

Research Paper

Effect of single-selection method on soil quality index in the Hyrcanian forests

Shohreh Kazemi^{*,1}, Seyed Mohammad Hojjati^{2,3}, Mahya Tafazoli⁴ and Masoumeh Izadi⁵

1,*- (Corresponding author) PhD in Forest Soil Science, Department of Silviculture and Forest Ecology, Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I. R. Iran. (shohreh.kazemi86@gmail.com)

2- Professor, Department of Forest Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, I. R. Iran. (s_m_hodjati@yahoo.com)

3- Visiting researcher, Silviculture and Forest Ecology of the Temperate Zones, University of Göttingen, Büsgenweg 1, Göttingen 37077, Germany (sm.hojjati@uni-goettingen.de)

4- Assistant Professor, Department of Forest Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, I. R. Iran. (mahya_tafazoli@yahoo.com)

5- PhD in Forest Soil Science, Department of Silviculture and Forest Ecology, Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I. R. Iran. (m.izadi460@yahoo.com)

Received: 18 July 2025

Accepted: 19 August 2025

Extended Abstract

Background and Objective: Hyrcanian forests, recognized as one of the most important temperate broadleaf forests of the Northern Hemisphere with a history spanning several million years, play a fundamental role in biodiversity conservation, regulation of ecological cycles, and the provision of ecosystem services. These forests, particularly in their eastern regions, are increasingly exposed to pressures arising from unsustainable harvesting, climate change, and habitat degradation. Among the various components of forest ecosystems, soil serves as the primary substrate for biological and chemical cycles and is therefore central to ecological stability. Soil quality, as an integrated indicator, reflects the soil's capacity to perform biological, chemical, and physical functions. Accordingly, assessment of the Soil Quality Index (SQI) can provide an effective tool for evaluating the impacts of forest management practices on ecosystem sustainability. The main objective of this study was to investigate the effects of single-tree selection silviculture on soil physical, chemical, and biological properties, as well as on the soil quality index, in the eastern Hyrcanian forests.

Material and Methods: This study was conducted in the Khalilshahr forest area located in eastern Mazandaran Province, northern Iran. The study area comprised two distinct management zones: (1) a forest managed under the single-tree selection system and (2) an unmanaged control area without harvesting. Soil sampling was carried out from the 0–10 cm depth using a completely randomized design in each zone, with a total of 20 soil samples collected per zone. Physical soil properties included texture (percentages of sand, silt, and clay) and bulk density (BD). Chemical properties included pH, electrical conductivity (EC), total nitrogen (TN), phosphorus (P), potassium (K), and organic carbon (OC). Biological properties included ammonium (NH_4^+) and nitrate (NO_3^-) production rates, all measured using standard laboratory methods. Principal component analysis (PCA) was applied to identify key indicators, and the soil quality index was calculated using a weighted scoring approach. A generalized linear model (GLM) was employed to determine the main factors influencing SQI.

Results: The results indicated that single-tree selection management significantly improved several soil properties compared with the control area. Specifically, sand content, volumetric soil moisture, pH, EC, total nitrogen, phosphorus, potassium, and ammonium production rate were significantly higher in the managed area ($P < 0.05$). In contrast, no significant differences were observed in bulk density, organic carbon, or nitrate production rate between the two zones. PCA results showed that the first two components explained more than 67% of the total variance; the first component was associated with soil fertility and physico-chemical quality, while the second component was related to nitrogen cycling processes. The soil quality index was significantly higher in the single-tree selection area than in the control. GLM results revealed that potassium, bulk density, and phosphorus were the most influential variables explaining SQI variation, and the model demonstrated strong predictive performance with a coefficient of determination of 0.87.

Conclusion: The findings demonstrate that single-tree selection forest management, when properly implemented in accordance with sustainable harvesting principles, can positively influence key soil properties and ultimately enhance soil quality. This suggests that selective, tree-based harvesting systems, unlike large-scale clear-cutting, have the capacity to maintain or even improve soil biological and chemical functioning. Given the critical role of soil in forest ecosystem stability and restoration, appropriate soil-focused management can substantially contribute to ecosystem health. Future studies are recommended to investigate the long-term effects of this management approach on soil carbon and nitrogen dynamics, the influence of vegetation species composition, and the role of soil microbial biodiversity. Moreover, the application of advanced modeling approaches to better predict spatial and temporal changes in soil quality indices could support the development of more precise and effective forest management strategies.

Keywords: Soil biological properties, Soil fertility, Soil quality, Silvicultural method, Hyrcanian forests.

How to Cite This Article: Kazemi, S., Hojjati, S. M., Tafazoli, M., and Izadi, M. (2025). Effect of single-selection method on soil quality index in the Hyrcanian forests. *Forest Research and Development*, 11(3), 401-420. DOI: [10.30466/jfrd.2025.56392.1768](https://doi.org/10.30466/jfrd.2025.56392.1768)



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

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

اثر اجرای شیوه جنگل‌شناسی تک‌گزینی بر شاخص کیفیت خاک در جنگل‌های هیرکانی

شهره کاظمی^{۱*}، سیدمحمد حجتی^۲، محیا تفضلی^۳ و معصومه ایزدی^۴

۱- دانش‌آموخته دکتری جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. (shohreh.kazemi86@gmail.com)

۲- استاد، گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. (s_m_hodjati@yahoo.com)

۳- پژوهشگر میهمان، گروه جنگل‌شناسی و بوم‌شناسی جنگل‌های مناطق معتدله، دانشگاه گوتینگن، گوتینگن، آلمان. (sm.hojjati@uni-goettingen.de)

۴- استادیار، گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. (mahya_tafazoli@yahoo.com)

۵- دانش‌آموخته دکتری جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. (m.izadi460@yahoo.com)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰

چکیده

مقدمه و هدف: جنگل‌های هیرکانی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین جنگل‌های پهن‌برگ نیمکره شمالی، با قدمتی بیش از چند میلیون سال، نقشی اساسی در حفاظت از تنوع زیستی، تنظیم چرخه‌های زیست‌محیطی و ارائه خدمات بوم‌شناسی ایفا می‌کنند. این جنگل‌ها به‌ویژه در ناحیه شرقی خود، در معرض فشارهای ناشی از بهره‌برداری ناپایدار، تغییرات اقلیمی و کاهش کیفیت زیستگاه‌ها قرار دارند. در میان اجزای مختلف بوم-سازگان جنگل، خاک به‌عنوان بستر اصلی چرخه‌های زیستی و شیمیایی، جایگاه ویژه‌ای در پایداری بوم-شناختی آن دارد. کیفیت خاک به‌عنوان شاخصی ترکیبی، توانایی خاک در انجام عملکردهای زیستی، شیمیایی و فیزیکی را نشان می‌دهد. از این‌رو، ارزیابی شاخص کیفیت خاک (Soil Quality Index - SQI) می‌تواند ابزار مؤثری برای تحلیل تأثیر اقدامات مدیریتی بر پایداری جنگل باشد. هدف اصلی این پژوهش بررسی اثر اجرای شیوه جنگل‌شناسی تک‌گزینی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، زیستی خاک و شاخص کیفیت خاک در بخش شرقی جنگل‌های هیرکانی بود.

مواد و روش‌ها: این پژوهش در منطقه جنگلی خلیل‌شهر واقع در شرق استان مازندران انجام شد. این منطقه شامل دو منطقه مدیریتی مجزا است: (۱) منطقه تحت مدیریت به شیوه تک‌گزینی (Single-tree Selection) و (۲) منطقه شاهد، فاقد بهره‌برداری. نمونه‌برداری خاک از عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متر در قالب طرح کاملاً تصادفی در هر منطقه انجام شد. در مجموع ۲۰ نمونه خاک از هر منطقه برداشت شد. ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل بافت (درصد شن، سیلت و رس) و چگالی ظاهری (BD)، ویژگی‌های شیمیایی شامل pH، هدایت الکتریکی (EC)، نیتروژن کل (TN)، فسفر (P)، پتاسیم (K) و کربن آلی (OC)، و ویژگی‌های زیستی شامل نرخ تولید آمونیوم (NH_4^+) و نیترات (NO_3^-) با استفاده از روش‌های استاندارد آزمایشگاهی اندازه‌گیری

شدند. برای تعیین شاخص کیفیت خاک، از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای انتخاب شاخص‌های کلیدی استفاده شد و سپس شاخص کیفیت خاک با روش شاخص‌سازی وزن‌دار محاسبه شد. برای شناسایی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر SQI، مدل خطی تعمیم‌یافته (GLM) اجرا شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که مدیریت جنگل به شیوه تک‌گزینی موجب بهبود معنی‌دار برخی از ویژگی‌های خاک نسبت به منطقه شاهد شده است. به‌طور ویژه، در منطقه مدیریت‌شده، درصد شن، رطوبت حجمی، pH، هدایت الکتریکی، درصد نیتروژن کل، فسفر، پتاسیم و نرخ تولید آمونیوم به‌طور معنی‌داری افزایش یافته‌اند (سطح معنی‌داری $P < 0.05$). در مقابل، تفاوت معنی‌داری در چگالی ظاهری، کربن آلی و نرخ تولید نیترات بین دو منطقه مشاهده نشد. تجزیه مؤلفه‌های اصلی نشان داد که دو مؤلفه اول بیش از ۶۷ درصد واریانس کل را تبیین می‌کنند؛ مؤلفه اول نمایانگر ویژگی‌های حاصلخیزی و کیفیت فیزیکی-شیمیایی خاک بود و مؤلفه دوم به فرآیندهای مرتبط با چرخه نیتروژن مربوط می‌شد. شاخص کیفیت خاک (SQI) در منطقه تحت مدیریت به شیوه تک‌گزینی، به‌طور معنی‌داری بیشتر از منطقه شاهد بود. نتایج مدل خطی تعمیم‌یافته نشان داد که سه متغیر پتاسیم، چگالی ظاهری و فسفر، به‌ترتیب بیشترین نقش را در تبیین تغییرات SQI داشتند و مدل با ضریب تبیین ۰/۸۷ عملکرد مطلوبی در پیش‌بینی شاخص کیفیت خاک داشت.

نتیجه‌گیری: یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که مدیریت جنگل به شیوه تک‌گزینی، اگر به‌درستی و بر اساس اصول بهره‌برداری پایدار اجرا شود، می‌تواند تأثیرات مثبتی بر ویژگی‌های مهم خاک و در نهایت بر شاخص کیفیت خاک داشته باشد. این امر بیانگر آن است که بهره‌برداری‌های مبتنی بر انتخاب تک‌درخت، برخلاف برداشت‌های گسترده، توانایی حفظ و حتی بهبود عملکرد زیستی و شیمیایی خاک را دارند. از آنجا که خاک عامل کلیدی در پایداری و احیای بوم‌سازگان جنگلی است، مدیریت صحیح آن می‌تواند در حفظ سلامت این بوم‌سازگان نقش مؤثری ایفا کند. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، اثرهای بلندمدت این نوع مدیریت بر پویایی کربن و نیتروژن خاک، تأثیر ترکیب گونه‌ای پوشش گیاهی، و نقش تنوع زیستی ریزجانداران خاک بررسی شود. همچنین، بهره‌گیری از مدل‌های پیشرفته برای پیش‌بینی بهتر تغییرات شاخص کیفیت خاک در سطوح مختلف مکانی و زمانی می‌تواند به توسعه راهکارهای مدیریتی دقیق‌تر کمک کند.

واژه‌های کلیدی: ویژگی‌های زیستی خاک، حاصلخیزی خاک، کیفیت خاک، شیوه جنگل‌شناسی، جنگل‌های هیرکانی.

جنگل‌های هیرکانی به‌عنوان یکی از ارزشمندترین باقی‌مانده‌های جنگل‌های پهن‌برگ خزری، در نوار باریکی از سواحل جنوبی دریای خزر تا دامنه‌های شمالی رشته‌کوه البرز گسترده شده‌اند و با قدمتی مربوط به دوره سوم زمین‌شناسی، نقش مهمی در حفظ تنوع زیستی، تعادل بوم‌شناسی و ارائه خدمات زیست‌بوم ایفا می‌کنند (Noroozi et al., 2020; Hadinezhad et al., 2025). این جنگل‌ها با دارا بودن پوشش گیاهی متراکم و ساختار پیچیده، خدمات متعددی مانند تثبیت کربن، حفاظت از منابع آب، تنظیم اقلیم محلی و کاهش فرسایش خاک را فراهم می‌کنند. با این حال، طی دهه‌های اخیر، عوامل انسانی مانند بهره‌برداری‌های گسترده، تغییرات کاربری اراضی و اجرای شیوه‌های مختلف مدیریتی، پایداری این بوم‌سازگان‌ها را با تهدیدات جدی مواجه ساخته‌اند (Hojjati et al., 2021; Tafazoli and Hojjati, 2025).

مدیریت جنگل، از طریق اجرای طرح‌های جنگلداری، عملیات بهره‌برداری، بازسازی یا احیای اراضی جنگلی، می‌تواند بر ساختار و ترکیب پوشش گیاهی، تنوع گونه‌ای و در نهایت ویژگی‌های خاک تأثیرگذار باشد (Battles et al., 2001; Duguid and Ashton, 2013). واکنش جنگل نسبت به این مداخلات، به‌عنوان یک بوم‌سازگان زنده، می‌تواند مثبت یا منفی باشد؛ به‌طوری‌که مدیریت پایدار سبب ارتقاء کارکردهای بوم‌شناختی شده و در مقابل، مدیریت ناپایدار موجب تخریب و تنزل کیفیت زیستی این بوم-سازگان می‌شود. بنابراین، درک و ارزیابی پاسخ بوم-سازگان جنگلی نسبت به اقدامات مدیریتی، پیش‌نیاز طراحی برنامه‌های کارآمد برای حفاظت و بهره‌برداری اصولی از منابع جنگلی است (Asplund et al., 2024).

پژوهش‌های متعدد نشان داده‌اند که فعالیت‌های مدیریتی در جنگل، می‌توانند ساختار فیزیکی خاک را تحت تأثیر قرار داده و منجر به افزایش وزن مخصوص ظاهری، کاهش تخلخل، کاهش نفوذپذیری، تغییر در پایداری خاک‌دانه‌ها و کوبیدگی لایه‌های سطحی آن شوند (Demir et al., 2007; Elliot et al., 2018). از سوی دیگر، ویژگی‌های شیمیایی خاک نیز در برابر مدیریت جنگل حساس هستند؛ به‌عنوان نمونه، کاهش pH، کاهش هدایت الکتریکی، کاهش دسترسی به عناصر غذایی و تغییر در نسبت کربن به نیتروژن از پیامدهای رایج اقدامات مدیریتی گزارش شدند (Kazemi et al., 2015; Chandra et al., 2016). همچنین، ویژگی‌های زیستی خاک مانند تنوع و فعالیت ریزجانداران، زی‌توده میکروبی و کارایی چرخه‌های زیستی نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرند (Chandra et al., 2016; Kazemi et al., 2017).

با توجه به ارتباط بین ساختار جنگل و وضعیت خاک (Peña-Claros et al., 2012)، بررسی اثر مدیریت جنگل بر ویژگی‌های خاک، از اهمیت بالایی برخوردار است (Li et al., 2013). این بررسی امکان درک عمیق‌تری از تعاملات جنگل و خاک را فراهم کرده و پایه‌ای علمی برای مدیریت پایدار جنگل به شمار می‌رود. تحلیل واکنش‌های خاک نسبت به فرآیندهای طبیعی و مدیریتی، بینشی ارزشمند در مورد سلامت بوم‌سازگان، تاب‌آوری آن و پایداری عملکردهای بلندمدت فراهم می‌کند. درک ارتباط میان مدیریت جنگل و شرایط خاک، گامی اساسی در راستای ارتقای راهبردهای مدیریت پایدار جنگل است (Grigal, 2000). توسعه و تحول خاک‌ها نه تنها در نتیجه تأثیرات پوشش گیاهی رخ می‌دهد، بلکه خود خاک نیز نقش فعالی در جهت‌دهی به رشد و بازسازی پوشش‌های گیاهی به ویژه جنگل ایفا می‌کند. از این‌رو، ارزیابی

پاسخ‌های خاک به شیوه‌های مختلف مدیریتی می‌تواند درک ما از کارکرد و تاب‌آوری بوم‌سازگان‌های جنگلی را به‌طور معناداری افزایش دهد (Osman and Osman, 2013).

برای ارزیابی پاسخ‌های خاک به مدیریت جنگل به‌صورت نظام‌مند و یکپارچه، شاخص کیفیت خاک (Soil Quality Index) چارچوبی ارزشمند ارائه می‌دهد (Arredondo-Ruiz et al., 2014). این شاخص با تلفیق داده‌های پیچیده حاصل از مجموعه‌ای از شاخص‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، آنها را به یک معیار قابل تفسیر و جامع تبدیل می‌کند. استفاده از این شاخص یکپارچه، امکان شناسایی تغییرات وضعیت خاک در گذر زمان و در شرایط مدیریتی مختلف را فراهم می‌سازد؛ تغییری که ممکن است از طریق بررسی هر یک از شاخص‌های خاک به تنهایی آشکار نباشد (Vasu et al., 2024). پایش شاخص کیفیت خاک در طول دوره‌های مختلف مدیریتی جنگل، نشان می‌دهد که تغییرات درصد تاج پوشش، مقدار لاشبرگ، فعالیت ریشه و شرایط ریزاقليمی چگونه می‌توانند به تفاوت‌های قابل اندازه‌گیری در عملکرد خاک منجر شوند (Burger and Kelting, 1999). این تفاوت‌ها ممکن است بر فرآیندهای کلیدی بوم‌سازگان مانند در دسترس بودن عناصر غذایی، چرخه کربن، فعالیت میکروبی و تنظیم چرخه آب تأثیرگذار باشند؛ فرآیندهایی که همگی برای حفظ سلامت و بهره‌وری جنگل حیاتی‌اند. به‌عنوان مثال، کاهش کیفیت خاک می‌تواند این فرآیندها را مختل کرده و منجر به ناپایداری بوم‌سازگان یا کاهش تاب‌آوری آن در برابر تنش‌های محیطی شود (Lal, 1997).

باوجود اهمیت بالایی بررسی تأثیر مدیریت جنگل بر شاخص کیفیت خاک، پژوهش‌های اندکی به‌طور جامع به ارزیابی تغییرات کیفیت خاک و عملکردهای

بوم‌سازگان در مراحل مختلف مدیریتی یا تحول ساختاری در بوم‌سازگان‌های جنگلی طبیعی، به‌ویژه جنگل‌های هیرکانی، پرداخته‌اند. از این‌رو، هدف این پژوهش بررسی تأثیر مدیریت جنگل به شیوه تک‌گزینی بر ویژگی‌های خاک و کیفیت آن با استفاده از شاخص کیفیت خاک به‌عنوان ابزاری تشخیصی بود. یافته‌های این پژوهش می‌توانند درک بهتری از عملکرد خاک به واسطه اعمال مدیریت در جنگل‌های هیرکانی فراهم آورده و مبنایی علمی برای تدوین راهبردهای مدیریتی متناسب با آن فراهم کند. همچنین، این نتایج در راستای اهداف کلان حفاظت پایدار جنگل، حفاظت از تنوع زیستی نقش مؤثری ایفا خواهند کرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش

برای انجام این پژوهش، در سال ۱۳۹۱ دو قطعه جنگلی (پارسل‌های ۱۰ و ۱۲) از سری یک طرح جنگلداری خلیل‌شهر، واقع در استان مازندران، انتخاب شدند. پارسل ۱۰ به‌عنوان قطعه شاهد (با توجه به اطلاعات موجود، از زمان اجرای طرح جنگلداری در سال ۱۳۷۲ در این پارسل مداخله مدیریتی انجام نشده است) و پارسل ۱۲ به‌عنوان قطعه مدیریت‌شده (تحت بهره‌برداری به روش تک‌گزینی از سال ۱۳۷۲) در نظر گرفته شدند. این منطقه در مختصات جغرافیایی ۵۳ درجه و ۴۵ دقیقه و ۴۲ ثانیه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۱۶ دقیقه عرض شمالی قرار دارد و در ارتفاع متوسط ۸۰۰ متر از سطح دریا واقع شده است. هر دو قطعه از نظر شرایط رویشگاهی و ترکیب پوشش گیاهی مشابه بوده و دارای شیب تقریبی ۳۰ درصد با جهت غالب شمالی هستند. سنگ مادر منطقه از نوع آهکی-دولومیتی است و خاک غالب، خاک قهوه‌ای شسته‌شده با افق کلسیک است. اقلیم منطقه با میانگین بارندگی

سالیانه ۶۷۹ میلی‌متر مشخص می‌شود. دمای منطقه در گرم‌ترین ماه (مرداد) به بیشینه ۴۳ درجه سانتی‌گراد و در سردترین ماه (بهمن) به کمینه ۹- درجه سانتی‌گراد می‌رسد. میانگین دمای بیشینه در مرداد ۳۱ درجه سانتی‌گراد و میانگین دمای کمینه در بهمن ۸/۲ درجه سانتی‌گراد است. ساختار جنگل در این قطعات به‌صورت ناهمسال و چندآشکوبه (دو تا سه آشکوبه) است. تیپ درختی غالب، راش-ممرز همراه با گونه‌های انجیلی (*Parrotia persica* C.A.Mey.)، خرمندی (*Diospyros lotus*) و توسکا (*Alnus glutinosa*) است. درختان در این جنگل در طبقه‌های سنی متنوع (جوان، میانسال و مسن) قرار دارند، که نشان‌دهنده تنوع سنی و ساختاری در بوم‌سازگان جنگلی است.

نمونه‌برداری خاک و تجزیه آزمایشگاهی خاک

در هر یک از دو پارسل مورد پژوهش، ۲۰ قطعه‌نمونه ۱۰ آری دایره‌ای شکل به‌صورت تصادفی-منظم با ابعاد شبکه ۷۵×۱۰۰ متر پیاده شد. در هر قطعه‌نمونه تعداد پنج ریزقطعه‌نمونه با مساحت یک متر مربع، یکی از آنها در مرکز و چهار ریز-قطعه‌نمونه دیگر در چهار جهت اصلی پیاده شدند. در مرکز هر قطعه‌نمونه، برای بررسی ویژگی‌های فیزیکی خاک، نمونه‌های دست‌نخورده از عمق صفر-۱۰ سانتی‌متر با استفاده از استوانه فلزی جمع‌آوری شدند. همچنین، برای بررسی ویژگی‌های شیمیایی خاک، در هر قطعه‌نمونه، پنج نمونه خاک یکی از آنها از مرکز و چهار نمونه دیگر در چهار جهت اصلی از همان عمق برداشت شد و پس از مخلوط کردن، یک نمونه مرکب تهیه شد (Kazemi et al., 2015).

نمونه‌های خاک در محیط باز پخش و در دمای محیط خشک شدند. پس از خشک شدن، خاک‌ها خرد شده و از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند تا برای آزمایش آماده شوند. ویژگی‌های خاک با روش‌های استاندارد آزمایشگاهی اندازه‌گیری شدند: رطوبت خاک

با روش توزین و خشک کردن، بافت خاک (درصد اجزای تشکیل‌دهنده) با روش هیدرومتری، وزن مخصوص ظاهری با روش کلوخه، اسیدیته خاک (pH) با دستگاه pH متر، هدایت الکتریکی (EC) پس از تهیه عصاره با دستگاه EC متر، نیتروژن کل با روش کج‌لدال و دستگاه کج‌لتک، فسفر و پتاسیم قابل جذب با دستگاه اسپکتروفوتومتر، و کربن آلی با روش والکلی-بلک اندازه‌گیری شدند (Ghazanshahi, 2006).

معدنی‌شدن خالص نیتروژن (N)، تولید آمونیوم و نیترات با استفاده از روش کیسه مدفون (Buried-bag method) مورد ارزیابی قرار گرفت (Binkley and Hart, 1989). در هر قطعه‌نمونه، دو نمونه (A و B) از عمق ۱۰ سانتی‌متری خاک در تیرماه برداشت شد. نمونه A بلافاصله در کیسه‌های پلی‌اتیلنی به آزمایشگاه منتقل شد (زمان اول)، در حالی که نمونه B در همان محل در کیسه‌های پلی‌اتیلنی قرار گرفته و به مدت ۳۰ روز در خاک مدفون شد (زمان دوم)؛ ۳۰ روز پس از زمان اول از عرصه برداشت و به آزمایشگاه منتقل شد. پس از برداشت، کلیه نمونه‌ها تا زمان آنالیز در دمای کمتر از چهار درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. پس از انتقال نمونه‌های خاک به آزمایشگاه و انجام مراحل آماده‌سازی (خشک کردن، کوبیدن و عبور از الک دو میلی‌متری)، ازت کل (Nt) و ازت معدنی (NH_4^+ و NO_3^-) برای تمام نمونه‌های متعلق به هر دو سری زمانی اندازه‌گیری شد (Ghazanshahi, 2006).

برای برآورد نرخ معدنی‌شدن خالص نیتروژن، نمونه‌های خاک (۱۰ گرم) آسیاب و از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند، سپس با ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول KCl با غلظت دو مول بر لیتر به مدت ۶۰ دقیقه استخراج شدند. محلول‌های خاک از فیلتر واتمن شماره ۴۲ عبور داده شدند. غلظت یون آمونیوم (NH_4^+) در تمام نمونه‌ها با استفاده از روش رنگ‌سنجی ایندوفنول

شاخص کیفیت خاک را فراهم می‌سازد (Navas et al., 2011).

تمام داده‌های خام مربوط به ویژگی‌های خاک وارد PCA در نرم‌افزار R شدند. ابتدا تمام مؤلفه‌های اصلی با مقدار ویژه (Eigenvalue) بیش از یک انتخاب شدند. برای استخراج مجموعه داده‌ی حداقلی (MDS)، از هر مؤلفه تنها متغیرهایی انتخاب شدند که همبستگی آنها با همان مؤلفه در میان ۱۰ درصد بالاتر (بر حسب قدر مطلق) قرار داشت. در صورتی که چند متغیر در یک مؤلفه بار عاملی بالایی داشتند، همبستگی بین آنها نیز بررسی شد و در صورت کمتر بودن مقدار همبستگی بین متغیری از ۰/۶، هر دو متغیر حفظ شدند؛ اما اگر همبستگی بالاتر از ۰/۶ بود، تنها یکی از آنها (دارای همبستگی بالاتر با مؤلفه) در مجموعه‌ی MDS باقی ماند. پس از انتخاب متغیرهای نهایی، مقادیر آنها به بازه‌ی بین صفر تا یک نرمال‌سازی شدند. برای این منظور، مقدار هر مشاهده ابتدا از کمترین مقدار همان متغیر کسر و سپس بر دامنه تغییرات آن متغیر (یعنی تفاوت بین بیشینه و کمینه) تقسیم شد. برای وزندهی به متغیرهای انتخاب‌شده، ابتدا سهم هر مؤلفه از واریانس کل (بر اساس نسبت واریانس توضیح داده‌شده توسط آن مؤلفه به مجموع واریانس مؤلفه‌های انتخاب‌شده) محاسبه شد. سپس این وزن به متغیرهای منتسب به همان مؤلفه تخصیص داده شد (Andrews et al., 2002). در نهایت، شاخص کیفیت خاک با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد:

$$SQI = \sum_{i=1}^n w_i S_i \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن، S_i امتیاز استاندارد شده برای هر متغیر، n تعداد متغیرهای موجود انتخاب شده در مجموعه داده حداقلی (MDS)، و w_i وزن اختصاص داده‌شده به هر متغیر است.

(Dorich and Nelson, 1983) اندازه‌گیری شد، در حالی که غلظت نترات (NO_3^-) با روش کاهش کادمیوم تعیین شد.

مقدار معدنی‌شدن خالص نیتروژن به صورت افزایش خالص تولید آمونیوم و نترات پس از ۳۰ روز با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شدند. افزایش در غلظت NO_3^- به عنوان نرخ تولید نترات خالص، و افزایش NH_4^+ به عنوان نرخ تولید آمونیوم خالص در نظر گرفته شد (Durán et al., 2009).

$$N_m = [(N_{t2} - N_{t1})/t] \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن، N_m نرخ معدنی‌شدن خالص نیتروژن، N_{t1} مقدار نیتروژن معدنی در زمان دوم، N_{t2} مقدار نیتروژن معدنی در زمان اول، و t مدت زمان تولید نیتروژن معدنی خالص (۳۰ روز) است.

شاخص کیفیت خاک

برای برآورد شاخص کیفیت خاک، از یک روش آماری مبتنی بر تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) استفاده شد (Navas et al., 2011). در این روش، PCA برای ایجاد یک مجموعه داده حداقلی (Minimum Data Set: MDS) بکار رفت تا از تعداد شاخص‌ها کاسته شده و از تکرار اطلاعات جلوگیری شود (Navas et al., 2011). عملکرد اصلی PCA کاهش ابعاد مجموعه داده‌ای متشکل از متغیرهای به هم وابسته است، به گونه‌ای که بیشترین واریانس ممکن حفظ شود. این کاهش ابعاد با تبدیل داده‌ها به مجموعه‌ای از متغیرهای بدون همبستگی تحت عنوان مؤلفه‌های اصلی (PCs) انجام می‌شود که بر اساس مقدار واریانس توضیح داده‌شده رتبه‌بندی شد، به طوری که چند مؤلفه اول، بیشترین تغییرات موجود در داده‌های اولیه را پوشش می‌دهند (Jolliffe and Cadima, 2016). به عبارت دیگر، PCA ابزاری برای کاهش داده‌ها است که امکان انتخاب مهم‌ترین شاخص‌ها برای نمایش و برآورد

تجزیه و تحلیل داده‌ها

پس از تهیه داده‌ها، نرمال بودن و همگنی واریانس آنها به ترتیب با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و آزمون لون بررسی شد. برای مقایسه ویژگی‌های خاک بین دو منطقه شاهد و مدیریت‌شده، از آزمون t مستقل در نرم‌افزار SPSS (نسخه ۲۶) استفاده شد. PCA با استفاده از بسته FactoMineR، تحلیل همبستگی پیرسون برای بررسی رابطه بین ویژگی‌های خاک و شاخص کیفیت خاک با بسته corplot، و تحلیل اهمیت نسبی متغیرها با مدل خطی تعمیم‌یافته (GLM) در قالب بسته caret، همگی در محیط R انجام شدند (Lê, 2008; Wei et al., 2017; Kuhn et al., 2020).

نتایج

ویژگی‌های خاک

بر اساس نتایج جدول ۱، مدیریت جنگل به شیوه تک-گزینی تأثیر معنی‌داری بر برخی از ویژگی‌های خاک داشت. مقدار رطوبت خاک در منطقه مدیریت‌شده به‌طور معنی‌داری بیشتر از منطقه شاهد بود. همچنین، درصد رس در منطقه شاهد بیشتر و درصد شن در منطقه مدیریت‌شده به‌طور معنی‌داری بیشتر بود. مقادیر pH و EC در خاک منطقه مدیریت‌شده به‌طور معنی‌داری بالاتر بودند. همچنین، مقدار نیتروژن کل، پتاسیم و فسفر قابل جذب در منطقه مدیریت‌شده نسبت به شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. در مقابل، تفاوت معنی‌داری در چگالی ظاهری، کربن آلی و برخی فرم‌های نیتروژن (Nit_1 ، $Ammon_1$ ، Nit_2 ، Nitrification) بین دو منطقه مشاهده نشد. با این حال، فرآیند تولید آمونیوم (Ammonification) در منطقه مدیریت‌شده به‌طور معنی‌داری بیشتر بود.

جدول ۱- مقادیر (میانگین $\pm$ اشتباه معیار) ویژگی‌های خاک در منطقه شاهد و مدیریت‌شده به شیوه تک‌گزینی

Table 1. Values (mean $\pm$ Std. error) of soil properties in the control and single selection managed areas

آماره t	اشتباه معیار	میانگین	نوع جنگل	علامت اختصاری	ویژگی خاک
t Value	Std. Error	Mean	Forest Type	Abbreviation	Soil properties
7.547 **	3.14183	69.6	مدیریت شده Managed	Moisture	درصد رطوبت Moisture (%)
	2.41316	39.7	شاهد Unmanaged		
-1.331 ns	0.08327	1.4839	مدیریت شده Managed	BD	چگالی ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب) Bulk density (g cm-3)
	0.037	1.6051	شاهد Unmanaged		
-3.454 **	1.98969	8.818	مدیریت شده Managed	Clay	درصد رس Clay (%)
	2.47158	19.778	شاهد Unmanaged		
4.719 **	5.25363	76.448	مدیریت شده Managed	Sand	درصد شن Sand (%)
	3.026	47.838	شاهد Unmanaged		

ادامه جدول ۱.

Continued Table 1.

آماره t t Value	اشتباه معیار Std. Error	میانگین Mean	نوع جنگل Forest Type	علامت اختصاری Abbreviation	ویژگی خاک Soil properties
-4.810 **	3.37086	14.734	مدیریت شده Managed	Silt	درصد سیلت Silt (%)
	1.44917	32.384	شاهد Unmanaged		
4.442 **	0.17891	6.472	مدیریت شده Managed	pH	اسیدیته pH
	0.11152	5.5356	شاهد Unmanaged		
5.522 **	0.03145	0.6307	مدیریت شده Managed	EC	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر) Electrical conductivity (ds m ⁻¹)
	0.03514	0.3703	شاهد Unmanaged		
1.737 ns	0.22497	6.8519	مدیریت شده Managed	OC	درصد کربن آلی Organic carbon (%)
	0.23142	6.2911	شاهد Unmanaged		
22.487 **	0.01215	0.6164	مدیریت شده Managed	N	درصد نیتروژن کل Total Nitrogen (%)
	0.00517	0.3195	شاهد Unmanaged		
8.661 **	14.15156	331	مدیریت شده Managed	K	پتاسیم قابل جذب (میلی گرم بر کیلوگرم) Available Potassium (mg kg ⁻¹)
	2.71129	206.2	شاهد Unmanaged		
4.967 **	1.89033	18.8	مدیریت شده Managed	P	فسفر قابل جذب (میلی گرم بر کیلوگرم) Available phosphorous (mg kg ⁻¹)
	0.29059	9.3	شاهد Unmanaged		
-1.849 ns	0.40877	13.287 3	مدیریت شده Managed	Nit1	غلظت نترات دوره اول (میلی گرم بر کیلوگرم) Nitrate of first collection (md kg ⁻¹)
	0.19574	14.125 3	شاهد Unmanaged		
-1.662 ns	0.10113	12.764	مدیریت شده Managed	Ammon1	غلظت آمونیم دوره اول (میلی گرم بر کیلوگرم) Ammonium of first collection (md kg ⁻¹)
	0.41465	13.473 3	شاهد Unmanaged		
-0.978 ns	0.0578	16.526	مدیریت شده Managed	Nit2	غلظت نترات دوره دوم (میلی گرم بر کیلوگرم) Nitrate of second collection (md kg ⁻¹)
	0.66011	17.174	شاهد Unmanaged		

Continued Table 1.

آماره t t Value	اشتباه معیار Std. Error	میانگین Mean	نوع جنگل Forest Type	علامت اختصاری Abbreviation	ویژگی خاک Soil properties
15.631 **	0.11554	14.126	مدیریت شده Managed	Ammo2	غلظت آمونیوم دوره دوم (میلی گرم بر کیلوگرم) Ammonium of second collection (md kg ⁻¹)
	0.001	12.32	شاهد Unmanaged		
0.290 ns	0.0117	0.108	مدیریت شده Managed	Nitrification	تولید نترات (میلی گرم در روز) Nitrification (mg day ⁻¹)
	0.01866	0.1016	شاهد Unmanaged		
6.066 **	0.00048	0.0454	مدیریت شده Managed	Ammonification	تولید آمونیوم (میلی گرم در روز) Ammonification (mg day ⁻¹)
	0.01382	-0.0384	شاهد Unmanaged		

تک‌گزینی و تیمار شاهد نشان داد؛ به‌گونه‌ای که نمونه‌های مدیریت‌شده بیشتر در امتداد مؤلفه اول و در بخش راست نمودار پراکنش یافتند که نشان‌دهنده اثر مثبت مدیریت بر بهبود رطوبت خاک، عناصر غذایی، کربن آلی و فعالیت‌های میکروبی است. در مقابل، نمونه‌های شاهد بیشتر با متغیرهایی نظیر سیلت، رس، چگالی ظاهری و برخی اشکال اولیه نیتروژن همراه بودند. در نهایت، با توجه به بیشترین بار عاملی در مؤلفه‌های منتخب، چهار متغیر کربن آلی، نیتروژن کل، نترات دوره اول و نترات دوره دوم به‌عنوان شاخص‌های نماینده برای تشکیل مجموعه داده حداقلی و محاسبه شاخص کیفیت خاک انتخاب شدند.

تجزیه به مؤلفه‌های اصلی ویژگی‌های خاک

نتایج PCA نشان داد که دو مؤلفه نخست بیش از ۶۷ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین می‌کنند، به‌طوری‌که سهم مؤلفه اول حدود ۵۰ درصد و مؤلفه دوم نزدیک به ۱۷ درصد است (جدول ۲). بر اساس الگوی همبستگی متغیرها، مؤلفه اول ارتباط مثبت و قوی با رطوبت خاک، درصد شن، pH، هدایت الکتریکی، نیتروژن کل، فسفر، پتاسیم، Ammo2 و فرایند آمونیفیکاسیون داشت. در مقابل، مؤلفه دوم بیشتر تحت تأثیر متغیرهای مرتبط با تولید نترات و شاخص Nit2 قرار گرفت. بررسی نمودار دویعدی PCA تفکیک آشکاری بین نمونه‌های مناطق مدیریت‌شده با روش

جدول ۲- مقادیر ارزش ویژه و واریانس مؤلفه‌های اصلی ویژگی‌های خاک مورد پژوهش

Table 2. The Eigenvalues and explained variance for each principal component of soil properties

مؤلفه Component	شاخص ارزش ویژه Eigenvalues	درصد واریانس % of Variance	درصد واریانس تجمعی Cumulative %
1	8.508	50.048	50.048
2	2.987	17.570	67.618
3	1.509	8.876	76.494
4	1.437	8.452	84.946

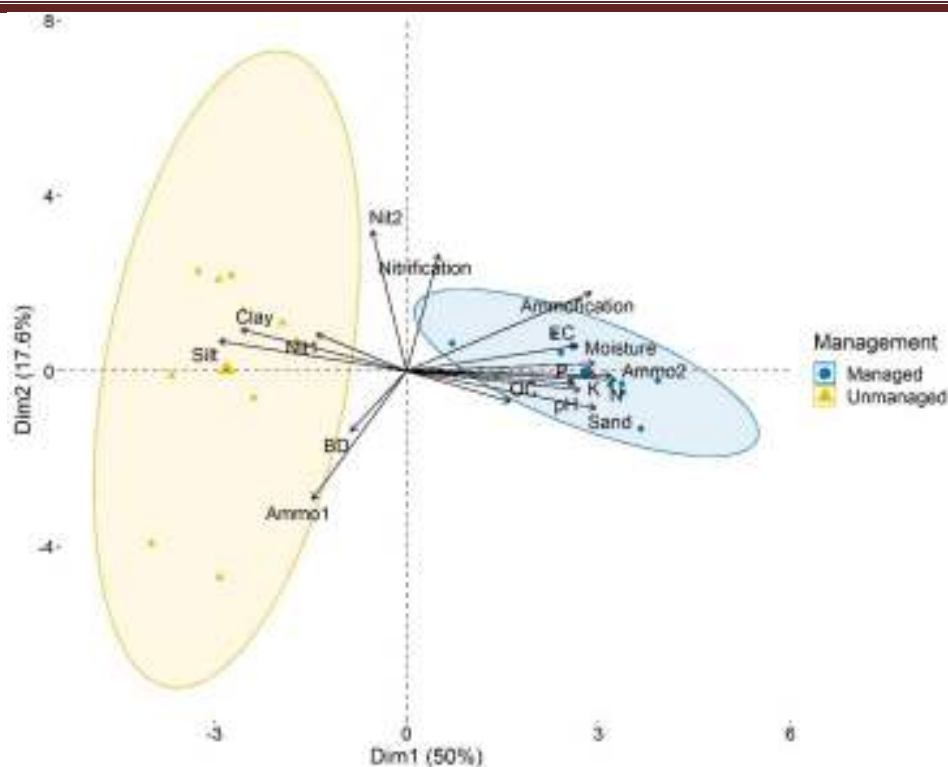
جدول ۳- مقادیر همبستگی متغیرهای مورد پژوهش با مؤلفه‌های اصلی

Table 3. Correlation coefficients of the studied variables with the principal components

مؤلفه Component				ویژگی خاک Soil properties
4	3	2	1	
-0.294	-0.120	0.051	0.856	درصد رطوبت Moisture (%)
0.461	0.578	-0.404	-0.256	چگالی ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب) Bulk density (g cm ⁻³)
-0.136	-0.042	0.277	-0.754	درصد رس Clay (%)
0.238	-0.032	-0.247	0.862	درصد شن Sand (%)
-0.288	0.083	0.199	-0.853	درصد سیلت Silt (%)
0.314	0.288	-0.124	0.790	اسیدیته pH
-0.010	-0.398	0.170	0.782	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر) Electrical conductivity (ds m ⁻¹)
0.606	0.074	-0.203	0.473	درصد کربن آلی* Organic carbon (%)*
-0.210	-0.026	-0.056	0.953	درصد نیتروژن کل* Total Nitrogen (%)*
-0.233	0.048	-0.027	0.863	پتاسیم قابل جذب (میلی گرم بر کیلوگرم) Available Potassium (mg kg ⁻¹)
0.123	-0.248	-0.084	0.764	فسفر قابل جذب (میلی گرم بر کیلوگرم) Available phosphorous (mg kg ⁻¹)
0.458	-0.694	0.247	-0.411	غلظت نترات دوره اول (میلی گرم بر کیلوگرم)* Nitrate of first collection (md kg ⁻¹)*
-0.209	0.036	-0.855	-0.431	غلظت آمونیوم دوره اول (میلی گرم بر کیلوگرم) of first collection (md kg ⁻¹) Ammonium
0.282	0.054	0.937	-0.156	غلظت نترات دوره دوم (میلی گرم بر کیلوگرم)* Nitrate of second collection (md kg ⁻¹)*
-0.252	0.147	-0.030	0.932	غلظت آمونیوم دوره دوم (میلی گرم بر کیلوگرم) of second collection (md kg ⁻¹) Ammonium
-0.053	0.573	0.778	0.147	تولید نترات (میلی گرم در روز) Nitrification (mg day ⁻¹)
-0.022	0.067	0.523	0.841	تولید آمونیوم (میلی گرم در روز) Ammonification (mg day ⁻¹)

* نشان‌دهنده متغیرهای انتخاب شده برای محاسبه شاخص کیفیت خاک است.

*Indicates the variables selected to calculate the soil quality index.



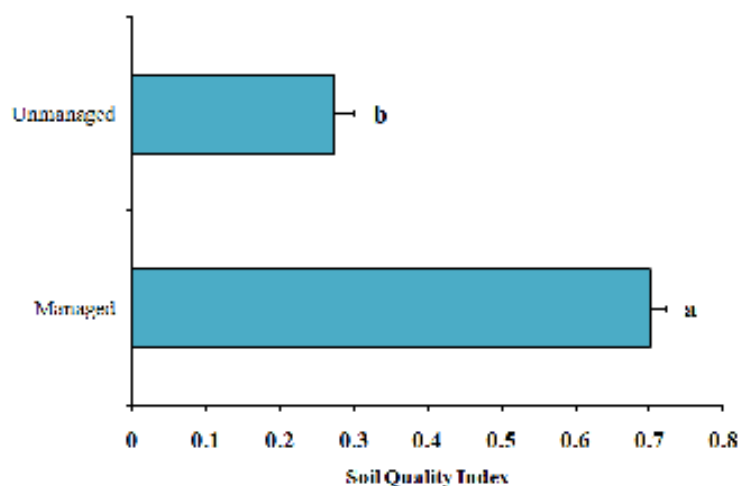
شکل ۲- نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی ویژگی‌های خاک در منطقه شاهد و مدیریت شده (Moisture: درصد رطوبت، BD: چگالی ظاهری، Clay: درصد رس، Sand: درصد شن، Silt: درصد سیلت، pH: اسیدیته، EC: هدایت الکتریکی، OC: درصد کربن آلی، N: نیتروژن کل، K: پتاسیم قابل جذب، P: فسفر قابل جذب، Nit1 و Nit2: غلظت نترات در دوره اول و دوم، Ammo1 و Ammo2: غلظت آمونیوم در دوره اول و دوم، Nitrification: تولید نترات، Ammonification: تولید آمونیوم).

Figure 2 – Principal component analysis (PCA) results of soil properties in the control and managed plots. Abbreviations of soil properties are as follows: Moisture = Moisture content; BD = Bulk density; EC = Electrical conductivity; OC = Organic carbon; N = Total nitrogen; K = Available potassium; P = Available phosphorus; Nit1/Nit2 = Nitrate concentration in the first/second collection; Ammo1/Ammo2 = Ammonium concentration in the first/second collection; Nitrification = Nitrate production; Ammonification = Ammonium production.

شاخص کیفیت خاک

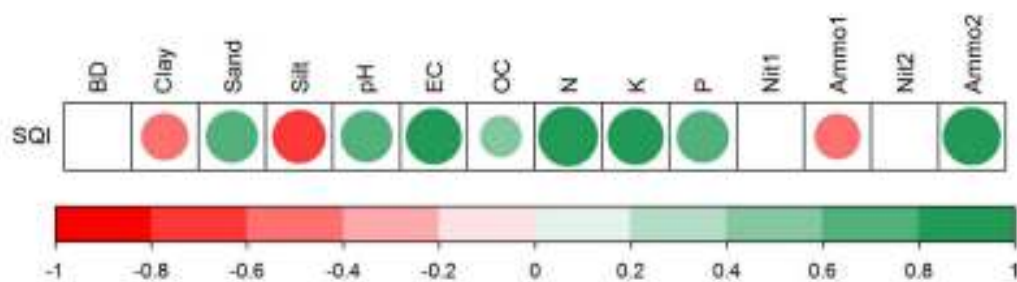
نتایج این پژوهش نشان داد که مدیریت جنگل به شیوه تک‌گزینی موجب افزایش معنی‌دار مقدار کیفیت خاک شد (شکل ۳). نتایج همبستگی پیرسون نشان داد که کیفیت خاک همبستگی مثبت و معنی‌داری با ویژگی‌هایی مانند درصد رس، اسیدیته، هدایت الکتریکی، کربن آلی، نیتروژن، فسفر، پتاسیم و آمونیوم خاک در دوره دوم برداشت دارد. در حالی که همبستگی منفی و معنی‌داری با درصد رس، سیلت و آمونیوم دوره اول برداشت داشت (شکل ۴). برای بررسی عوامل مؤثر بر

شاخص کیفیت خاک از مدل خطی تعمیم‌یافته استفاده شد. پیش از اجرای مدل، آزمون همخطی اجرا شد و متغیرهایی که همخطی بالایی داشتند از فرآیند مدلسازی حذف شدند. نتایج نشان داد که مدل خطی تعمیم‌یافته عملکرد بسیار خوبی (ضریب تبیین: ۰/۸۷) برای برآورد شاخص کیفیت خاک به همراه دارد. نتایج بررسی اهمیت نسبی متغیرها نشان داد که متغیرهای پتاسیم، چگالی ظاهری و فسفر خاک به ترتیب بیشترین اهمیت را در برآورد شاخص کیفیت خاک داشتند (شکل ۵).



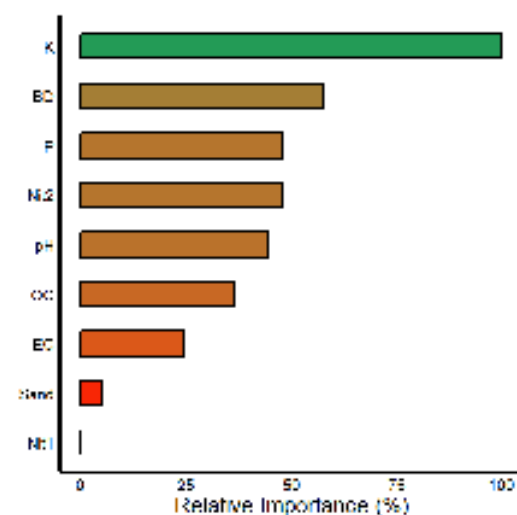
شکل ۳- شاخص کیفیت خاک در منطقه شاهد و مدیریت شده (حروف لاتین مختلف نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد با استفاده از آزمون t مستقل است).

Figure 3. Soil quality index in the control and managed area (different Latin letters indicate significant differences at the 95% confidence level using an independent t-test)



شکل ۴- همبستگی پیرسون ویژگی‌های خاک با شاخص کیفیت در منطقه شاهد و مدیریت شده

Figure 4. Pearson correlation of soil properties with quality index in control and managed areas



شکل ۵- اهمیت نسبی متغیرهای مورد پژوهش در پیش‌بینی شاخص کیفیت خاک

Figure 5. Relative importance of the studied variables in predicting soil quality index

بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که مدیریت جنگل به شیوه تک‌گزینی اثرهای زیادی بر برخی ویژگی‌های خاک در بخش شرقی جنگل‌های هیرکانی داشت، که با یافته‌های پژوهش‌های قبلی در این منطقه همخوانی دارد (Goushehghir et al., 2022; Amolikondori et al., 2020). افزایش معنی‌دار رطوبت خاک در منطقه مدیریت‌شده احتمالاً به دلیل کاهش تراکم تاج‌پوشش و افزایش نفوذ آب باران به خاک است، این تغییر می‌تواند به بهبود شرایط زیستی ریزجانداران خاک کمک کند و چرخه مواد مغذی را تقویت کند (Udom and Ehilegbu, 2018). افزایش رطوبت خاک پس از اجرای شیوه نزدیک‌به‌طبیعت در جنگل‌های آمیخته اسپانیا (Collado et al., 2023) و توده دست‌کاشت کاج (*Pinus sylvestris*) (Renčo et al., 2024) نیز مشاهده شد. همچنین Lotfi et al. (2022) در پژوهش خود در منطقه الندان بیان کردند که اجرای شیوه تک‌گزینی موجب افزایش معنی‌دار مقدار رطوبت خاک خواهد شد. تغییرات مشاهده‌شده در بافت خاک، به‌ویژه افزایش درصد شن و کاهش رس در منطقه مدیریت‌شده، ممکن است ناشی از فعالیت‌های مدیریتی مانند برداشت انتخابی باشد که منجر به جابجایی خاک و اختلاط لایه‌های مختلف آن می‌شود (Worrell and Hampson, 1997). این تغییرات می‌توانند بر ظرفیت نگهداری آب و مواد مغذی خاک تأثیر بگذارند و در درازمدت پایداری بوم‌سازگان جنگلی را تحت تأثیر قرار دهد. بیشتر بودن مقدار درصد رس خاک تحت تأثیر شیوه تک‌گزینی در پژوهشی در جنگل‌های الندان ساری نیز گزارش شد (Balabandi et al., 2024). با این حال، عدم تغییر معنی‌دار در چگالی ظاهری خاک نشان‌دهنده آن است که فعالیت‌های مدیریتی در این منطقه به حدی

شدید نبوده‌اند که ساختار فیزیکی خاک را به‌طور کامل مختل کنند. نتایج مشابه در خصوص عدم وجود اختلاف معنی‌دار چگالی ظاهری تحت تأثیر اجرا شیوه تک‌گزینی در جنگل‌های سفارود گیلان نیز گزارش شد (Karamdost Marian et al., 2022).

نتایج این پژوهش نشان داد که مقدار pH و هدایت الکتریکی در منطقه مدیریت‌شده به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از منطقه شاهد است. این افزایش pH در منطقه مدیریت‌شده می‌تواند به دلیل نفوذ بیشتر نور خورشید، افزایش رطوبت خاک و در نتیجه تسریع فرآیند تجزیه بقایای گیاهی (لاشبرگ) و بازگشت سریع‌تر عناصر غذایی به خاک باشد که منجر به بالا رفتن pH خاک و هدایت الکتریکی می‌شود (Fisher et al., 2017). افزایش معنی‌دار نیتروژن کل، پتاسیم و فسفر قابل جذب در منطقه مدیریت‌شده نشان‌دهنده بهبود وضعیت تغذیه‌ای خاک است که احتمالاً نتیجه افزایش فعالیت میکروبی و تسریع چرخه مواد مغذی است. افزایش معنی‌دار فرآیند تولید آمونیوم در منطقه مدیریت‌شده، همراه با عدم تغییر در تولید نترات، نشان‌دهنده تغییر در چرخه نیتروژن خاک است. این امر می‌تواند به افزایش فعالیت ریزجانداران مسئول فرآیند تولید آمونیوم مرتبط باشد که تحت تأثیر رطوبت بالاتر و تغییرات در کیفیت مواد آلی خاک قرار گرفته‌اند (Kazemi et al., 2017). افزایش مقدار نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل جذب تحت تأثیر شیوه تک‌گزینی بر اثر باز شدن تاج پوشش جنگلی و افزایش فعالیت ریزجانداران خاک، در پژوهشی در منطقه جنگل الندان ساری نیز گزارش شد (Lotfi et al., 2022). با این حال عدم وجود اختلاف معنی‌دار ویژگی‌های pH، هدایت الکتریکی نیتروژن کل، پتاسیم و فسفر قابل جذب بر اثر اجرای شیوه تک‌گزینی در پژوهشی دیگر گزارش شد

(Karamdost Marian et al., 2022). همچنین در پژوهش‌های Moslehi et al. (2020) بیشترین مقدار درصد نیتروژن و Balabandi et al. (2024) مقدار درصد نیتروژن و کربن آلی در منطقه شاهد به‌طور معنی‌داری بیشتر از منطقه تحت مدیریت تک‌گزینی بود. دلیل این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از اختلاف در شرایط محیطی و همچنین تفاوت در مدت زمان اجرای فعالیت‌های مدیریتی و همچنین زمان نمونه‌برداری پس از اجرای آن باشد.

نتایج PCA نشان‌دهنده الگوهای متمایز در ویژگی‌های خاک بین مناطق مدیریت‌شده و شاهد بود. دو مؤلفه اول که بیش از ۶۷ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین می‌کنند، نقش کلیدی در تفکیک ویژگی‌های خاک مرتبط با مدیریت جنگل دارند. مؤلفه اول، که حدود ۵۰ درصد از واریانس را توضیح می‌دهد، با متغیرهایی مانند رطوبت خاک، درصد شن، pH، EC، نیتروژن کل، فسفر، پتاسیم، Ammo2 و Ammonification همبستگی مثبت قوی دارد. این متغیرها به‌طور کلی نشان‌دهنده بهبود حاصلخیزی و کیفیت فیزیکوشیمیایی خاک در مناطق مدیریت‌شده هستند. افزایش رطوبت خاک و دسترسی به عناصر غذایی مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم در مناطق تحت مدیریت می‌تواند نتیجه ترکیبی از عوامل بوم‌شناسی و مدیریتی باشد. یکی از مهم‌ترین عوامل، کاهش تراکم پوشش درختی به دلیل برداشت یا تنک‌کردن درختان است که موجب افزایش مقدار بارش رسیده به سطح خاک می‌شود (Binkley and Giardina, 2000). همچنین، ورود نور بیشتر به سطح خاک موجب گرم‌تر شدن لایه سطحی خاک، افزایش فعالیت میکروبی و تسریع در تجزیه لاشبرگ و مواد آلی می‌شود که در نهایت به افزایش نرخ معدنی‌شدن و آزادسازی عناصر غذایی منجر می‌شود (Prescott et al., 2000). از سوی

دیگر، کاهش رقابت ریشه‌ای بین درختان می‌تواند موجب تمرکز بیشتر رطوبت و مواد غذایی در خاک سطحی شود که در پژوهش‌های مشابه نیز گزارش شده است (Vesterdal et al., 2008; Augusto et al., 2002). مجموع این فرایندها چرخه مواد غذایی را فعال‌تر و پویاتر کرده و به بهبود کیفیت و حاصلخیزی خاک در این مناطق کمک می‌کند. در مقابل، مؤلفه دوم، که حدود ۱۷ درصد از واریانس را پوشش می‌دهد، بیشتر با متغیرهای مرتبط با پویایی نیتروژن معدنی، به‌ویژه تولید نیترات و Nit2، همبستگی دارد. این مؤلفه نشان‌دهنده تفاوت‌هایی در فرایندهای زیستی-شیمیایی خاک است که ممکن است تحت تأثیر عوامل محیطی مانند کیفیت مواد آلی یا فعالیت ریزجانداران خاص قرار گیرند (Vitousek et al., 1997). عدم همبستگی قوی این مؤلفه با مناطق مدیریت‌شده یا شاهد ممکن است نشان‌دهنده تأثیر محدود مدیریت بر فرایندهای تولید نیترات باشد، که با نتایج پژوهش حاضر در مورد عدم تفاوت معنی‌دار در تولید نیترات بین دو منطقه همخوانی دارد.

نمودار دوبعدی PCA تفکیک روشنی بین منطقه مدیریت‌شده و شاهد نشان می‌دهد که تأییدکننده تأثیرات متمایز مدیریت جنگل بر ویژگی‌های خاک است. قرارگیری پراکنش نمونه‌های مدیریت‌شده در سمت راست نمودار، که با مؤلفه اول هم‌راستا است، نشان‌دهنده ارتباط قوی این مناطق با ویژگی‌های مرتبط با حاصلخیزی خاک (مانند رطوبت، مواد مغذی، و فعالیت میکروبی) است. در مقابل، نمونه‌های شاهد با ویژگی‌هایی مانند رس، سیلت، چگالی ظاهری، و Ammo1 مرتبط هستند، که ممکن است نشان‌دهنده شرایط خاک پایدارتر اما با حاصلخیزی کمتر باشد (Worrell and Hampson, 1997).

بر اساس اطلاعات موجود، پژوهش‌های کمی در داخل کشور در خصوص استفاده از روش تعیین حداقل مجموعه داده‌ها با کمک تجزیه به مؤلفه‌های اصلی در جنگل انجام شده و بیشتر در ارتباط با اثرات تغییرات کاربری اراضی بر شاخص کیفیت خاک بود. به عنوان مثال، در پژوهشی در ارتباط با تأثیر کاربری‌های کشاورزی، باغ و جنگل بر شاخص کیفیت خاک در استان آذربایجان غربی، مواد آلی، pH و فسفر قابل جذب به عنوان متغیرهای مهم برای تعیین شاخص کیفیت خاک بود (Rasouli-Sadaghiani and Sheikhlou, 2016). همچنین در پژوهشی دیگر در ارتباط با تعیین کیفیت خاک در تیپ‌های مختلف جنگل‌های زاگرس شمالی، نیتروژن، فسفر، پتاسیم قابل جذب خاک و بهره‌مندی متابولیکی به عنوان مجموعه حداقل داده انتخاب شدند و در تیپ‌های ویول خالص و ویول-مازودار شاخص کیفیت خاک به ترتیب ۰/۲۵ و ۰/۲۴ بود (Maleki et al., 2023).

نتایج این پژوهش نشان داد که مدیریت جنگل به طور معنی‌داری شاخص کیفیت خاک را افزایش داده است. افزایش کیفیت خاک در مناطق مدیریت شده می‌تواند به بهبود ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و تغذیه‌ای خاک مانند رطوبت، مواد مغذی (نیتروژن، فسفر، پتاسیم) و فعالیت میکروبی، نسبت داده شود (Binkley and Giardina, 2000). این بهبود احتمالاً نتیجه کاهش تراکم پوشش درختی، افزایش نفوذ آب و تسریع چرخه مواد مغذی در خاک است.

نتایج همبستگی پیرسون نشان‌دهنده ارتباط مثبت و معنی‌دار شاخص کیفیت خاک با متغیرهایی مانند درصد شن، pH، EC، کربن آلی، نیتروژن، فسفر، پتاسیم و آمونیم دوره دوم (Ammon2) است. این متغیرها به طور کلی نشان‌دهنده حاصلخیزی و کیفیت فیزیکوشیمیایی

خاک هستند که تحت تأثیر مدیریت جنگل بهبود یافته‌اند (Weil and Brady, 2016). به ویژه، همبستگی مثبت با کربن آلی و نیتروژن کل بر نقش کلیدی این متغیرها به عنوان شاخص‌های سلامت خاک تأکید دارد (Johnson and Curtis, 2001). از سوی دیگر، همبستگی منفی با درصد رس، سیلت و آمونیم دوره اول نشان‌دهنده این است که خاک‌های با بافت سنگین‌تر و فرایندهای اولیه نیتروژن در مناطق شاهد غالب هستند، که ممکن است به دلیل عدم اختلال در این مناطق باشد (Worrell and Hampson, 1997). این الگوها با نتایج PCA در این پژوهش هم‌راستا است، که تفکیک واضحی بین مناطق مدیریت شده و شاهد را نشان داد.

استفاده از مدل GLM برای بررسی عوامل مؤثر بر شاخص کیفیت خاک، با ضریب تبیین بالای ۰/۸۷، نشان‌دهنده عملکرد قوی این مدل در پیش‌بینی کیفیت خاک است. اهمیت نسبی بالای متغیرهای پتاسیم، چگالی ظاهری و فسفر در برآورد شاخص کیفیت خاک نشان‌دهنده نقش حیاتی این ویژگی‌ها در تعیین سلامت خاک است. پتاسیم و فسفر به عنوان مواد مغذی ضروری برای رشد گیاهان، به طور مستقیم بر بهره‌وری بوم-سازگان تأثیر می‌گذارند (Vitousek et al., 1997)، در حالی که چگالی ظاهری به عنوان یک ویژگی فیزیکی، بر ظرفیت نگهداری آب و نفوذپذیری خاک اثر می‌گذارد (Weil and Brady, 2016).

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که مدیریت جنگل به شیوه تک‌گزینی می‌تواند نقش مؤثری در بهبود کیفیت فیزیکوشیمیایی خاک ایفا کند. تغییرات مثبت مشاهده شده در متغیرهایی مانند رطوبت، pH، هدایت الکتریکی، نیتروژن، فسفر، پتاسیم و فرایندهای نیتروژنی

یافته‌های این پژوهش تأکید می‌کنند که مدیریت اصولی جنگل، از طریق بهبود ویژگی‌های کلیدی خاک، می‌تواند به ارتقای پایداری و سلامت بوم‌سازگان‌های جنگلی منجر شود. در پژوهش‌های آینده، بررسی اثرات ترکیب گونه‌ای پوشش گیاهی، و نقش تنوع زیستی روی شاخص کیفیت خاک پیشنهاد می‌شود. همچنین استفاده از رویکردهای مدل‌سازی پیشرفته‌تر می‌تواند درک بهتری از تعامل بین عوامل محیطی و کیفیت خاک فراهم آورد.

مانند تولید آمونیوم در منطقه مدیریت‌شده، بیانگر افزایش حاصلخیزی و بهبود شرایط زیستی خاک در نتیجه مدیریت است. PCA نیز مؤید این موضوع بود و تفکیک واضح بین نمونه‌های مناطق مدیریت‌شده و شاهد را نشان داد. افزایش معنی‌دار شاخص کیفیت خاک در منطقه مدیریت‌شده و عملکرد مطلوب مدل خطی تعمیم‌یافته در پیش‌بینی آن، اهمیت متغیرهایی مانند پتاسیم، چگالی ظاهری و فسفر را در تعیین وضعیت کیفیت خاک برجسته ساخت. در مجموع،

References

- Amolikondori, A.; Abrari Vajari, K.; Feizian, M.; Di Iorio, A., Influences of forest gaps on soil physico-chemical and biological properties in an oriental beech (*Fagus orientalis* L.) stand of hyrcanian Forest, North of Iran. *iForest-Biogeosciences and Forestry* **2020**, 13 (2), 124.
- Andrews, S. S.; Karlen, D. L.; Mitchell, J. P., A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in northern california. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **2002**, 90 (1), 25–45.
- Arredondo-Ruiz, F.; García-Montero, L.; Valverde-Asenjo, I.; Menta, C., Soil-quality indicators for forest management. *Quantitative Techniques in Participatory Forest Management* **2014**
- Asplund, J.; Nordén, J.; Kjonaas, O. J.; Madsen, R. L.; Lunde, L. F.; Birkemoe, T.; Ronold, E. K.; Norkute, M.; Jansson, K. U.; Karlsen, D. P.; Sverdrup-Thygeson, A., Long term effects of forest management on forest structure and dead wood in mature boreal forests. *Forest Ecology and Management* **2024**, 572, 122315.
- Augusto, L.; Ranger, J.; Binkley, D.; Rothe, A., Impact of several common tree species of european temperate forests on soil fertility. *Annals of Forest Science* **2002**, 59 (3), 233–253.
- Balabandi, H.; Abrari Vajari, K.; Shabani, N., Effects of different silvicultural systems on oil characteristic indices of beech (*Fagus orientalis* L.) forest stands (Case Study: Alandan forest, Mazanrdan). *Journal of Plant Ecosystem Conservation* **2024**, 12 (24), 136–150.
- Battles, J. J.; Shlisky, A. J.; Barrett, R. H.; Heald, R. C.; Allen-Diaz, B. H., The effects of forest management on plant species diversity in a sierran conifer forest. *Forest Ecology and Management* **2001**, 146 (1–3), 211–222.
- Binkley, D.; Giardina, C.; Bashkin, M. A., Soil Phosphorus Pools and Supply under the Influence of *Eucalyptus saligna* and Nitrogen-Fixing *Albizia facaltaria*. *Forest Ecology and Management* **2000**, 128 (3), 241–247.
- Binkley, D.; Hart, S. C., The components of nitrogen availability assessments in forest soils. *Advances in Soil Science* **1989**, 10, 57–112.
- Burger, J. A.; Kelting, D. L., Using soil quality indicators to assess forest stand management. *Forest Ecology and Management* **1999**, 122 (1–2), 155–166.
- Chandra, L. R.; Gupta, S.; Pande, V.; Singh, N., Impact of forest vegetation on soil characteristics: a correlation between soil biological and physico-chemical properties. *3 Biotech* **2016**, 6, 1–12.
- Collado, E.; Piqué, M.; Coello, J.; de-Dios-García, J.; Fuentes, C.; Coll, L., Close-to-nature management effects on tree growth and soil moisture in mediterranean mixed forests. *Forest Ecology and Management* **2023**, 549, 121457.
- Demir, M.; Makineci, E.; Yilmaz, E., Investigation of timber harvesting impacts on herbaceous cover, forest floor and surface soil properties on skid road in an Oak

- (*Quercus petrea* L.) stand. *Building and Environment* **2007**, 42 (3), 1194–1199.
- Dorich, R. A.; Nelson, D. W., Direct colorimetric measurement of ammonium in potassium chloride extracts of soils. *Soil Science Society of America Journal* **1983**, 47 (4), 833–836.
- Duguid, M. C.; Ashton, M. S., A Meta-Analysis of the effect of forest management for timber on understory plant species diversity in temperate forests. *Forest Ecology and Management* **2013**, 303, 81–90.
- Durán, J.; Rodríguez, A.; Fernández-Palacios, J. M.; Gallardo, A., Changes in net n mineralization rates and soil n and p pools in a pine forest wildfire chronosequence. *Biology and Fertility of Soils* **2009**, 45, 781–788.
- Elliot, W. J.; Page-Dumroese, D.; Robichaud, P. R., The effects of forest management on erosion and soil productivity. *Soil Quality and Soil Erosion* **2018**, 195–208.
- Fisher, K.A., Yarwood, S.A. and James, B.R., Soil urease activity and bacterial ureC gene copy numbers: Effect of pH. *Geoderma* **2018**, 285, 1–8.
- Ghazanshahi, J., Soil and plant analysis (translation). *Homa Publication, Tehran* **2006**.
- Goushehghir, Z.; Feghhi, J.; Innes, J. L., Challenges facing the improvement of forest management in the Hyrcanian forests of Iran. *Forests* **2022**, 13 (12), 2180.
- Grigal, D. F., Effects of extensive forest management on soil productivity. *Forest Ecology and Management* **2000**, 138 (1–3), 167–185.
- Hadinezhad, P.; Asadi, H.; Hojati, S. M.; Tafazoli, M.; Yousefpour, R., Factors affecting tree drought stress in Hyrcanian forests. *Forest Research and Development* **2025**, 10 (4), 431–451.
- Hojjati, S. M.; Darzi, A.; Asadi, H.; Tafazoli, M., Changes in soil properties and plant biodiversity after 12 years of rehabilitating livestock farms in the Hyrcanian Forests. *Agroforestry Systems* **2021**, 95, 1493–1503.
- Johnson, D. W.; Curtis, P. S., Effects of forest management on soil c and n storage: meta analysis. *Forest Ecology and Management* **2001**, 140 (2–3), 227–238.
- Jolliffe, I. T.; Cadima, J., Principal Component Analysis: a review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **2016**, 374 (2065), 20150202.
- Karamdost Marian, B.; Alijanpour, A.; Banj Shafiei, A.; Sasanifar, S., The effect of single-tree selection method on some quantitative and qualitative characteristics and soil of Shafarood forests. *Forest Research and Development* **2022**, 8 (2), 217–233.
- Kazemi, S.; Hojati, S. M.; Fallah, A.; Barari, K., The effect of forest management on soil net mineralization rate in Khalilmahle, Behshahr forest. *Ecology of Iranian Forest* **2017**, 4 (8), 9–18.
- Kazemi, S.; Hojati, S. M.; Fallah, A.; Tafazoli, M., Effects of forest management on soil physical and chemical properties of Khalil-Mahale forest. *Forest Research and Development* **2015**, 1 (2), 167–180.
- Kuhn, M.; Wing, J.; Weston, S.; Williams, A.; Keefer, C.; Engelhardt, A.; Cooper, T.; Mayer, Z.; Kenkel, B.; Team, R. C., Package ‘caret’. *The R Journal* **2020**, 223 (7), 48.
- Lal, R., Degradation and resilience of soils. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* **1997**, 352 (1356), 997–1010.
- Lê, S.; Josse, J.; Husson, F., FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software* **2008**, 25, 1–18.
- Li, Y.; Zhang, J.; Chang, S. X.; Jiang, P.; Zhou, G.; Fu, S.; Yan, E.; Wu, J.; Lin, L., Long-term intensive management effects on soil organic carbon pools and chemical composition in Moso Bamboo (*Phyllostachys pubescens*) forests in subtropical China. *Forest Ecology and Management* **2013**, 303, 121–130.
- Lotfi, R.; Hojjati, S. M.; Pourmajidian, M. R.; Espahbodi, K., The effect of silvicultural methods on the structural characteristics of forest stand and soil properties in the intermediate Hyrcanian Beech forests (Case Study: Alandan-Sari Series Forests). *Ecology of Iranian Forests* **2022**, 10 (20), 11–22.
- Maleki, S.; Pilehvar, B.; Mahmoodi, M. A., Assessment of soil quality in different types of forests in north zagros (Case Study: Armardeh Baneh forests). *Journal of Natural Environment* **2023**.
- Moslehi, M.; Habashi, H.; Ahmadi, A.; Zoghi, Z., Influence of single-tree selection system on soil total nitrogen and its seasonal changes under the mixed stand of Beech-Hornbeam

- (Case Study: Shast-Kalateh forest, Gorgan). *Journal of Wood and Forest Science and Technology* **2020**, 27 (2), 1–13.
- Navas, M.; Benito, M.; Rodríguez, I.; Masaguer, A., Effect of five forage legume covers on soil quality at the eastern plains of Venezuela. *Applied Soil Ecology* **2011**, 49, 242–249.
- Noroozi, J.; Talebi, A.; Doostmohammadi, M., The Alborz mountain range. *Plant Biogeography and Vegetation of High Mountains of Central and South-West Asia* **2020**, 117–149.
- Osman, K. T.; Osman, K. T., Forest Soils. *Forest Soils* **2013**. Springer Netherlands.
- Peña-Claros, M.; Poorter, L.; Alarcón, A.; Blate, G.; Choque, U.; Fredericksen, T. S.; Justiniano, M. J.; Leño, C.; Licona, J. C.; Pariona, W.; Putz, F. E., Soil effects on forest structure and diversity in a moist and a dry tropical forest. *Biotropica* **2012**, 44 (3), 276–283.
- Prescott, C. E.; Vesterdal, L.; Pratt, J.; Venner, K. H.; Montigny, L. D.; Trofymow, J. A., Nutrient concentrations and nitrogen mineralization in forest floors of single species conifer plantations in coastal British Columbia. *Canadian Journal of Forest Research* **2000**, 30 (9), 1341–1352.
- Rasouli-Sadaghiani, M. H.; Sheikhlou, F., Effects of agronomic, orchard and forest land uses on soil quality index (SQI) in west Azerbaijan province. *Journal of Water and Soil* **2016**, 26 (2), 141–153.
- Renčo, M.; Gömöryová, E.; Čerevková, A., Close-to-nature forest management effects on soil nematodes and microbial activity in pine plantations on Aeolian sands. *Community Ecology* **2024**, 25 (3), 337–348.
- Tafazoli, M.; Hojjati, S. M., Modeling lead and cadmium content in soil induced by coal mining activities in Hyrcanian forests. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal* **2025**, 1–15.
- Udom, B. E.; Ehilegbu, J., Critical moisture content, bulk density relationships and compaction of cultivated and uncultivated soils in the humid tropics. *Asian Soil Research Journal* **2018**, 1, 1–9.
- Vasu, D.; Tiwary, P.; Chandran, P., A Novel and comprehensive soil quality index integrating soil morphological, physical, chemical, and biological properties. *Soil and Tillage Research* **2024**, 244, 106246.
- Vesterdal, L.; Schmidt, I. K.; Callesen, I.; Nilsson, L. O.; Gundersen, P., Carbon and nitrogen in forest floor and mineral soil under six common European tree species. *Forest Ecology and Management* **2008**, 255 (1), 35–48.
- Vitousek, P. M.; Aber, J. D.; Howarth, R. W.; Likens, G. E.; Matson, P. A.; Schindler, D. W.; Schlesinger, W. H.; Tilman, D. G., Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications* **1997**, 7 (3), 737–750.
- Wei, T.; Simko, V.; Levy, M.; Xie, Y.; Jin, Y.; Zemla, J., Package ‘corrplot’. *Statistician* **2017**, 56 (316), e24.
- Weil RR; Brady NC, The nature and properties of soils. *Pearson, Ohio*. **2016**
- Worrell, R.; Hampson, A., The influence of some forest operations on the sustainable management of forest soils—a review. *Forestry: An International Journal of Forest Research* **1997**, 70 (1), 61–85.