

The Effect of Land Use Change on Root Characteristics and Soil Enzyme Dynamics in the Hyrcanian Ecosystem

F. Heidari¹, Y. Kooch^{1*}

1- Department of Range Management. Faculty of Natural Resources & Marine Sciences. Tarbiat Modares University. Noor. Iran

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

Received: 10 February 2026

Revised: 25 May 2026

Accepted: 01 June 2026

Available Online: 01 June 2026

How to cite this article:

Heidari, F., & Kooch, Y. (2026). The effect of land use change on root characteristics and soil enzyme dynamics in the Hyrcanian ecosystem. *Journal of Water and Soil*, 40(1), 89-108. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2026.97791.1526>

Introduction

The Hyrcanian region, one of the richest forest ecosystems in Iran, is characterized by dense and diverse vegetation that plays a fundamental role in environmental sustainability, regulation of biogeochemical cycles, and support of biodiversity. However, in recent years, increasing human pressures and unsustainable land-use practices have led to the degradation of parts of the Caspian forest ecosystems and a substantial reduction in vegetation cover in some areas. In this context, fine roots, due to their crucial role in nutrient cycling and high sensitivity to land-use changes, together with coarse roots because of their structural functions, and soil enzymes as sensitive indicators of land management, are considered effective tools for assessing the impacts of land-use change on ecosystem functioning. Therefore, this study aimed to investigate the effects of vegetation degradation and restoration on root characteristics and soil enzyme activities in the Caspian region.

Materials and Methods

The study area is located in Kelarabad district, western Mazandaran Province, Iran. Seven different land-use types were selected in the study area, including (1) natural forest, (2) degraded forest, (3) afforestation with *Alnus subcordata* C. A. Mey., (4) afforestation with *Acer insigne* Boiss., (5) mixed afforestation with *Alnus subcordata* C. A. Mey.–*Acer insigne* Boiss., (6) afforestation with the non-native coniferous species *Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl., and (7) prairie. For each vegetation type, three one-hectare sample plots (100 × 100 m) were established. Within each plot, soil samples were collected from the four corners at three depths (0–10, 10–20, and 20–30 cm) using a 30 × 30 cm sampling frame. Consequently, a total of 36 soil samples were collected from each habitat. Simultaneously, root samples were collected from the 0–30 cm depth within the same sampling units, resulting in 12 root samples per habitat, which were then transported to the laboratory. After transfer to the laboratory, root traits and soil properties were determined using standard analytical methods. All statistical analyses were performed using SPSS software (version 22). In addition, principal component analysis (PCA) was conducted using PC-ORD software to examine the relationships among vegetation cover, root characteristics, and soil enzyme activities across different soil depths.

Results and Discussion

The results of the assessment of root and soil ecochemical characteristics across the studied habitats indicated that the highest fine-root biomass and coarse root biomass occurred in the natural forest habitat. Specifically, coarse root biomass (482.38 kg ha⁻¹) and the concentrations of carbon (40.72%), nitrogen (0.51%), phosphorus (2.64%), potassium (1.56%), calcium (0.77%), and magnesium (0.42%) in fine roots were higher in the natural forest than in the other habitats. In contrast, the highest carbon-to-nitrogen ratios of both coarse roots (91.92) and



Authors retain the copyright. 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.2026.97791.1526>

fine roots (89.27) were observed in the degraded forest habitat. Regarding soil enzyme activities, the highest activities of acid phosphatase ($420.58 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$), arylsulfatase ($310.58 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$), and invertase ($198.08 \mu\text{g glucose g}^{-1} \text{h}^{-1}$) were recorded in the natural forest habitat at the 0–10 cm soil depth. The highest urease activity ($33.84 \mu\text{g NH}_4^+ -\text{N g}^{-1} \text{h}^{-1}$) was observed in the *Alnus subcordata*-restored habitat. Across all studied habitats, enzyme activities decreased with increasing soil depth, reaching their lowest values in the deeper soil layers.

Conclusion

The available evidence suggests that land degradation and land-use change, through reductions in vegetation quantity and diversity, can alter soil biological processes and lead to changes in root characteristics and soil enzyme activities. Because these biological indicators play a crucial role in regulating nutrient cycling and maintaining soil quality, understanding their responses to forest degradation and restoration is particularly important, especially in temperate ecosystems. The results of this study demonstrated that natural forest and restored forest habitats, characterized by higher soil enzyme activities, greater root biomass, and more favorable soil ecochemical conditions, exhibited superior biological performance compared with degraded and prairie habitats. Overall, the findings indicate that soil biological indicators—particularly root traits and soil enzyme activities—are sensitive and effective tools for evaluating the success of vegetation restoration and detecting the impacts of degradation in forest ecosystems of the Hyrcanian region. Therefore, the application of these indicators can provide a robust scientific basis for soil quality monitoring and the development of sustainable restoration and management programs in this region.

Acknowledgements

This work is based upon research funded by Iran National Science Foundation (INSF) under postdoctoral research project No.4038546.

Keywords: Coarse root, Fine root, Soil biochemical activity, Soil depth, Vegetation change

تأثیر تغییر کاربری زمین بر مشخصه‌های ریشه و پویایی آنزیم‌های خاک در اکوسیستم خزری

فاطمه حیدری^۱ - یحیی کوچ^{۱*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۱

چکیده

ناحیه خزری یکی از غنی‌ترین اکوسیستم‌های جنگلی ایران است که نقش مهمی در پایداری زیست‌محیطی و چرخه عناصر غذایی دارد. با این حال، تخریب ناشی از فعالیت‌های انسانی موجب کاهش پوشش گیاهی و اختلال در عملکرد زیستی خاک شده است. از آنجاکه مشخصه‌های ریشه و فعالیت آنزیم‌های خاک شاخص‌های حساسی نسبت به تغییر کاربری اراضی هستند، این پژوهش با هدف بررسی اثر تخریب و احیای پوشش گیاهی بر ویژگی‌های ریشه و فعالیت‌های آنزیمی خاک در ناحیه خزری انجام شد. مطالعه در حوزه کلارآباد (غرب مازندران) و در هفت نوع کاربری شامل جنگل طبیعی، جنگل کاری آمیخته با گونه پلت-توسکا، جنگل کاری خالص با گونه پلت، جنگل کاری خالص با گونه توسکا، جنگل کاری با گونه غیربومی سکویا، جنگل مخروطیه و رویشگاه علفزار انجام گرفت. در هر رویشگاه سه قطعه یک‌هکتاری انتخاب و نمونه‌برداری خاک در سه عمق صفر تا ۱۰، ۱۰-۲۰ و ۲۰-۳۰ سانتی‌متر انجام شد. هم‌زمان نمونه‌های ریشه از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر برداشت گردید. بدین منظور در هر یک از رویشگاه‌های مورد مطالعه ۱۲ نمونه ریشه و ۳۶ نمونه خاک از سه عمق مورد مطالعه برداشت و جهت تجزیه و تحلیل به آزمایشگاه انتقال داده شد. ویژگی‌های ریشه، عناصر غذایی ریشه و فعالیت آنزیم‌های خاک با روش‌های استاندارد اندازه‌گیری و تحلیل آماری کلیه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۲ انجام شد. همچنین از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای بررسی روابط بین پوشش گیاهی، مشخصه‌های ریشه و فعالیت‌های آنزیمی خاک در عمق‌های مختلف استفاده شد. طبق نتایج پژوهش حاضر بیشترین زی‌توده ریزریشه و درشت‌ریشه و نیز بالاترین مقادیر عناصر غذایی ریزریشه در رویشگاه جنگل طبیعی مشاهده شد، در حالی که نسبت کربن به نیتروژن ریشه‌ها در جنگل مخروطیه بیشینه بود. فعالیت آنزیم‌های اسیدفسفاتاز، آریل سولفاتاز و اینورتاز در جنگل طبیعی و در عمق سطحی خاک بیشترین مقدار را داشت و بیشترین فعالیت اوره‌آز در رویشگاه احیاشده با توسکا ثبت شد. در تمامی رویشگاه‌ها با افزایش عمق خاک، فعالیت آنزیم‌ها کاهش یافت. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تخریب و تغییر کاربری اراضی با کاهش پوشش گیاهی موجب افت زی‌توده ریشه و فعالیت آنزیم‌های خاک می‌شود، در حالی که رویشگاه‌های طبیعی و احیاشده از عملکرد زیستی مطلوب‌تری برخوردارند. بنابراین، مشخصه‌های ریشه و فعالیت آنزیم‌های خاک شاخص‌های مناسبی برای ارزیابی اثرات تخریب و موفقیت برنامه‌های احیای پوشش گیاهی در جنگل‌های ناحیه خزری محسوب می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: تغییر پوشش گیاهی، درشت‌ریشه، ریزریشه، فعالیت اکوشیمی، عمق خاک

مقدمه

اکوسیستم‌ها بر روی خاک است. پوشش گیاهی به‌عنوان یک عنصر حیاتی در کره زمین، نقش بسزایی در حفظ تعادل اکولوژیکی، کنترل آب و هوا (اقلیم)، حفاظت از رویشگاه‌ها، خاک و فرسایش را ایفا می‌کند (Wright et al., 2021). شرایط نامساعد محیطی، رشد سریع جمعیت و افزایش تقاضا برای سوخت، محصولات زراعی، پناهگاه و مسائلی از این قبیل موجب شده که پوشش طبیعی زمین و جنگل‌ها با سرعت هشداردهنده‌ای تخریب شود (Boromand et al., 2015). در حال حاضر حجم عظیمی از سطوح جنگلی و علفزار دچار تخریب شده است که این تخریب، با اختلال در ویژگی‌های فیزیکی و اکولوژیکی و

حفاظت از آب و خاک و تأمین بخشی از نیازهای انسانی، از جمله مهم‌ترین دلایلی بوده که جنگل‌ها و مراتع از گذشته تاکنون مورد توجه قرار گرفته‌اند. پوشش گیاهی و اکوسیستم‌های طبیعی، بویژه جنگل‌ها و مراتع، در برگیرنده منابع عظیمی از ذخایر ژنتیکی و تنوعی از گونه‌های گیاهی هستند که بخش بزرگی از تنوع زیستی را در خود جای داده‌اند و نقشی حیاتی در حفظ تعادل زیست‌بومی ایفا می‌کنند (Kiapash et al., 2017; Košanin et al., 2023). یکی از مهمترین خدمات اکوسیستمی جنگل‌ها و مراتع، اثرات پوشش گیاهی این

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

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

کاهش بهره‌وری زمین آشکار می‌شود، یک خطر محیطی عمده است که امنیت غذایی و معیشت پایدار را در سراسر جهان تهدید می‌کند (Cowie et al., 2018; Zhao et al., 2021; Zhao et al., 2023). یکی از چالش‌های مهم اقتصادی-اجتماعی بسیاری از کشورها از جمله ایران، تخریب پوشش گیاهی است. در طی چند دهه گذشته وسعت پوشش گیاهی اراضی ایران به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است که تخریب رویشگاه‌های طبیعی منجر به تخریب زمین و خاک می‌شود (Kohestani et al., 2021). تخریب اکوسیستم‌های طبیعی و تغییرات پوشش طبیعی عواقب جدی بر اکوسیستم‌ها دارد و سبب از بین رفتن بسیاری از خدمات اکوسیستمی می‌شود (Kamiab & Shabani, 2019). به دنبال تخریب جنگل، کاهش و تغییر پوشش گیاهی، تغییرات قابل ملاحظه‌ای در مشخصه‌های لاشبرگ و خاک ایجاد می‌شود. این تخریب با کاهش کیفیت و ورودی مواد آلی و ریزش لاشبرگ‌ها به خاک و تسریع تجزیه لاشبرگ همراه است که در نتیجه منجر به فرسایش خاک، کاهش حاصلخیزی و اختلال در چرخه عناصر غذایی خاک و کاهش میکروارگانیسم‌های خاک می‌شود (Zarafshar et al., 2019). فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه جنگل‌زدایی، تأثیر قابل توجهی بر کیفیت خاک دارد. به عبارت دیگر، از بین بردن پوشش گیاهی می‌تواند به‌طور مستقیم به کاهش کیفیت خاک منجر شود. از این‌رو، ارزیابی کیفیت خاک به‌عنوان یک شاخص مهم در مدیریت پایدار خاک به‌شمار می‌آید (Kooch et al., 2018). به‌طور کلی ویژگی‌های زیستی و اکوشیمیایی خاک، به‌دلیل حساسیت بالا به تغییرات مدیریتی، شاخص‌های مناسبی برای ارزیابی کیفیت و سلامت خاک در زیستگاه‌های طبیعی محسوب می‌شوند و در مقایسه با سایر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک، تأثیر بیشتری از تخریب و احیاء پوشش گیاهی می‌پذیرند (Dipesh & Schuler, 2013).

ریشه‌های گیاهان، شامل ریزریشه‌ها (با قطری کمتر از ۲ میلی‌متر) و درشت‌ریشه‌ها (با قطری بیش از ۲ میلی‌متر)، بخش قابل‌توجهی از اجزای زیرزمینی خاک را در اکوسیستم‌های طبیعی تشکیل می‌دهند. ریزریشه‌ها نقش اساسی در جریان کربن و چرخه عناصر غذایی در خاک ایفا می‌کنند (Dipesh & Schuler, 2013). از این‌رو، میزان تولید و نرخ تجزیه آن‌ها تأثیر مستقیمی بر فرآیندهای بیوژئوشیمیایی در اکوسیستم‌های مختلف داشته و به‌عنوان منبع اصلی کربن آلی زیرزمینی، تغییرات مهمی را در ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک ایجاد می‌کنند (Yuan et al., 2011). پوشش گیاهی به واسطه ریزریشه‌ها، آب و عناصر غذایی را از خاک جذب می‌کند (Leuschner & Hertel, 2003). ارزیابی مشخصه‌های ریزریشه‌ها به‌دلیل حساسیت بالای آن‌ها به تغییرات مدیریتی و کوتاه بودن دوره رشد آن‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد (Azaryan et al., 2021). درشت‌ریشه‌ها، با ابعاد بزرگ‌تر و نقش ساختاری برجسته، عامل مهمی در پایداری و استحکام بخش‌های هوایی گیاهان محسوب می‌شوند (Cardinale et al.,

2007). اگرچه فرآیند تجزیه و بازگشت آن‌ها به خاک نسبت به ریزریشه‌ها کندتر است، اما همچنان تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد اکوسیستم‌های گیاهی و پویایی رویشگاه دارند (Tamoooh et al., 2008). کاربری اراضی و نحوه بهره‌برداری از زمین، تأثیر مستقیمی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی محیط داشته و در نتیجه، بر وضعیت کلی آنزیم‌های خاک اثرگذار است (Varesteh Khanlari et al., 2020). تنوع، تراکم و زوال پوشش گیاهی می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بر میزان و الگوی فعالیت آنزیمی خاک تأثیرگذار باشد، چراکه تغییر در ترکیب پوشش گیاهی موجب تغییر در ورود مواد آلی، ریزوسفر گیاهی و شرایط میکروبی محیط خاک می‌شود (Zeng et al., 2009). آنزیم‌های خاک تغییر و تحول عناصر خاک مانند کربن، نیتروژن، فسفر و گوگرد و سایر عناصر را هدایت می‌کنند و تا حدودی منعکس‌کننده بهره‌برداری عناصر از محصول از عناصر غذایی خاک هستند (Van der Heijden et al., 2008). رابطه بین آنزیم‌ها با مشخصه‌های زیستی و بیوشیمی، سهولت در اندازه‌گیری و عکس‌العمل سریع آن‌ها به تغییرات، آنزیم‌ها به‌عنوان شاخص‌های پتانسیل کیفیت خاک مطرح شده‌اند (Martinez-Salgado et al., 2010). آنزیم اوره‌آز نقش اساسی در فرآیند معدنی‌شدن نیتروژن از ترکیبات آلی ایفا می‌کند. تخریب پوشش گیاهی می‌تواند فعالیت این آنزیم را در خاک تحت تأثیر قرار داده و از طریق تغییر در میزان ورود مواد آلی و پویایی میکروبی، بر چرخه نیتروژن و کارکردهای زیستی خاک اثرگذار باشد (Silva et al., 2019). آنزیم اسیدفسفاتاز به‌دلیل تسریع در فرآیند هیدرولیز استر-فسفات سبب آزادسازی فسفات به خاک می‌شود که می‌تواند توسط گیاهان و جانوران خاکی جذب شود و از آنزیم‌های مؤثر در چرخه فسفر است که در خاک‌های اسیدی فعالیت بیشتری دارد (Pang, 2009). آنزیم آریل سولفاتاز نقش مهمی در تجزیه مواد آلی و معدنی دارد و در مقایسه با آنزیم‌های دیگر حساسیت زیادی به تغییرات دارد (Zeng et al., 2009). آنزیم اینورتاز سبب تسریع در فرآیند هیدرولیز ساکاروز می‌شود و شاخص مهمی برای کیفیت خاک است (Pang, 2009). مرور منابع حاکی از آن است که مطالعات پیشین بیشتر بر مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تمرکز داشته‌اند (et al., 2024a; Mohmedi et al., 2024; Gao et al., 2025). تخریب و احیاء پوشش گیاهی با گونه‌های مختلف بر پویایی فعالیت آنزیمی خاک و اجزای زیرزمینی خاک در رویشگاه‌های مختلف، به‌ویژه در ناحیه خزری، مطالعات اندکی انجام شده است.

ناحیه خزری به‌عنوان یکی از غنی‌ترین اکوسیستم‌های جنگلی ایران، با برخورداری از پوشش گیاهی متراکم و متنوع، نقش مهمی در پایداری زیست‌محیطی، تنظیم چرخه‌های بیوژئوشیمیایی و حفظ تنوع زیستی ایفا می‌کند. باوجود این اهمیت، پژوهش‌های پیشین در این منطقه عمدتاً به تغییرات ساختاری پوشش گیاهی یا ویژگی‌های شیمیایی خاک محدود شده‌اند و کمتر مطالعه‌ای به بررسی همزمان

undulatifolius و *Setaria viridis* قرار دارد.

فرآیند جمع‌آوری داده‌ها

در این بررسی بخش‌هایی از اراضی فوق‌الذکر که کمترین اختلاف ارتفاع، شیب و جهت شیب را از یکدیگر نشان دادند، به‌عنوان نمونه‌های مطالعاتی انتخاب شدند، شرح تفصیلی هر رویشگاه در جدول ۱ گزارش شده است. سه قطعه نمونه یک هکتاری (۱۰۰ متر × ۱۰۰ متر) در هر یک از پوشش‌های گیاهی فوق‌الذکر مدنظر قرار گرفت. در هر یک از قطعات یک هکتاری، تعداد ۴ نمونه (از چهار گوشه قطعه نمونه یک هکتاری) از لایه معدنی خاک (سطح ۳۰ سانتی‌متر × ۳۰ سانتی‌متر از عمق صفر تا ۱۰، ۲۰-۳۰ و ۳۰-۲۰ سانتی‌متری) برداشت شد. در هر رویشگاه در مجموع ۳۶ نمونه خاک (۴ نمونه ۳ × ۳ قطعه نمونه ۳ × عمق) جمع‌آوری شد. هم‌زمان با نمونه‌برداری خاک، نمونه‌های ریشه از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک و در همان واحدهای نمونه‌برداری برداشت گردید که در مجموع ۱۲ نمونه (۴ نمونه ۳ × ۳ قطعه نمونه) ریشه در هر رویشگاه برداشت و به آزمایشگاه انتقال داده شد.

تجزیه آزمایشگاهی مشخصه‌های خاک و ریشه

یک بخش از نمونه‌های خاک جهت انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی، پس از هوا خشک شدن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. مشخصات خاک و ریشه، با بهره‌گیری از روش‌های استاندارد آزمایشگاهی به‌صورت زیر انجام گرفت. بافت خاک با استفاده از روش هیدرومتری و رطوبت خاک به روش توزین مورد اندازه‌گیری و سنجش قرار گرفت (Jafari Haghighi, 2003). مشخصه‌های شیمیایی خاک شامل: واکنش خاک به روش پتانسیومتری از طریق دستگاه pH متر الکتریکی، هدایت الکتریکی به‌وسیله EC سنج، کربن آلی با استفاده از روش والکی-بلاک و نیتروژن کل به روش کج‌لدال مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند (Jafari Haghighi, 2003). ریزریشه‌ها و درشت‌ریشه‌ها از نمونه‌ها جداسازی (بر مبنای عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری) و با استفاده از الک ۲ میلی‌متری شستشو داده شدند. سپس نمونه‌ها در آون به مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. در نهایت پس از توزین زی‌توده آنها محاسبه گردید (Neatrour et al., 2005). ویژگی‌های ریشه شامل زی‌توده (به روش توزین)، اندازه‌گیری غلظت کربن در درشت‌ریشه و ریزریشه از روش والکی-بلاک و اندازه‌گیری غلظت نیتروژن درشت‌ریشه و ریزریشه از روش کج‌لدال صورت گرفت (Pransiska et al., 2016).

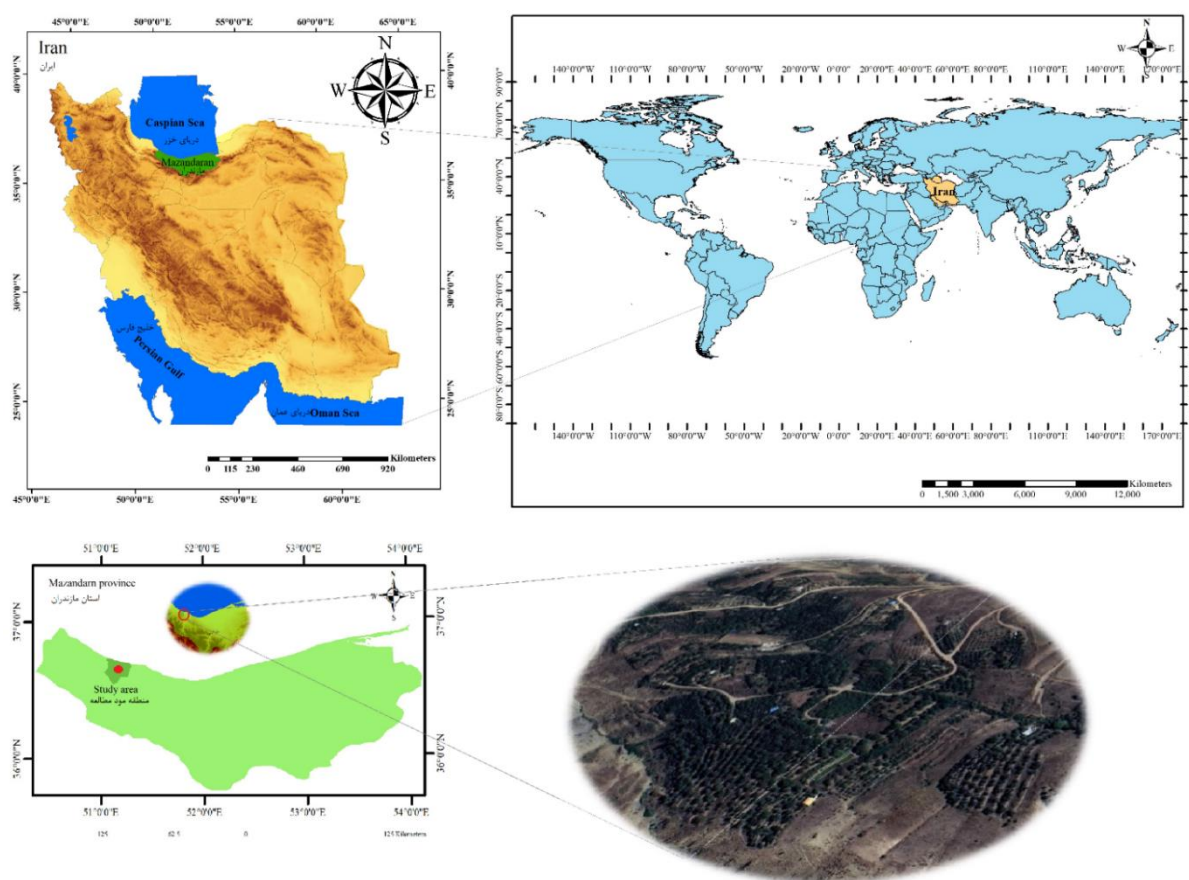
شاخص‌های اکوشیمی خاک و ویژگی‌های ریشه در شرایط تخریب و احیای پوشش گیاهی پرداخته است. از سوی دیگر، افزایش فشارهای انسانی و بهره‌برداری ناپایدار در سال‌های اخیر موجب تخریب بخش‌هایی از این جنگل‌ها و پیدایش رویشگاه‌هایی با پوشش گیاهی ضعیف یا بدون پوشش شده است. در چنین شرایطی، پژوهش حاضر با نگاهی تلفیقی به دنبال آن است که نشان دهد تخریب و احیای پوشش گیاهی چگونه بر شاخص‌های اکوشیمی خاک و ویژگی‌های ریشه تأثیر می‌گذارد. برای این منظور، سه هدف (۱) مقایسه شاخص‌های اکوشیمی خاک در رویشگاه‌های تخریب‌یافته، احیاشده و دست‌نخورده؛ (۲) بررسی ویژگی‌های ریشه در این سه شرایط؛ (۳) ارزیابی ارتباط بین نوع پوشش گیاهی و تغییرات شاخص‌های اکوشیمی خاک به‌منظور ارائه مبنایی علمی برای احیای اکوسیستم‌های خزری دنبال می‌شود. به این ترتیب، پژوهش حاضر خلأ موجود در مطالعات پیشین را که نبود بررسی هم‌زمان شاخص‌های اکوشیمی خاک و ویژگی‌های ریشه در شرایط تخریب و احیای پوشش گیاهی است، پر می‌کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد بررسی در رویشگاه‌های جنگلی کلارآباد قرار گرفته است (شکل ۱). حداقل ارتفاع از سطح دریا ۵۰ متر، حداکثر ارتفاع ۱۴۴ متر، شیب منطقه بین صفر تا ۵ درصد و متوسط بارندگی سالانه ۱۳۰۰ میلی‌متر است. بر اساس سامانه طبقه‌بندی خاک USDA، خاک‌های غالب منطقه مورد مطالعه از نظر بافت، از نوع لوم رسی (Clay Loam) و از نظر رده‌بندی ژنتیکی، در گروه آلفی‌سول‌ها (Alfisols) قرار می‌گیرند. این خاک‌ها بر بستر سنگ‌های آهک دولومیتی مربوط به دو دوره زمین‌شناسی ژوراسیک بالایی و کرتاسه پایینی تشکیل شده‌اند. به منظور حفاظت از عرصه‌های جنگلی و باغ‌ها در برابر تصرفات غیرمجاز، حدود ۳۸ هکتار از اراضی حاشیه شمالی پارسل ۱۱۲ (خرماچال) واقع در سری ۱ حوزه ۳۸ طرح جنگل‌داری تپله‌کنار سلمان‌شهر، در سال ۱۳۶۸ جنگل‌کاری شده است. در این پژوهش، به بررسی ۷ نوع کاربری مختلف در منطقه مورد مطالعه پرداخته شد.

۱. جنگل طبیعی (تقریباً دست‌نخورده) ممرز و انجیلی
۲. جنگل مخروطی با گونه‌های ممرز و انجیلی
۳. توده دست‌کاشت خالص با گونه پهن‌برگ توسکا
۴. توده دست‌کاشت خالص با گونه پهن‌برگ پلت
۵. توده دست‌کاشت آمیخته با گونه‌های پهن‌برگ پلت - توسکا
۶. توده دست‌کاشت خالص با گونه سوزنی‌برگ غیربومی سکوبا
۷. علف‌زار ثانویه شکل‌گرفته پس از رهاشدگی اراضی با دوره کوتاه کشت، که در حال حاضر تحت غالبیت گونه‌های *Brachypodium* *Oplismenus* *Microstegium vimineum* *pinnatum*



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان مازندران، شمال ایران
Figure 1- Location of the study area in Mazandaran Province, northern Iran

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

نخست، نرمال بودن و همگنی واریانس داده‌ها با استفاده از آزمون‌های کولموگروف-اسمیرنوف و لون مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی تفاوت یا عدم تفاوت مقادیر مشخصه‌های ریشه و فعالیت‌های اکوشیمی خاک در ارتباط با انواع پوشش‌های گیاهی و عمق‌های مختلف خاک به ترتیب از تجزیه واریانس یک طرفه و دو طرفه استفاده شد. آزمون دانکن هم به منظور مقایسه میانگین داده‌ها بکار گرفته شد. کلیه تجزیه و تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۲ صورت پذیرفت. همچنین، به منظور تعیین ارتباط شاخص اکوشیمی خاک و ریشه در ارتباط با نوع رویشگاه‌ها، آنالیز چند متغیره (PCA) با ایجاد ماتریس حاصله با استفاده از نرم‌افزار Origin Pro 2024b مورد بررسی قرار گرفت.

برای اندازه‌گیری غلظت کلسیم، پتاسیم، فسفر و منیزیم ریشه، نمونه‌های ریشه در محلول H_2SO_4 هضم شدند و با استفاده از Thermal-Jarrell-Ash ICP اندازه‌گیری شدند (Parkinson & Allen, 1975). اندازه‌گیری فعالیت آنزیم اوره آز با استفاده از محلول میلی‌مول اوره به عنوان سوبسترا و تحت شرایط استاندارد (۲ ساعت در دمای ۲۷ درجه سانتی‌گراد) تعیین شد. نرخ فعالیت آنزیم اسید فسفاتاز با استفاده از محلول ۱۵ میلی‌مولار پارانیتروفنل فسفات به عنوان سوبسترا و تحت شرایط استاندارد (pH=11 به مدت یک ساعت در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد) اندازه‌گیری شد. فعالیت آنزیم آریل سولفاتاز پس از انکوباسیون خاک در پارانیتروفنل سولفات به مدت ۱ ساعت و دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد و اندازه‌گیری پارانیتروفنل آزاد شده در طول هیدرولیز آنزیمی توسط اسپکتروفتومتری مدل ۷۵۰۰ UV در طول موج ۴۲۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. آنزیم اینورتاز از محلول گلوکز ۱/۲ درصد به عنوان سوبسترا با دوره انکوباسیون ۳ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد (Alef & Nannipieri, 1995).

جدول ۱- توصیف پوشش اراضی و ویژگی‌های فیزیوگرافی منطقه مورد مطالعه
Table 1- Description of land covers and physiographic characteristics in study area

رویشگاه Habitat	گونه‌های غالب Dominant species	مشخصه‌های فیزیوگرافی Physiographic characteristics		
		ارتفاع Altitude (m)	شیب Slope (%)	جهت Aspect
جنگل طبیعی Natural Forest	<i>Carpinus betulus</i> L. (143 n/ha) <i>Parrotia persica</i> C.A. Meyer. (91 n/ha)	105-111	1-4	شمال North
جنگل کاری با گونه پلت-توسکا Plantation with Alnus-Acer	<i>Alnus subcordata</i> C.A.Mey. + <i>Acer insigne</i> Boiss.	110-116	3-5	شمال North
جنگل کاری با گونه درختی توسکا Plantation with Al. Subcordata	<i>Alnus subcordata</i> C.A.Mey.	98-106	2-5	شمال North
جنگل کاری با گونه درختی پلت Plantation with Ac. Insigne	<i>Acer insigne</i> Boiss	107-115	1-4	شمال North
جنگل کاری با گونه درختی سکویا Plantation with S. Sempervirens	<i>Sequoia sempervirens</i> (D. Don) Endl.	103-109	3-5	شمال North
جنگل تخریب یافته Degraded forest	<i>Carpinus betulus</i> L (18 n/ha) <i>Parrotia persica</i> C.A. Meyer. (10 n/ha)	99-110	2-5	شمال North
علفزار Prairie	<i>Brachypodium pinnatum</i> , <i>Microstegium vimineum</i> , <i>Oplismenus undulatifolius</i> , <i>Setaria viridis</i>	106-113	1-4	شمال North

جدول ۲- اثر رویشگاه‌های مورد بررسی بر مشخصه‌های خاک
Table 2- The effect of different habitat on soil characteristics

مشخصه‌های خاک Soil properties	رویشگاه Habitat		عمق خاک Depth		عمق × رویشگاه Habitat×Depth	
	مقدار F F test	معنی‌داری P P value	مقدار F F test	معنی‌داری P P value	مقدار F F test	معنی‌داری P P value
شن Sand	3.388	0.003	4.030	0.019	0.687	0.763
سیلت Silt	1.772	0.106	10.817	0.000	0.243	0.996
رس Clay	4.693	0.000	4.408	0.013	0.472	0.930
رطوبت Moisture	4.368	0.000	0.077	0.926	0.241	0.996
واکنش خاک pH	15.205	0.000	0.122	0.886	0.151	1.000
هدایت الکتریکی خاک Electrical Conductivity	1.177	0.319	1.573	0.210	0.123	1.000
کربن آلی خاک Total organic C	9.730	0.000	35.730	0.000	0.725	0.727
نیتروژن خاک Total N	20.062	0.000	26.331	0.000	1.753	0.057
نسبت کربن به نیتروژن C/N ratio	5.631	0.000	1.862	0.158	0.562	0.871

نتایج

مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بجز مشخصه سیلت و هدایت الکتریکی خاک اختلاف معنی‌داری را در رویشگاه‌های مختلف مورد مطالعه نشان داده است.

مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

نتایج به‌دست آمده از اثر رویشگاه‌های مختلف و عمق بر روی

جدول ۳- میانگین (± انشباه معیار) مشخصه‌های خاک در اعماق و کاربری‌های مختلف
Table 3- Mean (± standard error) soil properties in different depths and land use

مشخصه‌های خاک Soil properties	عمق (سانتی متر) Depth (cm)	رویشگاه Studied sites						
		جنگل طبیعی Natural forest	پلت-توسکا Alnus-Acer	توسکا Al. Subcordata	پلت Ac. Insigne	سکویا S. Sempervirens	جنگل مخروبه Degraded forest	علفزار Prairie
شن (درصد) Sand (%)	0-10	23.58±2.59ab	18.41±1.87b	26.16±2.59ab	28.83±3.78a	26.58±2.82ab	31.75±3.96a	33.08±4.58a
	10-20	22.66±1.95	22.75±1.82	24.08±1.78	26.33±3.10	25.66±2.72	26.58±2.95	29.50±4.69
	20-30	20.58±1.22	22.66±2.19	20.66±2.12	24.25±2.42	17.91±1.85	27.16±2.87	24.66±3.87
	Mean	22.27±1.14C	21.27±1.15C	23.63±1.28BC	26.47±1.79A-C	23.38±1.55BC	28.50±1.89AB	29.08±2.53A
	0-10	36.50±3.39	42.91±2.19	33.33±3.52B	34.75±3.80	35.83±2.07	33.58±5.53	37.16±2.85
سیلت (درصد) Silt (%)	10-20	37.91±1.85	44.16±3.38	37.41±2.38AB	39.83±3.19	36.83±3.61	40.91±3.81	42.50±7.80
	20-30	43.33±4.08ab	50.75±2.93a	43.41±3.07Aab	47.00±2.77ab	45.41±2.60ab	40.00±3.25b	48.00±4.07ab
	Mean	39.25±1.88	45.94±1.71	38.05±1.83	40.52±2.02	39.36±1.75	38.16±2.48	42.55±3.08
	0-10	39.91±2.68	38.66±2.46	40.50±1.95	36.41±4.53	37.58±3.35	34.66±4.61	29.75±3.25
	10-20	39.41±2.04a	33.08±2.39ab	38.50±2.08a	33.83±1.96ab	37.50±3.31a	32.50±3.79ab	28.00±3.96b
رُس (درصد) Clay (%)	20-30	36.08±3.62a	26.58±2.36b	35.91±3.25a	28.75±1.48ab	36.66±1.39a	32.83±2.62ab	27.33±2.23b
	Mean	38.47±1.62A	32.77±1.58BC	38.30±1.43A	33.00±1.75BC	37.25±1.59AB	33.33±2.11A-C	28.36±1.81C
	0-10	33.47±2.52	28.91±1.40	30.58±2.32	33.52±2.42	37.93±2.15	32.35±1.83	24.64±2.75
	10-20	34.22±3.01	31.55±4.01	31.54±2.16	33.86±2.55	33.88±1.17	32.48±1.56	25.67±1.61
	20-30	33.81±2.57	32.43±5.7±	31.61±1.55	34.24±4.77	33.71±0.62	33.13±1.50	26.32±1.48
رطوبت خاک (درصد) Soil moisture (%)	Mean	33.83±1.52A	30.96±2.28A	31.24±1.14A	33.87±1.91A	35.17±0.88A	32.65±0.92A	25.54±1.14B
	0-10	7.61±0.14A	6.96±0.19AB	7.17±0.14AB	6.82±0.32B	5.87±0.19C	6.87±0.37AB	6.83±0.23B
	10-20	7.59±0.16A	6.97±0.17BC	7.32±0.13AB	6.98±0.21BC	6.03±0.19D	6.99±0.23BC	6.62±0.22C
	20-30	7.63±0.15A	6.93±0.18B	7.28±0.14AB	6.78±0.26B	6.08±0.28C	6.82±0.24B	6.67±0.23BC
	Mean	7.61±0.08	6.95±0.10	7.26±0.08	6.86±0.15	5.99±0.12	6.89±0.16	6.70±0.13
واکنش خاک pH (1:2.5 H ₂ O)	0-10	0.38±0.02	0.33±0.03	0.37±0.03	0.33±0.04	0.33±0.01	0.32±0.04	0.30±0.05
	10-20	0.35±0.01	0.38±0.03	0.37±0.04	0.35±0.02	0.31±0.03	0.32±0.05	0.39±0.03
	20-30	0.39±0.03	0.40±0.04	0.39±0.03	0.38±0.05	0.39±0.03	0.35±0.05	0.33±0.05
	Mean	0.39±0.01	0.36±0.01	0.38±0.02	0.36±0.02	0.35±0.01	0.32±0.02	0.32±0.03
	0-10	4.22±0.19ABb	3.80±0.38ABC	3.87±0.22ABCa	3.49±0.44BC	4.56±0.09Aa	3.11±0.32CDa	2.49±0.36D
کربن آلی خاک (درصد) Total organic C (%)	10-20	3.38±0.25Ab	2.87±0.31ABC	2.60±0.28ABCb	2.45±0.28BCD	3.24±0.28ABb	2.20±0.34CDab	1.70±0.22D
	20-30	2.82±0.21Aa	2.88±0.31A	2.17±0.18ABb	2.44±0.31AB	2.47±0.27ABc	2.13±0.27ABb	1.74±0.40B
	Mean	3.48±0.15A	3.18±0.20ABC	2.88±0.17BCD	2.79±0.21CD	3.42±0.19AB	2.48±0.19DE	1.98±0.20E
	0-10	0.55±0.07Aa	0.41±0.06Ba	0.42±0.04Ba	0.30±0.05BC	0.26±0.02Ca	0.17±0.01C	0.17±0.02Ca
	10-20	0.33±0.01Ab	0.27±0.04ABab	0.32±0.02Aab	0.27±0.03AB	0.19±0.02BCb	0.15±0.03C	0.13±0.01Cab
نیترژن خاک (درصد) Total N (%)	20-30	0.26±0.01Ab	0.20±0.03ABb	0.25±0.04Ab	0.24±0.02AB	0.16±0.01BCb	0.12±0.01C	0.10±0.01Cb
	Mean	0.38±0.03A	0.29±0.03B	0.33±0.02AB	0.27±0.02C	0.21±0.01CD	0.15±0.01DE	0.13±0.01E
	0-10	9.39±1.28C	11.80±1.82BCb	9.72±0.59CBC	14.97±2.58ABC	19.52±2.55A	18.98±2.63A	16.80±3.27AB
	10-20	10.58±1.17BC	12.06±1.66BCb	8.86±1.44C	9.87±1.14BC	20.15±3.06A	16.96±3.44AB	15.28±3.01ABC
	20-30	11.75±1.49	18.62±2.86a	13.74±2.68	11.45±2.04	17.99±3.43	22.28±6.09	17.64±3.84
نسبت کربن به نیترژن C/N ratio	Mean	10.57±0.76	14.16±1.33	10.77±1.06	12.10±1.18	19.22±1.71	19.41±2.44	16.57±1.91

هدایت الکتریکی خاک (دسی زیمنس بر متر)
Electrical Conductivity or EC (ds m⁻¹)

کربن آلی خاک (درصد)
Total organic C (%)

نیترژن خاک (درصد)
Total N (%)

نسبت کربن به نیترژن
C/N ratio

متغیرهای بافت خاک، کربن و نیتروژن خاک تحت تأثیر عمق خاک قرار گرفتند در حالی که هیچ یک از متغیرهای مورد مطالعه تحت تأثیر اثرات متقابل رویشگاه و عمق خاک قرار نگرفتند (جدول ۲). بیشترین مقادیر شن خاک مربوط به رویشگاه علفزار می‌باشد و کمترین میزان این متغیر در رویشگاه جنگل طبیعی و رویشگاه جنگل کاری شده با گونه پلت-توسکا مشاهده شد. درصد سیلت خاک تحت تأثیر رویشگاه قرار نگرفت و کمترین درصد رس خاک متعلق به رویشگاه علفزار بود. بیشترین میزان رطوبت خاک متعلق به رویشگاه جنگل طبیعی و رویشگاه پلت با میزان ۳۳/۸۰ درصد و کمترین آن در رویشگاه علفزار با میزان ۲۲/۵۴ درصد ثبت شد. رویشگاه سکویا مقادیر پایینی از مقدار pH خاک را نشان می‌دهد در حالی که در رویشگاه جنگل طبیعی مقادیر بالاتری از pH خاک ثبت شد. کمترین میزان هدایت الکتریکی خاک متعلق به رویشگاه علفزار و جنگل تخریب یافته بود، در حالی که

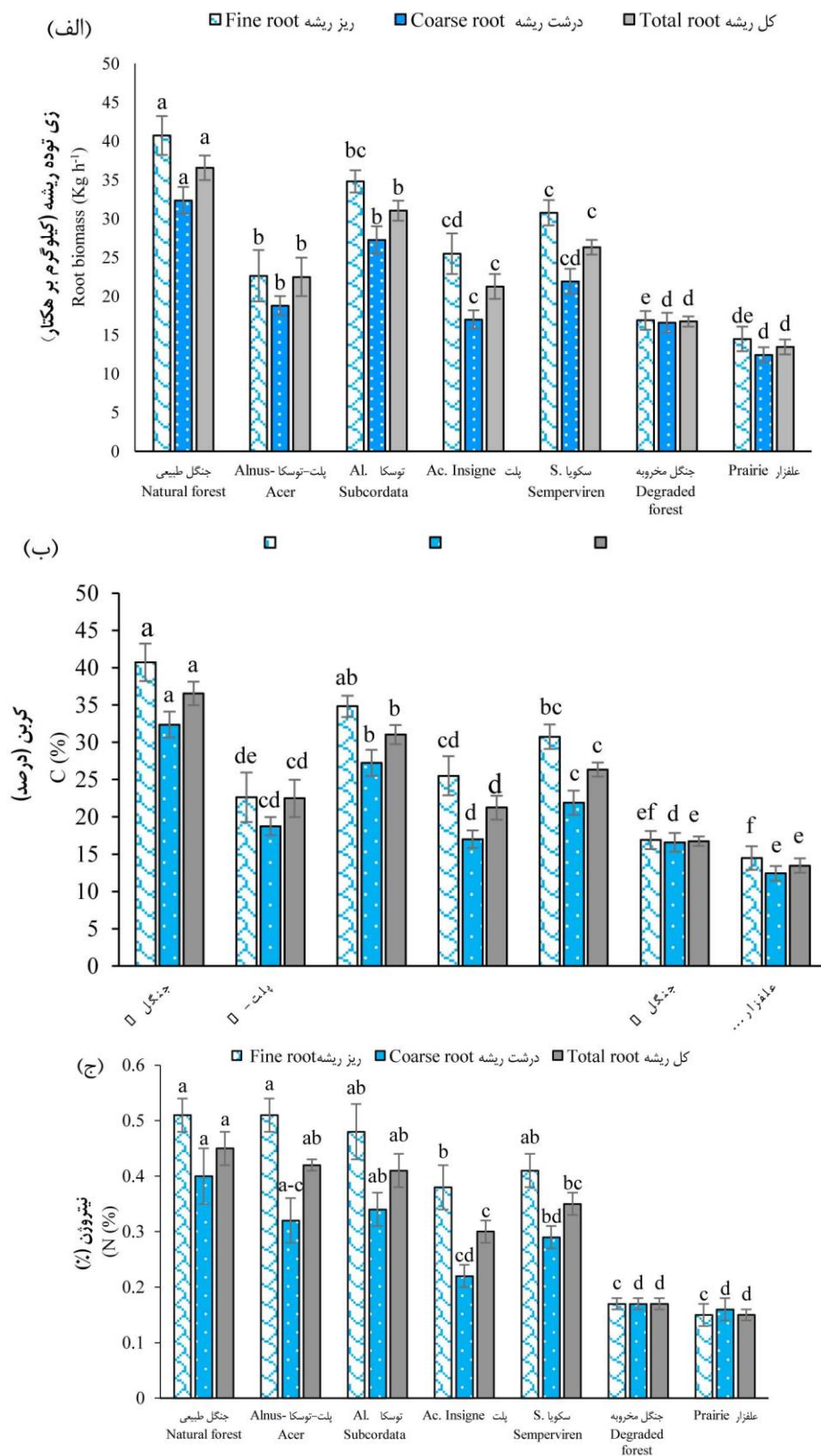
بالاترین میزان این متغیر در رویشگاه جنگل طبیعی مشاهده شد هر چند که این مشخصه تحت تأثیر رویشگاه و عمق قرار نگرفتند. بیشترین میزان محتوای کربن و نیتروژن خاک در رویشگاه جنگل طبیعی، به ترتیب ۳/۴۸ درصد و ۰/۳۸ درصد مشاهده شد. اما کمترین میزان این دو متغیر متعلق به رویشگاه علفزار بود. کمترین میزان نسبت کربن به نیتروژن متعلق به رویشگاه جنگل طبیعی بود، در حالی که بالاترین میزان نسبت کربن به نیتروژن خاک در رویشگاه جنگل مخروطی مشاهده شد (جدول ۳).

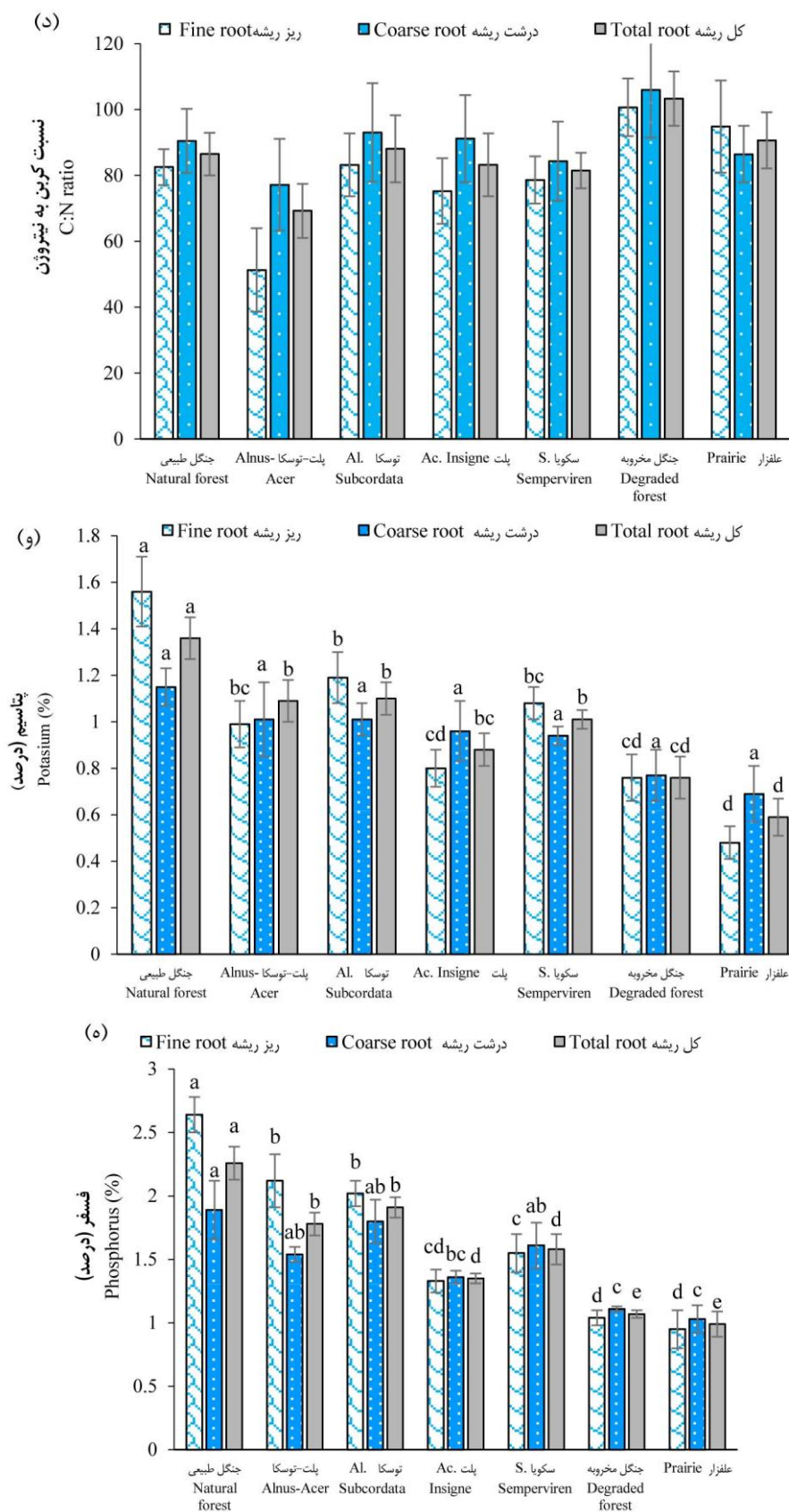
مشخصه‌های ریشه

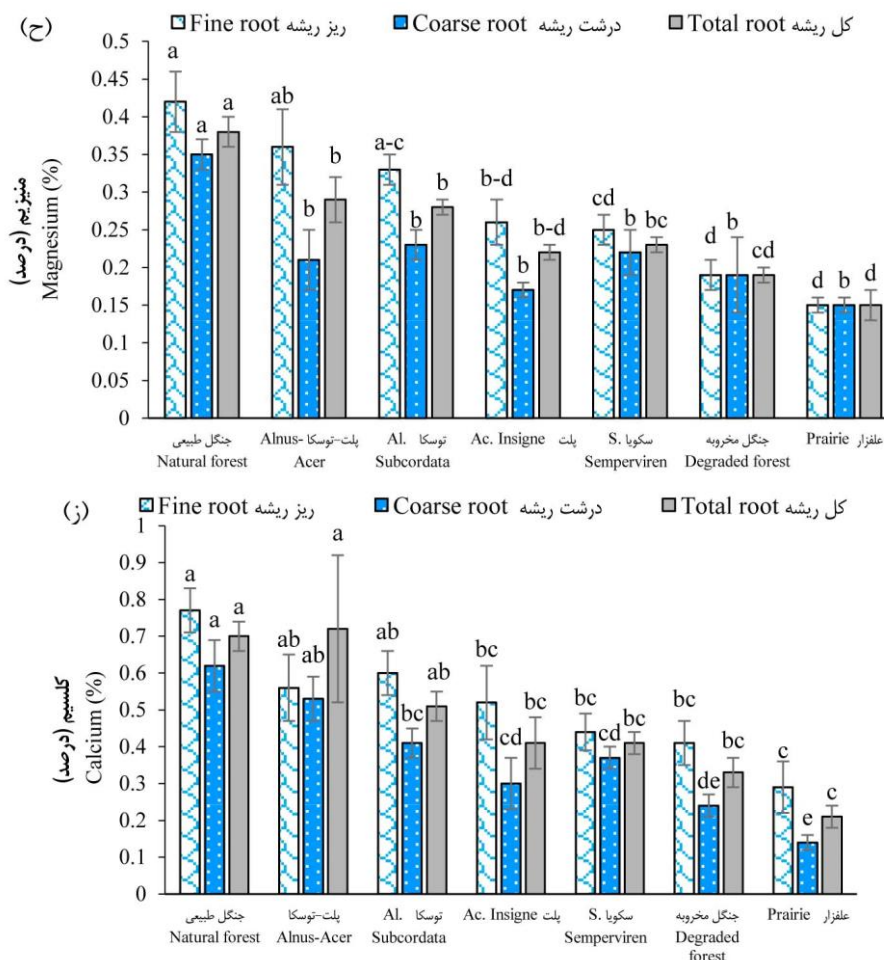
نتایج به دست آمده از مشخصه‌های ریشه اختلاف معنی‌داری را در رویشگاه‌های مختلف مورد مطالعه نشان داده است (جدول ۴).

جدول ۴- اثر رویشگاه‌های مورد بررسی بر مشخصه‌های ریشه
Table 4- The effect of different habitat on root characteristics

ویژگی ریشه Root properties	نوع ریشه Root type	رویشگاه Habitat		ویژگی ریشه Root properties	نوع ریشه Root type	رویشگاه Habitat	
		مقدار FF test	معنی‌داری P value			مقدار F test	معنی‌داری P value
زی‌توده Biomass	ریز ریشه Fine root	16.905	0.000	فسفر Phosphorus	ریز ریشه Fine root	19.516	0.000
	درشت ریشه Coarse root	40.873	0.000		درشت ریشه Coarse root	5.319	0.000
	کل ریشه Total root	49.567	0.000		کل ریشه Total root	23.049	0.000
	ریز ریشه Fine root	34.378	0.000		ریز ریشه Fine root	10.658	0.000
کربن Carbon	درشت ریشه Coarse root	26.460	0.000	پتاسیم Potassium	درشت ریشه Coarse root	1.947	0.084
	کل ریشه Total root	49.507	0.000		کل ریشه Total root	9.575	0.000
	ریز ریشه Fine root	16.593	0.000		ریز ریشه Fine root	3.939	0.002
	درشت ریشه Coarse root	7.711	0.000		درشت ریشه Coarse root	9.855	0.000
نیتروژن Nitrogen	کل ریشه Total root	22.549	0.000	کلسیم Calcium	کل ریشه Total root	4.310	0.001
	ریز ریشه Fine root	22.320	0.947		ریز ریشه Fine root	6.523	0.000
	درشت ریشه Coarse root	3.030	0.193		درشت ریشه Coarse root	3.706	0.003
	کل ریشه Total root	13.142	0.742		کل ریشه Total root	10.595	0.000







شکل ۲- میانگین ($\pm$ اشتباه معیار) مشخصه‌های ریشه خاک (صفر تا ۳۰ سانتی‌متری) در کاربری‌های مختلف
Figure 2. Mean ($\pm$ standard error) root properties (0-30 cm) different land uses

درشت‌ریشه معنی‌دار نشد. بیشترین و کمترین میزان کلسیم و منیزیم درشت‌ریشه و ریزریشه متعلق به رویشگاه جنگل طبیعی و علف‌زار بود (جدول ۴ و شکل ۲).

فعالیت‌های اکوشیمی خاک

اثر رویشگاه‌های مختلف و عمق بر روی فعالیت‌های آنزیمی خاک معنی‌دار بود. بیشترین میزان فعالیت آنزیم اوره‌آز در هر سه عمق مورد مطالعه در رویشگاه توسکا مشاهده شد و با افزایش عمق و افزایش شدت تخریب میزان فعالیت این آنزیم به صورت معنی‌داری کاهش پیدا کرد. در عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری بیشترین میزان فعالیت آنزیم اوره‌آز متعلق به رویشگاه توسکا با مقدار $33/84 \mu\text{gNH}_4^+-\text{N g}^{-1}2\text{h}^{-1}$ بود، همچنین میزان این آنزیم در عمق ۲۰-۳۰ و ۳۰-۴۰ سانتی‌متری در رویشگاه توسکا به ترتیب برابر با $23/57 \mu\text{gNH}_4^+-\text{N g}^{-1}2\text{h}^{-1}$ و $21/04 \mu\text{gNH}_4^+-\text{N g}^{-1}2\text{h}^{-1}$ مشاهده شد. تخریب رویشگاه سبب کاهش معنی‌دار در میزان آنزیم اسیدفسفاتاز خاک شد به گونه‌ای که

بیشترین مقادیر زی‌توده درشت‌ریشه و ریزریشه مربوط به رویشگاه جنگل طبیعی می‌باشد و کمترین میزان زی‌توده ریزریشه و درشت‌ریشه به ترتیب در رویشگاه تخریب‌یافته و رویشگاه علف‌زار مشاهده شد. بیشترین میزان محتوای کربن ریزریشه و درشت‌ریشه در رویشگاه جنگل طبیعی، به ترتیب ۴۰/۷۲ درصد و ۳۲/۳۷ درصد مشاهده شد. در دو رویشگاه جنگل طبیعی و رویشگاه پلت-توسکا بالاترین میزان نیتروژن ریزریشه مشاهده شد اما بیشترین میزان نیتروژن درشت‌ریشه متعلق به رویشگاه جنگل طبیعی بود. کمترین میزان نسبت کربن به نیتروژن ریزریشه متعلق به رویشگاه پلت-توسکا بود، در حالی که بالاترین میزان نسبت کربن به نیتروژن درشت‌ریشه در رویشگاه جنگل مخروبه مشاهده شد هر چند که این مشخصه‌ها تحت تأثیر تغییرات پوشش گیاهی قرار نگرفتند. رویشگاه بدون تخریب و طبیعی دارای بالاترین مقادیر فسفر ریزریشه و درشت‌ریشه به ترتیب ۲/۶۴ درصد و ۱/۸۹ درصد بود. بیشترین مقدار پتاسیم ریشه در رویشگاه جنگل طبیعی مشاهده شد در حالی که اثر رویشگاه‌های مختلف بر میزان پتاسیم

مقدار $۱۹۸/۰۸ \mu\text{gGlucose g}^{-1} 3\text{h}^{-1}$ و $۳۱۰/۵۸ \mu\text{gPNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ (جدول ۵ و شکل ۳).

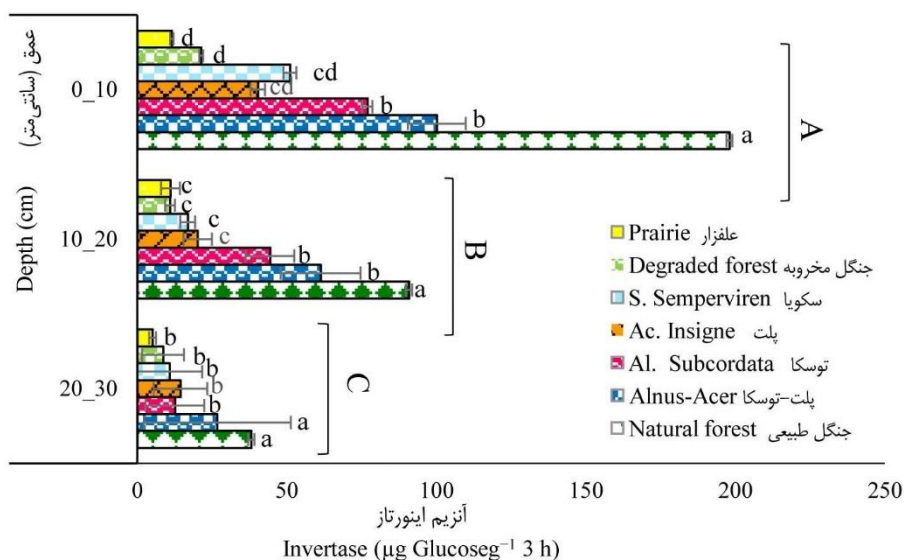
ارتباط رویشگاه‌های مورد مطالعه با مشخصه‌های ریشه و پویایی آنزیم‌های خاک

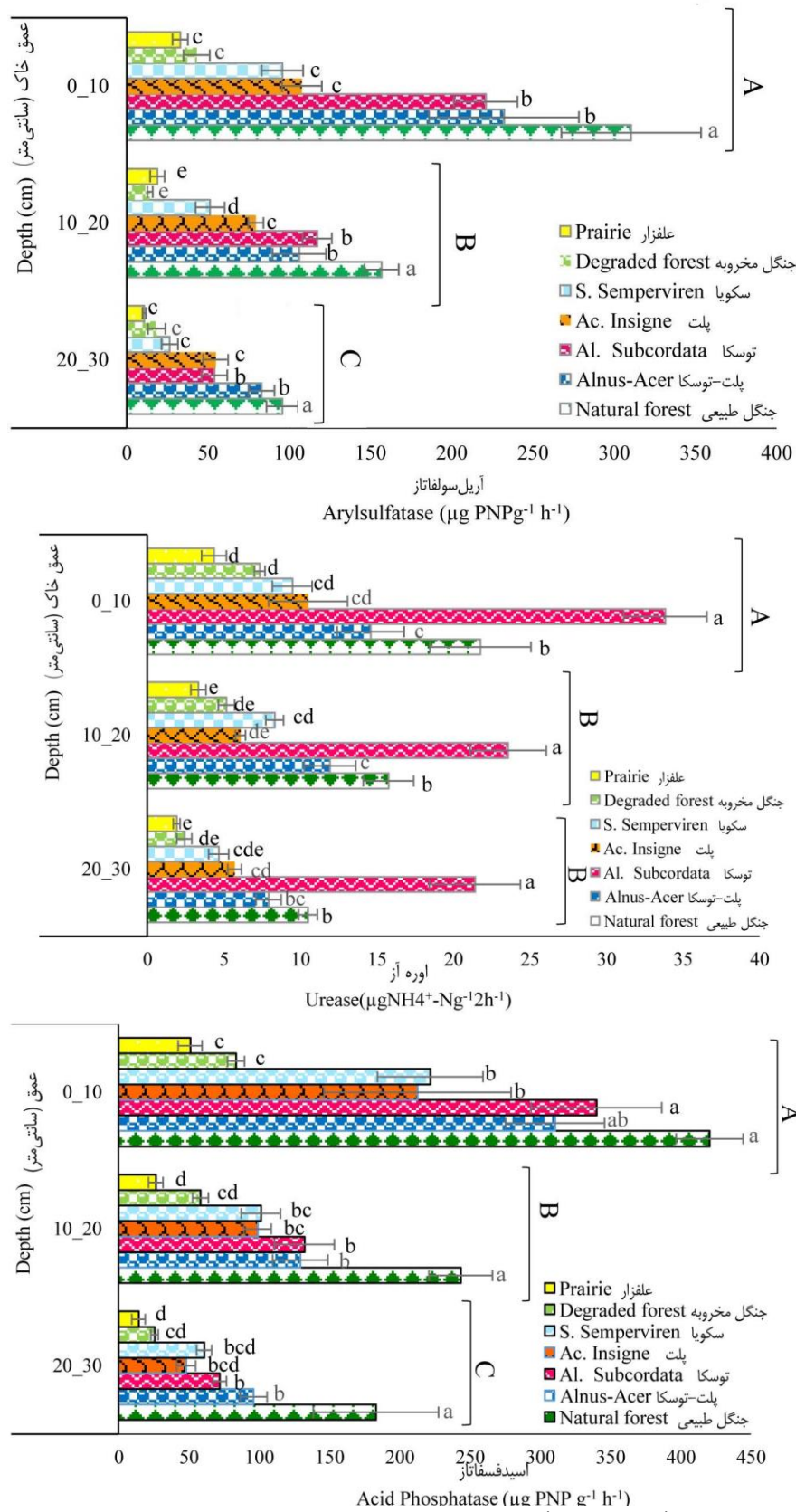
یافته‌های حاصل از PCA، ویژگی‌های متفاوت مشخصه‌های ریشه و پویایی آنزیم‌های خاک را در رویشگاه‌های مختلف آشکار کرد. به طوری که تغییرات در انواع پوشش گیاهی به وضوح در ویژگی‌های مختلف ریشه و آنزیم خاک منعکس شد.

بیشترین میزان فعالیت این آنزیم با میزان $۴۲۰/۵۸ \mu\text{gPNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ در رویشگاه جنگل طبیعی و کمترین میزان فعالیت این آنزیم با میزان $۵۰/۹۱ \mu\text{gPNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ در رویشگاه علف‌زار در عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری مشاهده شد. بررسی میزان فعالیت این آنزیم در عمق‌های مختلف بیانگر بیشترین میزان فعالیت این آنزیم در عمق سطحی خاک صفر تا ۱۰ سانتی‌متری است. با افزایش شدت تخریب میزان فعالیت آنزیم آریل سولفاتاز و اینورتاز روند کاهشی را نشان می‌دهد به طوری که در هر سه عمق مورد بررسی بیشترین میزان این آنزیم‌ها مربوط به رویشگاه جنگل طبیعی و کمترین میزان متعلق به رویشگاه مخروبه و علف‌زار شده است. عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری خاک دارای بیشترین مقادیر آریل سولفاتاز و اینورتاز در رویشگاه جنگل طبیعی به ترتیب با

جدول ۵- اثر رویشگاه‌های مختلف و عمق بر مشخصه‌های آنزیمی خاک
Table 5- The effect of different habitats and depth on soil enzyme characteristics

مشخصه‌های آنزیمی خاک Enzyme characteristics	رویشگاه Habitat		عمق خاک Depth		عمق × رویشگاه Habitat × Depth	
	مقدار F test	معنی‌داری P value	مقدار F test	معنی‌داری P value	مقدار F test	معنی‌داری P value
اوره‌آز Urease	71.275	0.000	30.209	0.000	1.715	0.065
اسیدفسفاتاز Acidphosphatase	32.764	0.000	76.302	0.000	3.414	0.000
آریل سولفاتاز Arylsulfatase	42.000	0.000	68.597	0.000	5.869	0.000
اینورتاز Invertase	38.540	0.000	56.389	0.000	7.653	0.000





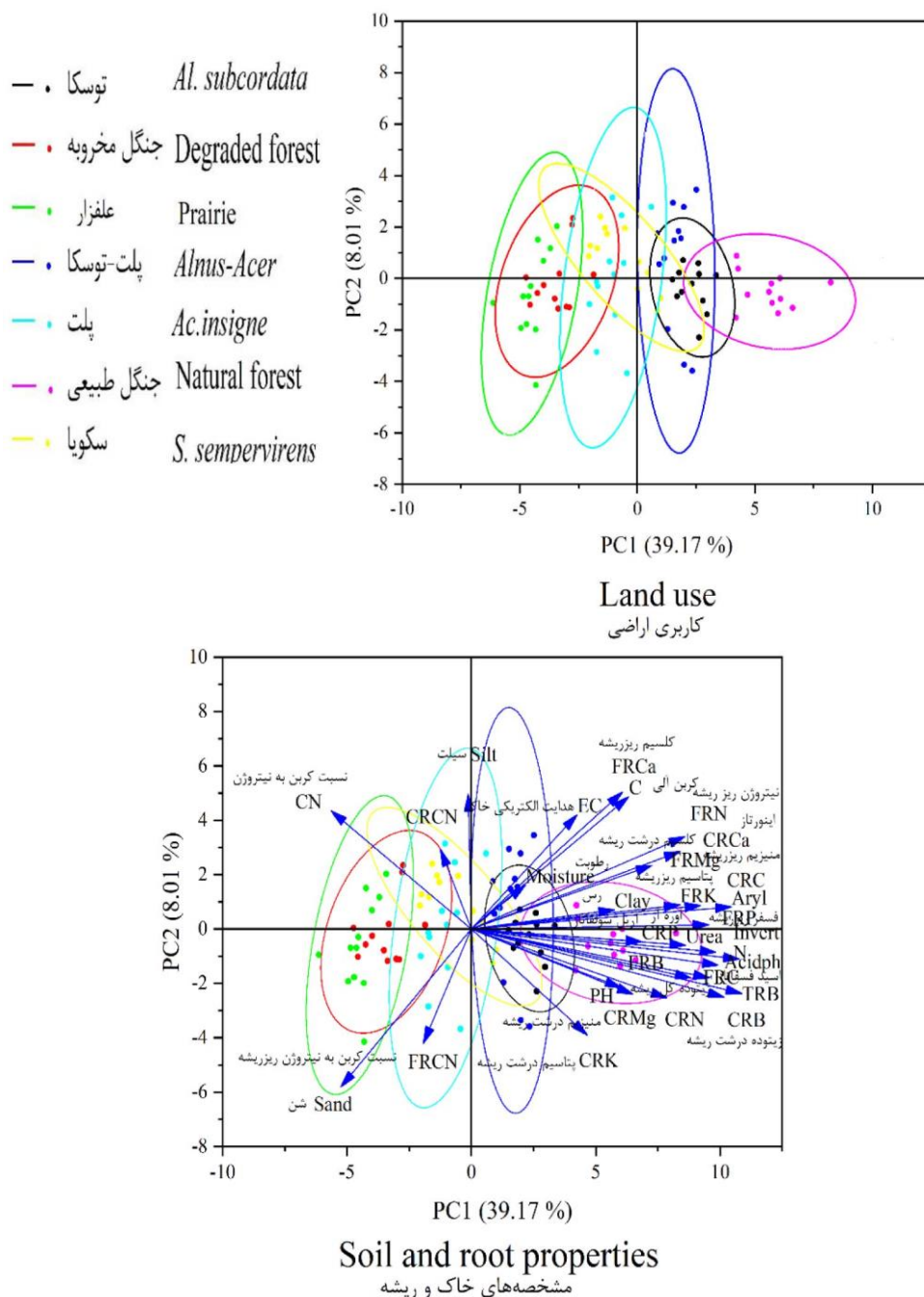
شکل ۳- میانگین (± اشتباه معیار) فعالیت‌های اکوشیمی خاک تحت روبشگاه‌های مختلف پوش گیاهی.
Figure 3. Mean (± standard error) soil ecochemical activities under different land uses

جدول ۶- همبستگی مشخصه‌های خاک و ریشه با مؤلفه‌های PCA
Table 6- Correlation of soil enzyme and root properties with PCA components

مشخصه‌های خاک و ریشه Soil and root properties	مخفف Abbreviation	محور اول Axis1	محور دوم Axis2	مشخصه‌های خاک و ریشه Soil and root properties	مخفف Abbreviation	محور اول Axis1	محور دوم Axis 2
شن Sand	Sand	0.396**	-0.122	فسفر درشت‌ریشه Coarse root phosphorus	CRP	-0.556**	-0.079
سیلت Silt	Silt	0.003	-0.041	پتاسیم درشت‌ریشه Coarse root potassium	CRK	-0.403**	-0.248*
رس Clay	Clay	-0.427**	0.177	کلسیم درشت‌ریشه Coarse root calcium	CRCa	-0.688**	0.074
رطوبت Moisture	Moist	-0.188	0.018	منیزیم درشت‌ریشه Coarse root magnesium	CRMg	-0.495**	0.096
pH	pH	-0.497**	0.024	میانگین کربن ریشه Root carbon	MeanCR	-0.827**	0.255*
هدایت الکتریکی خاک EC	EC	-0.335**	0.302**	میانگین نیتروژن ریشه Root nitrogen	MeanNR	-0.810**	-0.400**
کربن آلی خاک C	C	-0.533**	0.172	میانگین نسبت کربن به نیتروژن ریشه Root C.N ratio	MeanC/NR	0.158	0.901**
نیتروژن N	N	-0.765**	-0.086	میانگین فسفر ریشه Root phosphorus	MeanPR	-0.816**	-0.023
نسبت کربن به نیتروژن C/N	C/N	0.407**	0.216*	میانگین پتاسیم ریشه Root potassium	MeanKR	-0.721**	-0.029
کربن ریزریشه Fine root Carbon	FRC	-0.725**	0.143	میانگین کلسیم ریشه Root calcium	MeanCaR	-0.530**	0.241*
نیتروژن ریزریشه Fine root Nitrogen	FRN	-0.717**	-0.199	میانگین منیزیم ریشه Root magnesium	MeanMgR	-0.732**	0.228*
نسبت کربن به نیتروژن ریزریشه Fine root C.N ratio	FRC/N	0.168	0.422**	زی توده ریزریشه Fine root biomass	FRB	-0.669**	0.031
فسفر ریزریشه Fine root phosphorus	FRP	-0.780**	0.056	زی توده درشت‌ریشه Coarse root biomass	CRB	-0.452**	0.037
پتاسیم ریزریشه Fine root potassium	FRK	-0.679**	0.094	زی توده کل Total root biomass	TRB	-0.625**	0.042
کلسیم ریزریشه Fine root calcium	FRCa	-0.484**	0.268*	آنزیم اوره‌آز Urease enzyme	Urea	-0.669**	0.067
منیزیم ریزریشه Fine root magnesium	FRMg	-0.610**	0.236*	آنزیم اسیدفسفاتاز Acidphosphatase enzyme	Acidph	-0.860**	-0.041
کربن درشت‌ریشه Coarse root Carbon	CRC	-0.736**	0.274*	آنزیم آریل سولفاتاز Arylsulfatase enzyme	Aryl	-0.833**	0.0390
نیتروژن درشت‌ریشه Coarse root Nitrogen	CRN	-0.641**	-0.539**	آنزیم اینورتاز Invertase enzyme	Invert	-0.780**	-0.150
نسبت کربن به نیتروژن درشت‌ریشه Coarse root C:N ratio	CRC/N	0.112	0.812**				

* (p < 0.05)، ** (p < 0.01)، ns (عدم معنی‌داری).

ns: non-significance, *: significance at the 5% probability level, **: significance at the 1% probability level



شکل ۴- ارتباط رویشگاه‌های مورد مطالعه با مشخصه‌های خاک و ریشه و آنزیم‌های خاک در تحلیل PCA.

Figure 4. The relationship between different habitats with soil, root and biochemical in principal component analysis (PCA).

کمی و کیفی درشت‌ریشه و ریزریشه حاصلخیزی خاک و پویایی آنزیم‌های خاکی به‌ترتیب به رویشگاه‌های جنگل طبیعی، توسکا، پلت-توسکا، پلت، سکویا، جنگل مخروطی و علفزار در سمت راست محور اختصاص داشت که در ارتباط مستقیم با مقادیر محتوی رس، pH، هدایت الکتریکی، نیتروژن کل، کربن آلی خاک و رطوبت، می‌باشند. در حالی که مشخصه‌های C/N خاک، C/N درشت‌ریشه و ریزریشه و

نتایج تجزیه مؤلفه‌های اصلی در ارتباط با رویشگاه‌های مورد مطالعه، مشخصه‌های ریشه و آنزیم‌های خاک نشان می‌دهد که محورهای اول و دوم به‌ترتیب ۳۹/۱۷ و ۸/۰۱ درصد از تغییرات واریانس کل را توجیه می‌کنند، به‌طوری که تیپ‌های مورد مطالعه و مشخصه‌های خاک و ریشه بر روی محورهای نمودار پراکنش متفاوتی را نشان داده‌اند (جدول ۶ و شکل ۴). مطابق با نتایج، بیش‌ترین مقادیر مشخصه‌های

درصد شن در سمت چپ محور که مربوط به کاربری‌های جنگل مخروطه و علفزار بوده، بیشتر دیده شد (شکل ۴).

بحث

تراکم و نوع پوشش گیاهی روزمینی در رویشگاه‌های مختلف، مشخصه‌های خاکی و زی‌توده ریشه‌های موجود در خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Nadelhoffer & Raich, 1992; Hertel et al., 2009). پایین بودن تراکم و تنوع پوشش گیاهی در رویشگاه‌های تخریب شده سبب کاهش معنی‌داری در میزان زی‌توده ریشه‌ها می‌شود (Yang et al., 2003; Jones et al., 2003). تنوع بالای پوشش گیاهی در رویشگاه‌های جنگل طبیعی در مقایسه با رویشگاه‌های جنگل کاری شده می‌تواند دلیلی برای افزایش میزان زی‌توده ریشه باشد. علت افزایش زی‌توده با افزایش تنوع گونه‌ای را می‌توان به این دلیل عنوان کرد که مجموعه متنوعی از گیاهان مکمل یکدیگر در جذب و استفاده از منابع موجود هستند و در مقایسه با حضور تک گونه‌ها میزان زیست‌توده وضعیت مناسب‌تری پیدا می‌کند (Cardinale et al., 2007). نتایج مقایسه میانگین مشخصه‌های ریزریشه و درشت‌ریشه در رویشگاه‌های مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داد که غلظت عناصر غذایی در ریزریشه‌ها بیشتر از درشت‌ریشه‌ها است. این یافته با نتایج گزارش شده توسط امانی و همکاران (Amani et al., 2023) همخوانی دارد. این تفاوت می‌تواند به نقش عملکردی متفاوت ریشه‌ها نسبت داده شود؛ به‌طوری‌که درشت‌ریشه‌ها عمدتاً در استحکام و پایداری گیاه در خاک نقش دارند، در حالی‌که جذب عناصر غذایی خاک عمدتاً توسط ریزریشه‌ها انجام می‌گیرد (Yuan & Chen, 2010; Ma et al., 2015). علاوه بر این، تخریب پوشش گیاهی موجب کاهش تراکم گیاهان و افزایش آشبویی عناصر غذایی خاک می‌شود که در نهایت کاهش زی‌توده ریشه را به دنبال دارد (Singha et al., 2020; Kooch et al., 2024b). همچنین بالا بودن محتوای عناصر غذایی ریشه در رویشگاه‌های طبیعی و بدون تخریب در مقایسه با رویشگاه‌های احیاء شده و تخریب شده نشان‌دهنده حاصلخیزتر بودن خاک‌های این رویشگاه است. کمترین میزان زی‌توده ریشه در رویشگاه‌های علفزار و جنگل مخروطه مشاهده شد (شکل ۲)، این کاهش می‌تواند با اسیدی تر بودن خاک در این رویشگاه‌ها مرتبط باشد، زیرا pH پایین خاک با کاهش قابلیت دسترسی عناصر غذایی ضروری و افزایش سمیت برخی عناصر، شرایط نامناسبی برای رشد و فعالیت ریشه فراهم می‌کند. در نتیجه، توسعه و زی‌توده ریشه در چنین شرایطی محدود می‌شود که این موضوع با یافته‌های امانی و همکاران (Amani et al., 2023) همخوانی دارد.

آنزیم‌های خاک و سطح فعالیت آن‌ها نقش مهمی در تبیین عملکرد اکوسیستم خاک دارند و بازتاب‌دهنده تغییرات در ویژگی‌های خاک و

ریشه، حاصلخیزی خاک و ارتباط تنگاتنگ آن با نوع پوشش گیاهی هستند (He et al., 2022; Yang et al., 2008). مقایسه میانگین فعالیت‌های آنزیمی خاک در رویشگاه‌های مختلف در شکل ۳ تفاوت‌های قابل توجهی را نشان داد در نتیجه بالا بودن فعالیت آنزیم‌های خاکی (آریل سولفاتاز، اسیدفسفاتاز، اینورتاز و اوره‌از) در رویشگاه جنگل طبیعی در مقایسه با سایر رویشگاه‌های مورد بررسی را می‌توان به بالا بودن میزان تهویه خاک، مواد آلی سخت نسبت داد (Chen et al., 2016). افزایش فعالیت آنزیمی در جنگل‌های طبیعی و جنگل کاری آمیخته با گونه پلت-توسکا باعث تسریع فرآیند تجزیه و انتشار مواد مغذی آلی می‌شود (Cheng et al., 2013). بیشترین فعالیت آنزیم اوره‌از در رویشگاه توسکا و پس از آن در جنگل طبیعی مشاهده شد، در حالی‌که کمترین مقدار آن در رویشگاه علفزار ثبت گردید که نتایج آن در شکل ۳ ارائه شده است. گونه توسکا به دلیل توانایی تثبیت نیتروژن و ایجاد بستر مناسب خاک، نقش مهمی در افزایش نیتروژن خاک ایفا می‌کند (Kooch et al., 2016). نتایج مقایسه میانگین مشخصه‌های خاک در رویشگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۳ و نتایج تجزیه مؤلفه‌های اصلی در ارتباط با رویشگاه‌های مختلف و فعالیت‌های آنزیم خاک در شکل ۴ نشان داد که افزایش نیتروژن قابل دسترس، همراه با شرایط مناسب pH خاک، می‌تواند فعالیت میکروارگانیسم‌ها و در نتیجه فعالیت آنزیم اوره‌از را تقویت کند. نتایج تجزیه مؤلفه‌های اصلی در ارتباط با رویشگاه‌های مختلف و فعالیت‌های آنزیم خاک در شکل ۴ همبستگی معنی‌دار مشاهده شده بین فعالیت اوره‌از، نیتروژن و pH خاک، این تفسیر را تأیید می‌کند و دلیل بالاتر بودن فعالیت این آنزیم در رویشگاه توسکا را توضیح می‌دهد. فعالیت بالای آنزیم اوره‌از در رویشگاه‌های توسکا و جنگل طبیعی ممکن است ناشی از رشد میکروبی و تحریک فعالیت میکروبی به دلیل افزایش دسترسی به منابع باشد، همچنین تغییرات در ترکیب جامعه میکروبی نیز می‌تواند در این امر تأثیرگذار باشد (Moghimian et al., 2017). تحقیقات پیشین بیان کرده‌اند که تغییرات فعالیت آنزیم اوره‌از تحت تأثیر کاربری زمین را می‌توان به متفاوت بودن میزان مواد مغذی خاک در این رویشگاه‌ها و همبستگی این آنزیم با مواد مغذی خاک عنوان کرد (Zeng et al., 2009; Moghimian et al., 2017). بر همین اساس، ارتباط بین مشخصه‌های خاکی در رویشگاه‌های مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است.

بالا بودن فعالیت آنزیمی خاک در رویشگاه طبیعی را می‌توان به pH بالا و در دسترس بودن مواد غذایی نسبت داد (شکل ۴) که نتایج حاصل از تحقیقات چنگ و همکاران (Cheng et al., 2013) و لینگ و همکاران (Ling et al., 2014) تأیید کننده این موضوع است. آنزیم اسیدفسفاتاز از آنزیم‌هایی است که به واسطه ریز جانداران ریشه‌های گیاهی و کرم خاکری تولید می‌شود و ارتباط مستقیمی با مواد آلی و رطوبت خاک دارد که علت افزایش این آنزیم در رویشگاه طبیعی را

پویایی آنزیم‌های خاک و شاخص‌های حاصلخیزی خاک در اکوسیستم‌های ناحیه خزری ایران می‌پردازد. تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) در شکل ۴ واگرایی مناسبی از ویژگی ریشه و خاک انتخاب شده بین انواع مختلف پوشش گیاهی را تعیین کرد. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که فراوانی میزان شاخص‌های کمی و کیفی ریشه، شاخص‌های حاصلخیزی خاک و فعالیت‌های آنزیمی خاک در رویشگاه‌های مورد مطالعه به ترتیب رتبه > علف‌زار > جنگل مخروطیه > سکویا > پلت > پلت - توسکا > توسکا > جنگل طبیعی کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

بررسی تأثیرپذیری مشخصه‌های خاکی و اجزای موجود در آن تحت تأثیر پوشش‌های مختلف از پایه‌های مدیریت اصولی عرصه‌های طبیعی است. نوع پوشش گیاهی از عوامل اصلی مؤثر بر ویژگی‌های خاک و اجزای زیرزمینی آن است و تغییر در ترکیب و وضعیت پوشش گیاهی، به‌طور مستقیم بر کیفیت خاک، زی‌توده ریشه‌ای و فعالیت‌های زیستی آن اثر می‌گذارد. کاهش پوشش گیاهی و تشدید تخریب، با افت ورود مواد آلی به خاک، برهم خوردن شرایط مطلوب میکروکلیمایی و افزایش آبشویی عناصر غذایی همراه بوده و در نهایت موجب تضعیف فعالیت‌های آنزیمی و کاهش شاخص‌های زیستی و عملکردی خاک می‌شود. در مقابل، حفظ و احیای پوشش‌های طبیعی و بهره‌گیری از جنگل‌کاری‌های با گونه بومی می‌تواند شرایط مساعدتری را برای پایداری خاک و بهبود فرآیندهای زیستی آن فراهم کند. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، استفاده از پوشش‌های چوبی بومی می‌تواند به‌عنوان یک راهکار کاربردی در مناطق دچار تخریب پیشنهاد شود، زیرا این پوشش‌ها در بهبود ویژگی‌های خاک و پایداری چرخه عناصر نقش داشته و به حفظ کیفیت و سلامت خاک کمک می‌کنند بنابراین، حفاظت از رویشگاه‌های طبیعی، جلوگیری از تخریب بیشتر عرصه‌ها، احیای پوشش گیاهی بومی و متناسب با شرایط اکولوژیکی منطقه و همچنین استفاده از گونه‌های مناسب در عملیات جنگل‌کاری و بازسازی، از مهم‌ترین راهکارهای مدیریتی برای ارتقای کیفیت خاک و پایداری اکوسیستم‌های طبیعی به شمار می‌رود. بر این اساس، حفاظت از رویشگاه‌های طبیعی، جلوگیری از تخریب بیشتر عرصه‌ها و استفاده از گونه‌های بومی و سازگار، به‌ویژه توسکا، در برنامه‌های احیا و جنگل کاری می‌تواند به حفظ کیفیت خاک و پایداری بلندمدت اکوسیستم‌های طبیعی کمک کند.

سپاسگزاری

این اثر تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) برگرفته شده از طرح پسادکتری شماره "۴۰۳۸۵۴۶" انجام شده است.

می‌توان به بالا بودن میزان رطوبت و مواد آلی این رویشگاه در مقایسه با رویشگاه‌های دیگر عنوان کرد (جدول ۳ و شکل ۳). آنزیم اسیدفسفاتاز تحت تأثیر میزان شدت نور نسبی کاهش پیدا می‌کند (Taati et al., 2016). بنابراین به دنبال تخریب و کاهش میزان پوشش گیاهی، میزان نور ورودی به درون این رویشگاه‌ها بیشتر شده و همین امر با تأثیر منفی بر فعالیت این آنزیم، کاهش آن را سبب می‌شود (Amani et al., 2022). کاهش ورودی مواد آلی در رویشگاه‌های علف زار و مخروطیه سبب کاهش مواد مغذی خاک و در نتیجه کاهش آنزیم فسفاتاز شد زیرا مقادیر کربن، نیتروژن و فسفر خاک بر فعالیت‌های این آنزیم اثرگذار هستند (Maharjan et al., 2017).

آنزیم آریل سولفاتاز نقش مهم و اساسی در هیدرولیز استرهای آروماتیک سولفات به گوگرد معدنی مورد نیاز گیاهان دارد و تحت تأثیر اندازه ذرات خاک قرار می‌گیرد (Moscatelli et al., 2005). در رویشگاه مورد مطالعه جنگل طبیعی به دلیل مناسب بودن شرایط موجود رویشگاه بالاترین مقدار فعالیت آنزیم آریل سولفاتاز مشاهده شد (Ling et al., 2014). فعالیت‌های اسیدفسفاتاز و آریل سولفاتاز در خاک‌های رویشگاه جنگل طبیعی و توسکا مشابه بود، احتمالاً به این دلیل که هر دو به pH وابسته هستند. آنزیم اینورتاز به دلیل نقش کلیدی در چرخه کربن و نیتروژن می‌تواند منجر به تبدیل ساکارز به گلوکز و فروکتوز شود (Pang, 2009) که بر همین اساس رابطه نزدیکی بین میزان کربن و نیتروژن خاک با فعالیت آنزیم اینورتاز وجود دارد (Zeng et al., 2009). علاوه بر موارد فوق، بالا بودن میزان کربن و نیتروژن ریشه در رویشگاه‌های بدون تخریب و طبیعی نیز نقش بسیار مؤثر در افزایش فعالیت این آنزیم در داخل خاک دارد (شکل ۳ و ۴). فعالیت آنزیم اینورتاز تحت تأثیر کاربری/پوشش زمین، فصل نمونه‌برداری و تعاملات بین آنها قرار دارد. بیشترین فعالیت آنزیم اینورتاز در جنگل طبیعی به دلیل تجزیه سریع و آسان لاشبرگ و تسریع چرخه نیتروژن است (Pang et al., 2009). کمترین فعالیت این آنزیم در رویشگاه علف‌زار و مخروطیه مشاهده شد. مقادیر پایین pH خاک و کاهش حاصلخیزی از جمله عوامل مؤثر در نتیجه مذکور می‌باشد (Zeng et al., 2009). بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) در شکل ۴، به نظر می‌رسد نوع کاربری و پوشش زمین، از طریق تغییر در ورودی بقایای آلی، وضعیت نیتروژن و شرایط زیستی خاک، نقش مهمی در تنظیم فعالیت آنزیم‌های خاک ایفا کند. تفاوت مشاهده‌شده بین رویشگاه‌های جنگلی و اراضی علف‌زار در این مطالعه، مؤید این موضوع است و با گزارش‌های پیشین درباره اثر شیوه‌های مدیریتی و پوشش زمین بر فعالیت آنزیمی خاک هم‌راستا می‌باشد (Maharjan et al., 2017). به‌طور کلی، می‌توان اظهار داشت که روابط مؤثری بین انواع مختلف پوشش گیاهی، مشخصه‌های ریشه، شاخص‌های حاصلخیزی خاک و پویایی آنزیم خاک وجود دارد. این مطالعه به بررسی و کمی‌سازی تأثیر انواع مختلف پوشش گیاهی بر ویژگی‌های ریشه،

References

1. Alef, K., & Nannipieri, P. (1995). *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. Academic Press, London.
2. Amani, M., Kooch, Y., & Abedi, M. (2022). Effect of degradation intensity of wooded rangelands on soil health indicators of Kojur region, Nowshahr. (master's thesis). Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, 181 pages. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154827>
3. Amani, M., Kooch, Y., & Abedi, M. (2023). Effect of degradation intensity of wooded rangelands on root characteristics and soil ecochemical activities of Mirkola Region of Nowshahr. *Rangeland*, 17, 82-96. (In Persian with English abstract)
4. Azaryan, M., Abrari Vajari, K., & Amanzadeh, B. (2021). Variations in humus and fine root properties related to development stages in a temperate natural Beech forest. *European Journal of Forest Research*, 140, 307-316. <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01331-2>
5. Boromand, M., Qajar Sepalnou, M., Bahmanyar, M.A., & Salek Gilani, S. (2015). Evaluation of the effects of land use change from forest areas into agricultural lands on some chemical properties of soil (Case study: Zarin Abad, Sari, Iran). *Physical Geography Research*, 47, 449-435. (In Persian with English abstract)
6. Cardinale, B.J., Wright, J.P., Cadotte, M.W., Carroll, I.T., Hector, A., Srivastava, D.S., Loreau, M., & Weis, J.J. (2007). Impacts of plant diversity on biomass production increase through time because of species complementarity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104, 18123-18128. <https://doi.org/10.1073/pnas.0709069104>
7. Chen, X., Chen, H.Y.H., Chen, X., Wang, J., Chen, B., Wang, D., & Guan, Q. (2016). Soil labile organic carbon and carbon-cycle enzyme activities under different thinning intensities in Chinese fir plantations. *Soil Ecology*, 107, 162-169. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.05.016>
8. Cheng, X.L., Yang, Y.H., Li, M., Dou, X.L., & Zhang, Q.F. (2013). The impact of agricultural land use changes on soil organic carbon dynamics in the Danjiangkou Reservoir area of China. *Plant and Soil*, 366, 415-424. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1446-6>
9. Cowie, A.L., Orr, B.J., Sanchez, V.M.C., Chasek, P., Crossman, N.D., Erlewein, A., Louwagie, G., Maron, M., Metternicht, G.I., Minelli, S., Tengberg, A.E., Walter, S., & Welton, S. (2018). Land in balance: The scientific conceptual framework for Land Degradation Neutrality. *Environmental Science & Policy*, 79, 25-35. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.10.011>
10. Dipesh, K.C., & Schuler, J.L. (2013). Estimating fine-root production and mortality in the biomass plantations. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 44, 2514-2523. <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.811516>
11. Gao, M., Hu, W., Li, M., Wang, S., & Chu, L. (2025). Network analysis was effective in establishing the soil quality index and differentiated among changes in land-use type. *Soil and Tillage Research*, 246, 106352. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106352>
12. He, Y., Hong, M., Xu, X., Liang, Z., Jiang, N., Tu, N., & Wu, Z. (2022). Nitrogen deposition changes the keystone taxa of soil microorganisms and indirectly affects plant aboveground biomass in desert steppe regions. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1354926/v1>
13. Hertel, D., Harteveld, M.A., & Leuschne, C.H. (2009). Conversion of a tropical forest into agroforestry alters the fine root-related carbon flux to the soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 4, 481-490. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.11.020>
14. Jafari Haghighi, M. (2003). *Methods of soil analysis sampling and important physical*. 2nd ed., Sari: Neday Zohi, 236 p. (In Persian).
15. Jones, R.H., Mitchell, R.J., Tevens, G.N.S., & Pecot, S.D. (2003). Controls of fine root dynamics across a gradient of gap sizes in a pine woodland. *Oecologia*, 134, 132-143. <https://doi.org/10.1007/s00442-002-1098-y>
16. Kamiab, H.R., & Shabani, N. (2019). The impact of land use/land cover change on ecosystem services in Golestan province. *Advanced Environmental Sciences*, 17, 43-56. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.29252/envs.17.2.43>
17. Kiapasha, K., Darvishsefat, A.A., Zargham, N., Attarod, P., Nadi, M., & Schaepman, M. (2017). Greening trend in the Hyrcanian forests using NOAA NADVI time series during 1981-2012. *Journal of Forest and Wood Products*, 70, 409-420. (In Persian with English abstract)
18. Kohestani, N., Rastgar, S., Heydari, G., Shetaee Jouibary, S., & Amirnejad, H. (2021). Monitoring the spatial distribution of soil carbon sequestration during four decades of rangeland cover changes (Case study: Nourroud watershed, Mazandaran province). *Rangeland Journal*, 15, 344-356. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03203-2>
19. Kooch, Y., Heidari, F., Haghverdi, K., Gómez-Brandón, M., & Kartalaei, Z.M. (2024a). 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>
20. Kooch, Y., Heidari, F., Gómez-Brandón, M., & Meurer, K.H. (2024b). Restoration of soil multifunctional indicators requires more than thirty years in degraded shrubland of a semi-arid mountainous ecosystem. *Journal of Environmental Management*, 371, 123140. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123140>
 21. Kooch, Y., Rostayee, F., & Hosseini, S.M. (2016). Effects of tree species on topsoil properties and nitrogen cycling in natural forest and tree plantations of northern Iran. *Catena*, 144, 65-73. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.05.002>
 22. Kooch, Y., Tavakoli, M., & Akbarinia, M. (2018). Tree species could have substantial consequences on topsoil fauna: a feedback of land degradation/restoration. *European Journal of Forest Research*, 137, 793-805. <https://doi.org/10.1007/s10342-018-1140-1>
 23. Košanin, O., Govedar, Z., Ljubičić, J., & Nešić, M. (2023). The importance of forests in the environment. n: Ilić P, Govedar Z, Pržulj N (eds) Environment. Academy of Sciences and Arts of the Republic of Srpska, Banja Luka, Monograph LV:579–621. <https://doi.org/10.7251/EORU2309579K>
 24. Leuschner, C., & Hertel, D. (2003). Fine root biomass of temperate forests in relation to soil acidity and fertility, climate, age and species. *Prog Botany*, 64, 405–438. https://doi.org/10.1007/978-3-642-55819-1_16
 25. Ling, N., Sun, Y., Ma, J., Guo, J., Zhu, P., Peng, C., & Shen, Q. (2014). Response of the bacterial diversity and soil enzyme activity in particle-size fractions of Mollisol after different fertilization in a long-term experiment. *Biology and Fertility of Soils*, 50, 901-911. <https://doi.org/10.1007/s00374-014-0911-1>
 26. Ma, Y.Z., Zhong, Q.L., Jin, B.J., Lu, H.D., Guo, B.Q., Zheng, Y., Li, M., & Cheng, D.L. (2015). Spatial changes and influencing factors of fine root carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of plants in China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 159-167. <https://doi.org/10.17521/cjpe.2015.0015>
 27. Maharjan, M., Sanaullah, M., Razavi, B.S., & Kuzyakov, Y. (2017). Effect of land use and management practices on microbial biomass and enzyme activities in subtropical top-and sub-soils. *Applied Soil Ecology*, 113, 22-28. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.01.008>
 28. Martinez-Salgado, M.M., Gutiérrez- Romero, V., Jannsens, M., & Ortega- Blu, R. (2010). Biological soil quality indicators: a review. *Current Research, Technology and Education Topics in Applied Microbiology and Microbial Biotechnology*, 1, 319-328.
 29. Moghimian, N., Hosseini, S.M., Kooch, Y., & Darki, B.Z. (2017). Impacts of changes in land use/cover on soil microbial and enzyme activities. *Catena*, 157, 407-414. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.06.003>
 30. Mohmedi Kartalaei, Z., Kooch, Y., & Dianati Tilaki, Q. (2024). Biogeochemical cycling of carbon and nitrogen in wooded and non-wooded lands of Kojur region, Nowshahr. (doctoral dissertation). Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, 152 pages. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.106289>
 31. Moscatelli, M.C., Lagomarsino, A., Angelis, P.D., & Grego, S. (2005). Seasonality of soil biological properties in a poplar plantation growing under elevated atmospheric CO₂. *Applied Soil Ecology*, 30, 162-173. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.02.008>
 32. Nadelhoffer, K.J., & Raich, J.W. (1992). Fine root production estimates and belowground carbon allocation in forest ecosystems. *Ecology*, 73, 1139–1147. <https://doi.org/10.2307/1940664>
 33. Neatrou, M.A., Jones, R.H., & Golladay, S.W. (2005). Correlations between soil nutrients availability and fine-root biomass at two spatial scales in forested wetlands with contrasting hydrological regimes. *NRC Research Press*, 35, 2934-2941. <https://doi.org/10.1139/x05-217>
 34. Pang, L. (2009). Microbial removal rates in subsurface media estimated from published studies of field experiments and large intact soil cores. *Journal of Environmental Quality*, 38, 1531-1559. <https://doi.org/10.2134/jeq2008.0379>
 35. Pransiska, Y., Triadiati, T., Tjitrosoedirjo, S., Hertel, D., & Kotowska, M.M. (2016). Forest conversion impacts on the fine and coarse root system, and soil organic matter in tropical lowlands of Sumatera (Indonesia). *Forest Ecology and Management*, 379, 288–298. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.07.038>
 36. Parkinson, J.A., & Allen, S.E. (1975). A wet oxidation procedure suitable for the determination of nitrogen and mineral nutrients in biological material. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 6, 1–11. <https://doi.org/10.1080/00103627509366539>
 37. Silva, V., Mol, H.G., Zomer, P., Tienstra, M.C., Ritsema, J., & Geissen, V. (2019). Pesticide residues in European agricultural soils—A hidden reality unfolded. *Science of the Total Environment*, 653, 1532-1545. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.441>
 38. Singha, D., Brearley, F.Q., & Tripathi, S.K. (2020). Fine root and soil nitrogen dynamics during stand development following shifting agriculture in Northeast India. *Forests*, 11, 123-142. <https://doi.org/10.3390/f11121236>
 39. Taati, S., Matinizadeh, M., Sagheb-Talebi, Kh., Rahmani, Kh., & Habashi, H. (2016). The role of canopy gap size and light intensity on soil phosphatase enzyme activity in Beech forest (Case study: Langa-Kladresht). *Iranian Journal of Plant Research*, 29, 532-539. (In Persian with English abstract)
 40. Tamooch, F., Huxhamd, M., Karachi, M., Mencuccini, J., M., Kairo, G., & Kirui, B. (2008). Below-ground root

- yieldand distribution in natural and replanted mangrove forests at Gazi bay, Kenya. *Forest Ecology and Management*, 256, 1290–1297. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.06.026>
41. Van der Heijden, M.G.A., Bardgett, R.D., & van Straalen, N.M. (2008). The unseen majority: Soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 11, 296–310. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01139.x>
42. Varesteh Khanlari, Z., Golchin, A., & Mousavi Cooper, 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, 1055-1068. (In Persian with English abstract)
43. Wright, A.J., Barry, K.E., Lortie, C.J., & Callaway, R.M. (2021). Biodiversity and ecosystem functioning: Have our experiments and indices been underestimating the role of facilitation? *Journal of Ecology*, 109, 1962-1968. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13665>
44. Yang, L.L., Zhang, F.S., Mao, R.Z., Ju, X.T., Cai, X.B., Lu, Y.H. (2008). Conversion of natural ecosystems to cropland increases the soil net nitrogen mineralization and nitrification in Tibet. *Pedosphere*, 18, 699–706. [https://doi.org/10.1016/s1002-0160\(08\)60065-x](https://doi.org/10.1016/s1002-0160(08)60065-x)
45. Yang, Y.S., Guo, J.F., Chen, G.S., He, Z.M., & Xie, J.S. (2003). Effects of slash burning nutrient removal and soil fertility in Chinese fir and evergreen broadleaved forests of mid-subtropical China. *Pedosphere*, 13, 87–96. [https://doi.org/10.1016/s1002-0160\(06\)60026-x](https://doi.org/10.1016/s1002-0160(06)60026-x)
46. Yuan, Z.Y., & Chen, H.Y.H. (2010). Fine root biomass, production, turnover rates, and nutrient contents in Boreal forest ecosystems in relation to species, climate, fertility, and stand age: Literature Review and Meta-Analyses. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 29, 204–221. <https://doi.org/10.1080/07352689.2010.483579>
47. Yuan, Z.Y., Chen, H.Y., & Reich, P.B. (2011). Global-scale latitudinal patterns of plant fine-root nitrogen and phosphorus. *Nature Communications*, 2, 12-19. <https://doi.org/10.1038/ncomms1346>
48. Zarafshar, M., Matinizadeh, M., Roustaei, M.J., Bordbar, S.K., Kooch, Y., Negahdarsaber, M.R., Abbasi, A., & Enayati, K. (2019). The impact of forest degradation and land use change on some soil biological indices (case study: Persian oak (*Quercus brantii* Lindl) forests in Fars province). *Journal of Plant Ecosystem Conservation*, 7, 319-332. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103536>
49. Zeng, D.H., Hu, Y.L., Chang, S.X., & Fan, Z.P. (2009). Land cover change effects on soil chemical and biological properties after planting Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) in sandy lands in Keerqin, northeastern China. *Plant and Soil*, 317, 121-133. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9793-z>
50. Zhao, L., Jia, K., Liu, X., Li, J., & Xia, M. (2023). Assessment of land degradation in Inner Mongolia between 2000 and 2020 based on remote sensing data. *Geography and Sustainability*, 4, 100-111. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2023.01.003>
51. Zhao, W., Hua, T., Meadows, M. E., & Pereira, P. (2021). Degradation debts accounting: A holistic approach towards land degradation neutrality. *Global Change Biology*, 27, 5411-5413. <https://doi.org/10.1111/gcb.15855>