Urmia University

Forest Research and Development

Vol. 12, Issue 1, 2026, 123-159

Review Paper

A review of forest soil quality assessment indicators

Yahya Kooch[1,*], Mahmood Tavakoli Faizabadi[2], Nahid Jafarian[3]

1,*- (Corresponding author) Associate Professor, Department of Range Management, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modarres University, Noor, I. R. Iran. (yahya.kooch@modares.ac.ir)
2- Ph.D. Student of Forestry, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modarres University, Noor, I. R. Iran. (mahmood.tavakoli@modares.ac.ir)
3- Division of Forests, Rangelands and Watershed, Ilam Agricultural and Natural Resources Research Center (AREEO), Ilam, I. R. Iran. (n.jafarian@areeo.ac.ir)

Received: 27 June 2025 Revised: 25 November 2025 Accepted: 29 November 2025

Extended Abstract

Background and Objective: Forests represent one of the most critical terrestrial ecosystems, playing a fundamental role in biodiversity conservation, carbon sequestration, and environmental stability. While the resilience of these ecosystems is intrinsically linked to soil quality, factors such as land-use change, industrial pollution, climate change, and unsustainable management practices have led to widespread forest soil degradation. This process not only hinders vegetation growth and establishment but also compromises essential soil functions, including nutrient cycling, carbon storage, and hydrological regulation. Consequently, soil quality has emerged as a key metric for assessing the health and sustainability of forest ecosystems. Despite its significance, a comprehensive and standardized set of indicators for evaluating forest soil quality remains lacking. Therefore, the present study aims to develop and introduce novel soil quality indices to facilitate the robust monitoring of forest soil health.

Material and Methods: This study was conducted using a systematic review approach to evaluate forest soil quality indices. Scientific literature was retrieved from reputable national and international databases using keywords related to soil quality, forest soils, soil fertility, and soil biological indicators. The search timeframe encompassed 1390 to 1404 AP for Persian sources and 2000 to 2025 AD for international publications. Following screening and rigorous assessment, a total of 115 scientific articles were selected for analysis. The results of this review highlight the conceptual evolution of soil quality and identify the most critical physical, chemical, and biological indicators used in forest soil assessments. Among these, soil organic matter, structural properties, stratification, biodiversity, and microbial and enzymatic activities emerged as the most significant evaluation criteria. Furthermore, the capacity and application of novel biological indices, including community composition analysis, molecular and genetic methods, DNA sequencing, proteomics, and metabolomics, were examined for monitoring the health and function of forest soils.

Results: The results of this research indicate that soil health and quality are vital factors in maintaining human health and the sustainability of forest ecosystems. A review of existing literature reveals that the concept of soil quality is continuously evolving, necessitating more precise criteria for assessment in the context of forest sustainability and public health. Findings suggest that biological soil indicators, such as urease and dehydrogenase enzyme activities, microbial

respiration, and labile organic carbon, exhibit greater sensitivity and accuracy in monitoring forest soil quality compared to traditional physical and chemical parameters. Based on this systematic review, an integrated framework incorporating the fungal-to-bacterial (F:B) ratio, metabolic quotient, and ecological stoichiometry indices is proposed as a novel suite for soil quality evaluation. This framework is highly applicable across various management levels and can detect changes induced by anthropogenic activities and natural disturbances with high precision.

Conclusion: This systematic review emphasizes that the future of forest soil quality assessment must transition from traditional physical and chemical indices toward an integrated framework centered on sensitive biological indicators. Synthesized from previous studies, this proposed framework identifies the fungal-to-bacterial (F:B) ratio, metabolic quotient, key enzymatic activities (urease and dehydrogenase), and stoichiometric indices (microbial C:N ratio) as the core components for soil quality monitoring. Implementing this framework enables forest managers not only to facilitate early detection of degradation and evaluate the efficacy of conservation management practices but also to achieve dynamic and practical monitoring of forest ecosystem health. Future research priorities should focus on the localization and validation of these integrated indices within Iran's forest ecosystems.

Keywords: Soil biota, Soil health, Assessment methods and indices, Organic matter.

How to Cite This Article: Kooch, Y., Tavakoli Faizabadi, M., and Jafarian, N. (2026). A review of forest soil quality assessment indicators. Forest Research and Development, 12(1), 123-159. DOI: 10.30466/jfrd.2025.56309.1762

Copyright ©2024 Kooch et al. Published by Urmia University.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

پژوهش و توسعه جنگل
جلد ۱۲، شماره ۱، صفحه ۱۵۹-۱۲۳، (۱۴۰۵)
DOI: https://doi.org/10.30466/jfrd.2025.56309.1762
DOR:

مقالهٔ مروری

مروری بر شاخص‌های ارزیابی کیفیت خاک‌های جنگلی

یحیی کوچ*[۱]، محمود توکلی فیض‌آبادی[۲]، ناهید جعفریان[۳]

۱- دانشیار، گروه مرتعداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. (yahya.kooch@modares.ac.ir)
۲- دانشجوی دکتری، گروه جنگل‌داری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. (mahmood.tavakoli@modares.ac.ir)
۳- دکتری علوم زیستی جنگل، محقق بخش تحقیقات جنگلها، مراتع و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان ایلام، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایلام، ایران. (n.jafarian@areeo.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۸

چکیده

مقدمه و هدف: جنگل‌ها از مهم‌ترین بوم‌سازگان‌های خشکی هستند که در حفظ تنوع زیستی، ذخیره کربن و پایداری محیط‌زیست نقش اساسی دارند. پایداری این بوم‌سازگان‌ها به کیفیت خاک وابسته است، اما عواملی مانند تغییر کاربری اراضی، آلودگی‌های صنعتی، تغییرات اقلیمی و بهره‌برداری ناپایدار موجب تخریب خاک‌های جنگلی شده‌اند. این فرایند علاوه بر کاهش رشد و استقرار پوشش گیاهی، کارکردهای مهم خاک از جمله چرخه مواد مغذی، ذخیره کربن و تنظیم منابع آب را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. ازاین‌رو، کیفیت خاک به‌عنوان معیاری کلیدی برای ارزیابی سلامت و پایداری بوم‌سازگان‌های جنگلی شناخته می‌شود. با وجود اهمیت این موضوع، هنوز مجموعه‌ای جامع و استاندارد از شاخص‌ها برای ارزیابی کیفیت خاک‌های جنگلی وجود ندارد. بنابراین، این پژوهش با هدف معرفی شاخص‌های نوین کیفیت خاک برای پایش سلامت خاک‌های جنگلی انجام شده است.

مواد و روش‌ها: این پژوهش به روش مرور سیستماتیک و با هدف بررسی شاخص‌های ارزیابی کیفیت خاک‌های جنگلی انجام شد. منابع علمی از پایگاه‌های معتبر داخلی و بین‌المللی با استفاده از کلیدواژه‌های مرتبط با کیفیت خاک، خاک‌های جنگلی، حاصلخیزی خاک و شاخص‌های زیستی خاک جستجو و گردآوری شدند. بازه زمانی جستجو برای منابع فارسی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۴ و برای منابع خارجی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵ را دربر گرفت. در مجموع، ۱۱۵ مقاله علمی پس از غربالگری و ارزیابی، مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج این بررسی روند تکامل مفهوم کیفیت خاک و مهم‌ترین شاخص‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی مورد استفاده در ارزیابی خاک‌های جنگلی را نشان داد. در این میان، شاخص‌هایی نظیر ماده آلی خاک، ویژگی‌های ساختاری و لایه‌بندی خاک، تنوع زیستی و فعالیت‌های میکروبی و آنزیمی از مهم‌ترین معیارهای ارزیابی

کیفیت خاک معرفی شدند. همچنین ظرفیت و کاربرد شاخص‌های نوین زیستی شامل تحلیل ترکیب جوامع زیستی، روش‌های مولکولی و ژنتیکی، توالی‌یابیDNA ، پروتئومیکس و متابولومیکس در پایش سلامت و عملکرد خاک‌های جنگلی مورد بررسی قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که سلامت و کیفیت خاک به‌عنوان عاملی کلیدی در حفظ سلامت انسان و پایداری بوم‌سازگان‌های جنگلی اهمیت حیاتی دارد. مرور بررسی‌های گذشته نشان داد که مفهوم کیفیت خاک به‌طور مداوم درحال تحول است و نیاز به معیارهای دقیق‌تر برای ارزیابی آن در ارتباط با پایداری بوم‌سازگان‌های جنگلی و سلامت انسان دارد. بر اساس یافته‌ها، شاخص‌های زیستی خاک مانند فعالیت آنزیم‌های اوره‌آز و دهیدروژناز، تنفس میکروبی و کربن آلی ناپایدار در مقایسه با شاخص‌های فیزیکی و شیمیایی، حساسیت و دقت بیشتری در پایش کیفیت خاک‌های جنگلی دارند. بر مبنای مرور نظام‌مند بررسی‌ها، چارچوب تلفیقی متشکل از نسبت قارچ به باکتری، ضریب متابولیکی و شاخص‌های استوکیومتری بوم‌شناسی به‌عنوان مجموعه‌ای نوین برای ارزیابی کیفیت خاک پیشنهاد می‌شود. این چارچوب از قابلیت کاربردی در سطوح مختلف مدیریتی برخوردار بوده و می‌تواند تغییرات ناشی از فعالیت‌های انسانی و اختلالات طبیعی را با دقت بالایی آشکار سازد.

نتیجه‌گیری: به‌عنوان حاصل این مرور نظام‌مند، می‌توان تأکید کرد که رویکرد آینده در ارزیابی کیفیت خاک‌های جنگلی، باید بر گذر از شاخص‌های سنتی فیزیکی و شیمیایی به سمت یک چارچوب تلفیقی با محوریت شاخص‌های زیستی حساس متمرکز شود. این چارچوب که از سنتز بررسی‌های پیشین استخراج شده است، شاخص‌هایی چون نسبت قارچ به باکتری، ضریب متابولیکی، فعالیت آنزیم‌های کلیدی (اوره‌آز و دهیدروژناز) و شاخص‌های استوکیومتری (نسبت کربن به نیتروژن میکروبی) را به‌عنوان هسته اصلی پایش کیفیت خاک معرفی می‌کند. بکارگیری این چارچوب توسط مدیران جنگل، نه تنها امکان تشخیص زودهنگام تخریب و ارزیابی اثربخشی روش‌های مدیریتی حفاظتی را فراهم می‌سازد، بلکه پایش پویا و کاربردی سلامت بوم‌سازگان جنگلی را میسر می‌کند. اولویت پژوهشی آینده، بومی‌سازی و اعتبارسنجی این شاخص‌های تلفیقی در بوم‌سازگان‌های جنگلی ایران خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: زیست خاک، سلامت خاک، شیوه‌ها و شاخص‌های ارزیابی، ماده آلی.

* نویسنده مسئول شمارهٔ تماس: ۰۹۱۱۲۹۳۲۳۱۳

مقدمه

از دیرباز تاکنون، ارزیابی ویژگی‌های خاک برای مدیران جنگل در سراسر جهان اهمیت داشته است تا ظرفیت مناطق جنگلی در پشتیبانی از تولیدات جنگل مورد بررسی قرار گیرد (Worrell and Hampson, 1997; Schoenholtz et al., 2000؛ Siry et al., 2005). در سال‌های اخیر، به دلیل افزایش علاقه عمومی به ارزیابی تأثیرات روش‌های مدیریتی بر کیفیت خاک، که به پایداری عملکرد بوم‌سازگان جنگلی و تولید گیاهی مرتبط است، این نیاز بیشتر احساس می‌شود. مفهوم کیفیت خاک (Soil Quality) شامل ارزیابی ویژگی‌ها و فرآیندهای خاک به‌گونه‌ای است که نشان دهد خاک چگونه می‌تواند به‌عنوان یک جزء مؤثر در یک بوم سازگان سالم عمل کند (Lehmann et al., 2021). کیفیت خاک، مشابه با مفاهیم کیفیت رویشگاه یا بهره‌وری جنگل، بر اساس اهداف مدیریت بوم‌سازگان تعریف می‌شود و بنابراین به نوع مدیریت و ویژگی‌های بوم‌سازگان وابسته است (Schoenholtz et al., 2000) کیفیت خاک ممکن است به‌طور گسترده به‌عنوان ترکیبی از عملکردهای فیزیکی، ظرفیت نگهداری آب، ذخیره‌سازی کربن، چرخه مواد غذایی، فراهم‌سازی زیستگاه، تولید محصول، کاهش آلودگی و دیگر عملکردها تعریف شود (Kazemi et al., 2015). با این حال، تعاریف محدودتری نیز ممکن است وجود داشته باشد؛ به‌عنوان مثال، یک مدیر جنگلکاری ممکن است کیفیت خاک را به ظرفیت تولید زیست‌توده آن مرتبط کند.

این مقاله ابتدا به بررسی کیفیت خاک می‌پردازد و سپس چگونگی توسعهٔ مفهوم کیفیت خاک در علوم کشاورزی و جنگلداری را مرور می‌کند. در ادامه، استفاده از شاخص‌های نوین خاک به‌عنوان معیارهای کیفیت و سلامت خاک‌های جنگلی برای ارزیابی کیفیت خاک مورد تحلیل قرار گرفته و چالش‌ها و فرصت‌هایی برای دانشمندان خاکشناسی جنگل ارائه می‌شود تا از طریق درک مفهوم کیفیت خاک به‌عنوان شاخص پایداری، نقش موثرتری در ارزیابی صحیح و بهبود مدیریت پایدار جنگل‌ها ایفا کنند.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌صورت مروری و با استفاده از پایگاه‌های داده معتبر علمی مانند Google Scholar، ScienceDirect، Scopus و ResearchGate انجام شد. در مرحله نخست، مقالات مرتبط با ارتباط میان سلامت و کیفیت خاک با سلامت انسان بررسی شد. هدف از این بخش، نشان دادن اهمیت پرداختن به کیفیت خاک و تأثیرات آن بر سلامت بوم‌سازگان‌ها و انسان بود. برای این منظور، مقالات منتشرشده در دو دهه اخیر با تأکید بر ارزیابی‌های علمی و محیط‌زیستی بررسی و تحلیل شدند. در مرحله بعد، تاریخچهٔ توسعه و تکامل مفهوم کیفیت خاک مورد توجه قرار گرفت. در این بخش، به بررسی منابع علمی کلیدی پرداخته شد که روند تحول مفهوم کیفیت خاک را از گذشته تا به امروز تحلیل می‌کنند. تلاش شده تا از رویکردهای مختلف، مانند بررسی‌های تجربی و مروری، برای درک عمیق‌تر از تغییرات در مفهوم کیفیت خاک بهره‌برداری شود. در نهایت، شاخص‌های نوین کیفیت خاک که در بررسی‌های اخیر معرفی شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفتند. شاخص‌های فیزیکی، شیمیایی، و زیستی مختلف تحلیل و ارزیابی شدند تا مجموعه‌ای از شاخص‌های کارآمد برای ارزیابی کیفیت خاک‌های جنگلی ارائه شود. در این بخش، تأکید بر شاخص‌هایی همچون ماده آلی، جانداران خاکزی، فعالیت‌های میکروبی و آنزیمی بوده است. این شاخص‌ها با توجه به تغییرات مدیریتی

و اثرات ناشی از اختلالات طبیعی و انسانی، در بررسی‌های متنوع تحلیل و بررسی شدند.

کیفیت خاک

به‌طور کلی، مفهوم ترکیبی کیفیت خاک و سلامت خاک شامل کیفیت درون‌زاد خاک (که به‌طور سنتی به آن تناسب خاک گفته می‌شود) و کیفیت پویای خاک یا سلامت خاک است. در این راستا، سلامت خاک بیشتر با کیفیت پویای خاک مرتبط است، درحالی‌که تناسب خاک با کیفیت ذاتی یا درون‌زاد خاک ارتباط دارد. بنابراین، رابطه بین کیفیت و سلامت خاک می‌تواند در قالب رابطه ۱ توضیح داده شود.

رابطهٔ ۱ کیفیت درون‌زاد خاک (تناسب خاک) + کیفیت پویای خاک (سلامت خاک)=کیفیت خاک

تکامل مفهوم کیفیت خاک در کشاورزی و جنگلداری

ارزیابی کیفیت خاک به دانش بومی کشاورزان در سنجش توان تولیدی زمین‌ها برمی‌گردد که با گذشت زمان و از طریق آزمون و خطا شکل گرفت (Warkentin, 1995). این دانش اولیه با پیشرفت‌های علمی بعدی تکامل یافت و به ایجاد سیستم‌های دقیق طبقه‌بندی، نقشه‌برداری و ارزیابی خاک در قرن حاضر منجر شد (Arrouays et al., 2021).

پس از جنگ جهانی دوم، ارزیابی تأثیر مدیریت‌های مختلف بر بهره‌وری خاک آغاز شد. بررسی‌ها نشان داد که اقداماتی مانند زهکشی و کوددهی بهره‌وری را افزایش می‌دهند، اما فرآیندهای تخریبی مانند فرسایش و کاهش ماده‌آلی آن را کاهش می‌دهند (Warkentin, 1995). با توجه به همزمانی این تغییرات، ارزیابی کیفیت خاک نمی‌تواند تنها بر اساس عملکرد محصول باشد و به شاخص‌های جامع‌تری نیاز دارد.

درحالی‌که جنگلداری بهره‌وری خاک را صرفاً بر اساس تولید چوب ارزیابی می‌کرد (Ford, 1983)، کشاورزی با تعریف گسترده‌تری از ظرفیت خاک برای انجام عملکردهای مختلف رویکرد جامع‌تری داشت (Warkentin, 1995). با توجه به اینکه خاک‌های جنگلی نیز عملکردهای بوم‌سازگانی متعددی مانند ذخیره کربن، تنظیم چرخه آب و بازیافت مواد مغذی را بر عهده دارند، لازم است تعریف بهره‌وری خاک در جنگلداری نیز به همین وسعت توسعه یابد.

در دهه‌های اخیر، ارزیابی کیفیت خاک با افزایش آگاهی از نقش حیاتی آن در حفاظت محیط‌زیست گسترش یافته است. این روند پس از انتشار گزارش "خاک و کیفیت آب" (شورای تحقیقات ملی، ۱۹۹۳) شتاب گرفت و به تعریف رسمی کیفیت خاک توسط انجمن علمی خاک آمریکا به‌عنوان "ظرفیت خاک برای انجام عملکردهای حیاتی در بوم‌سازگان‌های طبیعی و مدیریت‌شده" منجر شد. ارزیابی مطابق با شاخص‌های قابل اندازه‌گیری فیزیکی، شیمیایی و زیستی که عملکردهای خاک را منعکس می‌کنند، دید جامع‌تری از وضعیت خاک ارائه می‌دهد (Muñoz-Rojas, 2018; Gomes et al., 2023). با توجه به تداوم تخریب خاک جهانی در اثر فرسایش، شوری و کاهش ماده آلی، مدیریت مستقل منابع خاک برای حفظ بهره‌وری پایدار و حفاظت از محیط‌زیست ضروری است (Smith et al., 2024).

ارزیابی صحیح کیفیت خاک می‌تواند به‌عنوان شاخصی برای تضمین امنیت غذایی، ارتقای سلامت و مقابله با تخریب خاک عمل کند (Evangelista et al., 2023). اهمیت این موضوع با برگزاری سمپوزیوم‌های متعددی چون کارگاه رودایل (۱۹۹۱) و سمپوزیوم

بوداپست (۱۹۹۲) مورد تأکید قرار گرفته است و در آثار مرجعی مانند «روش‌های ارزیابی کیفیت خاک» تدوین شده است. این توجه در سطح بین‌المللی با نامگذاری روز جهانی خاک (پنج دسامبر) توسط اتحادیه جهانی علوم خاک (۲۰۰۳) و تعیین سال ۲۰۱۵ به‌عنوان سال جهانی خاک‌ها توسط سازمان ملل متحد تثبیت شده است (Kooch, 2021).

کیفیت خاک در جنگلداری

در جنگلداری، خاک بیشتر به‌عنوان بخشی از جنگل درنظر گرفته می‌شود و کمتر به‌عنوان منبعی مستقل مورد توجه قرار می‌گیرد. اگرچه مفهوم "کیفیت سایت" که خاک، توپوگرافی و شرایط آب و هوایی را شامل می‌شود، به‌خوبی شناخته شده است، اما ارزیابی آن معمولاً بر اساس معیارهای رشد درختان مانند ارتفاع در سن خاصی انجام می‌شود (Schoenholtz et al., 2000; Aguirre et al., 2022). این درحالی است که خاک جنگلی علاوه بر تولید چوب، عملکردهای حیاتی دیگری مانند ذخیره کربن، تنظیم چرخهٔ آب و تجزیه مواد زائد را برعهده دارد (Evangelista et al., 2023). برای دستیابی به مدیریت پایدار جنگل، لازم است که نقش چندگانه خاک در بوم‌سازگان به‌طور کامل درک شده و تغییرات ناشی از عملیات مدیریتی به دقت پایش شود.

شیوه‌ها و شاخص‌های ارزیابی کیفیت خاک

ارزیابی کیفیت خاک در سال‌های اخیر پیشرفت قابل توجهی کرده است. در مقیاس جهانی به سبب اهمیت تغییرات محیط زیست، بهبود روش‌های ارزیابی کیفیت خاک برای توسعه پایدار و نیز تشخیص پایداری مدیریت خاک و سامانه‌های کاربری زمین ضروری است. از این‌رو، به‌دست آوردن روش‌ها و شاخص‌های مناسب ارزیابی کیفیت خاک به علت تأثیر مهم آن بر نتیجه‌گیری و قضاوت نهایی در مورد وضعیت کیفیت و مدیریت خاک، مانند مهم‌ترین مسائل مورد توجه است. تا به حال روش‌های متنوعی برای جمع‌آوری داده‌ها، اندازه‌گیری و ارزیابی کیفیت خاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از روش‌های عمدتاً کیفی تا کاملاً کمی شامل کارت‌های نمره‌دهی (Scorecards)، ارزیابی بصری خاک (Visual soil assessments)، بسته‌های آزمایشی یا مزرعه‌ای (Field kits)، آمایش خاک (Soil surveys) و تجزیه‌های آزمایشگاهی در تعیین کیفیت خاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در بین این روش‌ها، امروزه تجزیه‌های آزمایشگاهی متداول‌ترین روش است، که برتری آنها، امکان استفاده آسان، انعطاف‌پذیری و کمی بودن ویژگی‌های مؤثر بر شاخص‌های مختلف کیفیت می‌باشد (Kooch, 2021). شاخص‌های مؤثر بر شاخص‌های کیفیت خاک به‌صورت فرآیندها و ویژگی‌هایی از خاک تعریف می‌شوند که به تغییرات مدیریت خاک حساس هستند. این ویژگی‌ها می‌توانند مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، زیستی یا ترکیبی از آنها باشند (Wang et al., 2023).

مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

بوم‌شناسان و پژوهشگران خاکشناسی به این موضوع پی برده‌اند که پوشش گیاهی جنگلی می‌تواند بر ویژگی‌های خاک مؤثر باشند. تغییر نوع کاربری اراضی از جنگل به رویشگاه‌های دیگر علاوه بر تغییر پوشش‌گیاهی موجب تغییرات اساسی در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک می‌شود. در واقع تغییر کاربری موجب تغییر در مقدار لایه‌بندی ماده آلی می‌شود و این تغییر مقدار، اثرات مستقیمی بر مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دارد. تغییر پوشش اراضی علاوه بر تغییر مقدار ماده‌آلی ورودی موجب تغییرات فیزیکی مانند تغییر در جرم مخصوص ظاهری، جرم مخصوص حقیقی، تخلخل،

پایداری خاکدانه، بافت، رطوبت و حرارت خاک می‌شود. با کاهش درصد ماده‌آلی، سبک شدن بافت و تخریب ساختمان خاک طی تغییر کاربری جنگل به اراضی کشاورزی، جرم مخصوص ظاهری افزایش می‌یابد، زیرا با عملیات خاک‌ورزی و بهم زدن خاک سطحی موجب کاهش ماده‌آلی و تخریب خاک می‌شود، در نتیجه خلل و فرج خاک کاهش می‌یابد (Ibáñez and Bockheim, 2013). از طرفی با کاهش درصد لایه آلی، سبک شدن بافت و تخریب ساختمان خاک مشاهده می‌شود. در مجموع مشخصه‌های فیزیکی خاک در ارزیابی کیفیت خاک از اهمیت بالایی برخوردارند، زیرا این ویژگی‌ها پویا بوده و به‌وسیله اعمال مدیریت‌های مختلف تغییر می‌کنند (Baath and Anderson, 2003). شاخص پایداری خاکدانه‌ها، مقدار ماده‌آلی و مقدار رس قابل انتشار از شاخص‌های مهم در ارزیابی ویژگی‌های کیفی خاک به‌حساب می‌آیند. در چهار قرن گذشته حدود ۳۰ درصد از اراضی جنگلی جهان به چراگاه‌های دام و اراضی کشاورزی تبدیل شده است. چنین فعالیت‌هایی سبب کاهش ورود بقایای گیاهی تازه به خاک شده و منجر به بروز تغییراتی قابل در ویژگی‌های شیمیایی خاک شده است. در محدوده بهینه (معمولاً اسیدیتهٔ نزدیک به خنثی)، افزایش pH بیشتر با زیست‌توده میکروبی بیشتر و نرخ بالاتری از تجزیه لاشبرگ، تنفس خاک و معدنی‌سازی خالص نیتروژن همراه است. خاک‌هایی با pH بین شش تا هفت معمولاً از غلظت بالایی از مواد مغذی در دسترس برخوردارند، با این حال در سطوح بالاتر یا پایین‌تر pH، عناصر به غلظت‌های سمی خود نزدیک می‌شوند. در سطوح پایین pH، آلومینیوم، آهن و منگنز به مقدار زیاد در دسترس گیاه هستند. در سطوح بالای pH، کلسیم و پتاسیم غلظت بالایی خواهند داشت. مطابق با گزارش‌های ارائه‌شده تغییر در کاربری اراضی جنگلی موجب آزادسازی و ورود خالص حدود ۰/۹۱ گرم کربن در هر سال به اتمسفر می‌شود. مطابق با بررسی‌ها، فعالیت کشاورزی منجر به کاهش قابل توجهی از کربن خاک می‌شود، درحالی‌که فعالیت‌هایی مانند بهره‌برداری یا احیای جنگل‌ها مقدار ناچیزی از ذخیره کربن را آزاد می‌کند. بقایای آلی در خاک منابع اصلی مواد آلی ازته را در خاک تشکیل می‌دهند و مطابق با یافته‌های پژوهشگران، ماده‌آلی خاک به شدت بر گردش نیتروژن خاک تأثیر می‌گذارد و بقایای آلی با غلظت بیشتر نیتروژن، تأثیر مثبتی بر افزایش ذخیره نیتروژن خاک دارند و بیش از ۵۰ درصد از نیاز نیتروژن محصولات را تأمین می‌کند. در واقع نیتروژن یکی از مهم‌ترین عناصر مورد نیاز برای رشد گیاهان است که با تغییر کاربری جنگل روند کاهشی دارد. بیشینه نیتروژن کل در لایه صفر تا ۱۰ سانتی‌متر در کاربری جنگل به مقدار ۰/۳۰ درصد و کمینه آن در لایه ۲۰-۱۰ سانتی‌متر در کاربری باغ به‌مقدار ۰/۱۹ درصد مشاهده شد، که کاهشی معادل با ۳۷/۳۲ درصد را نشان می‌دهد. نسبت C/N عبارت است از نسبت جرم کربن به جرم نیتروژن در ماده و این نسبت در مواد مختلف مقادیر متفاوتی دارا می‌باشد. نسبت C/N محتوی ماده‌آلی خاک شاخص اصلی کیفیت مواد آلی محسوب می‌شود و می‌توان از آن در تعیین مقدار نیتروژن آزادشده طی فرآیند تجزیه استفاده کرد. این شاخص بیانگر مقدار معدنی‌سازی نیتروژن و مقدار نیتروژن غیرفعال به ازای هر واحد کربن تحت عملکرد تجزیه‌کنندگان است. نسبت C/N را می‌توان به‌عنوان شاخص حاصلخیزی خاک و دسترسی به نیتروژن مورد توجه قرار داد. پژوهش‌های مختلفی نسبت‌های کربن و نیتروژن خاک را به‌عنوان متغیرهای مهم در حاصلخیزی خاک‌های جنگلی عنوان کردند (Heydari et al., 2023).

نقش عناصر غذایی در رویشگاه‌های جنگلی از اهمیت فراوانی برخوردار است. عناصر غذایی باید به‌صورت ترکیباتی قرار گیرند که به راحتی در دسترس گیاه باشد. دو نکته مهم که در تعیین یک عناصر غذایی گیاه در نظر گرفته می‌شوند: الف) ضرورت آن برای تکمیل دوره و چرخه زندگی گیاه می‌باشد. ب) اثر مستقیم در تغذیه گیاه بدون توجه به اثرات آن در اصلاح برخی شرایط نامناسب خاک و محیط است. پتاسیم موجب سرعت بخشیدن به سنتز و تحریک کربوهیدرات‌ها و ضخیم شدن دیواره سلولی گیاه و مقاوم شدن آن در برابر امراض نقش دارد و فسفر در ساختمان سلولی نقش دارد و به منزله منبع انرژی عمومی در کلیه فعل و انفعالات بیوشیمیایی داخل سلول‌های زنده نقش ضروری و مهمی دارد. عنصر کلسیم در پایداری دیواره سلولی، توسعه سلول و فرایندهای داخلی، پایداری غشاهای سلولی، تعادل کاتیون و آنیون، فعال‌کننده برخی آنزیم‌ها و همچنین تنظیم فشار اسمزی نقش دارد. کمبود آن سبب تجزیه دیوار سلولی و خشکیدگی برگ‌ها می‌شود. منیزیم تنها جزء معدنی مولکول کلروفیل است. منیزیم در ساخته شدن روغن در گیاه دخالت داشته و سبب تنظیم جذب فسفر در گیاه می‌شود و نیز در تولید هیدروکربن‌ها و مواد قندی مؤثر است. منیزیم انتقال‌دهنده فسفر به دانهٔ گیاهان است و همچنین فعال‌کننده آنزیم‌های دهیدروژناز و دی‌کربوکسیلاز است و در تنفس سلولی اهمیت حیاتی دارد. این عنصر فعال‌کننده آنزیم‌ها و در اعمال اکسیداسیون و احیاء در گیاه نقش دارد و عامل جداسازی مولکول اکسیژن در فتوسنتز است. همچنین، تغییر کاربری اراضی بر کاهش مواد مغذی خاک اثرگذار است (Haghprast Tanha, 1993).

ماده‌آلی و لایه‌بندی آن

مواد آلی بخشی از ترکیبات جامد سطحی خاک را تشکیل می‌دهند و نقش آن در پایداری، بهبود مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی و نیز کارکرد خاک جنگل اهمیت بسیاری دارد. هوموس، بخش سطحی خاک، به شدت تحت تأثیر مواد آلی خاک قرار دارد و از لایه‌های آلی و آلی- معدنی تشکیل شده است (Graham et al., 1995). بقایای گیاهی مانند برگ، برگ سوزنی، چوب و ترشحات ریشه بخش بارز تولید هوموس در رویشگاه‌های جنگلی را برعهده دارند. هوموس‌ها به‌عنوان محیط ویژه‌ای برای فعل و انفعالات بین گیاهان، خاک و میکروارگانیسم‌ها به‌حساب می‌آیند. تجزیه مواد آلی به اجزای کوچکتر، اولین قدم در تبدیل مواد آلی به مواد معدنی قابل استفاده برای گیاهان است. از آنجایی‌که در رویشگاه‌های جنگلی تقریباً بیشتر مواد غذایی دردسترس گیاهان از بقایای گیاهی نشأت می‌گیرند، بنابرین تجزیهٔ لاشبرگ‌های گیاهی در یک رویشگاه مرحله مهمی از چرخهٔ مواد غذایی است (Guo et al., 2003). اغلب، بستر رویشگاه‌های جنگلی حاصل از مواد لاشبرگی و چوب‌های پوسیده است که طی مدت‌های زیادی انباشته و به‌صورت هوموس درآمده‌اند (شکل‌های ۱ و ۲)، که شامل مواد غذایی و کربن ذخیره‌شده در لایه‌های مختلف است.

شکل ۱- ورود حجم عظیمی از لاشبرگ‌ها در رویشگاه‌های جنگلی معتدله (Biranvand, 2015).

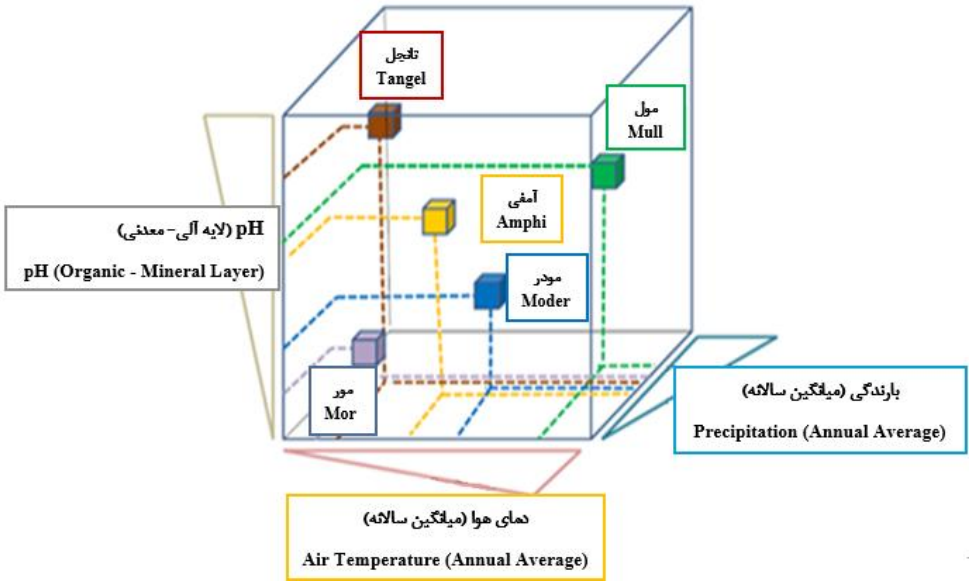
Figure 1. The input of a massive volume of leaf litter in temperate forest stands

شکل ۲- پنج فرم غالب هوهوس در رویشگاه‌های معتدله جهان (Kooch, 2023).

Figure 2. The five dominant forms of humus in temperate forest ecosystems worldwide

درصد غلظت مواد غذایی در لاشبرگ‌های گیاهان مختلف و همچنین آزادسازی مواد غذایی در تیپ‌های مختلف لاشبرگی متفاوت است. در رویشگاه‌های جنگلی، اشکال هوموس به‌عنوان یک الگوی مورفولوژیکی در ارتباط با مواد آلی و معدنی در نظر گرفته می‌شود و به‌عنوان نیروی محرکه، بسیاری از تغییرات در رویشگاه‌های جنگلی را نشان می‌دهد (Biranvand, 2015). طبقه‌بندی فرم‌های هوموس، روابط بین بوم‌سازگان و جوامع زنده را مشخص می‌کند و به‌عنوان ابزاری برای ارزیابی سلامت رویشگاه‌ها معرفی شده است. فرم‌های هوموس در باروری مواد معدنی و حاصلخیزی خاک بسیار تأثیرگذار است. فرم‌های هوموس توسعه‌یافته بیشترین اهمیت را در پایداری رطوبت و مواد غذایی خاک برعهده دارد (Nikpour et al., 2017). همچنین، بستری مناسب برای فعالیت ارگانیسم‌های تجزیه‌کننده، منبع کربن، عناصر غذایی و یکی از برآورد کننده‌های دما، هوادیدگی و ریشه‌دوانی در رویشگاه‌ها است؛ از این‌رو، عوامل مهمی در بررسی حاصلخیزی خاک به‌شمار می‌آید. فرم‌ها و لایه‌های مختلف هوموس، بزرگترین بخش ذخیره کربن آلی خاک به‌حساب می‌آیند، بر همین اساس نقش بسیار مهم و مؤثری در فرآیند چرخه کربن و پدیده گرمایش جهانی زمین برعهده دارند. همچنین می‌توان اذعان داشت که اشکال هوموس نقش بسیار مهمی در تنوع زیستی کاربردی رویشگاه‌های جنگلی ایفا می‌کنند(Nikpour and Habashi, 2023). بنابراین شناخت و طبقه‌بندی فرم‌های هوموس بسیار ضروری است. پژوهش‌های انجام‌شده در خصوص اشکال

هوموس به سه فرم اصلی آنها (مول، مودر و مور) در رویشگاه‌های مختلف اشاره داشته‌اند، درحالی‌که فرم‌های دیگر هوموس (آمفی و تانجل) کمتر مورد بحث قرار گرفته است (Nikpour et al., 2017). تغییر در فرم‌های هوموس را می‌توان در نتیجهٔ تغییر در تنوع گیاهان و خاک نسبت داد. نقش و روابط نزدیک بین فرم هوموس، پوشش گیاهی و خاک که در بسیاری از پژوهش‌ها به اثبات رسیده است، سبب می‌شود که فرم هوموس یکی از ترکیبات اصلی رویشگاه‌های جنگلی به‌شمار آید (Biranvand, 2015). با توجه به اینکه مواد اولیه تشکیل‌دهنده هوموس‌ها در اراضی طبیعی بیشتر از لاشبرگ و تکه چوب‌های پوشش‌های گیاهی چوبی و علفی است، بنابراین شناسایی تیپ‌های مختلف گیاهی و تأثیر آنها روی فرم‌های هوموس بسیار با اهمیت است. با استفاده از نوع خاک، اقلیم و تیپ‌های گیاهی می‌توان توزیع فرم‌های هوموس و روابط بین این عوامل را مدلسازی کرد. تیپ‌های گیاهی متفاوت می‌تواند نشان‌دهنده وضعیت حاصلخیزی عناصر غذایی در فرم‌های هوموس و خاک باشد. فرم‌های هوموس عمدتاً تحت تأثیر عوامل محیطی و بوم‌شناسی مانند آب و هوا، خاک، سنگ بستر، توپوگرافی، ترکیب گونه‌های گیاهی و عوامل مدیریتی قرار می‌گیرند (Nikpour and Habashi, 2023). در این بین ترکیب گونه‌های گیاهی تأثیر بسزایی روی فرم‌های هوموس دارند. در رویشگاه با شرایط آب و هوا و خاک ثابت، گونه‌های گیاهی می‌توانند تعیین‌کننده فرم‌های هوموس در منطقه باشند. علاوه بر این، عواملی مانند سنگ بستر و ارتفاع از سطح دریا به‌مراتب تأثیر بیشتری نسبت به تیپ‌های گیاهی روی تغییر فرم‌های هوموس دارند (Biranvand, 2015). در این زمینه، Zanella و همکاران (۲۰۱۱) تأثیر سه عامل اصلی درجهٔ حرارت، بارش سالانه و pH خاک، که از عوامل مهم تأثیرگذار بر تجزیهٔ زیستی فرم‌های هوموس هستند، را بر موقعیت نسبی اشکال اصلی هوموس در یک فضای سه‌بعدی نشان دادند (شکل ۳).



شکل ۳- موقعیت فرم‌های هوموس در ارتباط با عوامل pH، دما و بارندگی (Biranvand, 2015).

Figure 3. The position of humus forms in relation to pH, temperature, and precipitation factors

درواقع می‌توان اشاره داشت که ماده آلی طیف گسترده‌ای از اجزاء زنده و غیرزنده و یکی از پیچیده‌ترین و ناهمگن‌ترین اجزای خاک است که نقش مهمی در خواص، عملکرد، نرخ بازگشت، تنظیم چرخه فسفر، گوگرد، ترکیب با یون‌های چندبنیانی، فراهم کردن زیستگاه جانوران و موجودات میکروبی، ثبات خاکدانه، گردش مواد، نگهداری و حفظ آب دارد، به همین خاطر به‌عنوان یک ویژگی مهم کیفیت و یا سلامت خاک رویشگاه‌های جنگلی شناخته شده است. محتوای ماده‌آلی و پویایی آن در خاک، یک مشخصهٔ ضروری برای ارزیابی تغییرات در تیپ‌های مختلف جنگلی است (Scahrenbroch and Bockheim, 2007). درختان از طریق تأمین مقادیر مختلف مواد آلی با ترکیبات شیمیایی مختلف طی خزان با ایجاد لاشبرگ بر روی خاک تأثیر می‌گذارند، که تجزیه و فساد شاخ و برگ درختان در کف جنگل منجر به ایجاد تغییرات در خاک می‌شود. تغییر در مقدار لایه‌بندی ماده‌آلی منجر به تغییرات اساسی در جرم مخصوص ظاهری، پایداری خاکدانه، تخلخل، سرعت نفوذ، زیتوده میکروبی و مقدار فعالیت آن در خاک و درنهایت چرخهٔ مواد غذایی می‌شود. بسته به نوع و مقدار مواد آلی موجود در خاک، پاسخ و واکنش به تغییرات پوشش اراضی متفاوت است. امروزه از شاخص نسبت لایه‌بندی (Stratification ratio) ماده آلی (مقدار ماده آلی در لایه سطحی تقسیم بر مقادیر آن مشخصه در لایه زیرسطحی)، به‌جای مقادیر مطلق آن، برای ارزیابی کیفیت خاک رویشگاه‌های جنگلی استفاده می‌شود و به‌عنوان شاخصی از مقدار ورودی ماده‌آلی به خاک به‌حساب می‌آید. هر نوع پوششی از اراضی (جنگلی، مرتعی و زراعی) منجر به افزایش نسبت لایه‌بندی ماده‌آلی خاک در مقایسه با اراضی لخت و بدون پوشش می‌شود. همچنین نسبت لایه‌بندی ماده آلی خاک تحت پوشش‌های طبیعی بیش از دو بوده، درحالی‌که این نسبت در دیگر پوشش‌های اراضی (جنگلکاری، مرتع و کشاورزی) مقادیری کمتر از دو را نشان داده‌اند (Kooch, 2012). مرور منابع حاکی از آن است که با تبدیل مناطق تخریب‌یافته به جنگلکاری، بر مقدار انباشت ماده‌آلی در خاک افزوده می‌شود. علاوه بر آن وجود لایهٔ آلی موجب بهبود ساختمان خاک می‌شود. همچنین، با تغییر اراضی از جنگل طبیعی به کاربری‌های دیگر از مقدار لایه‌بندی ماده‌آلی کاسته می‌شود که این کاهش موجب تغییر در فعالیت موجودات خاکزی می‌شود. در واقع تغییر کاربری از جنگل طبیعی منجر به کاهش لایه‌بندی ماده آلی می‌شود و همین امر موجب کاهش رطوبت و فعالیت موجودات خاکزی می‌شود (Blagodatskaya and Anderson, 1998).

مشخصه‌های زیستی خاک

طیف وسیعی از موجودات زنده در بوم‌سازگان خاکی زندگی می‌کنند که نیازهای بوم‌شناسی متنوع و متفاوتی دارند. تعداد، تنوع و ترکیب نسبی موجودات خاکزی تابعی از ویژگی‌های خاک (رطوبت، تهویه، واکنش خاک و عناصرغذایی)، ویژگی‌های اقلیمی و پوشش گیاهی سطح خاک است. به‌عبارت دیگر، ویژگی‌های زیستی خاک که جزء ویژگی‌های پویا و دینامیک خاک است، به‌نوعی بیانگر تطابق نیازهای موجودات خاکزی با شرایط موجود در خاک است. بیشتر موجودات خاکزی از نظر تغذیه‌ای به گروه‌هایی تعلق دارند که برای فعالیت و بقاء به وجود مواد آلی در خاک وابسته هستند (هتروتروف‌اند)، انواع اتوتروف که تولیدکننده مواد آلی بوده و بخش کوچکی از جانداران خاکزی را شامل می‌شوند، جز در شرایط خاص مقدار ماده آلی تولیدی توسط آنها قابل توجه نیست (Fu et al., 2004). از طرفی مواد آلی با بهبود ویژگی‌های فیزیکی (افزایش تهویه، ظرفیت نگهداری آب در خاک) و شیمیایی

(آزادسازی عناصر غذایی، جذب و ذخیره‌سازی عناصر) بر جمعیت و فعالیت موجودات خاکزی نقش مهمی ایفا می‌کنند. ویژگی‌های خاک و اقلیم علاوه بر تعداد ریزجانداران خاکزی بر تنوع و ترکیب نسبی آنها نیز تأثیر بسزایی دارد (Fisher and Binkley, 2000). خاک حاصلخیز یکی از مهم‌ترین اجزای ضروری بوم‌سازگان است؛ زیرا نشان‌دهنده شرایط مطلوب رویشگاه و فعالیت موجودات خاکزی است. مواد آلی خاک موجب بهبود ظرفیت نگهداری مواد غذایی، ثبات خاکدانه‌ها، ذخیره کربن و ترسیب آن را دارند و تأمین‌کننده انرژی فعالیت‌های هتروتروفی در خاک هستند. همهٔ موجودات خاکزی، به‌ویژه جانوران خاک نقش مهم و شناخته‌شده‌ای در تشکیل و پایداری ساختمان خاک دارند. مطابق با مرور منابع، موجودات خاکزی سالانه تقریباً یک تن در هکتار در تولید خاک سطحی کمک می‌کنند. مورچه‌ها، موریانه‌ها، کرم‌های خاکی و سخت‌بال‌پوشان که روی سطح خاک یا در لانه و حفراتی درون خاک زندگی می‌کنند و جزء ماکروفون خاک و مهندسان بوم‌سازگان به‌شمار می‌آیند (Binkley and Valentine, 1991).

موجودات خاکزی با توجه به اندازه و نوع به چند گروه تقسیم شده‌اند. گروه اول میکروفلورای خاک و دربرگیرنده قارچ‌ها، باکتری‌ها و اکتینومیست‌ها است. تنوع این موجودات برای حفظ کیفیت خاک بحرانی است، زیرا در بسیاری از کارکردهای مهم خاک مانند چرخهٔ کربن، چرخهٔ نیتروژن، حفظ و تشکیل ساختمان خاک و تبدیل مواد آلی مشارکت دارند. میکروفون‌ها به گروه دیگری از موجودات خاک‌زی گفته می‌شوند که متوسط اندازه آنها کمتر از ۲۰۰ میکرومتر بوده و در منافذ پر آب خاک زندگی می‌کنند، پروتوزوئرها در این گروه قرار می‌گیرند. مزوفون‌ها گروه دیگری هستند که اندازه آنها ۰/۲ تا دو میلی‌متر بوده و در منافذ پر از هوای خاک زندگی می‌کنند، بندپایان کوچک (مثل کنه‌های خاکزی و پادمان) و نماتدها به این گروه تعلق دارند. ماکروفون‌ها در برگیرنده جانوران بزرگ خاک هستند مورچه‌ها، موریانه‌ها، کرم‌های خاکی و دیگر حشرات بزرگ که روی سطح خاک یا در لانه و حفراتی درون خاک زندگی می‌کنند، جزء ماکروفون‌های خاک به‌شمار می‌آیند. ماکروفون خاک بر خرد شدن، دانه‌بندی و ترکیب مواد آلی خاک مؤثر بوده و مسئول تغییرات فیزیکی و تغییر ماده‌آلی خاک نیز هستند (Saleh Rastin, 1978). جانوران خاک می‌توانند نقش مهمی در قابلیت دسترسی آب و عناصر غذایی داشته باشد. فعالیت کرم‌های خاکی سبب می‌شود نفوذ آب در خاک بهبود یابد نفوذ ریشه در خاک تسهیل شود، ترسیب کربن انجام شود (حمل مواد آلی سطحی به عمق خاک) و کیفیت ساختمان خاک بهبود یابد. به‌طورکلی، فراوانی و تنوع جوامع موجودات خاکزی شاخص خوبی برای کیفیت خاک‌های جنگلی است، زیرا موجودات نشان‌دهنده جنبه‌های متفاوتی از کیفیت خاک در ترکیب و فراوانی‌شان هستند (Banerjee and Burton, 1998).

کرم‌های خاکی

کرم‌های خاکی مهم‌ترین بی‌مهرگان خاکزی در سراسر جهان به‌شمار می‌آیند و به‌عنوان مهندسان بوم‌سازگان خاکی نام گرفته‌اند. جمعیت کرم‌های خاکی یک بوم‌سازگان به‌عنوان شاخصی برای کیفیت زیستی خاک محسوب می‌شود. تیپ‌های مختلف جنگلی اثرات متفاوتی بر مشخصه‌های خاک دارند (Rahmani, 1998). در واقع جنگل‌ها با پوشش گیاهی مختلف به‌طور مستقیم، با ورود لاشبرگ از طریق تفاوت در محتوی مواد آلی خاک، کیفیت زیستگاه (مقدار رطوبت، pH و وضعیت عناصر غذایی)، اثر بر آبشویی و شیوه

مدیریت کاربری و به‌طور غیرمستقیم با تغییر ویژگی‌های خاک سبب تغییر بر فراوانی و ساختار جمعیت کرم‌های خاکی می‌شود (Sarlo, 2006). از طرف دیگر، تغییر فصل نیز بر مقدار رطوبت و حرارت و به تبع آن فراوانی کرم‌های خاکی اثرگذار است (Moghimian et al., 2018). کرم‌های خاکی سبب اختلاط مواد آلی سطح خاک با اعماق پایین‌تر و تولید مواد معدنی می‌شوند. توزیع اندازه خاکدانه‌ها در لایه‌های بالایی خاک تحت تأثیر شدید فعالیت کرم‌های خاکی می‌باشد. کرم‌های خاکی، خاک‌های مرطوب را برای زندگی ترجیح می‌دهند و با توجه به محل زندگی‌شان در خاک، تغذیه، حفار بودن و رفتار آنها را به سه گروه لاشبرگی (اپی‌ژئیک)، بینابینی (آنسئیک) و خاکزی (اندوژئیک) تقسیم می‌شوند (Phillips et al., 2019). اپی‌ژئیک‌ها در لایه سطحی خاک و بقایای آلی زندگی می‌کنند. معمولاً در سطح خاک تا عمق حدود ۲۰ سانتی‌متر حضور دارند. این گروه از کرم‌های خاکی تأثیر زیادی بر ساختمان خاک ندارند. آنسئیک‌ها در داخل خاک تونل‌های افقی ایجاد می‌کنند و اغلب در عمق حدود ۲۰ تا ٤۰ سانتی‌متری قرار دارند. اندوژئیک‌ها تونل‌های دائمی و عمودی می‌سازند و برای تغذیه به سطح خاک می‌آیند. این گروه عمیق‌ترین پراکنش را دارند و اغلب در عمق حدود ٤۰ تا ٦۰ سانتی‌متر (با توجه به شرایط اکولوژیکی رویشگاه، ویژگی‌های خاک و گونه کرم خاکی، گاهاً در عمق‌های بیش از ۲ متر هم حضور دارند) مشاهده می‌شوند. این گروه از کرم‌ها با حفاری زیاد در خاک، سبب افزایش ظرفیت نگهداری آب و هوا در خاک و حرکت مواد و املاح به عمق‌های پایین‌تر و نفوذ ریشه در خاک را تسهیل می‌کند (Kooch and Kuzyakov, 2024). نمایی شماتیک از گروه‌های بوم‌شناسی کرم‌های خاکی و ویژگی‌های مختلف آنها در شکل ٤ و جداول ۱ و ۲ ارائه شده است (Edwards and Bohlen, 1996). کرم‌های خاکی بخش مهمی از رژیم غذایی بسیاری از گونه‌های جانوری، چه مهره‌داران و چه بی‌مهرگان، محسوب شده و به این ترتیب در زنجیره مواد غذایی بوم‌سازگان‌ها نقش بسزایی دارند. فعالیت‌های زیستی کرم خاکی نمایانگر قابلیت تولید رویشگاه است و در آینده معیار مناسبی برای ارزیابی عملکرد مدیریت جنگل از نظر حفاظت و پایداری بوم‌سازگان است.

شکل ٤- گروه‌های بوم‌شناسی کرم‌های خاکی (Kooch and Kuzyakov, 2024).

Figure 4. Ecological Groups of Earthworms

جدول ۱- طبقه‌بندی بوم‌شناسی، ویژگی محل زندگی، تغذیه‌ای و ویژگی‌های مورفولوژیکی کرم‌های خاکی

Table 1. Ecological Classification, Habitat Characteristics, Feeding Behavior, and Morphological Features of Earthworms

Class کلاس	Subclass زیر کلاس	Habitat رویشگاه	Feeding تغذیه
اپی‌ژئیک Epigeic	اپی‌ژئیک Epigeic	لاشبرگ Litter	لاشبرگ و میکروب Litter and microbes
اپی‌ژئیک Epigeic	اپی- آنستئیک/اپی اندوژئیک Anecic/Epi--Epi Endogeic	لاشبرگ و سطح خاک Litter and soil surface	لاشبرگ و میکروب Litter and microbes
آنستئیک Anecic	آنستئیک Anecic	درون لانه Inside burrows	لاشبرگ و خاک Litter and soil
اندوژئیک Endogeic	پلی هومیک Polihumic	سطح خاک و ریزوسفر Soil surface and rhizosphere	خاک غنی از مواد آلی Organic-rich soil
	مزو هومیک Mesohumic	عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری خاک Depth 0-20 cm in soil	عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری خاک Depth 0-10 cm in soil
	اندو- آنستئیک Endo-Anecic	عمق صفر تا ۵۰ سانتی‌متری خاک Depth 0-50 cm in soil	عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری خاک Depth 0-10 cm in soil
	الیگوهومیک Oligohumic	عمق ۱۵ تا ۸۰ سانتی‌متری خاک Depth 15-80 cm in soil	عمق ۲۰ تا ٤٠ سانتی‌متری خاک Depth 20-40 cm in soil

جدول ۲- ویژگی‌های جداکننده گروه‌های بوم‌شناسی کرم خاکی

Table 2. Distinguishing Features of Ecological Groups of Earthworms

نوع گروه بوم-شناسی Ecological group type	اپی ژئیک Epigeic	آنستئیک Anecic	اندوژئیک Endogeic
نوع غذا Type of food	تجزیهٔ برگ‌های پوسیده روی سطح خاک، منحصراً برگ‌های پوسیده و نه خاک Decomposing leaf litter on the soil surface, exclusively leaf litter and not soil	تجزیهٔ برگ‌های پوسیده روی سطح خاک، که مقداری از برگ‌ها به داخل لانه‌ها منتقل شده و مقداری از خاک بلعیده می‌شود. Decomposing leaf litter on the soil surface, with some leaf litter being carried into burrows and some soil being ingested.	خاک معدنی غنی شده با مواد آلی Mineral soil enriched with organic material
رنگ بدن Body color	تیره، معمولاً با رنگدانه‌های متمرکزتر در سطح بالایی Dark, typically with more concentrated pigments on the upper surface	تیره تا متوسط، با رنگدانه‌هایی که معمولاً فقط در سطح بالایی متمرکز هستند Dark to medium, with pigments usually concentrated only on the upper surface	بی‌رنگ یا بسیار کم‌رنگ با رنگدانهٔ کم Colorless or very pale with low pigment

ادامهٔ جدول ۲.

Continued Table 2.

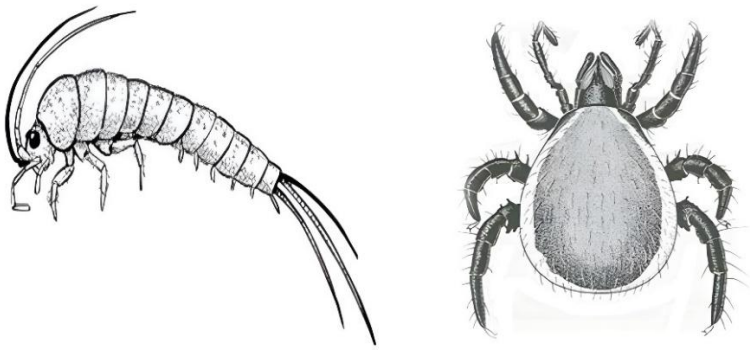
نوع گروه بوم-شناسی Ecological group type	اپی ژئیک Epigeic	آنستئیک Anecic	اندوژئیک Endogeic
اندازه کرم بالغ Size of adult worm	کوچک تا متوسط Small to medium	بزرگ Large	متوسط Medium
توانایی نقب زدن Burrowing ability	هیچ، با چند حفره کوچک چند سانتی‌متر زیر سطح خاک None, with some small cavities a few centimeters below the soil surface	مرتفع و دائمی، با حفره‌های عمودی که تا لایه‌های معدنی امتداد یافته‌اند High and permanent, with vertical burrows extending into the mineral layers	پیوسته و گسترده، با نقب‌های زیرسطحی معمولاً در لایه صفر تا ۱۰ سانتی‌متری خاک معدنی Continuous and extensive, with subsurface burrows usually in the 0 to 10 cm layer of mineral soil
توانایی حرکت Movement ability	حرکت سریع در پاسخ به تهدیدات Rapid movement in response to threats	آنها به سرعت به لانه‌های خود عقب‌نشینی می‌کنند اما در مقایسه با گونه‌های اپی‌ژئیک کندتر هستند They quickly retreat into their burrows but are slower compared to epigeic species	عموماً کند Generally slow
شکار Predation	بسیار بالا، به‌ویژه توسط پرندگان، پستانداران و بندپایان شکارچی Very high, especially by birds, mammals, and predatory arthropods	در ارتفاع بالا، به‌خصوص وقتی روی سطح آب هستند، با پنهان شدن در لانه از خود محافظت می‌کنند. High, especially when on the surface, they protect themselves by hiding in burrow	کم، با شکار عمدتاً توسط پرندگانی که در سطح آب زندگی می‌کنند و بندپایان شکارچی Low, with predation mainly by birds living on the surface and predatory arthropod
طول عمر Lifespan	به‌نسبت کوتاه Relatively short	به‌نسبت بلند Relatively long	متوسط Intermediate
زمان تولید مثل Reproduction time	کوتاه Short	بلند Long	کوتاه Short

کنه (Acari) و پادمان (Collembola)

کنه‌ها بزرگترین و متنوع‌ترین گروه از رده عنکبوت‌مانان هستند که در سراسر جهان پراکنش دارند و خاک از مهم‌ترین زیستگاه‌های آنها به‌شمار می‌رود. تراکم جمعیت کنه‌ها در داخل خاک به‌ویژه خاک‌های هوموسی بسیار زیاد است، به‌طوری‌که هفت درصد مجموع جمعیت فون بی‌مهرگان خاکزی را تشکیل می‌دهند. کنه‌ها از اجزای بسیار مهم زنجیره‌های غذایی در خاک می‌باشند که تنوع زیادی در رژیم غذایی آنها مشاهده می‌شود. کنه‌های خاکزی در فرآیندهای حیاتی که در خاک رخ می‌دهد نقش فعالی دارند، به‌عنوان مثال هدایت و تماس بیشتر ریزجانداران با بقایای گیاهی و جانوری شده و روند تجزیه و پوسیدگی آن‌ها را تسریع می‌کنند که در واقع سبب تشدید فعالیت این موجودات شده و برای حاصلخیزی خاک بسیار مفید هستند. کنه‌ها با خرد کردن مواد آلی و مخلوط کردن آنها با خاک و

نیز با آغشته کردن مواد آلی به آنزیم‌ها و دیگر مواد دستگاه گوارش خود سبب افزایش کارکرد دیگر جانداران خاک می‌شوند. از سوی دیگر ۵۰ تا ۸۰ درصد کنه‌ها از میکروفلور خاک به‌ویژه قارچ‌ها و جلبک‌ها تغذیه می‌کنند و نزدیک به ۱۵ درصد از آنها نیز جانوران کوچک را شکار می‌کنند و از آنها تغذیه می‌کنند (Kooch, 2021).

پادمان از راسته بندپایان هستند و یکی از موفق‌ترین موجودات روی کره زمین می‌باشند و تقریباً در تمام زیستگاه‌ها یافت می‌شوند. خاک یکی از مهم‌ترین زیستگاه‌های آنها است. حشرات خاکزی تأثیر فراوانی بر ماده آلی و عناصر غذایی خاک می‌گذارند و تجزیهٔ لاشریزه نیز به وجود آنها وابسته است. پادمان از فراوان‌ترین بندپایان خاکزی هستند که با تجزیهٔ مواد آلی در خاک کمک به چرخهٔ عناصر، تغییر ریشه‌ها نقش مهمی در طبیعت ایفا می‌کنند. تراکم آنها در خاک ممکن است به ۱۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ عدد در مترمربع برسد. پادمان حشراتی با جثه کوچک و به طول نه-۰/۲۵ میلی‌متر هستند و اغلب گونه‌های با جثه یک تا دو میلی‌متری آنها در خاک گلدان‌ها و سطح آب‌های راکد فعالیت می‌کنند. این حشرات پراکندگی گسترده‌ای دارند و بعضی از گونه‌های آن در قطب شمال و جنوب نیز یافت می‌شوند. این گونه‌ها اغلب در خاک‌هایی با رطوبت اشباع و به‌ویژه در خاک‌های جنگلی با جمعیت زیادی زندگی می‌کنند. جمعیت آنها با افزایش عمق خاک کاهش می‌یابد. برخی از آنها تا عمق دو متری نیز یافت می‌شوند. این حشرات از نظر تجزیه مواد آلی، تأمین هوموس و قابل استفاده کردن خاک برای کاشت گیاهان از جنبه اقتصادی اهمیت دارند. غالب پادمان از بقایای گیاهی، قارچ‌ها، باکتری‌ها و یا از بدن دیگر بندپایان تغذیه می‌کنند. مطابق با بررسی انجام‌شده، مناطقی با تجمع بالای مواد آلی، تنوع و تراکم گونه‌های مختلف پادمان را افزایش می‌دهد. همچنین، نیتروژن موجود در خاک نیز به‌عنوان یکی از عوامل اصلی تأثیرگذار روی جمعیت پادمان و کنه‌های خاکزی بیان شده است (Samadzadeh et al., 2017). نمایی شماتیک از کنه و پادمان در شکل ۵ نمایش داده شده است.



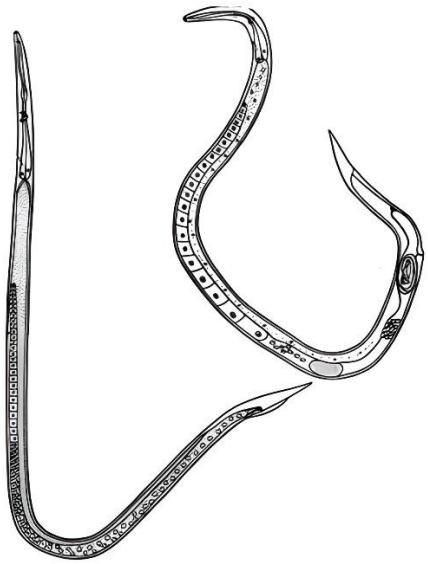
شکل ۵- نمایی از کنه (تصویر راست) و پادمان (تصویر چپ) (Kooch, 2023).

Figure 5. View of a Mite (right image) and a Springtail (left image)

نماتد (Nematoda)

نماتدها، کرم‌های بدون بند هستند و به‌عنوان مهم‌ترین گروه از مزوفون‌های خاک شناخته شده‌اند. همچنین نماتدها به‌عنوان فراوان‌ترین بی‌مهرگان از گروه مزوفون خاک، در منافذ پر آب خاک و نیز لایه‌های نازک آب اطراف ذرات خاک فعال بوده و فراوانی آنها در بعضی

از رویشگاه‌ها به بیش از سه میلیون در هر مترمربع می‌رسد. پژوهش‌ها بیانگر آن است که جمعیت نماتدها می‌تواند به‌عنوان شاخص ساختاری و عملکردی شبکه غذایی خاک مدنظر قرار گیرد. نماتدهای خاک‌زی از نظر تغذیه به چهار گروه مختلف شامل پارازیت گیاه، همه‌چیزخوار، باکتری‌خوار و قارچ‌خوار تقسیم‌بندی می‌شوند، بنابراین در ارتباط نزدیک با دیگر موجودات خاک‌زی می‌باشند و فعالیت آنها تولید اولیه، جریان انرژی، تجزیه و چرخهٔ عناصر را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Kooch, 2021). بسیاری از شاخص‌ها مانند نوع گونهٔ درختی و پوشش گیاهی، مشخصه‌های فیزیکوشیمیایی خاک، عمق لاشبرگ و مدیریت جنگل نقش تعیین‌کننده‌ای در توزیع و فراوانی نماتدهای خاکزی در بوم‌سازگان‌های جنگلی دارند. در بوم-سازگان‌های جنگلی، فراوانی نماتد خاک می‌تواند اطلاعات مهمی در باره نقش گونه‌های جنگلی در ساختار شبکه‌های غذایی رویشگاه در اختیار پژوهشگران قرار دهد (Sanjabi, 2003). از این‌رو، جمعیت نماتدهای خاکزی، شاخص مناسبی برای ارزیابی زیستی کیفیت خاک در رویشگاه‌های جنگلی است. نمایی شماتیک از نماتد در شکل ٦ ترسیم شده است.



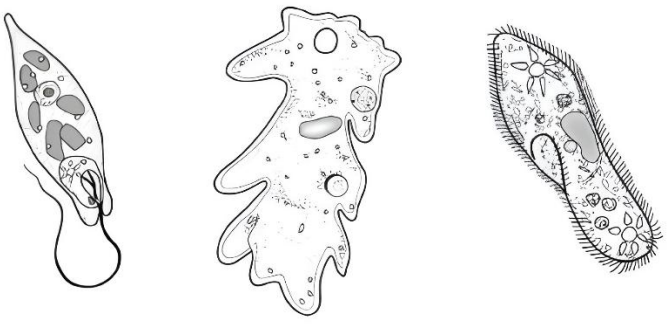
شکل ٦- نماتدهای خاکزی (Kooch, 2023).

Figure 7. Soil nematodes

پروتزوئر (Protozoa)

پروتوزوئرها جانورانی کوچک با اندازه‌ای کمتر از ۱۰۰ میکرومتر هستند که میکروب‌ها را شکار می‌کنند. در یک گرم خاک مناطق معتدله می‌توان ۳۰ هزار یا ٤٠ هزار پروتوزوئر مشاهده کرد. این جانوران به ۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متری عمق خاک محدود می‌شوند و در خلل و فرجی، که هم‌اندازه آنهاست، جای می‌گیرند. پروتوزوئرهایی که در خاک زیست می‌کنند به سه گروه طبقه‌بندی می‌شوند: گروه اول تاژک‌داران، گروه دوم آمیب‌ها و گروه سوم مژک‌داران هستند. تاژکداران کوچک‌ترین پروتوزوئرهای خاک هستند و به وسیله یک تا چهار تاژک شلاق‌مانند حرکت می‌کنند. این موجودات به‌طور عمده از باکتری‌ها تغذیه می‌کنند و بیشترین تعداد را در بین پروتوزوئرهای خاک دارند. مژک‌داران بزرگترین نوع پروتوزوئرها هستند و کمترین تعداد را نسبت به دو گروه دیگر دارند. این موجودات

از دو نوع دیگر پروتوزوئرها و باکتری‌ها تغذیه می‌کنند. مژک‌داران ممکن است بیش از ۱۰ هزار باکتری در روز مصرف کنند. آمیب‌ها هم‌اندازه بزرگ دارند و به‌وسیله پاهای کاذب حرکت می‌کنند. آنها در لایه ریزوسفر و همچنین اطراف ریشه ساکن هستند، جایی که بتوانند از جمعیت باکتری‌ها تغذیه کنند. تعداد آنها بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ هزار در هر گرم خاک در ۱۵ سانتی‌متری بالایی خاک گزارش شده است. از این تعداد کمتر از ۱۰۰۰ عدد از آنها مژکدار و بقیه تاژکدار و آمیب می‌باشند. اهمیت بوم‌شناسی پروتوزوئر در خاک به‌طور کامل مشخص نشده است (Kooch, 2012). پروتوزوئر در تجزیه اولیه مادهٔآلی خاک نقش دارند، آنها ذرات آلی را جذب کرده و فرآیندسازی می‌کنند. همچنین در دستگاه گوارش تعدادی از جانوران خاکزی مانند موریانه‌ها که نقش قابل توجهی در تجزیه مواد سلولزی دارند، انواعی از پروتوزوئرها زیست می‌کنند. بخش قابل توجهی از اهمیت بوم‌شناسی پروتوزوئر درخاک به فعالیت آنها در رابطه با پتانسیل آب، خاک و ویژگی‌های منافذ خاک مربوط می‌شود. مطابق با مرور منابع، پروتوزوئرها نسبت به عوامل ذکرشده بیشتر وابسته به ویژگی‌های خاک هستند. در این موجودات در مقایسه با باکتری‌هایی که شکار می‌کنند در سلول‌های خود دارای غلظت پایین‌تری از کربن و نیتروژن هستند. باکتری‌هایی که توسط پروتوزوئرها خورده می‌شوند حاوی مقدار زیادی نیتروژن هستند، که نیتروژن اضافی به‌صورت آمونیوم آزاد می‌شود، باکتری‌ها و دیگر ارگانیسم‌ها به‌سرعت آمونیوم را جذب می‌کنند، اما مقداری از آن هم توسط گیاه استفاده می‌شود. مطالب بالا نشان‌دهنده آن است که پروتوزوئرها به‌عنوان جزء مهمی از بوم‌سازگان‌ها محسوب می‌شوند. بنابراین فعالیت و ساختار جوامع آنها می‌توانند شاخص‌های حساس نسبت به تغییرات زیستی و غیرزیستی محیطی باشند (Lekzian and Shaddel, 2007). نمایی شماتیک از پروتوزوئر در شکل ۷ نمایش داده شده است.



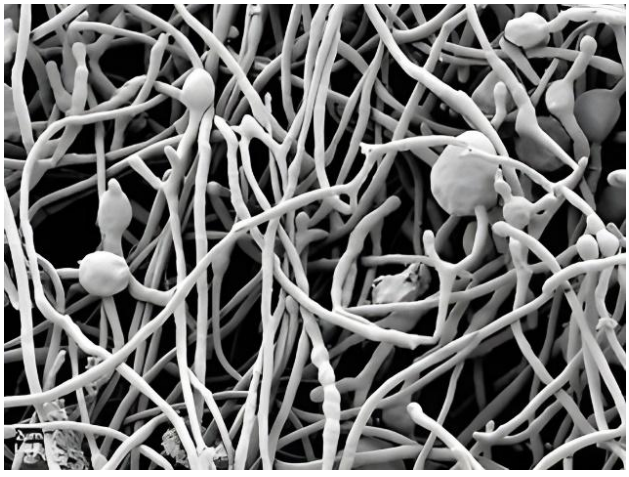
شکل ۷- انواع پروتوزوئر. مژکدار، آمیب شکل و تاژکدار (از راست به چپ) (Kooch, 2023).

Figure 7. Types of protozoa: Ciliated, amoeboid, and flagellated (from right to left)

قارچ‌های خاک‌زی (Soil Fungi)

قارچ‌ها به‌ندرت در خلل و فرج کوچک خاک یافت شده و اغلب در بین خاکدانه‌های خاک محدود می‌شوند. قارچ‌ها هتروتروف بوده و جزء موجودات هوازی اجباری می‌باشند. جنس Scordotrio از انواع قارچ‌ها هستند که در مدفوع علف‌خواران در سطح خاک یافت می‌شوند و نیز Chaetomium که در کمپوست (بقایای گیاهی و حیوانی که تحت شرایط پوسیدگی قرار گرفته باشند) زندگی می‌کنند. برخی از قارچ‌ها نیز به شکل اسپور (هاگ قارچ و دیگر گیاهان) در خاک

زندگی می‌کنند و عوامل بیماری‌زای گیاهی مانند Erysiphe graminis f.sp. tritici هستند. تجزیه اغلب پلیمرها مانند لیگنین به‌وسیله انواعی از قارچ‌ها صورت می‌پذیرد. بعضی از آنها نیز رابط همزیستی خارجی با ریشه دارند. انواع قارچ‌های میکروسکوپی در خاک زندگی می‌کنند به‌عنوان مثال، Penicillium که برای اولین بار فلمینگ از آنها پنی‌سیلین استخراج کرد. مهم‌ترین نقش بوم‌شناسی قارچ‌ها در خاک تجزیه ماده‌آلی از ساده‌ترین قندها و اسید آمینه تا مقاوم‌ترین پلیمرها مانند لیگنین و اسیدهای هومیک کمپلکس است. به دلیل اینکه قارچ‌ها در مقایسه با باکتری‌های هتروتروف تحمل بیشتری به اسیدیته دارند، تجزیهٔ ماده‌آلی خاک‌های اسیدیته عمدتاً به‌وسیلهٔ قارچ‌ها انجام می‌شود. قارچ‌ها نقش عمده‌ای در چرخهٔ عناصر غذایی خاک به‌ویژه در سیستم‌های اسیدی دارند. قارچ‌های خاک‌زی در ارتباطات همزیستی با ریشهٔ گیاهان از نظر تنظیم جذب عناصر غذایی، مقاومت به بیماری، روابط آب و بالاخره رشد گیاه اهمیت زیادی دارند. تاریخچهٔ جداسازی قارچ‌های خاکزی به سال ۱۸۸٦ برمی‌گردد. قارچ‌ها در خاک‌های کشت‌شده با تهویهٔ خوب، بیشترین بخش کل توده میکروبی را تشکیل می‌دهند. توده زنده قارچ‌ها در خاک به علت قطر زیاد و شبکه وسیع هیف‌ها بیشتر است (Yan et al., 2024). قارچ‌ها در خاک بسیار متنوع هستند و به علت فعالیت‌های مختلف، گروه بسیار جالبی بوده و بررسی‌های بسیار وسیعی روی آنها انجام شده است. از نقش قارچ‌ها در خاک می‌توان به ایجاد رابطه انگلی با گیاهان، شرکت فعال در تجزیه بقایای گیاهی و جانوری و شرکت در روابط میکوریزی را نام برد. در یک خاک حاصلخیز ممکن است طول رشته‌های قارچی از ۱۰۰–۱۰ متر در هر گرم متغیر باشند. اگرچه پژوهش‌های زیادی در نیم قرن گذشته در مورد قارچ‌های خاکزی انجام شده است ولی این دانش بسیار ناقص بوده و فقط حدود ۵۰ درصد از قارچ‌های خاکزی برای ما شناخته شده‌اند. پژوهش‌ها نشان داده است که ویژگی‌های خاک بر جامعه میکروبی خاک تأثیر داشته ولی بر جمعیت قارچ‌ها به‌ندرت تأثیرگذار است. نمایی شماتیک از قارچ در شکل ۸ نمایش داده شده است.

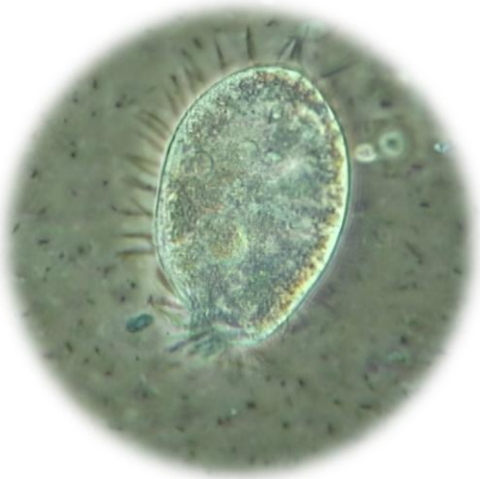


شکل ۸– قارچ خاکزی (Kooch, 2024).

Figure 8. Soil fungi

باکتری (Bacteria)

بیشترین یافته‌های موجود در خاک، پروکاریوت‌های (آن دسته از باکتری‌ها که هستهٔ آنها فاقد هستک و غشاء است) تک‌سلولی هستند. در خاک تراکم زی‌توده باکتری‌ها معمولاً بیش از زی‌توده قارچ‌ها است. باکتری‌های موجود در خاک ممکن است غیرمتحرک یا متحرک باشند و حرکت آنها به‌وسیلهٔ تاژک‌ها یا مژک‌هایی انجام شود که حول سلول قرار گرفته (تاژک‌های محیطی) یا فقط در انتهای سلول (تاژک‌های قطبی) باشند. براساس تکنیک‌های شناسایی و شمارش متداول باکتری‌های خاک را مورد بررسی قرار می‌دهند. باکتری‌های موجود در خاک به دلیل تنوع مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی که دارند، توانایی بسزایی برای اثرگذاری بر خاک از خود نشان می‌دهند. یکی از قابل توجه‌ترین اختلافات مورفولوژیکی بین باکتری‌ها در خاک و در کشت آزمایشگاهی وجود یک پوشش ضخیم موسیلاژی (نوعی ماده ترکیبی که توسط گیاهان، قارچ‌ها و یا باکتری‌ها تولید می‌شود که دارای بوی معطر و طعم شیرین است) در باکتری موجود در خاک است، این پوشش احتمالاً محافظی در برابر برخی از شرایط نامساعد محیطی خاک و از عوامل اتصال باکتری به ذرات خاک است. مهم‌ترین ناسازگاری فیزیولوژیکی باکتری در خاک کند کردن متابولیسم برای رشد است در شرایطی که عرضهٔ کربن و عناصر غذایی خاک اندک است. باکتری‌ها در خاک نقش عمده‌ای دارند، تجزیهٔ بقایای جانوری، گیاهی و میکروبی به‌وسیلهٔ باکتری‌های هتروتروف انجام می‌شود. مانند گونه‌هایی از جنس Azotobacter (هوازی اجباری)، Bacillus (اختیاری غیرهوازی) و Clostridium (اجباری غیرهوازی) که نقش تثبیت ازت را دارند. شناخت الگوهای زیستی باکتری‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا این موجودات در برگیرندهٔ بخش زیادی از تنوع گونه‌ای جنگل‌ها بوده و بسترساز و عامل بسیاری از واکنش‌هایی هستند که سبب پایداری زندگی در زمین است (Haghprast Tanha, 1993). همهٔ چرخه‌های غذایی از طریق باکتری‌ها به سطوح تغذیه‌ای بالاتر متصل می‌شوند، بنابراین به علت تنوع واکنش‌هایی که باکتری‌ها عامل آن هستند، کارکرد و احتمالا تنوع باکتری‌ها، عامل مهمی در تعیین کارکرد یک بوم‌سازگان جنگلی خواهد بود. باکتری‌های خاکزی کارکردهای مهمی دارند و بر این اساس خدمات متنوعی ارائه می‌کنند. باکتری‌ها نقش عمده‌ای در تشکیل ساختمان خاک دارند. پلی‌ساکاریدهای تولیدشده به‌وسیلهٔ باکتری‌ها ذرات خاک را به هم متصل کرده و به تشکیل ساختمان خاک کمک می‌کند. مواد هوموسی ناشی از فعالیت باکتری‌ها نیز سبب تشکیل کمپلکس‌های رس- مواد آلی می‌شود که به دانه‌بندی خاک کمک می‌کند. باکتری‌های گروه اکتینومیست، هیف‌هایی تولید می‌کنند که ذرات خاک را به هم متصل کرده و بدین طریق در دانه‌بندی خاک ایفای نقش می‌کنند. دانه‌بندی خاک سبب کاهش فرسایش خاک، بهبود نفوذ آب و تهویه مناسب خاک می‌شود (Guo et al., 2003). نمایی شماتیک از نماتد در شکل ۹ نمایش داده شده است.



شکل ۹- باکتری خاکزی (Kooch and Hosseini, 2010).

Figure 9. Soil bacteria

فعالیت‌های میکروبی

اولین و شاید آشکارترین اثر تخریب جنگل و تغییر کاربری اراضی، تغییر نوع پوشش گیاهی و هیدرولوژی بوم‌سازگان است که بسته به شرایط محیطی و اقلیمی ممکن است در درازمدت بر بسیاری از مشخصات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک آثاری مثبت و یا منفی داشته باشند. خاک‌ورزی شدید و بی‌رویه، شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک را تغییر و موجب تحریک و افزایش فعالیت‌های میکروبی و تجزیه بیشتر بقایای گیاهی می‌شود. جمعیت میکروبی خاک نقش اصلی و اساسی در محصولات اولیه و چرخهٔ غذایی بوم‌سازگان‌های جنگلی دارد. در تمام جنگل‌ها، میکروب‌های خاک نقش مهمی در تجزیهٔ مواد آلی، چرخه مواد غذایی و فراهمی عناصر غذایی قابل جذب گیاه ایفا می‌کنند. تجزیهٔ بقایای گیاهی در خاک یک فرآیند میکروبی بسیار پیچیده است که توسط عوامل مختلف مانند ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بقایا و خاک کنترل می‌شود. در محیط، خاک مهم‌ترین عامل محدودکننده فعالیت میکروبی قابلیت دسترسی به سوبسترای کربنه قابل مصرف است که با ورود سوبسترای کربنه به خاک مانند بقایای گیاهی جمعیت میکروبی در اطراف سوبسترا افزایش می‌یابد. در واقع جمعیت میکروبی خاک مسئول تنظیم چرخهٔ عناصر غذایی در خاک است و در فراهم ساختن عناصر غذایی برای گیاه نقش مهمی را برعهده داشته و بدین گونه در رشد گیاه و تولیدات کشاورزی کارایی بالایی دارد. پیامد افزایش بقایای گیاهی تشدید فعالیت میکروب‌های مفید خاک است که این امر تصعید گازکربنیک و آزاد شدن نیترات و دیگر ترکیبات غذایی را سبب می‌شود (Baath and Anderson, 2003). میکروب‌هایی مانند ازتوباکتر که نیتروژن خاک را زیاد می‌کند حساسیتی فوق‌العاده به مقدار کربن خاک دارد؛ هرچه مقدار این ماده بیشتر باشد، فعالیت آنها نیز فراوان‌تر خواهد بود. در اغلب موارد فعالیت میکروبی از طریق افزودن مستقیم موادآلی یا اعمال مدیریت حفاظتی یعنی حفظ بقایای محصول و شخم حداقل در خاک بوده است. تنوع میکروبی خاک همچنین در حفظ سلامت و کیفیت خاک از اهمیت زیادی برخوردار است. برخی از مشخصه‌های میکروبی خاک مانند زی- توده میکروبی، تنفس خاک، تنفس برانگیخته با

سوبسترا، ضریب متابولیکی و قابلیت دسترسی به کربن شاخص‌های حساسی برای تعیین اثر متغیرهای محیطی بر فعالیت میکروبی خاک هستند و از این مشخصه‌ها برای تجزیه و تحلیل اثر عوامل محیطی و تنش‌های وارده بر جمعیت میکروبی خاک‌های جنگلی بهره‌گیری می‌شود. تنفس خاک، که به آن تنفس پایه نیز گفته می‌شود، نشان‌دهنده فعالیت‌های زیستی است (Abbas Nejad, 2005). تنفس خاک از شاخص‌های حساس کیفیت خاک به تخریب جنگل و تغییر کاربری اراضی به‌شمار می‌رود و تعیین‌کننده مقدار و سرعت خروج کربن از خاک است (Habashi, 2015). تنفس پایه خاک یکی از قدیمی‌ترین و متداول‌ترین مشخصه‌های زیستی مورد استفاده برای سنجش فعالیت‌های میکروبی خاک به‌شمار می‌رود. تنفس برانگیخته برای تخمین فعالیت بالقوه میکروفلور در فرآیندهای معدنی‌شدن مواد آلی و تعیین کمی زی‌توده میکروبی در خاک استفاده می‌شود. تنفس برانگیخته به‌عنوان یک شاخص از نرخ تنفس میکروبی تحت شرایط بهینه است. تخریب رویشگاه‌های جنگلی و تغییر کاربری اراضی و عملیات کشاورزی در اراضی بکر، سبب کاهش ورود بقایای گیاهی تازه به خاک و در نتیجه کاهش تنفس و فعالیت‌های میکروبی می‌شود. این بقایا شامل مقادیر قابل توجهی از ترکیباتی هستند که به‌راحتی تجزیه می‌شوند و مورد استفاده ریزجانداران قرار می‌گیرند. کاهش ذخایر کربن در خاک سبب کاهش توده زنده میکروبی و فعالیت ریزجانداران در خاک می‌شود. زی‌توده میکروبی به‌عنوان یکی از منابع مهم عناصر غذایی در خاک شناخته می‌شود. این بخش مهم از ماده‌آلی خاک در تجزیهٔ مواد آلی و بازچرخش عناصر غذایی ضروری نقش مهمی ایفا می‌کند و در تجزیه ضایعات و آلاینده‌های آلی نیز نقش دارند. مقدار زی‌توده میکروبی کربن و نیتروژن تابعی از مقدار کربن آلی خاک است و رابطهٔ مستقیمی با آن دارد، به‌طوری‌که در بیشتر مواقع یک تا سه درصد مقدار کربن آلی خاک را شامل می‌شود. متفاوت بودن نوع پوشش جنگلی اثر قابل توجهی روی زی‌توده میکروبی کربن و نیتروژن خاک دارد. کربن آلی خاک به آرامی تغییر می‌کند و اندازه‌گیری دقیق آن مشکل است، اما زی‌توده میکروبی کربن سریع‌تر از مواد آلی کل به تغییرات مدیریت پاسخ می‌دهد. نیتروژن توده زنده میکروبی علاوه بر این که شاخص مهم و نشان‌دهنده جمعیت میکروبی زنده خاک است، ذخیره ارزشمندی از نیتروژن آلی است که به سهولت به نیتروژن معدنی تبدیل می‌شود (Milani and Lekzian, 2010).

ضریب متابولیکی نشان‌دهنده مقدار کربن متصاعدشده (تنفس پایه) از هر واحد کربن زی‌توده میکروبی در واحد زمان است. نسبت تنفس پایه به زی‌توده میکروبی کربن (ضریب متابولیکی) یک روش برای ارتباط بین اندازه و فعالیت جمعیت میکروبی خاک است. بنابراین به‌طور گسترده به‌عنوان یک شاخص از فعالیت درست میکروبی خاک به‌کار گرفته می‌شود. این نسبت به‌عنوان یک شاخص برای ارزیابی پاسخ جامعه میکروبی به اثرات خارجی مثل استرس و اختلال است. این شاخص یک مشخصه حساس به تغییر پوشش اراضی است، به‌عنوان مثال مقدار آن بین علفزار و جنگل‌های بارانی متفاوت است. سهم میکروبی یک برآورد غیر مستقیم از کیفیت ماده‌آلی است و مقادیر کمتر نشان‌دهنده کیفیت پایین‌تر ماده‌آلی و در نتیجه راندمان پایین زی‌توده میکروبی در تثبیت کردن کربن و نیتروژن است که این به نفع موجودات با متابولیسم مقرون به صرفه است که کربن بیشتری را در سلول‌های میکروبی تثبیت کرده و کمتر برای متابولیسم استفاده

می‌کنند و بنابراین موجب افزایش سهم میکروبی می‌شود. اشکال ناپایدار مواد آلی شامل کربن آلی محلول (Dissolved organic ccarbon (DOC))، نیتروژن آلی محلول (Dissolved organic nitrogen (DON))، کربن آلی ذره‌ای (Particulate organic carbon (POC)) و نیتروژن آلی ذره‌ای (Particulate organic nitrogen (PON)) تنوع جوامع میکروبی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این اشکال از مواد آلی منبع اصلی انرژی برای ریزجانداران خاک بوده و با تأثیر بر مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای از خاک، به‌ویژه تصاعد دی‌اکسید کربن، در پدیدهٔ گرمایش جهانی نقش بسیار مهی دارند (Osman, 2013). در بوم‌سازگان‌ها جنگلی حضور گونه‌های درختی با کیفیت‌های متفاوت از لاشریزه‌ها سهم بسیار زیادی در تغییرپذیری اجزای پایدار هوموسی و ناپایدار ماده‌آلی خاک بر عهده دارند. در رویشگاه‌های جنگلی، معدنی‌شدن مواد آلی و تولید نیتروژن قابل استفاده معدنی بین ۲٤ تا ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار در سال برآورد شده است و با توجه به این که بیشترین نیتروژن مصرفی برای تولید زی‌تودهٔ گیاهی حاصل از معدنی‌سازی موادآلی است، معدنی‌شدن نیتروژن از مهم‌ترین جریانات نیتروژن در جنگل‌های معتدله محسوب می‌شود (Mazardlan and Sawaqabi Firouzabadi, 2015). در واقع، مرور منابع پیشین حاکی از آن است که بسیاری از پژوهش‌های انجام‌شده فوق‌الذکر بر مقادیر مطلق مشخصه‌های میکروبی خاک تأکید داشته‌اند، درحالی‌که امروزه بر نسبت بین اجزای فعالیت‌های میکروبی خاک به‌عنوان شاخصی از چرخه‌های عناصر غذایی (به‌ویژه کربن، نیتروژن و فسفر) تأکید می‌شود. علم استوکیومتری (عنصرسنجی یا قیاس‌سنجی) (Stoichiometry) بوم‌شناسی، بررسی توازن انرژی و عناصر شیمیایی در سیستم زیستی بوده و ابزار مهمی در بررسی چرخهٔ عناصر غذایی و درک پویایی و عملکرد بوم‌سازگان‌های جنگلی است. به‌طور کلی استوکیومتری اکولوژیکی شاخص‌های میکروبی، در مقایسه با دیگر مشخصه‌های فیزیکی، شیمیایی، زیستی، میکروبی و آنزیمی به دلیل حساس بودن به هر گونه دگرگونی ایجاد شده، اثر تخریب و یا احیای رویشگاه‌ها، به‌عنوان شاخص‌های مناسبی برای بررسی کیفیت و سلامت خاک در بوم‌سازگان‌های جنگلی مورد توجه هستند (Mahmoudi and Hakimian, 2007).

فعالیت‌های آنزیمی

یکی از شاخص‌های حساس و مهم کیفیت خاک آنزیم‌ها هستند که در فرآیندهای زیست شیمیایی و میکروبی خاک مانند چرخهٔ عناصر غذایی خاک، تجزیهٔ مواد آلی، جریان و انتقال مواد بین اجزاء مختلف بوم‌سازگان، پاکسازی آلاینده‌ها در محیط و تغییرات جهانی اقلیم نقش مهمی را ایفا می‌کنند (Burns et al., 2013; Sharifpour et al., 2018). آنزیم‌های خاک به عنوان شاخص‌های قابل استفاده برای آلودگی، حاصلخیزی، سلامت و بلوغ خاک پیشنهاد شده‌اند که از دلایل اصلی این رویکرد به ارتباط نزدیک آنزیم‌های خاک با ماده‌آلی و ویژگی‌های بیولوژیکی و فیزیکی خاک، سهولت در اندازه‌گیری و پاسخ سریع آنزیم‌ها به تغییرات در مدیریت خاک می‌توان اشاره کرد (Machulla et al., 2005). فعالیت آنزیم‌های خاک به روند و شدت فرآیندهای بیوشیمیایی وابسته بوده و از نوع خاک، طرح مدیریتی خاک، پوشش گیاهی و نوع کاربری تأثیر می‌پذیرد (Abbasian et al., 2015).

آنزیم‌های خاک در فرآیند معدنی‌شدن عناصر غذایی نقش اساسی دارند و دارای همبستگی خوبی با تجزیهٔ لاشبرگ‌های گیاهی هستند و سبب سهولت دسترسی به عناصر غذایی می‌شوند. به این علت که آنزیم‌ها ممکن است از ریشه‌ها و یا بخش مرتبط به مایکوریزا نشأت گرفته باشند (Yang and Zhu, 2015).

فعالیت آنزیمی خاک زمانی تغییر می‌کند که کاربری اراضی تغییر کند و یکی از مشخصه‌هایی است که از همان آغاز تغییر اراضی دچار تغییر می‌شود. بنابراین، به‌عنوان شاخصی از کیفیت خاک درنظر گرفته شده است، زیرا هم تأمین مواد مغذی برای گیاهان و هم رشد میکروبی را کنترل می‌کند (Burns et al., 2013). فعالیت‌های آنزیمی ممکن است به تغییرات پوشش گیاهی سریع‌تر از دیگر متغیرهای خاک واکنش نشان دهند و بنابراین ممکن است به‌عنوان شاخص‌های اولیه تغییرات زیستی مفید باشند. آنزیم‌های خاک که توسط میکروب‌ها تولید می‌شوند نقش‌های کلیدی در عملکرد بیوشیمیایی ماده‌آلی تجزیهٔ مواد آلی و چرخهٔ مواد مغذی ایفا می‌کنند. فعالیت آنزیم‌های خاک تأثیرگذار در واکنش‌های مختلف و فرآیندهای متابولیک در چرخهٔ زیستی مواد مغذی است و در مورد اختلالات طبیعی و انسانی که در بوم‌سازگان خاک اتفاق می‌افتد واکنش نشان می‌دهد. فعالیت‌های آنزیم همچنین می‌توانند با محتوی زی‌توده میکروبی ارتباط داشته باشند. رابطه آنزیم‌ها با مشخصه‌های زیستی خاک و سهولت اندازه‌گیری و عکس‌العمل سریع آنها به تغییر در مدیریت خاک سبب شده است تا آنزیم‌های خاک نیز به‌عنوان شاخص‌های بالقوه‌ایی برای ارزیابی کیفیت خاک به‌حساب آیند. در سال‌های اخیر به دلیل پاسخ سریع آنزیم‌ها به تغییرات مدیریتی خاک، آنزیم‌ها به‌عنوان شاخص‌های پتانسیل کیفیت خاک مطرح شده‌اند. مدیریت اراضی و ماهیت پوشش‌های جنگلی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیوشیمیایی خاک تأثیر می‌گذارند و چنین تغییراتی می‌توانند بر سطوح فعالیت آنزیم‌ها نیز مؤثر باشند (Parsapour et al., 2018).

در خاک آنزیم‌های متنوعی وجود دارد که به‌صورت درون سلولی، برون سلولی، آزاد و یا به‌صورت ترکیبی از این حالت‌ها هستند. از مهم‌ترین آنزیم‌ها موجود در خاک می‌توان اوره‌آز و دهیدروژناز به علت نقش در چرخه نیتروژن، فسفاتاز (نقش در محلول شدن فسفر) و اینورتاز (نقش در چرخه کربن) را نام برد. در میان این آنزیم‌ها، اوره‌آز به دلیل نقش مستقیم در چرخه نیتروژن و دهیدروژناز به‌عنوان شاخصی کلیدی برای سنجش فعالیت متابولیک کلی جامعهٔ میکروبی خاک، در بررسی‌های جنگل‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند (Alizadeh et al., 2013).

اوره‌آز، آنزیمی است که هیدرولیز اوره به دی‌اکسیدکربن و آمونیاک و بالطبع در افزایش سطح واکنش خاک و کاهش نیتروژن آن از طریق تبخیر آمونیوم مشارکت دارد. منشأ این آنزیم میکروبی و مقاوم به تجزیه می‌باشد و بدین علت آنزیم اوره‌آز در سلول‌های آزاد ذخیره می‌شود. از این‌رو، دلیل اهمیت این آنزیم، تعیین مقدار کیفیت خاک از نقطه نظر چرخه نیتروژن در خاک است. اهمیت سنجش آنزیم اوره‌آز به دلیل ارزیابی هیدرولازها در خاک است که قادر است در فرآیندهای تجزیه اثرگذار باشد (Cheng et al., 2013). منشاء آنزیم اوره‌آز ریزجانداران خاک زی هستند و در شرایطی که شرایط برای فعالیت ریزجانداران مناسب باشد (اسیدیتهٔ مناسب، کربن، نیتروژن و سایر عناصر غذایی) فعالیت آنزیم اوره‌آز افزایش پیدا می‌کند.

پژوهشگران نشان داده‌اند که فعالیت اوره‌آز به جمعیت میکروبی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک وابسته است. این آنزیم به‌طور گسترده در طبیعت، در گیاهان، جانوران و ریزجانداران یافت می‌شود. آنزیم اوره‌آز نقش مهمی در معدنی کردن نیتروژن ترکیب‌های آلی و همچنین در تأمین نیتروژن برای گیاهان و

ریزجانداران از منابع طبیعی و کودها در خاک مؤثر است. آگاهی از سطح فعالیت این آنزیم نقش مهمی در مصرف صحیح کود اوره، اطلاع از توان تصعید، آبشویی نیتروژن و مسائل زیست‌محیطی دارد.آنزیم فسفاتاز با تسریع هیدرولیز پیوندهای استر–فسفات، سبب آزاد شدن فسفات در خاک شده که می‌تواند توسط گیاهان یا ریزجانداران جذب شود. بنابراین، یکی از آنزیم‌های مهم در چرخهٔ فسفر خاک به‌شمار می‌آید و معمولاً در خاک‌ها با pH بالا، فراوان و فعال‌تر است. افزایش مواد آلی از طریق افزایش فعالیت میکروبی و پایدارسازی آنزیم فسفاتاز در خاک سبب افزایش فعالیت این آنزیم می‌شود (Hu et al., 2006). فسفاتازها یک گروه از آنزیم‌های کلیدی در چرخه فسفر خاک در عرصه‌های مختلف هستند و فعالیت فسفاتازها یک شاخص خوب برای پتانسیل معدنی شدن فسفر آلی و فعالیت‌های بیولوژیکی خاک است (Hu et al., 2006). آنزیم فسفاتاز از انواع آنزیم‌های برون‌سلولی بوده و به‌وسیلهٔ ریزجانداران، ریشه‌های گیاهی و کرم‌های خاکی تولید می‌شود و ارتباط این آنزیم با مقدار ماده‌آلی خاک، رطوبت خاک و حجم خاک در محیط ریشه، به اثبات رسیده است. افزایش مواد آلی نه تنها از طریق افزایش فعالیت میکروبی بلکه از طریق پایدارسازی آنزیم فسفاتاز در خاک سبب افزایش فعالیت این آنزیم می‌شود. به‌طورکلی، از آنجا که آنزیم فسفاتاز قلیایی، یکی از آنزیم‌های ضروری در چرخه فسفر بوده و فعالیت بیشتر فسفاتازها وابسته به تغییر و تبدیل ترکیبات حاوی فسفر آلی و غیرآلی در خاک است، فعالیت آن می‌تواند به‌عنوان شاخصی از قابلیت دسترسی فسفر برای گیاهان و جانوران ریز خاک قلمداد شود (Fu et al., 2004). فعالیت فسفاتازها در خاک به وضعیت پوشش جنگلی، تغییرات انجام‌شده در اثر روش‌های مختلف مدیریتی و رطوبت و دمای خاک بستگی دارد.

آریل سولفاتاز، آنزیمی است که مسئولیت هیدرولیز استرهای سولفاته آلی و آزادسازی گوگرد معدنی (به شکل سولفات) مورد نیاز برای گیاهان و ریزجانداران خاک را برعهده دارد. آنزیم آریل‌سولفاتاز نقش حیاتی در تجزیهٔ ماده آلی و معدنی‌شدن در خاک‌ها ایفا کرده و به نوع طرح مدیریتی خاک حساس است. در جنگل‌ها، فعالیت این آنزیم اغلب با مشخصه‌هایی مانند کربن آلی، گوگرد آلی، زی‌توده میکروبی و pH خاک مرتبط است. نتایج پژوهش‌ها نشان داده است که استفاده از بقایای گیاهی یا مدیریت پایدار جنگل می‌تواند موجب افزایش فعالیت آریل‌سولفاتاز شود (Klose and Tabatabai, 2001; Sinsabaugh et al., 2008).

اینورتاز آنزیمی است که هیدرولیز ساکاروز را تسریع می‌بخشد. آنزیم اینورتاز به‌عنوان شاخصی کارآمد از کیفیت خاک، بسته به نوع پوشش جنگلی تغییر می‌کند و با زی‌توده میکروبی خاک در ارتباط است. در جنگل‌ها، فعالیت این آنزیم می‌تواند تحت تأثیر تغییرات ریزاقلیم مانند رطوبت و دما قرار گیرد. به‌طور خاص، بررسی‌ها نشان داده‌اند که اندازه شکاف در تاج پوشش جنگل بر فعالیت اینورتاز اثر دارد؛ شکاف‌های بزرگتر منجر به افزایش نور، دما و رطوبت خاک می‌شوند که در نتیجه، فعالیت این آنزیم افزایش می‌یابد (Yu et al., 2023) آنزیم اینورتاز اغلب بیشتر از دیگر آنزیم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد زیرا قابلیت بالایی در انعکاس فعالیت بیولوژیکی و حاصلخیزی خاک دارد. برخی از پژوهشگران توصیه می‌کنند که فعالیت اینورتاز و فسفاتاز به‌عنوان یک شاخص برای ارزیابی حاصلخیزی خاک هستند. برای ارزیابی بهتر فعالیت‌های آنزیمی از شاخص میانگین هندسی آن فعالیت‌ها (Geometric mean of enzyme activities (GME)) استفاده می‌شود. این شاخص برای تنوع

عملکردی فعالیت‌های آنزیمی خاک است. در واقع GME یک شاخص مشترک برای ادغام داده‌ها و اطلاعات از آنزیم‌های مختلف خاک با ارزش‌ها و واحدهای مختلف است و ممکن است فعالیت‌های آنزیمی کلی و همچنین فعالیت‌های میکروبیولوژیک عمومی را نشان دهد. در واقع به‌عنوان شاخص تغییرات کیفی هم شناخته می‌شود، به‌عبارتی برای ارزیابی اثرات تخریب جنگل و تغییر کاربری اراضی بر کیفیت خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای محاسبهٔ تنوع فعالیت‌های آنزیمی از شاخص H´ یا شاخص تنوع شانون استفاده می‌شود. این شاخص عملکرد هریک از انواع آنزیم‌ها را در هر قسمت خاک اندازه‌گیری می‌کند و امکان فعالیت، حضور و تعداد تنوع را بازگو می‌کند (Lekzian, 2015).

شاخص‌های زیستی نوین و بالقوه خاک

پژوهش جوامع زیستی خاک از طریق شاخص‌های مختلفی مانند فراوانی و تنوع ارگانیسم‌های منفرد خاک، بیوماس میکروبی و قارچی و نسبت قارچ به باکتری، شاخص‌های بر مبنای جوامع قارچی یا نماتدی، ترکیب جامعهٔ زیستی خاک، ترکیب جامعه با PLFA، روش‌های اثر انگشت ژنتیکی (Fingerprinting methods) (مثل DGGE، T-RFLP، ARISA و غیره)، توالی‌یابی (metabarcoding)، نیمرخ فیزیولوژیکی جامعه (Biolog و MicroResp)، تنفس خاک، نیتریفیکاسیون، دنیتریفیکاسیون، نیتروژن قابل معدنی‌شده، ضریب متابولیکی، سنتز DNA و پروتئین، فعالیت‌های آنزیمی، ژن‌ها و نسخه‌برداری‌ها (transcripts)، متابولومیکس و پروتئومیکس و ردیابی ایزوتوپی پایدار که در سطح بوم سازگان تعریف می‌شوند که در مقایسه با شاخص‌های سطح فردی یا جمعیتی، درک بهتری از ارتباط بین موجودات زنده خاک و نقش آنها در ارائه خدمات بوم‌سازگانی فراهم می‌کنند (Pulleman et al., 2012). با این وجود، انتخاب روش‌های مناسب به دلیل تنوع مزایا و محدودیت‌های هر روش دشوار است. یکی از چالش‌های اساسی در این زمینه، عدم وجود رابطه مستقیم و روشن بین داده‌های تنوع زیستی و عملکرد خاک است که تا حدی ناشی از مشکل در شناسایی جمعیت‌های فعال ریزجانداران است (Blagodatskaya and Kuzyakov, 2013).

بررسی‌های جدید شواهدی از ارتباط مستقیم بین تنوع زیستی و عملکرد خاک ارائه کرده‌اند (Tardy et al., 2015; Allan Wagg et al., 2014). به‌عنوان نمونه، بررسی‌ها نشان داده‌اند که تنوع و غنای جوامع میکروبی تأثیر زیادی بر چرخه‌های کربن و نیتروژن دارد (Philippot et al., 2013). همچنین، کاهش تنوع زیستی خاک، به‌ویژه در جوامع قارچ‌های میکوریزایی و نماتدها، می‌تواند عملکردهای حیاتی مانند تثبیت کربن و چرخهٔ نیتروژن را تحت تأثیر قرار دهد (Wagg et al., 2014). با این حال، برای تأیید قطعی این روابط به پژوهش‌های بیشتری نیاز است. بکارگیری روش‌های تحلیلی پیشرفته مانند تحلیل شبکه و مدلسازی معادلات ساختاری می‌تواند در شناسایی روابط بین تنوع زیستی و عملکرد بوم‌سازگان مؤثر واقع شود (Creamer et al., 2016).

در ادامه در خصوص برخی از شاخص‌ها مطالبی ارائه می‌شود:

۱) حضور، فراوانی و تنوع ارگانیسم‌های منفرد خاک

اندازه‌گیری این شاخص با استفاده از روش‌های میکروسکوپی سنتی و پیشرفت‌های مولکولی مانند qPCRو شناسایی گروه‌های کلیدی (مانند میکوریزا، ازت‌سازها، ریزوبیا) انجام می‌شود. درک تنوع گونه‌ای،

تاکسونومیک و عملکردی جامعه میکروبی خاک مانند مزایای این روش است. از معایب آن می‌توان به این نکته اشاره کرد که همیشه به‌طور مستقیم با عملکردهای زیستی خاک ارتباط ندارد و شناسایی بعضی گروه‌ها مانند پروتوزوآ، پادمان و نماتدها دشوار است (Brussaard et al., 2004; Cardoso et al., 2013).

۲) زی‌توده میکروبی و قارچی و نسبت قارچ به باکتری

زی‌توده میکروبی خاک یکی از مهم‌ترین شاخص‌های زیستی در ارزیابی کیفیت خاک است که نشان‌دهنده فعالیت ریزجانداران و حاصلخیزی زیستی خاک می‌باشد. روش‌های اندازه‌گیری شامل شمارش مستقیم، استخراج کلروفرمی، PLFA، SIR و تعیین کمّی مولکولی هستند. در جنگل‌ها که تنوع گونه‌ای و آلی بالاست، این روش‌ها برای تعیین تأثیر پوشش گیاهی، تجزیهٔ برگ و خاک‌ورزی طبیعی اهمیت زیادی دارند. همچنین این روش‌ها در تعیین وضعیت تغذیه‌ای، پایداری تجمع و چرخه‌های زیستی خاک مؤثر هستند. مزیت آنها حساسیت بالا و ارتباط قوی با دیگر شاخص‌های کیفیت خاک است. از طرف دیگر، این روش‌ها به دلیل اینکه از لحاظ مکانی متغیر هستند، تفسیر نتایج آنها دشوار است و ارتباط واضح و روشنی با عملکرد زیستی ندارند (Brussaard et al., 2004; Cardoso et al., 2013).

۳) ترکیب جامعه زیستی خاک (Community composition)

ترکیب جامعه زیستی خاک با روش‌هایی مانند شمارش و شناسایی مستقیم گونه‌ها، ترکیب جامعه با اسیدهای چرب فسفولیپیدی (PLFA)، شمارش دستی، PLFA، و روش‌های مولکولی (Denaturing Gradient Gel Electrophoresis (DGGE); Automated Ribosomal Intergenic Spacer Analysis (ARISA); Terminal Restriction Fragment Length Polymorphism (T-RFLP) و توالی‌یابی ژن SrRNA۱٦ (metabarcoding) و پروفایل فیزیولوژیکی جامعه (Biolog™, MicroResp) اندازه‌گیری می‌شود. در بوم‌سازگان‌های جنگلی، این روش‌ها برای بررسی اثر گونه‌های گیاهی مختلف، کیفیت لایهٔ آلی خاک و تغییرات فصلی کاربرد دارند. روش PLFA تصویر کلی از گروه‌های میکروبی ارائه می‌دهد، این درحالی است که روش‌های ژنتیکی امکان شناسایی دقیق‌تر و بررسی تنوع ژنتیکی را فراهم می‌کنند. این روش‌ها نیاز به هزینه بالاتری دارند و تفسیر داده‌ها نیازمند تخصص بالایی است (de Groot et al., 2014; Cardoso et al., 2013).

با توجه به نقش کلیدی جامعه زیستی خاک در عملکرد بوم‌سازگان‌ها، در این بخش برخی روش‌های تجزیه‌وتحلیل ترکیب این جامعه مورد بحث قرار می‌گیرد.

شمارش و شناسایی مستقیم گونه‌ها

یکی از روش‌های ترکیب جامعهٔ زیستی خاک شمارش و شناسایی مستقیم گونه‌ها است. توانایی تشخیص گروه‌های عملکردی یکی از مزایای این روش است که می‌تواند نشان‌دهندهٔ عملکردهای زیستی باشد. اما این روش وقت‌گیر، نیازمند تخصص و مهارت بالا است و لزوماً فعالیت زیستی را نشان نمی‌دهد (Brussaard et al., 2004; Lehman et al., 2015).

ترکیب جامعه با اسیدهای چرب فسفولیپیدی (PLFA)

در این روش از تحلیل اسیدهای چرب فسفولیپیدی (PLFA)برای تعیین مقدار و تنوع و ارزیابی ساختار جوامع میکروبی استفاده می‌شود. این روش بر اساس این اصل است که ریزجانداران مختلف دارای الگوهای منحصربه‌فردی از اسیدهای چرب هستند (Frostegård et al., 2011). Zhang et al. (2012) گزارش کردند که تغییرات در PLFA می‌تواند نشان‌دهنده اختلال در خاک ناشی از فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی شدید یا

آلودگی باشد. همچنین، این روش برای پایش بازیابی خاک‌های تخریب‌شده مفید است، چراکه تغییرات در جامعهٔ میکروبی را به‌سرعت نشان می‌دهد(Banerjee et al., 2019). این روش به علت همبستگی با دیگر شاخص‌ها، شاخص خوبی برای زی‌توده میکروبی است. زمان‌بر بودن و عدم ارتباط مستقیم با عملکردهای زیستی خاک از معایب این روش است (Cardoso et al., 2013).

روش‌های مولکولی

روش‌های مولکولی مانند روش‌های DGGE، T-RFLP و ARISA از روش‌های پیشرفته و پرکاربرد در تعیین و بررسی تنوع گونه‌ای جوامع میکروبی خاک هستند. روش‌های مولکولی با بهره‌گیری از ویژگی‌های ژنتیکی ریزجانداران، امکان شناسایی و تفکیک گونه‌های مختلف را فراهم می‌کنند. این روش‌ها از دقت بالایی در تفکیک ژنتیکی برخوردار هستند و توانایی بالایی در تشخیص تفاوت‌های بسیار کوچک در توالی‌های DNA و قابلیت شناسایی گونه‌های کم‌فراوان در جامعه میکروبی را دارد. اما این روش‌ها عملکرد زیستی را مستقیم را نشان نمی‌دهد و تحلیل داده‌ها پیچیده بوده و نیاز به تخصص و نرم‌افزارهای خاص برای تفسیر نتایج است و هزینهٔ بسیار بالایی دارد (Cardoso et al., 2013).

توالی‌یابی (metabarcoding)

یک روش پیشرفته ژنتیکی – مولکولی است که برای شناسایی و بررسی تنوع گونه‌ای در جوامع زیستی و ماکروارگانیسم‌ها با استفاده از توالی‌یابی DNA محیطی (یا DNA استخراج‌شده از نمونه‌های پیچیده (مانند خاک، آب و ..) استفاده می‌شود. این روش بر طبق بارکدگذاری DNA کار می‌کند، بدین طریق که یک ناحیهٔ ژنی خاص به‌عنوان نشانگر تنوع زیستی انتخاب می‌شود و با استفاده از تکنیک‌های تکثیری (PCR) و توالی‌یابی نسل جدید (NGS) تحلیل و بررسی می‌شود. مزایای این روش شامل جزئیات بالای تنوع، امکان مقایسه آسان و هزینه پایین است. اما این روش ارتباط مستقیمی با عملکرد ندارد و تحلیل نتایج نیز نیاز به تخصص دارد (de Groot et al., 2014; Orgiazzi et al., 2015).

نیمرخ فیزیولوژیکی جامعه (Community-Level Physiological Profiling)

نیمرخ فیزیولوژیکی جامعه یک روش عملکردمحور برای ارزیابی فعالیت متابولیکی جامعهٔ میکروبی خاک است. در این روش، تنوع متابولیکی و پتانسیل عملکردی جامعهٔ میکروبی با استفاده از مقدار مصرف سوبستراهای کربنی مختلف منابع کربنی بررسی می‌شود. در این زمینه دو سیستم اصلی شامل پلیت‌های بوم‌شناسی (Biolog™) و سیستم MicroResp وجود دارد. سیستم Biolog™ شامل ۳۱ سوبسترای کربنی است. این سوبستراها شامل کربوهیدرات‌هایی مانند گلوکز و ساکاروز، اسیدهای کربوکسیلیک مانند مالیک اسید، پلیمرها مانند تورین، آمینواسیدها مانند گلوتامیک اسید و ترکیبات فنلیک است. سیستم MicroResp™ نیز مبتنی بر تولید CO_2 است. مزیت این روش بررسی سریع عملکرد جامعه است، اما تحت تأثیر ارگانیسم‌های رشد سریع قرار دارد و تفسیر نتایج به دقت نیاز دارد (Campbell et al., 2003; Creamer et al., 2016).

۱) سنتز DNA و پروتئین

یکی از شاخص‌هایی که به‌عنوان شاخص‌های مستقیم فعالیت متابولیکی و رشد میکروبی مورد استفاده قرار می‌گیرد، سنتز DNA و پروتئین در ریزجانداران خاک است. با استفاده از مواد نشاندار مانند تیمیدین و لوسین، سنتز DNA و پروتئین بررسی می‌شود. این

روش به علت اینکه فرآیندهای بیوسنتزی را مستقیم اندازه‌گیری می‌کند، اطلاعات ارزشمندی در خصوص نرخ رشد و فعالیت واقعی جامعه میکروبی خاک ارائه دهد. از این روش در بررسی‌های بوم‌شناسی که نیاز به بررسی دقیق فعالیت میکروبی دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. از بین این بررسی‌ها می‌توان به ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی و یا مدیریت خاک بر جوامع میکروبی اشاره کرد. از معایب آن می‌توان به نیاز به مواد شیمیایی خاص و تجهیزات پیشرفته مانند شمارشگر مایع سینتیلاسیون اشاره کرد (Blagodatskaya and Kuzyakov, 2013).

۲) ژن‌ها و رونویسی عملکردی

بررسی ژن‌ها و نسخه‌های RNA و رونوشت‌های عملکردی با استفاده از روش‌هایی مانندqPCR، میکروآریه‌ها و متاترنسکریپتومیکس انجام می‌شود و درک ارزشمندی از عملکرد ریزجانداران خاک را ارائه می‌دهد. این روش‌ها به عملکرد خاک نزدیک هستند، ولی فقط ژن‌های شناخته‌شده را بررسی می‌کنند و ممکن است برخی ژن‌ها بیان نشوند (Blagodatskaya and Kuzyakov, 2013; Rocca et al., 2015; Saleh-Lakha et al., 2005). بررسی ژن‌ها و رونوشت‌های RNA در خاک‌های جنگلی در درک عملکرد ریزجانداران در فرآیندهای بیوشیمیایی مانند تجزیه لیگنین، تثبیت نیتروژن و مقاومت در برابر تنش‌های محیطی دارای اهمیت بسیاری است. از مزایای این روش‌ها، دقت بالا و توانایی پیگیری ژن‌های خاص است. با این حال، محدودیت‌های فنی مانند وابستگی به بانک‌های ژنی و دشواری استخراج RNA در خاک‌های جنگلی مرطوب از معایب این روش‌ها است (Blagodatskaya and Kuzyakov, 2013). در پژوهش‌های خاک‌های جنگلی، به علت وجود ترکیبات ممانعت‌کننده مانند هومیک اسیدها و فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده RNA استخراج RNA با کیفیت بالا با دشواری‌های مواجه است. از این‌رو، پژوهشگران از روش‌های بهینه‌شده مانند استفاده از بازدارنده‌های RNase و تکنیک‌های پیشرفته خالص‌سازی RNA استفاده می‌کنند.

۳) متابولومیکس و پروتئومیکس

تکنیک‌های پیشرفته توالی‌یابی مانند متاژنومیکس و متاترانسکریپتومیکس با شناسایی همزمان ژن‌های عملکردی و نشانگرهای تاکسونومیکی، درک ما از ارتباط بین تنوع، ساختار و عملکرد جوامع خاکی را متحول کرده‌اند (Fierer et al., 2012). روش‌های نوین دیگری مانند میکروآرایه‌های DNA/RNA، qPCR و تحلیل‌های ژنومی تطبیقی نیز با پتانسیل بالا در ارتباط دهی تنوع زیستی به عملکردهای خاک و خدمات بوم‌سازگانی توسعه یافته‌اند (de Bruijn et al., 2015; Xue et al., 2013). با این وجود، ارتباط بین حضور و بیان ژن‌ها با نرخ واقعی فرآیندهای بیوشیمیایی نیاز به بررسی‌های بیشتری دارد (Rocca et al., 2015).

رویکردهای مبتنی بر صفات عملکردی با تمرکز بر ویژگی‌های خاص، دقت بیشتری نسبت به روش‌های سنتی مبتنی بر گروه‌های عملکردی یا گونه‌های کلیدی دارند (de Bello et al., 2010; Ferris and Tuomisto, 2015). این روش‌ها که بر شناسایی و اندازه‌گیری ویژگی‌های عملکردی خاص تمرکز دارند، نسبت به روش‌های مبتنی بر گروه‌های عملکردی یا گونه‌های کلیدی از دقت بیشتری برخوردارند و این صفات عملکردی احتمالاً قدرت تفکیک بیشتری نسبت به گروه‌های عملکردی (مانند تجزیه‌کنندگان، دنیتریفیکاتورها، بیماری‌زای گیاهی، باکتری‌های محرک رشد گیاه، گروه‌های عملکردی جانوری) یا گونه‌های کلیدی (مانند قارچ‌های میکوریزا، دیازوتروف‌ها، گونه‌های خاصی از کرم‌های خاکی) به‌عنوان شاخص

فرآیندهای بوم‌سازگانی دارند، اگرچه اندازه‌گیری این صفات در بین گروه‌های تاکسونومیکی مختلف همچنان با چالش‌هایی همراه است. از سوی دیگر، تکنیک‌های متابولومیکس و متاپروتئومیکس با شناسایی مستقیم متابولیت‌ها و پروتئین‌ها از طریق طیف‌سنجی جرمی، ارتباط دقیق‌تری با عملکردهای خاک مانند فعالیت‌های میکروبی و چرخهٔ مواد مغذی ایجاد می‌کنند (Simon and Daniel, 2011).

روش متابولومیکس و متاپروتئومیکس شامل ارزیابی متابولیت‌ها و پروتئین‌های موجود در خاک با استفاده از طیف‌سنجی جرمی، است که به بررسی عملکردهای میکروبی، سرکوب بیماری و تشکیل ساختار خاک کمک می‌کند. که در جنگل‌ها، این داده‌ها می‌توانند به درک بهتر روابط بین پوشش گیاهی، میکروبیوم و چرخه مواد مغذی کمک کنند. متابولومیکس متابولیت‌های کوچک در خاک را بررسی می‌کند که بازتابی از فعالیت‌های متابولیکی ریزجانداران است. روش متابولومیکس می‌تواند تغییرات سریع در شرایط خاک مانند تأثیر آلاینده‌ها یا تغییرات در مدیریت کشاورزی را شناسایی کند (Swenson et al., 2015). به‌عنوان نمونه تجزیه‌وتحلیل متابولیت‌های مرتبط به چرخه کربن و نیتروژن می‌تواند نشان‌دهندهٔ سلامت خاک باشد (Zhalnina et al., 2018). متابولومیکس می‌تواند ترکیبات سمی را که بر رشد گیاه تأثیر می‌گذارند نیز شناسایی کند، که این مسئله در امنیت غذایی دارای اهمیت بسیاری است (Sasse et al., 2018). روش متابولومیکس و متاپروتئومیکس دقت بالایی دارند و امکان تحلیل عملکردهای واقعی در محیط را فراهم می‌کنند، اما هنوز در مرحله توسعه هستند و نیاز به زیرساخت‌های پیشرفته دارند ولی هنوز در مرحله توسعه قرار دارد (Bastida et al., 2008; Simon and Daniel, 2011).

٤) ردیابی ایزوتوپی پایدار

یکی از ابزارهای قدرتمند برای بررسی فعالیت‌های میکروبی و مسیرهای متابولیکی در خاک روش ردیابی ایزوتوپ‌های پایدار با استفاده از ایزوتوپ‌های C۱۳ یا N۱۵ در مولکول‌های زیستی (DNA، RNA، PLFA و پروتئین‌ها) می‌باشد. این روش به‌ویژه برای بررسی ارتباط بین تنوع و عملکرد خاک مؤثر است. این روش به زمان و تجهیزات تخصصی نیاز دارد (Bastida et al., 2008; Saleh-Lakha et al., 2005; Witzinger, 1997). در سال‌های اخیر، ترکیب روش ردیابی ایزوتوپ پایدار با تکنیک‌های omics مانند متاژنومیکس و متاترنسکریپتومیکس و توسعه نانوسنسورهای ایزوتوپی دقت و کارایی این روش را به‌طور چشمگیری افزایش داده است (Wang et al., 2015). در جنگل‌ها برای شناسایی ریزجانداران فعال در تجزیه برگ‌ها، تثبیت نیتروژن و چرخه کربن، بررسی پاسخ میکروبیوم خاک به تغییرات اقلیمی استفاده می‌شود. (Witzinger, 1997; Bastida et al., 2008). این روش امکان تحلیل فعالیت‌های واقعی در محیط را فراهم می‌کند، اما بسیار تخصصی بوده و زمان‌بر است (SIP) در ترکیب با تکنیک‌هایی مانند PLFA یا تحلیل اسیدهای نوکلئیک می‌تواند به درک بهتر ارتباط بین تنوع زیستی و عملکرد خاک کمک کند (Wang et al., 2015; Watzinger, 1997). با این حال، این روش‌ها عمدتاً بر فرآیندهای بیوشیمیایی متمرکز بوده و برای ارزیابی فرآیندهای فیزیکی خاک و خدمات بوم‌سازگانی مرتبط کارایی کمتری دارند. امروزه از روش ردیابی ایزوتوپی پایدار در زمینه‌های نوینی مانند پالایش زیستی، کشاورزی پایدار و بررسی‌های ترسیب کربن استفاده می‌شود.

۵) کربن آلی ناپایدار (Labile Organic Carbon)

کربن آلی ناپایدار (LOC) بخشی از مواد آلی خاک است که به‌سرعت توسط ریزجانداران تجزیه می‌شود و نقش حیاتی در سلامت خاک، چرخهٔ مواد مغذی و تغذیه خاک ایفا می‌کند. اگرچه مواد آلی خاک به‌طورکلی به‌عنوان معیاری برای کیفیت خاک در نظر گرفته می‌شوند، تغییرات آن در اثر مدیریت زمین بیشتر نامحسوس است، زیرا ذخیره کل مواد آلی خاک بسیار گسترده و پایدار است (Haynes, 2005). کربن آلی ناپایدار شاخصی برای پایش تغییرات کوتاه‌مدت است؛ زیرا دارای واکنش‌پذیری بالایی است. این شاخص تأثیر عوامل مختلفی مانند تغییرات اقلیمی، فعالیت میکروبی و مدیریت کشاورزی دارد.

کربن آلی ناپایدار، که گاهی "کربن فعال" نیز نامیده می‌شود، منبع اصلی انرژی برای میکروب‌های خاک است و تغییرات آن سریع‌تر از کربن آلی کل رخ می‌دهد و به‌طور مستقیم بر حاصلخیزی خاک اثر می‌گذارد. افزایش این شاخص سبب تسریع چرخهٔ مواد مغذی (نیتروژن و فسفر)، بهبود ساختار خاک و افزایش ظرفیت نگهداری آب می‌شود. براساس نتایج پژوهش‌های اخیر سیستم‌های کشاورزی پایدار مانند کشت بدون خاک‌ورزی، استفاده از کودهای آلی و کشت پوششی موجب افزایش کربن آلی ناپایدار در خاک افزایش می‌شود (Blanco-Canqui et al., 2022).

ادغام روش‌های مولکولی برای ارزیابی جامع امنیت غذایی خاک

ادغام داده‌های متابولومیکس، پروتئومیکس، تجزیه‌وتحلیل اسیدهای چرب و DNA/RNA می‌تواند یک ارزیابی جامع از سلامت خاک ارائه دهد. با استفاده از این رویکرد چندمتغیره شناسایی دقیق‌تر عوامل تهدیدکننده امنیت غذایی فراهم می‌شود (Thompson et al., 2017). به‌عنوان نمونه ترکیبی از داده‌های متاژنومیکس و متابولومیکس می‌تواند ارتباط بین ساختار جامعه میکروبی و عملکرد متابولیکی را نمایان کند (Bahram et al., 2018). بنابراین انجام پژوهش‌ها با استفاده از روش‌های ادغامی برای توسعه راهکارهای پایدار در مدیریت خاک و بهبود امنیت غذایی ضروری به‌نظر می‌رسد (Rillig et al., 2018).

نتیجه‌گیری

این بررسی نشان می‌دهد که ارزیابی کیفیت خاک‌های جنگلی نیازمند رویکردی یکپارچه و چندمعیاره است. با توجه به پیچیدگی ذاتی بوم‌سازگان‌های جنگلی و تنوع عملکردهای خاک، هیچ شاخص منفردی قادر نیست به‌تنهایی بیانگر کاملی از کیفیت خاک باشد. نتایج نشان می‌دهد که شاخص‌های زیستی خاک مانند تنفس میکروبی، فعالیت آنزیم‌های کلیدی، نسبت قارچ به باکتری و شاخص‌های استوکیومتری به‌عنوان حساس‌ترین نشانگرهای تغییرات کیفی خاک شناخته می‌شوند. این شاخص‌ها قادرند تأثیرات مدیریت جنگل و اختلالات محیطی را زودتر از شاخص‌های فیزیکی و شیمیایی معمول نشان دهند.

در زمینهٔ ارجحیت‌های روش‌شناختی، اگرچه روش‌های مولکولی پیشرفته (مانند متاژنومیکس و متابولومیکس) از دقت تحلیلی بالایی برخوردارند، اما به دلیل نیاز به تجهیزات پیشرفته و هزینه‌های اجرایی قابل توجه، کاربرد محدودی در مدیریت عملی جنگل دارند. در مقابل، شاخص‌های زیستی میانی مانند فعالیت آنزیمی و زی‌توده میکروبی، تعادل مناسبی بین حساسیت، سهولت اندازه‌گیری و مقرون‌به‌صرفه بودن ارائه می‌دهند. مهم‌ترین محدودیت‌ها شامل وابستگی شدید نتایج به شرایط بوم‌شناسی خاص هر منطقه، چالش‌های تفسیر داده‌های پیچیده و عدم وجود استانداردهای یکسان برای بسیاری از شاخص‌های زیستی است.

برای دستیابی به ارزیابی جامع از کیفیت خاک‌های جنگلی، توسعه چارچوب‌های بومی‌سازی شده که تلفیقی هوشمندانه از شاخص‌های زیستی حساس، شاخص‌های فیزیکی و شیمیایی پایه و روش‌های نوین مولکولی باشد، ضروری به‌نظر می‌رسد. اولویت‌های پژوهشی آینده باید شامل بومی‌سازی شاخص‌ها برای جنگل‌های مختلف ایران، ایجاد بانک‌های اطلاعاتی منطقه‌ای، توسعه مدل‌های پایش بلندمدت و تدوین پروتکل‌های استاندارد برای اندازه‌گیری و تفسیر شاخص‌ها باشد. از طریق چنین رویکرد جامعی می‌توان به ارزیابی دقیق کیفیت خاک‌های جنگلی و در نهایت، حفاظت پایدار بوم‌سازگان‌های حیاتی دست یافت.

References

Abbas Nejad, A. *Soil Geology (for Geologists)*; Shahid Bahonar University Publications: Kerman, Iran, **2005**; p 535. (In Persian)

Abbasian, A.; Golchin, A.; Sheklabadi, M. Investigation of biological properties and enzymatic activities of soil under the influence of soil type and sampling depth. *Soil Biology* **2015**, *3* (1), 31–43.

Aguirre, A.; Moreno-Fernández, D.; Alberdi, I.; Hernández, L.; Adame, P.; Cañellas, I.; Montes, F. Mapping forest site quality at national level. *Forest Ecology and Management* **2022**, *508*, 120043.

Alizadeh, T.; Salehi, A.; Matinizadeh, M.; Taheri Abkenar, K. Alteration of dehydrogenase and urease enzyme activity and some chemical properties of soil in different development stages of beech stand (case study: Rezvanshahr forest). *Iranian Journal of Forest* **2013**, *5* (3), 337–347.

Allan, E.; Manning, P.; Alt, F.; Binkenstein, J.; Blaser, S.; Blüthgen, N.; Boehm, S.; Grassein, F.; Hoelzel, N.; Klaus, V. H.; Kleinebecker, T.; Morris, E. K.; Oelmann, Y.; Prati, D.; Renner, S. C.; Rillig, M. C.; Schaefer, M.; Schloter, M.; Schmitt, B.; Schoening, I.; Schrumpf, M.; Solly, E.; Sorkau, E.; Steckel, J.; Steffen-Dewenter, I.; Stempfhuber, B.; Tschapka, M.; Weiner, C. N.; Weisser, W. W.; Werner, M.; Westphal, C.; Wilcke, W.; Fischer, M. Land use intensification alters ecosystem multifunctionality via loss of biodiversity and changes to functional composition. *Ecology Letters* **2015**, *18* (8), 834–843.

Arrouays, D.; Mulder, V. L.; Richer-de-Forges, A. C. Soil mapping, digital soil mapping and soil monitoring over large areas and the dimensions of soil security: A review. *Soil Security* **2021**, *5*, 100018.

Bååth, E.; Anderson, T. H. Comparison of soil fungal/bacterial ratios in a pH gradient using physiological and PLFA-based techniques. *Soil Biology and Biochemistry* **2003**, *35*, 955–963.

Bahram, M.; Hildebrand, F.; Forslund, S.; Anderson, J. Structure and function of the global topsoil microbiome. *Nature* **2018**, *560* (7717), 233–237.

Banerjee, M. R.; Burton, D. L. Landscape-induced variation in soil biological quality in Manitoba. *Soil Biology and Biochemistry* **1998**, *30*, 1152–1158.

Banerjee, S.; Walder, F.; Büchi, L.; Meyer, M.; Held, A.; Gattinger, A.; Keller, T.; Charles, R.; van der Heijden, M. Agricultural intensification reduces microbial network complexity and the abundance of keystone taxa in roots. *Soil Biology and Biochemistry* **2019**, *137*, 1722–1736.

Bastida, F.; Zsolnay, A.; Hernández, T.; García, C. Past, present and future of soil quality indices: a biological perspective. *Geoderma* **2008**, *147*, 159–171.

Binkley, D.; Valentine, D. Fifty-year biogeochemical effects of green ash, white pine and Norway spruce in a replicated experiment. *Forest Ecology and Management* **1991**, *40*, 13–25.

Biranvand, M. *Analysis of morphological-functional structure of humus forms in relation to tree ecological groups*. M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University **2015**; 153 pp. (In Persian)

Blagodatskaya, E.; Kuzyakov, Y. Active microorganisms in soil: critical review of estimation criteria and approaches. *Soil Biology and Biochemistry* **2013**, *67*, 192–211.

Blagodatskaya, E. V.; Anderson, T. H. Interactive effects of pH and substrate quality on fungal-to-bacterial ratio and qCO_2 of microbial communities in forest soils. *Soil Biology and Biochemistry* **1998**, *30*, 1269–1274.

Blanco-Canqui, H.; Ruis, S.; Holman, J.; Creech, C.; Obour, A. Can cover crops improve soil ecosystem services in water-limited environments? A review. *Soil Science Society of America Journal* **2022**, *86* (1), 1–18.

Brussaard, L.; Kuyper, T. W.; Didden, W. A. M.; de Goede, R. G. M.; Bloem, J. Biological soil quality from biomass to biodiversity – importance and resilience to management stress and disturbance. In *Managing Soil Quality: Challenges in Modern Agriculture*; Schjønning, P.; Elmholt, S.; Christensen, B. T., Eds.; CABI: Wallingford, UK, **2004**; pp. 139–171.

Burns, R. G.; De Forest, J. L.; Marxsen, J.; Sinsabaugh, R. L.; Stromberger, M. E.; Wallenstein, M. D.; Weintraub, M. N.; Zoppini, A. Soil enzymes in a changing environment: current knowledge and future directions. *Soil Biology and Biochemistry* **2013**, *58*, 216–234.

Campbell, C. D.; Chapman, S. J.; Cameron, C. M.; Davidson, M. S.; Potts, J. M. A rapid microtiter plate method to measure carbon dioxide evolved from carbon substrate amendments so as to determine the physiological profiles of soil microbial communities by using whole soil. *Applied and Environmental Microbiology* **2003**, *69* (6), 3593–3599.

Cardoso, E. J. B. N.; Figueiredo Vasconcellos, R. L.; Bini, D.; Horta Miyauchi, M. Y.; dos Santos, C. A.; Lopes Alves, P. R.; de Paula, A. M.; Nakatani, A. S.; Pereira, J. d. M.; Nogueira, M. A. Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? *Scientia Agricola* **2013**, *70* (4), 274–289.

Cheng, F.; Peng, X.; Zhao, P.; Yuan, J.; Zhong, C.; Cheng, Y.; Cui, C.; Zhang, S. Soil microbial biomass, basal respiration and enzyme activity of main forest types in the Qinling Mountains. *PLoS ONE* **2013**, *8* (6), e67353.

Creamer, R. E.; Hannula, S. E.; Van Leeuwen, J. P.; Stone, D.; Rutgers, M.; Schmelz, R. M.; de Ruiter, P. C.; Hendriksen, N. B.; Bolger, T.; Bouffaud, M. L.; et al. Ecological network analysis reveals the inter-connection between soil biodiversity and ecosystem function as affected by land use across Europe. *Applied Soil Ecology* **2016**, *97*, 112–124.

de Bello, F.; Lavorel, S.; Díaz, S.; Harrington, R.; Cornelissen, J. H. C.; Bardgett, R. D.; Berg, M. P.; Cipriotti, P.; Feld, C. K.; Hering, D.; et al. Towards an assessment of multiple ecosystem processes and services via functional traits. *Biodiversity and Conservation* **2010**, *19* (10), 2873–2893.

de Bruijn, I.; Cheng, X.; de Jager, V.; Exposito, R. G.; Watrous, J.; Patel, N.; Postma, J.; Dorrestein, P. C.; Kobayashi, D.; Raaijmakers, J. M. Comparative genomics and metabolic profiling of the genus *Lysobacter*. *BMC Genomics* **2015**, *16*.

de Groot, G. A.; Geisen, S.; Laros, I.; Faber, J. H.; Schmeltz, R. A tiered approach for high-resolution characterization of the soil faunal community via DNA metabarcoding. In *Book of Abstracts of the First Global Soil Biodiversity Conference*; **2014**; p. 87.

Edwards, C. A.; Bohlen, P. J. *Biology and Ecology of Earthworms*, 3rd ed.; Chapman and Hall: London, UK, **1996**; p. 426.

Evangelista, S. J.; Field, D. J.; McBratney, A. B.; Minasny, B.; Ng, W.; Padarian, J.; Wadoux, A. M. C. A proposal for the assessment of soil security: Soil functions, soil services and threats to soil. *Soil Security* **2023**, *10*, 100086.

Ferris, H.; Tuomisto, H. Unearthing the role of biological diversity in soil health. *Soil Biology & Biochemistry* **2015**, *85*, 101–109.

Fierer, N.; Lauber, C. L.; Ramirez, K. S.; Zaneveld, J.; Bradford, M. A.; Knight, R. Comparative metagenomic, phylogenetic and physiological analyses of soil microbial communities across nitrogen gradients. *ISME Journal* **2012**, *6* (5), 1007–1017.

Fisher, R. F.; Binkley, D. *Ecology and Management of Forest Soils*; John Wiley & Sons: New York, USA, **2000**; p. 489.

Ford, D. E. What do we need to know about forest productivity and how can we measure it. In *IUFRO Symposium on Forest Site and Continuous Productivity*; USDA Forest Service, General Technical Report PNW, **1983**; pp. 2–12.

Frostegård, Å.; Tunlid, A.; Bååth, E. Use and misuse of PLFA measurements in soils. *Soil Biology and Biochemistry* **2011**, *43*, 1621–1625.

Fu, B. J.; Liu, S. L.; Ma, K. M.; Zhu, Y. G. Relationships between soil characteristics, topography and plant diversity in a heterogeneous deciduous broad-leaved forest near Beijing, China. *Plant and Soil* **2004**, *261*, 47–54.

Gomes, L. C.; Beucher, A. M.; Møller, A. B.; Iversen, B. V.; Børgesen, C. D.; Adetsu, D. V.; Greve, M. H. Soil assessment in Denmark: Towards soil functional mapping and beyond. *Frontiers in Soil Science* **2023**, *3*, 1090145.

Graham, R. C.; Ervin, J. O.; Wood, H. B. Aggregate stability under oak and pine after four decades of soil development. *Soil Science Society of America Journal* **1995**, *59*, 1740–1744.

Guo, Y.; Gong, P.; Amundson, R. Pedodiversity in the United States of America. *Geoderma* **2003**, *117*, 99–115.

Habashi, H. Microbial respiration and microbial biomass C relationship with soil organic matter in different types of mixed beech forest. *Forest Research and Development* **2015**, *1* (2), 135–144.

Haghprast Tanha, M. R. *Soil loss and agricultural soils*; Islamic Azad University Publications, Rasht Branch: Rasht, Iran, **1993**; p. 342. (In Persian)

Haynes, R. J. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: An overview. *Advances in Agronomy* **2005**, *85*, 221–268.

Heydari, M.; Cheraghi, J.; Omidipour, R.; Rostaminia, M.; Kooch, Y.; Valkó, O.; Carcaillet, C. Tree dieback, woody plant diversity, and ecosystem processes driven by topography in semi-arid mountain forests: Implication for ecosystem management. *Journal of Environmental Management* **2023**, *339*, 117892.

Hu, Y. L.; Wang, S. L.; Zeng, D. H. Effects of single Chinese fir and mixed leaf litters on soil chemical, microbial properties and soil enzyme activities. *Plant and Soil* **2006**, *282* (2), 379–386.

Ibáñez, J. J.; Bockheim, J. *Pedodiversity*; CRC Press (Taylor & Francis Group): Boca Raton, FL, USA, **2013**; p. 250.

Kazemi, Sh.; Hojjati, M.; Fallah, A.; Tafazoli, M. Effects of forest management on soil physical and chemical properties of Khalil-Mahale forest. *Forest Research and Development* **2015**, *1* (2), 167–180.

Klose, S.; Tabatabai, M. A. Arylsulfatase activities of microbial biomass in soils of the Black Forest, Germany. *Soil Biology and Biochemistry* **2001**, *33* (10), 1437–1445.

Kooch, Y. *Soil ecosystem: principles and management*; Jahad-Daneshgahi of Mazandaran Publications: Sari, Iran, **2024**; p. 489. (In Persian)

Kooch, Y. *Soil functional ecology*; Jahad-Daneshgahi of Mazandaran Publications: Sari, Iran, **2023**; p. 288. (In Persian)

Kooch, Y. Soil quality: why and how? In *Proceedings of the 17th Iranian Congress of Soil Sciences and 4th National Conference on Water Management in the Farm*; Karaj, Iran, **2021**.

Kooch, Y. The variability of soil properties in relation to pit and mound, canopy gap and single trees in a beech mixed forest (PhD thesis). Tarbiat Modares University, **2012**; p. 157. (In Persian)

Kooch, Y.; Hosseini, M. *Ecology of forest soils (concepts and algorithms)*; Jahad-Daneshgahi of Mazandaran Publications: Sari, Iran, **2010**; p. 414. (In Persian)

Kooch, Y.; Kuzyakov, Y. *Earthworms and Ecological Processes*; Springer: Cham, Switzerland, **2024**. https://doi.org/10.1007/978-3-031-64510-5_4

Lehmann, J.; Bossio, D. A.; Kögel-Knabner, I.; Rillig, M. C. The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment* **2021**, *10*, 544–553.

Lekzian, A. *Enzymological methods*; Ferdowsi University of Mashhad Press: Mashhad, Iran, **2015**; p. 566. (In Persian)

Lekzian, A.; Shaddel, L. *Soil protozoa*; Ferdowsi University of Mashhad Press: Mashhad, Iran, **2007**; p. 252. (In Persian)

Machulla, G.; Bruns, M. A.; Scow, K. M. Microbial properties of mine spoil materials in the initial stages of soil development. *Soil Science Society of America Journal* **2005**, *69*, 1069–1077.

Mahmoudi, Sh.; Hakimian, M. *Basics of soil science*; Tehran University Press: Tehran, Iran, **2007**; p. 700. (In Persian)

Mazardlan, M.; Sawaqabi Firouzabadi, G. H. *Soil fertility management for sustainable agriculture*; Tehran University Press: Tehran, Iran, **2015**; p. 387. (In Persian)

Milani, N.; Lekzian, A. *Principles and applications of soil microbiology*; Ferdowsi University of Mashhad Press: Mashhad, Iran, **2010**; p. 696. (In Persian)

Moghimian, N.; Hosseini, S. M.; Kooch, Y.; Zarei Darki, B., The effects of disturbance caused by land use change on the dynamics of topsoil earthworm activity, nematodes and

carbon dioxide emission in the Nowshahr region (Case study: Gerdekoh-Safak). *Iranian Journal of Soil and Water Research* **2018**, 49 (4), 915–924.

Muñoz-Rojas, M., Soil quality indicators: critical tools in ecosystem restoration. *Current Opinion in Environmental Science & Health* **2018**, 5, 47–52.

Nikpour, A. R.; Habashi, H., Variability of main and secondary humus forms in relation to morphometric indices at local-scale surveys. *Journal of Wood and Forest Science and Technology* **2023**, 30 (2), 39–54.

Nikpour, A. R.; Habashi, H.; Sajedi, T., Morphological classification of humus forms in eastern Hyrcanian forests. In *National Conference on Knowledge and Technology of Agricultural Sciences, Natural Resources and Environment of Iran*; Tehran, Iran, **2017**; p. 5.

Orgiazzi, A.; Dunbar, M. B.; Panagos, P.; de Groot, G. A.; Lemanceau, P., Soil biodiversity and DNA barcodes: opportunities and challenges. *Soil Biology & Biochemistry* **2015**, 80, 244–250.

Osman, K. T., *Forest Soils: Properties and Management*; Springer: Cham, **2013**; p. 222. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5663-2

Parsapour, M. K.; Kooch, Y.; Hosseini, S. M.; Alavi, S. J., Litter and topsoil in *Alnus subcordata* plantation on former degraded natural forest land: a synthesis of age-sequence. *Soil and Tillage Research* **2018**, 179, 1–10.

Philippot, L.; Spor, A.; Henault, C.; Bru, D.; Bizouard, F.; Jones, C. M.; Sarr, A.; Maron, P. A., Loss in microbial diversity affects nitrogen cycling in soil. *ISME Journal* **2013**, 7 (8), 1609–1619.

Phillips, H. R. P.; Guerra, C. A.; Kooch, Y.; Eisenhauer, N., Global distribution of earthworm diversity. *Science* **2019**, 366 (6464), 480–485.

Pulleman, M.; Creamer, R.; Hamer, U.; Helder, J.; Pelosi, C.; Peres, G.; Rutgers, M., Soil biodiversity, biological indicators and soil ecosystem services—an overview of European approaches. *Current Opinion in Environmental Sustainability* **2012**, 4 (5), 529–538.

Rahmani, R., *Studying the Population and Biodiversity of Terrestrial Invertebrates and Their Relationship with the Major Forest Types of Neka*; PhD Thesis, Tarbiat Modares University: Tehran, Iran, **1998**; p. 117. (In Persian)

Rillig, M. C.; Lehmann, A.; Lehmann, J.; Camenzind, T.; Rauh, C., Soil biodiversity effects from field to fork. *Trends in Plant Science* **2018**, 23 (1), 17–24.

Rocca, J. D.; Hall, E. K.; Lennon, J. T.; Evans, S. E.; Waldrop, M. P.; Cotner, J. B.; Nemergut, D. R.; Graham, E. B.; Wallenstein, M. D., Relationships between protein-encoding gene abundance and corresponding process are commonly assumed yet rarely observed. *ISME Journal* **2015**, 9 (8), 1693–1699.

Saleh Rastin, N., *Soil Biology (Soil Organisms and Their Role in the Circulation of Elements)*; Tehran University Press: Tehran, Iran, **1978**; p. 213.

Saleh-Lakha, S.; Miller, M.; Campbell, R. G.; Schneider, K.; Elahimanesh, P.; Hart, M. M.; Trevors, J. T., Microbial gene expression in soil: methods, applications and challenges. *Journal of Microbiological Methods* **2005**, 63 (1), 1–19.

Samadzadeh, B.; Kooch, Y.; Hosseini, S. M., Linkages of litter and soil C:N:P stoichiometry in a temperate broad-leaved forest stands. *Ecopersia* **2017**, 5, 1955–1967.

Sanjabi, A. A., *Soil Biology and Biochemistry*; Bu-Ali Sina University Publications: Hamedan, Iran, **2003**; p. 383.

Sarlo, M., Individual tree species effects on earthworm biomass in a tropical plantation in Panama. *Caribbean Journal of Science* **2006**, 42, 419–427.

Sasse, J.; Martinoia, E.; Northen, T., Feed your friends: do plant exudates shape the root microbiome? *Trends in Plant Science* **2018**, 23 (1), 25–41.

Scahrenbroch, B. C.; Bockheim, J. G., Pedodiversity in an old-growth northern hardwood forest in the Huron Mountains, Upper Peninsula, Michigan. *Canadian Journal of Forest Research* **2007**, 37, 1106–1117.

Schoenholtz, S. H.; Van Miegroet, H.; Burger, J. A., A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management* **2000**, 138 (1–3), 335–356.

Sharifpour, Y.; Habashi, H.; AliArab, A. R., The effect of rhizosphere competition on seasonal variations of absolute and specific urease activities in pure and mixed planting of Chestnut-leaved oak and Persian maple.

Journal of Forest Research and Development **2018**, 4 (1), 1–14.

Simon, C.; Daniel, R., Metagenomic analyses: past and future trends. *Applied and Environmental Microbiology* **2011**, 77 (4), 1153–1161.

Sinsabaugh, R. L.; Hill, B. H.; Follstad Shah, J. J., Ecoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment. *Nature* **2008**, 452 (7183), 38–41.

Siry, J. P.; Cubbage, F. W.; Ahmed, M. R., Sustainable forest management: global trends and opportunities. *Forest Policy and Economics* **2005**, 7 (4), 551–561.

Smith, P.; et al., Status of the world's soils. *Annual Review of Environment and Resources* **2024**, 49, 73–104.

Swenson, T. L.; Jenkins, S.; Bowen, B. P.; Northen, T. R., Untargeted soil metabolomics methods for analysis of extractable organic matter. *Soil Biology and Biochemistry* **2015**, 80, 189–198.

Tardy, V.; Spor, A.; Mathieu, O.; et al., Shifts in microbial diversity through land use intensity as drivers of carbon mineralization in soil. *Soil Biology & Biochemistry* **2015**, 90, 204–213.

Thompson, L. R.; Sanders, J.; McDonald, D.; Amir, A., A communal catalogue reveals Earth's multiscale microbial diversity. *Nature Biotechnology* **2017**, 551 (7681), 457–463.

Wagg, C.; Bender, S. F.; Widmer, F.; van der Heijden, M. G. A., Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. *PNAS* **2014**, 111 (14), 5266–5270.

Wang, L.; Wang, X.; Kooch, Y.; Song, K.; Wu, D., Improvement of data imbalance for digital soil class mapping in Eastern China. *Computers and Electronics in Agriculture* **2023**, 214, 108322.

Wang, X. Q.; Sharp, C. E.; Jones, G. M.; Grasby, S. E.; Brady, A. L.; Dunfield, P. F., (details incomplete in source). **2015**.

Warkentin, B. P., The changing concept of soil quality. *Journal of Soil and Water Conservation* **1995**, 50 (3), 226–228.

Witzinger, J., Stable isotope probing in soil microbiology. *Environmental Microbiology Reports* **1997**.

Worrell, R.; Hampson, A., The influence of some forest operations on the sustainable management of forest soils—a review. *Forestry* **1997**, 70 (1), 61–85.

Xue, K.; Wu, L. Y.; Deng, Y.; et al., Functional gene differences in soil microbial communities from conventional, low-input, and organic farmlands. *Applied and Environmental Microbiology* **2013**, 79 (4), 1284–1292.

Yan, J.; Sheng, L.; Lu, S.; Yu, X.; Kooch, Y.; Zou, Y., Snow removal promotes microbial-mediated organic carbon stabilization within aggregates in northeast peatland of China. *Pedosphere* **2024**, 34, 751–762.

Yang, K.; Zhu, J. J., Impact of tree litter decomposition on soil biochemical properties obtained from a temperate secondary forest in Northeast China. *Journal of Soils and Sediments* **2015**, 15 (1), 13–23.

Yu, Z.; Zhang, Y.; Liu, Q.; Liu, Z.; Liu, G., Short-term effects of forest gap size on soil enzyme activity in a Pinus tabuliformis plantation. *Frontiers in Ecology and Evolution* **2023**, 11, 1122796.

Zanella, A.; Jabiol, B.; Chersich, S.; Langohr, E. R., European humus forms references. **2011**, HAL archive, hal-00541496.

Zhalnina, K.; Louie, K.; Hao, Z.; et al., Dynamic root exudate chemistry and microbial substrate preferences drive rhizosphere microbial assembly. *Nature Microbiology* **2018**, 3 (4), 470–480.

Zhang, B.; He, H.; Ding, X.; Zhang, X., Soil microbial community dynamics under tillage practices. *Soil and Tillage Research* **2012**, 124, 153–160.