

The Effect of Tree and Shrub Cover (Vegetation) on Soil Characteristics of Rudbar in Guilan

Y. Kooch^{1*}, M. Fooladi Doghazlo¹, K. Haghverdi²

1- Department of Range Management, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, I. R. Iran

(*- Corresponding Author Email: yahya.kooch@modares.ac.ir)

2- Department of Wood and Paper Science and Technology, Ka.C., Islamic Azad University, Karaj, Iran

Received: 07 March 2025

Revised: 19 May 2025

Accepted: 24 May 2025

Available Online: 24 May 2025

How to cite this article:

Kooch, Y., Fooladi Doghazlo, M., & Haghverdi, K. (2025). Analysis of the effect of tree and shrub cover (vegetation) on soil characteristics Rudbar in Guilan. *Journal of Water and Soil*, 39(2), 155-171. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2025.92519.1475>

Introduction

Vegetation, as a key factor in ecosystems, has significant impacts on soil properties through multiple ecological processes. Vegetative cover enhances soil structure and composition by stabilizing organic matter, reducing erosion, regulating moisture levels, promoting nutrient cycling, and supporting microbial activity. While extensive research has elucidated the effects of various vegetation types on the physical and chemical properties of soil, the biological attributes of soil under different vegetation covers, particularly tree and shrub species, remain underexplored. This study aims to comprehensively evaluate the characteristics of the organic and mineral soil layers in areas dominated by *Quercus macranthera* tree cover, *Crataegus microphylla* shrub cover, *Berberis integerrima* shrub cover, and a mixed *Crataegus microphylla* and *Berberis integerrima* shrub cover in Rudbar County, Guilan Province, Iran. By examining these diverse vegetation types, the study seeks to elucidate their differential impacts on soil health and ecosystem functionality, providing insights for sustainable land management.

Materials and Methods

To investigate the influence of vegetation cover on soil properties, a rigorous site selection process was employed. Following preliminary field assessments, study areas were chosen to ensure continuity of vegetation cover and minimal variations in topographic factors, including elevation above sea level, slope gradient, and aspect. This approach minimized confounding variables, allowing for accurate comparisons across vegetation types. In each habitat, two 100 m × 100 m plots were implemented, with a minimum separation of 500 meters to account for spatial variability. Within each one-hectare plot, five soil samples (30 cm × 30 cm surface area, 10 cm depth) were collected from the organic and mineral layers at the four corners and the center of the plot. In total, 10 litter samples and 10 soil samples were collected from each vegetation type and transported to the laboratory for detailed analysis. Laboratory assays evaluated a suite of physical, chemical, and biological parameters, including soil aggregate stability, nutrient content, enzymatic activities, and microbial community dynamics, to provide a comprehensive understanding of soil responses to vegetation cover.

Results and Discussion

The findings revealed marked differences in soil properties across the studied vegetation types. The *Q. macranthera* tree cover exhibited the highest amount of essential nutrients in the organic layer, including nitrogen,



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.92519.1475>

phosphorus, potassium, calcium, and magnesium, reflecting its capacity to enhance nutrient cycling. In contrast, the *B. integerrima* shrub cover consistently exhibited the lowest nutrient concentrations, indicating minimal contribution to soil fertility. Analysis of soil physical and chemical properties further highlighted these differences. The *Q. macranthera* cover demonstrated significantly greater soil aggregate stability, higher clay content, increased proportions of coarse and fine aggregates, more favorable pH levels, and elevated concentrations of total nitrogen, ammonium, nitrate, phosphorus, potassium, calcium, as well as greater fine root biomass. Enzymatic activities, including urease, acid phosphatase, arylsulfatase, and invertase, were also significantly higher under *Q. macranthera*, indicating robust microbial and biochemical processes. Conversely, *B. integerrima* cover recorded the lowest values for these parameters, highlighting its limited impact on soil structure and function. Particulate and dissolved organic nitrogen levels were similarly highest under *Q. macranthera*, reinforcing its role in organic matter dynamics. Biological soil properties mirrored these trends. The *Q. macranthera* cover supported the highest densities of soil microfauna, including Acarina, Collembola, and nematodes, as well as abundant protozoa, fungal, and bacterial populations. Metrics of microbial activity, such as basal respiration, substrate-induced respiration, microbial biomass nitrogen, and microbial biomass phosphorus, were also maximized under this tree cover, reflecting a thriving soil microbial community. In contrast, *B. integerrima* cover exhibited the lowest values for these biological indicators, suggesting a less supportive environment for soil biota. Temporal analysis of carbon mineralization revealed significant variations at weeks 2, 4, 5, 8, and 12, with no notable changes at weeks 1 and 17. The highest carbon mineralization rates were observed under *Q. macranthera*, while *B. integerrima* showed the lowest. Nitrogen mineralization followed a similar pattern, with significant changes on days 7, 14, 21, 28, and 35, and the highest rates under *Q. macranthera*. These results collectively indicate that vegetation type, combined with topographic factors like elevation, significantly shapes the physical, chemical, and biological characteristics of soil in Rudbar County.

Conclusion

This study demonstrates that *Q. macranthera* tree cover significantly enhances soil quality compared to *C. microphylla*, *B. integerrima*, and their mixed shrub covers. The superior physical, chemical, and biological properties observed under *Q. macranthera* highlight its critical role in fostering soil microbial communities, improving nutrient cycling, and maintaining soil fertility. Enhanced carbon and nitrogen mineralization rates further underscore the importance of this tree species in driving biogeochemical processes essential for ecosystem health. These findings have important implications for land-use planning, forest management, and ecological restoration in Rudbar County. By prioritizing *Q. macranthera* in reforestation and conservation strategies, land managers can optimize soil productivity and ecosystem resilience. Future research should focus on long-term monitoring of these soil-vegetation interactions and explore additional environmental factors, such as climate and land-use history, to further refine management practices. The integration of such data will support the development of sustainable strategies that balance ecological health with agricultural and forestry objectives, ensuring the long-term vitality of Rudbar County's ecosystems.

Keywords: Carbon and nitrogen mineralization, Soil fertility, enzymatic activity, Soil physical and chemical properties

تأثیر پوشش‌های درختی و درختچه‌ای بر ویژگی‌های خاک منطقه رودبار گیلان

یحیی کوچ^۱ - مهین فولادی دوقزلو^۱ - کتابون حق‌وردی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳

چکیده

پوشش‌های گیاهی به‌عنوان عوامل کلیدی در اکوسیستم‌ها، اثرات قابل توجهی بر ویژگی‌های خاک دارند. در همین راستا پژوهش حاضر با هدف بررسی ویژگی‌های مختلف لایه‌آلی و بخش معدنی خاک در اراضی دارای پوشش درختی با غالبیت اوری، پوشش درختچه‌ای ولیک، زرشک، آمیخته ولیک و زرشک در شهرستان رودبار استان گیلان انجام شد. بدین منظور در هر یک از رویشگاه‌های مورد مطالعه ۱۰ نمونه لایه آلی (لاشه ریزه) و ۱۰ نمونه خاک از عمق ۰-۱۰ سانتی‌متری جهت تجزیه و تحلیل به آزمایشگاه انتقال داده شد. یک بخش از نمونه‌های خاک جهت انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی، پس از هوا خشک شدن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شده و بخش دوم نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌های زیستی تا زمان آزمایش در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. طبق نتایج پژوهش حاضر بیشترین مقادیر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم لایه آلی در پوشش درختی اوری و کمترین مقدار این ویژگی‌ها در پوشش درختچه‌ای زرشک مشاهده شد. همچنین بیشترین مقدار پایداری خاکدانه‌ها، خاکدانه درشت، بیشترین مقادیر pH و ویژگی‌های حاصل‌خیزی خاک در پوشش درختی اوری مشاهده شد. بیشترین و کمترین میزان معدنی شدن کربن و نیتروژن به ترتیب به پوشش درختی اوری و پوشش درختچه‌ای زرشک تعلق داشت. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که حضور پوشش‌های درختی، اثرات مثبتی بر ویژگی‌های خاک دارد. این پوشش‌ها با بهبود ساختار فیزیکی، افزایش مواد آلی و فعالیت‌های میکروبی کیفیت خاک را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهند. در همین راستا پیشنهاد می‌شود برای احیاء اراضی تخریب یافته با شرایط اکولوژی مشابه از پوشش درختی (اوری) استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: حاصل‌خیزی خاک، فعالیت آنزیمی، معدنی‌شدن کربن و نیتروژن، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

مقدمه

(2021). در مناطق مرتفع، که شرایط آب و هوایی و ویژگی‌های خاک می‌تواند به‌طور قابل توجهی متفاوت باشد، وجود پوشش گیاهی حتی ضروری‌تر می‌شود (Zhao & Riaz, 2024). فشارهای منحصر به فرد ارتفاع از جمله نوسانات دما، در دسترس بودن رطوبت، و ترکیب خاک وجود شکل‌های تخصصی رشد گیاهان، به ویژه درختان و درختچه‌ها را ضروری می‌کند، که می‌تواند خاک را تثبیت کند و محیطی مساعد را برای سایر اشکال پوشش گیاهی ایجاد کند (Dolezal, Dvorsky, 2016). وجود پوشش‌های درختی و درختچه‌ای در اکوسیستم‌های کوهستانی، نقشی اساسی در تأثیرگذاری بر ویژگی‌های

پوشش گیاهی نقش مهمی در شکل‌دهی اکوسیستم‌های زمینی ایفا می‌کند و بر تعداد زیادی از عملکردها و خدمات اکولوژیکی تأثیر می‌گذارد (Feng, Yang, Liu, Liu, Xia, Wu, & Zhang, 2024). پوشش گیاهی به‌عنوان عامل اصلی تعیین‌کننده سلامت خاک، تنوع زیستی و چرخه عناصر غذایی عمل می‌کند و زیستگاهی را برای ارگانیسم‌های بی‌شماری فراهم می‌کند، در عین حال از خاک در برابر تغییرات شدید محیطی محافظت می‌کند (Timmis & Ramos, 2021).

۱- گروه مرتعداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

(*)- نویسنده مسئول: yahya.kooch@modares.ac.ir (Email:)

۲- گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

مرور منابع حاکی از آن است که مطالعات بیشین بیشتر بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تمرکز داشته‌اند (Moscatelli, Marabottini, Massaccesi, & Marinari, 2022; Babur, Uslu, Battaglia, et al., 2021; Tufa, Melese, & Tena, 2019) از آنجایی که ویژگی‌های زیستی خاک، از جمله تنوع و فعالیت میکروبی نقش حیاتی در پایداری ساختمان خاک، چرخه عناصر غذایی و حفظ سلامت اکوسیستم‌ها دارند، و تأثیر مستقیمی بر فرآیندهای بیولوژیکی و شیمیایی خاک می‌گذارند و به بهبود ظرفیت خاک برای حمایت از پوشش گیاهی و کاهش فرسایش کمک می‌کنند (Mohamed, Sofy, Almoneafy, et al., 2021). در تحقیق حاضر علاوه بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بر ویژگی‌های زیستی خاک، از جمله فعالیت‌های میکروبی، تنوع و تراکم میکروارگانیسم‌ها تحت پوشش‌های گیاهی مختلف پرداخته شده است و شناخت بیشتری از تأثیرات بلند مدت پوشش‌های گیاهی بر بهبود یا کاهش سلامت خاک فراهم می‌آورد. از این رو تحقیق حاضر با هدف بررسی تأثیر انواع پوشش‌های درختی و درختچه‌ای از جمله اوری (Quercus macranthera) و زرشک (Crataegus) (Fisch. and C. A. Mey) آمیخته ولیک و زرشک (Crataegus microphylla C. Koch. and Berberis integerrima Bunge) ولیک (Crataegus microphylla C. Koch) و زرشک (Berberis integerrima Bunge) بر برخی از ویژگی‌های لایه آلی و معدنی خاک در شهرستان دودبار استان گیلان، مورد بررسی قرار گرفت.

منطقه مورد مطالعه

لايه آلى خاك ايفا مى كند (Kooch, Heidari, Haghverdi, Gómez-Brandón, & Kartalaei, 2024). اين نوع پوشش گياهى نه تنها از طريق بستر برگ و زيست توده ريشه به مواد آلى كمك مى كند، بلكه باعث بهبود ساختمان و حفظ رطوبت خاك مى شود (Poirier, Roumet, & Munson, 2018). همانطور كه اين گياهان رشد مى كنند و پوسيده مى شوند، خاك را با تركيبات آلى غنى مى كنند و يك تعامل پيچيده از زندگى ميكروبي را تقويت مى كنند كه براى چرخه عناصر غذايى ضرورى است (Bhattacharyya & Furtak, 2022).

محتوای ماده آلی خاک به‌عنوان یک شاخص اساسی برای کیفیت و باروری خاک شناخته می‌شود. مواد آلی با فراهم آوردن انرژی، فعالیت‌های زیستی خاک را تقویت کرده و به طور مستقیم ویژگی‌های خاک را بهبود می‌بخشند، همچنین مانع از آلودگی و تخریب خاک می‌شوند (Qu, Huang, Ma, Zhang, & Biere, 2016). این ترکیبات به شدت تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی مانند شیوه‌های مختلف مدیریت زمین قرار دارند. با توجه به تفاوت‌های موجود در میزان مواد آلی در انواع مختلف پوشش‌های گیاهی، آگاهی از تأثیر گونه‌های مختلف گیاهی بر مواد آلی خاک امری ضروری است. پوشش‌های گیاهی مختلف از جمله پوشش‌های درختی و درختچه‌ای با ایجاد تغییرات در ویژگی‌های خاک، بر کیفیت و مقدار مواد آلی تأثیر می‌گذارند (Liu, Huang, An, Sun, Bhople, & Chen, 2018). از نظر اکولوژیکی، ویژگی‌های فیزیکی خاک اهمیت زیادی دارند، به‌طوری‌که خصوصیات زیستی و شیمیایی خاک تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی آن قرار می‌گیرند. وجود پوشش‌های گیاهی از گونه‌های مختلف نقش قابل توجهی در تغییرپذیری ویژگی‌های فیزیکی خاک ایفا می‌کند. به‌طوری‌که حضور پوشش‌های درختی می‌تواند باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری، افزایش تخلخل، افزایش نفوذپذیری و کاهش فرسایش خاک شود (Osman, 2013).

پوشش‌های گیاهی از جمله درختان و درختچه‌ها، نه تنها به تثبیت خاک و جلوگیری از فرسایش آن کمک می‌کنند، بلکه نقش اساسی در بهبود خصوصیات شیمیایی خاک ایفا می‌کنند. یکی از مهم‌ترین اثرات پوشش‌های گیاهی بر خاک، افزایش محتوای کربن آلی و نیتروژن در خاک است. به‌طور خاص، مواد آلی تولید شده توسط گیاهان می‌تواند به بهبود ساختمان خاک و افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی آن کمک کند که این امر به نوبه خود بر دسترسی به عناصر غذایی خاک تأثیر می‌گذارد (Gerke, 2022). در نتیجه، وجود چنین پوشش گیاهی پیامدهای عمیقی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، از جمله pH دارد (Zhao & Riaz, 2024). علاوه بر این، ویژگی‌های بیولوژیکی و بیوشیمیایی خاک به شدت تحت تأثیر پوشش درختان قرار می‌گیرد. سیستم ریشه این گیاهان مسیرهایی را برای نفوذ آب، کاهش فرسایش و تهویه خاک ایجاد می‌کند (Eslaminejad, Heydari, Kakhki, et

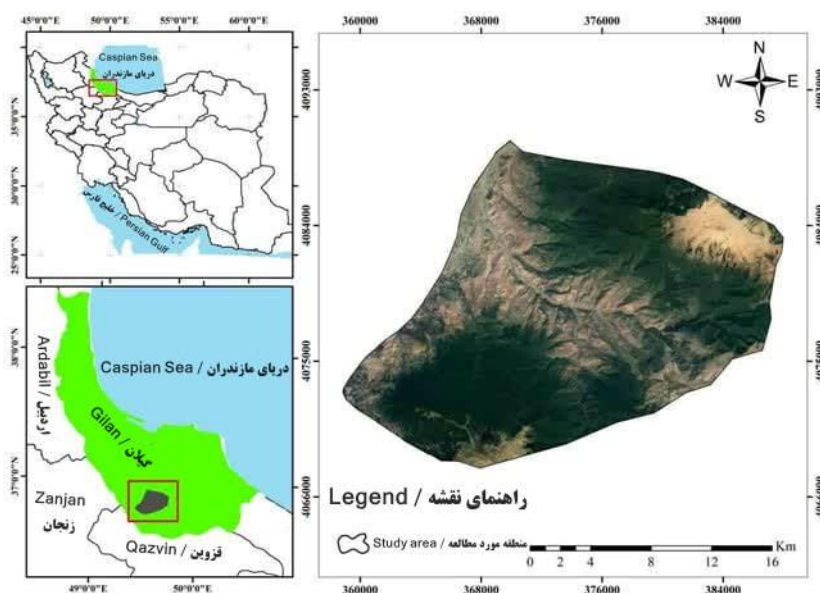
مورد مطالعه دو قطعه یک هکتاری (۱۰۰ متر × ۱۰۰ متر) با فواصل حداقل ۵۰۰ متر انتخاب شدند. در هر یک از قطعات یک هکتاری، تعداد ۵ نمونه (از چهار گوشه و مرکز این قطعات نمونه یک هکتاری) از لایه آلی و معدنی خاک (سطح ۳۰ سانتی‌متر × ۳۰ سانتی‌متر تا عمق ۱۰ سانتی‌متری) برداشت و در مجموع از هر یک از رویشگاه‌های مورد مطالعه تعداد ۱۰ نمونه لاشبرگ و ۱۰ نمونه خاک جهت تجزیه و تحلیل به آزمایشگاه انتقال داده شد. یک بخش از نمونه‌های خاک جهت انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی پس از هوا خشک شدن از الک ۲ میلی متری عبور داده شده و بخش دوم نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌های زیستی تا زمان آزمایش در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد (Kooch & Noghre, 2020). ضخامت لایه بستر در عرصه، مقدار کربن لایه آلی (لاشبرگ یا لاشه‌ریزه) به روش احتراق (Nilsson, Wardle, & Dahlberg, 1999) و مقدار نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و مینیزیم لاشبرگ به روش معدنی‌سازی نمونه‌ها (Bremner & Mulvaney, 1982) در محیط آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. سپس، برای اندازه‌گیری رطوبت خاک قبل از هوا خشک شدن به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک شدند (Tavakoli, Kooch, & Akbarinia, 2018). دمای خاک نیز با استفاده از دماسنج دیجیتال برای عمق مورد مطالعه در زمان نمونه‌برداری اندازه‌گیری گردید (Zancan, Trevisan, & Paoletti, 2006). به‌علاوه، جرم مخصوص ظاهری به روش کلوخه و جرم مخصوص حقیقی به روش پیکنومتری اندازه‌گیری و سپس تخلخل خاک محاسبه شد (Blake & Hartge, 1986).

و میانگین دمای سالانه برابر با ۲۱٫۸ درجه سانتی‌گراد برآورد شده‌است. بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی آمبرژه، این منطقه در کلاسه مرطوب تا نیمه‌مرطوب سرد قرار می‌گیرد. در ارتفاعات پایین‌تر (۹۸۰ تا ۱۸۰۰ متر از سطح دریا)، گونه‌های جنگلی نظیر راش، ممرز، بلندمازو، افرا پلت و توسکا غالب هستند، در حالی‌که در ارتفاعات بالاتر از ۱۸۰۰ متر، گونه‌هایی همچون اوری، لور، ولیک و زرشک غلبه دارند. متوسط شیب منطقه نیز حدود ۴۵ درصد محاسبه شده‌است (Seddighi Chafjiri, Hasan Zad Navroudi, Taheri Abkenar, & Pourbabaei, 2021). توده‌های جنگلی مورد مطالعه در این تحقیق عبارتند از:

- ۱- پوشش جنگلی با غالبیت (پوشش بیش از ۹۰ درصد) اوری
- ۲- پوشش درختچه‌ای با غالبیت (پوشش بیش از ۹۰ درصد) ولیک
- ۳- پوشش درختچه‌ای با غالبیت (پوشش بیش از ۹۰ درصد) زرشک
- ۴- پوشش درختچه‌ای آمیخته ولیک (پوشش حدود ۵۰ درصد) و زرشک (پوشش حدود ۴۰ درصد)

روش نمونه‌برداری، تجزیه آزمایشگاهی لایه آلی و معدنی خاک

به‌منظور بررسی اثرات پوشش‌های اراضی بر ویژگی‌های مختلف لایه آلی و معدنی خاک، پس از بررسی‌های اولیه و بازدیدهای میدانی، بخش‌هایی از اراضی فوق‌الذکر انتخاب شد که به صورت پیوسته با هم بوده و حداقل اختلاف ارتفاع از سطح دریا، حداقل تغییر درصد و جهت شیب در آن‌ها مشاهده شد. بدین منظور در هر یک از رویشگاه‌های



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در استان گیلان، شمال ایران
Figure 1- Location of the study area in Guilan Province, Northern Iran

به روش کشت (Wollum, 1982) در محیط آزمایشگاه ثبت شد. تنفس پایه خاک با استفاده از روش بطری درسته (Bayranvand & Kooch, 2016) و تنفس برانگیخته خاک، همانند روش تنفس پایه با اضافه کردن میزان ۱ میلی لیتر گلوکز ۱ درصد برای هر نمونه خاک ۱۰ گرمی اندازه گیری شد (Anderson & Domsch, 1990). کربن و نیتروژن زی توده میکروبی خاک نیز به روش تدخین استخراج اندازه گیری شد (Brookes, Landman, Pruden, & Jenkinson, 1985). همچنین، اندازه گیری آمونیوم به روش Indophenol blue و قرائت عصاره در طول موج ۶۴۵ نانومتر توسط دستگاه طیف سنج انجام شد (که اساس آن بر واکنش بین فنل و آمونیوم است) و اندازه گیری نیترات با دستگاه فتومتر (در طول موج ۴۲۰ نانومتر) به روش نیترات صورت گرفت (Robertson, Coleman, Sollins, & Bledsoe, 1999). در نهایت، برای سنجش فرآیندهای آمونیفیکاسیون، نیتریفیکاسیون و معدنی شدن نیتروژن از روش کیسه مدفون استفاده شد (Singh, Singh, & Kashyap, 2009).

تحلیل آماری داده ها

جهت تجزیه، تحلیل و همچنین مقایسه داده ها ابتدا نرمال بودن آن ها با استفاده از آزمون کولموگروف اسمیرنوف و همگنی واریانس با آزمون لون بررسی شد. تفاوت یا عدم تفاوت مقادیر ویژگی های لایه آلی و معدنی خاک در ارتباط با پوشش های اراضی، با تجزیه واریانس یک طرفه انجام شد. در نهایت مقایسه چندگانه میانگین در نمونه های برداشتی با آزمون دانکن در نرم افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام گرفت. تحلیل مؤلفه های اصلی (PCA) با استفاده از زبان Python (نسخه ۳،۱۱) و پکیج Scikit-learn انجام شد.

نتایج و بحث

ویژگی های لایه آلی

طبق نتایج پژوهش حاضر ویژگی های ضخامت، نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم لایه آلی تغییرات معنی داری را نشان دادند. درحالی که پارامترهای کربن و نسبت کربن به نیتروژن دارای اختلاف معنی داری در بین پوشش های گیاهی اراضی نمی باشند. کمترین و بیشترین مقدار ضخامت لاشبرگ به ترتیب به پوشش درختی اوری و ولیک تعلق داشت. همچنین، بیشترین مقادیر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم لایه آلی در پوشش درختی اوری و کمترین مقادیر این ویژگی ها در پوشش درختچه ای زرشک مشاهده شد (جدول ۱). همچنین یافته های حاصل از تحلیل مؤلفه های اصلی نشان می دهد که بین نوع پوشش گیاهی و ویژگی های مرتبط با لایه آلی خاک، ارتباط

در نهایت، پایداری خاکدانه ها به روش یودر (Kemper & Rosenau, 1986) و بافت خاک به روش هیدرومتری اندازه گیری شد (Six, Callewaert, Lenders, et al., 2002). واکنش به روش پتانسیومتری از طریق دستگاه pH متر الکتریکی، هدایت الکتریکی به وسیله EC سنج، کربن آلی خاک به روش والکلی بلاک (Allison, 1975) و نیتروژن کل به روش کج لادال (Bremner & Mulvaney, 1982) اندازه گیری شدند. میزان ذخیره کربن و نیتروژن بر اساس داده های کربن آلی، نیتروژن کل، جرم مخصوص ظاهری و عمق نمونه برداری خاک محاسبه شد (Wang & Wang, 2006). به علاوه، فسفر به روش اولسن (Chapman & Pratt, 1962)، پتاسیم، کلسیم و منیزیم قابل جذب خاک با استفاده از روش جذب اتمی اندازه گیری شد (Bower, Reitemeier, & Fireman, 1952). کربن و نیتروژن آلی ذره ای با روش کاهش وزن به وسیله سوزاندن تعیین شد (Nelson & Sommers, 1983). پس از تعیین مقدار خاکدانه های میکرو (ذرات کوچکتر از ۰/۲۵ میلی متر) و ماکرو (ذرات بزرگتر از ۰/۲۵ میلی متر) به روش الک تر، روش والکلی بلاک برای اندازه گیری مقادیر کربن و نیتروژن موجود در خاکدانه های میکرو و ماکرو مورد استفاده قرار گرفت (Elliott & Cambardella, 1991). کربن و نیتروژن آلی محلول به وسیله دستگاه تجزیه کربن آلی (Shimadzu TOC-550A) اندازه گیری شد. سپس، مقدار زی توده درشت ریشه ها (قطر بالای ۲ میلی متر) و ریز ریشه ها (قطر کمتر از ۲ میلی متر) در متر مربع برای هر رویشگاه به دست آمد (Neatrou, Jones, & Golladay, 2005). سپس، از روش انکوباسیون آزمایشگاهی برای سنجش فعالیت آنزیم های اوره آز، فسفاتاز، آریل سولفاتاز و اینورتاز استفاده شد (Alef & Nannipieri, 1995). برای شناسایی کرم های خاکی از روی شکل ظاهری، هر یک از آن ها ابتدا به صورت دستی از خاک جدا و پس از شستشو در آب در ظروف حاوی الکل نگهداری شد. با توجه به ویژگی های ریخت شناسی (اندازه، طول و رنگ بدن) و همچنین ویژگی هایی نظیر محل قرارگیری و شکل گلیتوم، محل قرارگیری اندام های جنسی روی سگمنت ها و گلیتوم، شکل و نوع اندام های جنسی و دیگر مشخصات ظاهری، کرم های خاکی مورد شناسایی قرار گرفت (Bayranvand & Kooch, 2016). به علاوه، نمونه های جمع آوری شده کرم های خاکی تمیز و شمارش شد، در پاکت های مقوایی قرار داده شده و به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس خشک شد و سپس وزن آن ها به وسیله ترازو تا دقت میلی گرم اندازه گیری شد (Kooch, Samadzadeh, & Hosseini, 2017). شمارش کنه ها و پادمان ها به روش قیف برلیز، نماتدهای خاکی با استفاده از تکنیک قیف بیرمن و سانتریفیوژ (Alef & Nannipieri, 1995)، پروتوزوئرها و خاک به وسیله میکروسکوپ با بزرگنمایی ۵۰۰ اندازه گیری شد (Adl, Acosta-Mercado, & Anderson, & Lynn, 2006). جمعیت باکتری ها و قارچ های خاکی

آنزیم‌هایی می‌شوند که در آزادسازی عناصر تثبیت‌شده مانند فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم مؤثر هستند. همچنین ترکیبات ترش‌ریزه می‌توانند pH خاک را به گونه‌ای تغییر دهند که دسترسی این عناصر افزایش یابد. این تعاملات، به‌ویژه در خاک‌های جنگلی تحت پوشش اوری، باعث بهبود دسترسی عناصر غذایی برای گیاه و تقویت ساختمان خاک می‌شود که در نهایت به بهبود پایداری اکوسیستم منجر می‌گردد (Sardans & Peñuelas, 2021; Wang, Jia, Qi, Li, (Degen, Han, & Shang, 2022).

ویژگی‌های معدنی خاک

طبق نتایج حاصل از تجزیه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بیشترین و کمترین مقدار درصد پایداری خاکدانه‌ها، خاکدانه درشت، خاکدانه ریز، pH، نیتروژن کل، آمونیوم، نترات، فسفر، پتاسیم، کلسیم، زی‌توده ریز ریشه، آنزیم‌های اوره آز، اسید فسفاتاز، آریل سولفاتاز و اینورتاز، نیتروژن آلی ذره‌ای، نیتروژن آلی محلول به ترتیب در پوشش درختی اوری و درختچه‌ای زرشک مشاهده شد. همچنین بیشترین مقدار نسبت کربن به نیتروژن به رویشگاه اوری و کمترین مقدار آن به پوشش آمیخته ولیک و زرشک متعلق بود.

معناداری وجود دارد. در میان پوشش‌های بررسی‌شده، درخت اوری (*Quercus macranthera*) به واسطه ویژگی‌های برگ و سیستم ریشه‌ای خود، نقش برجسته‌ای در بهبود وضعیت لایه آلی خاک ایفا کرده است. برگ‌های گونه *Quercus macranthera* از نظر ترکیب شیمیایی، به‌ویژه در میزان نیتروژن، با سایر گونه‌ها تفاوت قابل‌توجهی دارند. این برگ‌ها حاوی مقادیر بالاتری از نیتروژن هستند که این ویژگی آن‌ها را مستعد تجزیه سریع‌تر در خاک می‌سازد. ورود این برگ‌ها به خاک، موجب افزایش فعالیت میکروبی می‌گردد، چرا که میکروارگانیسم‌ها از ترکیبات نیتروژن‌دار به‌عنوان منبع انرژی و رشد بهره می‌برند. افزایش فعالیت میکروبی منجر به تسریع در فرآیندهای معدنی‌شدن و تجزیه مواد آلی می‌شود. در نتیجه، نیتروژن آلی افزایش می‌یابد. این فرآیندها در مجموع موجب افزایش غلظت نیتروژن در خاک زیرپوشش این گونه شده و شرایط حاصل‌خیزی خاک را بهبود می‌بخشند (Kim, 2007; Jordan, Ponder, Jr, & Hubbard, 2003). همچنین ریشه‌های *Quercus macranthera* با ترشح ترکیبات آلی و به‌ویژه فنولی‌ها نقش کلیدی در بهبود چرخه عناصر غذایی خاک ایفا می‌کنند. این ترکیبات از طریق تحریک میکروارگانیسم‌های خاص در ناحیه ریزوسفیر، موجب افزایش فعالیت‌های زیستی از جمله تولید

جدول ۱- مقایسه میانگین (میانگین $\pm$ انحراف معیار) ویژگی‌های لایه آلی در رویشگاه‌های مورد مطالعه

Table 1- Compare Mean for organic layer characteristics in the studied habitats

ویژگی‌های لایه آلی Organic properties	رویشگاه Habitat				تجزیه واریانس ANOVA	
	<i>Quercus macranthera</i> اوری	<i>Crataegus microphylla</i> and <i>Berberis integerrima</i> آمیخته ولیک و زرشک	<i>Crataegus microphylla</i> ولیک	<i>Berberis integerrima</i> زرشک	F-value آماره F	Sig سطح معناداری
ضخامت لاشبرگ Thickness (cm)	6.16 $\pm$ 0.83c	7.01 $\pm$ 0.53bc	27.78 $\pm$ 0.49ab	8.45 $\pm$ 0.7a	4.038	0.014
کربن لایه آلی (%) Carbon	28.55 $\pm$ 3.05a	27.69 $\pm$ 2.6a	27.78 $\pm$ 2.46a	31.78 $\pm$ 2.96a	0.479	0.698
نیتروژن لایه آلی (%) Nitrogen	2.53 $\pm$ 0.16a	1.69 $\pm$ 0.13b	1.58 $\pm$ 0.17b	1.26 $\pm$ 0.1b	7.408	0.005
نسبت کربن به نیتروژن لایه آلی C/N ratio	14.69 $\pm$ 4.01b	18.21 $\pm$ 3.48ab	18.97 $\pm$ 2.03ab	26.69 $\pm$ 3.29a	2.358	0.087
فسفر Phosphorus (%)	3.88 $\pm$ 0.16a	3.18 $\pm$ 0.17b	3.13 $\pm$ 0.25b	3.15 $\pm$ 0.19b	3.274	0.032
پتاسیم Potassium (%)	2.31 $\pm$ 0.33a	1.75 $\pm$ 0.12ab	1.6 $\pm$ 0.11b	1.43 $\pm$ 0.2b	3.077	0.039
کلسیم Calcium (%)	2.73 $\pm$ 0.42a	1.86 $\pm$ 0.12b	1.82 $\pm$ 0.21b	1.48 $\pm$ 0.16b	4.28	0.011
منیزیم Magnesium (%)	0.69 $\pm$ 0.05a	0.65 $\pm$ 0.05a	0.56 $\pm$ 0.06ab	0.43 $\pm$ 0.06b	3.483	0.025

لازم به ذکر است که سایر ویژگی‌های مورد بررسی دارای اختلاف معنی‌داری در بین رویشگاه‌های مورد مطالعه نبودند (جدول ۲).

مطابق با نتایج PCA، عناصر غذایی قابل جذب از جمله فسفر، کلسیم و پتاسیم همبستگی بالایی با نقاط مربوط به گونه اوری داشته‌اند. این نتایج نشان‌دهنده ارتباط مثبت بین پوشش درختی و افزایش عناصر غذایی در خاک است. تحلیل PCA همچنین نشان داد که ویژگی‌های فیزیکی نظیر درصد پایداری خاکدانه‌ها در مناطق با پوشش اوری وضعیت بهتری نسبت به گونه‌های ولیک و زرشک داشتند که می‌تواند ناشی از تأثیرات ساختاری ریشه باشد. پوشش درخت اوری مقادیر بالاتری از درصد پایداری خاکدانه‌ها، درصد رس، خاکدانه درشت و ریز را نشان می‌دهد که به بیوماس و سیستم ریشه عمیق‌تر نسبت داده می‌شود. این ساختار ریشه باعث تجمع بهتر خاک و کاهش فرسایش شده که منجر به بهبود پایداری خاکدانه‌ها می‌شود. خاک‌های تحت پوشش درختان به دلیل تأثیر بر ساختمان خاک (از جمله کاهش فرسایش و افزایش مواد آلی) ممکن است ترکیب متفاوت‌تری از رس، سیلت و شن داشته باشند، در حالی که میزان رس خاک معمولاً به نوع خاک و شرایط آب و هوایی بستگی دارد. اما پوشش گیاهی می‌تواند به طور غیرمستقیم و با تأثیر بر فرایندهای هیدرولوژیکی و فیزیکی خاک باعث تثبیت خاک در برابر فرسایش و حفظ ساختار خاک می‌شود (Zhou, Luukkanen, Tokola, & Nieminen, 2008; Mohammad & Adam, 2010). گونه‌ی درختی *Quercus macranthera* در مقایسه با گونه‌ی درختچه‌ای *Berberis integerrima* تأثیر مثبت‌تری بر کیفیت خاک و چرخه عناصر غذایی دارد. طبق بررسی پوربابایی و همکاران (Pourbabaei, Salehi, Ebrahimi, & Khodaparasrt, 2020)، پوشش درختان اوری به‌ویژه در ارتفاعات، با فراهم‌سازی لاشبرگ غنی‌تر و تجزیه‌پذیر، موجب افزایش کربن آلی، نیتروژن، بهبود pH و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک می‌شود. این درختان همچنین محیط مناسبی برای فعالیت‌های میکروبی و ارتقاء زیست‌توده خاک فراهم می‌کنند. در حالی که بر اساس پژوهش کوچ و نقره (Kooch & Noghre, 2020) گونه‌هایی مانند *Berberis integerrima* اگرچه نقش مهمی در حفاظت خاک و کنترل فرسایش دارند، اما به دلیل نرخ برگ‌ریزی پایین‌تر و بیومس محدود، تأثیر کمتری بر شاخص‌های شیمیایی و زیستی خاک دارند. در مجموع، برتری درختان بلند قامت و دیرزیستی همچون اوری در بهبود پایداری

اکوسیستم‌های خاکی و تسهیل چرخه عناصر غذایی، نسبت به گونه‌های درختچه‌ای، قابل توجه است (Gilhen-Baker, Roviello, Beresford-Kroeger, & Roviello, 2022). مطابق با نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، بسیاری از ویژگی‌های شیمیایی خاک، از جمله غلظت عناصر غذایی نظیر فسفر، کلسیم، نیتروژن و پتاسیم و همچنین شاخص‌هایی مانند هدایت الکتریکی، pH و فعالیت‌های مختلف آنزیمی همبستگی بالایی با نمونه‌های تحت پوشش گونه‌ی *Quercus macranthera* (اوری) داشتند. جهت‌گیری بردارهای این ویژگی‌ها در نمودار PCA نشان می‌دهد که این پارامترها به طور هم‌زمان در جهت تمایز تیپ پوششی اوری از سایر تیپ‌ها عمل کرده‌اند. بنابراین، نتایج PCA به طور واضح نقش کلیدی پوشش درختی اوری را در تقویت ویژگی‌های شیمیایی خاک و فراهمی عناصر غذایی برجسته می‌کند، و در عین حال مؤید آن است که تیپ‌های درختچه‌ای در این زمینه کارایی کمتری دارند.

از نظر شیمیایی، پوشش درخت اوری سطوح بالایی از نیتروژن، آمونیوم، نیترات، فسفر، پتاسیم و فعالیت‌های مختلف آنزیمی (مانند اوره آر و اسید فسفاتاز) را نشان می‌دهد. این اتفاق در درجه اول به دلیل نرخ‌های بالاتر تجزیه مواد آلی است که توسط فعالیت میکروبی غنی‌تر در مناطق جنگلی تسهیل می‌شود. وجود گونه‌های درختی متنوع به فرآیند چرخه عناصر غذایی پیچیده‌تر کمک می‌کند و دسترسی عناصر غذایی را در خاک افزایش می‌دهد. در مقابل، زیستگاه درختچه زرشک مقادیر کمتری را در این شاخص‌های شیمیایی نشان می‌دهد. کاهش فعالیت آنزیمی در این زیستگاه نشان‌دهنده یک جامعه میکروبی کمتر فعال است که باعث کاهش بیشتر در دسترس بودن عناصر غذایی و حاصل‌خیزی کلی خاک می‌شود (Długosz, Dębska, & Piotrowska-Długosz, 2024). درختان خزان‌کننده، مقدار قابل توجهی از لاشبرگ را تولید می‌کنند که پس از تجزیه، می‌تواند قلیایی بودن خاک را افزایش دهد. فرآیند تجزیه باعث آزاد شدن کاتیون‌های اساسی مانند کلسیم و منیزیم می‌شود که می‌توانند pH خاک را در طول زمان افزایش دهند (Bélanger & Chaput-Richard, 2023). ریشه و تاج بزرگ‌تر درختان به حفظ رطوبت خاک و تجمع مواد آلی کمک می‌کند و محیط مساعدتری برای رشد ریشه و افزایش زی‌توده ریز ریشه فراهم می‌کند (Toca, Morrison, Artz, Gimona, & Quaife, 2022).

جدول ۲- مقایسه میانگین (میانگین $\pm$ انحراف معیار) ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در رویشگاه‌های مورد مطالعه

Table 2- Compare Mean for soil physical and chemicals characteristic in the studied habitats

ویژگی‌های معدنی خاک Soil mineral properties	رویشگاه Habitat				تجزیه واریانس ANOVA	
	<i>Quercus macranthera</i> اوری	<i>Crataegus microphylla</i> and <i>Berberis integerrima</i> آمیخته ولیک و زرشک	<i>Crataegus microphylla</i> ولیک	<i>Berberis integerrima</i> زرشک	F-value آماره F	Sig. سطح معناداری
رطوبت خاک Moisture (%)	44.39 $\pm$ 1.54a	39.7 $\pm$ 3.28ab	33.34 $\pm$ 2.68bc	26.79 $\pm$ 2.05c	9.54	0.00
دمای خاک Temperature (°C)	22.14 $\pm$ 1.2a	26.3 $\pm$ 2.2bc	29.88 $\pm$ 1.95ab	32.45 $\pm$ 2.49c	4.908	0.005
جرم مخصوص ظاهری Bulk density (g cm ⁻³)	1.4 $\pm$ 0.08a	1.52 $\pm$ 0.07a	1.54 $\pm$ 0.06a	1.57 $\pm$ 0.06a	1.153	0.34
جرم مخصوص حقیقی Particle density (g cm ⁻³)	2.31 $\pm$ 0.08a	2.36 $\pm$ 0.09a	2.38 $\pm$ 0.08a	2.39 $\pm$ 0.06a	0.177	0.911
تخلخل Porosity (%)	37.73 $\pm$ 5.22a	34.66 $\pm$ 3.57a	34.36 $\pm$ 3.35a	33.33 $\pm$ 3.83a	0.216	0.884
پایداری Stability (%)	74.67 $\pm$ 2.51a	67.53 $\pm$ 2.13ab	60.96 $\pm$ 4.48b	59.79 $\pm$ 2.29b	5.192	0.004
شن Sand (%)	24.6 $\pm$ 1.66a	28.1 $\pm$ 4.22a	27.7 $\pm$ 2.78a	29.5 $\pm$ 4.7a	0.337	0.798
سیلت Silt (%)	32.3 $\pm$ 4.47a	31.1 $\pm$ 6.66a	43 $\pm$ 3.59a	39.6 $\pm$ 4.78a	1.312	0.285
رس Clay (%)	43.1 $\pm$ 4.42a	40.8 $\pm$ 4.83ab	29.3 $\pm$ 1.62c	30.9 $\pm$ 2.99bc	3.526	0.024
خاکدانه درشت Macro-aggregate (g kg ⁻¹)	53.4 $\pm$ 2.95a	43.2 $\pm$ 3.31ab	37.7 $\pm$ 6.81bc	26.8 $\pm$ 2.65c	6.722	0.001
کربن در خاکدانه درشت C in Macro-aggregate (g kg ⁻¹)	0.33 $\pm$ 0.05a	0.28 $\pm$ 0.03ab	0.22 $\pm$ 0.02ab	0.2 $\pm$ 0.02b	2.181	0.107
کربن در خاکدانه ریز C in Micro-aggregate (%)	0.22 $\pm$ 0.04a	0.18 $\pm$ 0.01a	0.17 $\pm$ 0.02a	0.14 $\pm$ 0.02a	1.348	0.274
خاکدانه ریز Micro-aggregate (%)	38.3 $\pm$ 6.52a	32.1 $\pm$ 2.22ab	24.4 $\pm$ 2.16bc	19.5 $\pm$ 2.24c	4.82	0.006
نیتروژن در خاکدانه درشت N in Macro-aggregate (g kg ⁻¹)	0.28 $\pm$ 0.04a	0.26 $\pm$ 0.04ab	0.12 $\pm$ 0.03b	0.15 $\pm$ 0.05ab	2.83	0.052
نیتروژن در خاکدانه ریز N in Micro-aggregate (g kg ⁻¹)	0.21 $\pm$ 0.04a	0.14 $\pm$ 0.05a	0.11 $\pm$ 0.02a	0.1 $\pm$ 0.02a	1.569	0.213
واکنش pH	7.02 $\pm$ 0.11a	6.89 $\pm$ 0.14a	6.19 $\pm$ 0.11b	6.03 $\pm$ 0.26b	8.36	0.00
هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)	0.37 $\pm$ 0.03a	0.35 $\pm$ 0.03ab	0.29 $\pm$ 0.03ab	0.26 $\pm$ 0.03b	2.442	0.079
کربن C (%)	3.08 $\pm$ 0.21a	2.65 $\pm$ 0.33a	2.38 $\pm$ 0.34a	2.31 $\pm$ 0.4a	1.098	0.362
نیتروژن Total N (%)	0.44 $\pm$ 0.03a	0.28 $\pm$ 0.04b	0.22 $\pm$ 0.03b	0.21 $\pm$ 0.06b	5.504	0.003
نسبت کربن به نیتروژن لایه آلی C/N ratio	7.44 $\pm$ 0.81b	10.13 $\pm$ 1.37ab	11.21 $\pm$ 1.49ab	15.34 $\pm$ 3.08a	3.021	0.042
آمونیم NH ₄ (mg kg ⁻¹)	37.85 $\pm$ 2.29a	33.2 $\pm$ 3.45a	19.83 $\pm$ 0.92b	16.72 $\pm$ 1.58b	20.26	0.00
نترات NO ₃ (mg kg ⁻¹)	44.29 $\pm$ 2.85a	38.91 $\pm$ 4.06a	27.41 $\pm$ 4.03b	24.75 $\pm$ 1.85b	7.776	0.00
فسفر Available P (mg kg ⁻¹)	28.85 $\pm$ 1.65a	20.65 $\pm$ 1.78b	15.48 $\pm$ 1.24b	14.89 $\pm$ 2.85b	10.703	0.00
پتاسیم Available K (mg kg ⁻¹)	392.1 $\pm$ 19.88a	329.8 $\pm$ 27.02a	252.5 $\pm$ 30.02b	204.1 $\pm$ 27.87b	9.845	0.00
کلسیم Available Ca (mg kg ⁻¹)	267.1 $\pm$ 18.85a	229.1 $\pm$ 21.95a	122.4 $\pm$ 12b	121.4 $\pm$ 19.64b	16.235	0.00
منیزیم Available Mg (mg kg ⁻¹)	44.6 $\pm$ 5.62a	37.8 $\pm$ 5.3a	34 $\pm$ 2.37a	31.8 $\pm$ 4.81a	1.421	0.252

ویژگی‌های زیستی

طبق نتایج پژوهش حاضر بیشترین مقدار فراوانی کنه خاک‌زی، فراوانی پادمان خاک‌زی، نماد کل خاک‌زی، فراوانی پروتوزوئر خاک‌زی، جمعیت قارچ، جمعیت باکتری، تنفس پایه، تنفس میکروبی برانگیخته، زی‌توده میکروبی نیتروژن، زی‌توده میکروبی فسفر، مربوط به پوشش درختی اوری و کمترین مقدار این ویژگی‌ها متعلق به پوشش درختچه‌ای زرشک بود. اما سایر ویژگی‌های مورد بررسی از جمله فراوانی اپی‌ژئیک، زی‌توده اپی‌ژئیک، فراوانی آنسئیک، زی‌توده آنسئیک، فراوانی، اندوژئیک، زی‌توده اندوژئیک، فراوانی کل کرم‌خاکی، زی‌توده کل کرم‌خاکی، کربن زی‌توده میکروبی، نسبت زی‌توده میکروبی نیتروژن به نیتروژن کل، نسبت زی‌توده میکروبی فسفر به فسفر کل، نسبت کربن به نیتروژن زی‌توده میکروبی، نسبت زی‌توده میکروبی کربن به زی‌توده میکروبی فسفر، نسبت زی‌توده میکروبی نیتروژن به زی‌توده میکروبی فسفر، ضریب متابولیکی، سهم میکروبی، قابلیت دسترسی کربن دارای اختلاف معنی‌داری نبودند (جدول ۳).

بر اساس تحلیل PCA، شاخص‌های زیستی خاک از جمله فعالیت آنزیم‌های خاک، تنفس میکروبی و کربن زیست‌توده‌ای، بیشترین ارتباط را با نمونه‌های تحت پوشش گونه اوری داشتند، که این موضوع نشان‌دهنده فعالیت میکروبی بالاتر و فرآیندهای زیستی کارآمدتر در این تیپ پوششی است. مقادیر بالاتر برخی از ویژگی‌های خاک از جمله فراوانی فون خاک، زیست‌توده میکروبی و سرعت تنفس در زیر پوشش درختی در مقایسه با سایر پوشش‌ها اغلب به عوامل اکولوژیکی متعددی بستگی دارد، پوشش تاجی درختان یک خرد اقلیم پایدارتر را فراهم می‌کند که باعث افزایش حفظ رطوبت خاک و کاهش میزان تبخیر می‌شود. این امر برای حفظ جمعیت میکروبی و جانوری و همچنین افزایش تجمع مواد آلی از طریق بستر برگ و ترشحات ریشه بسیار مهم است. تحقیقات نشان می‌دهد که وجود درختان منجر به افزایش کیفیت و کمیت لاشبرگ می‌شود که به نوبه خود از یک جامعه میکروبی متنوع پشتیبانی می‌کند و فرآیندهای چرخه عناصر غذایی را در خاک افزایش می‌دهد (Xiang, Qiang, Liu, Liu, Ai, & Ma, 2023).

همچنین، سیستم‌های ریشه درختان در مقایسه با درختچه‌ها عمیق‌تر به خاک نفوذ می‌کنند و دسترسی بهتر به آب و عناصر غذایی را تسهیل می‌کنند. این ریشه‌زایی عمیق‌تر می‌تواند منجر به بهبود ساختمان و هوادهی خاک شود که برای فعالیت میکروبی حیاتی است (Li, Liang, Peng, Cui, Huang, & Lin, 2017). اینکه خاک زیر درختچه‌ها در مقایسه با خاک زیر درختان دمای بالاتری دارد، را می‌توان به عوامل متعددی نسبت داد که عمدتاً مربوط به تاج پوشش و اثرات خرد اقلیم است. درختچه‌ها معمولاً پوشش پوشش تاجی کمتری

نسبت به درختان دارند و اجازه می‌دهند نور خورشید بیشتری به زمین برسد که می‌تواند دمای خاک را افزایش دهد. علاوه بر این، شاخ و برگ متراکم درختان اغلب منجر به سایه بیشتر می‌شود و میزان نور مستقیم خورشید را که به سطح خاک زیر آنها نفوذ می‌کند، کاهش می‌دهد پوشش‌های درختی به‌عنوان یک پوشش طبیعی برای میکروارگانیسم‌ها عمل می‌کنند. این محیط‌ها معمولاً از اثرات مستقیم تغییرات شدید آب و هوایی مانند تابش شدید نور خورشید یا وزش باد محافظت می‌کنند، که می‌تواند باعث افزایش جمعیت میکروارگانیسم‌ها از جمله قارچ‌ها و باکتری‌ها شود (Edmondson, Stott, Davies, Gaston, & Leake, 2016).

در بررسی تغییرات معدنی شدن کربن، نتایج نشان داد که در هفته‌های دوم، چهارم، پنجم، هشتم و دوازدهم تغییرات معنی‌داری وجود داشت، در حالی که در هفته‌های اول و هفدهم این تغییرات معنی‌دار نبودند. بالاترین میزان معدنی شدن کربن در خاک تحت پوشش درخت اوری و کمترین مقدار مربوط به زرشک بود (جدول ۴). نوسانات معنی‌دار در نرخ معدنی شدن کربن طی هفته‌های مختلف می‌تواند ناشی از تغییر در دسترسی به مواد آلی قابل تجزیه، فعالیت میکروبی، و شرایط محیطی نظیر دما و رطوبت خاک باشد. در هفته‌های ابتدایی، معمولاً به‌دلیل وجود مواد آلی تازه و ساده‌تر، فعالیت میکروبی بالا بوده و در نتیجه معدنی شدن کربن به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. در مقابل، در هفته‌هایی که این منابع کاهش یافته یا شرایط برای فعالیت میکروبی نامساعد شده‌اند، ممکن است تغییرات مشاهده‌شده از نظر آماری معنی‌دار نباشد (Sharma, Setia, Rishi, Kumar, Singh, & Pateriya, 2025; Mendoza, De Neve, Deroo, Li, François, & Sleutel, 2025).

معدنی شدن بیشتر کربن در خاک‌های تحت پوشش اوری در مقایسه با سایر رویشگاه‌ها می‌توان به عوامل متعددی در ارتباط با ویژگی‌های گیاهی و پویایی میکروبی خاک نسبت داد. همانطور که اشاره شد درخت اوری، به‌عنوان یک گونه درختی، به‌طور معمول مواد آلی بیشتری را از طریق لاشبرگ و زیست‌توده ریشه به خاک وارد می‌کند، که فعالیت میکروبی را افزایش می‌دهد و منجر به افزایش میزان معدنی شدن کربن می‌شود. علاوه بر این، اثرات ریزوسفر درختان اغلب باعث ایجاد یک جامعه میکروبی متنوع‌تر و فعال‌تر می‌شود و تجزیه مواد آلی به دی اکسید کربن را تسهیل می‌کند. وجود ویژگی‌های بیوشیمیایی خاص خاک مرتبط با گونه‌های درختی، مانند اوری و سطوح بالاتر کربن آلی محلول در آب، نیز نقش مهمی در افزایش معدنی شدن کربن در این رویشگاه‌ها دارد (Uluşu & Darıcı, 2023).

جدول ۳- مقایسه میانگین (میانگین $\pm$ اشتباه معیار) ویژگی‌های زیستی خاک در رویشگاه‌های مورد مطالعه

Table 3- Compare Mean for Biology characteristic in the studied habitats

ویژگی‌های زیستی خاک Soil biological properties	رویشگاه Habitat				تجزیه واریانس ANOVA	
	<i>Quercus macranthera</i> اوری	<i>Crataegus microphylla</i> and <i>Berberis integerrima</i> آمیخته ولیک و زرشک	<i>Crataegus microphylla</i> ولیک	<i>Berberis integerrima</i> زرشک	F-value آماره F	Sig سطح معناداری
فراوانی اپی‌ژئیک Epigeic density (n m ⁻²)	1.9 $\pm$ 0.348a	1.2 $\pm$ 0.326a	1 $\pm$ 0.365a	0.8 $\pm$ 0.46a	1.583	0.21
زی‌توده اپی‌ژئیک Epigeic biomass (mg m ⁻²)	24.74 $\pm$ 4.88a	14.27 $\pm$ 4.03ab	9.73 $\pm$ 3.58b	9.48 $\pm$ 5.41b	2.476	0.077
فراوانی آنسئیک Anecic density (n m ⁻²)	2.4 $\pm$ 0.65a	1.5 $\pm$ 0.5a	1.2 $\pm$ 0.51a	0.8 $\pm$ 0.55a	1.485	0.234
زی‌توده آنسئیک Anecic biomass (mg m ⁻²)	27.92 $\pm$ 8.66a	20.3 $\pm$ 6.79a	15.41 $\pm$ 6.51a	10.06 $\pm$ 6.94a	1.086	0.367
فراوانی اندوژئیک Endogeic density (n m ⁻²)	0.9 $\pm$ 0.34a	0.6 $\pm$ 0.26a	0.5 $\pm$ 0.26a	0.2 $\pm$ 0.13a	1.181	0.33
زی‌توده اندوژئیک Endogeic biomass (mg m ⁻²)	12.07 $\pm$ 5.02a	8.23 $\pm$ 3.83a	7.25 $\pm$ 3.77a	2.14 $\pm$ 1.45a	1.187	0.328
فراوانی کل کرم‌خاکی Earthworm density (n m ⁻²)	5.2 $\pm$ 0.86a	3.3 $\pm$ 0.36ab	2.7 $\pm$ 0.95ab	1.8 $\pm$ 0.98b	2.987	0.043
زی‌توده کل کرم‌خاکی Earthworm biomass (mg m ⁻²)	64.74 $\pm$ 14.14a	42.81 $\pm$ 6.01ab	32.4 $\pm$ 11.61ab	21.69 $\pm$ 11.72b	2.654	0.063
فراوانی کنه خاک‌زی Acarina density (n m ⁻²)	61974.5 $\pm$ 8971.15a	43521.1 $\pm$ 8302.21ab	31328.9 $\pm$ 5191.73bc	20463.5 $\pm$ 2448.67c	6.948	0.00
فراوانی پادمان خاک‌زی Collembola density (n m ⁻²)	32908.4 $\pm$ 6339.69a	21936.2 $\pm$ 2294.95b	17626.7 $\pm$ 1283.15b	12149.5 $\pm$ 1471.7b	6.286	0.001
نماتد کل خاک‌زی Total nematode (in 100 gr soil)	753.4 $\pm$ 32.23a	464.3 $\pm$ 28.22b	346.3 $\pm$ 62.24bc	302.5 $\pm$ 65.76c	16.43	0.00
فراوانی پروتوزوئر خاک‌زی Protozoa density (in 100 gr soil)	453.7 $\pm$ 47.14a	312.8 $\pm$ 33.86b	209.3 $\pm$ 14.36c	206.6 $\pm$ 21.21c	13.465	0.00
جمعیت قارچ Total fungi ($\times 10^7$ g soil)	3.4 $\pm$ 0.19a	1.59 $\pm$ 0.23b	1.01 $\pm$ 0.05c	0.59 $\pm$ 0.06c	59.355	0.00
جمعیت باکتری Total bacteria ($\times 10^7$ g soil)	6.449 $\pm$ 0.49a	2.4 $\pm$ 0.21b	2.22 $\pm$ 0.34b	1.91 $\pm$ 0.21b	40.983	0.00
تنفس پایه BR (mg CO ₂ g ⁻¹ day ⁻¹)	0.55 $\pm$ 0.03a	0.41 $\pm$ 0.03a	0.26 $\pm$ 0.02c	0.23 $\pm$ 0.01c	23.746	0.00
تنفس میکروبی برآنگیخته SIR (mg CO ₂ g ⁻¹ day ⁻¹)	1.28 $\pm$ 0.12a	1.09 $\pm$ 0.08ab	0.84 $\pm$ 0.14c	0.82 $\pm$ 0.07c	3.954	0.015
زی‌توده میکروبی کربن MBC (mg kg ⁻¹)	441.1 $\pm$ 82.06a	308.2 $\pm$ 57.3ab	318.7 $\pm$ 75.68ab	201.4 $\pm$ 22.35b	2.367	0.086
زی‌توده میکروبی نیتروژن MBN (mg kg ⁻¹)	54.25 $\pm$ 6.77a	33.29 $\pm$ 4.56b	27.12 $\pm$ 4.13b	23.59 $\pm$ 3.75b	7.69	0.00
نسبت زی‌توده میکروبی نیتروژن به نیتروژن کل MBN/Total N	129.73 $\pm$ 18a	139.7 $\pm$ 29.42a	122.1 $\pm$ 9.47a	167.07 $\pm$ 25.28a	0.804	0.499
زی‌توده میکروبی فسفر MBP (mg kg ⁻¹)	67 $\pm$ 7.3a	49.2 $\pm$ 6.82b	31.4 $\pm$ 2.56c	26.7 $\pm$ 1.49c	12.418	0.00
نسبت زی‌توده میکروبی فسفر به فسفر کل MBP/ P	2.38 $\pm$ 0.32a	2.4 $\pm$ 0.3a	2.11 $\pm$ 0.22a	2.44 $\pm$ 0.45a	0.202	0.893
نسبت زی‌توده میکروبی کربن به زی‌توده میکروبی MBC/MBN ratio	10.65 $\pm$ 2.91a	9.6 $\pm$ 1.14a	12.93 $\pm$ 2.30a	9.85 $\pm$ 1.49a	0.202	0.893
نسبت زی‌توده میکروبی کربن به زی‌توده میکروبی فسفر MBC/MBP	6.81 $\pm$ 0.98a	7.81 $\pm$ 1.96a	10.9 $\pm$ 2.60a	7.65 $\pm$ 0.81a	0.529	0.664
نسبت زی‌توده میکروبی نیتروژن به زی‌توده میکروبی فسفر MBN/MBP	0.94 $\pm$ 0.17a	0.76 $\pm$ 0.12a	0.88 $\pm$ 0.11a	0.93 $\pm$ 0.18a	1.049	0.382
ضریب متابولیسم q CO ₂	1.87 $\pm$ 0.39a	1.67 $\pm$ 0.28a	1.08 $\pm$ 0.2a	1.08 $\pm$ 0.12a	1.786	0.167

سهم میکروبی Microbial ratio	145.91 ± 27.61a	133.73 ± 28.55a	155.15 ± 34.63a	108.7 ± 18.72a	0.518	0.672
قابلیت دسترسی کربن CAI	0.45 ± 0.04a	0.4 ± 0.04a	0.43 ± 0.09a	0.32 ± 0.05a	0.814	0.494
زی توده ریز ریشه Fine root biomass (g m ⁻²)	73.58 ± 10.73a	68.24 ± 4.7a	40.22 ± 2.49b	37.55 ± 5.24b	8.129	0.00
آنزیم اسید فسفاتاز Acid phosphatase (μg PNP g ⁻¹ h ⁻¹)	317.3 ± 13.84a	222.7 ± 32.92b	213 ± 31.51b	157 ± 16.2b	6.987	0.00
آنزیم آریل سولفاتاز Arylsulphatase (μg PNP g ⁻¹ h ⁻¹)	206.4 ± 31.29a	178.3 ± 23.44ab	126.4 ± 7.33b	108.2 ± 4.97b	5.136	0.004
آنزیم اینورتاز Invertase (μg Glucose g ⁻¹ 3 h ⁻¹)	212.7 ± 28.95a	162.7 ± 30.76ab	119.7 ± 9b	100.1 ± 3.79b	5.313	0.003
نسبت آنزیم اورداز به کربن آلی Urease/OC	7.74 ± 1.73a	7.81 ± 5.12a	7 ± 3.35a	7.03 ± 3.07a	0.156	0.925
نسبت آنزیم اسید فسفاتاز به کربن آلی Acid phosphatase/OC	109 ± 35.28a	103.72 ± 74.31a	113.3 ± 79.75a	81.15 ± 32.4a	0.577	0.633
نسبت آنزیم آریل سولفاتاز به کربن آلی Arylsulfatase/OC	68.63 ± 35.11a	73.79 ± 35.78a	63.44 ± 29.64a	58.6 ± 25.99a	0.422	0.738
نسبت آنزیم اینورتاز به کربن آلی Invertase/OC	73.02 ± 37.24a	66.17 ± 39.75a	60.31 ± 32.81a	53.96 ± 24.29a	0.572	0.637
نسبت آنزیم اورداز به زی توده میکروبی کربن Urease/MBC	0.07 ± 0.03a	0.06 ± 0.03a	0.05 ± 0.04a	0.07 ± 0.03a	0.292	0.83
نسبت آنزیم اسید فسفاتاز به زی توده میکروبی کربن Acid phosphatase/MBC	1.04 ± 0.73a	1.01 ± 0.8a	0.83 ± 0.57a	0.84 ± 0.36a	0.292	0.81
نسبت آنزیم آریل سولفاتاز به زی توده میکروبی کربن Arylsulfatase/MBC	0.52 ± 0.14a	0.69 ± 0.39a	0.51 ± 0.26a	0.58 ± 0.17a	0.946	0.428
نسبت آنزیم اینورتاز به زی توده میکروبی کربن Invertase/MBC	0.61 ± 0.32a	0.57 ± 0.27a	0.47 ± 0.18a	0.54 ± 0.24a	0.528	0.665
میانگین هندسی فعالیت آنزیمی GME	1.47 ± 0.25a	1.47 ± 0.25a	1.47 ± 0.25a	1.47 ± 0.25a	0	1
کربن آلی ذره‌ای Particulate organic C (mg kg ⁻¹)	3.27 ± 0.6a	2.65 ± 0.32a	2.4 ± 0.45a	2.12 ± 0.23a	1.307	0.286
نیتروژن آلی ذره‌ای Particulate organic N (mg kg ⁻¹)	0.66 ± 0.05a	0.59 ± 0.08a	0.34 ± 0.03b	0.28 ± 0.05b	8.709	0.00
نسبت کربن به نیتروژن آلی ذره‌ای Particulate organic C/N ratio	5.08 ± 0.97a	5.81 ± 1.56a	7.69 ± 1.89a	10.66 ± 2.63a	1.778	0.168
کربن آلی محلول Dissolved organic C (mg kg ⁻¹)	23.03 ± 4.5a	20.27 ± 6.49a	15.04 ± 2.08a	14.56 ± 2.96a	0.895	0.452
نیتروژن آلی محلول Dissolved organic N (mg kg ⁻¹)	33.59 ± 4.78a	28.24 ± 3.34a	17.19 ± 1.29b	14.18 ± 1.58b	8.742	0.00
نسبت کربن به نیتروژن آلی محلول Dissolved organic C/N ratio	0.87 ± 0.22a	0.74 ± 0.19a	0.93 ± 0.17a	1.15 ± 0.28a	0.584	0.629

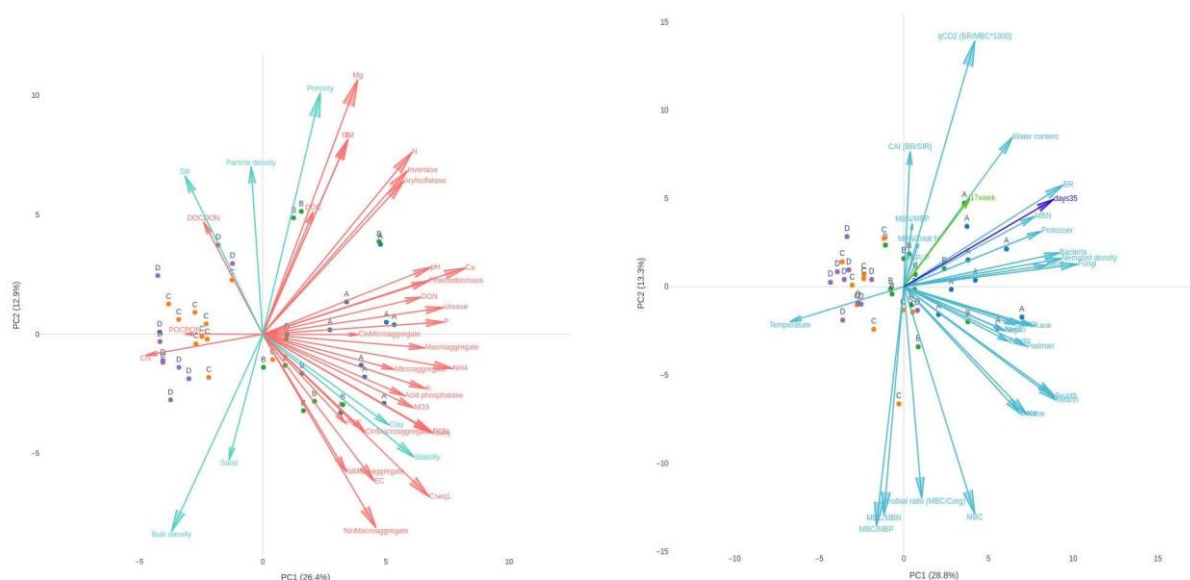
کمک می‌کند و اهمیت پوشش درختی را برای افزایش حاصل‌خیزی خاک و بهره‌وری اکوسیستم برجسته می‌کند (Yengwe, Gebremikael, Buchan, Lungu, & De Neve, 2018). همچنین نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی بیانگر آن است که نوع پوشش گیاهی اثر قابل توجهی بر ویژگی‌های مختلف خاک دارد. پوشش گیاهی اوری (A) با بهبود شاخص‌های مهمی همچون ماده آلی، فسفر، رطوبت، تنفس میکروبی و فعالیت آنزیمی بهترین عملکرد را در ارتقاء کیفیت خاک داشته است. در مقابل، تیپ‌های زرشک (C) و ولیک (D) سطوح پایین‌تری از حاصل‌خیزی خاک را از نظر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی مورد بررسی نشان دادند (شکل ۲).

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، تغییرات معنی‌داری در معدنی شدن نیتروژن در روزهای هفت، چهارده، بیست و یک، بیست و هشت و سی و پنج مشاهده شد. بالاترین میزان معدنی شدن نیتروژن مربوط به پوشش درختی اوری و کمترین آن به پوشش درختچه‌ای زرشک تعلق داشت (جدول ۴). معدنی شدن نیتروژن در خاک پوشیده از درختان به عوامل متعددی در ارتباط با فعالیت میکروبی خاک و تجزیه مواد آلی بستگی دارد. هنگامی که درختان برگ‌ها و سایر مواد آلی را به سطح خاک اضافه می‌کنند، این ورودی‌ها جمعیت میکروبی را در خاک افزایش می‌دهند که نقش مهمی در تجزیه مواد آلی و آزاد کردن نیتروژن به شکل معدنی دارد که گیاهان می‌توانند از آن استفاده کنند. این فرآیند اغلب در خاک زیر پوشش تاجی درختان بارزتر است. وجود لاشبرگ درختان به‌طور قابل توجهی به افزایش میزان نیتروژن در خاک اطراف

جدول ۴- مقایسه میانگین (میانگین $\pm$ اشتباه معیار) معدنی شدن کربن و نیتروژن در رویشگاه‌های مورد مطالعه

Table 4- Compare Mean of soil C and N mineralization in the studied habitats

معدنی شدن کربن و نیتروژن Carbon and nitrogen mineralization		رویشگاه Habitat				تجزیه واریانس ANOVA	
		<i>Quercus macranthera</i> اوری	<i>Crataegus microphylla</i> and <i>Berberis integerrima</i> آمیخته ولیک و زرشک	<i>Crataegus microphylla</i> ولیک	<i>Berberis integerrima</i> زرشک	F-value F آماره	Sig سطح معناداری
C mineralization (mg kg ⁻¹ soil)	Week 1	59.4 ± 3.52a	55.9 ± 4.47ab	53.3 ± 2.8ab	46.4 ± 3.38b	2.338	0.089
	Week 2	136.8 ± 7.79a	116.6 ± 10.88ab	98.9 ± 5.44b	96.4 ± 6.98b	5.435	0.003
	Week 4	151.3 ± 11.51a	147.8 ± 7.53a	121.4 ± 7.66b	102.5 ± 4.82b	7.852	0.00
	Week 5	218.7 ± 21.96a	202.9 ± 18.06a	191.2 ± 14.17a	107.2 ± 9.30b	9.054	0.00
	Week 8	239.3 ± 23.04a	227.2 ± 24.37a	121 ± 9.84b	117.5 ± 8.87b	13.399	0.00
N mineralization (mg kg ⁻¹ soil)	Week 12	304 ± 21.23a	279.1 ± 19.69a	283.1 ± 24.88a	207.4 ± 17.6b	4.011	0.014
	Week 14	314.6 ± 28.03a	291.1 ± 33.29a	274.2 ± 22a	248.7 ± 13.29a	1.208	0.32
	Day 7	54.7 ± 3.79a	50.9 ± 5.2a	48 ± 3.68ab	38 ± 2.37b	3.364	0.029
	Day 14	63.6 ± 4.67a	58.2 ± 3.7ab	50.5 ± 5.13ab	44.8 ± 5.12b	3.119	0.037
	Day 21	77.3 ± 4.54a	61.9 ± 4b	63.8 ± 4.56b	56.1 ± 3.78b	4.479	0.009
	Day 28	127.8 ± 13.01a	90.9 ± 10.44b	80.3 ± 11.91b	73.9 ± 5.34b	5.16	0.004
	Day 35	162.1 ± 13.04a	109 ± 4.8b	94.2 ± 5.64b	92.6 ± 3.6b	17.78	0.00



شکل ۲- ارتباط پوشش‌های گیاهی مورد مطالعه: اوری (A)، آمیخته ولیک و زرشک (B)، زرشک (C) و ولیک (D) با ویژگی‌های لایه آلی، فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در آنالیز مؤلفه‌های اصلی

Figure 2- Relationship between the studied Vegetation covers: *Quercus macranthera* (A), *Berberis integerrima* and *Crataegus microphylla* (B), *Berberis integerrima* (C) and *Crataegus microphylla* (D) with the characteristics of the organic, physical and chemecal, and the biological characteritics soil of the soil in principal component analysis

نتیجه گیری

به طور کلی نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تغییرات ارتفاع و نوع پوشش های گیاهی درختی و درختچه ای باعث ایجاد تغییرات معنی داری در ویژگی های لایه آلی و معدنی خاک در شهرستان رودبار استان گیلان شد. نتایج این پژوهش نشان داد که ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک در مناطق تحت پوشش درخت اوری نسبت به سایر پوشش های گیاهی بررسی شده، شرایط مساعدتری را نشان می دهند. به طوری که بیشترین مقادیر ویژگی های نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم لایه آلی در پوشش درختی اوری مشاهده شد. همچنین پوشش درختی اوری با افزایش پایداری خاکدانه ها شاخص های فرسایش پذیری را به طور قابل توجهی کاهش داده است. لازم به ذکر

است که پوشش درختی اوری نسبت به سایر پوشش های مورد بررسی موجب بهبود ویژگی های فیزیکی، شیمیایی و زیستی شد. این یافته اهمیت گونه های گیاهی خاص را در شکل دهی جوامع بیولوژیکی خاک و پویایی آن ها، با پیامدهای بالقوه برای سلامت خاک و عملکرد اکوسیستم را برجسته می کند. تغییرات مشاهده شده در نرخ معدنی شدن کربن و نیتروژن بیشتر بر نقش حیاتی پوشش درختی در افزایش فرایندهای چرخه عناصر غذایی، که برای حفظ حاصل خیزی خاک ضروری هستند، تأکید می کند. در همین راستا پیشنهاد می شود در برنامه ریزی کاربری اراضی و استراتژی های مدیریت جنگل از پوشش های درختی (اوری) جهت افزایش سلامت اکولوژیکی و بهره وری خاک استفاده شود.

References

1. Adl, S.M., Acosta-Mercado, D., Anderson, T.R., & Lynn, D.H. (2006). Protozoa, supplementary material. *Soil Sampling and Methods of Analysis*, 2(1), 455-470. <https://doi.org/10.1201/9781420005271.ch36>
2. Alef, K., & Nannipieri, P. (1995). *Methods in applied soil microbiology and biochemistry* (Issue 631.46 M592ma). Academic Press.
3. Allison, L.E. (1975). Organic carbon. In: Black CA. *Methods of soil analysis*. American Society of Agronomy, Part, 2.
4. 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. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(90\)90094-G](https://doi.org/10.1016/0038-0717(90)90094-G)
5. Babur, E., Uslu, Ö.S., Battaglia, M.L., Diatta, A., Fahad, S., Datta, R., & Danish, S. (2021). Studying soil erosion by evaluating changes in physico-chemical properties of soils under different land-use types. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 20(3), 190-197. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.01.005>
6. Bayranvand, M., & Kooch, Y. (2016). The effect of broad-leaved tree species on abundance and diversity of earthworms in the flat forest ecosystem. *Journal of Soil Biology*, 4(1), 15-26.
7. Bélanger, N., & Chaput-Richard, C. (2023). Experimental warming of typically acidic and nutrient-poor boreal soils does not affect leaf-litter decomposition of temperate deciduous tree species. *Soil Systems*, 7(1), 14. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7010014>
8. Bhattacharyya, S.S., & Furtak, K. (2022). Soil-Plant-Microbe interactions determine soil biological fertility by altering rhizospheric nutrient cycling and biocrust formation. *Sustainability*, 15(1), 625. <https://doi.org/10.3390/su15010625>
9. Blake, G.R., & Hartge, K.H. (1986). Particle density. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of soil analysis*. Part 1. Physical and mineralogical methods, 2nd ed. SSSA Book Ser. 5. ASA and SSSA, Madison, WI, 377-382. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c14>
10. Bower, C.A., Reitemeier, R.F., & Fireman, M. (1952). Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil Science*, 73, 251-261. <https://doi.org/10.1097/00010694-195204000-00001>
11. Bremner, J.M., & Mulvaney, C.S. (1982). Nitrogen-total total. In 'Methods of Soil Analyses. Part 2: Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy, Madison, 595-624. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c31>
12. Brookes, P.C., Landman, A., Pruden, G., & Jenkinson, D.S. (1985). Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 17(6), 837-842. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(85\)90144-0](https://doi.org/10.1016/0038-0717(85)90144-0)
13. Chapman, H.D., & Pratt, P.F. (1962). Methods of analysis for soils, plants and waters. *Soil Science*, 93(1), 68. <https://doi.org/10.1097/00010694-196201000-00015>
14. Coonan, E.C., Kirkby, C.A., Kirkegaard, J.A., Amidy, M.R., Strong, C.L., & Richardson, A.E. (2020). Microorganisms and nutrient stoichiometry as mediators of soil organic matter dynamics. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 117(3), 273-298. <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10076-8>

15. Długosz, J., Dębska, B., & Piotrowska-Długosz, A. (2024). The effect of soil tillage systems on the soil microbial and enzymatic properties under soybean (*Glycine max* L. Merrill) cultivation—implications for sustainable soil management. *Sustainability*, 16(24), 11140. <https://doi.org/10.3390/su162411140>
16. Dolezal, J., Dvorsky, M., Kopecky, M., Liancourt, P., Hiiesalu, I., Macek, M., & Schweingruber, F. (2016). Vegetation dynamics at the upper elevational limit of vascular plants in Himalaya. *Scientific Reports*, 6(1), 24881. <https://doi.org/10.1038/srep24881>.
17. Edmondson, J.L., Stott, I., Davies, Z.G., Gaston, K.J., & Leake, J.R. (2016). Soil surface temperatures reveal moderation of the urban heat island effect by trees and shrubs. *Scientific Reports*, 6(1), 33708. <https://doi.org/10.1038/srep33708>
18. Elliott, E.T., & Cambardella, C.A. (1991). Physical separation of soil organic matter. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 34(1-4), 407-419. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(91\)90124-G](https://doi.org/10.1016/0167-8809(91)90124-G)
19. Eslaminejad, P., Heydari, M., Kakhki, F.V., Mirab-Balou, M., Omidipour, R., Muñoz-Rojas, M., & Lucas-Borja, M.E. (2020). Plant species and season influence soil physicochemical properties and microbial function in a semi-arid woodland ecosystem. *Plant and Soil*, 456, 43-59. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04691-1>.
20. Feng, Q., Yang, H., Liu, Y., Liu, Z., Xia, S., Wu, Z., & Zhang, Y. (2024). Interdisciplinary perspectives on forest ecosystems and climate interplay: a review. *Environmental Reviews*, 33, 1-21. <https://doi.org/10.1139/er-2024-0010>
21. Gerke, J. (2022). The central role of soil organic matter in soil fertility and carbon storage. *Soil Systems*, 6(2), 33. <https://doi.org/10.3390/soilsystems6020033>
22. Gilhen-Baker, M., Roviello, V., Beresford-Kroeger, D., & Roviello, G.N. (2022). Old growth forests and large old trees as critical organisms connecting ecosystems and human health. A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(2), 1529-1538. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01372-y>
23. Harman, G., Khadka, R., Doni, F., & Uphoff, N. (2021). Benefits to plant health and productivity from enhancing plant microbial symbionts. *Frontiers in Plant Science*, 11, 610065. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.610065>
24. Jordan, D., Ponder, F., Jr., & Hubbard, V.C. (2003). Effects of soil compaction, forest leaf litter and nitrogen fertilizer on two oak species and microbial activity. *Applied Soil Ecology*, 23(1), 33-41. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(03\)00003-9](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(03)00003-9)
25. Kemper, W.D., & Rosenau, R.C. (1986). Aggregate stability and size distribution. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, 5, 425-442. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17>
26. Kim, J.S. (2007). Litter decomposition and nitrogen release in three quercus species at temperate broad-leaved forest. *Forest Science and Technology*, 3(2), 123-131. <https://doi.org/10.1080/21580103.2007.9656328>
27. Kooch, Y., & Noghre, N. (2020). Nutrient cycling and soil-related processes under different land covers of semi-arid rangeland ecosystems in northern Iran. *Catena*, 193, 104621. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104621>
28. Kooch, Y., Heidari, F., Haghverdi, K., Gómez-Brandón, M., & Kartalaei, Z.M. (2024). The type of land cover and management affect differently soil functional indicators in a semi-arid ecosystem. *Applied Soil Ecology*, 202, 105553. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105553>
29. Kooch, Y., Samadzadeh, B., & Hosseini, S.M. (2017). The effects of broad-leaved tree species on litter quality and soil properties in a plain forest stand. *Catena*, 150(3), 223-229. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.023>
30. Li, Z., Liang, D., Peng, Q., Cui, Z., Huang, J., & Lin, Z. (2017). Interaction between selenium and soil organic matter and its impact on soil selenium bioavailability: A review. *Geoderma*, 295, 69-79. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.02.019>
31. Liu, D., Huang, Y., An, S., Sun, H., Bhople, P., & Chen, Z. (2018). Soil physicochemical and microbial characteristics of contrasting land-use types along soil depth gradients. *Catena*, 162, 345-353. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.028>
32. Mendoza, O., De Neve, S., Deroo, H., Li, H., François, A., & Sleutel, S. (2025). Soil organic carbon mineralization is controlled by the application dose of exogenous organic matter. *Soil*, 11(1), 105-119. <https://doi.org/10.5194/soil-11-105-2025>
33. Mohamed, H. I., Sofy, M.R., Almoneafy, A.A., Abdelhamid, M.T., Basit, A., Sofy, A.R., & Abou-El-Enain, M.M. (2021). Role of microorganisms in managing soil fertility and plant nutrition in sustainable agriculture. *Plant Growth-promoting Microbes for Sustainable Biotic and Abiotic Stress Management*, 93-114. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66587-6_4
34. Mohammad, A.G., & Adam, M.A. (2010). The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses. *Catena*, 81(2), 97-103. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.01.008>
35. Moscatelli, M.C., Marabottini, R., Massaccesi, L., & Marinari, S. (2022). Soil properties changes after seven years of ground mounted photovoltaic panels in Central Italy coastal area. *Geoderma Regional*, 29, e00500. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00500>

36. Neatrour, M.A., Jones, R.H., & Golladay, S.W. (2005). Correlations between soil nutrient availability and fine-root biomass at two spatial scales in forested wetlands with contrasting hydrological regimes. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(12), 2934–2941. <https://doi.org/10.1139/x05-217>
37. Nelson, D.W.A., & Sommers, L. (1983). Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, 9, 539–579. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c29>
38. Nilsson, M.-C., Wardle, D.A., & Dahlberg, A. (1999). Effects of plant litter species composition and diversity on the boreal forest plant-soil system. *Oikos*, 16–26. <https://doi.org/10.2307/3546566>
39. Osman, K.T., & Osman, K.T. (2013). Physical properties of forest soils. *Forest Soils: Properties and Management*, 19-44. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02541-4_2
40. Poirier, V., Roumet, C., & Munson, A.D. (2018). The root of the matter: Linking root traits and soil organic matter stabilization processes. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 246-259. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.02.016>
41. Pourbabaie, H., Salehi, A., Ebrahimi, S.S., & Khodaparast, F. (2020). Variations of soil physicochemical properties and vegetation cover under different altitudinal gradient, western Hyrcanean forest, north of Iran. <https://doi.org/10.17221/136/2019-JFS>
42. Qu, L., Huang, Y., Ma, K., Zhang, Y., & Biere, A. (2016). Effects of plant cover on properties of rhizosphere and inter-plant soil in a semiarid valley, SW China. *Soil Biology and Biochemistry*, 94, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.11.004>
43. Robertson, G.P., Coleman, D.C., Sollins, P., & Bledsoe, C.S. (1999). *Standard soil methods for long-term ecological research* (Vol. 2). Oxford University Press on Demand. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195120837.001.0001>
44. Sardans, J., & Peñuelas, J. (2021). Potassium control of plant functions: Ecological and agricultural implications. *Plants*, 10(2), 419. <https://doi.org/10.3390/plants10020419>
45. Seddighi Chafjiri, A.N., Hasan Zad Navroudi, I., Taheri Abkenar, K., & Pourbabaie, H. (2021). Effect of protection on quantity and quality characteristics of Persian oak (*Quercus macranthera* C. A. Mey) in Roudbar forests of Guilan province. *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(11), 263-275.
46. Sharma, M., Setia, R., Rishi, M., Kumar, V., Singh, R., & Pateriya, B. (2025). Short-term carbon mineralization from soils under different land uses in northwest India. *Soil Advances*, 3, 100038. <https://doi.org/10.1016/j.soilad.2025.100038>
47. Singh, J.S., Singh, D.P., & Kashyap, A.K. (2009). A comparative account of the microbial biomass-N and N-mineralization of soils under natural forest, grassland and crop field from dry tropical region, India. *Plant Soil Environ*, 55(6), 223-230. <https://doi.org/10.17221/1021-PSE>
48. Six, J., Callewaert, P., Lenders, S., De Gryze, S., Morris, S.J., Gregorich, E.G., Paul, E.A., & Paustian, K. (2002). Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. *Soil Science Society of America Journal*, 66(6), 1981-1987. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1981>
49. Tavakoli, M., Kooch, Y., & Akbarinia, M. (2018). Frequency and diversity of worms in topsoil of degraded and reclaimed forest habitats of the Caspian region. *Iranian Journal of Forest*, 10(3), 293–306. (In Persian)
50. Timmis, K., & Ramos, J.L. (2021). The soil crisis: the need to treat as a global health problem and the pivotal role of microbes in prophylaxis and therapy. *Microbial Biotechnology*, 14(3), 769-797. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13771>
51. Toca, L., Morrison, K., Artz, R., Gimona, A., & Quaife, T. (2022). High resolution C-band SAR backscatter response to peatland water table depth and soil moisture: a laboratory experiment. *International Journal of Remote Sensing*, 43(14), 5231-5251. <https://doi.org/10.1080/01431161.2022.2131478>
52. Tufa, M., Melese, A., & Tena, W. (2019). Effects of land use types on selected soil physical and chemical properties: The case of Kuyu District, Ethiopia. *Eurasian Journal of Soil Science*, 8(2), 94-109. <https://doi.org/10.18393/ejss.510744>
53. Ulusu, F., & Darıcı, C. (2023). The influence of tannins purified from Eastern Mediterranean Region plants (*Pinus brutia* Ten. and *Quercus coccifera* L.) on carbon mineralization: Antimicrobial and antimutagenic evaluation. *Anatolian Journal of Botany*, 7(1), 60-69. <https://doi.org/10.30616/ajb.1259084>
54. Wang, Q., & Wang, S. (2006). Microbial biomass in subtropical forest soils: effect of conversion of natural secondary broad-leaved forest to *Cunninghamia lanceolata* plantation. *Journal of Forestry Research*, 17(3), 197–200. <https://doi.org/10.1007/s11676-006-0046-9>
55. Wang, W., Jia, T., Qi, T., Li, S., Degen, A.A., Han, J., & Shang, Z. (2022). Root exudates enhanced rhizobacteria complexity and microbial carbon metabolism of toxic plants. *Iscience*, 25(10). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.105243>
56. Wollum, A.G. (1982). Cultural methods for soil microorganisms. *Methods of Soil Analysis: part 2 Chemical and Microbiological Properties*, 9, 781-802. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c37>

57. Xiang, T., Qiang, F., Liu, G., Liu, C., Liu, Y., Ai, N., & Ma, H. (2023). Soil quality evaluation of typical vegetation and their response to precipitation in Loess Hilly and Gully Areas. *Forests*, 14(9), 1909. <https://doi.org/10.3390/f14091909>.
58. Yengwe, J., Gebremikael, M.T., Buchan, D., Lungu, O., & De Neve, S. (2018). Effects of *Faidherbia albida* canopy and leaf litter on soil microbial communities and nitrogen mineralization in selected Zambian soils. *Agroforestry Systems*, 92, 349-363. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-0063-4>
59. Zancan, S., Trevisan, R., & Paoletti, M.G. (2006). Soil algae composition under different agro-ecosystems in North-Eastern Italy. *Agric Ecosyst Environ*, 112(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.06.018>
60. Zhao, S., & Riaz, M. (2024). Plant–soil interactions and nutrient cycling dynamics in tropical rainforests. In *Environment, Climate, Plant and Vegetation Growth*, 229-264. https://doi.org/10.1007/978-3-031-69417-2_8
61. Zhou, P., Luukkanen, O., Tokola, T., & Nieminen, J. (2008). Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed. *Catena*, 75(3), 319-325. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.010>