Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

Response of Soil Biological and Quality Indicators to Land-Use Change from Forest to Tea Plantation and Paddy Field (A Case Study from Fuman, Gilan Province, Iran)

Atefeh Tavakoli[1]✉ | **Ahmad Golchin**[2] | **Parviz Karami**[3] | **Shahriar Sobh Zahedi**[4]

1. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: atefeh.tavakoli@znu.ac.ir

2 Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran, E-mail: agolchin2011@yahoo.com

3. Department Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. Board Member of Department of Zrebar Lake Environmental Research, Kurdistan Studies Institute, University of Kurdistan, E-mail: p.karami@uok.ac.ir

4. Forest, Rangeland and Watershed Researches Department, Gilan Agricultural and Natural Resources Researches and Education Center, AREEO, Rasht, Iran. E-mail: sh.szahedi@gmail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Nov. 10, 2025

Revised: Jan. 20, 2026

Accepted: Feb. 28, 2026

Published online: March. 2026

Keywords:
Depth of soil,
Glomalin,
Land-use change,
Organic carbon,
Sensitivity index

ABSTRACT

This study was conducted to investigate the effects of land-use change and soil depth variations on the biological, chemical, and physical properties of soil in Fuman region, Gilan Province. Accordingly, 15 soil samples were collected from each of the natural forest, tea plantation, and paddy field land uses at five soil depths (0–20, 20–40, 40–60, 60–80, and 80–100 cm). The measured indicators included soil organic carbon (SOC), microbial respiration (Cmin), microbial biomass carbon (MBC), glomalin, mean weight diameter of aggregates (MWD), activities of dehydrogenase, acid and alkaline phosphatases, cellulase, soil pH, and the metabolic quotient (qCO_2). Analysis of variance showed that the interaction effect of depth and land use on all measured indicators was significant at the 1% probability level ($p < 0.01$). Overall, the tea plantation performed better in most indicators compared with the other two land uses; in the surface layer (0–20 cm), the values of SOC, Cmin, MBC, cellulase, glomalin and MWD were respectively 17.94%, 0.36%, 19.44%, 16%, 14.3% and 7% higher relative to the forest, and 36.86%, 1.68%, 46.79%, 23.61%, 55.92% and 52.34% higher relative to the paddy field. In the surface soil layer, acid phosphatase activity in the forest land use was 23.66% and 10.88% higher than those in the tea plantation and paddy field, respectively. In contrast, in the surface layer, Dehydrogenase and alkaline phosphatase activities, and qCO_2 in the paddy field were, respectively, four times, 7.35% and 31.86% higher relative to the forest, and 15.89%, 9.5% and 43.28% higher relative to the tea plantation. This increase suggests that under flooded paddy field conditions, soil microorganisms require greater energy expenditure to maintain their metabolism as a result of oxygen limitation and low carbon-use efficiency. Other indicators also showed a significant decrease with increasing depth. These results indicate the relative superiority of tea plantations in terms of biological quality and structural stability of the soil compared with other land uses, and highlight the importance of maintaining this land use for the sustainability of soil ecosystems in northern Iran.

Cite this article: Tavakoli, A., Golchin, A., Karami, P, Sobh Zahedi, Sh., (2026) Response of Soil Biological and Quality Indicators to Land-Use Change from Forest to Tea Plantation and Paddy Field (A Case Study from Fuman, Gilan Province, Iran), *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (1), 131-149. https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.405888.670048

© The Author(s). Publisher: University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.405888.670048

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Land-use change is one of the key factors affecting soil quality and sustainability. Such changes can alter the biological, chemical, and physical processes of soils and significantly influence the storage and dynamics of soil organic carbon (SOC). Among different land uses, tea plantations—with their permanent vegetation cover and minimal tillage can enhance soil properties, while paddy fields, due to flooded conditions and fluctuating redox potential, may cause a decline in soil biological quality. This study aimed to investigate the effects of land-use change from natural forest to tea plantation and paddy field on the biological, chemical, and physical properties of soil in Fuman region, Gilan Province, northern Iran.

Materials and Methods

Soil sampling was conducted from three land uses—natural forest, tea plantation, and paddy field at five depths (0–20, 20–40, 40–60, 60–80, and 80–100 cm). The measured indicators included soil organic carbon (SOC), microbial biomass carbon (MBC), microbial respiration (Cmin), glomalin, mean weight diameter of aggregates (MWD), the activities of dehydrogenase, acid and alkaline phosphatases, and cellulase, soil pH, and the microbial metabolic quotient (qCO_2). The experiments were performed in a factorial arrangement based on a completely randomized design with three replications. Data were analyzed using SAS and Excel software, employing two-way analysis of variance (ANOVA) and Duncan's multiple range test to compare means..

Results and Discussion

The results showed that the interaction effect of land use and soil depth on all measured indicators was significant at the 1% probability level ($p < 0.01$). Overall, the tea plantation demonstrated superior performance in most indicators compared with forest and paddy land. In the surface layer (0–20 cm), SOC, MBC, and glomalin were 17.94%, 19.44%, and 14.3% higher than in the forest, and 36.86%, 46.79%, and 55.92% higher than in the paddy field, respectively. Conversely, dehydrogenase activity and qCO_2 in the paddy field were four times and 31.86% higher than in the forest, and 15.89% and 43.28% higher than in the tea plantation, respectively, indicating lower microbial efficiency under anaerobic conditions. Furthermore, MWD and glomalin exhibited the highest values in the tea plantation and decreased significantly with depth.

Conclusion

The findings revealed that tea plantations, due to their continuous root systems and minimal disturbance, improved the physical, chemical, and biological quality of soil and exhibited greater stability compared with forest and paddy land. In contrast, flooded conditions and mechanical disturbance in paddy soils reduced microbial activity and metabolic efficiency. Therefore, maintaining and expanding tea plantation land use, along with appropriate organic matter and nutrient management, can play an important role in enhancing soil health and sustaining the soil ecosystems of northern Iran.

Funding

This article was conducted with the financial and moral support of the Vice Chancellor for Research, University of Zanjan.

Financial support for this research was provided by the University of Zanjan, Faculty of Agriculture in the form of a student thesis research of the first author and Done for the second author.

Authorship contribution

Conceptualization A.G.; methodology, A.T. and A.G.; software, A.T. and P.K.; validation, A.T., A.G.; formal analysis, A.T.; investigation, A.T.; resources, A.T and A.G.. data curation, A.T., and SH.S.Z; writing—original draft preparation, A.T.; writing—review and editing, A.T. and A.G.; visualization, A.T and A.G.; supervision,A.G.; project administration, A.G.; funding acquisition, A.T. and A.G. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

Generative AI and AI-assisted technologies were not used in writing this article.

Data availability statement

The data of this study are available upon request from the corresponding author.

Acknowledgements

We would like to thank the University of Zanjan for providing the necessary facilities to conduct this research.

The respected reviewers are thanked for providing structural and scientific comments.

Ethical considerations

The authors have observed ethical principles in conducting and publishing this scientific research, and this is confirmed by all of them.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۷، شماره ۱ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

بررسی پاسخ شاخص‌های زیستی و کیفی خاک به تغییر کاربری از جنگل به باغ چای و شالیزار (مطالعه موردی: شهرستان فومن، استان گیلان، ایران)

عاطفه توکلی[۱]✉| احمد گلچین[۲] | پرویز کرمی[۳] | شهریار صبح‌زاهدی[۴]

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: tavakoli@znu.ac.irAtefeh.tavakoli@znu.ac.ir.atefeh

۲. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: agolchin2011@yahoo.com

۳. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. عضو گروه پژوهشی مطالعات محیطی دریاچه زریبار، پژوهشکده کردستان شناسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: p.karami@uok.ac.ir

۴. بخش تحقیقات جنگل، مرتع و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گیلان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران. رایانامه: sh.szahedi@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۸/۱۹
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۹
تاریخ انتشار: فروردین ۱۴۰۵

واژه‌های کلیدی:
تغییر کاربری،
شاخص حساسیت،
عمق خاک،
کربن آلی،
گلومالین

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی اثر تغییر کاربری اراضی و تغییرات عمق بر ویژگی‌های زیستی، شیمیایی و فیزیکی خاک در منطقه فومن، استان گیلان انجام شد. بدین‌منظور، از هر یک از کاربری‌های جنگل طبیعی، باغ چای و شالیزار، تعداد ۱۵ نمونه خاک در پنج عمق (۲۰-۰، ۴۰-۲۰، ۶۰-۴۰، ۸۰-۶۰ و ۱۰۰-۸۰ سانتی‌متر) جمع‌آوری شد. شاخص‌های اندازه‌گیری شده شامل کربن آلی خاک ((SOC، تنفس میکروبی ((Cmin، کربن زیست‌توده میکروبی (MBC)، گلومالین، میانگین وزنی قطر خاک‌دانه (MWD)، فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز، فسفاتاز اسیدی و قلیایی، سلولاز، pH و ضریب متابولیک (qCO_2)بود. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل عمق و کاربری بر تمام شاخص‌های اندازه‌گیری شده در سطح احتمال یک درصد ($p<0.01$)معنی‌دار بود. به‌طورکلی، باغ چای در اغلب شاخص‌ها عملکرد بهتری نسبت به دو کاربری دیگر داشت؛ به‌گونه‌ای که در لایه سطحی (۲۰-۰ سانتی‌متر)، مقدار SOC، Cmin، MBC، آنزیم سلولاز، گلومالین و MWD به‌ترتیب ۱۷/۹۴، ۰/۳۶، ۱۹/۴۴، ۱۶، ۱۴/۳ و ۷ درصد بیش‌تر از جنگل و ۳۶/۸۶، ۱/۶۸، ۴۶/۷۹، ۲۳/۶۱، ۵۵/۹۲ و ۵۲/۳۴ درصد بیش‌تر از شالیزار بود. فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی در لایه سطحی کاربری جنگل نسبت به کاربری‌های باغ‌چای و شالیزار به‌ترتیب ۲۳/۶۶ و ۱۰/۸۸ درصد بیش‌تر بود. در مقابل، در لایه سطحی، فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز، فسفاتاز قلیایی و شاخص qCO_2 در شالیزار به‌ترتیب ۴ برابر، ۷/۳۵ و ۳۱/۸۶ درصد بیش‌تر از جنگل و ۱۵/۸۹، ۹/۵ و ۴۳/۲۸ درصد بیش‌تر از باغ چای بود. این افزایش نشان می‌دهد که میکروارگانیسم‌های خاک در شرایط غرقابی شالیزار، به‌دلیل محدودیت اکسیژن و کارایی پایین مصرف کربن، انرژی بیشتری برای حفظ متابولیسم صرف می‌کنند. سایر شاخص‌ها نیز با افزایش عمق کاهش معنی‌داری داشتند. این نتایج بیانگر برتری نسبی باغ‌های چای از نظر کیفیت زیستی و پایداری خاک نسبت به سایر کاربری‌ها و اهمیت حفظ این کاربری در اکوسیستم‌های خاکی شمال ایران است.

استناد: توکلی؛ عاطفه، گلچین؛ احمد، کرمی؛ پرویز، صبح زاهدی؛ شهریار، (۱۴۰۵) بررسی پاسخ شاخص‌های زیستی و کیفی خاک به تغییر کاربری از جنگل به باغ چای و شالیزار (مطالعه موردی: شهرستان فومن، استان گیلان، ایران)، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۷ (۱)، ۱۴۹-۱۳۱.
https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.405888.670048

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.405888.670048

مقدمه

خاک نقشی اساسی در تولید مواد غذایی، تنظیم چرخه کربن، ذخیره و تصفیه آب و پشتیبانی از تنوع زیستی دارد و از این‌رو یکی از بنیادی‌ترین مؤلفه‌های عملکرد و پایداری اکوسیستم‌های زمینی به‌شمار می‌آید (Delgado-Baquerizo et al., 2025). برآوردها نشان می‌دهد بیش از ۹۵ درصد غذای انسان از خاک منشأ می‌گیرد. خاک به‌عنوان بزرگ‌ترین مخزن کربن آلی در خشکی، سه برابر بیش‌تر از جو و زیست‌توده زنده، کربن در خود ذخیره دارد؛ به همین دلیل نقش تعیین‌کننده‌ای در تغییرات اقلیمی و پایداری اکوسیستم‌ها دارد (Amundson & Biardeau, 2018; Delgado-Baquerizo et al., 2025). از نظر زیستی نیز، خاک یکی از پیچیده‌ترین زیستگاه‌های میکروبی زمین است و فرایندهایی همچون تنفس میکروبی، تجزیه بقایای آلی، چرخه فسفر و نیتروژن و تثبیت کربن آلی عمدتاً به‌وسیله آنزیم‌های میکروبی و ترکیبات پلیمری برون‌سلولی مانند گلومالین در آن انجام می‌شود؛ ترکیباتی که در پایداری خاک‌دانه‌ها و ذخیره بلندمدت کربن نقش اساسی دارند (Kuzyakov & Blagodatskaya, 2015). باوجود اهمیت حفظ و ارتقای کیفیت خاک، افزایش جمعیت و نیاز روزافزون به تولید مواد غذایی سبب شده است که خاک، به‌ویژه در مناطق مرطوب و حاصلخیز، با فشار فزاینده تغییر کاربری اراضی مواجه شود (Harris et al., 2021). در این میان، متداول‌ترین نوع تغییر کاربری در این مناطق تبدیل جنگل‌ها به اراضی مرتعی، کشاورزی و باغی است (Parsapour et al., 2018; عزیزی‌مهر و همکاران، ۱۳۹۹). بر اساس یافته‌های Winkler et al. (2021)، در شش دهه گذشته (۱۹۶۰ تا ۲۰۱۹) حدود یک‌سوم از سطح زمین‌های جهان دستخوش تغییر کاربری شده‌اند. این تغییرات معمولاً با حذف پوشش جنگلی، کاهش ورود بقایای آلی به خاک، خاک‌ورزی، آبیاری و مصرف کود و سم همراه‌اند و می‌توانند ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را به‌طور چشمگیری تغییر دهند (Shao et al., 2024). این فرایند غالباً موجب کاهش کربن آلی، افت فعالیت‌های میکروبی و درنتیجه کاهش کیفیت زیستی خاک می‌شود (Ma et al., 2022; Mir et al., 2023). همچنین، تغییر کاربری اراضی با افزایش جرم مخصوص ظاهری، کاهش تخلخل و نفوذپذیری، تشدید فرسایش و تغییر در میزان مواد آلی ورودی به خاک همراه است که درنهایت ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و حاصلخیزی خاک را دگرگون می‌سازد (Osman, 2013).

در مقابل، مطالعات نشان داده‌اند که کاربری‌های دائمی و چندساله مانند باغ‌های چای به‌دلیل حضور پوشش گیاهی دائمی، ورود مستمر بقایای آلی به خاک و خاک‌ورزی حداقلی، می‌توانند موجب بهبود پایداری خاک‌دانه‌ها، افزایش کربن آلی و ارتقای فعالیت‌های آنزیمی شوند (He et al., 2023; Shao et al., 2024). درحالی‌که سامانه‌های غرقابی مانند شالیزارها، به‌ویژه در صورت مدیریت ضعیف بقایا و تناوب زراعی، به‌دلیل شرایط بی‌هوازی اغلب با افت فعالیت آنزیم‌های هوازی، کاهش زیست‌توده میکروبی و تضعیف ساختار خاک همراه‌اند (Mir et al., 2023; Das et al., 2025). این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که ارزیابی اثر تغییر کاربری نیازمند بررسی هم‌زمان جنبه‌های زیستی، بیوشیمیایی و فیزیکی خاک در کاربری‌های مختلف و در اعماق گوناگون خاک است تا درک جامع‌تری از پویایی ویژگی‌های خاک تحت شرایط مدیریتی متفاوت حاصل شود.

ویژگی‌های زیستی و بیوشیمیایی خاک از شاخص‌هایی هستند که در بازه‌های زمانی کوتاه به تغییرات محیطی واکنش نشان می‌دهند و ازاین‌رو ابزارهای مناسبی برای ارزیابی سلامت و کیفیت خاک محسوب می‌شوند. این ویژگی‌ها از مؤلفه‌های اصلی حاصلخیزی و پایداری زیستی خاک به‌شمار می‌روند و نقش مهمی در چرخه عناصر غذایی، فرایندهای بیوشیمیایی، پایداری بلندمدت حاصلخیزی و جریان انرژی در اکوسیستم‌های خاکی دارند (Tellen & Yerima, 2018). در میان شاخص‌های زیستی، کربن زیست‌توده میکروبی (MBC) و فعالیت‌های آنزیمی از مهم‌ترین پارامترهای میکروبی–بیوشیمیایی به شمار می‌روند که به‌دلیل نقش کلیدی در چرخه عناصر غذایی، به‌طور گسترده برای پایش کیفیت و سلامت خاک مورداستفاده قرار می‌گیرند. در سال‌های اخیر، شاخص‌های اکوفیزیولوژیک مبتنی بر ویژگی‌های میکروبی و بیوشیمیایی خاک مانند ضریب متابولیک (qCO_2) معرفی شده‌اند که حساسیت بالایی نسبت به تغییرات محیطی دارند و می‌توانند نشانگر تغییرات کیفیت خاک و میزان اختلال در اکوسیستم‌های خاکی باشند (Moghimian et al., 2019). فعالیت آنزیم‌های خاک نیز از شاخص‌های زیستی حساس به تغییرات محیطی است که معمولاً با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک ارتباط مستقیم دارد و بیانگر جهت و شدت فرایندهای بیوشیمیایی درون خاک است؛ بنابراین اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌ها یکی از روش‌های کلیدی در ارزیابی کیفیت زیست‌محیطی و پایداری زیستی خاک محسوب می‌شود (Lu et al., 2023).

از دیگر عوامل مؤثر در ارزیابی کیفیت خاک، عمق خاک است. بسیاری از مطالعات تنها به لایه سطحی (۲۰–۰ سانتی‌متر) اکتفا کرده‌اند، درحالی‌که فرایندهای زیستی، شیمیایی و فیزیکی مهم تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متر نیز ادامه دارند و این مخزن زیرسطحی سهم قابل‌توجهی در ذخیره کربن آلی، مواد مغذی و ظرفیت نگهداری آب دارد (Wang et al., 2024). شواهد اخیر نشان می‌دهد که فعالیت آنزیم‌ها و زیست‌توده میکروبی با افزایش عمق خاک کاهش می‌یابد و حساسیت این شاخص‌ها به مدیریت در لایه‌های زیرسطحی ممکن

است متفاوت و کندتر از لایه‌های سطحی باشد (Dove et al., 2021). پایداری ساختاری خاک، که از طریق ویژگی‌هایی مانند پایداری خاک‌دانه‌ها و میانگین وزنی قطر آن‌ها سنجیده می‌شود، تابع مستقیمی از مقدار ماده آلی و ترکیبات پلیمری حاصل از فعالیت میکروارگانیسم‌ها است. در میان این ترکیبات، گلومالین به‌عنوان یکی از فرآورده‌های قارچ‌های میکوریزی آربسکولار، نقشی کلیدی در چسبندگی ذرات، تشکیل خاک‌دانه‌های پایدار و تثبیت کربن ایفا می‌کند. تغییر در مدیریت اراضی (نظیر شخم، ورودی بقایا یا تغییر کاربری) و نیز عمق خاک می‌تواند مقدار گلومالین و به‌تبع آن پایداری فیزیکی خاک را تغییر دهد؛ فرایندی که در نهایت بر نفوذپذیری آب، نگهداشت رطوبت و فرسایش‌پذیری خاک اثرگذار است (Wright & Upadhyaya, 1998).

در مناطق مرطوب شمال ایران، به‌ویژه در نواحی کشاورزی و جنگلی گیلان، بررسی هم‌زمان اثر عمق و نوع کاربری بر کیفیت خاک کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است؛ در حالی‌که شناخت دقیق روابط میان ویژگی‌های زیستی، بیوشیمیایی و فیزیکی خاک در لایه‌های مختلف می‌تواند مبنای مهمی برای مدیریت پایدار اراضی باشد. بر این اساس، این پژوهش با هدف بررسی تأثیر هم‌زمان نوع کاربری (جنگل طبیعی، باغ چای و شالیزار) و عمق خاک بر ویژگی‌های زیستی، شیمیایی و فیزیکی خاک در منطقه فومن استان گیلان انجام شد. در این مطالعه، شاخص‌های کربن آلی خاک (SOC)، تنفس میکروبی (Cmin)، کربن زیست‌توده میکروبی (MBC)، گلومالین، میانگین وزنی قطر خاک‌دانه (MWD)، فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز، فسفاتاز اسیدی و قلیایی، سلولاز، pH و ضریب متابولیک (qCO_2) در پنج عمق (۲۰-۰، ۴۰-۲۰، ۶۰-۴۰، ۸۰-۶۰ و ۱۰۰-۸۰ سانتی‌متر) اندازه‌گیری شدند تا نقش عمق و نوع کاربری در پویایی کربن آلی، فعالیت میکروبی و ساختار فیزیکی خاک ارزیابی شود. بر این اساس، فرض بر این است که نوع کاربری و عمق خاک اثر معناداری بر این شاخص‌ها دارند و باغ‌های چای به‌دلیل پایداری مدیریتی و ورود مداوم مواد آلی به خاک، از کیفیت زیستی و ساختاری بالاتری نسبت به دو کاربری دیگر برخوردارند.

پیشینه پژوهش

ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک به‌شدت تحت تأثیر نوع کاربری و نحوه مدیریت زمین قرار دارند و تغییر کاربری می‌تواند ساختار، حاصل‌خیزی و پایداری اکوسیستم خاک را به‌طور چشمگیری دگرگون کند. نتایج مطالعات متعدد در ایران و سایر کشورها نشان داده‌اند که تبدیل جنگل‌های طبیعی به اراضی کشاورزی غالباً با کاهش ماده آلی، تغییر در نسبت کربن به نیتروژن و افت فعالیت آنزیم‌های میکروبی همراه است (Mir et al., 2023). در استان‌های شمالی ایران، تغییر کاربری از جنگل به شالیزار و باغ چای یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر کاهش کیفیت خاک محسوب می‌شود. کهنه و همکاران (۱۴۰۲) در پژوهشی در باغ‌های چای گیلان و مازندران گزارش کردند که کشت طولانی‌مدت چای، همراه با مصرف نامتعادل کودهای شیمیایی، موجب کاهش فعالیت میکروبی و تغییر در جمعیت قارچ‌های مایکوریزا آربسکولار شده است. این تغییرات معمولاً با کاهش pH، افزایش فسفر قابل‌دسترس و دگرگونی در ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک همراه است. بررسی‌ها در باغ‌های چای کشور نشان می‌دهد که اسیدی شدن خاک و انباشت فسفر از مهم‌ترین عوامل کاهش فراوانی قارچ‌های همزیست مایکوریزی هستند؛ ازاین‌رو اجرای مدیریت تغذیه متعادل، استفاده از کودهای زیستی و اصلاح اسیدیته خاک از راهکارهای مؤثر در حفظ جمعیت میکروارگانیسم‌های مفید و ارتقای کیفیت زیستی خاک به‌شمار می‌رود.

همچنین، براساس نتایج مطالعه‌ای در استان گیلان، تبدیل جنگل‌های طبیعی به شالیزار تأثیر چشمگیری بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک داشته است. در این تحقیق، مقادیر چگالی ظاهری و رس قابل انتشار پس از تغییر کاربری افزایش یافته، در حالی‌که میزان کربن آلی، نیتروژن کل، ظرفیت تبادل کاتیونی و پایداری خاک‌دانه‌ها به‌طور معنی‌داری کاهش پیدا کرده است. تحلیل شاخص حساسیت نشان داد که میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها و کربن آلی از حساس‌ترین متغیرها نسبت به تغییر کاربری هستند. نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی نیز بیانگر آن بود که این دو عامل به‌همراه چگالی ظاهری و کربوهیدرات‌های خاک، بیش‌ترین نقش را در تبیین تغییرات کیفیت خاک ایفا می‌کنند. به‌طور کلی، یافته‌ها نشان دادند که تبدیل جنگل به شالیزار منجر به کاهش پایداری فیزیکی و افت کیفیت شیمیایی خاک می‌شود و در نتیجه حفظ کاربری جنگل برای پایداری اکوسیستم‌های خاکی شمال کشور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (وارسته‌خانلری و همکاران، ۱۳۹۹).

در سطح بین‌المللی نیز نتایج مشابهی گزارش شده است. Ma et al. (2022) در جنوب چین نشان دادند که تبدیل جنگل‌های گرمسیری به باغ‌های چای موجب کاهش حدود ۲۷ درصدی کربن آلی خاک و ۲۲ درصدی کربن بقایای میکروبی شد. این نوع کربن که از بقایای سلولی میکروارگانیسم‌های مرده در خاک حاصل می‌شود، از اجزای پایدار کربن آلی بوده و سهم قابل‌توجهی در تثبیت بلندمدت کربن دارد. همچنین Tian et al. (2020) گزارش کردند که تغییر کاربری جنگل به باغ چای باعث افزایش انتشار N_2O و کاهش تنوع

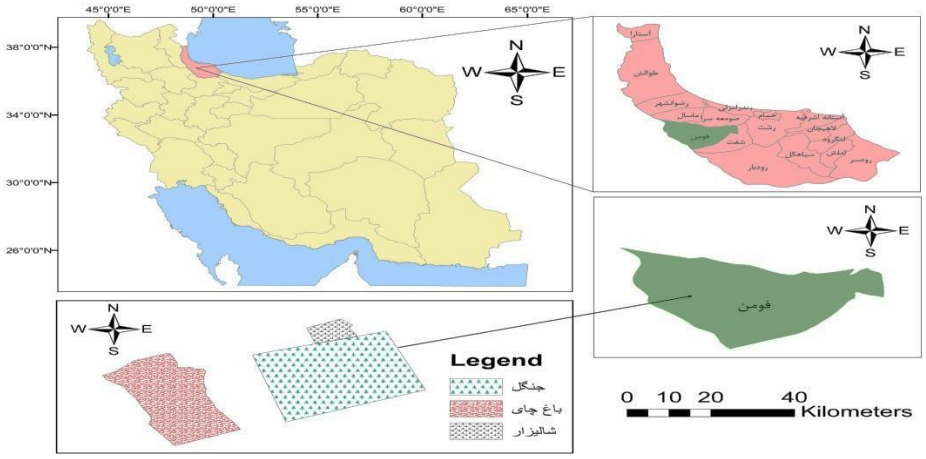
میکروبی خاک می‌شود. با این حال، اثر تغییر کاربری همواره منفی نیست؛ چنان‌که در پژوهشی بر روی باغ‌های چای با سابقه طولانی نشان دادند که به‌دلیل ورود مداوم بقایای آلی به خاک و توسعه شبکه مایکوریزی، مقدار گلومالین و پایداری خاک‌دانه‌ها افزایش یافته و مقاومت خاک در برابر فرسایش بهبود پیدا می‌کند (Gui et al., 2021). از سوی دیگر، یافته‌های جدید اهمیت قابل‌توجه عمق خاک را در ارزیابی پویایی ویژگی‌های زیستی و شیمیایی برجسته ساخته‌اند. Wang et al. (2024) در تحلیلی جهانی گزارش کردند که بیش از ۴۰ درصد از کل کربن آلی خاک در عمق ۲۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متری ذخیره می‌شود. بررسی انجام شده در چند اکوسیستم طبیعی و کشاورزی نشان داد که واکنش فعالیت آنزیم‌ها به عمق در کاربری‌های مختلف متفاوت است و تغییرات در لایه‌های زیرین معمولاً با تأخیر اما با پایداری بیش‌تری رخ می‌دهد (Dove et al., 2021).

به‌طور کلی، مرور مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که تغییر کاربری جنگل به باغ چای یا شالیزار می‌تواند بسته به شرایط اکولوژیکی و مدیریتی منطقه، اثرات مثبت یا منفی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک بر جای گذارد. با وجود مطالعات متعدد در این زمینه، بررسی هم‌زمان اثر نوع کاربری و عمق خاک بر شاخص‌های کیفی در مناطق مرطوب شمال کشور کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. این امر لزوم انجام پژوهش‌های جامع‌تر را برای درک بهتر تعاملات بین کاربری، عمق و ویژگی‌های خاک و در نتیجه تدوین راهبردهای مؤثر در مدیریت پایدار خاک‌های این مناطق را آشکار می‌سازد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در شهرستان فومن واقع در استان گیلان انجام شد. عرصه مورد مطالعه در موقعیت جغرافیایی ۴۹ درجه و ۱۶ دقیقه و ۱۲/۸۳۷ ثانیه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۱۳ دقیقه و ۴/۲۸۹ ثانیه عرض شمالی قرار دارد و به‌عنوان پایگاه تحقیقاتی صنوبر و درختان سریع‌الرشد غرب استان گیلان (پیش‌حصار فومن) شناخته می‌شود. کاربری‌های مورد بررسی شامل جنگل طبیعی، باغ چای و شالیزار بود و هر سه کاربری در یک منطقه و در مجاورت یکدیگر قرار داشتند (شکل ۱). این کاربری‌ها از نظر اقلیم، توپوگرافی، بافت خاک، جهت و درجه شیب تقریباً مشابه بوده اما از لحاظ پوشش گیاهی و مدیریت زمین با یکدیگر تفاوت دارند. بر اساس اطلاعات موجود، تغییر کاربری از عرصه‌های ملی و دارای گونه‌های بومی به کاربری‌های باغ چای و شالیزار بیش از ۵۰ سال پیش صورت گرفته است. منطقه مورد مطالعه جزو اراضی جلگه‌ای شمال کشور بوده و از نظر توپوگرافی بدون شیب است و به‌طور متوسط در ارتفاع ۱۰ متر از سطح دریا قرار دارد. بر مبنای داده‌های ایستگاه‌های تبخیرسنجی شرکت آب منطقه‌ای استان گیلان، این منطقه دارای میانگین رطوبت نسبی ۸۵ درصد، بارندگی سالانه ۱۲۵۲/۱۲ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۷/۵ درجه سلسیوس است. بیشینه و کمینه دمای ثبت‌شده به‌ترتیب ۲۲/۵ و ۱۲/۵ درجه سلسیوس گزارش شده است. تعداد روزهای بارانی سالانه در حدود ۱۰۵ روز و روزهای یخبندان بین ۲ تا ۳ روز می‌باشد. وسعت کل منطقه مطالعاتی حدود ۲۰ هکتار است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی استان گیلان، ایران

به‌منظور بررسی تأثیر تغییر کاربری و عمق خاک بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی، در هر کاربری سه تکرار در نظر گرفته شد. در هر تکرار، با حفر پروفیل خاک، نمونه‌برداری از پنج عمق ۰-۲۰، ۲۰-۴۰، ۴۰-۶۰، ۶۰-۸۰ و ۸۰-۱۰۰ سانتی‌متر به‌صورت جداگانه انجام گرفت. نمونه‌های برداشت‌شده از عمق‌های مشابه با یکدیگر مخلوط و برای هر عمق یک نمونه مرکب تهیه گردید. بدین ترتیب، با در نظر گرفتن سه کاربری، پنج عمق و سه تکرار، در مجموع ۴۵ نمونه مرکب خاک تهیه گردید. نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه به دو بخش تقسیم شدند. بخش نخست پس از خشک شدن در هوای آزاد و عبور از الک دو میلی‌متر برای سنجش ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مورد استفاده قرار گرفت و بخش دوم در دمای ۴ درجه سلسیوس برای اندازه‌گیری ویژگی‌های زیستی و فعالیت آنزیمی نگه‌داری شد.

ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده در خاک

در این پژوهش، مجموعه‌ای از شاخص‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک اندازه‌گیری شد تا تأثیر تغییر کاربری و عمق بر کیفیت خاک به‌صورت جامع ارزیابی گردد. پایداری خاک‌دانه‌ها با استفاده از روش الک‌تر (Angers et al., 2008)، میزان کربن آلی خاک بر اساس روش Walkley & Black (1934) و فسفر قابل‌جذب با استفاده از روش Bray-1 که مناسب خاک‌های اسیدی و فاقد آهک است (Bray & Kurtz, 1945) اندازه‌گیری شدند. همچنین، واکنش خاک (pH) در گل اشباع طبق دستورالعمل Carter & Gregorich (2008) و مقدار گلومالین کل به روش Bradford (1976) مورد سنجش قرار گرفت.

برای ارزیابی شاخص‌های زیستی، کربن زیست‌توده میکروبی (MBC) با استفاده از روش تدخین–استخراج (Vance et al., 1987) اندازه‌گیری شد و ضریب متابولیک میکروبی (qCO_2) به‌عنوان شاخص کارایی متابولیک میکروارگانیسم‌ها و بیانگر میزان دی‌اکسیدکربن تولیدشده به ازای هر واحد زی‌توده در واحد زمان محاسبه گردید (Soman et al.,2006). علاوه بر این، کربن معدنی‌شده یا تنفس خاک از طریق سنجش دی‌اکسیدکربن حاصل از تنفس میکروبی با روش تیتراسیون برگشتی سود با اسید کلریدریک در طول ۱۶ هفته تعیین شد (Anderson, 1982).

به‌منظور بررسی پویایی زیستی خاک، فعالیت چند آنزیم کلیدی شامل دهیدروژناز (R.Ohlinger& Von Mersi, 2012)، سلولاز (Von Mersi & Schinner, 2012) و فسفاتازهای اسیدی و قلیایی (Margesin, 2012) اندازه‌گیری گردید. این آنزیم‌ها به‌ترتیب به‌عنوان شاخص‌هایی از فعالیت کلی میکروبی، تجزیه مواد آلی و چرخه فسفر در خاک شناخته می‌شوند و نقش مهمی در ارزیابی وضعیت زیستی خاک دارند

محاسبه شاخص حساسیت (SI)

برای ارزیابی تغییرات نسبی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در اثر تغییر کاربری، از شاخص حساسیت (SI) استفاده شد که بر اساس رابطه زیر محاسبه گردید (Mgango et al., 2016).

$$SI = [\frac{QI_N - QI_A}{QI_N}] \times 100$$ رابطه ۱)

در رابطه ۱، SI: درصد شاخص حساسیت، QI_N: مقدار مشخصه‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی اندازه‌گیری شده در اراضی جنگلی، QI_A: مقدار همان مشخصه‌ها در اراضی تغییر کاربری یافته هستند. این شاخص برای بررسی تأثیر تغییر کاربری زمین بر کیفیت خاک استفاده می‌شود. مقادیر منفی SI، نشان دهنده افزایش مقدار شاخص در کاربری جدید نسبت به جنگل بوده و مقادیر مثبت SI، نیز نشان دهنده کاهش آن شاخص نسبت به جنگل می‌باشد.

تجزیه آماری داده‌ها

داده‌های به‌دست‌آمده از این مطالعه به کمک نرم‌افزار آماری SAS 9.4 به‌صورت یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت. به‌منظور بررسی سطوح معنی‌داری یا عدم معنی‌داری مقادیر شاخص‌های اندازه‌گیری شده فیزیکی و شیمیایی خاک در ارتباط با کاربری و عمق مورد مطالعه از تجزیه واریانس دوطرفه استفاده شد. هم‌چنین برای مقایسه میانگین‌های مشخصه‌ها آزمون چند دامنه‌ای دانکن (سطح آماری ۱ و ۵ درصد) به کار گرفته شد. رسم نمودارها نیز به کمک نرم‌افزار Excel صورت پذیرفت.

یافته‌های پژوهش

نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه واریانس دوطرفه نشان داد که اثر نوع کاربری، عمق خاک و اثر متقابل آن‌ها بر شاخص‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در سطح احتمال ۱ درصد ($p < 0.01$) معنی‌دار بود. این موضوع نشان می‌دهد که پاسخ خاک به تغییر کاربری در عمق‌های مختلف یکنواخت نبوده و شدت واکنش متغیرهای خاک به تغییر کاربری در سطوح مختلف عمق متفاوت می‌باشد (جدول‌های ۱ و ۲).

جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای آزمایشی بر ویژگی‌های زیستی و آنزیمی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		Cmin	qCO_2	MBC	DHA
بلوک	۲	۱۴۷۲/۶۹^{ns}	۳۳/۱۶ ^{ns}	۷۷۰/۹۲ ^{ns}	۸/۶۳^{ns}
کاربری	۲	۱۵۹۶۴/۲۹**	۱۴۶۲۰/۹۵**	۶۶۴۵۹۱/۳۹**	۱۳۵۲/۱۵**
عمق	۴	۴۲۶۶۱۱/۷**	۵۱۸۱/۳۷**	۱۱۱۲۲۸۹/۸۹**	۱۸۳/۷۶**
کاربری × عمق	۸	۱۲۶۰۳۳/۳۳**	۴۰۱۳/۸۶**	۴۳۴۹۴۷/۰۵**	۳۷۵/۶۶**
اشتباه	۲۸	۱۲۶۸/۷۶	۳۲/۸۸	۱۶۵۶/۵۹	۵/۹۱
درصد ضریب تغییرات	–	۳/۱۸	۹/۰۷	۸/۰۷	۱۳/۲۵

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		CEL	ACP	ALP
بلوک	۲	۲۵/ ۸ ^{ns}	۱/۷۴^{ns}	۲۳/۰۸^{ns}
کاربری	۲	۴۱۴/۶**	۱۰۷/۲**	۷۱۲/۸۸**
عمق	۴	۲۱۸۱۸/۳۵**	۲۸۱/۲**	۵۵۹۰/۹۴**
کاربری× عمق	۸	۵۸۶/۹۹**	۹۹/۴۶**	۱۷۹۸/۳۸**
اشتباه	۲۸	۴/۸۴	۲/۴۴	۳۰/۰۴
درصد ضریب تغییرات	–	۸/۰۹	۹/۸۶	۶/۳۸

** و * به ترتیب در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد معنی‌دار و ^{ns} عدم اختلاف معنی‌دار است.

Cmin (تنفس تجمعی میکروبی)[1]؛ MBC (کربن زیست‌توده میکروبی)[2]؛ DHA (فعالیت دهیدروژناز)[3]؛ ACP (فعالیت فسفاتاز اسیدی)[4]؛ ALP (فعالیت فسفاتاز قلیایی)[5]؛ CEL (فعالیت سلولاز)[6]؛ qCO_2 (کسر متابولیکی)[7]

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای آزمایشی بر ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		SOC	P-avail	T-GRSP	pH	MWD
بلوک	۲	۰/ ۸^{ns}	۱/ ۰۹^{ns}	۵/۴۲**	۰/ ۰۱^{ns}	۰/ ۰۲*
کاربری	۲	۲۷۹/۹۶**	۴۸۷۶/۹۴**	۴۹/۳۲**	۲۱/۱۴**	۰/۵۵**
عمق	۴	۸۰۱/۲۶**	۸۱/۰۷**	۹۶/۳۴**	۰/۲۳**	۲/۸۲**
کاربری× عمق	۸	۲۷۶/۳۲**	۸۰۰/۱۶**	۳۷/۲۸**	۳/۱۴**	۰/۹۹**
اشتباه	۲۸	۳/۴۲	۱/۰۹	۰/۱	۰/۰۱	۰/۰۰۵
درصد ضریب تغییرات	–	۱۱/۳۸	۴/۸۱	۶/۵۳	۱/۸۳	۹/۱۸

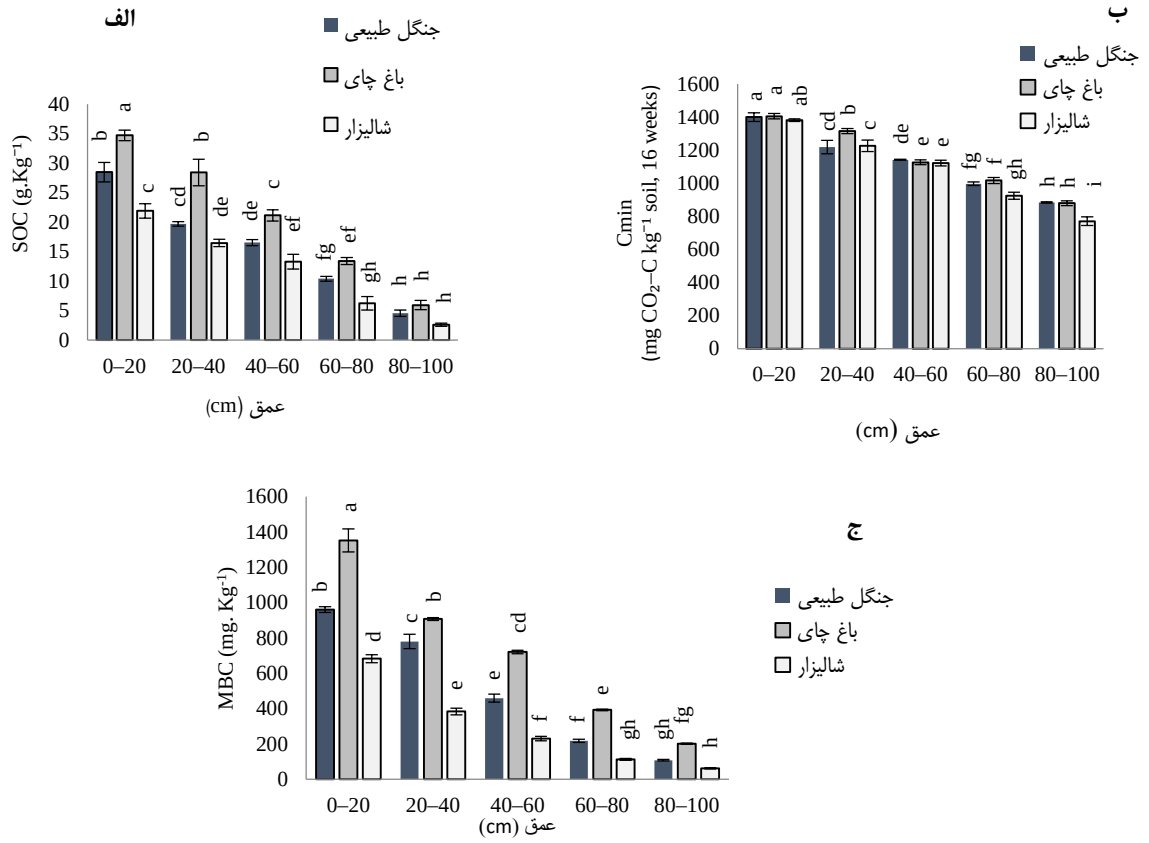
** و * به ترتیب در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد معنی‌دار و ^{ns} عدم اختلاف معنی‌دار است.

SOC (کربن آلی خاک)[8]؛ P-avail (فسفر قابل جذب خاک)[9]؛ T-GRSP (گلومالین کل)[10]؛ MWD (میانگین وزنی قطر خاکدانه)[11]

1. Cumulative Microbial Respiration
2. Microbial Biomass Carbon
3. Dehydrogenase Activity
4. Acid Phosphatase
5. Alkaline Phosphatase Activity
6. Cellulase Activity
7. Metabolic Quotient
8. Soil Organic Carbon
9. Available Phosphorus
10. Total Glomalin Related Soil Protein
11. Mean Weight Diameter

کربن آلی خاک و فعالیت میکروبی پایه

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، کربن آلی خاک (SOC)، زیست‌توده میکروبی (MBC) و تنفس میکروبی (Cmin) به‌طور معنی‌داری ($p < 0.01$) تحت تأثیر نوع کاربری و عمق خاک قرار گرفتند. بر اساس شکل ۱ (الف، ب و ج)، مقدار این شاخص‌ها در کاربری باغ چای بیش‌تر از جنگل طبیعی و شالیزار بود، در حالی‌که شالیزار در اغلب عمق‌ها کم‌ترین مقادیر را نشان داد. در لایه سطحی (۲۰–۰ سانتی‌متر)، SOC در باغ چای برابر با ۳۴/۷۳ گرم بر کیلوگرم، MBC حدود ۱۳۵۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم و تنفس میکروبی ۱۴۰۶ اندازه‌گیری شد که به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از سایر کاربری‌ها بود. با افزایش عمق، هر سه شاخص به‌طور قابل توجهی کاهش یافتند و در عمق ۱۰۰–۸۰ سانتی‌متر به کم‌ترین میزان خود رسیدند. روند کاهشی SOC و MBC نسبت به عمق در هر سه کاربری به‌مراتب شدیدتر از Cmin بود که بیانگر وابستگی بیش‌تر شاخص‌های زیستی به ورود مواد آلی به خاک سطحی است. در میان کاربری‌ها، شدت کاهش در شالیزار بیش‌تر بود و الگوی کربن و زیست‌توده میکروبی در آن ناپایدارتر از دو کاربری دیگر بود. در مقابل، باغ چای با وجود کاهش عمقی، مقادیر بالاتری را در کل پروفیل خاک حفظ کرد که این امر بیانگر نقش ورود مداوم بقایای آلی به خاک و پوشش دائمی گیاه در پایداری کربن و فعالیت میکروبی این کاربری است.

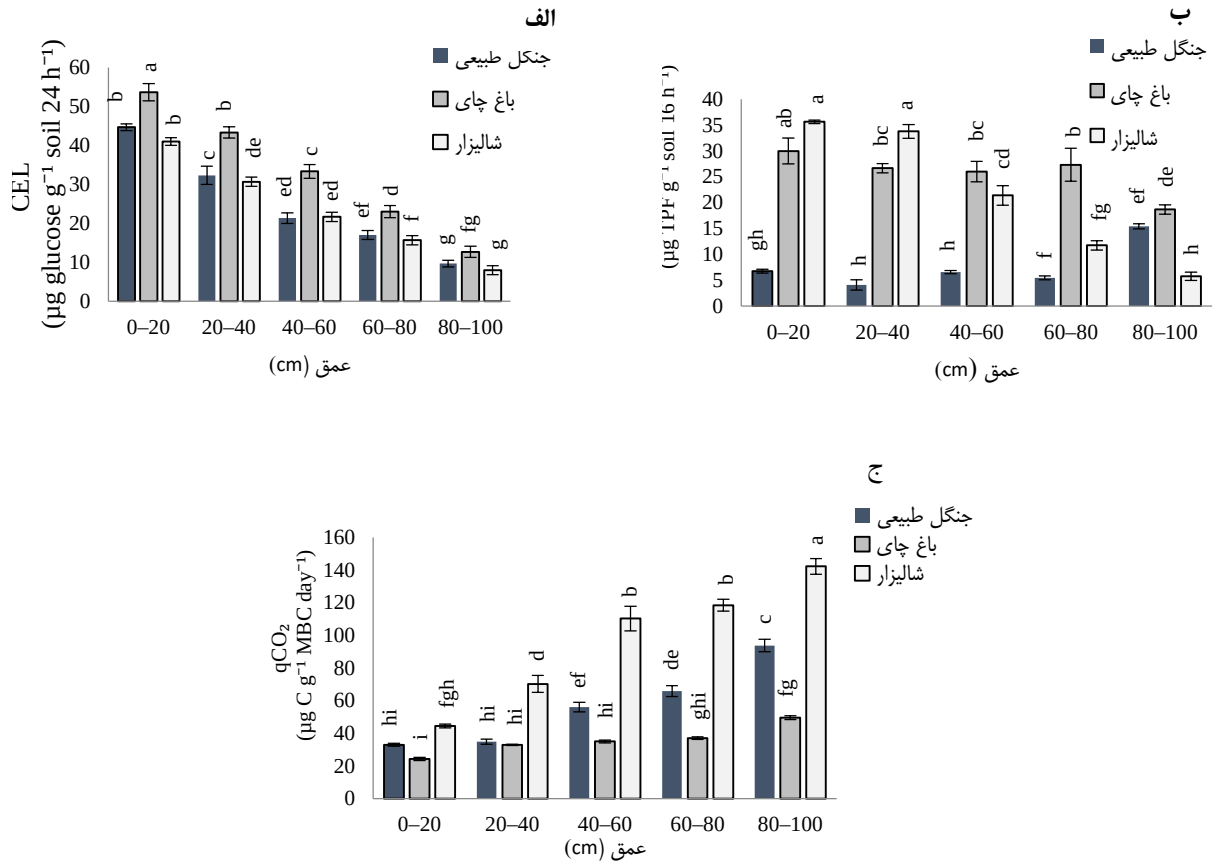


شکل ۱. مقایسه میانگین اثر متقابل نوع کاربری (جنگل طبیعی، باغ چای و شالیزار) و عمق خاک (۲۰–۰، ۴۰–۲۰، ۶۰–۴۰، ۸۰–۶۰ و ۱۰۰–۸۰ سانتی‌متر) (n=3)، بر مقادیر کربن آلی خاک (SOC)، تنفس تجمعی میکروبی (Cmin) و کربن زیست‌توده میکروبی (MBC). حروف متفاوت در بالای ستون‌ها نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال یک درصد و خطوط عمودی بیانگر مقادیر خطای استاندارد می‌باشند.

کیفیت و کارایی فعالیت‌های میکروبی

نتایج نشان داد فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز (DHA) و سلولاز (CEL) و شاخص کسر متابولیکی (qCO_2) به‌طور معنی‌داری ($p < 0.01$) تحت تأثیر نوع کاربری و عمق خاک قرار گرفتند. همان‌گونه که در شکل ۲ (الف) مشاهده می‌شود، بیش‌ترین مقدار فعالیت سلولاز در عمق ۲۰–۰ سانتی‌متری کاربری باغ چای (۵۳/۶۷ میکروگرم گلوکز بر گرم خاک در ۲۴ ساعت) و کم‌ترین در عمق ۱۰۰–۸۰ سانتی‌متری کاربری شالیزار (۸ میکروگرم گلوکز بر گرم خاک در ۲۴ ساعت) اندازه‌گیری شد. در تمام کاربری‌ها، فعالیت سلولاز با افزایش عمق کاهش

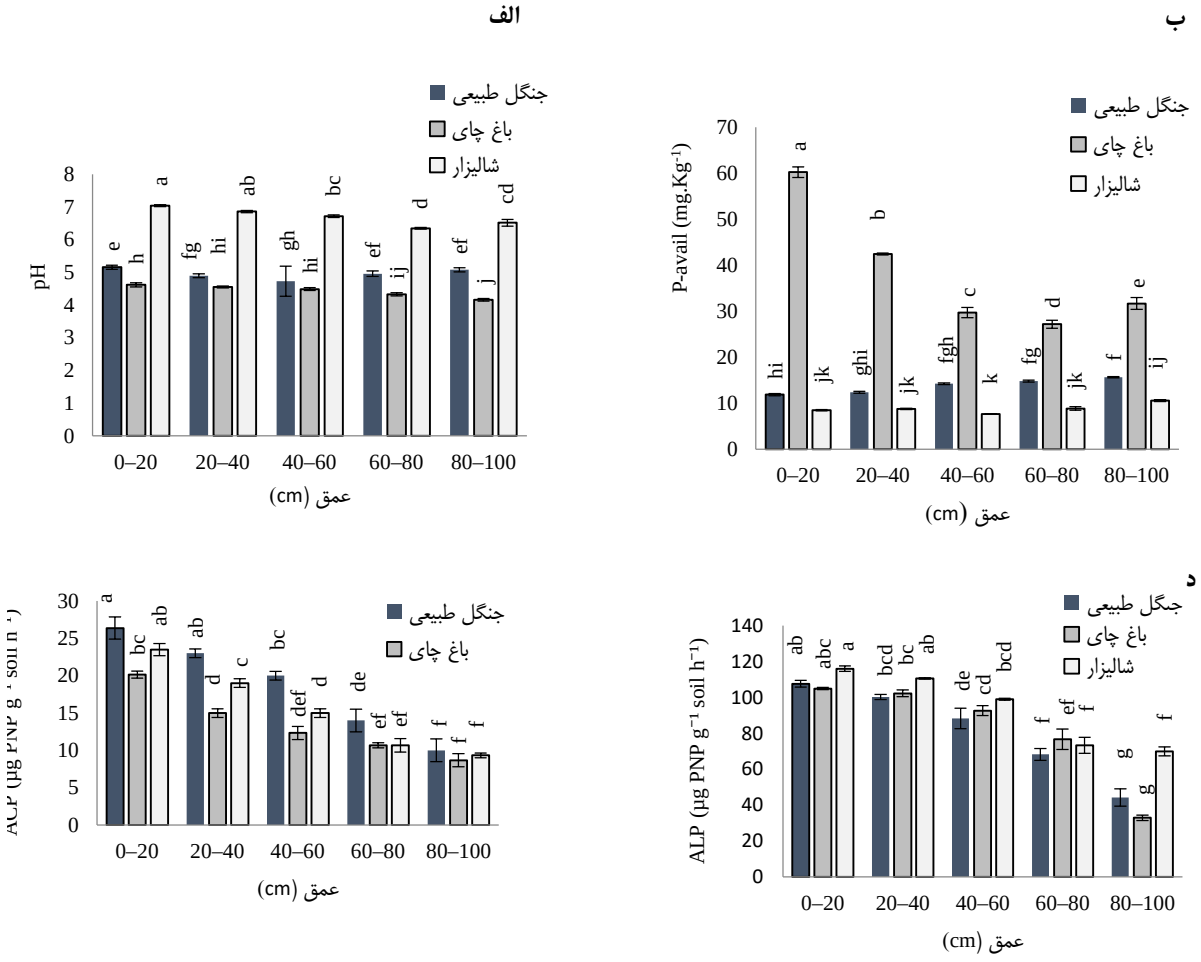
یافت. فعالیت دهیدروژناز در لایه سطحی کاربری شالیزار بیش‌ترین (۳۵/۶۷ میکروگرم TPF بر گرم خاک در ۱۶ ساعت) و در عمق ۴۰–۲۰ سانتی‌متری جنگل طبیعی کم‌ترین مقدار (۴/۰۷ میکروگرم TPF بر گرم خاک در ۱۶ ساعت) را داشت (شکل ۲-ب). شاخص کسر متابولیکی (qCO_2) نیز در کاربری شالیزار و عمق ۱۰۰–۸۰ سانتی‌متری بیش‌ترین (۱۴۲/۲۳ میکروگرم C بر گرم MBC در روز) و در عمق ۲۰–۰ سانتی‌متری باغ چای کم‌ترین مقدار (۲۴/۲۶ میکروگرم C بر گرم MBC در روز) را داشت و در این کاربری با افزایش عمق روندی افزایشی نشان داد (شکل ۲-ج). در مجموع، کاربری باغ چای بالاترین فعالیت آنزیمی و کارایی میکروبی را داشت، در حالی‌که شالیزار بیش‌ترین شدت متابولیسم میکروبی را نشان داد.



شکل ۲. مقایسه میانگین اثر متقابل نوع کاربری (جنگل طبیعی، باغ چای و شالیزار) و عمق خاک (۲۰–۰، ۴۰–۲۰، ۶۰–۴۰، ۸۰–۶۰ و ۱۰۰–۸۰ سانتی‌متر) (n=3)، بر مقادیر فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز (DHA) و سلولاز (CEL) و شاخص کسر متابولیکی (qCO_2). حروف متفاوت در بالای ستون‌ها نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال یک درصد و خطوط عمودی بیانگر مقادیر خطای استاندارد می‌باشند.

چرخه فسفر و فعالیت آنزیم‌های فسفاتازی خاک

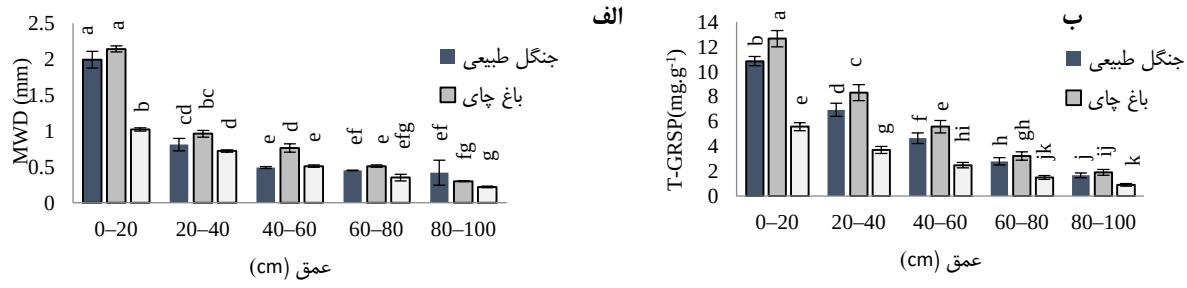
بررسی‌ها نشان داد که pH، فسفر قابل‌جذب (P-available) و فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی (ACP) و فسفاتاز قلیایی (ALP) به‌طور معنی‌داری ($p < 0.01$) تحت تأثیر نوع کاربری و عمق خاک قرار گرفتند. مقدار pH در کاربری شالیزار بیش‌ترین (۷/۰۴ در لایه ۲۰–۰ سانتی‌متر) و در باغ چای کم‌ترین (۴/۱۶ در لایه ۱۰۰–۸۰ سانتی‌متر) مقدار را نشان داد (شکل ۳-الف). بیش‌ترین مقدار فسفر قابل‌جذب با میانگین ۶۰/۲۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک در عمق ۲۰–۰ سانتی‌متری باغ چای و کم‌ترین مقدار آن با میانگین ۷/۶۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک در عمق ۶۰–۴۰ سانتی‌متری کاربری شالیزار اندازه‌گیری شد (شکل ۳-ب). فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی در لایه سطحی جنگل طبیعی بیش‌ترین مقدار (۲۶/۳۷ میکروگرم PNP بر گرم خاک در ساعت) و در عمق ۱۰۰–۸۰ سانتی‌متری شالیزار (۸/۶۷ میکروگرم PNP بر گرم خاک در ساعت) کم‌ترین مقدار را داشت و با افزایش عمق در تمامی کاربری‌ها روندی کاهشی نشان داد (شکل ۳-ج). در مقابل، فعالیت فسفاتاز قلیایی در کاربری شالیزار و عمق ۲۰–۰ سانتی‌متری بیش‌ترین مقدار (۱۱۶/۰۳ میکروگرم PNP بر گرم خاک در ساعت) را داشت و با عمق روندی کاهشی نشان داد، به‌طوری‌که در عمق ۱۰۰–۸۰ سانتی‌متری باغ چای کم‌ترین مقدار آن (۳۳ میکروگرم PNP بر گرم خاک در ساعت) اندازه‌گیری شد (شکل ۳-د).



شکل ۳. مقایسه میانگین اثر متقابل نوع کاربری (جنگل طبیعی، باغ چای و شالیزار) و عمق خاک (۲۰–۰، ۴۰–۲۰، ۶۰–۴۰، ۸۰–۶۰ و ۱۰۰–۸۰ سانتی‌متر) (n=3)، بر مقادیر pH، فسفر قابل‌جذب (P-available) و فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی (ACP) و فسفاتاز قلیایی (ALP). حروف متفاوت در بالای ستون‌ها نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال یک درصد و خطوط عمودی بیانگر مقادیر خطای استاندارد می‌باشند.

پایداری ساختاری خاک و گلومالین کل

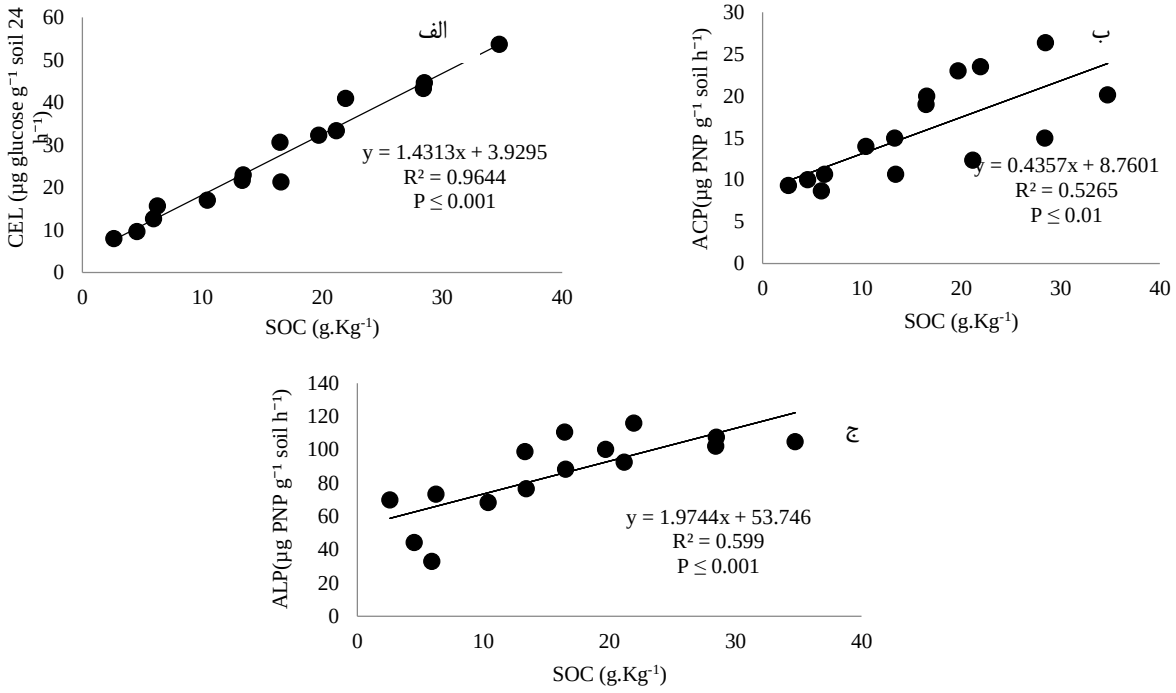
میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها (MWD) و گلومالین کل (T-GRSP) نیز به‌طور معنی‌داری ($p < 0.01$) تحت تأثیر اثر متقابل نوع کاربری و عمق خاک قرار گرفتند. بیش‌ترین مقدار MWD در عمق ۲۰–۰ سانتی‌متری باغ چای (۲/۱۴ میلی‌متر) و کم‌ترین مقدار آن در عمق ۱۰۰–۸۰ سانتی‌متری شالیزار (۰/۲۲ میلی‌متر) اندازه‌گیری شد. با افزایش عمق، مقدار MWD در همه کاربری‌ها کاهش یافت و در عمق ۱۰۰–۸۰ سانتی‌متری به کم‌تر از ۰/۵ میلی‌متر رسید (شکل ۴-الف). میزان گلومالین کل نیز روند مشابهی داشت؛ به‌گونه‌ای که در لایه سطحی باغ چای به بیش‌ترین مقدار (۱۲/۶۶ میلی‌گرم بر گرم خاک) و در عمق ۱۰۰–۸۰ سانتی‌متری شالیزار به کم‌ترین مقدار (۰/۹ میلی‌گرم بر گرم خاک) مشاهده شد (شکل ۴-ب).



شکل ۴. مقایسه میانگین اثر متقابل نوع کاربری (جنگل طبیعی، باغ چای و شالیزار) و عمق خاک (۲۰–۰، ۴۰–۲۰، ۶۰–۴۰، ۸۰–۶۰ و ۱۰۰–۸۰ سانتی‌متر) (n=3)، بر مقادیر میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها (MWD) و گلومالین کل (T-GRSP). حروف متفاوت در بالای ستون‌ها نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال یک درصد و خطوط عمودی بیانگر مقادیر خطای استاندارد می‌باشند.

نتایج تجزیه و تحلیل رگرسیونی شاخص‌های اندازه‌گیری شده

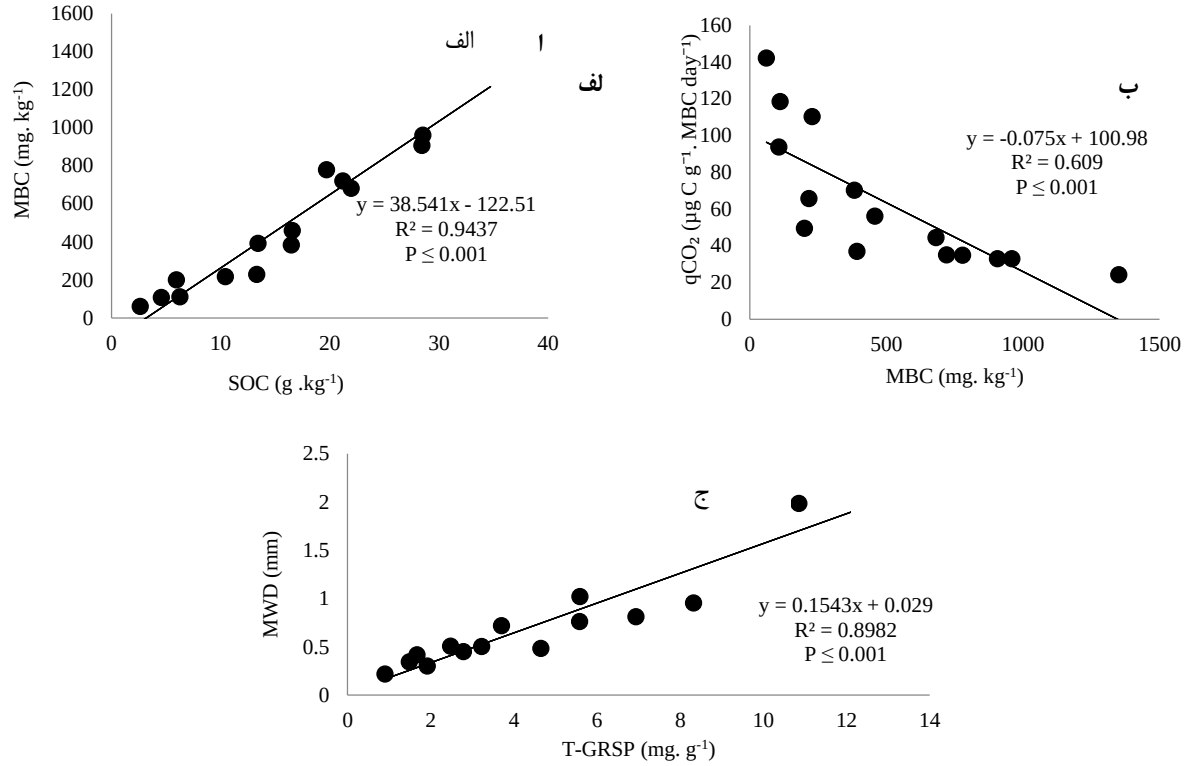
به‌منظور انجام تحلیل رگرسیونی و بررسی روابط بین متغیرها، از میانگین سه تکرار هر کاربری در هر عمق استفاده گردید. نتایج حاصل از تحلیل رگرسیونی خطی بین کربن آلی خاک (SOC) و فعالیت آنزیم‌های مختلف خاک نشان داد که روابط مثبت و معنی‌داری میان SOC و فعالیت آنزیم‌های سلولاز، فسفاتاز اسیدی و فسفاتاز قلیایی وجود دارد (شکل ۵). ضریب تعیین بین SOC و فعالیت آنزیم سلولاز برابر با ۰/۹۶ بود که نشان‌دهنده همبستگی بسیار قوی میان این دو متغیر است. برای آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و فسفاتاز قلیایی به‌ترتیب ضرایب تعیین ۰/۵۳ و ۰/۶ به‌دست آمد که بیانگر آن است افزایش کربن آلی، فعالیت این آنزیم‌ها را نیز به‌طور معنی‌داری افزایش می‌دهد. در مقابل، رابطه میان SOC و فعالیت آنزیم دهیدروژناز از نظر آماری معنی‌دار نبود، که نشان می‌دهد تغییرات فعالیت دهیدروژناز الزاماً تابع مستقیم میزان کربن آلی نمی‌باشد.



شکل ۵. رابطه بین کربن آلی خاک و فعالیت آنزیم‌های مختلف در خاک‌های منطقه مورد مطالعه

نتایج تحلیل رگرسیونی بین غلظت کربن آلی خاک و زیست‌توده میکروبی نیز وجود رابطه‌ای مثبت و بسیار معنی‌دار را نشان داد (شکل ۶-الف). با افزایش مقدار کربن آلی، میزان زیست‌توده میکروبی به‌طور قابل توجهی افزایش یافت که این موضوع بیانگر وابستگی شدید جوامع میکروبی خاک به منابع کربنی قابل تجزیه است. در مقابل، بین زیست‌توده میکروبی و شاخص کسر متابولیکی رابطه‌ای منفی و معنی‌دار مشاهده شد (شکل ۶-ب). کاهش مقادیر qCO_2 همزمان با افزایش MBC نشان می‌دهد که در خاک‌هایی با زیست‌توده میکروبی بالاتر، کارایی متابولیکی میکروارگانیسم‌ها بیش‌تر بوده و انرژی کم‌تری برای حفظ متابولیسم پایه صرف می‌شود.

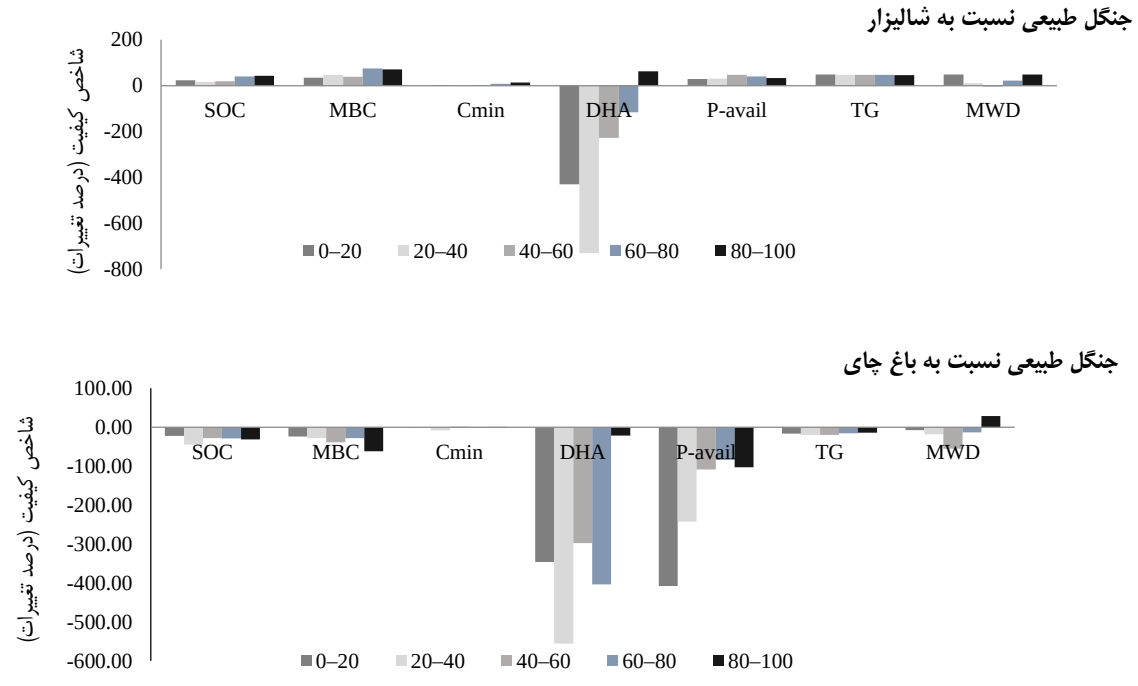
علاوه بر این، رابطه میان گلومالین کل (T-GRSP) و میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها (MWD) نیز مثبت و بسیار معنی‌دار بود (شکل ۶-ج). این همبستگی قوی نشان‌دهنده نقش تعیین‌کننده ترکیبات گلومالینی در پایداری فیزیکی خاک، انسجام خاک‌دانه‌ها و تشکیل ساختارهای پایدار در کاربری‌های مختلف است. به‌طور کلی، نتایج تحلیل‌های رگرسیونی بیانگر آن است که افزایش کربن آلی خاک از طریق ارتقای فعالیت‌های میکروبی و افزایش سنتز ترکیبات پلیمری مانند گلومالین، موجب بهبود پایداری ساختاری و زیستی خاک در اکوسیستم‌های مختلف منطقه فومن می‌شود.



شکل ۶. رابطه بین برخی از شاخص‌های اندازه گیری شده در خاک‌های منطقه مورد مطالعه

شاخص حساسیت

بررسی شاخص حساسیت (SI) نشان داد که پاسخ ویژگی‌های زیستی، شیمیایی و فیزیکی خاک به تغییر کاربری زمین متفاوت است. در نتیجه تبدیل جنگل طبیعی به شالیزار، بیش‌تر شاخص‌ها از جمله کربن آلی خاک (SOC)، زیست‌توده میکروبی (MBC)، گلومالین کل (T-GRSP) و میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها (MWD) دارای مقادیر مثبت SI بودند، که نشان‌دهنده کاهش این ویژگی‌ها در شالیزار است. این کاهش احتمالاً ناشی از شرایط غرقابی، کاهش اکسیژن و محدود شدن فعالیت‌های میکروبی و فرآیندهای تثبیت مواد آلی می‌باشد. در مقابل، فعالیت آنزیم دهیدروژناز (DHA) افزایش قابل‌توجهی نشان داد (SI=٪-۷۰۰) که می‌تواند ناشی از نقش این آنزیم در مسیرهای احیایی و افزایش فعالیت آن در محیط‌های بی‌هوازی شالیزار باشد.



شکل ۷. شاخص حساسیت ویژگی‌های زیستی، شیمیایی و فیزیکی اندازه‌گیری شده در کل پروفیل خاک جنگل طبیعی در مقایسه با شالیزار و باغ چای.

در تبدیل جنگل طبیعی به باغ چای، مقادیر SI برای تمامی شاخص‌های مورد مقایسه منفی بود؛ به این معنا که مقادیر این ویژگی‌ها در باغ چای بالاتر از جنگل بودند. به نظر می‌رسد مدیریت منظم، ورود مستمر مواد آلی ناشی از ریزش برگ‌ها و بقایای چای به خاک و عدم بهم زدن مداوم خاک، شرایط مطلوب‌تری برای تجمع کربن و افزایش فعالیت میکروبی فراهم کرده است. به‌طور کلی، آنزیم دهیدروژناز (DHA) بیش‌ترین حساسیت را نسبت به تغییر کاربری نشان داد، در حالی‌که شاخص‌های ساختاری مانند پایداری خاک‌دانه‌ها (MWD) کم‌ترین حساسیت را داشتند. این نتایج بیانگر آن است که شاخص‌های زیستی، به‌ویژه آنزیم‌های خاک، نسبت به تغییرات کاربری و عمق خاک پاسخ سریع‌تری دارند و می‌توانند به‌عنوان نشانگرهای مؤثر در ارزیابی کیفیت و پایداری خاک مورد استفاده قرار گیرند.

نتایج ضرایب همبستگی پیرسون (جدول ۳) نیز نشان داد که میان بیش‌تر ویژگی‌های زیستی، شیمیایی و فیزیکی خاک روابط مثبت و معنی‌داری وجود دارد. کربن آلی خاک (SOC) همبستگی مثبت و بسیار قوی با زیست‌توده میکروبی (r= 0.95; P<0.01) و گلومالین کل (r= 0.94; P<0.01) داشت که بیانگر نقش مستقیم مواد آلی در تحریک رشد میکروارگانیسم‌ها و بهبود پایداری ساختاری خاک است. فعالیت آنزیم سلولاز (CEL) نیز با SOC همبستگی مثبت و معنی‌دار (r= 0.96; P<0.01) نشان داد که نشان‌دهنده ارتباط نزدیک بین چرخه کربن و فرآیندهای آنزیمی است. در مقابل، شاخص کسر متابولیکی (qCO_2) با SOC (r= -0.74; P<0.01) و MBC (r= -0.78; P<0.01) روابط منفی معنی‌داری داشت که بیانگر کارایی بالاتر میکروبی در خاک‌های دارای کربن بیش‌تر است. همچنین، بین گلومالین کل (T-GRSP) و پایداری خاک‌دانه‌ها (MWD) رابطه‌ای مثبت و (r= 0.92; P<0.01) مشاهده شد که اهمیت ترکیبات پلیمری میکروبی در بهبود ساختار و پایداری فیزیکی خاک را تأیید می‌کند.

جدول ۳. ضریب همبستگی پیرسون (r) بین برخی از ویژگی‌های زیستی، فیزیکی و شیمیایی خاک در لایه ۱۰۰-۰ سانتی‌متر و کاربری‌های مورد مطالعه

	C_{min}	MBC	SOC	T-GRSP	pH	P-avail	DHA	ACP	ALP	CEL	qCO_2	MWD
C_{min}	۱/۰۰											
MBC	۰/۸۶**	۱/۰۰										
SOC	۰/۹۲**	۰/۹۵**	۱/۰۰									
T-GRSP	۰/۸۴**	۰/۹۶**	۰/۹۴**	۱/۰۰								
pH	۰/۰۰۴ns	−۰/۳۲*	−۰/۲۲ns	−۰/۳۱*	۱/۰۰							
P-avail	۰/۲۳ns	۰/۵۸**	۰/۵**	۰/۵**	−۰/۶۸**	۱/۰۰						
DHA	۰/۴**	۰/۳۱**	۰/۳۷*	۰/۱۹ns	۰/۱۶ns	۰/۴۲**	۱/۰۰					
ACP	۰/۸۲**	۰/۶۶**	۰/۶۹**	۰/۶۹**	۰/۱۵ns	−۰/۱۵ns	۰/۰۳ns	۱/۰۰				
ALP	۰/۸۳**	۰/۶۵**	۰/۷۵**	۰/۶۲**	۰/۳۴*	−۰/۰۰۶ns	۰/۳۵*	۰/۷۶**	۱/۰۰			
CEL	۰/۹۳**	/۹۴**	۰/۹۶**	۰/۹**	−۰/۱۱ns	۰/۴۵ **	۰/۴۵ **	۰/۷۱ **	۰/۷۸**	۱/۰۰		
qCO_2	−۰/۶۷**	−۰/۷۸**	−۰/۷۴**	−۰/۷۲**	۰/۶۱**	−۰/۵۸**	−۰/۳۱*	−۰/۵**	−۰/۳۶*	−۰/۷۲**	۱/۰۰	
MWD	۰/۸۱**	۰/۸۹**	۰/۸۶**	۰/۹۲**	−۰/۱۵ns	۰/۴۱**	۰/۲۳ns	۰/۶۹**	۰/۶**	۰/۸۸**	−۰/۶**	۱/۰۰

**** و * به ترتیب در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد معنی‌دار و ns عدم اختلاف معنی‌دار است.**

بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که تغییر کاربری جنگل طبیعی به باغ چای و شالیزار، تأثیر معنی‌داری بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در عمق‌های مختلف دارد. الگوهای مشاهده‌شده بیانگر آن است که نوع کاربری و عمق خاک به‌صورت توأم بر چرخه مواد آلی، فعالیت میکروبی و پایداری ساختار خاک اثرگذارند. در مجموع، باغ چای در اغلب شاخص‌های اندازه‌گیری‌شده عملکرد بهتری نسبت به جنگل و شالیزار داشت.

کربن آلی خاک (SOC) به‌عنوان منبع اصلی انرژی و بستر تغذیه‌ای میکروارگانیسم‌ها، از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت خاک و پایداری اکوسیستم‌ها محسوب می‌شود (Lal, 2020). بر اساس نتایج این پژوهش، مقدار SOC در باغ چای بیش‌تر از جنگل طبیعی و شالیزار بود. این امر احتمالاً ناشی از ورود مداوم بقایای آلی به خاک، حضور دائمی ریشه‌ها و اجرای خاک‌ورزی حداقلی در باغ چای است. سامانه‌های دائمی با پوشش گیاهی همیشگی و حضور دائمی ریشه و حداقل اختلال مکانیکی در خاک، معمولاً ظرفیت بالاتری برای انباشت کربن آلی فعال و نسبتاً پایدار دارند. این الگو در سامانه‌های چای‌کاری جنوب چین نیز گزارش شده است، به‌طوری‌که تبدیل جنگل نیمه‌طبیعی به باغ چای منجر به افزایش ذخیره کربن آلی و زیست‌توده میکروبی شده است (Gui et al., 2022). این همسویی

نشان می‌دهد که در شرایط مدیریتی مشابه، باغ‌های دائمی می‌توانند نه‌تنها ظرفیت نگهداشت کربن را حفظ کنند، بلکه در برخی لایه‌ها نسبت به جنگل اولیه نیز افزایش دهند. با این حال، مطالعات نشان داده‌اند که تغییر کاربری از جنگل به سایر کاربری‌ها لزوماً همواره با کاهش کربن آلی خاک همراه نیست و واکنش کربن آلی خاک به این تغییرات می‌تواند بسته به شرایط اقلیمی، شیوه‌های مدیریت خاک، سن سامانه‌ها و شدت اختلال یا بهره‌برداری متفاوت باشد؛ به‌گونه‌ای که در برخی موارد مقدار کربن آلی خاک ثابت مانده یا حتی افزایش یافته است (Post & Kwon, 2000; Lal, 2005). در این پژوهش، کاهش قابل‌توجه کربن آلی و زیست‌توده میکروبی و همچنین شدت تنفس میکروبی با افزایش عمق خاک مشاهده شد. این روند بازتابی از کاهش تدریجی مواد آلی تازه، بقایای ریشه‌ها و فعالیت‌های زیستی در لایه‌های زیرسطحی است که پیش‌تر نیز توسط Dove et al. (2021) گزارش شده است. در کاربری شالیزار، با وجود کاهش SOC، نرخ تنفس میکروبی در برخی عمق‌ها افزایش یافت؛ پدیده‌ای که معمولاً در خاک‌های غرقابی مشاهده می‌شود و ناشی از چرخه‌های اکسایش–احیا و کاهش کارایی متابولیکی میکروارگانیسم‌ها در شرایط بی‌هوازی است (Conrad, 2007; Kuzyakov & Blagodatskaya, 2015).

شاخص کسر متابولیکی (qCO_2) که نسبت تنفس میکروبی به زیست‌توده میکروبی را نشان می‌دهد، در کاربری شالیزار بیش‌تر از جنگل و باغ چای بود و با افزایش عمق نیز روندی افزایشی داشت. مقدار بالای qCO_2 به‌عنوان نشانه‌ای از کاهش کارایی متابولیکی میکروارگانیسم‌ها در شرایط تنش‌زا مانند محیط‌های بی‌هوازی یا دارای منابع محدود کربن شناخته می‌شود (Anderson & Domsch, 1990; Wardle & Ghani, 1995). در چنین شرایطی، بخش عمده‌ای از کربن مصرفی صرف نگه‌داری سلولی و بقاء می‌شود، نه سنتز زیست‌توده و در نتیجه بازده زیستی کاهش می‌یابد (Jia & Liu, 2017).

فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز (DHA) و سلولاز (CEL) نیز تحت تأثیر قابل‌توجه نوع کاربری قرار گرفت. بالاتر بودن فعالیت DHA در شالیزار نسبت به باغ چای و جنگل، با وجود SOC کم‌تر، احتمالاً به حضور میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی و فعالیت‌های احیایی مرتبط است. با این حال، رابطه معنی‌داری بین DHA و SOC در این مطالعه مشاهده نشد. این یافته با گزارش‌های پیشین سازگار است که نشان داده‌اند اغلب تولیدکنندگان DHA در شرایط کم‌اکسیژن فعالیت بالاتری دارند (Wolińska & Stępniewska, 2012). بر اساس مطالعات Brzezińska et al. (2001) و Wolińska & Bennicelli (2010)، بین فعالیت DHA و شاخص‌های تهویه خاک رابطه‌ای معکوس وجود دارد، به‌طوری‌که در لایه‌های زیرسطحی با تهویه محدود، فعالیت DHA می‌تواند افزایش یابد. در مقابل، فعالیت آنزیم سلولاز در کاربری باغ چای بیش‌ترین مقدار را داشت که بیانگر تجزیه مؤثر بقایای گیاهی و ورود مداوم مواد آلی است. این نتیجه با یافته‌های Wang et al. (2020) هم‌خوانی دارد که گزارش کردند در باغ‌های چای مسن‌تر، فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده سلولز افزایش یافته و نقش مهمی در پایداری کربن و بهبود ساختار خاک ایفا می‌کند.

واکنش خاک از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های شیمیایی آن است که بر فرآیندهای زیستی، قابلیت جذب عناصر غذایی و پایداری ترکیبات آلی تأثیر می‌گذارد. نتایج این پژوهش نشان داد که خاک باغ چای دارای pH پایین‌تری نسبت به جنگل و شالیزار است. اسیدی شدن خاک در باغ‌های چای پدیده‌ای شناخته‌شده بوده و عمدتاً به مصرف کودهای آمونیومی، ترشحات اسیدی ریشه‌ها و برداشت مداوم زی‌توده نسبت داده می‌شود (Ye et al., 2022). در مقابل، در شالیزارها شرایط غرقابی موجب کاهش پتانسیل اکسایش–احیا و تشکیل بی‌کربنات‌ها شده و در نتیجه خاک به سمت واکنش خنثی میل می‌کند (Sahrawat, 2012). از نظر فسفر قابل جذب، بیش‌ترین مقدار آن در باغ چای و کم‌ترین مقدار آن در شالیزار مشاهده شد. این تفاوت احتمالاً ناشی از کاربرد مداوم کودهای فسفاته در باغ چای و تثبیت فسفر در شرایط اشباع شالیزار است (Gui et al., 2022). هرچند در محیط‌های غرقابی ممکن است در مراحل اولیه احیا، فسفر از اکسیدهای آهن آزاد شود، اما در ادامه با بازتثبیت مجدد، غلظت فسفر قابل‌دسترس کاهش می‌یابد (Martinengo et al., 2023). با وجود بالاتر بودن کربن آلی در باغ چای، فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی در این کاربری پایین‌تر از جنگل بود؛ پدیده‌ای که می‌تواند ناشی از غلظت بالای فسفر معدنی در خاک باشد، زیرا در چنین شرایطی نیاز میکروارگانیسم‌ها به سنتز آنزیم‌های معدنی‌کننده فسفر کاهش (Allison & Vitousek, 2005; Razavi & Gupta, 2016). در مقابل، فعالیت فسفاتاز قلیایی (ALP) بیش‌تر تحت تأثیر pH قرار داشت؛ با افزایش pH، میزان ALP نیز افزایش یافت؛ بنابراین، در شالیزار با واکنش نزدیک به خنثی، فعالیت ALP بیش‌تر بود، در حالی‌که در جنگل با pH پایین‌تر، فعالیت این آنزیم کاهش یافت. این الگو با گزارش‌های پیشین هم‌خوانی دارد که بیان می‌کنند فسفاتاز قلیایی در خاک‌های قلیایی و فسفاتاز اسیدی در خاک‌های اسیدی فعال‌تر هستند (Tabatabai, 1994; Acosta-Martinez & Tabatabai, 2000).

نتایج مربوط به میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها (MWD) و میزان گلومالین کل (T-GRSP) نیز نشان داد که پایداری ساختاری خاک به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر کاربری قرار دارد. بیش‌ترین مقدار این دو شاخص در باغ چای و کم‌ترین مقدار آن‌ها در شالیزار مشاهده شد. گلومالین، گلیکوپروتئینی است که توسط قارچ‌های میکوریزی آربسکولار تولید می‌شود و نقش کلیدی در چسبندگی ذرات

خاک و پایداری فیزیکی آن دارد (Rillig, 2004) .در اکوسیستم‌های چندساله با پوشش دائمی گیاه و حداقل اختلال مکانیکی، به دلیل وجود شبکه ریشه‌ای فعال و ارتباط مستمر قارچ‌های میکوریزی، میزان گلومالین و پایداری خاک‌دانه‌ها افزایش می‌یابد (Borie et al., 2008). یافته‌های این پژوهش نیز این الگو را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که در باغ چای، پایداری ساختار خاک به واسطه ریشه‌های دائمی و ورود مستمر مواد آلی به خاک، افزایش یافته است، در حالی‌که در شالیزار، چرخه‌های متناوب غرقاب و خشک شدن و عملیات خاک‌ورزی منجر به تخریب ساختار خاک و کاهش گلومالین شده است. هر دو شاخص MWD و گلومالین با افزایش عمق کاهش یافتند، هرچند این روند در باغ چای ملایم‌تر بود (Dove et al., 2021).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تغییر کاربری اراضی از جنگل طبیعی به باغ چای و شالیزار، اثر چشمگیری بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در عمق‌های مختلف دارد. در میان کاربری‌ها، خاک باغ چای به‌دلیل وجود ریشه‌های دائمی، حداقل خاک‌ورزی و ورود مداوم مواد آلی، از نظر کربن آلی، زیست‌توده میکروبی، پایداری خاک‌دانه و محتوای گلومالین در وضعیت مطلوب‌تری قرار داشت. در مقابل، در شالیزار به‌رغم pH نزدیک به خنثی، چرخه‌های متناوب غرقاب و خشک شدن و اختلاط مکانیکی خاک موجب کاهش گلومالین، تخریب ساختار خاک‌دانه‌ها و افت شاخص‌های زیستی شد. فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز نیز به‌شدت تحت تأثیر وضعیت فسفر و pHقرار گرفت؛ به‌گونه‌ای که در باغ چای، علیرغم میزان بالای کربن آلی، فعالیت فسفاتاز اسیدی به دلیل فراوانی فسفر معدنی کاهش یافت، در حالی‌که در شالیزار با افزایشpH ، فعالیت فسفاتاز قلیایی در بالاترین سطح مشاهده شد. این نتایج نشان می‌دهد که پویایی ویژگی‌های زیستی خاک از جمله فعالیت آنزیمی و ترکیبات گلومالینی، به‌شدت وابسته به نوع کاربری، شرایط شیمیایی خاک و مدیریت زراعی است.

به‌طور کلی، یافته‌ها بیانگر آن است که تداوم فعالیت‌های کشاورزی بدون رعایت اصول حفاظتی می‌تواند موجب افت تدریجی کیفیت زیستی و ساختاری خاک شود. بر این اساس، در باغ‌های چای توصیه می‌شود مصرف کودهای فسفاته بر پایه آزمون خاک انجام گیرد و با افزودن مواد آلی و اصلاح‌کننده‌های آهکی از اسیدی‌شدن بیش از حد خاک جلوگیری شود. در شالیزارها نیز کاهش دفعات شخم، اجرای تناوب خشک–غرقاب و کشت متناوب با گیاهان غیرغرقابی می‌تواند موجب بهبود تهویه، افزایش پایداری خاک‌دانه‌ها و تقویت فعالیت آنزیم‌های مفید شود. به‌طور کلی، استفاده مستمر از منابع آلی، مدیریت بهینه تغذیه و پایش دوره‌ای شاخص‌های زیستی خاک، راه‌کارهایی کلیدی برای حفظ پایداری بلندمدت حاصل‌خیزی و سلامت اکوسیستم‌های خاکی در مناطق شمالی کشور محسوب می‌شوند.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه زنجان انجام شد.

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه زنجان، دانشکده کشاورزی در قالب پژوهانهٔ پایان‌نامه دانشجویی نویسنده اول و همچنین پژوهانهٔ برای نویسنده دوم انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: دانشجو: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله- نهایی سازی مقاله

نویسنده دوم: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

نویسنده سوم: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در تجزیه و تحلیل آماری داده ها

نویسنده چهارم: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در جمع آوری نمونه.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

از هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در نگارش این مقاله استفاده نشده است.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسنده مسئول قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از دانشگاه زنجان به خاطر فراهم کردن امکانات لازم برای انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

عزیزی‌مهر، میلاد؛ کوچ، یحیی و حسینی، سید محسن (۱۳۹۹). اثر شدت تخریب جنگل بر پویایی فعالیت‌های میکروبی و بیوشیمی خاک در بخش جلگه‌ای نوشهر. *مجله جنگل ایران*، ۱۲(۲)، ۱۷۵-۱۸۸.

کهنه، احسان؛ آزادی گنبد، رضا؛ سراجی، علی و شیرین‌فکر، احمد (۱۴۰۲). تأثیر کاشت طولانی‌مدت چای بر فراوانی اسپور قارچ‌های آربسکولار مایکوریزا و ارتباط آن با برخی خصوصیات خاک. *پژوهش در علوم باغبانی*، (۲)۲، ۲۷۷-۲۴۲.

وارسته خانلری، زهرا؛ گلچین، احمد و موسوی کوپر، سید عبدالله (۱۳۹۹). تأثیر تغییرکاربری و احیای اراضی تخریب شده روی برخی از ویژگی‌های کیفی و فعالیت تعدادی آنزیم در خاک. *تحقیقات آب و خاک ایران*، (۴)۵۱، ۱۰۵۵-۱۰۶۸.

REFERENCES

Acosta-Martínez, V., & Tabatabai, M. A. (2000). Enzyme activities in a limed agricultural soil. *Biology and Fertility of soils*, *31*(1), 85-91.

Allison, S. D., & Vitousek, P. M. (2005). Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs. *Soil Biology and Biochemistry*, *37*(5), 937-944.

Amundson, R., & Biardeau, L. (2018). Soil carbon sequestration is an elusive climate mitigation tool. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *115*(46), 11652-11656.

Anderson, J. P. (1982). Soil respiration. Methods of soil analysis: part 2 chemical and microbiological properties, 9, 831-871.

Anderson, T. H., & Domsch, K. H. (1990). Application of eco-physiological quotients (qCO2 and qD) on microbial biomasses from soils of different cropping histories. *Soil Biology and Biochemistry*, *22*(2), 251-255.

Angers, D. A., Bullock, M. S., & Mehuys, G. R. (2008). Aggregate stability to water. *Soil sampling and methods of analysis*, *2*, 811-819.

Azizi Mehr, M., Kooch, Y., & Hosseini, S.M. (2020). The effect of forest degradation intensity on the dynamics of soil microbial activities and biochemical in the plain region of Noshahr. *Iranian Journal of Forest*, 12(2), 175-188 *(In Persian)*.

Borie, F., Rubio, R., & Morales, A. (2008). Arbuscular mycorrhizal fungi and soil aggregation. In *segundo simposio internacional suelos, ecología y medioambiente universidad de la frontera (15)*.

Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical biochemistry*, *72*(1-2), 248-254.

Bray, R. H., & Kurtz, L. T. (1945). Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil science*, *59*(1), 39-46.

Brzezinska, M., Stepniewska, Z., Stêpniewski, W., Wlodarczyk, T., Przywara, G., & Bennicelli, R. (2001). Effect of oxygen deficiency on soil dehydrogenase activity [pot experiment with barley]. *International agrophysics*, *15*(1).

Carter, M.R., & Gregorich, E.G., (2008). *Soil Sampling and Methods of Analysis*. P 823-1224, In: Carter, M.R., Gregorich, E.G., (ed.). CRC Press: Boca Raton, FLorida, USA.

Conrad, R. (2007). Microbial ecology of methanogens and methanotrophs. *Advances in agronomy*, *96*, 1-63.

Das, A. K., Lee, D. S., Woo, Y. J., Sultana, S., Mahmud, A., & Yun, B. W. (2025). The Impact of Flooding on Soil Microbial Communities and Their Functions: A Review. *Stresses*, *5*(2), 30.

Delgado-Baquerizo, M., Eldridge, D. J., Liu, Y. R., Liu, Z. W., Coleine, C., & Trivedi, P. (2025). Soil biodiversity and function under global change. *PLoS Biology*, *23*(3), e3003093.

Dove, N. C., Barnes, M. E., Moreland, K., Graham, R. C., Berhe, A. A., & Hart, S. C. (2021). Depth dependence of climatic controls on soil microbial community activity and composition. *ISME communications*, *1*(1), 78.

Gui, H., Fan, L., Wang, D., Yan, P., Li, X., Pang, Y., & Han, W. (2022). Variations in soil nutrient dynamics and bacterial communities after the conversion of forests to long-term tea monoculture systems. *Frontiers in Microbiology*, *13*, 896530.

Harris, N. L., Gibbs, D. A., Baccini, A., Birdsey, R. A., De Bruin, S., Farina, M., & Tyukavina, A. (2021). Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nature Climate Change*, *11*(3), 234-240.

He, S., Zhu, R., Zheng, Z., & Li, T. (2023). The effect of tea plantation age on soil water-stable aggregates and aggregate-associated carbohydrate in southwestern China. *International Soil and Water Conservation Research*, *11*(2), 393-401.

Jia, G., & Liu, X. (2017). Soil microbial biomass and metabolic quotient across a gradient of the duration of annually cyclic drainage of hillslope riparian zone in the three gorges reservoir area. *Ecological Engineering*, *99*, 366-373.

Kahneh, E., Azadi Gonbad, R., Seraji, A., & Shirinfekr, A. (2023). Effect of long-term tea plantations on spore abundance of AM fungi and its relationship with some physicochemical properties of soil. *Research in Horticultural Sciences*, *2*(2), 227-242 *(In Persian)*.

Kuzyakov, Y., & Blagodatskaya, E. (2015). Microbial hotspots and hot moments in soil: concept & review. *Soil Biology and Biochemistry*, *83*, 184-199.

Lal, R. (2005). Forest soils and carbon sequestration. *Forest ecology and management*, *220*(1–3), 242–258.

Lal, R. (2020). Soil organic matter and water retention. *Agronomy Journal*, *112*(5), 3265-3277.

Lu, Z., Zhou, Y., Li, Y., Li, C., Lu, M., Sun, X., & Fan, M. (2023). Effects of partial substitution of chemical fertilizer with organic manure on the activity of enzyme and soil bacterial communities in the mountain red soil. *Frontiers in Microbiology*, *14*, 1234904.

Ma, S., Zhu, B., Chen, G., Ni, X., Zhou, L., Su, H., & Fang, J. (2022). Loss of soil microbial residue carbon by converting a tropical forest to tea plantation. *Science of the Total Environment*, *818*, 151742.

Margesion, R. 2012. Enzymes involved in phosphorus metabolism. 13.2. Acid and alkaline phosphomonoesterase activity with the substrate p-nitrophenyl phosphate. P. 213- 217. Schinner, F., Ohlinger, R., Kandeler. And Margesin, R. (Eds). Methods in soil biology. Part, 13. Springer. P. 437.

Martinengo, S., Schiavon, M., Santoro, V., Said-Pullicino, D., Romani, M., Miniotti, E. F., & Martin, M. (2023). Assessing phosphorus availability in paddy soils: the importance of integrating soil tests and plant responses. *Biology and Fertility of Soils*, *59*(4), 391-405.

Mganga, K. Z., Razavi, B. S., & Kuzyakov, Y. (2016). Land use affects soil biochemical properties in Mt. Kilimanjaro region. *Catena*, *141*, 22-29.

Mir, Y. H., Ganie, M. A., Shah, T. I., Bangroo, S. A., Mir, S. A., Shah, A. M., & Rahman, S. U. (2023). Soil microbial and enzyme activities in different land use systems of the Northwestern Himalayas. *PeerJ*, *11*, e15993.

Moghimian, N., Hosseini, S. M., Kooch, Y., & Darki, B. Z. (2019). Evaluating soil biochemical/microbial indices as ecological indicators of different land use/cover in northern Iran. *Acta Ecologica Sinica*, *39*(4), 328-333.

Öhlinger, H., & Von Mersi, W. (1996). Enzymes involved in intracellular metabolism. In *Methods in soil biology* (pp. 235-245). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Osman, K. T. (2013). Physical properties of forest soils. In *Forest soils: properties and management* (pp. 19-44). Cham: Springer International Publishing.

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

Post, W. M., & Kwon, K. C. (2000). Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential. *Global change biology*, *6*(3), 317–327.

Razavi, S., & Gupta, H. V. (2016). A new framework for comprehensive, robust, and efficient global sensitivity analysis: 1. Theory. *Water Resources Research*, *52*(1), 423-439.

Rillig, M. C. (2004). Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. *Canadian journal of soil science*, *84*(4), 355-363.

Sahrawat, K. L. (2012). Soil fertility in flooded and non-flooded irrigated rice systems. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *58*(4), 423-436.

Shao, S., Li, Y., Li, Z., Ma, X., Zhu, Y., Luo, Y., & Li, Q. (2024). Impact of tea tree cultivation on soil microbiota, soil organic matter, and nitrogen cycling in mountainous plantations. *Agronomy*, *14*(3), 638.

Soman, T., Rafay, M. F., Hune, S., Allen, A., MacGregor, D., & deveber, G. (2006). The risks and safety of clopidogrel in pediatric arterial ischemic stroke. *Stroke*, *37*(4), 1120-1122.

Tabatabai, M. A. (1994). Soil enzymes. Methods of soil analysis: Part 2 Microbiological and biochemical properties, 5, 775-833.

Tellen, V. A., & Yerima, B. P. (2018). Effects of land use change on soil physicochemical properties in selected areas in the North West region of Cameroon. *Environmental systems research*, *7*(1), 1-29.

Tian, H., Xu, R., Canadell, J. G., Thompson, R. L., Winiwarter, W., Suntharalingam, P., & Yao, Y. (2020). A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. *Nature*, *586*(7828), 248-256.

Vance, E. D., Brookes, P. C., & Jenkinson, D. S. (1987). Microbial biomass measurements in forest soils: the use of the chloroform fumigation-incubation method in strongly acid soils. *Soil Biology and Biochemistry*, *19*(6), 697-702.

varasteh khanlari, Z., Golchin, A., & Mosavi Kupar, S. A. (2020). Effect of Land Use Change and Land Reclamation on Some Qualitative Characteristics and Activity of Some Enzymes in the Soil. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *51*(4), 1055-1068 *(In Persian)*.

Von Mersi, W. and Schinner, P. 2012. Enzymes involved in carbon metabolism. 12.1. CM-Cellulase activity. P. 190-193. Schinner, F., Ohlinger, R., Kandeler. And Margesin, R. (Eds). Methods in soil biology. Part, 12. Springer. P. 437.

Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, *37*(1), 29-38.

Wang, H., Yin, Y., Cai, T., Tian, X., Chen, Z., He, K., & Cui, Z. (2024). Global patterns of soil organic carbon dynamics in the 20–100 cm soil profile for different ecosystems: A global meta-analysis. *Earth System Science Data Discussions*, *2024*, 1-28.

Wang, S., Yao, X., & Ye, S. (2020). Soil aggregate-related organic carbon and relevant enzyme activities as affected by tea (Camellia sinensis L.) planting age in hilly region of southern Guangxi, China. *Applied Soil Ecology*, *150*, 103444.

Wardle, D. A., & Ghani, A. (1995). A critique of the microbial metabolic quotient (qCO2) as a bioindicator of disturbance and ecosystem development. *Soil Biology and Biochemistry*, *27*(12), 1601-1610.

Winkler, K., Fuchs, R., Rounsevell, M., & Herold, M. (2021). Global land use changes are four times greater than previously estimated. *Nature communications*, *12*(1), 2501.

Wolińska, A., & Bennicelli, R. P. (2010). Dehydrogenase Activity Response to Soil Reoxidation Process Described as Varied Conditions of Water Potential, Air Porosity and Oxygen Availability. *Polish Journal of Environmental Studies*, *19*(3).

Wolińska, A., & Stępniewska, Z. (2012). Dehydrogenase activity in the soil environment. *Dehydrogenases*, *10*, 183-210.

Wright, S. F., & Upadhyaya, A. (1998). A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and soil*, *198*(1), 97-107.

Ye, J., Wang, Y., Wang, Y., Hong, L., Kang, J., Jia, Y., & Wang, H. (2023). Improvement of soil acidification and ammonium nitrogen content in tea plantations by long-term use of organic fertilizer. *Plant Biology*, *25*(6), 994-1008.