

Sustainable Governance of Hyrcanian Forests; Mitigation of Harvesting-induced Disturbance Impacts on Forest Soil

Ali Babaei Ahmadabad¹ , and Meghdad Jourgholami² 

1. Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural resources, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
2. Corresponding Author, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural resources, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: mjgholami@ut.ac.ir

Article Info

Article type
Research Article

Article History:

Received 27 January, 2026
Revised 25 February, 2026
Accepted 27 February, 2026
Published online 22 June, 2026

Keywords:

Forest Governance,
Soil,
Soil Properties,
Time Since Harvest,
Traffic Intensity.

ABSTRACT

Sustainable governance of Hyrcanian forest soils requires a precise understanding of the consequences of harvesting operations on the soil ecosystem. This study investigated the mid-term effects (7, 10, 15, and 20 years post-harvest) of skidding operations on soil physical and chemical properties under various traffic intensities (low, medium, high, and log landings) in the Kheyroud Forest, northern Iran. Soil physical properties, including bulk density, porosity, penetration resistance, moisture content, and texture, along with chemical properties such as organic carbon, total nitrogen, C/N ratio, and pH, were analyzed using analysis of variance (ANOVA) and Principal Component Analysis (PCA). The results indicated that bulk density and penetration resistance were significantly higher in skid trails compared to undisturbed control areas, whereas porosity and moisture content significantly decreased. Furthermore, organic carbon and total nitrogen declined in skid trails, and trafficked areas exhibited increased acidity (lower pH). PCA results confirmed that soil compaction indicators were negatively correlated with soil moisture, carbon, nitrogen, and pH, while positively correlated with traffic intensity and time since harvest. These indicators were identified as the primary factors distinguishing disturbed from undisturbed forest soils. Although signs of recovery were evident after two decades, soil conditions in heavily trafficked trails had not yet returned to control levels. These findings underscore the necessity of integrated, ecosystem-based governance. Developing technical standards to minimize traffic, utilizing low-ground-pressure machinery, scheduling operations based on soil moisture conditions, and ensuring the active involvement of operators are essential strategies for the long-term sustainable management of forest ecosystems.

Cite this article: Babaei Ahmadabad, A., & Jourgholami, M. (2026). Sustainable Governance of Hyrcanian Forests; Mitigation of Harvesting-induced Disturbance Impacts on Forest Soil. *Natural Resources Governance*, 3(2), 1-19. <https://doi.org/10.22059/jnrg.2026.410165.1087>



© The Author(s) retain the copyright.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jnrg.2026.410165.1087>

Publisher: University of Tehran Press.

Introduction

Sustainable governance of Hyrcanian forest soils requires a precise understanding of the long-term consequences of mechanized harvesting operations. Despite numerous studies on the short-term effects of skidding, knowledge about the mid-term soil recovery process under the interaction of traffic intensity and time since harvest remains insufficient. This knowledge gap challenges the planning of sustainable forest management. The main objective of this study was to investigate the effects of time since harvest (7, 10, 15, and 20 years after skidding) and different traffic intensities (low, medium, high, and landing areas) on the physical and chemical properties of soil in skid trails of the Kheyroud Forest, Hyrcanian region. The key research questions were: (1) After two decades, have the soils on skid trails recovered to the level of undisturbed forest areas? (2) What is the role of initial traffic intensity in the rate of recovery? (3) Is there a significant interaction effect between time since harvest and traffic intensity?

Method

The research was conducted in the Kheyroud Educational and Research Forest (Mazandaran Province). Four stands with a beech–hornbeam forest type and time since harvest of 7, 10, 15, and 20 years were selected. In each stand, four levels of traffic intensity were defined: landing (highest traffic), high, medium, and low. For each treatment, six main sample plots (1×1 m) were established along the skid trail, and three control plots were located 10 m away inside the undisturbed forest (144 sample plots in total). Soil sampling was conducted at a depth of 5 cm. Measured physical properties included moisture content, bulk density (BD), total porosity (TP), penetration resistance (PR), and soil texture. Chemical properties included organic carbon (C), total nitrogen (N), C/N ratio, and pH. Data were analyzed using two-way ANOVA in SPSS and SAS JMP software, and principal component analysis (PCA) was used to identify relationships among variables.

Results

ANOVA results showed that time since harvest, traffic intensity, and their interaction had a significant effect on all measured physical and chemical soil properties ($p < 0.001$ for all). Mean BD in landings was 49% higher than in control areas ($0.95 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$). The highest BD was recorded in the 7-year landing (1.45), and the lowest was recorded in the low-traffic 20-year treatment (1.03), but it still significantly differed from the control. Mean TP in skid trails was 38% lower than in controls (65.19%). The lowest TP was in the 7-year landing (43.01%), and the highest was in the low-traffic 20-year treatment (58.54%); however, full recovery was not achieved. PR in landings increased by up to 91% compared to controls (from 1.41 to 3.11 MPa at age 7 years). Even in the best case (low traffic, 20 years), PR remained 50.5% higher than in the control. Soil moisture content decreased from 41.97% in the control to 10.11% in the 7-year landing and had not recovered to control levels after 20 years. Soil texture also changed: controls were predominantly clay loam (89%), whereas skid trails became dominated by loam texture (54%). Organic carbon decreased from 6.37% (control) to 4.10% in the 7-year landing, and after 20 years (5.22%) was still lower than the control (6.60%). Total nitrogen showed a similar reduction (from 0.54% to 0.43% at age 7 years). The C/N ratio at age 7 years was lower than in the control (9.58 vs. 11.82), but at age 20 years it became higher in skid trails than in the control (12.29 in landing vs. 11.54), indicating disturbance of the nitrogen cycle. Soil pH decreased (became more acidic) from about 6.8–7.0 in controls to 5.24 in the 7-year landing, and after 20 years reached 6.13 but still differed from the control (7.04). The first two principal components of the PCA explained 66% of the total variance. The first component (43%) was positively correlated with BD and PR and negatively correlated with TP, C, and N (the

"compaction and degradation axis"). The second component (23%) was associated with moisture, nitrogen, and pH. The PCA biplot clearly showed that treatments with time since harvest of 7 and 10 years and high traffic intensity fell into the severe degradation zone, whereas treatments with 20 years and low traffic moved toward the control zone but still did not fully overlap with it.

Conclusion

This study demonstrates that mechanized skidding operations in the Hyrcanian forests cause deep and persistent soil degradation. Significant increases in BD and PR, along with decreases in TP, moisture, C, and N, are particularly severe in landings and high-traffic areas. Initial traffic intensity is the main determinant of degradation severity. Although signs of natural recovery (relative improvement in TP, reduction in PR, slight increases in C and pH) are visible after 20 years, soils at none of the traffic levels have fully recovered to the condition of undisturbed forest. The significant interaction between time since harvest and traffic intensity indicates that recovery rate depends strongly on the initial degree of disturbance. From the perspective of adaptive governance, these findings have clear policy implications: the development of technical standards to reduce traffic intensity (establishing permissible passage limits, optimizing trail network design), mandating low-ground-pressure machinery and scheduling operations based on soil moisture conditions, rethinking harvesting practices with an emphasis on prevention rather than remediation, and designing active restoration programs for old skid trails (mulching, planting nitrogen-fixing species). Ultimately, achieving good soil governance in the Hyrcanian forests requires not only regulatory enforcement but also active stakeholder participation and the institutionalization of a long-term, sustainability-oriented perspective in natural resource management.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

CRedit authorship contribution statement

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgments

The authors thank all participants in this study.



حکمرانی پایدار جنگل‌های هیرکانی؛ کاهش اثرات آشفته‌گی ناشی از بهره‌برداری بر خاک جنگل

علی بابایی احمدآباد^۱، و مقداد جورغلامی^۲ 

۱. گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
۲. نویسنده مسئول، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
رایانامه: mjgholami@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۸ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱ کلیدواژه: حکمرانی جنگل، خاک، خصوصیات خاک، سن بهره‌برداری، شدت تردد.	حکمرانی سازگار خاک در جنگل‌های هیرکانی مستلزم شناخت دقیق پیامدهای بهره‌برداری بر زیست‌بوم خاک است. پژوهش حاضر به بررسی اثرات عملیات چوب‌کشی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در بازه‌های زمانی ۷، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سال (میان‌مدت) پس از بهره‌برداری، تحت سطوح مختلف تردد (کم، متوسط، زیاد و دیو) در جنگل‌های هیرکانی (منطقه خیرود) پرداخته است. متغیرهای فیزیکی (جرم مخصوص ظاهری، تخلخل، مقاومت به نفوذ، رطوبت و بافت خاک) و شیمیایی (کربن آلی، نیتروژن کل، نسبت C/N و pH) با استفاده از تجزیه واریانس و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) در نرم‌افزارهای SPSS و SAS JMP واکاوی شدند. یافته‌ها نشان داد که جرم مخصوص ظاهری و مقاومت به نفوذ خاک در مسیرهای چوب‌کشی در مقایسه با مناطق شاهد، به‌طور معنی‌داری افزایش، و تخلخل و رطوبت خاک کاهش یافته است. همچنین، محتوای کربن آلی و نیتروژن خاک کاهش یافته و اسیدیته خاک در مسیرهای مذکور افزایش (کاهش pH) نشان داد. نتایج تحلیل PCA تأیید کرد که شاخص‌های فشردگی خاک (جرم مخصوص ظاهری و مقاومت به نفوذ) با رطوبت، کربن، نیتروژن و pH همبستگی منفی، و با شدت تردد و زمان سپری شده از بهره‌برداری همبستگی مثبت دارند؛ این شاخص‌ها مهم‌ترین عوامل تمایز بین مناطق تخریب‌یافته و دست‌نخورده جنگل شناخته شدند. اگرچه پس از گذشت دو دهه روند احیای خاک قابل مشاهده بود، اما ویژگی‌های خاک در مسیرهای با تردد شدید همچنان به سطح مناطق شاهد بازنگشته است. این نتایج بر ضرورت حکمرانی یکپارچه و اکوسیستم‌محور تأکید دارد. تدوین استانداردهای فنی جهت کاهش تردد، به‌کارگیری ماشین‌آلات با فشار سطحی کم، زمان‌بندی عملیات بر اساس شرایط رطوبتی خاک و مشارکت فعال بهره‌برداران، از راهکارهای کلیدی برای گذار به مدیریت پایدار و بلندمدت منابع جنگلی محسوب می‌شود.

استناد: بابایی احمدآباد، علی؛ و جورغلامی، مقداد (۱۴۰۵). حکمرانی پایدار جنگل‌های هیرکانی؛ کاهش اثرات آشفته‌گی ناشی از بهره‌برداری بر خاک جنگل. *حکمرانی منابع طبیعی*، ۳ (۲)، ۱۹-۱. <https://doi.org/10.22059/jnrg.2026.410165.1087>



مقدمه

در جهان امروز و با در نظر گرفتن تخریب‌های گسترده ناشی از فعالیت‌های اقتصادی و صنعتی و پیشرفت‌های علمی، منابع طبیعی ابزارهایی حیاتی برای توسعه و بهبود کیفیت زندگی انسان محسوب می‌شوند. حفاظت و مدیریت سازگار این منابع از چالش‌های مهم در مسیر توسعه پایدار است که به توجه ویژه‌ای از سوی حاکمان و بهره‌برداران نیاز دارد (صیادی و شریعتی‌نیا، ۲۰۲۴). برای مدیریت منابع طبیعی باید اقدام‌ها و تحقیقات مختلفی از نظر علوم مختلف مرتبط، با هدف تولید دانش و درک اصولی آن صورت گیرد و رویکردهای مختلفی مانند تحقیقات بین‌رشته‌ای یا فرارشته‌ای و مدیریت یکپارچه منابع پیشنهاد شده است (Finca et al., 2019). به عبارت دیگر، چالش‌های پایداری منابع طبیعی مستلزم ادغام انواع مختلف دانش برای درک و مدیریت این منابع به‌عنوان نظام خاک، به‌عنوان بستر حیات و پیچیده‌ترین جزء اکوسیستم‌های جنگلی بوده و نقشی اساسی در پایداری و احیای طبیعی جنگل دارد و حفاظت از آن برای زادآوری جنگل حیاتی است (Martin & Sanga, 2023). خاک ضمن ارائه خدمات بوم‌شناختی زیاد، نقشی مهم در کاهش تغییرات اقلیمی، حفاظت از تنوع زیستی و حمایت از رفاه جوامع بشری داشته است (Schaal et al., 2026). خاک برای حاصلخیزی، زادآوری طبیعی و ارائه خدمات اکوسیستمی جنگل از اهمیت بالایی برخوردار است (Grigal et al., 2020; Picchio et al., 2020). این بستر پویا نه‌تنها تأمین‌کننده آب و مواد غذایی برای گیاهان است، بلکه به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین ذخایر کربن زمینی، نقشی کلیدی در تنظیم چرخه جهانی کربن و کاهش تغییرات اقلیمی و اثرات آن دارد (Jourgholami et al., 2020). با این نگرش خاک جنگل یک سرمایه عظیم است و به حفاظت و تبیین سازوکارهای همسو با محیط زیست در بلندمدت نیاز دارد (Juliana et al., 2022). حکمرانی پایدار خاک رویکردی، نوظهور و نوین برای مدیریت خاک به‌عنوان منبعی استراتژیک است. این نکته که حکمرانی فراتر از قوانین آمره و دستوری است (Juerges & Hansjurgens, 2018)، باید محور توجه قرار گیرد و بر این اساس موفقیت حکمرانی مطلوب خاک در گرو پذیرش داوطلبانه، خودراهبری و مشارکت فعال بهره‌برداران است (شیروانی و همکاران، ۲۰۲۵؛ Mills et al., 2018).

جنگل‌های هیرکانی ایران، به‌عنوان یکی از ارزشمندترین و کهن‌ترین بازمانده‌های جنگل‌های معتدله پهن‌برگ جهان، با تنوع زیستی منحصربه‌فرد و کارکردهای هیدرولوژیکی و حفاظت خاک بی‌نظیر، از دیرباز تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی ازجمله بهره‌برداری چوب و صدمات ناشی از آن قرار داشته است (سهرابی و جورغلامی، ۲۰۲۱؛ مروی مهاجر، ۲۰۰۶). گسترش استفاده از ماشین و مکانیزاسیون در عملیات جنگلداری و استفاده فزاینده از اسکیدر، فورواردر و هاروسترها فشار فزاینده‌ای بر ساختار طبیعی و عملکرد و زادآوری طبیعی این اکوسیستم‌های حساس وارد آورده است (Ampoorter et al., 2011; Labelle et al., 2022). تردد ماشین‌های بهره‌برداری روی خاک جنگل، یکی از شدیدترین اشکال آشفتگی‌هایی که انسان ایجاد کرده، محسوب می‌شود و این اختلال به پدیده‌ای به نام فشردگی خاک منجر می‌شود (Horn et al., 1971; Cambi et al., 2015). فشردگی خاک از طریق ورود نیروهای مکانیکی ناشی از وزن ماشین و بار آن، سبب کاهش حجم خاک، نزدیک‌تر شدن ذرات به یکدیگر، کاهش چشمگیر فضای تخلخل، افزایش جرم مخصوص ظاهری و مقاومت مکانیکی خاک می‌شود (Greacen and Sands, 1980). این تغییرات فیزیکی به‌نوبه خود، نفوذپذیری آب‌وهوا، توسعه و گسترش سیستم ریشه، فعالیت میکرو ارگانیسم‌های خاکریزی و سرعت چرخه مواد مغذی خاک را محدود و مختل می‌کند (Ezzati et al., 2012). علاوه بر آثار و صدمات فیزیکی مستقیم این آشفتگی‌ها بر خاک و اکوسیستم جنگل، تغییرات عمیق و پایداری در ویژگی‌های شیمیایی و بیوشیمیایی خاک نیز ممکن است ایجاد شود. کاهش ذخایر ماده آلی خاک، تغییر در اسیدیته (pH)، تخلیه عناصر غذایی اصلی مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم و تغییر نسبت کربن به نیتروژن (C/N) ازجمله پیامدهای مستند به عملیات بهره‌برداری و چوب‌کشی هستند (Rab, 2004; Solgi and Najafi, 2014). این تغییرات (فیزیکی - شیمیایی) نه‌تنها حاصلخیزی خاک را کاهش می‌دهد، بلکه بر ترکیب و تنوع جوامع میکروبی و جانوری خاک تأثیر منفی می‌گذارد و در نتیجه، فرایندهای کلیدی تجزیه و معدنی شدن را کند می‌سازد (Kiumarsi et al., 2024).

در جنگل‌های هیرکانی، اگرچه پژوهش‌های متعددی به بررسی آثار کوتاه‌مدت عملیات چوب‌کشی بر خاک جنگل پرداخته‌اند (برای مثال، عزتی و نجفی (۲۰۱۱) و جورغلامی و مجنونیان (۲۰۱۰))، اطلاعات جامع و نظام‌مندی درباره روند تغییرات میان‌مدت و بلندمدت خصوصیات خاک، به‌ویژه تحت تأثیر متغیرهای کلیدی و در تعامل با یکدیگر مانند «سن بهره‌برداری» و «شدت تردد»

اولیه، اندک و پراکنده است. بیشتر مطالعات بر یک بازه زمانی خاص یا یک شدت تردد متمرکز بوده‌اند و اثر متقابل این دو فاکتور بر روند بازیابی خاک کمتر بررسی دقیق شده است (سهرابی و همکاران، ۲۰۱۹). این شکاف دانشی، برنامه‌ریزی برای مدیریت پایدار جنگل و پیش‌بینی زمان واقعی بازیابی اکوسیستم را با چالش جدی مواجه می‌سازد. از سوی دیگر، تخریب کیفیت خاک ناشی از عملیات بهره‌برداری، از موانع اصلی در اجرای موفق طرح‌های احیا و غنی‌سازی جنگل‌های تخریب‌شده شمال ایران است (Tavankar et al., 2022؛ نقدی و همکاران، ۲۰۱۴). درک دقیق از دینامیک و سیر تکاملی ویژگی‌های خاک پس از آشفته‌گی، برای انتخاب گونه‌های مناسب احیا، تعیین نیاز به عملیات اصلاحی خاک (مانند مالچ‌پاشی) و ارزیابی موفقیت طرح‌های مناسب برای احیای جنگل ضروری است و بر این اساس، این پژوهش در جنگل‌های هیرکانی و با هدف بررسی اثر سن بهره‌برداری در میان‌مدت (۷، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سال) و تحت سطوح مختلف تردد (کم، متوسط، زیاد و دپو) بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در مسیرهای چوب‌کشی جنگل‌های هیرکانی طراحی شده است. بر این اساس پرسش‌های کلیدی تحقیق عبارت‌اند از: ۱- آیا پس از گذشت دو دهه از اتمام عملیات بهره‌برداری، خاک مسیرهای چوب‌کشی از نظر ویژگی‌های فیزیکی (جرم مخصوص، تخلخل، مقاومت به نفوذ) و شیمیایی (کربن، نیتروژن و C/N) به سطوح مناطق دست‌نخورده جنگل (شاهد) نزدیک شده است؟ ۲- نقش شدت تردد اولیه در تسریع یا تأخیر روند بازیابی طبیعی چگونه است؟ و ۳- آیا اثر متقابل معناداری بین سن و شدت تردد بر روند تغییرات خاک وجود دارد یا خیر؟

پاسخ به این پرسش‌ها می‌تواند مبنای علمی محکمی برای تدوین راهکارهای مدیریتی پیشگیرانه و اصلاحی فراهم آورد، زیرا سیاست‌های کلان در حوزه حکمرانی، وقتی به اهداف خود نزدیک می‌شود که در مقیاس خرد، به رفتار پایدار منجر شود (شیروانی و همکاران، ۲۰۲۵). از جمله این پاسخ‌ها باید به تدوین استانداردهای فنی برای طراحی مسیرهای چوب‌کشی با حداقل آسیب، تعیین حد مجاز تردد ماشین‌آلات، برنامه‌ریزی زمان‌بندی عملیات بر اساس رطوبت خاک، استفاده از ماشین‌آلات کم‌فشار و در نهایت ارائه راهنمایی‌هایی برای تسریع بازیابی خاک در عرصه‌های تخریب‌شده اشاره کرد. نتایج این پژوهش می‌تواند گامی به سوی تحقق مدیریت اکوسیستم‌محور برای حکمرانی سازگار خاک جنگل‌های هیرکانی باشد. باید به این نکته اشاره کرد که پذیرش داوطلبانه، از نمودهای حکمرانی مطلوب است و دولت‌ها در برنامه‌ریزی‌های کلان مدیریتی خود، باید جلب مشارکت حداکثری بهره‌برداران را در نظر داشته باشند (Mills et al., 2018). در این پژوهش با بررسی آسیب‌های وارده به خاک در اثر بهره‌برداری از درختان جنگل و عملیات چوب‌کشی و نشان دادن شدت این صدمات به خاک جنگل سعی در ارائه راهکارهای مدیریتی برای کاهش صدمات وارده از سوی بهره‌برداران جنگل‌های هیرکانی داشته‌ایم.

روش‌شناسی تحقیق

این پژوهش در جنگل آموزشی - پژوهشی دانشگاه تهران، واقع در استان مازندران، از جنگل‌های هیرکانی ایران انجام شد. این حوزه آبخیز ۳۴ هزار هکتار مساحت دارد و جنگل خیرود با ۸۰۰۰ هکتار یکی از زیرحوزه‌های آن محسوب می‌شود، این جنگل شامل هفت سری است و در ۷ کیلومتری شرق شهرستان نوشهر با مختصات جغرافیایی شرقی ۵۶° ۳۹' ۵۱" و ۱۲° ۳۳' ۵۱" و عرض‌های جغرافیایی شمالی ۳۶° ۳۲' ۰۸" و ۴۵° ۴۵' ۰۵" در مجاورت روستای نجارده قرار گرفته است.

این پژوهش در دو سری نمخانه (پارسل‌های ۲۲۰ با سن ۱۵ سال و ۲۲۱، ۲۰ سال) و گرازبن (پارسل‌های ۳۱۶ با سن ۷ سال و ۳۱۷، ۱۰ سال) انجام شد (سهرابی و همکاران، ۲۰۱۹). در همه پارسل‌ها تیپ جنگلی غالب راش - ممرز (*Fagus orientalis* - *Carpinus betulus*) با خاک‌های قهوه‌ای جنگلی از نوع آلفی سول بودند. جهت عمومی مسیرهای چوب‌کشی آنها در دامنه‌ها جنوبی قرار داشت و ارتفاع این پارسل‌ها از سطح دریا بین ۱۰۰۰ تا ۱۲۵۰ متر متغیر بود. میانگین بارندگی سالانه حدود ۱۱۴۶ میلی‌متر و دمای سالانه آن ۸/۵۵ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است (سهرابی و همکاران، ۲۰۱۹) (جدول ۱).

جدول ۱. مشخصات پارسل‌ها و ماشین‌ها در بخش‌های نمخانه و گرازین

پارسل	سن بهره‌برداری	جهت	متوسط ارتفاع از سطح دریا (متر)	تیپ جنگل	نوع خاک	طول مسیر چوب‌کشی (متر)
۳۱۶	۷ سال	جنوبی	۱۲۲۵	راش - ممرز	قهوه‌ای جنگلی	۹۰۰
۳۱۷	۱۰ سال	جنوبی	۱۱۴۰	راش - ممرز	قهوه‌ای جنگلی	۱۰۵۰
۲۲۰	۱۵ سال	جنوب و جنوب غربی	۱۰۷۰	راش - ممرز	قهوه‌ای جنگلی	۹۷۵
۲۲۱	۲۰ سال	جنوبی	۱۱۴۰	راش - ممرز	قهوه‌ای جنگلی	۱۰۰۰

پس از شناسایی مسیرهای چوب‌کشی در هر پارسل، چهار سطح تردد بر اساس تعداد دفعات عبور و میزان آشفته‌گی تعریف و انتخاب شدند: ۱- دیو (محل تخلیه چوب، بیشترین تردد)، ۲- شدت زیاد (بخش‌های اصلی و مستقیم مسیر)، ۳- شدت متوسط (انشعاب‌های فرعی) و ۴- تردد کم (انتهای مسیر یا بخش‌های کم‌تردد). برای هر کلاسه شدت تردد در هر پارسل، بعد از ورود به مسیر و طی ۱۰ متر، با شروع از سمت راست، یک قطعه نمونه با آزمون مشخص، از یک درخت شاهد که علامت‌گذاری شده بود معین و پیکه‌کوبی شد. به‌صورت سیستماتیک در طول مسیر ۶ قطعه نمونه اصلی (کوادرات ۱×۱ متر) و ۳ قطعه نمونه شاهد در فاصله ۱۰ متری عمود بر لبه مسیر و در داخل جنگل دست‌نخورده مستقر شدند. در مجموع از ۴ پارسل ۴× شدت تردد × (۶ نمونه اصلی + ۳ نمونه شاهد) = ۱۴۴ قطعه نمونه تعیین شد، سپس نمونه‌برداری از خاک در بالای هر کوادرات با سیلندری به عمق ۵ سانتی‌متر برای بررسی خصوصیات فیزیکی و نمونه‌ای نیز برای بررسی خواص شیمیایی خاک برداشت شد. درصد رطوبت، جرم مخصوص ظاهری، درصد تخلخل، مقاومت به نفوذ، اسیدیته خاک، کربن، نیتروژن C/N آزمایش شد.

برای تجزیه و تحلیل آماری و با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از ۱۴۴ قطعه نمونه که به‌صورت تصادفی سیستماتیک برداشت آن انجام شده بود، داده‌ها در نرم‌افزار اکسل مرتب و به‌منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها از تجزیه واریانس یک‌طرفه با ادغام زمان‌ها برای مشخص شدن اثر متقابل عوامل با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۸، SAS JMP نسخه ۱۳، ۰۵ و ۴ برای تعیین مثلث بافت خاک از نرم‌افزار TAL استفاده شد.

یافته‌های پژوهش

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد سن بهره‌برداری، شدت تردد و اثر متقابل این دو عامل بر یکدیگر بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری‌شده خاک به‌شدت و در سطح آماری یک‌هزارم مؤثر بوده است (جدول ۲).

جدول ۲. جدول آنالیز واریانس تأثیر شدت تردد و سن بهره‌برداری و اثر متقابل شدت تردد و سن بهره‌برداری بر مشخصه‌های فیزیکی خاک

عامل	رطوبت	جرم مخصوص ظاهری	درصد تخلخل	مقاومت به نفوذ
	P-value	F	P-value	F
شدت تردد	۰/۰۰*	۱۷۳۴/۷۲	۰/۰۰*	۱۴۰۹/۰۷
سن بهره‌برداری	۰/۰۰*	۶۱/۰۸	۰/۰۰*	۶۶/۴۵
اثر متقابل سن و شدت تردد	۰/۰۰*	۱۱/۵۵	۰/۰۰*	۱۰/۴۲

۱. خصوصیات فیزیکی خاک

برای مشخص کردن جرم مخصوص ظاهری، نمونه‌ها در آون با درجه حرارت ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد برای ۲۴ ساعت خشک و وزن شدند که از تقسیم وزن خاک خشک به حجم سیلندر (گرم بر سانتی‌متر مکعب)، رطوبت خاک و جرم مخصوص ظاهری آن مشخص شد (سهرابی و همکاران، ۲۰۱۹).

رطوبت خاک مسیرهای چوب‌کشی در مقایسه با مناطق شاهد تحت تأثیر عملیات چوب‌کشی قرار داشته است. در محل دیو و در میان شدت‌های مختلف تردد، بیشترین کاهش رطوبت با مقادیر میانگین ۱۰/۱۱ درصد، ۱۰/۲۹ درصد، ۳/۷۹ درصد و ۶/۵۸

درصد به ترتیب در سنین ۷، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سال ثبت شده و در مجموع باید گفت بعد از گذشت دو دهه پس از عملیات چوب‌کشی هنوز میزان رطوبت خاک این مناطق به سطح قبل از عملیات چوب‌کشی نرسیده و در مقایسه با مناطق دست‌نخورده شاهد دارای تفاوت معنی‌داری است.

جرم مخصوص ظاهری خاک در دپوها ۴۹ درصد بیشتر از مناطق شاهد (۰/۹۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب) بود. این رقم در مسیر با تردد کم و در پارسل با سن بهره‌برداری ۲۰ سال به حداقل خود یعنی ۱/۰۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب رسیده، ولی با این وجود هنوز اختلاف زیاد و معنی‌داری با منطقه شاهد داشته و نتایج در یک گروه آماری قرار نگرفته است.

در خصوص تخلخل خاک، بین منطقه شاهد (دست‌نخورده) جنگل با ۶۵/۱۹ درصد تخلخل و (کلیه) مسیرهای چوب‌کشی تحت شدت‌های مختلف تردد و سنین متفاوت عملیات چوب‌کشی و اثر متقابل این دو عامل بر یکدیگر اختلاف معنی‌داری وجود داشت، به‌طوری که میانگین کل تخلخل خاک مسیرهای چوب‌کشی، در مقایسه با مناطق شاهد ۳۷/۹۶ درصد کاهش را نشان داده، ولی درصد تخلخل خاک از کمترین مقدار آن در دپو ۷ سال (۴۳/۰۱) تا بیشترین مقدار آن در تردد کم سن ۲۰ سال ۲۳/۱۸ درصد رشد داشته است، با وجود این روند افزایشی، هنوز این مقدار در مقایسه با منطقه شاهد، دارای اختلاف زیادی است.

نتایج نشان داد میزان مقاومت به نفوذ مسیرهای چوب‌کشی در مقایسه با مناطق شاهد تفاوت معنی‌داری یافته است. در دپوها با افزایش ۹۰/۹۵ درصدی مواجه بوده‌ایم. این افزایش در بهترین حالت که در مسیرهای کم تردد ۵۰/۵۵ درصد گزارش شده که با منطقه شاهد پس از گذشت ۲ دهه، دارای اختلاف معنی‌داری است، البته در خصوص شدت تردد، اختلاف بین محل دپو و مسیر با تردد کم ۱۳/۱۱ درصد بوده است که کاهش شدت تردد، موجب کاهش در مقاومت به نفوذ خاک شده است. در مورد سن بهره‌برداری نیز میانگین مقاومت به نفوذ خاک در سن بهره‌برداری ۷ سال ۲/۶۹ مگاپاسکال بوده که این رقم در سن بهره‌برداری ۲۰ سال به ۲/۰۷ رسیده و با این نتیجه، بهبود نسبی با کاهش ۳۰ درصدی به‌وضوح قابل رؤیت است. با این حال هنوز بین نتایج به‌دست‌آمده در سن ۲۰ سال و منطقه شاهد اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد دیده می‌شود. مقاومت به نفوذ خاک نیز در مسیرهای چوب‌کشی به‌ویژه در دپوها تا ۳ برابر بیشتر از مناطق شاهد افزایش یافته بود (جدول ۳).

جدول ۳. روند تغییرات مشخصه‌های فیزیکی خاک در سنین و سطوح مختلف تردد پس از عملیات چوب‌کشی (میانگین $\pm$ انحراف معیار)

سن	رطوبت	جرم مخصوص (BD)	تخلخل (TP)	مقاومت به نفوذ (PR)
۷	دپو	۱۰/۱۱±۱/۸ ⁱ	۱/۴۵±۰/۰۳ ^a	۴۳/۰۱±۱/۱۸ ^k
	تردد زیاد	۲۹/۷۸±۳/۱۶ ^{fg}	۱/۲۱±۰/۰۶ ^{cd}	۵۱/۸۵±۲/۴۵ ^{hi}
	تردد متوسط	۳۳/۲۷±۲/۹۹ ^{ef}	۱/۱۹±۰/۰۱ ^d	۵۲/۱۸±۰/۷۱ ^{hi}
	تردد کم	۴۴/۰۴±۳/۳۹ ^{ab}	۱/۰۷±۰/۰۲ ^{fg}	۵۶/۵۱±۰/۷۳ ^{c-f}
	شاهد	۴۱/۹۷±۳/۰۳ ^{a-c}	۰/۸۸±۰/۰۲ ^{ij}	۶۴/۳۹±۰/۶۳ ^{ab}
۱۰	دپو	۱۰/۲۹±۴/۳۵ ⁱ	۱/۳۵±۰/۰۵ ^b	۴۶/۶۹±۲/۳۴ ^j
	تردد زیاد	۲۰/۴۰±۲/۷۴ ^h	۱/۲۴±۰/۰۳ ^c	۵۰/۵۶±۱/۳۴ ⁱ
	تردد متوسط	۳۵/۱۴±۱/۳۳ ^{d-f}	۱/۱۱±۰/۰۱ ^{ef}	۵۵/۶۱±۰/۲۸ ^{ef}
	تردد کم	۳۷/۵۹±۱/۹۹ ^{c-e}	۱/۰۶±۰/۰۲ ^{fg}	۵۷/۱۱±۰/۶۵ ^{c-e}
	شاهد	۳۹/۹۳±۳/۲۳ ^{b-d}	۰/۸۹±۰/۰۱ ⁱ	۶۳/۷۷±۰/۳۲ ^b
۱۵	دپو	۳/۷۹±۲/۴۲ ^j	۱/۳۲±۰/۰۳ ^b	۴۸/۱۸±۱/۱۷ ^j
	تردد زیاد	۱۳/۰۲±۰/۶۵ ⁱ	۱/۲۱±۰/۰۱ ^{cd}	۵۲/۱۱±۰/۳۷ ^{hi}
	تردد متوسط	۲۰/۱۸±۲/۵۳ ^h	۱/۱۲±۰/۰۳ ^c	۵۴/۸۵±۱/۳۴ ^{fg}
	تردد کم	۳۱/۰۶±۰/۵۳ ^{fg}	۱/۰۳±۰/۰۱ ^h	۵۸/۲۶±۰/۴۳ ^{cd}
	شاهد	۴۷/۴۳±۲/۱۱ ^a	۰/۸۳±۰/۰۱ ^j	۶۶/۲۴±۰/۳۴ ^a
۲۰	دپو	۶/۸۵±۱/۳۴ ^{ij}	۱/۲۵±۰/۰۱ ^c	۵۱/۱۳±۰/۳۸ ^{hi}
	تردد زیاد	۱۳/۱۰±۰/۳۶ ⁱ	۱/۱۹±۰/۰۱ ^d	۵۲/۸۴±۰/۲۷ ^{gh}
	تردد متوسط	۲۲/۳۵±۱/۳۹ ^h	۱/۰۹±۰/۰۱ ^{ef}	۵۶/۳۳±۰/۳۵ ^{d-f}

۱/۷۵±۰/۰۴ ^g	۵۸/۵۴±۰/۶۶ ^c	۱/۰۳±۰/۰۱ ^h	۲۵/۴۱±۱/۹۹ ^{gh}	تردد کم
۱/۳۲±۰/۰۳ ^h	۶۶/۳۵±۱/۶۳ ^a	۰/۸۳±۰/۰۴ ^j	۴۲/۹۷±۷/۰۴ ^{a-c}	شاهد

۲. خصوصیات شیمیایی خاک

تغییرات مشخصه‌های شیمیایی خاک در سال‌ها و شدت‌های مختلف تردد پس از عملیات چوب‌کشی، با مشخصه‌های شیمیایی خاک شامل کربن (C)، نیتروژن (N) و نسبت کربن به نیتروژن (C/N) آزمایش شد. نتایج نشان داد در سطوح مختلف تردد و سنین متفاوت بهره‌برداری و اثر متقابل این دو عامل، بین مسیرهای چوب‌کشی و مناطق دست‌نخورده شاهد، تفاوت معنی‌داری وجود دارد (جدول ۴).

جدول ۴. جدول آنالیز واریانس تأثیر شدت تردد و سن بهره‌برداری و برهمکنش شدت تردد و سن بهره‌برداری بر مشخصه‌های شیمیایی خاک

عامل		کربن (C)		نیتروژن (N)		نسبت کربن بر نیتروژن (C/N)	
		P-value	F	P-value	F	P-value	F
شدت تردد		۰/۰۰*	۱۳۷۳/۷۱	۰/۰۰*	۸۴/۰۹	۰/۰۰*	۳۸/۴۸
سن بهره‌برداری		۰/۰۰*	۴۲۲/۰۹	۰/۰۰*	۵۴/۷۸	۰/۰۰*	۱۵۱/۹۶
اثر متقابل سن بر شدت تردد		۰/۰۰*	۲۸/۰۰	۰/۰۰*	۳/۶۳	۰/۰۰*	۱۵/۵۶

مقادیر کربن خاک در مسیرهای چوب‌کشی به صورت معنی‌داری کمتر از مناطق شاهد مجاور بود. میزان کربن موجود در خاک مسیرهای با سن بهره‌برداری ۷ سال، با میانگین ۴/۴۸ درصد، در مقابل مناطق شاهد با ۶/۳۷ قرار داشت و در این سن و در محل دیو، شدت تردد زیاد، متوسط و کم، کربن خاک به ترتیب ۴/۱۰ درصد، ۴/۴۰ درصد، ۴/۶۱ درصد و ۴/۸۲ درصد به ثبت رسید. در سن بهره‌برداری ۱۰ سال با میانگین کربن ۵/۰۴ درصد در مقابل منطقه شاهد با ۶/۵۴، دارای اختلاف معنی‌داری بود. در سن ۱۵ سال نیز همانند سنین بهره‌برداری ۷ و ۱۰ سال هنوز آثار شدید تخریب خاک و کاهش کربن مشاهده می‌شود. در ضمن در این پارسل و در محل دیو، بیشترین کاهش کربن خاک مشاهده شد. در سن بهره‌برداری ۲۰ سال، مقادیر به دست آمده از کربن خاک تحت سطوح مختلف تردد، به طور معنی‌داری نسبت به پارسل‌های دیگر بالاتر و به منطقه شاهد نزدیک‌تر بود.

نیتروژن خاک در سن بهره‌برداری ۷ سال در مقایسه با منطقه شاهد دارای کمترین میزان بود. در سن ۱۰ سال به جز در مسیر با تردد کم، نتایج نیتروژن خاک سایر مسیرها با منطقه شاهد دارای تفاوت معنی‌داری بود. در سن ۱۵ سال، تمام مسیرهای چوب‌کشی در مقایسه با منطقه شاهد متناظر خود، دارای اختلاف معنی‌داری بودند و میانگین کل نیتروژن مسیرهای چوب‌کشی با سطوح مختلف تردد این پارسل ۰/۴۹ درصد بود. در سن بهره‌برداری ۲۰ از لحاظ وجود نیتروژن خاک، دارای مقادیری کمتر از مسیرهای چوب‌کشی شده با عمر ۷ سال بود. در خصوص شدت‌های مختلف تردد نیز محل دیو با میانگین ۰/۴۶ درصد نیتروژن کمترین مقدار را داشته است.

در سن ۷ سال نسبت کربن بر نیتروژن خاک به صورت معنی‌داری کمتر از منطقه شاهد گزارش شد. در سن ۱۰ سال نیز نتایج به دست آمده نشان داد چهار تیمار شدت تردد با میانگین ۹/۳۱ در مقابل ۱۰/۹۱ منطقه شاهد، دارای اختلاف معنی‌داری است. در مسیرهای با سن چوب‌کشی ۱۵ سال C/N در محل دیو، تردد زیاد، متوسط و کم با میانگین ۹/۷۳ (کل مسیرها) در مقابل منطقه شاهد با میانگین ۱۰/۹۵ دارای اختلاف معنی‌داری بودند. در سن ۲۰ سال و در تمام شدت‌های تردد، با میانگین ۱۲/۵۵ در مقابل منطقه شاهد با میانگین ۱۱/۵۴ به طور معنی‌داری، مقادیر نسبت کربن به نیتروژن بالاتر بود.

اسیدیته خاک با دستگاه pH متر در محل برداشت نمونه خاک در کنار همه قطعات نمونه اندازه‌گیری و ثبت شد (در قطعات نمونه رد چرخ و رد چوب دیو و قطعات نمونه شاهد) و این پارامتر یک بار نیز در آزمایشگاه خاک با استفاده از دستگاه pH متر و به صورت تهیه گل اشباع از همه نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت به نسبت ۱:۲/۵ اندازه‌گیری شد (سهرابی و همکاران، ۲۰۱۹). خاک مسیرهای چوب‌کشی به طور قابل توجهی نسبت به مناطق دست‌نخورده جنگل اسیدی‌تر شده است. میانگین pH خاک مناطق شاهد

در سنین بهره‌برداری (۷ و ۱۰ سال) به ترتیب ۶/۸۳ و ۶/۸۴ بود که به صورت چشمگیری بالاتر از مسیرهای چوب‌کشی با میانگین ۵/۴۵ در ۷ سال و ۵/۵۴ در ۱۰ سال قرار داشت، ولی با گذشت ۱۵ و ۲۰ سال از زمان بهره‌برداری، روند بهبود نسبی در اکثر تیمارها (به خصوص در محل‌های دیو و تردد زیاد)، به وضوح قابل رؤیت است، ولی حتی پس از سپری شدن دو دهه، pH خاک مسیرهای چوب‌کشی در هیچ‌یک از سطوح تردد به سطح مناطق شاهد با میانگین ۶/۸۷ نرسیده است. از لحاظ گروه‌بندی آماری مناطق شاهد در یک گروه آماری قرار گرفته‌اند و این موضوع نشان‌دهنده ثابت و پایداری pH خاک جنگل در عرصه‌های دست‌نخورده جنگلی است (جدول ۵).

جدول ۵. روند تغییرات مشخصه‌های شیمیایی خاک در سنین و سطوح مختلف تردد پس از عملیات چوب‌کشی (میانگین $\pm$ انحراف معیار)

سن	کربن (C)	نیترژن (N)	(C/N)	pH
۷	دیو	۴/۱۰ $\pm$ ۰/۰۵ ^k	۰/۴۳ $\pm$ ۰/۰۱ ^{ij}	۹/۵۸ $\pm$ ۰/۳۸ ^{gh}
	تردد زیاد	۴/۴۰ $\pm$ ۰/۱۲ ^j	۰/۴۸ $\pm$ ۰/۰۳ ^{f-j}	۹/۲۰ $\pm$ ۰/۵۶ ^{gh}
	تردد متوسط	۴/۶۱ $\pm$ ۰/۰۴ ^{ij}	۰/۴۶ $\pm$ ۰/۰۳ ^{g-j}	۹/۹۸ $\pm$ ۰/۶۸ ^{e-g}
	تردد کم	۴/۸۲ $\pm$ ۰/۰۴ ^{hi}	۰/۴۹ $\pm$ ۰/۰۱ ^{e-h}	۹/۸۷ $\pm$ ۰/۲۱ ^{e-g}
	شاهد	۶/۳۷ $\pm$ ۰/۱۶ ^{c-a}	۰/۵۴ $\pm$ ۰/۰۲ ^{a-c}	۱۱/۸۲ $\pm$ ۰/۶۲ ^{b-g}
۱۰	دیو	۴/۶۱ $\pm$ ۰/۰۸ ^{ij}	۰/۵۲ $\pm$ ۰/۰۱ ^{c-f}	۸/۸۵ $\pm$ ۰/۲۹ ^{gh}
	تردد زیاد	۴/۹۴ $\pm$ ۰/۰۴ ^h	۰/۵۲ $\pm$ ۰/۰۱ ^{d-g}	۹/۵۶ $\pm$ ۰/۱۸ ^{gh}
	تردد متوسط	۵/۲۲ $\pm$ ۰/۰۶ ^{fg}	۰/۵۵ $\pm$ ۰/۰۱ ^{a-d}	۹/۴۴ $\pm$ ۰/۲۶ ^{gh}
	تردد کم	۵/۴۰ $\pm$ ۰/۰۵ ^{ef}	۰/۵۸ $\pm$ ۰/۰۶ ^{ab}	۹/۳۸ $\pm$ ۰/۸۵ ^{gh}
	شاهد	۶/۵۴ $\pm$ ۰/۱۹ ^a	۰/۶ $\pm$ ۰/۰۴ ^a	۱۰/۹۱ $\pm$ ۰/۸۴ ^{d-f}
۱۵	دیو	۴/۰۶ $\pm$ ۰/۰۲ ^k	۰/۴۷ $\pm$ ۰/۰۲ ^{f-j}	۸/۵۹ $\pm$ ۰/۴۴ ^h
	تردد زیاد	۴/۴۵ $\pm$ ۰/۰۳ ^j	۰/۴۸ $\pm$ ۰/۰۱ ^{f-j}	۹/۳۰ $\pm$ ۰/۱۸ ^{gh}
	تردد متوسط	۵/۰۰ $\pm$ ۰/۰۷ ^{gh}	۰/۵۲ $\pm$ ۰/۰۶ ^{d-g}	۹/۷۷ $\pm$ ۱/۰۰ ^{fg}
	تردد کم	۵/۴۷ $\pm$ ۰/۲۰ ^e	۰/۴۹ $\pm$ ۰/۰۲ ^{e-h}	۱۱/۲۵ $\pm$ ۰/۵۷ ^{b-d}
	شاهد	۶/۳۴ $\pm$ ۰/۲۱ ^{c-a}	۰/۵۸ $\pm$ ۰/۰۳ ^{ab}	۱۰/۹۵ $\pm$ ۰/۶۱ ^{c-e}
۲۰	دیو	۵/۲۲ $\pm$ ۰/۰۳ ^{fg}	۰/۴۳ $\pm$ ۰/۰۲ ^j	۱۲/۲۹ $\pm$ ۰/۴۴ ^b
	تردد زیاد	۵/۵۳ $\pm$ ۰/۰۵ ^e	۰/۴۶ $\pm$ ۰/۰۴ ^{h-j}	۱۲/۰۹ $\pm$ ۰/۹۸ ^{bc}
	تردد متوسط	۵/۸۳ $\pm$ ۰/۰۴ ^d	۰/۴۸ $\pm$ ۰/۰۲ ^{f-i}	۱۲/۱۳ $\pm$ ۰/۴۶ ^b
	تردد کم	۶/۱۳ $\pm$ ۰/۰۵ ^{bc}	۰/۴۵ $\pm$ ۰/۰۱ ^{j-h}	۱۳/۶۸ $\pm$ ۰/۳۷ ^a
	شاهد	۶/۶۰ $\pm$ ۰/۱۴ ^{ab}	۰/۵۷ $\pm$ ۰/۰۲ ^{c-a}	۱۱/۵۴ $\pm$ ۰/۳۷ ^{b-d}

۳. بافت خاک

برای تعیین بافت خاک، بشر را تا نصف با آب مقطر پر و سپس ۱۰ سی‌سی هگزامتافسفات سدیم به آن اضافه و به مدت ۵ دقیقه هم زده شد. پس از آن ۱۵ دقیقه با همزن برقی محلول هم زده شد و مخلوط آب و خاک به درون استوانه مدرج یک لیتری انتقال یافت و حجم کل با آب مقطر یک لیتر شد. درجه حرارت مشخص شد و پس از هم‌زدن مخلوط به مدت یک دقیقه، پس از چند ثانیه هیدرومتر درون استوانه قرار داده شد (سهرابی و همکاران، ۲۰۱۹). نتایج به دست آمده از داده‌های بافت خاک و مقادیر رس، سیلت و ماسه به درصد مشخص شد، در سن بهره‌برداری ۷ سال از ۲۴ نمونه اخذ شده، ۱۷ نمونه دارای بافت لومی، ۶ نمونه رسی - لومی و یک نمونه بافت شنی - رسی - لومی بود و در مقابل، تمام نتایج به دست آمده در منطقه شاهد بافت رسی - لومی نشان دادند. در سن بهره‌برداری ۱۰ سال از ۲۴ نمونه خاک، ۱۵ نمونه لومی، ۷ نمونه رسی - لومی و ۲ نمونه شنی - رسی - لومی بود، در مقابل منطقه شاهد که به جز سه نمونه، همگی شنی - رسی بودند. در سن بهره‌برداری ۱۵ سال از ۲۴ نمونه، ۱۶ نمونه

دارای بافت لومی و ۸ نمونه بافت رسی - لومی بودند و در مقابل، در منطقه شاهد ۵۰ درصد نمونه‌ها بافت لومی و ۵۰ درصد نمونه‌ها، بافت رسی - لومی داشتند. در سن بهره‌برداری ۲۰ سال، ۲۰ نمونه خاک دارای بافت رسی - لومی بودند و ۴ نمونه بافت لومی داشتند. در منطقه شاهد، فقط یک نمونه دارای بافت لومی بود و بقیه نمونه‌ها بافت رسی - لومی داشتند، در مجموع نتایج بافت خاک در مسیرهای چوب‌کشی در نمونه‌های مختلف عبارت بود از لومی ۵۴/۱۷ درصد، رسی لومی ۴۲/۷۱ درصد، شنی - رسی - لومی ۳/۱۳ درصد و بافت خاک در منطقه شاهد ۸۸/۸۹ درصد رسی - لومی و ۱۱/۱۱ درصد لومی بود (جدول ۶).

جدول ۶. روند تغییرات بافت خاک در سنین و سطوح مختلف تردد پس از عملیات چوب‌کشی (میانگین $\pm$ انحراف معیار)

سن	رس	سیلت	ماسه
دپو	$26/17 \pm 1/65^{e-b}$	$31/37 \pm 1/64^{cd}$	$42/46 \pm 2/80^{b-d}$
تردد زیاد	$26/47 \pm 2/26^{e-b}$	$30/63 \pm 0/81^{cd}$	$42/91 \pm 2/60^{a-d}$
تردد متوسط	$24/33 \pm 1/78^{de}$	$31/23 \pm 2/97^{cd}$	$44/45 \pm 1/56^{ab}$
تردد کم	$25/97 \pm 1/02^{e-b}$	$30/48 \pm 1/34^{cd}$	$43/55 \pm 1/53^{a-c}$
شاهد	$29/36 \pm 1/21^{ab}$	$31/76 \pm 1/46^{cd}$	$38/88 \pm 1/90^{c-e}$
دپو	$22/98 \pm 0/95^e$	$29/24 \pm 1/50^d$	$47/79 \pm 1/75^a$
تردد زیاد	$25/47 \pm 2/31^{e-c}$	$31/93 \pm 1/58^{cd}$	$42/60 \pm 1/92^{b-d}$
تردد متوسط	$24/71 \pm 1/61^{de}$	$31/81 \pm 1/49^{cd}$	$43/48 \pm 1/64^{a-c}$
تردد کم	$28/55 \pm 2/14^{c-a}$	$31/09 \pm 1/26^{cd}$	$40/36 \pm 3/13^{b-d}$
شاهد	$27/22 \pm 2/87^{d-a}$	$31/17 \pm 1/21^{cd}$	$41/61 \pm 3/54^{b-d}$
دپو	$29/22 \pm 1/69^{ab}$	$31/24 \pm 0/92^{cd}$	$39/55 \pm 2/23^{b-e}$
تردد زیاد	$27/26 \pm 0/68^{d-a}$	$34/64 \pm 1/77^{c-a}$	$38/09 \pm 1/24^{d-f}$
تردد متوسط	$26/56 \pm 0/30^{d-b}$	$38/19 \pm 2/29^{ab}$	$35/26 \pm 1/99^{ef}$
تردد کم	$24/28 \pm 0/60^{de}$	$33/24 \pm 1/06^{d-b}$	$42/48 \pm 1/51^{b-d}$
شاهد	$27/04 \pm 3/02^{d-a}$	$39/63 \pm 6/61^a$	$33/33 \pm 4/87^f$
دپو	$27/61 \pm 0/85^{d-a}$	$30/36 \pm 1/74^{cd}$	$42/03 \pm 2/20^{b-d}$
تردد زیاد	$30/40 \pm 0/92^a$	$31/30 \pm 1/72^{cd}$	$38/30 \pm 2/38^{d-f}$
تردد متوسط	$26/97 \pm 0/65^{d-a}$	$30/90 \pm 1/37^{cd}$	$42/13 \pm 1/17^{b-d}$
تردد کم	$28/98 \pm 1/35^{c-a}$	$31/58 \pm 0/83^{cd}$	$39/44 \pm 2/03^{b-e}$
شاهد	$28/83 \pm 1/61^{c-a}$	$31/97 \pm 2/37^{cd}$	$39/20 \pm 1/54^{c-e}$

۳. تحلیل مؤلفه‌های اصلی

در رابطه با تغییرات به‌دست‌آمده از متغیرهای فیزیکی و شیمیایی خاک، در مسیرهای چوب‌کشی از نظر سطوح مختلف تردد و سنین بهره‌برداری (با توجه به اصول تجزیه و تحلیل آنالیز (PCA)^۱ که با چند مؤلفه با محور بیان می‌شود و هریک از این مؤلفه‌ها بیانگر قسمتی از تغییرات است)، نتایج این محورها در این پژوهش آورده شد. با بررسی ۳ محور، بیش از ۸۱/۵ درصد از واریانس تجمعی قابل تفسیر است، ولی نقطه شکست آرنج این محور در مؤلفه دوم با ۶۶/۲ درصد واریانس تجمعی اتفاق افتاده است. با بررسی محوره‌های به‌دست‌آمده از آزمون PCA مشخص شد مؤلفه اول دارای مقدار ویژه ۴/۷، به‌طور چشمگیری از سایر مؤلفه‌ها بالاتر است. این بدان معنی است که این مؤلفه به تنهایی قوی‌ترین الگوی ساختاری موجود در میان داده‌های بررسی شده است. مؤلفه دوم با مقدار ویژه ۲/۵۷ و مؤلفه سوم با ۱/۶۹ در مرتبه‌های دوم و سوم قرار داشتند. به عبارت دیگر مؤلفه اول با ۴۲/۸ درصد و مؤلفه دوم با ۲۳/۳۸ درصد و مؤلفه سوم با ۱۵/۳۸ درصد واریانس را توضیح می‌دهند و بعد از مؤلفه سوم که عملاً ۸۱/۵۵ درصد از کل واریانس را توضیح می‌دهد، سایر مؤلفه‌های چهار به بعد سودمندی چندانی برای توضیح واریانس واقعی ندارند. در مؤلفه اول

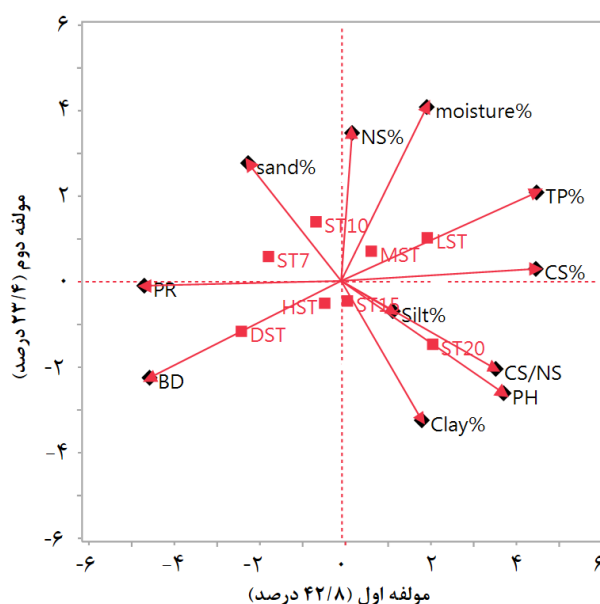
^۱ Principal Components Analysis

کربن خاک بیشترین ارزش مثبت و مقاومت به نفوذ و جرم مخصوص ظاهری بیشترین ارزش منفی را داشتند. در مؤلفه دوم رطوبت و نیتروژن لاشبرگ بیشترین ارزش مثبت و درصد رس و اسیدیت خاک بیشترین مقدار منفی را داشتند. در محور سوم ماسه بیشترین ارزش مثبت و سیلت بیشترین تأثیر منفی را داشت (جدول ۷).

جدول ۷. مقادیر بردارهای ویژه برای تغییرات خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مسیرهای چوب‌کشی

محور ۱	محور ۲	محور ۳
درصد رطوبت	۰/۱۸	۰/۴۹
جرم مخصوص ظاهری	-۰/۴۰	-۰/۲۷
درصد تخلخل	۰/۴۱	۰/۲۵
مقاومت به نفوذ	-۰/۴۱	-۰/۰۱
درصد رس	۰/۱۷	-۰/۴۰
درصد سیلت	۰/۱۱	-۰/۰۹
درصد ماسه	-۰/۲۰	۰/۳۳
اسیدیت	۰/۳۴	-۰/۳۱
درصد کربن خاک	۰/۴۱	۰/۰۳
درصد نیتروژن خاک	۰/۰۲	۰/۴۲
نسبت کربن به نیتروژن خاک	۰/۳۲	-۰/۲۵

نمودار نتایج تحلیل PCA برای درک روابط بین متغیرها و گروه‌بندی تیمارها بسیار گویا است. دو مؤلفه اول در مجموع حدود ۶۶ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین کردند. مؤلفه اول ۴۳ درصد به‌شدت با متغیرهای جرم مخصوص ظاهری (BD) و مقاومت به نفوذ (PR) همبستگی مثبت و با تخلخل (TP)، کربن آلی (C) و نیتروژن (N) همبستگی منفی داشت. این مؤلفه به‌وضوح محور فشردگی و تخریب خاک را نشان می‌داد. مؤلفه دوم با ۲۳/۴ درصد به‌طور عمده با رطوبت، نیتروژن، اسیدیت (pH) و درصد رس خاک مرتبط بود، همچنین نمودار نشان داد در سن بهره‌برداری ۷ و ۱۰ سال بالاترین سطح آسیب به خاک و رطوبت وجود داشته، ولی در سنین بهره‌برداری ۱۵ و ۲۰ سال تا حدودی این آثار کاهش یافته است. در خصوص شدت‌های مختلف تردد نیز بیشترین صدمات به خاک در شدت‌های بالای تردد وارد شده و تردد بیشتر، با جرم مخصوص ظاهری، مقاومت به نفوذ و تا حدودی با اسیدیت خاک همبستگی مثبت و با درصد رطوبت، تخلخل و کربن خاک همبستگی منفی شدید دارد. درخصوص بافت خاک نیز با توجه به قرار گرفتن نوع و ذرات تشکیل‌دهنده آن روی نمودار مشخص شد درصد ماسه و رس با یکدیگر، همچنین با شدت تردد و سن بهره‌برداری همبستگی دارند، به‌صورتی که درصد ماسه در سن ۷ و ۱۰ سال و شدت‌های بالای تردد (دپو و تردد زیاد)، همبستگی مثبت داشت و درصد رس در سن بهره‌برداری ۲۰ سال همبستگی مثبت داشت (شکل ۱).



شکل ۱. نمودار تجزیه و تحلیل PCA از سن بهره‌برداری (۷، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سال) و در شدت تردد (دپو، زیاد، متوسط و کم) و مشخصه‌های فیزیکی (رطوبت، جرم مخصوص ظاهری، تخلخل و مقاومت به نفوذ) و مشخصه‌های شیمیایی خاک (pH، کربن، نیتروژن و C/N)

بحث و نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش به‌وضوح نشان داد عملیات چوب‌کشی مکانیزه تأثیرات عمیق و پایداری بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک جنگل‌های هیرکانی بر جای گذاشته است. افزایش جرم مخصوص ظاهری و کاهش تخلخل و نفوذپذیری در مسیرهای چوب‌کشی، به‌ویژه در مناطق دپو، کاملاً با یافته‌های مطالعات پیشین در جنگل‌های مختلف جهان مطابقت دارد (Cambi et al., 2015; Ampoorter et al., 2010). این تغییرات فیزیکی ناشی از فشردگی خاک، به‌طور مستقیم به کاهش ذخیره و محتوای رطوبت خاک منجر می‌شود که می‌تواند استرس آبی را برای زادآوری و گیاهان علفی تشدید کند (Ezzati et al., 2012)، همچنین نتایج به‌دست‌آمده نشان داد عملیات چوب‌کشی به‌طور معنی‌داری بر رطوبت خاک تأثیر گذاشته و با افزایش شدت تردد، درصد رطوبت خاک کاهش می‌یابد. کمترین میزان رطوبت در مناطق پرتردد و به‌ویژه در دیوها مشاهده شده است. از سوی دیگر با گذشت زمان (از ۷ به ۲۰ سال)، رطوبت خاک در مسیرهای چوب‌کشی روندی افزایشی داشته، اگرچه حتی پس از دو دهه هنوز به سطح رطوبت اولیه نرسیده بود. این یافته‌ها با تحقیقات سهرابی و همکاران (۲۰۱۹) که در همین منطقه، مطالعه کرده‌اند و نجفی^۱ و سلگی^۲ (۲۰۱۴) و عزتی^۳ و همکاران (۲۰۱۲) همسویی دارد. این محققان گزارش کرده‌اند که با افزایش تردد، رطوبت خاک در مسیرهای چوب‌کشی کاهش می‌یابد. این محققان کاهش توانایی نگهداری آب را در رد چرخ‌های ماشین‌های چوب‌کشی گزارش کرده‌اند و در مقابل سیرویس^۴ و میلر^۵ (۱۹۸۶) افزایش رطوبت خاک در مسیرهای چوب‌کشی را ناشی از حذف تاج‌پوشش و در نتیجه کاهش تبخیر و تعرق گزارش کرده‌اند.

نتایج نشان داد جرم مخصوص ظاهری خاک در مسیرهای چوب‌کشی بیشتر از مناطق شاهد بوده، به‌طوری که بیشترین مقادیر جرم مخصوص ظاهری در محل‌های دیوها و با شدت تردد زیاد ثبت شده است. با گذشت زمان از ۷ به ۲۰ سال، روند کاهشی جرم مخصوص ظاهری خاک مشاهده شد، این روند نشان‌دهنده آغاز فرایند بازبایی تدریجی خاک است. اگرچه بازبایی خاک بلافاصله پس از توقف آشفستگی آغاز می‌شود، ولی این روند کند و ناقص است و به‌ویژه در مسیرهای با شدت تردد بیشتر این آهنگ کندتر

¹ Najafi

² Solgi

³ Ezzati

⁴ Sirois

⁵ Miller

هم می‌شود. این یافته‌ها با نتایج مطالعه پیکو^۱ و همکاران (۲۰۱۹)، سهرابی و همکاران (۲۰۱۵) و امپورتر^۲ و همکاران (۲۰۱۰) همخوانی دارد.

این پژوهش نشان داد عملیات چوب‌کشی تأثیر معنی‌داری بر کاهش درصد تخلخل در مسیرهای چوب‌کشی دارد. میانگین تخلخل خاک در مناطق شاهد ۶۵/۱۹ درصد بوده، در حالی که این شاخص در مسیرهای چوب‌کشی ۱۸/۹۶ درصد پایین‌تر از مناطق شاهد بوده است. این موضوع نشان‌دهنده حساسیت بالای ساختار خاک حتی در ترددهای محدود است و عدم بازیابی تخلخل خاک، پس از گذشت دو دهه از عملیات چوب‌کشی، نشان‌دهنده تأثیر کوبیدگی اولیه است. در مسیرهای با تردد شدید (دپو و تردد زیاد) بهبود تخلخل خاک بسیار محدود و ناچیز بوده است. نتایج به‌دست‌آمده در مسیرهای با شدت تردد بالا نیز نشان‌دهنده تأثیر منفی تردد زیاد بر تخلخل خاک است. این یافته‌ها حاکی از تأثیر بسیار ماندگار و عمیق فشردگی شدید خاک ناشی از تمرکز فعالیت‌ها و ترددهای مکرر است. در مناطقی که تحت فشار سطوح کمتر تردد بوده‌اند، روند بهبود تخلخل با گذشت زمان مشهودتر است. بازیابی ناقص تخلخل خاک پس از دو دهه به‌ویژه در نقاط بحرانی (دپو و تردد زیاد) هشدار جدی برای مدیریت جنگل است، چراکه این ویژگی خاک به‌طور مستقیم بر نفوذپذیری آب در خاک، تهویه، فعالیت زیستی تأثیرگذار است. نتایج این پژوهش با تحقیقات پیکو و همکاران (۲۰۱۹) همخوانی دارد. نتایج نشان داد شدت تردد و سن بهره‌برداری عامل تعیین‌کننده‌ای در افزایش معنی‌دار مقاومت به نفوذ خاک در مسیرهای چوب‌کشی هستند و در مسیرهایی که شدیدترین تردد و بالاترین سطوح تردد را داشته‌اند، بیشترین مقادیر PR ثبت شده است. افزایش PR تنها یک شاخص برای تعیین خواص فیزیکی خاک نیست، بلکه مقادیر آن به‌طور مستقیم و عمیق بر سلامت اکوسیستم جنگل تأثیر گذاشته و محدودیت در توسعه ریشه را به‌وجود می‌آورد. این پدیده چرخه مواد مغذی را مختل می‌کند و این روند به تخریب بیشتر رویشگاه منتهی می‌شود. نتایج این تحقیق با تحقیقات لاترینی^۳ و همکاران (۲۰۲۴)، نقدی و همکاران (۲۰۲۴)، دی آرموند^۴ و همکاران (۲۰۲۳)، کامبی^۵ و همکاران (۲۰۱۷)، جورغلامی و گلیج (۲۰۱۳) و راب^۶ (۲۰۰۴) همسویی دارد.

از نظر خصوصیات شیمیایی، کاهش معنی‌دار کربن آلی و نیتروژن کل در خاک‌های فشرده، یکی از نگران‌کننده‌ترین نتایج این مطالعه است. این موضوع می‌تواند ناشی از چند مکانیسم باشد: ۱- اختلاط خاک معدنی با لایه آلی و تسریع معدنی شدن، ۲- کاهش ورود مواد آلی جدید به دلیل حذف پوشش گیاهی، ۳- کاهش فعالیت میکروبی و در نتیجه کندی تجزیه و تشکیل هوموس (Kiumarsi et al., 2024؛ سهرابی و همکاران، ۲۰۱۹). افزایش نسبت C/N در خاک‌های فشرده نیز نشان می‌دهد فرایندهای مربوط به چرخه نیتروژن (معدنی شدن) بیش از چرخه کربن تحت تأثیر منفی قرار گرفته‌اند. نتایج این پژوهش یک اثر متقابل معنی‌دار را بین سن بهره‌برداری و شدت تردد نشان می‌دهد. میزان بازیابی کربن، نیتروژن و نسبت کربن بر نیتروژن خاک، به‌شدت به میزان تخریب اولیه (شدت تردد) و گذشت زمان بستگی دارد. یافته‌های این پژوهش نشان‌دهنده افزایش pH خاک تحت تأثیر عملیات چوب‌کشی است و خاک این مناطق نسبت به منطقه شاهد اسیدی‌تر شده است. این تغییر از تردد کم به سمت دپو تشدید شده و با گذشت زمان روند کاهش اسیدیته خاک مشاهده می‌شود. نتایج این پژوهش با تحقیقات لیبل^۷ و همکاران (۲۰۲۲)، دلجویی^۸ و همکاران (۲۰۱۷)، کامبی و همکاران (۲۰۱۷) و سلگی و نجفی (۲۰۱۴) همخوانی داشته و با تحقیقات وی^۹ و همکاران (۲۰۱۵)، همسویی ندارد. اگرچه با افزایش سن بهره‌برداری از ۷ به ۲۰ سال، بهبود نسبی در برخی شاخص‌های اندازه‌گیری شده، رخ داد، ولی روند این بهبود کند است. حتی پس از گذشت دو دهه، خاک در مسیرهای با شدت تردد زیاد و دپو از نظر بسیاری از شاخص‌های

^۱ Picchio

^۲ Ampoorter

^۳ Latterini

^۴ DeArmond

^۵ Cambi

^۶ Rab

^۷ Labelle

^۸ Deljouei

^۹ Wei

کلیدی کیفیت خاک، به‌طور معنی‌داری با مناطق دست‌نخورده فاصله دارد. این نتیجه، یافته‌های مطالعات بلندمدت در سایر نقاط جهان را تأیید می‌کند که بازیابی کامل خاک ممکن است به چند دهه یا حتی بیشتر نیاز داشته باشد (Rab, 2004; DeArmond et al., 2023). اثر متقابل معنی‌دار سن و شدت تردد نیز گویای این واقعیت است که شدت آسیب اولیه، مدت‌زمان مورد نیاز برای بازیابی را تعیین می‌کند، به‌طوری که مناطق با تردد شدیدتر، حتی در بلندمدت نیز وضعیت نامطلوب‌تری خواهند داشت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد احیای خاک در مسیرهای چوب‌کشی نیازمند مداخلات اصلاحی فراتر از حفاظت انفعالی است و ضمن توجه مدیران جنگل برای ارائه دستورالعمل‌های مناسب علمی برای کاهش صدمات وارده به خاک در اثر بهره‌برداری، باید برنامه‌های علمی و عملی برای احیای مسیرهای چوب‌کشی در راستای بازیابی خاک و پوشش گیاهی تدوین شود.

نتایج آنالیز چندمتغیره و نمودار ترسیمی PCA به‌خوبی توانست تیمارهای مختلف را بر اساس درجه تخریب و روند بازیابی از یکدیگر متمایز و نقش کلیدی متغیرهای فشردگی خاک شامل جرم مخصوص ظاهری، مقاومت به نفوذ، درصد تخلخل و رطوبت خاک و مشخصه‌های شیمیایی خاک شامل کربن، نیتروژن، نسبت کربن بر نیتروژن و اسیدیته خاک را مشخص کند. مقادیر به‌دست‌آمده نشان داد میزان فشردگی خاک با رطوبت و میزان تخلخل همبستگی منفی دارد و در سال‌های بهره‌برداری ۷ و ۱۰ سال و در شدت‌های بالای تردد، این همبستگی افزایش می‌یابد، همچنین این مقادیر نشان داد نسبت‌های مربوط به ذرات تشکیل‌دهنده خاک (رس - سیلت - ماسه) همبستگی شدیدی با شدت تردد و سن بهره‌برداری دارند.

عملیات چوب‌کشی مکانیزه، به تخریب شدید کیفیت فیزیکی و شیمیایی خاک جنگل‌های هیرکانی منجر می‌شود که مهم‌ترین نمودهای آن ۱- افزایش جرم مخصوص ظاهری و مقاومت به نفوذ، کاهش تخلخل، رطوبت، کربن آلی و نیتروژن کل خاک است، ۲- شدت تردد اولیه و مدت‌زمان سپری‌شده از روی عملیات چوب‌کشی، عامل تعیین‌کننده‌ای در میزان این تخریب است، به‌طوری که محل دپو و با مسیرهای با تردد زیاد بیشترین آسیب و صدمات را متحمل شده‌اند، ۳- روند بازیابی طبیعی خاک پس از پایان عملیات چوب‌کشی، فرایندی زمان‌بر، کند و تدریجی و درخصوص برخی از مشخصه‌ها غیرقابل برگشت است. اگرچه پس از ۲۰ سال بهبودهایی مشاهده می‌شود، اما خاک در مناطق پرتردد به وضعیت اولیه و مشابه مناطق شاهد بازنگشته است. این امر نشان می‌دهد آثار منفی چوب‌کشی می‌تواند در مقیاس دهه‌ها پایدار بماند، ۴- بین سن بهره‌برداری و شدت تردد اثر متقابل وجود دارد، به این صورت که سرعت و میزان بازیابی در مناطق مختلف، به شدت آسیب اولیه و گذشت زمان وابسته است.

پیامدهای سیاستی این تحقیق نشان می‌دهد که برای نیل به اهداف حکمرانی صحیح و حفاظت از منابع طبیعی، مخصوصاً برای جلوگیری از تخریب جنگل‌های هیرکانی، سازمان‌های متولی در امر جنگلداری و منابع طبیعی و بهره‌برداران باید با تدوین و به‌کارگیری استانداردهای لازم و علمی از ورود صدمات به خاک و زادآوری جنگل جلوگیری کنند. به نظر می‌رسد برای نیل به این اهداف، برنامه‌های تدوینی باید ضمن داشتن ضمانت اجرای حقوقی، از مشارکت فعال بهره‌برداران نیز در جهت پذیرش داوطلبانه نیز بهره کافی ببرد.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه تهران، دانشکده منابع طبیعی در قالب پژوهانه پایان‌نامه دانشجویی نویسنده اول و همچنین پژوهانه برای سایر نویسندگان انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: دانشجو: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله
نویسنده دوم: استاد راهنمای رساله، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

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

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

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

منابع

- Ampoorter, E., Van Nevel, L., De Vos, B., Hermy, M., & Verheyen, K. (2010). Assessing the effects of initial soil characteristics, machine mass and traffic intensity on forest soil compaction. *Forest Ecology and Management*, 260(10), 1664–1676. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.08.002>
- Cambi, M., Certini, G., Neri, F., & Marchi, E. (2015). The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest Ecology and Management*, 338, 124–138. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.022>
- Cambi, M., Hoshika, Y., Mariotti, B., Paoletti, E., Picchio, R., Venanzi, R., & Marchi, E. (2017). Compaction by a forest machine affects soil quality and *Quercus robur* L. seedling performance in an experimental field. *Forest Ecology and Management*, 384, 406–414. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.03.018>
- DeArmond, D., Baptista Silva Ferraz, J., Rodrigues de Oliveira, L., Nogueira Lima, A. J., Souza Falcão, N. P., & Higuchi, N. (2023). Soil compaction in skid trails still affects topsoil recovery 28 years after logging in Central Amazonia. *Geoderma*, 434, 116473. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116473>
- Deljouei, A., Abdi, E., Marcantonio, M., Majnounian, B., Amici, V., & Sohrabi, H. (2017). The impact of forest roads on understory plant diversity in temperate hornbeam-beech forests of Northern Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(7), 329. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6105-1>
- Ezzati, S., & Najafi, A. (2011). Effects of 20 years of land logging on physical and hydrological properties of soil (Case study: Forests of Neka-Zalemroud basin, eastern Mazandaran). *Journal of Agricultural Sciences and Technologies and Natural Resources, Water and Soil Sciences*, 16(61), 261–272. (In Persian) <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-2444-en.html>
- Ezzati, S., Najafi, A., Rab, M. A., & Zenner, E. K. (2012). Recovery of soil bulk density, porosity and rutting from ground skidding over a 20-year period after timber harvesting in Iran. *Silva Fennica*, 46(4), 521–538. <https://doi.org/10.14214/sf.908>
- Wolff, M. G., Cockburn, J. J., De Wet, C., Bezerra, J. C., Weaver, M. J. T., Finca, A., De Vos, A., Ralekhetla, M. M., Libala, N., Mkabile, Q. B., Odume, O. N., & Palmer, C. G. (2019). Exploring and expanding transdisciplinary research for sustainable and just natural resource management. *Ecology and Society*, 24(4), Article 14. <https://doi.org/10.5751/ES-11077-240414>
- Greacen, E. L., & Sands, R. (1980). Compaction of forest soils: A review. *Australian Journal of Soil Research*, 18(2), 163–189. <https://doi.org/10.1071/SR9800163>
- Grigal, D. F. (2000). Effects of extensive forest management on soil productivity. *Forest Ecology and Management*, 138(1-3), 167–185. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00395-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00395-9)
- Horn, H. S. (1971). *The adaptive geometry of trees*. Princeton University Press.
- Jourgholami, M., Fathi, K., & Labelle, E. R. (2020). Effects of litter and straw mulch amendments on compacted soil properties and Caucasian alder (*Alnus subcordata*) growth. *New Forests*, 51, 349–365. <https://doi.org/10.1007/s11056-019-09738-5>
- Jourgholami, M., & Golej, M. (2013). Environmental effects of logging operations on apparent disturbance and soil permeability in Kheyroud forest. *Environmental Research*, 4(8), 55–64. (In Persian)
- Jourgholami, M., & Majnounian, B. (2010). Forest soil compaction and disturbance due to wood removal by rubber-wheeled skidder (Case study: Kheyroud Forest). *Iranian Journal of Forest*, 2(4), 288–298. (In Persian)
- Juerges, N., & Hansjürgens, B. (2018). Soil governance in the transition towards a sustainable bioeconomy: A review. *Journal of Cleaner Production*, 170, 1628–1639. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.143>
- Juliana, N., Lada, S., Chekima, B., & Abdul Adis, A. A. (2022). Exploring determinants shaping recycling behavior using an extended theory of planned behavior model: An empirical study of households in Sabah, Malaysia. *Sustainability*, 14(8), 4628. <https://doi.org/10.3390/su14084628>
- Kiumarsi, F., Jourgholami, M., Jafari, M., Lo Monaco, A., Venanzi, R., & Picchio, R. (2024). Restoring soil properties in the Hyrcanian forests from machine induced compaction: Reforestation of N2-

- fixing black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.). *Land Degradation & Development*, 35(6), 2084–2096. <https://doi.org/10.1002/ldr.5045>
- Labelle, E. R., Hansson, L., Högbom, L., Jourgholami, M., & Laschi, A. (2022). Strategies to mitigate the effects of soil physical disturbances caused by forest machinery: A comprehensive review. *Current Forestry Reports*, 8, 20–36. <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00155-6>
- Latterini, F., Venanzi, R., Papa, I., Duka, A., & Picchio, R. (2024). A meta-analysis to evaluate the reliability of depth-to-water maps in predicting areas particularly sensitive to machinery-induced soil disturbance. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 45(2), 433–444. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2024.2559>
- Martin, R., & Sanga, U. (2023). Participatory modelling: Participatory research methods for sustainability toolkit #6. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, 32(2), 230–232. <https://doi.org/10.14512/gaia.32.2.5>
- Marvie Mohadjer, M. R. (2006). *Silviculture*. University of Tehran Press. (In Persian)
- Miller, J. H., & Sirois, D. L. (1986). Soil disturbance by skyline yarding vs. skidding in a loamy hill forest. *Soil Science Society of America Journal*, 50(6), 1579–1583. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000060039x>
- Mills, J., Gaskell, P., Ingram, J., & Chaplin, S. (2018). Understanding farmers' motivations for providing unsubsidised environmental benefits. *Land Use Policy*, 76, 707–717. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.02.053>
- Naghdi, R., Pourbabaei, H., Heidari, M., & Nouri, M. (2014). Studying the effects of forest roads on vegetation and some physical and chemical properties of soil (Case study: Shafarud forests, series 2). *Iranian Forest Ecology*, 2(3), 49–64. (In Persian)
- Naghdi, R., Solgi, A., Rahmani, P., & Tsioras, P. (2024). Influence of machine type, traffic intensity, and travel speed on selected soil physical properties during skidding operations. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 22(3), 727–740. <https://doi.org/10.22124/cjes.2024.7852>
- Picchio, R., Mederski, P. S., & Tavankar, F. (2020). How and how much, do harvesting activities affect forest soil, regeneration and stands? *Current Forestry Reports*, 6, 115–128. <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00113-8>
- Picchio, R., Venanzi, R., Tavankar, F., Luchenti, I., Iranparast Bodaghi, A., Latterini, F., Nikooy, M., Di Marzio, N., & Naghdi, R. (2019). Changes in soil parameters of forests after windstorms and timber extraction. *European Journal of Forest Research*, 138, 875–888. <https://doi.org/10.1007/s10342-019-01210-5>
- Rab, M. A. (2004). Recovery of soil physical properties from compaction and soil profile disturbance caused by logging of native forest in Victorian Central Highlands, Australia. *Forest Ecology and Management*, 191(1-3), 329–340. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.12.010>
- Sayadi, M., & Shariatyniya, L. (2024). Identification of effective components in natural resource governance: A case study of Rudan County. *Natural Resources Governance*, 1(3), 267–284. (In Persian) <https://doi.org/10.22059/jnrg.2024.385043.1024>
- Schaal, J., Neef, N., & Otto, S. (2026). Mapping soil knowledge: A qualitative comparison of laypeople's understanding of soil and expert-identified essentials in Germany. *Journal for Nature Conservation*, 89, 127079. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2025.127079>
- Shirvani, Z., Rezaei, R., & Safa, L. (2025). Soil's sustainable governance: The role of the Value-Identity-Personal Norm model in explaining Zanjan County farmers' behavioural intention. *Natural Resources Governance*, 2(2), 207–220. (In Persian) <https://doi.org/10.22059/jnrg.2025.402014.1054>
- Sohrabi, H., Jourgholami, M., & Jafari, M. (2019). Evaluation of changes in physical, chemical and biological characteristics of soil 25 years after logging operations in Khairud forest. *Forest and Wood Products*, 73(4), 415–426. (In Persian) <https://doi.org/10.22059/jfw.2020.294831.1054>
- Sohrabi, H., Jourgholami, M., Majnounian, B., Zahedi Amiri, Q., & Ezzati, S. (2015). Evaluation of long-term recovery of bulk density, porosity and resistance to soil infiltration 20 years after logging operations in Khairud forest. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 23(3), 536–548. (In Persian) <https://doi.org/10.22092/ijfpr.2015.105658>

- Sohrabi, H., Jourgholami, M., Tavankar, F., Venanzi, R., & Picchio, R. (2019). Post-harvest evaluation of soil physical properties and natural regeneration growth in steep-slope terrains. *Forests*, 10(11), 1034. <https://doi.org/10.3390/f10111034>
- Solgi, A., & Najafi, A. (2014). The impacts of ground-based logging equipment on forest soil. *Journal of Forest Science*, 60(1), 28–34. <https://doi.org/10.17221/76/2013-JFS>
- Tavankar, F., Nikooy, M., Ezzati, S., Jourgholami, M., Latterini, F., Venanzi, R., & Picchio, R. (2022). Long-term assessment of soil physicochemical properties and seedlings establishment after skidding operations in mountainous mixed hardwoods. *European Journal of Forest Research*, 141, 571–585. <https://doi.org/10.1007/s10342-022-01461-9>
- Wei, L., Villemey, A., Hulin, F., Bilger, I., Yann, D., Chevalier, R., Archaux, F., & Gosselin, F. (2015). Plant diversity on skid trails in oak high forests: A matter of disturbance, micro-environmental conditions or forest age? *Forest Ecology and Management*, 338, 20–31. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.018>