی معنی‌دار می‌باشند. برخی همبستگی‌ها میان شاخص‌های محاسبه‌شده (مانند MBC، qMic، BR و qCO₂) ممکن است تحت تأثیر وابستگی محاسباتی ناشی از روابط محاسباتی میان این متغیرها باشند؛ بنابراین، این روابط باید با احتیاط تفسیر شوند.

Figure 2. Pearson correlation coefficients among the studied biological properties. Colored boxes indicate significant correlations at the 5% probability level ($P < 0.05$), whereas white boxes indicate non-significant correlations. Some correlations among the calculated indices (e.g., MBC, qMic, BR, and qCO₂) may be influenced by mathematical coupling arising from the computational relationships among these variables; therefore, these relationships should be interpreted with caution.

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر چهار نوع کاربری اراضی شامل باغ سیب، کشت گندم، کشت سیب‌زمینی و اراضی آیش بر ویژگی‌های کربنی و زیستی خاک و برخی شاخص‌های مرتبط با چرخه نیتروژن در یک ناحیه خشک در جنوب بغداد انجام شد. نتایج نشان داد که ویژگی‌های زیستی خاک و عملگردهای مرتبط با چرخه کربن و نیتروژن در میان کاربری‌های مورد بررسی تفاوت قابل توجهی داشتند. باغ سیب در مقایسه با سایر کاربری‌ها مقادیر بالاتری از کربن آلی، کربن فعال، زیست‌توده میکروبی و تنفس پایه و همچنین qMic بالاتر و qCO₂ پایین‌تری داشت که با شرایط مناسب‌تر برای حفظ کربن و فعالیت میکروبی سازگار است و نشان‌دهنده نقش مهم فراهمی منابع آلی و پایداری بیشتر

فراوانی باکتری‌های قابل کشت، پتانسیل معدنی شدن نیتروژن، نیتروژن زیست توده میکروبی و کربن فعال همبستگی منفی نشان داد که بیانگر کاهش کارایی ضریب متابولیسمی جامعه میکروبی در کاربری‌های تحت مدیریت فشرده‌تر یا دارای اختلال بیشتر است. در مجموع، نتایج همبستگی نشان داد که تغییر کاربری اراضی از طریق تأثیر هم‌زمان بر پویایی کربن، چرخه نیتروژن و فعالیت میکروبی، موجب تغییرات هماهنگ در ویژگی‌های زیستی خاک می‌شود (Medriano et al., 2023).

نتیجه‌گیری

به کارگیری شیوه‌های مدیریت پایدار، از جمله کاهش خاک‌ورزی، حفظ و افزایش بقایای آلی، می‌تواند در حفظ عملکردهای زیستی خاک در بلندمدت مؤثر باشد. به‌طور کلی، مطالعات بلندمدت و شیوه‌های مدیریتی مثل خاک‌ورزی، مقدار و نوع بقایای گیاهی و کاربرد کودهای دامی، برای بررسی جامع‌تر در کاربری‌های مختلف پیشنهاد می‌شود.

تشکر و سپاسگزاری

تضاد منافع

محیط خاک در تقویت فعالیت و کارایی جامعه میکروبی است. در مقابل، نتایج متفاوت برخی شاخص‌های زیستی مثل افزایش qCO_2 و کاهش $qMic$ ، در سیستم‌های زراعی به‌ویژه در خاک زیر کشت سیب‌زمینی، نشان‌دهنده کاهش کارایی فیزیولوژیکی جامعه میکروبی و افزایش سهم کربن مصرف‌شده در فرآیندهای تنفسی بوده و با تفاوت در ورودی‌های آلی و شرایط مدیریتی این سیستم مرتبط است. همچنین، اگرچه اراضی آیش بیشترین فراوانی باکتریایی را نشان دادند، این افزایش با بالاترین مقادیر شاخص‌های عملکردی میکروبی همراه نبود. بنابراین، تفسیر وضعیت زیستی خاک نیازمند استفاده هم‌زمان از شاخص‌های کمی و عملکردی میکروبی است. در مجموع، یافته‌ها نشان می‌دهند که حفظ پوشش گیاهی دائمی و تأمین مستمر ورودی‌های آلی می‌تواند با وضعیت مطلوب‌تر شاخص‌های کربنی و زیستی خاک در محیط خشک همراه باشد. بنابراین،

References

منابع مورد استفاده

1. Ademe, Y., Kebede, T., Mullatu, A., Shafi, T. 2017. Evaluation of the effectiveness of soil and water conservation practices on improving selected soil properties in Wonago district, Southern Ethiopia. *J. Soil Sci. Environ. Manag.*, 8(3), 70–79. <https://doi.org/10.5897/JSSEM2016.0601>
2. Al-Dabbas, M.A., Razzaq, S.M.A. 2017. Climatic analysis and climatic water balance determination for Al-Yusufiyah area, southern Baghdad, Iraq. *Iraqi Journal of Science*, 1246–1255.
3. Anderson, T. H., Domsch, K. H. 1990. Application of eco-physiological quotients (qCO_2 and qD) on microbial biomasses from soils of different cropping histories. *Soil Bio. Biochem.*, 22(2), 251–255. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0038-0717\(90\)90094-G](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0038-0717(90)90094-G)
4. Andrews, S.S., Karlen, D.L., Mitchell, J.P. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agr. Ecosys. Environ.*, 90(1), 25–45. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00174-8)
5. Arshad, M.A., Martin, S. 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agr. Ecosys. Environ.*, 88(2), 153–160. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00252-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00252-3)
6. Arunrat, N., Uttarotai, T., Mhuanong, W., Kongsurakan, P., Sereenonchai, S., Hatano, R. 2025. Soil bacterial communities in a 10-year fallow rotational shifting cultivation field and an 85-year-old terraced paddy field in Northern Thailand. *Environmental Sciences Europe*, 37(1), 95. <https://doi.org/10.1186/s12302-025-01143-4>
7. Azarmi-Atajan, F., Rostampour, M. 2025. Comparison of soil organic carbon, total nitrogen, and carbon to nitrogen ratio (C/N) in rangeland and desert habitats of South Khorasan province. *J. Soil Plant Interact.* 16(2), 21–38 (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.47176/jspi.16.2.21591>
8. Babur, E., Dindaroğlu, T., Uslu, Ö. S., Gozukara, G., Ozlu, E. 2025. Long-Term Effects of Land Use Conversion on Soil Microbial Biomass and Stoichiometric Indices in Eastern Mediterranean Karst Ecosystems (1981–2018). *Land Degrad. Develop.*, 36(16), 5666–5680. <https://doi.org/10.22541/au.173149594.44561832/v>
9. Bhaduri, D., Sihi, D., Bhowmik, A., Verma, B.C., Munda, S. Dari, B. 2022. A review on effective soil health bio-indicators for ecosystem restoration and sustainability. *Frontiers in microbiology*, 13, p.938481. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.938481>
10. Blagodatskaya, E., Kuzyakov, Y. 2013. Active microorganisms in soil: critical review of estimation criteria and approaches. *Soil Biology and Biochemistry*, 67, 192–211. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.08.024>
11. Blanco-Canqui, H., Ruis, S.J. 2018. No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*, 326, 164–200.

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.011>

12. Bremner, J.M., Mulvaney, C.S. 1983. Nitrogen—Total. In *Methods of Soil Analysis* (pp. 595–624). <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c31>
13. Burket, J.Z., Dick, R.P. 1998. Microbial and soil parameters in relation to N mineralization in soils of diverse genesis under differing management systems. *Bio. Fert. Soils*, 27(4), 430–438. <https://doi.org/10.1007/s003740050454>
14. Cambardella, C.A., Elliott, E.T. 1993. Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions. In: *Soil structure/soil biota interrelationships*, pp. 449–457. Elsevier.
15. de Sousa Almeida, M., de Fátima Marques Pires, M., Cunha, M.B.M., Oliveira, M. S., da Silva Mota, K. 2026. Green Manure Modulates Soil–Plant–Microbial Responses to Increasing Irrigation Salinity in a Semiarid groecosystem. *Irrig. Drain.*, 1–14. <https://doi.org/10.1002/ird.70164>
16. Deche, A., Assen, M., Damene, S., Legass, A. 2022. Effects of Different Cropping and Land Management Practices on the Quality of Irrigated Soils of the Upper Awash Basin, Central Rift Valley of Ethiopia. *Ekológia*, 41(2), 101–112. <https://doi.org/10.2478/eko-2022-0011>
17. Diaz-Raviña, M., Carballas, T., Acea, M.J. 1988. Microbial biomass and metabolic activity in four acid soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 20(6), 817–823. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(88\)90087-9](https://doi.org/10.1016/0038-0717(88)90087-9)
18. Du, X., Ge, Y., Zhang, Y., Hu, H., Zhang, Y., Yang, Z., Song, Y. 2023. Responses of soil carbon cycling microbial functional genes to nitrogen and phosphorus addition in saline-sodic soils. *Plant Soil*, 490(1), 261–277. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06070-y>
19. Ghosh, U., Daigh, A.L.M. 2020. Soil compaction problems and subsoiling effects on potato crops: A review. *Crop, Forage & Turfgrass Management*, 6(1), e20030. <https://doi.org/10.1002/cft2.20030>
20. He, C., Li, K., Li, J., Fan, P., Ruan, Y., Jia, Z. 2024. Rice straw increases microbial nitrogen fixation, bacterial and nifH genes abundance with the change of land use types. *Front. Microbio.*, 14, 1283675. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1283675>
21. Henzel, D., Junge, S.M., Joergensen, R.G., Finckh, M.R. 2025. Can potato cropping be made regenerative? Cover crops and dead organic mulch support soil microbial activity. *Biology and Fertility of Soils*, 61(4), 735–746. <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01887-w>
22. Isermeyer, H. 1952. Estimation of soil respiration in closed jars. *Method in applied soil microbiology and biochemistry*. London: Academic Press, Harcourt Brace & Company.
23. Jafarnejhadi, A.R., Meskini-vishkaee, F. 2024. The Temporal and Spatial Variations of Some Soil Properties in Wheat- Cultivated Farms of Khuzestan Province. *J. Soil Plant Interact.* 15(2), 49–64. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8.2>
24. James, T., Aliyu, E.H., Ishaku, D., Abubakar, S.Y., Haruna, I.M., Gideon, M.M. 2020. Soil microbial status under different land use systems in Gombe state, Nigeria. *WORLD*, 7(1), 104–110. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2020.7.1.0221>
25. Jat, H.S., Choudhary, M., Datta, A., Yadav, A.K., Meena, M.D., Devi, R., Sharma, P.C. 2020. Temporal changes in soil microbial properties and nutrient dynamics under climate smart agriculture practices. *Soil Til. Res.*, 199, 104595. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104595>
26. Jenkinson, D.S. 1988. Determination of Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Soil. In: Wilson, J.B., Ed., *Soil biochemistry*, Marcel Dekker, New York, 415–471.
27. Karlen, D.L., Ditzler, C.A., Andrews, S.S. 2003. Soil quality: why and how?. *Geoderma*, 114(3–4), 145–156. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00039-9)
28. Khanmohammadi, Z., Matinizadeh, M. 2023. Evaluation of Soil Properties Under The Canopy of Wild Pistachio (*Pistacia atlantica* Desf.) and Wild Almond (*Prunus orientalis* (Mill.) Koehne) (Case Study: Tang Khoshk, Semirom). *J. Soil Plant Interact.* 14(2), 93–108. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.47176/jspi.14.2.20462>
29. Kubar, K.A., Ali, Q., Kalhoro, S.A., Memon, S.A., Nehela, Y., Korai, P.K., Narejo, M.U.N. 2024. Dynamics of organic carbon fractions, soil fertility, and aggregates affected by diverse land-use cultivation systems in semiarid degraded land. *J. Soil Sci. Plant Nut.*, 24(1), 524–536. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01562-3>
30. Larkin, R.P., Griffin, T.S., Honeycutt, C.W., Olanya, O.M., He, Z. 2021. Potato cropping system management strategy impacts soil physical, chemical, and biological properties over time. *Soil and Tillage Research*, 213, 105148. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105148>
31. Lawal, H.M., Salifu, U.M., Amapu, I.Y., Atta, H.I. 2020. Diversity of microbes in soil aggregate fractions under different land-use in northern Guinea Savanna, Nigeria. *Journal of Food Science*, 4(2), 510–518. <https://doi.org/10.33003/fjs-2020-0402-192>
32. Li, H., Chang, L., Liu, H., Li, Y. 2024. Diverse factors influence the amounts of carbon input to soils via rhizodeposition in plants: A review. *Science of The Total Environment*, 948, 174858. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174858>
33. Liu, C., He, C., Chang, S.X., Chen, X., An, S., Wang, D., Yan, J., Zhang, Y., Li, P. 2024. Fertilization and tillage

- influence on soil organic carbon fractions: A global meta-analysis. *CATENA*, 246, 108404. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108404>
34. Lorch, H.J., Benckiser, G., Ottow, J.C.G., 1998. Basic methods for counting microorganisms in soil and water. Pappelallee 78/79 10437, Berlin, Germany
35. Maghami Moghim, F., Karimi, A., Bagheri-Bodaghabadi, M., Emami, H., Duraisamy, V. 2024. Evaluation of soil quality and land suitability in different management systems. *Arch. Agron. Soil Sci.*, 70(1), 1–19. <https://doi.org/10.1080/03650340.2023.2298851>
36. Medriano, C.A., Chan, A., De Sotro, R., Bae, S. 2023. Different types of land use influence soil physiochemical properties, the abundance of nitrifying bacteria, and microbial interactions in tropical urban soil. *Sci. Total Environ.*, 869, 161722. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161722>
37. Menta, C., Conti, F.D., Pinto, S., Bodini, A. 2018. Soil Biological Quality index (QBS-ar): 15 years of application at global scale. *Ecolog. Indic.*, 85, 773–780. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.11.030>
38. Mganga, K.Z., Rolando, J., Kalu, S., Karhu, K. 2024. Microbial soil quality indicators depending on land use and soil type in a semi-arid dryland in Kenya. *European Journal of Soil Biology*, 121, 103626. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2024.103626>
39. Moradi, S., Beheshti Ale Agha, A., Sarikhani, M.R., Hasanpur, K., Shiri, J. 2026. Microbial eco-physiological responses to long-term crude oil contamination in arid soils: Field evidence and AI-based prediction of qmic and qCO₂. *Ann. Appl. Biol.*, 188(2), 592–605. <https://doi.org/10.1111/aab.70073>
40. Naasko, K., Martin, T., Mammanna, C., Murray, J., Mann, M., Sprunger, C. 2024. Soil protein: A key indicator of soil health and nitrogen management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 88(1), 89–108. <https://doi.org/10.1002/saj2.20600>
41. Okolo, C.C., Dippold, M.A., Gebresamuel, G., Zenebe, A., Haile, M., Bore, E. 2020. Assessing the sustainability of land use management of northern Ethiopian drylands by various indicators for soil health. *Ecological Indicators*, 112, 106092. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106092>
42. Owliaie, H., Adhami, E., Alvaninezhad, S. 2025. Influence of wild pistachio (*Pistacia atlantica* Desf.) and wild almond (*Prunus orientalis*) canopy on selected soil properties in the Vezg forest (Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad province). *J. Soil Plant Interact.* 16(3), 39–57 (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.47176/jspi.16.3.21691>
43. Pabst, H., Kühnel, A., Kuzyakov, Y. 2013. Effect of land-use and elevation on microbial biomass and water extractable carbon in soils of Mt. Kilimanjaro ecosystems. *Appl. Soil Ecol.*, 67, 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.02.006>
44. Pareja-Sánchez, E., Domouso, P., and García-Ruiz, R. 2026. Soil erosion changes nitrogen balance estimates across a management gradient in Mediterranean olive groves. *Front. Agron.*, 8, 1851719. <https://doi.org/10.3389/fagro.2026.1851719>
45. Pausch, J., Kuzyakov, Y. 2018. Carbon input by roots into the soil: Quantification of rhizodeposition from root to ecosystem scale. *Global Change Biology*, 24(1), 1–12. <https://doi.org/10.1111/gcb.13850>
46. Putra, A.D., Ardiansyah, N., Ishaq, R.M., Saputra, D.D., Kurniawan, S., Hairiah, K. 2025. Benefits of Agroforestry for Maintaining Soil Health: using Microbial Biomass Carbon (MBC) as an indicator. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1466, No. 1, p. 012002). IOP Publishing.
47. Samaei, F., Emami, H., Lakzian, A. 2022. Assessing soil quality of pasture and agriculture land uses in Shandiz county, northwestern Iran. *Ecol. Indic.*, 139, 108974. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108974>
48. Sarkar, S., Das, D.K., Singh, A., Laik, R., Singh, S.K., van Es, H.M., Mahmoud, E. A. 2024. Seasonal variations in soil characteristics control microbial respiration and carbon use under tree plantations in the middle gangetic region. *Heliyon*, 10(16). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35593>
49. Schiebelbein, B.E., Bordonal, R.D.O., Cerri, C.E.P., Oliveira, D.M.D.S., Cherubin, M.R. 2023. Mineral-associated and particulate organic matter in aggregates as a proxy for soil C changes in pasturesugarcane land use transitions. *Revis.Bras. Ciên Solo*, 47, e0220103. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220103>
50. Sharma, S., Bhardwaj, S.K., Bhardwaj, D.R., Kumar, G., Nangla, S., Rachappanavar, V., Sharma, I. 2025. Soil Quality Dynamics across Diverse Land-Use Types in the Northwestern Himalayan Mountain Ecosystem. *Euras. Soil Sci.*, 58(13), 199. <https://doi.org/10.1134/S1064229325602331>
51. Singh, J., Abarca, V., Restuccia, N.G., Lindsey, A.J. 2026. Lawn Age and Soil Health in Florida Urban Landscapes: Carbon Sequestration, Respiration, and Nitrogen Mineralization. *Hort Tech.*, 36(1), 15–23. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH05775-25>
52. Stalham, M.A., Slack, S., Barrett, R., Bhattacharyya, R., Cavalieri-Polizeli, K.M.V., del Río, R.F., Kirkwood, I., McPhee, J.E., McWilliam, S., Pavék, M.J., Rahmati, M., Rios, L., Speed, K., Steyn, M., Thornton, M., Tillier, L., White, B., Wright, P., Zhao, Y., McKenzie, B.M. 2026. Soil cultivation for potatoes. A global survey of cultivation practices. *Soil and Tillage Research*, 259, 107052. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.107052>
53. Tadayonnejad, M., Shahmansouri, S. 2025. The impact of conservation tillage systems on soil pore size distribution and hydraulic properties under saline conditions and barley-safflower rotation. *J. Soil Plant Interact.* 15(4), 79–97 (In Persian). <https://doi.org/10.47176/jspi.15.4.01893>

54. Tan, S., Cao, Y., Zhang, Z., Zhou, L., Li, X. 2025. The grain for green program promotes soil organic matter accumulation and improves soil fungal diversity in the Southwestern karst region. *Forests*, 16(1), 121. <https://doi.org/10.3390/f16010121>
55. Tian, Y., Xu, Z., Wang, Y., He, J., Wang, Z. 2023. Soil quality evaluation for different forest plantation of sandy land in Yinchuan Plain, Ningxia. *Acta Ecol. Sin.*, 43(4), 1515–1525. <https://doi.org/10.1155/2022/7506189>
56. Vance, E.D., Brookes, P.C., Jenkinson, D.S. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biol. Biochem.*, 19(6), 703–707. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90052-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90052-6)
57. Walkley, A., Black, C.A. 1934. Determination of organic matter in the soil by chromic acid digestion. *Soil Sci*, 63, 251–264.
58. Wang, W., Petticord, D.F., Zhao, S., Yang, G., Chen, Y., Huang, X. 2026. Conversion from farmland to orchard or agroforestry improves soil carbon sequestration by enhancing microbial biological activity in Northwest China. *Plos one*, 21(3), e0344008. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0344008>
59. Weil, R.R., Islam, K.R., Stine, M.A., Gruver, J.B., Samson-Liebig, S.E. 2003. Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. *American Journal of Alternative Agriculture*, 18(1), 3–17. <https://doi.org/DOI: 10.1079/AJAA200228>
60. Yakovlev, A.S., Gendugov, V.M., Glazunov, G.P., Evdokimova, M.V., Shulakova, E.A. 2009. Methodology for the environmental assessment of the soil state and regulation of the soil quality. *Eurasian Soil Science*, 42(8), 916–925. <https://doi.org/10.1134/S1064229309080109>
61. Yuan, G., Huan, W., Song, H., Lu, D., Chen, X., Wang, H., Zhou, J. 2021. Effects of straw incorporation and potassium fertilizer on crop yields, soil organic carbon, and active carbon in the rice–wheat system. *Soil Til. Res.*, 209, 104958. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104958>
62. Zhao, Y., Xu, Y., Cha, X., Zhang, P., Li, Y., Cai, A., Ren, C. 2025. A Global Meta-Analysis of Land Use Change on Soil Mineral-Associated and Particulate Organic Carbon. *Glob.Chan. Biol.*, 31(3), e70111. <https://doi.org/10.1111/gcb.70111>