

Research Paper

The effect of skid trail designs on the recovery of soil physical properties

Ali Ganji Vatan¹, Sättar Ezzati^{*2}, Farzam Tavankar³, and Ramin Rahmani⁴

1- MSc. Student, Department of Forestry, Faculty of Forest Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I. R. Iran. (ganjali283@gmail.com)

2,*- (Corresponding author) Assistant Professor, Department of Forestry, Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I. R. Iran. (sattar.ezzati@gau.ac.ir)

3- Associate Professor, Department of Forestry, Khalkhal Branch, Islamic Azad University, Khalkhal, I. R. Iran. (tavankar@aukh.ac.ir)

4- Professor, Department of Forestry, Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I. R. Iran. (rahmani@gau.ac.ir)

Received: 15 February 2025

Accepted: 14 May 2025

Extended Abstract

Background and Objective: Skid trail design, or the secondary forest road network, is usually carried out prior to tree-felling operations, with an emphasis on creating straight alignments that minimize damage to standing trees. However, in mountainous and steep forest terrains, skid trails often include numerous bends and curves due to topographic constraints. This significantly increases damage to residual trees along the trail margins, forest regeneration, soil properties, and their long-term recovery. The objective of this study was to evaluate the effect of skid trail design type, straight versus curved, on the recovery of degraded soil physical properties in abandoned skid trails after 15- and 30-years following ground-based logging operations.

Material and Methods: The study was conducted in the Kouhmiyan Forest District, Azadshahr, Golestan Province. Soil physical properties including bulk density, moisture content, macroporosity, total porosity, and penetration resistance were measured from abandoned skid trails. Two trails with ages of 15 and 30 years since logging were selected from adjacent compartments. Within each trail, two design types (straight and curved) and three traffic intensities (low, medium, and high) were distinguished. For each treatment, a 40 m² sample plot was established, subdivided into transects, and random soil samples were collected. Bulk density was measured at 0–10 cm depth using metal cylinders. In total, 90 soil samples were collected and compared with undisturbed control soils.

Results: Results showed that with increasing traffic intensity, both bulk density and penetration resistance increased. After 15 years, bulk density in heavily trafficked trails remained 27% higher and penetration resistance 116% higher than the control soils, while after 30 years these values not only failed to fully recover but exceeded control levels by 14% and 53%, respectively. After 15 years, soil moisture was 30% lower, macroporosity 24% lower, and total porosity 16% lower than the control. By year 30, soil moisture was 7% higher, while macroporosity and total porosity remained 18% and 12% lower than the control. Partial recovery of porosity, moisture, and bulk density was observed under low and medium traffic after 15 years; however, penetration resistance showed no recovery in any treatment and requires more than 30 years for full restoration. Straight trails caused less soil degradation compared to curved ones. In 15-year-old straight trails, bulk

density was 9% higher, penetration resistance 56% higher, while macroporosity, total porosity, and moisture were 16%, 11%, and 19% lower than control soils. In contrast, in 30-year-old curved trails, bulk density and penetration resistance remained 6% and 88% higher than controls, while macroporosity and total porosity were still 12% and 3% lower with soil moisture 7% higher.

Conclusion: To minimize soil degradation and enhance long-term recovery of soil physical properties, protective measures such as using straight skid trails and applying slash in high-traffic areas are recommended. Careful design of permanent and straight skid trails is essential to reduce soil damage, while restorative practices such as surface scarification and spreading logging residues can help mitigate impacts and accelerate recovery of soil physical properties on skid trails.

Keywords: Timber harvesting, Slope gradients, Forest management, Penetration resistance, Bulk density.

How to Cite This Article: Ganji Vatan, A., Ezzati, S., Tavankar, F., and Rahmani, R. (2025). The effect of skid trail designs on the recovery of soil physical properties. *Forest Research and Development*, 11(2), 205-222. DOI: [10.30466/jfrd.2025.55964.1754](https://doi.org/10.30466/jfrd.2025.55964.1754)



Copyright ©2024 Ganji Vatan 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 طراحی مسیرهای چوبکشی بر بازیابی ویژگی‌های فیزیکی خاک

علی گنجی وطن^۱، ستار عزتی^{۲*}، فرزام توانکار^۳ و رامین رحمانی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

(ganjali283@gmail.com)

۲- استادیار، گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. (sattar.ezzati@gau.ac.ir)

۳- دانشیار، گروه جنگلداری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خلخال، خلخال، ایران. (tavankar@aukh.ac.ir)

۴- استاد، گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. (rahmani@gau.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۷

چکیده

مقدمه و هدف: طراحی مسیرهای چوبکشی، یا شبکه ریزبافت جنگل، عموماً قبل از عملیات قطع درختان نشانه‌گذاری شده در جنگل انجام می‌شود و در این طراحی تلاش بر این است که این مسیرها تا حد امکان مستقیم بوده و در طراحی خط پروژه آن آسیب کمتری به درختان سرپای توده وارد شود. اما در جنگل‌های کوهستانی و شیب‌دار به دلیل وضعیت خاص شرایط عرصه، مسیرهای چوبکشی عمدتاً همراه با قوس و پیچ‌های بزرگ و کوچک است. این امر بر روی شدت آسیب به درختان حاشیه مسیرهای چوبکشی، تجدیدحیات پیش‌بجای جنگل، خاک و بازیابی طولانی مدت آن تأثیر منفی دارد. هدف این بررسی، بررسی تأثیر نوع طراحی مسیرهای چوبکشی شامل مسیرهای مستقیم و قوس‌دار بر روی زمان بازیابی ویژگی‌های فیزیکی خاک تخریب‌شده در مسیرهای چوبکشی رهاشده پس از گذشت ۱۵ و ۳۰ سال از اجرای فعالیت‌های چوبکشی زمینی است.

مواد و روش‌ها: این بررسی در جنگل‌های حوزه کوه‌میان آزادشهر در استان گلستان انجام و ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل وزن مخصوص ظاهری، درصد رطوبت، تخلخل درشت‌دانه، تخلخل کل و مقاومت به نفوذ با تهیه نمونه خاک از مسیرهای چوبکشی رها شده اندازه‌گیری شد. بدین منظور، از بین مسیرهای موجود در سطح پارس‌ل، دو مسیر چوبکشی از دو پارس‌ل نزدیک بهم با سن ۱۵ و ۳۰ سال از اجرای فعالیت‌های چوبکشی انتخاب شد. در هر مسیر، دو کلاس طراحی (مسیر مستقیم و قوس‌دار) و سه شدت رفت و آمد (کم، متوسط و شدید) تفکیک شد. در هر تیمار یک قطعه نمونه ۴۰ مترمربعی از بین سه قطعه نمونه طراحی شده با طول ۱۰ متر و عرض چهار متر (عرض مسیر) انتخاب و پنج خط نمونه اندازه‌گیری بافاصله دو متر از هم جدا و سپس به‌طور تصادفی سه خط نمونه برداشت شد. نمونه‌ها برای اندازه‌گیری وزن

مخصوص ظاهری از عمق صفر-۱۰ سانتی متر با استفاده از سیلندرهای فلزی انجام شد. درمجموع ۹۰ نمونه خاک از مسیرهای چوبکشی برداشت و برای بررسی بازایی ویژگی های فیزیکی در مقایسه با خاک منطقه شاهد برداشت شد.

یافته ها: نتایج نشان داد که با افزایش شدت تردد، وزن مخصوص ظاهری و مقاومت به نفوذ روند افزایشی داشته است. طوری که پس از گذشت ۱۵ سال، وزن مخصوص ظاهری در تردد شدید هنوز ۲۷ درصد و مقاومت به نفوذ ۱۱۶ درصد بیشتر از خاک منطقه شاهد بوده است. این درحالی است که این مشخصات پس از گذشت ۳۰ سال نه تنها به آستانه بازایی رسیده، بلکه ۱۴ و ۵۳ درصد به ترتیب بیشتر از منطقه شاهد بوده است. پس از گذشت ۱۵ سال، رطوبت خاک ۳۰ درصد، تخلخل درشت دانه ۲۴ درصد، مجموع تخلخل ۱۶ درصد کمتر از منطقه شاهد بوده است. حال آنکه پس از گذشت ۳۰ سال مقدار تغییرات این ویژگی های به ترتیب هفت درصد بیشتر، ۱۸ درصد کمتر و ۱۲ درصد کمتر از منطقه شاهد بوده است. بازایی جزئی برای تخلخل درشت دانه، مجموع تخلخل، رطوبت و وزن مخصوص ظاهری در تردد کم و متوسط بعد از ۱۵ سال مشاهده شد، حال آنکه مقاومت به نفوذ در هیچ یک از تیمارها بازایی نشده و به زمانی بیشتر از ۳۰ سال برای بازایی کامل نیاز دارد. مسیرهای مستقیم تخریب خاک کمتری را در مقایسه با مسیرهای مارپیچی از خود نشان دادند. در مسیرهای مستقیم با سن ۱۵ سال، وزن مخصوص ظاهری نه درصد بیشتر، مقاومت به نفوذ ۵۶ درصد بیشتر، تخلخل درشت دانه، مجموع تخلخل و رطوبت خاک ۱۶، ۱۱ و ۱۹ درصد به ترتیب کمتر از منطقه شاهد بوده است. حال آنکه در مسیرهای مارپیچ با سن ۳۰ سال وزن مخصوص ظاهری و مقاومت به نفوذ به ترتیب شش و ۸۸ درصد هنوز بیشتر از منطقه شاهد است. همچنین درصد تغییرات تخلخل درشت دانه و مجموع تخلخل به ترتیب ۱۲، سه درصد کمتر و رطوبت خاک به اندازه هفت درصد بیشتر از منطقه شاهد بوده است.

نتیجه گیری: برای کاهش تخریب خاک و افزایش بازایی طولانی مدت ویژگی های فیزیکی خاک، اتخاذ تدابیر حفاظتی مانند استفاده از مسیرهای مستقیم و اضافه کردن سرشاخه درختان در مناطق با تردد شدید توصیه می شود. لازم است با طراحی دقیق مسیرهای چوبکشی، استفاده از مسیرهای دائمی و مستقیم برای کاهش شدت خسارت الزامی شود. از طرفی عملیات احیایی مانند خراش سطحی و پراکنده کردن سرشاخه درختان برداشت شده بر روی مسیرهای چوبکشی می تواند به کاهش شدت تخریب و تسریع در بازایی ویژگی های فیزیکی خاک در این مسیرها کمک کند.

واژه های کلیدی: بهره برداری جنگل، شیب طولی، مدیریت جنگل، مقاومت به نفوذ، وزن مخصوص ظاهری.

نحوه طراحی مسیرهای چوبکشی (مستقیم بودن و یا دارای قوس در طول مسیر) است که هم منجر به بالا رفتن شدت و دامنه تخریب خاک می‌شود و هم برگشت‌پذیری خاک تخریب‌شده را ممکن است تا سالیان طولانی به تعویق بیاندازد. اگرچه تأثیر ویژگی‌های فنی مسیرهای چوبکشی در بررسی‌های زیادی (Naghdi et al., 2020; Sohrabi et al., 2020) بررسی شده اما تأثیر نحوه طراحی مسیرهای چوبکشی بر روی برگشت‌پذیری ویژگی‌های فیزیکی خاک در مناطق جنگلی کمتر مسبوق به سابقه است و چنین بررسی‌هایی در جنگل‌های شمال ایران گزارش نشده است. (Naghdi et al., 2019) به بررسی صدمات بهره‌برداری به درختان حاشیه مسیرهای چوبکشی در مسیرهای مستقیم و دارای قوس در جنگل‌های حوزه نصار رود مازندران پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با کاهش شعاع پیچ و قوس‌ها در طول مسیر چوبکشی، شدت خسارت به درختان حاشیه افزایش یافت. (Tavankar et al., 2022) در بررسی ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک پس از گذشت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سال از اجرای عملیات چوبکشی در جنگل‌های شرق هیرکانی نشان دادند که با افزایش شدت تردد و شیب طولی مسیرهای چوبکشی، فرایند بازیابی خاک زمان طولانی‌تری را به خود اختصاص داده بود. همچنین (Picchio et al., 2022) در بررسی‌های خود به این نتیجه رسیدند که افزایش وزن مخصوص ظاهری و کاهش تخلخل‌های خاک منجر به کاهش نفوذ عمقی ریشه پوشش گیاهان شده بود. ضمن اینکه، فشردگی خاک منجر به کاهش عناصر غذایی، سفت شدن خاک سطحی و در نهایت رواناب سطحی بر روی مسیر چوبکشی می‌شود (Drewry et al., 2021). بازیابی خاک‌های تخریب‌شده جنگلی در نبود تیمارهای اصلاح‌کننده طبیعی مانند

سیستم چوبکشی زمینی در جنگل‌های شمال کشور، به دلیل محدودیت وسعت و حجم کلی کار، و نیز نبود تکنولوژی و متخصصین کافی در استفاده از سیستم‌های کابلی، همچنین وجود شیب و مشکل در استفاده از سیستم‌های مکانیزه مانند فرورادر، به روشی اقتصادی و بی‌جایگزین تبدیل شده است. استفاده از دواب نیز همواره به عنوان یک روش جایگزین در عرصه‌هایی که امکان دسترسی به سیستم موتوری (اسکیدرهای چوبکشی یا تراکتور) نبوده و حجم مقطوعات کم و مقطوعات مستحصل شده به دور از شبکه دسترسی است، مطرح است. استفاده از تجهیزات موتوری با وزن ناخالص ۱۰-۲۰ تن منجر به تأثیرگذاری خاک عرصه جنگل، درختان سرپا و تجدید حیات پیش‌بجا می‌شود (Labelle et al., 2019; Hashemi et al., 2021; Solgi et al., 2023). در این میان خاک جنگل یکی از مهم‌ترین مؤلفه بوم‌سازگان‌های جنگلی است که تردد ماشین‌آلات با فشرده کردن و اختلاط خاک با لایه لاشبرگ و کنار زدن آن‌ها از روی لایه سطحی خاک مسیرهای چوبکشی، منجر به ایجاد خسارت جدی می‌شود، به‌طوری‌که این تأثیرات در مسیرهای چوبکشی رهاسده که دیگر مورد استفاده مجدد قرار نمی‌گیرد می‌تواند تا سال‌ها پس از عملیات چوبکشی زمینی پابرجا باشد. شدت این خسارات بسته به سطح تردد، شیب طولی مسیر، درصد رطوبت خاک حین عملیات، به‌منظور چوبکشی، جهت چوبکشی و ... متفاوت بوده و توسط پژوهشگران زیادی در داخل و خارج کشور بررسی شده است (Toivio et al., 2017; Lotfalian et al., 2018; DeArmond et al., 2019; Solgi et al., 2023). علاوه بر ویژگی‌های فنی مسیرهای چوبکشی (شیب و شدت تردد)، یکی از عوامل تأثیرگذار بر شدت و وسعت خسارت عملیات چوبکشی بر روی خاک،

تغییر در شرایط میکروکلیمای منطقه (سرد و گرم شدن- های و یخ بستن و باز شدن متوالی)، ایجاد حفراتی طبیعی در اثر ریشه دوانی و فعالیت موجودات خاکزی خاک (موریانه، سوسک‌ها و کرم‌های خاکی)، بسیار کند و نیازمند چندین دهه زمان است (Kozlowski, 1999; Sveistrup et al., 2005). به عنوان مثال، مدت زمان بازیابی فشردگی لایه سطحی خاک (کمتر از ۲۰ سانتی- متر) ممکن است زمان ۱۰-۳۰ سال را به خود اختصاص دهد (Mohieddinne et al., 2019)، درحالی‌که برای بازیابی کوبیدگی لایه‌های تحتانی خاک (بیشتر از ۲۰ سانتی‌متر) این زمان طولانی‌تر و بین ۵۰ تا ۱۰۰ سال اعلام شده است (Greacen & Sand, 1980). پژوهش Rab (2004) در جنگل‌های شرق گپسلند، استرالیا نشان داد که ۲۵ سال بعد از عملیات بهره‌برداری وزن مخصوص ظاهری در مسیرهای چوبکشی و دپو در مقایسه با ناحیه شاهد بازیابی نشده بود. (Salehi et al., 2012) در بررسی‌های خود در سری یک جنگل ناو اسالم به این نتیجه رسیدند که وزن مخصوص ظاهری، تخلخل، درصد رطوبت اشباع و بافت خاک در مسیرهای چوبکشی با قدمت ۱۱ سال با خاک جنگل طبیعی اختلاف معنی‌داری دارد. Abdi et al. (2017) طی پژوهش خود به بررسی اثرات ناشی از چوبکشی زمینی بر خاک جنگل در جنگل‌های کوهمیان آزادشهر پرداختند. نتایج آن‌ها ارتباط خطی و معکوس بین نفوذپذیری و کوبیدگی خاک را تأیید کرد. Mohieddinne et al. (2019) در پژوهش خود به بررسی بازیابی فشردگی خاک با استفاده از شاخص مقاومت به نفوذ پرداخت، نتایج آن‌ها نشان داد که بازیابی کامل احتیاج به زمان ۵۰-۷۰ سال بسته به نوع بافت خاک متغیر است. آن‌ها همچنین زمان بازیابی را برای خاک‌های با بافت ماسه‌ای کمتر از ۲۰ سال اعلام کردند. Masumian et al. (2024) به بررسی بازیابی ویژگی‌های فیزیکی خاک تخریب‌شده چهار مسیر چوبکشی بافاصله زمانی یک، پنج، ۱۰ و ۲۰ سال پس از عملیات چوبکشی زمینی در سه شدت تردد و دو کلاسه شیب در جنگل‌های شانرود استان گیلان پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش شدت تردد، مقدار بازیابی ویژگی‌های فیزیکی خاک روند کاهش معنی‌داری داشت، طوری که پس از گذشت زمان ۲۰ سال وزن مخصوص ظاهری و تخلخل درشت‌دانه و مجموع تخلخل هنوز بازیابی نشده بودند. DeArmond et al. (2019) در جنگل‌های استوایی برزیل نشان دادند که اگرچه بازیابی جزئی در ویژگی‌های فیزیکی خاک (وزن مخصوص ظاهری، نفوذپذیری در لایه‌های سطحی) در مسیرهای با شدت تردد پایین پس از گذشت ۲۴ سال به وجود آمده بود اما بازیابی کامل این ویژگی‌های به زمان بیشتر از ۳۰ سال نیاز دارد. مرور سوابق بررسی ارائه‌شده در بالا نشان می‌دهد در خصوص بررسی روند بازیابی خاک تخریب‌شده مسیر چوبکشی پس از فعالیت‌های بهره‌برداری با در نظر گرفتن ویژگی‌های فنی مسیرهای چوبکشی (شیب و شدت تردد) در سال‌های پس از عملیات بهره‌برداری تا ۲۰ سال با فواصل زمانی پنج سال بررسی‌های زیادی انجام شده است (Ezzati & Najafi, 2010; DeArmond et al., 2019)، اما تأثیر نوع طراحی مسیرهای چوبکشی کمتر بررسی شده است. از این‌رو، این پژوهش به دنبال بررسی خواص فیزیکی خاک (وزن مخصوص، رطوبت خاک و تخلخل خاک)، در مقایسه با منطقه شاهد در سطوح مختلفی از تیمارهای شدت ترافیک، سن و نحوه طراحی مسیر چوبکشی در طی دو دوره ۱۵ و ۳۰ سال پس از توقف فعالیت‌های بهره‌برداری است.

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش

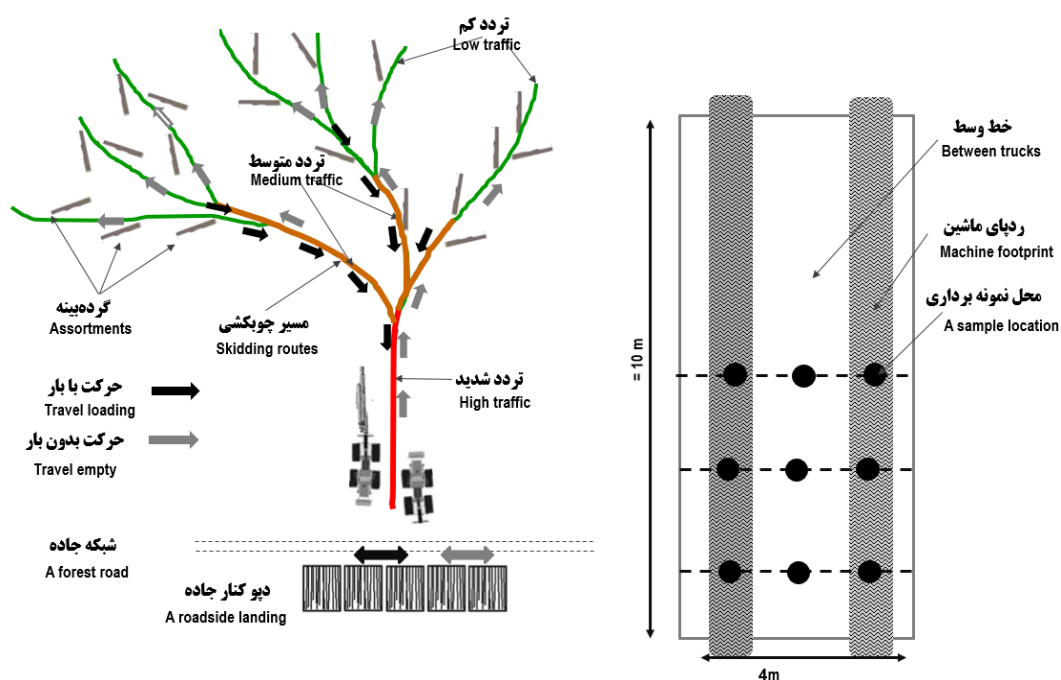
محدوده این بررسی، طرح جنگلداری کوهمیان در حوزه آبخیز ۸۹ در شهرستان آزادشهر در عرض جغرافیایی ۱۵° و ۵۶' و ۳۷° الی ۰۰' و ۳۷° و طول جغرافیایی ۴۹° و ۱۴' و ۵۵° الی ۳۰' و ۵۵° در استان گلستان است. متوسط بارندگی سالیانه ۸۰۹ میلی‌متر و کمینه بارندگی ۳۳ میلی‌متر در تیرماه است و بیشینه درجه حرارت ۲۲ و حداقل هشت درجه سانتی‌گراد است (Kuhmian Forestry Booklet, 2011). عمق خاک پارسل‌های مورد پژوهش به نسبت عمیق حدود ۹۸ سانتی‌متر با نفوذپذیری متوسط بوده است. ارتفاع از سطح دریا بین ۷۰۰ تا ۱۳۵۰ متر متغیر بوده است. در این پژوهش، دو مسیر چوبکشی رها شده با سن ۱۵ و ۳۰ سال پس از اجرای عملیات چوبکشی زمینی مورد بررسی واقع شد. این مسیر در پارسل‌های سه و چهار از طرح جنگلداری کوهمیان قرار دارد. پوشش گیاهی پارسل‌های مورد بررسی درختان پهن‌برگ مخلوط شامل ممرز (*Carpinus betulus* L)، بلوط (*Quercus castanifolia* C.A)، توسکا (*Alnus subcordata*)، افرا پلت (*Acer velutinum*)، افرا شیردار (*Acer cappadocicum*) است. طول مسیرهای چوبکشی در مسیر ۱۵ و ۳۰ سال به ترتیب ۸۸۱ متر و ۹۵۷ متر بوده است. نوع ماشین مورد استفاده برای عملیات چوبکشی اسکیدر تاف و نوع محصولات خارج شده گرده‌بینه کوتاه بوده است.

شیوه اجرای پژوهش

برای ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی خاک، دو مسیر چوبکشی با سن ۱۵ و ۳۰ سال از عملیات چوبکشی زمینی در منطقه مورد پژوهش انتخاب شد. ابتدا بر اساس فاصله از دیو و شاخه‌های مسیر، سه شدت ترافیک کم، متوسط و زیاد تفکیک شد (Sohrabi et al., 2020). به عنوان مثال، ۲۰۰-۳۰۰ متر مسیر چوبکشی

نزدیک به محل دیو و خروجی پارسل که بیشترین تردد را دارد به عنوان تیمار تردد زیاد در نظر گرفته شد (شکل ۱: رنگ قرمز). ۲۰۰-۳۰۰ متر انتهای مسیر چوبکشی (در داخل عمق جنگل) به عنوان تیمار تردد کم انتخاب شد (شکل ۱: رنگ سبز)، ۲۰۰-۳۰۰ متر وسط مسیر هم به عنوان تیمار تردد متوسط انتخاب شد (شکل ۱: رنگ قهوه‌ای). در هر شدت تردد دو کلاس مسیر مستقیم و مسیر دارای قوس جدا شد (Naghd et al. 2019). در هر تیمار سه قطعه نمونه طراحی و یکی از آنها با طول ۱۰ متر و عرض چهار متر (عرض مسیر) انتخاب شد، در هر قطعه نمونه ۴۰ مترمربعی، پنج خط نمونه اندازه‌گیری با فاصله دو متر از هم جدا و سپس به طور تصادفی سه خط نمونه برداشت شد (شکل ۱: سمت راست). نمونه‌ها برای اندازه‌گیری وزن مخصوص از عمق صفر-۱۰ سانتی‌متر با استفاده از سیلندرهای فلزی با قطر داخلی پنج و طول ۱۰ سانتی‌متر به دلیل تأثیرپذیری زیاد این افق از عملیات چوبکشی انجام شد (Solgi et al., 2023). نمونه‌های برداشت شده به آزمایشگاه منتقل و پس از اندازه‌گیری وزن تر آن‌ها با قرار دادن در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت وزن خشک آن‌ها تعیین شد. رطوبت خاک با دستگاه رطوبت‌سنج پرتابل در هر تیمار اندازه‌گیری شد. نمونه‌برداری ویژگی‌های فیزیکی خاک در تیر و مرداد ۱۴۰۲ به دلیل پایین بودن رطوبت هوا و ایجاد شرایط یکسان برای نمونه‌گیری انجام شد. به فاصله ۴۰-۵۰ متر از مسیرهای چوبکشی در هر تیمار شدت تردد سه نمونه شاهد گرفته شد تا نمونه‌های گرفته شده در مسیرهای چوبکشی با آن مقایسه و از این نظر روند بازیابی ویژگی‌های فیزیکی خاک بررسی شود. لازم به توضیح است که در هر مسیر ۳۶ نمونه با نه نمونه شاهد و در مجموع برای دو سن مسیر چوبکشی ۹۰ نمونه خاک از عرصه برداشت شد. بافت خاک در مسیر ۱۵

سال سیلت-لومی در مسیر ۳۰ سال رسی-سیلانی تعیین شد.



شکل ۱- شمای کلی از نمونه برداری در عرصه و موقعیت قطعات نمونه

Figure 2. General flowchart of the sampling strategy and the location of samples

برای اندازه گیری وزن مخصوص ظاهری و پترومتر دستی را نشان می دهد.

اندازه گیری نفوذپذیری خاک به تعداد سه نمونه در هر تیمار و سه تکرار با استفاده از پترومتر دستی انجام شد (Labelle et al., 2019). شکل ۲ سیلندر فلزی



شکل ۲- دستگاه پترومتر دستی (چپ) و سیلندر استوانه ای برای نمونه برداری خاک (راست)

Figure 2. Manual penetrometer (left) and soil cylinder for soil sampling (right)

وزن مخصوص ظاهری بر اساس رابطه (۱)

محاسبه شد:

$$BD = \frac{M_s}{V_t} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه فوق BD وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)، M جرم خاک (گرم) و V حجم استوانه (سانتی‌متر مکعب) است. برای محاسبه تخلخل کل نیز از رابطه (۲) استفاده شد:

$$TP = \left[1 - \left(\frac{\rho_d}{2.65} \right) \right] \times 100 \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه TP تخلخل کل (درصد)، ρ_d وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)، وزن مخصوص حقیقی برابر با ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و VC حجم سیلندر نمونه‌گیری خاک (۲۰۶/۰۶ سانتی‌متر مکعب) است. درصد تخلخل ریزدانه از رابطه (۳) محاسبه شد:

$$MiP = \Phi_m \times \rho_d \quad \text{رابطه (۳)}$$

در رابطه بالا MiP تخلخل ریزدانه (درصد)، Φ_m بیانگر حجم آب در نمونه (درصد) و ρ_d وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب) است. همچنین تخلخل درشت از رابطه (۴) محاسبه شد:

$$MP = TP - MiP \quad \text{رابطه (۴)}$$

در این رابطه MP تخلخل درشت‌دانه (درصد)، TP تخلخل کل (درصد) و MiP تخلخل ریزدانه (درصد) است. پس از گردآوری اطلاعات، تحلیل آماری در نرم‌افزار SPSS انجام شد.

روش تجزیه و تحلیل

این بررسی در قالب طرح آماری بلوک‌های کاملاً تصادفی شامل سه بلوک (تردد، سن و موقعیت مسیر چوبکشی) تحت آزمایش فاکتوریل انجام شد. ابتدا نرمال بودن داده‌ها با آزمون کلموگراف-اسمیرنوف و همگنی واریانس‌ها با آزمون شاپیروویک انجام گرفت.

برای مقایسات آماری مانند بررسی اثرهای ساده و متقابل تیمارهای مورد بررسی بر روی ویژگی‌های فیزیکی خاک از آنالیز واریانس دوطرفه (MANOVA) استفاده و بررسی میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح اطمینان یک درصد و پنج درصد انجام شد.

نتایج

نتایج آنالیز واریانس مربوط به تأثیر متغیرهای مستقل شدت رفت و آمد و نوع طراحی و تأثیر متقابل آن‌ها بر مشخصات فیزیکی خاک شامل جرم مخصوص ظاهری، رطوبت، مقاومت به نفوذ، تخلخل کل و تخلخل درشت‌دانه در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج نشان داد که عامل رفت و آمد و سن بر تمام متغیرها اثر معنی‌دار داشته است. نوع طراحی، اثرهای دوگانه سن-نوع طراحی و رفت و آمد-نوع طراحی تنها بر روی متغیرهای وزن مخصوص ظاهری و مقاومت به نفوذ تأثیر معنی‌داری داشت.

تأثیر شدت رفت و آمد بر خصوصیات فیزیکی

در هر دو سن مسیر چوبکشی، با افزایش شدت تردد، وزن مخصوص ظاهری و مقاومت به نفوذ روند افزایشی مشاهده شد اما رطوبت خاک، تخلخل درشت‌دانه، مجموع تخلخل روند کاهشی را طی کرده است. رطوبت خاک در هر سه شدت تردد و هر دو سن مسیر چوبکشی فاقد اختلاف معنی‌دار با منطقه شاهد بوده است. وزن مخصوص ظاهری و مقاومت به نفوذ در سه تردد کم، متوسط و شدید، به‌استثنای مسیر ۳۰ سال، اختلاف معنی‌دار با منطقه شاهد دارد. تخلخل درشت‌دانه در مسیر ۱۵ سال در تردد کم و شدید هنوز بازیابی نشده، حال آنکه در تردد متوسط فاقد اختلاف معنی‌دار با منطقه شاهد است.

جدول ۱- تجزیه واریانس مربوط به متغیرهای فیزیکی خاک

Table 1. Analysis of variance relevant to physical soil properties

متغیر Variable	رطوبت (درصد) Moisture content (%)	جرم مخصوص ظاهری (گرم/سانتی متر مکعب) Bulk density (g cm ³)	مقاومت به نفوذ (مگا پاسکال) Penetration resistance (MPa)	تخلخل درشت دانه (درصد) Macroporosity (%)	تخلخل کل (درصد) Total porosity (%)
رفت و آمد Traffic	6.09**	9.48**	5.76**	10.08**	3.48*
سن Age	24.08**	33.42**	26.73**	30.22**	10.60**
نوع طراحی Design type	0.32 ^{ns}	14.30**	16.06**	0.16 ^{ns}	0.20 ^{ns}
سن × نوع طراحی Age×Design type	0.10 ^{ns}	2.60*	5.39**	0.11 ^{ns}	0.09 ^{ns}
رفت و آمد × نوع طراحی Traffic × Design type	0.08 ^{ns}	2.85*	6.17**	0.30 ^{ns}	0.10 ^{ns}

* معرف تفاوت معنی دار کمتر یا مساوی پنج درصد؛ ** معرف تفاوت معنی دار کمتر یا مساوی یک درصد؛ N.S. عدم وجود تفاوت معنی دار

* Significant differences at * $p<0.05$, ** $p<0.01$, N.S. non-significant difference

این درحالی است که مجموع تخلخل فقط در تردد شدید دارای اختلاف معنی دار با منطقه شاهد است و در دو تردد دیگر فاقد اختلاف معنی دار است. بعد از گذشت ۳۰ سال، وزن مخصوص ظاهری و مجموع تخلخل در تردد شدید هنوز دارای اختلاف معنی دار با منطقه شاهد است، اما در دو طبقه تردد دیگر اختلاف معنی دار مشاهده نمی شود. اگرچه در تردد کم و شدید،

مقاومت به نفوذ خاک باهم اختلاف معنی دار ندارند اما با منطقه شاهد اختلاف معنی دار در سطح یک درصد را از خود نشان می دهد. در مسیر ۳۰ سال، بین سه کلاس تردد تخلخل درشت دانه باهم اختلاف معنی دار ندارند، اما هر سه کلاس اختلاف معنی دار با منطقه شاهد از خود نشان می دهند.

جدول ۲- تأثیر شدت رفت و آمد بر روی خصوصیات فیزیکی خاک تخریب شده با استفاده از آزمون دانکن

Table 2. Effect of traffic intensity on disturbed physical soil properties using Duncan test

متغیر Variable	رطوبت (درصد) Moisture content (%)	جرم مخصوص ظاهری (گرم/سانتی متر مکعب) Bulk density (g cm ³)	مقاومت به نفوذ (مگا پاسکال) Infiltration resistance (MPa)	تخلخل درشت دانه (درصد) Macroporosity (%)	تخلخل کل (درصد) Total porosity (%)
مسیر با سن ۱۵ سال Skid trail age 15					
تردد کم Low traffic	29.16±3.14a	0.72±0.10c	3.1±0.5b	50.80±4.00b	71.80±5.17a

ادامه جدول ۲.

Continued table 2.

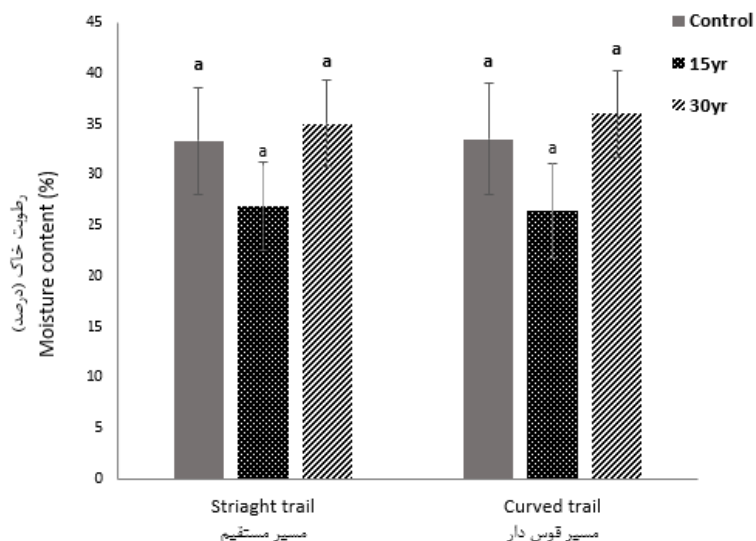
متغیر Variable	رطوبت (درصد) Moisture content (%)	جرم مخصوص ظاهری (گرم/سانتی مترمکعب) Bulk density (g cm ³)	مقاومت به نفوذ (مگا پاسکال) Infiltration resistance (MPa)	تخلخل درشت‌دانه (درصد) Macroporosity (%)	تخلخل کل (درصد) Total porosity (%)
مسیر با سن ۱۵ سال Skid trail age 15					
تردد متوسط Medium traffic	26.04±3.19a	0.77±0.07b	3.5±0.8b	46.60±4.11a	67.71±5.63a
تردد شدید High traffic	23.11±3.10a	0.84±0.07a	3.9±0.8a	41.90±4.39b	62.95±5.49b
شاهد Control	33.30±5.48a	0.66±0.05d	1.8±0.8c	55.47±5.10a	75.46±5.42a
مسیر با سن ۳۰ سال Skid trail age 30					
تردد کم Low traffic	36.83±3.05a	0.66±0.06b	2.4±0.9a	51.60±4.76b	76.52±5.12a
تردد متوسط Medium traffic	36.07±3.41a	0.7±0.06ab	2.5±0.8b	48.71±5.28b	73.73±5.44a
تردد شدید High traffic	35.74±3.16a	0.74±0.06a	2.6±0.8a	45.02±5.02b	70.62±5.70b
شاهد Control	33.19±5.31a	0.65±0.05b	1.7±0.8c	55.02±5.09a	80.62±5.03a

تأثیر نوع طراحی مسیر چوبکشی بر ویژگی‌های فیزیکی

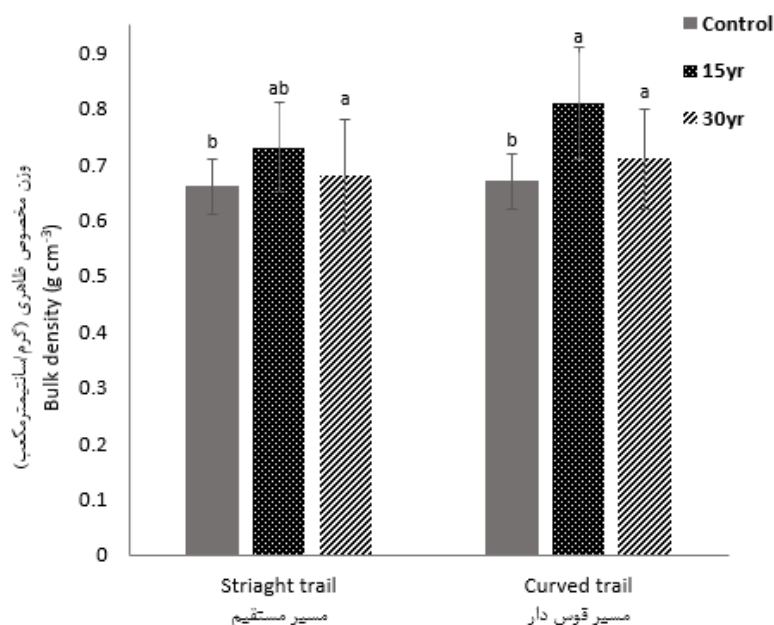
شکل ۳ تجزیه و تحلیل ویژگی‌های فیزیکی خاک در مسیرهای مستقیم و دارای قوس را در مسیر ۱۵ و ۳۰ سال نشان می‌دهد. درصد رطوبت خاک در هر دو مسیر مستقیم و قوس‌دار فاقد اختلاف معنی‌دار با منطقه شاهد است. در مسیر ۱۵ سال، اگرچه تفاوت معنی‌داری را با منطقه شاهد از خود نشان نمی‌دهد، اما درصد رطوبت در مسیر مستقیم به اندازه ۱۹ درصد و در مسیر قوس‌دار به اندازه ۲۱ درصد کمتر از منطقه شاهد است. این درصدها در مسیر ۳۰ سال به ترتیب اندازه پنج و هفت

درصد در مسیر مستقیم و قوس‌دار بیشتر از منطقه شاهد بوده است.

در مسیرهای مستقیم، وزن مخصوص ظاهری خاک در دو سن مسیر چوبکشی اختلاف معنی‌داری باهم ندارند، اما مسیر ۳۰ سال هنوز با منطقه شاهد اختلاف دارد (شکل ۴). در مسیر قوس‌دار، وزن مخصوص در هر دو سن مسیر چوبکشی نه تنها دارای اختلاف معنی‌دار با منطقه شاهد است، بلکه مقدار آن به اندازه ۳۷ درصد و ۲۱ درصد در مسیرهای چوبکشی با سن ۱۵ و ۳۰ سال بیشتر از منطقه شاهد است.



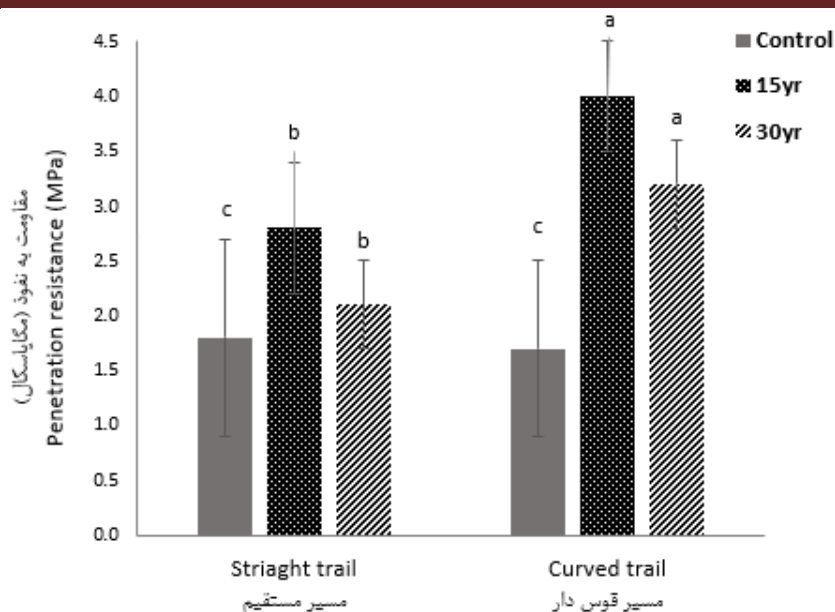
شکل ۳- تأثیر نوع طراحی مسیرهای چوبکشی بر رطوبت وزنی خاک
Figure 3. Effect of skid trail design on soil moisture content



شکل ۴- تأثیر نوع طراحی مسیرهای چوبکشی بر وزن مخصوص ظاهری خاک
Figure 4. Effect of skid trail design on soil bulk density

افزایش مقاومت به نفوذ در مسیر ۱۵ و ۳۰ سال به اندازه ۵۶ درصد و ۱۷ درصد نسبت به منطقه شاهد بوده است. حال آنکه این درصدها در مسیر قوس دار به ترتیب ۱۳۵ درصد و ۸۸ درصد پس از گذشت ۱۵ و ۳۰ سال بوده است.

با تغییر نوع طراحی مسیر چوبکشی، مقاومت به نفوذ خاک در مسیر ۱۵ سال نسبت به منطقه شاهد روند افزایشی داشته است (شکل ۵)، حال آنکه در هر دو نوع طراحی مسیر چوبکشی در سن ۱۵ و ۳۰ سال روند کاهشی مشاهده می شود. در مسیر مستقیم، درصد

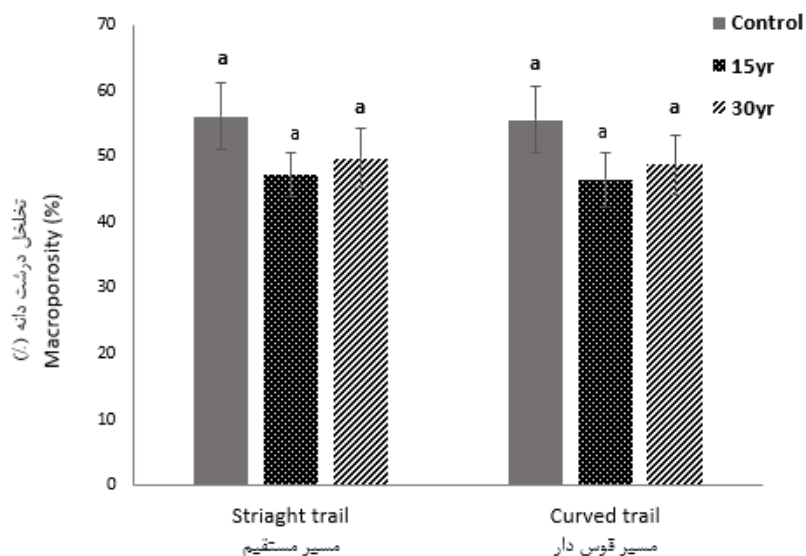


شکل ۵- تأثیر نوع طراحی مسیرهای چوبکشی بر مقاومت به نفوذ

Figure 5. Effect of skid trail design on penetration resistance

و ۱۱ درصد در مسیر ۱۵ و ۳۰ سال کمتر از منطقه شاهد است. این درصدها در مسیر قوس‌دار به اندازه ۱۶ درصد و ۱۲ درصد در مسیر ۱۵ و ۳۰ سال کمتر از منطقه شاهد است.

تخلخل‌های درشت‌دانه در هر دو مسیر مستقیم و مسیر قوس‌دار بازیابی شده و اختلاف معنی‌دار را با منطقه شاهد از خود نشان نمی‌دهد (شکل ۶). هرچند که در مسیر مستقیم مقدار آن هنوز به اندازه ۱۶ درصد

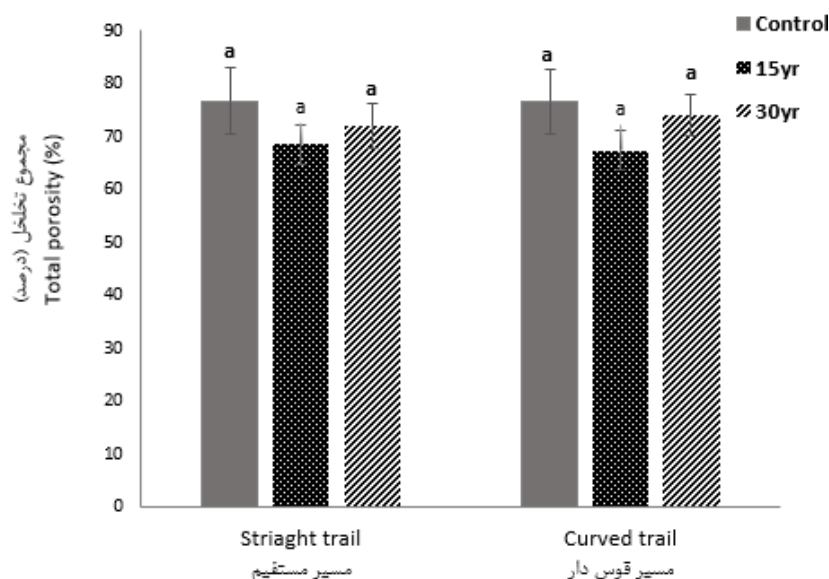


شکل ۶- تأثیر نوع طراحی مسیرهای چوبکشی بر تخلخل درشت‌دانه

Figure 6. Effect of skid trail design on macroporosity

شده، بلکه فاقد اختلاف معنی دار با منطقه شاهد دارد. هرچند که مقدار آن در مسیرهای مستقیم و مسیره‌های قوس دار به اندازه هشت درصد کمتر از منطقه شاهد است.

روندی مشابه تخلخل‌های درشت‌دانه، برای تخلخل کل (مجموع تخلخل‌های درشت‌دانه (محل نگهداری هوا) و ریزدانه (محل نگهداری آب)) مشاهده شد (شکل ۷). مقدار تخلخل کل خاک بعد از گذشت ۳۰ سال از فعالیت‌های چوبکشی زمینی نه تنها بازیابی



شکل ۷- تأثیر نوع طراحی مسیرهای چوبکشی بر مجموع تخلخل

Figure 7. Effect of skid trail design on total porosity

در این پژوهش، ویژگی‌های فیزیکی خاک مسیرهای چوبکشی با توجه به سه تیمار شدت رفت و آمد (کم، متوسط و شدید)، سن مسیرهای چوبکشی (۱۵ و ۳۰ سال) و نوع طراحی (مسیرهای مستقیم و دارای قوس) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش شدت تردد، وزن مخصوص ظاهری، مقاومت به نفوذ و رطوبت وزنی خاک روند افزایشی داشته اما تخلخل درشت‌دانه و مجموع تخلخل روند کاهشی را طی کرده است. تخلخل درشت‌دانه در مسیر ۱۵ سال در تردد کم و شدید هنوز بازیابی نشده، حال آنکه در تردد متوسط بازیابی جزئی حاصل شد، هرچند که مقدار آن به اندازه ۱۶ درصد از منطقه شاهد کمتر است. این بازیابی جزئی

بحث

تخریب ساختمان فیزیکی خاک در نتیجه شکل‌گیری مجدد ذرات و کاهش سهم تخلخل‌های خاک و پیوستگی آن‌ها در مسیرهای چوبکشی به دلیل تردد ماشین‌آلات و کشیدن گرده‌بین‌ها، از پیامدهای اجتناب‌ناپذیر عملیات چوبکشی زمینی در جنگل است که می‌تواند تا سال‌ها پس از توقف فعالیت‌های بهره‌برداری به قوت خود باقی بماند (Naghdi et al. 2020; Lotfalian et al. 2018). بخشی از این تخریب‌ها موقتی بوده مانند شیاری شدن، جابجایی خاک و لایه لاشبرگ و برخی دیگر مثل تغییر در ویژگی‌های فیزیکی (وزن مخصوص ظاهری، تخلخل‌های ریز و درشت‌دانه، نفوذپذیری و...) در مدت زمان طولانی بازیابی می‌شود.

ممکن است ناشی از بالا بودن درصد لاش‌ریزه درختان حاشیه بر روی مسیر چوبکشی، پایین بودن رطوبت خاک حین عملیات چوبکشی و فعالیت بیشتر موجودات خاکزی بوده است (Ezzati & Najafi, 2010; Sohrabi et al., 2020). لایه لاشبرگ موجود در سطح مسیر چوبکشی مانند یک بافر عمل کرده و با داشتن خاصیت ارتجاعی خود مانع ایجاد تخریب شدید در ساختمان فیزیکی خاک مانند افزایش کوبیدگی و تغییر در نظم تخلخل‌های خاک می‌شود (DeArmond et al., 2019). بعد از گذشت ۳۰ سال، وزن مخصوص ظاهری و مجموع تخلخل در تردد شدید هنوز بازیابی نشده و به زمانی بیشتر از ۳۰ سال نیاز دارد. مقاومت به نفوذ خاک هم در سه کلاس تردد و هم با منطقه شاهد دارای اختلاف معنی‌دار است و هنوز به آستانه بازیابی نرسیده است. نکته قابل توجه این است که میانگین وزن مخصوص ظاهری در سه شدت تردد کم، متوسط و زیاد بعد از گذشت ۱۵ سال، ۱۸ درصد و بعد از گذشت ۳۰ سال معادل هشت درصد بیشتر از منطقه شاهد بوده است، این درحالی است که مقادیر مقاومت به نفوذ در تیمارهای مشابه به ترتیب ۹۴ و ۴۷ درصد بوده است. به عبارت دیگر درصد افزایش مقاومت به نفوذ به نسبت وزن مخصوص ظاهری بعد از گذشت ۱۵ و ۳۰ سال به ترتیب سال معادل ۴۳۲ و ۵۱۱ درصد بوده است. افزایش مقاومت به نفوذ به نسبت وزن مخصوص ظاهری خاک در بررسی‌های (Moraes et al., 2017) پس از ۳۲ سال از عملیات چوبکشی زمینی در جنگل - های تروپیکال برزیل مطابقت دارد. آن‌ها اعلام کردند که دلیل عدم برگشت‌پذیری مقاومت به نفوذ خاک در مسیرهای چوبکشی، ناشی از پدیده سفت شدن خاک (Age-hardening) باگذشت زمان است. این فرایند ناشی از شکل‌گیری آرایش مجدد ذرات و یا سیمانی

شدن لایه‌های خاک ناشی از اعمال فشار و منتقل شدن آن به لایه‌های عمیق پروفیل خاک بوده (Dexter et al., 1978) که بیشتر در خاک‌های ریزدانه قابل مشاهده است. در خاک‌های ریزدانه، مثل منطقه مورد بررسی، ثبات خاکدانه‌های خاک عمدتاً ناشی از اکسیدهای آلومینیوم و آهن است و هنگام تخریب خاک به دلیل محبوس شدن رطوبت در منافذ درشت‌دانه به جای هوا، این اکسیدها منجر به افزایش چسبندگی بیشتر خاکدانه - های خاک می‌شود و در نهایت منجر به تأخیر افتادن برگشت‌پذیری نفوذپذیری خاک می‌شود (Moraes et al., 2017). مقدار مقاومت به نفوذ خاک نه تنها با افزایش شدت تردد، در هر دو سن مسیرهای چوبکشی روند افزایشی را داشته است، بلکه مقدار آن در مسیرهای قوس‌دار بیشتر از مسیرهای مستقیم بوده است. مقدار مقاومت به نفوذ خاک در مسیر ۱۵ سال در هر سه تردد بررسی شده بالای سه مگا پاسکال و در مسیرهای ۳۰ سال بالای ۲/۴ مگا پاسکال بوده است، حال آنکه در مسیر ۱۵ سال قوس‌دار به بیشترین مقدار خود یعنی چهار مگا پاسکال رسیده است. (Dexter et al., 1978). اعلام کرد که وقتی که مقاومت نفوذ خاک کمتر از ۳/۵ مگا پاسکال است، موجودات خاکزی مانند کرم‌های خاکی قابلیت فعالیت و نفوذ را در آن دارند، بنابراین، نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های (Lotfalian et al., 2019; DeArmond et al., 2018) مبنی بر عدم برگشت‌پذیری مقاومت به نفوذ خاک پس از گذشت زمان ۳۰ سال از فعالیت‌های چوبکشی زمینی مطابقت دارد. تغییر در ویژگی‌های فیزیکی خاک نه تنها با تغییر در شدت تردد و سن مسیرهای چوبکشی مشاهده شد، بلکه نوع طراحی مسیرهای چوبکشی هم در برگشت‌پذیری خصوصیات خاک مؤثر بوده است. در مسیرهای مستقیم با سن ۱۵ سال، درصد رطوبت وزنی

تبادلات گازی خاک با اتمسفر اثرگذار است (Mohieddinne et al., 2019). افزایش وزن مخصوص ظاهری خاک و به دنبال آن کاهش تخلخل‌های خاک سبب تأثیر منفی بر روی ریشه دوانی گیاهان و تأخیر در زمان بازیابی خاک می‌شود. این مسئله در نهایت توده جنگلی باقی‌مانده را به دلیل فقدان دسترسی به اکسیژن و کاهش آب‌وهوا در فضاهای خالی خاک، کاهش رشد و نیز حاصلخیزی خاک را به دنبال دارد (Zenner et al., 2007). هرچند که در پژوهش حاضر این موارد بررسی نشد و می‌تواند چراغ راه بررسی‌های بعدی قرار گیرد. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که ۳۰ سال پس از توقف فعالیت‌های چوبکشی در جنگل، مدت زمان کوتاه برای قضاوت در زمینه بازیابی مقاومت به نفوذ و وزن مخصوص ظاهری در مسیرهای با شدت تردد بالا و دارای قوس است. چنانکه (Mohieddinne et al., 2019) در پژوهش خود اعلام کردند که بسته به نوع بافت خاک زمان بازیابی فشردگی را برای خاک‌های پدوزول و لووی‌سول بین ۵۰-۷۰ سال اعلام کردند. بنابراین برای دستیابی به نتیجه قطعی در مورد زمان بازیابی مؤلفه‌های فیزیکی خاک باید بررسی‌های بیشتری به‌خصوص در جنگل‌های هیرکانی انجام شود تا با قاطعیت یک راهکار مدیریتی صحیح از جمله طراحی بهینه موقعیت مسیرهای چوبکشی قبل از اجرا با در نظر گرفتن شرایط عرصه و توده، محدود کردن تردد ماشین‌آلات در مسیرهای چوبکشی و استفاده از مسیرهای مستقیم به‌جای مسیرهای مارپیچ برای کنترل این تأثیرات به مجریان طرح‌های جنگلداری ارائه داد.

نتیجه‌گیری

باگذشت ۳۰ سال از اتمام فعالیت‌های چوبکشی زمینی، ویژگی‌های فیزیکی خاک در مسیرهای چوبکشی رهاشده در جنگل‌های هیرکانی شمال شرق ایران با توجه به سه تیمار شدت تردد، سن و موقعیت مسیرهای

خاک، وزن مخصوص ظاهری، تخلخل درشت‌دانه و مجموع تخلخل بازیابی شده و اختلاف معنی‌داری را با منطقه شاهد از خود نشان نمی‌دهند. حال‌آنکه در مسیرهای مارپیچ با سن ۳۰ سال، مجموع تخلخل، تخلخل درشت‌دانه و درصد رطوبت وزنی خاک بازیابی شده است، اما مقاومت به نفوذ و وزن مخصوص ظاهری خاک هنوز بازیابی نشده است. نتایج این پژوهش با یافته‌های (Sohrabi et al., 2019) پس از ۲۰ سال در جنگل‌های شمال ایران، (Mohieddinne et al., 2019) پس از ۲۳ سال در جنگل‌های شمال فرانسه (DeArmond et al., 2019) پس از گذشت ۳۰ سال از اجرای فعالیت‌های چوبکشی در جنگل‌های تروپیکال آمازون و پژوهش (Tavankar et al., 2022) پس از گذشت مدت زمان ۳۰ سال از اجرای فعالیت‌های چوبکشی در جنگل‌های گیلان مطابقت دارد. موردی که تعجب ما را برانگیخت، بازیابی وزن مخصوص ظاهری در مسیرهای مستقیم پس از گذشت زمان ۱۵ سال بود، این در حالی است که این عامل در مسیر ۳۰ سال هنوز بازیابی نشده است. این بازیابی جزئی هرچند که مقدار آن به‌اندازه ۱۱ درصد بیشتر از منطقه شاهد است ممکن است ناشی از پایین بودن رطوبت خاک حین عملیات، تجمع لایه لاشبرگ و فراهم شدن فعالیت موجودات خاکری (DeArmond et al., 2019) و تسریع در بازیابی خاک در این تیمارها بوده است. خاک مسیر چوبکشی در اثر فشردگی ناشی از تردد ماشین‌آلات سنگین چوبکشی دچار کاهش حجم شده و افزایش وزن مخصوص ظاهری آن به دلیل تغییر در آرایش دانه-بندی و کاهش خلل و فرج خاک می‌شود. در نهایت افزایش سهم تخلخل‌های ریزدانه و کاهش سهم تخلخل‌های درشت‌دانه، کاهش تهویه و فعالیت بیولوژیک خاک را به دنبال دارد (Kolka & Smidt, 2005; DeArmond et al., 2019) که این امر بر روی

مستقیم برای کاهش شدت خسارت الزامی است. از طرفی عملیات احیایی مانند خراش سطحی و پراکنده کردن سرشاخه مازاد مقطوعات بر روی مسیرهای چوبکشی نه تنها به کاهش شدت تخریب و تسریع در بازیابی ویژگی‌های فیزیکی خاک در این مسیرها کمک می‌کند بلکه می‌تواند شدت فرسایش و رواناب را در این مسیرها به حداقل ممکن برساند.

تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه/علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان از نویسنده اول در قالب پایان‌نامه دانشجویی با کد ۱۳۳۴۵۴۰۱ انجام شده است. همچنین بخشی از هزینه‌ها توسط بنیاد ملی نخبگان (طرح دکتر کاظم آشتیانی به شماره ۱۵/۲۸۲۸۴ مصوب خرداد ۱۴۰۲) اختصاص یافته به نویسنده دوم تأمین شده است.

References

- Abdi, E.; Moghadamirad, M.; Hayati, E.; Jaeger, D., Soil hydrophysical degradation associated with forest operations. *Forest Science and Technology*, **2017**, 13(4), 152-157.
- DeArmond, D.; Emmert, F.; Lima, A.J.N.; Higuchi, N., Impacts of soil compaction persist 30 years after logging operations in the Amazon Basin. *Soil and Tillage Research*, **2019**, 189, 207-216.
- Dexter, A.R., Tunnelling in soil by earthworms. **1978**, *Soil Biol. Biochem.* 10, 171-178.
- Drewry, J.J.; Cavanagh, J-AE.; McNeill, S.J.; Stevenson, B.A.; Gordon, D.A.; Taylor, M.D., Long-term monitoring of soil quality and trace elements to evaluate land use effects and temporal change in the Wellington region, New Zealand. *Geoderma Reg*, **2021**, e00383.
- Ezzati, S.; Najafi, A., Long-Term Impact Evaluation of Ground-Base Skidding on Residual Damaged Trees in the Hyrcanian Forest, Iran. *International Journal of Forestry Research* **2010**, 183735.

چوبکشی مورد بررسی واقع شد. مقایسه این ویژگی‌ها در شدت تردهای مختلف در طول مسیرهای چوبکشی نشان داد که رطوبت خاک، وزن مخصوص ظاهری و تخلخل کل (به‌استثنای تردد شدید) بازیابی شده بود، حال آنکه تخلخل درشت‌دانه و مقاومت به نفوذ نتوانسته بودند بازیابی شوند و مقادیر آن‌ها هنوز با منطقه شاهد اختلاف معنی‌دار دارد. از بین ویژگی‌های بررسی شده فقط رطوبت خاک نتوانسته بود در مدت زمان ۱۵ سال بازیابی شود. در مسیرهای مستقیم، رطوبت وزنی خاک، تخلخل درشت‌دانه و مجموع تخلخل بازیابی شده اما وزن مخصوص ظاهری و مقاومت به نفوذ در مسیرهای قوس‌دار بازیابی نشده و پس از گذشت ۳۰ سال هنوز به‌اندازه شش و ۸۸ درصد با منطقه شاهد اختلاف معنی‌دار دارند. لازم است با طراحی دقیق مسیرهای چوبکشی، استفاده از مسیرهای دائمی و مسیرهای

- Greacen, E.L.; Sands, R., Compaction of forest soils. A review. *Soil Research*, **1980**, 18(2), 163-189.
- Hashemi, M.; Nikooy, M.; Salehi, A.; Naghdi, R., Investigation of soil physical properties 11 years after water-bar construction on skid trail. *Forest Research and Development*, **2021**, 7(2), 169-182.
- Kolka, R.K.; Smidt, M.F., Effects of forest road amelioration techniques on soil bulk density, surface runoff, sediment transport, soil moisture and seedling growth. *Forest Ecology and Management*, 2004, **2005** (1-3), 313-323.
- Kozlowski, T.T., Soil compaction and growth of woody plants. *Scandinavian Journal of Forest Research*, **1999**, 14(6), 596-619.
- Labelle, E. R.; Poltorak, B.J.; Jaeger, D., The role of brush mats in mitigating machine-induced soil disturbances: an assessment using absolute and relative soil bulk density and penetration resistance. *Canadian Journal of Forest Research*, **2019**, 49(2), 164-178.
- Lotfalian, M.; Parsakho, A.; Sadeghi, M.; Nazariani, N., Comparison of soil compaction recovery methods on Skid Trails.

- Journal of Forest Research and Development* **2018**, 4 (1), 59-71.
- Masumian, A.; Rabiee, M.R.S.; Solgi, A.; Behjou, F.K.; Marchi, E.; Hájek, M.; Geraeli, H., Assessment of the impact of ground-based skidding on soil physical properties: initial effect and medium-term recovery. *International Journal of Forest Engineering*, **2024**, 35(2), 284-295.
- Mohieddinne, H.; Brasseur, B.; Spicher, F.; Gallet-Moron, E.; Buridant, J.; Kobaiissi, A.; Horen, H., Physical recovery of forest soil after compaction by heavy machines, revealed by penetration resistance over multiple decades. *Forest Ecology and Management*, **2019**, 449, 117472.
- Moraes, M.T.; Debiasi, H.; Carlesso, R.; Franchini, J.C.; Da Silva, V.R.; Da Luz, F.B., Age-hardening phenomena in an Oxisol from the subtropical region of Brazil. *Soil and Tillage Research*, **2017**, 170, 27-37.
- Naghdi, R.; Solgi, A.; Labelle, E.R.; Nikooy, M., Combined effects of soil texture and machine operating trail gradient on changes in forest soil physical properties during ground-based skidding. *Pedosphere*, **2020**, 30(4), 508-516.
- Naghdi, R.; Solgi, A.; Zenner, E.K.; Tsioras, P.A., Effect of skid trail curvature on residual tree damage. *Australian Forestry*, **2019**, 82(1), 1-8.
- Rab, M.A. 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*, **2004**, 191(1-3), 329-340.
- Salehi, A.; Taheri Abkenar, k.; Basiri, R., Study of the recovery soil physical properties and establishment of natural regeneration in skid trails (case study: Nav-E Asalem forests). *Journal of Iranian Forestry* **2012**, 317-329. (In Persian)
- Sohrabi, H.; Jourgholami, M.; Jafari, M.; Shabanian, N.; Venanzi, R.; Tavankar, F.; Picchio, R., Soil recovery assessment after timber harvesting based on the Sustainable Forest Operation (SFO) perspective in Iranian temperate forests. *Sustainability*, **2020**, 12(7), 2874.
- Sohrabi, H.; Jourgholami, M.; Tavankar, F.; Venanzi, R.; Picchio, R., Post-harvest evaluation of soil physical properties and natural regeneration growth in steep-slope terrains. *Forests*, **2019**, 10(11), 1034.
- Solgi, A.; Lotfalian, M.; Rafiei, A.; Marchi, E.; Ilstedt, U., Combined effects of traffic intensity, skid trail slope, skidder type, and soil moisture content on soil degradation in the Hyrcanian forest of Iran. *International Journal of Forest Engineering*, **2023**, 34(3), 385-396.
- Sveistrup, T.E.; Haraldsen, T.K.; Langohr, R.; Marcelino, V.; Kværner, J., Impact of land use and seasonal freezing on morphological and physical properties of silty Norwegian soils. *Soil and Tillage Research*, **2005**, 81(1), 39-56.
- Tavankar, F.; Nikooy, M.; Ezzati, S.; Jourgholami, M.; Latterini, F.; Venanzi, R.; Picchio, R., Long-term assessment of soil physicochemical properties and seedlings establishment after skidding operations in mountainous mixed hardwoods. *European Journal of Forest Research*, **2022**, 141(4):571-585.
- Toivio, J.; Helmisaari, H.S.; Palviainen, M.; Lindeman, H.; Ala-Ilomäki, J.; Sirén, M.; Uusitalo, J., Impacts of timber forwarding on physical properties of forest soils in southern Finland. *Forest Ecology and Management*, **2017**, 405, 22-30.
- Zenner, E.K.; Fauskee, J.T.; Berger, A.L.; Puettmann, K.J., Impacts of skidding traffic intensity on soil disturbance, soil recovery, and aspen regeneration in north central Minnesota. *Northern Journal of Applied Forestry*, **2007**, 24(3), 177-183.