Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Water and Soil Conservation

Print ISSN: 2322-2069
Online ISSN: 2322-2794

(OPEN ACCESS)

Assessment of the recovery of compacted soil physical properties after skidding operations in Kuhmian forests in Golestān province

Ali Ganji[1], Sattar Ezzati[*2], Farzam Tavankar[3], Ramin Rahmani[4]

1. M.Sc. Student of Forestry, Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: aliganji@gmail.com
2. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Forestry, Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: sattar.ezzati@gau.ac.ir
3. Associate Prof., Dept. of Forestry, Khalkhal Branch, Islamic Azad University, Khalkhal, Iran. E-mail: tavankar@aukh.ac.ir
4. Professor, Dept. of Silviculture and Forest Ecology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: rahmani@gau.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 10.28.2024
Revised: 01.06.2025
Accepted: 01.27.2025

Keywords:
Harvesting,
Macroporosity,
Physical properties,
Skid trails,
Soil recovery

ABSTRACT

Background and Objectives: Heavy harvesting machines through compaction and changes in the physical structure of the soil lead to an impact on the habitat of soil in logging routes, winching routes and the location of log landings. Therefore, these effects persist for years after the harvesting operation. The aim of this study was to analyze the recovery of disturbed soil physical properties, including moisture content, bulk density, macroporosity, and total porosity across slope and traffic classes of abandoned skid trails within 10, 15, and 30 years after cessation of harvesting operations.

Materials and Methods: This study was carried out in the Kuhmian watershed in Golestān province. The intended treatments included three classes of traffic intensity and two levels of slope gradients. To do so, at each trail age, three traffic intensities of low, medium and severe were separated regarding the distance from the roadside landings and the routes branched from the main road. Within each traffic intensity, two slope classes <15% and > 15% were identified. A 40-meter plot was delineated and 6 soil samples were taken to the laboratory to measure the physical properties of the soil, including moisture content, bulk density, macroporosity, and total porosity. The moisture content of the samples was measured using a digital scale. The dry weight of the samples and other properties were measured in the laboratory.

Results: The results showed that after 10 years, none of soil physical properties were recovered in all the studied treatments. In heavy traffic of the 30 years of trail values of moisture content (8% higher), bulk density (14% higher), macroporosity (18% lower) and total porosity (12% lower) compare to control areas. In treatments with slope <15% moisture content, macroporosity, and total porosity recovered, however, in slops >15% values of bulk density and macroporosity were 11% higher and 13% lower, respectively, compare to control areas. Regardless of slopes and traffic levels, macroporosity did not recover and its value was 12% lower compared to control areas after 30 years.

Conclusion: The results of this study showed that soil physical properties did not recovery in treatments with heavy traffic and slopes >15% even after 30 years. It is recommended to use logging residues over skidding trails before skidding operations and use lower load capacity in order to enhance soil recovery and protect degraded soil a result of skidding operations in unfavorable conditions.

Cite this article: Ganji, Ali, Ezzati, Sattar, Tavankar, Farzam, Rahmani, Ramin. 2025. Assessment of the recovery of compacted soil physical properties after skidding operations in Kuhmian forests in Golestān province. *Journal of Water and Soil Conservation*, 32 (2), 165-182.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/jwsc.2025.22914.3768
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

شاپا چاپی: ۲۰۶۹-۲۳۲۲
شاپا آنلاین: ۲۷۹٤-۲۳۲۲

ارزیابی میزان بهبود خصوصیات فیزیکی خاک فشرده شده پس از اجرای عملیات چوبکشی زمینی در جنگل کوهمیان استان گلستان

علی گنجی[۱]، ستار عزتی*[۲]، فرزام توانکار[۳]، رامین رحمانی[٤]

۱. دانشجوی کارشناسی‌ارشد جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: aliganji@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، استادیار گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: sattar.ezzati@gau.ac.ir

۳. دانشیار گروه جنگلداری، واحد خلخال، دانشگاه آزاد اسلامی، خلخال، ایران. رایانامه: tavankar@aukh.ac.ir

٤. استاد گروه جنگلشناسی و اکولوژی جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: rahmani@gau.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۰۳/۰۸/۰۷
تاریخ ویرایش: ۰۳/۱۰/۱۷
تاریخ پذیرش: ۰۳/۱۱/۰۸

واژه‌های کلیدی:
بهبود خاک،
بهره‌برداری،
تخلخل خاک،
خصوصیات فیزیکی،
مسیرهای چوبکشی

چکیده

سابقه و هدف: ماشین‌آلات سنگین در عملیات بهره‌برداری با فشردگی و تغییر در ساختمان فیزیکی خاک، تأثیرات قابل‌توجهی بر بخشی از خاک رویشگاه که مسیرهای چوبکشی، مسیرهای کشیدن و مناطق دپوهای جنگلی بر روی آن احداث‌شده است ایجاد می‌کنند. این تأثیرات ممکن است تا سالیان طولانی پابرجا باشد. هدف این مطالعه ارزیابی روند بهبودی خصوصیات فیزیکی خاک تخریب‌شده شامل وزن مخصوص ظاهری، تخلخل درشت‌دانه، تخلخل کل و رطوبت وزنی در مسیرهای چوبکشی با خصوصیات فنی متفاوت (شیب و تردد) پس از گذشت ۳۰ سال از عملیات چوبکشی زمینی است.

مواد و روش‌ها: مطالعه حاضر در جنگل‌های حوزه کوهمیان در سه مسیر چوبکشی با سنین مختلف ۱۰، ۱۵ و ۳۰ سال در استان گلستان انجام شد. تیمارهای موردنظر شامل سه کلاس شدت تردد ماشین چوبکشی و دو کلاس شیب طولی مسیر چوبکشی بود. بدین‌منظور، در هر سن مسیر چوبکشی، سه شدت تردد کم، متوسط و شدید براساس فاصله از محل دپو و مسیرهای منشعب شده از مسیر اصلی تفکیک شد. در هر شدت تردد، دو کلاس شیب بالای ۱۵٪ و زیر ۱۵٪ جدا شد. در هر تیمار یک پلات ٤۰ مترمربعی برداشت شد. تعداد ٦ نمونه خاک (سه نمونه در شیار سمت چپ و سه نمونه در شیار سمت راست) جهت اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی خاک شامل رطوبت وزنی، وزن مخصوص ظاهری، تخلخل درشت‌دانه و تخلخل کل برداشت و به آزمایشگاه انتقال داده شد. وزن مرطوب نمونه‌ها در عرصه با استفاده از ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری و وزن خشک نمونه‌ها در آون و سایر مشخصات خاک در

آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. درمجموع ۱۰۸ نمونه خاک برداشت و آزمایش شد. به‌منظور بررسی بهبود خصوصیات فیزیکی، خاک مسیرهای چوبکشی با مناطق بدون به‌هم‌خوردگی (شاهد) مقایسه شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که در مسیر ۱۰ ساله، هیچ‌یک از خصوصیات فیزیکی خاک بهبود نیافته است. این در حالی است که در تردد شدید مسیر ۳۰ سال مقدار رطوبت خاک (۸ درصد بیش‌تر)، وزن مخصوص ظاهری (١٤ درصد بیش‌تر)، تخلخل درشت‌دانه (۱۸ درصد کم‌تر) و مجموع تخلخل (۱۲ درصد کم‌تر) در مقایسه با منطقه شاهد بوده است. در شیب زیر ۱۵ درصد، رطوبت خاک، تخلخل درشت‌دانه و مجموع تخلخل توانسته بودند به آستانه بهبود برسند، اما درشیب‌های بالای ۱۵ درصد، وزن مخصوص ظاهری (۱۱ درصد بیش‌تر) و تخلخل درشت‌دانه (۱۳ درصد کم‌تر) در مقایسه با منطقه شاهد اختلاف دارند. فارغ از خصوصیات فنی مسیرهای چوبکشی (شیب و تردد)، بعد از گذشت زمان ۳۰ سال، فقط تخلخل درشت‌دانه نتوانسته بود بهبود یابد و مقدار آن به‌اندازه ۱۲ کم‌تر از منطقه شاهد بوده است و برای بهبودی کامل به زمان بیش‌تری نیاز دارد.

نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که خصوصیات فیزیکی خاک در تیمارهای با شیب‌های بالای ۱۵ درصد و تردد شدید نتوانسته بودند بعد از گذشت ۳۰ سال به‌طور کامل بهبود یابند، بنابراین به‌منظور حداقل نمودن آسیب به اکوسیستم جنگل استفاده از مازاد مقطوعات و سرشاخه درختان بر روی مسیر و کاهش حجم بار ماشین به‌منظور کمک به بهبود و تخریب حداکثر و خاک در این نواحی پیشنهاد می‌شود.

استناد: گنجی، علی، عزتی، ستار، توانکار، فرزام، رحمانی، رامین (۱۴۰۴). ارزیابی میزان بهبود خصوصیات فیزیکی خاک فشرده شده پس از اجرای عملیات چوبکشی زمینی در جنگل کوهمیان استان گلستان. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۳۲ (۲)، ۱۸۲-۱۶۵.
DOI: 10.22069/jwsc.2025.22914.3768

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
© نویسندگان.

مقدمه

جنگل‌های شمال از آستارا تا گلیداغ بر روی یک نوار باریک در حاشیه دریای خزر، عرصه‌ای با شرایط خاص اکولوژیک و مجموعه‌ای منحصربه‌فرد از انواع گونه‌های چوبی و غیرچوبی را تشکیل داده است. با نگاهی به آمار و ارقام موجود در کشور، تنها بخش کوچکی از این سرزمین یعنی جنگل‌های هیرکانی که حدود ۱/۸ میلیون هکتار وسعت دارد، ۷ درصد از خاک این کشور پهناور را در برگرفته است. بهره‌برداری بی‌رویه ناشی از طراحی نامناسب مسیرهای چوبکشی، عدم به‌کارگیری اصول فنی در عملیات چوبکشی و زمان نامناسب برای خروج مقطوعات موجب تخریب خاک بخشی از عرصه‌های تحت پوشش مسیرهای چوبکشی و مناطق دپو شده و این نواحی از فرایند تولید زیستی جنگل خارج کرده است. از مجموع مساحت جنگل‌های شمال به‌عنوان تنها جنگل تجاری در ایران، تقریباً ٦٠ درصد آن قابلیت بهره‌برداری صنعتی (استفاده از ماشین‌آلات مکانیکی به‌منظور خروج محصولات به‌صورت گرده‌بینه) را دارد (۱). حجیم بودن و وزن بالای مقطوعات، وجود گونه‌های باارزش صنعتی بالا، کوهستانی و شیب‌دار بودن بخش اعظمی از جنگل‌های هیرکانی سبب شده تا سیستم‌های چوبکشی زمینی تنها راه خروج مقطوعات جنگلی تلقی گردد. از طرفی به‌کارگیری این ماشین‌آلات سنگین‌وزن بدون تخریب و آسیب جدی به خاک ممکن نیست (۲ و ۳). هرچند که مقدار و شدت آن متغیر است. بر همین اساس استفاده از ماشین‌آلات سنگین در عملیات بهره‌برداری جنگل همواره به‌عنوان یکی از علل اصلی کاهش تولید جنگل در درازمدت شناخته‌شده است (٤). حمل گرده‌بینه با طول و وزن زیاد علاوه بر خسارت بر توده سرپا، آسیب جبران‌ناپذیری را بر خاک جنگل وارد می‌سازد. از طرف دیگر حفاظت و نگهداری منابع آبی و خاکی به‌عنوان مهم‌ترین اصل در مدیریت پایدار جنگل مطرح است (۵). بهبود خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در اثر تخریب ناشی از عملیات چوبکشی زمینی یک فرایند کند و زمان‌بر (٦) است. بسته به شرایط اقلیمی، توپوگرافی و فیزیوگرافی شدت و وسعت خسارات و سن توده، فعالیت فون و فلور خاک، شدت و روش بهره‌برداری (۷) می‌توانند از یک سال در لایه‌های سطحی (۸) تا ۱۰۰ سال در لایه‌های عمیق‌تر خاک به طول بیانجامد. مطالعات متعددی در این زمینه انجام‌شده است که تمرکز اصلی بر روی میزان تخریب خاک و بهبود در دوره‌های زمانی کوتاه بعد از عملیات بهره‌برداری بوده است و مطالعه طولانی‌مدت در این زمینه به دلیل عدم دسترسی به داده‌های تاریخی کم‌تر انجام‌شده است (۹). فیروزان و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهش‌های خود به این نتیجه رسیدند که در مسیرهای چوبکشی که ۱۱ سال از زمان تردد ماشین‌آلات گذشته بود، وزن مخصوص ظاهری و درصد تخلخل به‌طور معنی‌داری با جنگل طبیعی تفاوت داشت (۱۰). هاشمی و همکاران (۲۰۲۱) طی مطالعه خود به بررسی ویژگی‌های فیزیکی خاک ۱۱ سال پس از ساخت جوی – پشته بر روی مسیرهای چوبکشی نمودند (۱۱). نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که اثر شیب، ترافیک و تأثیر متقابل شیب – تردد بروی متغیرهای وزن مخصوص ظاهری، تخلخل و نفوذپذیری درشیب کم هنوز تأثیر معنی‌داری داشته است. دآرموند و همکاران (۲۰۱۹) در جنگل‌های استوایی برزیل نشان دادند اگرچه بهبودی جزئی در خصوصیات فیزیکی خاک (وزن مخصوص ظاهری، نفوذپذیری در لایه‌های سطحی) در مسیرهای با شدت تردد پایین پس از گذشت ٢٤ سال به وجود آمده بود اما بهبودی کامل این خصوصیات به زمان بیش‌تر از ۳۰ سال نیاز دارد (۱۲).

با توجه به موقعیت خاص جنگل‌های شمال کشور و لزوم حفظ خاک جنگل لازم است مطالعه روند تغییرات خاک در عرصه‌های جنگلی بعد از اتمام عملیات مدیریتی جنگل صورت گیرد. از طرف دیگر به دلیل قانونی شدن تعطیلی عملیات بهره‌برداری صنعتی در جنگل‌های شمال کشور (مصوب سال ۱۳۹٦ هیئت وزیران)، مدیریت طرح‌های جنگلداری در شمال ایران نیز متوقف شده است. انجام چنین مطالعاتی می‌تواند اطلاعات باارزشی در جهت کاهش خسارت و شناسایی در معرض آسیب در پایان طرح تنفس و اجرای طرح صنعتی بهره‌برداری متناسب با ظرفیت اکولوژیکی جنگل‌های شمال کشور در آینده را پیش‌روی مدیران و مجریان شرکت‌های بهره‌برداری قرار دهد. ضمن این‌که مطالعه حاضر، بررسی طولانی‌مدت خصوصیات فیزیکی خاک را در طیف وسیعی از تیمارهای مربوط به شیب و تردد مسیرهای چوبکشی پس از توقف عملیات چوبکشی زمینی در جنگل‌های پهن‌برگ شمال ایران انجام داده که در نوع خود منحصربه‌فرد است. هدف مطالعه حاضر ارزیابی میزان بهبود خصوصیات فیزیکی خاک فشرده‌شده (وزن مخصوص ظاهری، تخلخل و رطوبت) پس از اجرای عملیات چوبکشی زمینی تحت‌تأثیر تیمارهای شدت تردد، شیب طولی و سن مسیرهای چوبکشی در یک دوره ۳۰ ساله پس از عملیات چوبکشی زمینی در جنگل کوهمیان استان گلستان است.

مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه: منطقه موردمطالعه در این پژوهش، طرح جنگلداری کوهمیان در شهرستان آزادشهر، استان گلستان است. این طرح در دامنه شمالی سلسله جبال البرز در حوزه آبخیز ۸۹ قرار گرفته است که حدود آن از شمال به زمین‌های زراعی قراءکوهمیان، فاضل‌آباد، خاندوز سادات و مرزبن و از جنوب و غرب به طرح جنگلداری نعیم‌آباد و از شرق به طرح جنگلداری وطن در عرض جغرافیایی: "۱۵ '۵٦ °۳۷ تا "۰۰ '۰۰ °۳۷ و طول جغرافیایی "٤۹ '۱٤ °۵۵ تا "۳۰ '۱۰ °۵۵ واقع شده است. متوسط بارندگی سالیانه ۸۰۹ میلی‌متر و حداقل بارندگی ۳۳ میلی‌متر در تیرماه است و حداکثر درجه حرارت ۲۲ و حداقل ۸ درجه سانتی‌گراد است (کتابچه طرح جنگلداری کوهمیان، ۱۳۹٦). عمق خاک پارسل‌های موردمطالعه نسبتاً عمیق تا عمیق ۹۸ سانتی‌متر، نفوذپذیری متوسط و بافت خاک سیلت لومی تا سیلت کلی بوده است. ارتفاع از سطح دریا بین ۷۰۰ تا ۱۳۵۰ متر متغیر بوده است. در این مطالعه سه مسیر چوبکشی رهاشده با سنین مختلف ۱۰، ۱۵ و ۳۰ سال پس از عملیات چوبکشی زمینی موردبررسی واقع شد. مسیر اول با سن ۱۰ سال در مرز پارسل‌های ۱۲ و ۱٤، مسیر دوم با سن ۱۵ سال در پارسل‌های ۳۵ و ۳٦ و مسیر سوم با سن ۳۰ سال در پارسل‌های ۳ و ٤ از طرح جنگلداری کوهمیان قرار گرفته است. مسیر ۱۰ و ۱۵ سال در طرح جنگلداری نعیم‌آباد قرار دارند. پوشش گیاهی پارسل‌های موردمطالعه شامل درختان پهن‌برگ مخلوط شامل ممرز (*Carpinus betulus* L.)، بلوط (*Quercus castanifolia* C.A)، توسکا، افرا پلت (*Acer velutinum*)، افرا شیردار (*Acer cappadocicum*) است. طول مسیرهای چوبکشی در مسیر ۱۰ سال ۵۷٦ متر، در مسیر ۱۵ سال ٤۲۳ متر و در مسیر ۳۰ سال ۹۵۷ متر بوده است. نوع ماشین مورداستفاده برای عملیات چوبکشی در دو مسیر ۱۰ و ۱۵ سال اسکیدر تیمبرجک (وزن ۱۰/۲۵۷ تن) و در مسیر ۳۰ سال اسکیدر تاف (وزن ۱۲ تن) بوده است. نوع محصولات خارج‌شده گرده‌بینه کوتاه بوده است. حجم خروجی چوب در مسیر ۱۰ سال، ۱۲۱٤/٤ مترمکعب، در مسیر ۱۵ سال، ۱۰۰۰ مترمکعب و در مسیر ۳۰ سال هم ۸۹۰ مترمکعب بوده

است (کتابچه طرح جنگلداری کوهمیان، ۱۳۹٦). لازم به توضیح است که در مسیر ۳۰ سال شیوه جنگل‌شناسی تدریجی پناهی و در مسیرهای ۱۰ و ۱۵ سال همگام با طبیعت بوده است. بعد از عملیات چوبکشی، هیچ‌گونه عملیات مراقبتی مانند نهال‌کاری و شخم زدن در مسیرهای چوبکشی انجام‌نشده است. فقط در مسیرهای ۳۰ سال در نواحی شیب‌دار از پرچین‌های چوبی به‌منظور کنترل رواناب در سال‌های اخیر استفاده‌شده بود.

روش تحقیق: به‌منظور ارزیابی خصوصیات فیزیکی خاک تخریب‌شده پس از عملیات بهره‌برداری، در هر یک از مسیرهای چوبکشی بر اساس فاصله از دپو و شاخه‌های مسیر، سه شدت ترافیک کم، متوسط و زیاد جدا شد (۱۳). در هر کلاسه ترافیک دو کلاس شیب شامل شیب کم‌تر از ۱۵ درصد (۰-۱۵ درصد) و بیش از ۱۵ درصد (۲۰-۳۵ درصد) جدا شد (۱۵، ۱٦). در هر کلاس شیب طولی، سه قطعه‌نمونه با طول ۱۰ متر و عرض ٤ متر (عرض مسیر) طراحی و سپس یک قطعه‌نمونه به‌طور تصادفی انتخاب شد. در هر قطعه‌نمونه ٤۰ مترمربعی، ۵ خط‌نمونه بافاصله ۲ متر از هم جدا و سپس به‌طور تصادفی ۳ خط‌نمونه انتخاب شد. تعداد سه نمونه از مرکز شیار سمت راست و سه نمونه دیگر از مرکز شیار سمت چپ گرفته شد (۳). درمجموع ۱۰۸ نمونه جهت اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی خاک از عمق ۱۰-۰ سانتی‌متر با استفاده از سیلندرهای فلزی با قطر داخلی ۵ و طول ۱۰ سانتی‌متر به دلیل تأثیرپذیری زیاد این افق از عملیات چوبکشی برداشت شد (۱٤). وزن نمونه‌های مرطوب در عرصه با ترازوی دستی اندازه‌گیری و نمونه‌های برداشت شده سپس در محیط آزمایشگاه انتقال و در داخل آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲٤ ساعت قرار داده شد. نمونه‌ها دوباره توزین شده تا میزان رطوبت وزنی و وزن خشک تعیین شود (۱۵). زمان نمونه‌برداری در تیر و مرداد ۱٤۰۲ به دلیل پایین بودن رطوبت هوا و ایجاد شرایط یکسان برای نمونه‌گیری بوده است. نمونه‌برداری برای تعیین وزن مخصوص ظاهری خاک در منطقه شاهد در مجاورت هر پلات به فاصله ۵۰ متر از مسیر چوبکشی بوده تا خصوصیات خاک در مسیرهای چوبکشی با نمونه منطقه شاهد مقایسه شود (۱۲). وزن مخصوص ظاهری (رابطه ۱)، تخلخل خاک (مجموع تخلخل (رابطه ۲)، تخلخل درشت‌دانه (رابطه ۳)، ریزدانه)، درصد رطوبت نمونه‌های برداشت‌شده مطابق رابطه ٤ محاسبه شد (۱٤، ۱۵).

$$BD = \frac{M_s}{V_t} \qquad (۱)$$

در رابطه فوق، BD وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌مترمکعب)، M جرم خاک (گرم) و V حجم استوانه (سانتی‌مترمکعب) است.

$$TP = 1 - (\frac{\rho_d}{2.65}) \times 100 \qquad (۲)$$

در این رابطه، TP تخلخل کل (درصد)، ρ_d وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌مترمکعب)، وزن مخصوص حقیقی برابر با ۲/٦۵ و VC حجم سیلندر نمونه‌گیری خاک (۲۰٦/۰٦ سانتی‌مترمکعب) است.

$$MP = \frac{w_s - w_d}{v} \qquad (۳)$$

در این رابطه، MP تخلخل درشت‌دانه (درصد)، w_s وزن اشباع‌شده خاک (گرم)، w_d وزن خاک زهکشی شده بعد از ۳ ساعت (گرم) و v حجم ظرف (سانتی‌مترمکعب). رطوبت وزنی نمونه‌ها از طریق رابطه ٤ محاسبه شد.

$$w = \frac{w_s - w_w}{w_w} \times 100 \qquad (٤)$$

در رابطه فوق، w رطوبت وزنی، w_s وزن خشک خاک و w_w وزن مرطوب خاک است.

پس از جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل آماری در نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۰ انجام شد. این پژوهش در قالب طرح آماری بلوک‌های کاملاً تصادفی شامل ۳ بلوک (شیب (دو سطح: کم‌تر از ۱۵ درصد و بیش از ۱۵ درصد)، تردد (سه سطح: کم، متوسط و زیاد) و سن (سه کلاس ۱۰، ۱۵ و ۳۰ سال)) تحت آزمایش فاکتوریل انجام شد. ابتدا نرمال بودن داده‌ها با آزمون کلموگراف – اسمیرنوف و همگنی واریانس‌ها با آزمون شاپیروویک و آزمون لون تأیید شد. برای مقایسات آماری مانند بررسی اثرات ساده و متقابل تیمارهای موردمطالعه بر روی خصوصیات فیزیکی خاک از آنالیز واریانس استفاده و بررسی میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح اطمینان ۵٪ انجام شد.

نتایج

نتایج آنالیز واریانس نشان داد که عوامل سن، ترافیک و شیب و اثر متقابل سن – ترافیک تأثیر معنی‌داری بر تمام خصوصیات فیزیکی خاک داشته است (جدول ۱). اثر متقابل سن و شیب تنها بر روی متغیرهای وزن مخصوص ظاهری و درصد رطوبت خاک معنی‌دار بود. اثر متقابل ترافیک و شیب و اثر متقابل سن، ترافیک و شیب فقط بر روی متغیر وزن مخصوص ظاهری معنی‌دار بود.

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس (مقدار F) بین متغیرهای سن، تردد و شیب طولی مسیر چوبکشی و خصوصیات فیزیکی خاک.

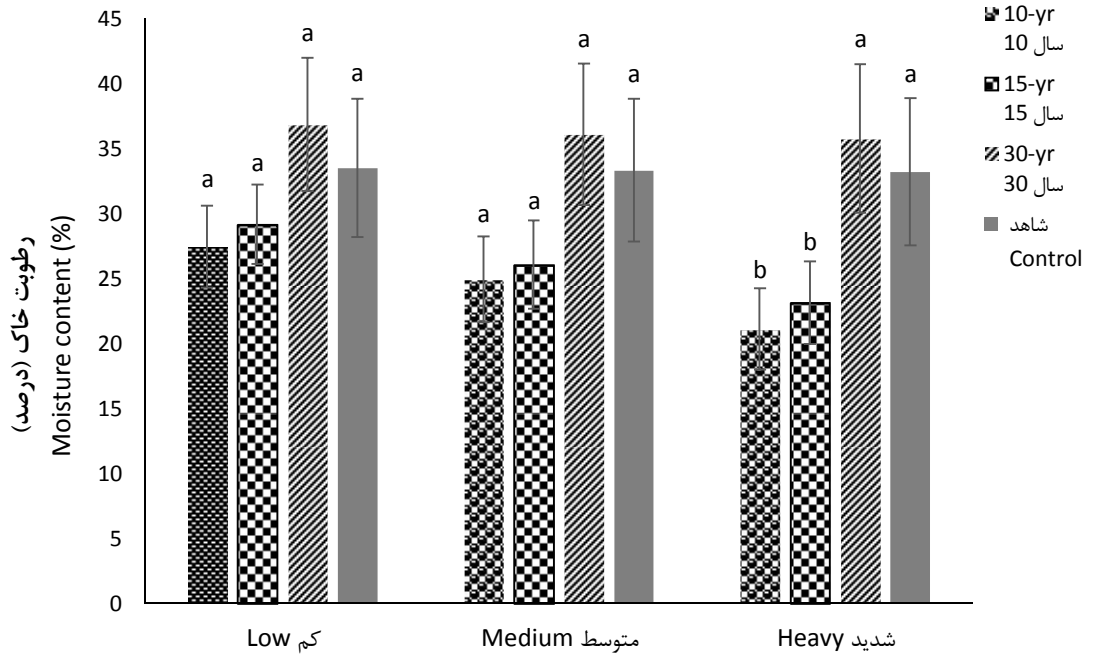
Table 1. Analysis of variance (F-value) between age, traffic, and slope variables and soil physical properties.

متغیر Variable	جرم مخصوص ظاهری (گرم/سانتی‌مترمکعب) Bulk density (g cm^3)	رطوبت خاک (٪) Moisture content (%)	تخلخل درشت‌دانه (٪) Macroporosity (%)	تخلخل کل (٪) Total porosity (%)
سن Age	33.42**	24.08**	30.22**	10.60**
ترافیک Traffic	9.48**	6.09**	10.08**	3.48*
شیب Slope	13.10**	3.86*	2.39*	3.76*
سن× ترافیک Age×Traffic	4.18**	28.73**	40.40**	17.01**
سن × شیب Age×Slope	7.09**	5.20**	0.86^{ns}	3.70*
ترافیک × شیب Slope×Traffic	2.95*	1.02^{ns}	0.50^{ns}	0.61^{ns}
سن × ترافیک × شیب Age×Traffic×Slope	3.37*	0.98^{ns}	0.76^{ns}	0.27^{ns}

*، **، ^{ns} به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد و عدم معنی‌داری است

*, ** and ^{ns} Significant at the 5% and 1% probability levels and not significant, respectively

تأثیر شدت تردد بر خصوصیات فیزیکی خاک: با افزایش شدت تردد، رطوبت خاک روند کاهشی داشته، اما با افزایش سن روند افزایشی را طی نموده است. میانگین درصد تغییرات رطوبت خاک در سه شدت تردد کم، متوسط و زیاد به ترتیب ۷، ۱۳ و ۲۰ درصد کم‌تر از رطوبت خاک در منطقه شاهد بوده است (شکل ۱). رطوبت خاک در شدت تردد کم و متوسط در مسیرهای با سن ۱۰ و ۱۵ سال بهبودیافته و اختلاف معنی‌دار با منطقه شاهد از خود نشان نمی‌دهد. حال‌آن‌که رطوبت خاک در تردد شدید در مسیر ۱۰ و ۱۵ سال نه‌تنها بهبود نیافته، بلکه مقدار آن به ترتیب ۳۷ و ۳۱ درصد کم‌تر از منطقه شاهد است. پس از گذشت ۳۰ سال، رطوبت خاک تردد شدید بهبودیافته و فاقد اختلاف معنی‌دار با منطقه شاهد است و مقدار آن ۸ درصد بیش‌تر از منطقه شاهد است. این یافته با نتایج مطالعه (۱۶، ۱۷) در بررسی رطوبت خاک پس از ۲۰ سال از اجرای عملیات چوبکشی مبنی بر بهبودی سریع‌تر رطوبت خاک در مقایسه با وزن مخصوص ظاهری، مطابقت دارد.

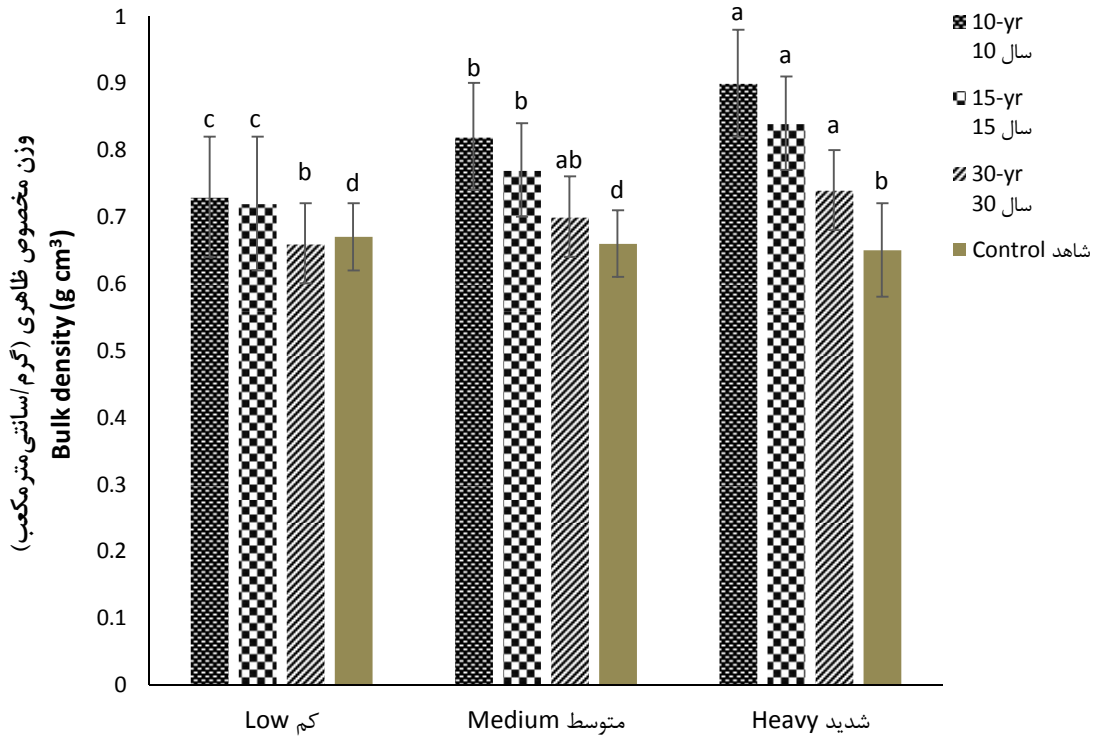


شکل ۱- تأثیر شدت تردد بر درصد رطوبت خاک در مسیرهای مطالعه شده، حروف بالای ستون بیانگر تفاوت معنی‌دار در کل کلاسه‌ها است.

Figure 1. The effect of traffic intensity on the percentage of soil moisture in the studied trails, the upper letters of the column indicate a significant difference among all classes.

میانگین وزن مخصوص ظاهری در سه کلاس ترافیک کم، متوسط و شدید به ترتیب ۷، ۱۶ و ۲۵ درصد بیش‌تر از منطقه شاهد بوده است (شکل ۲). وزن مخصوص ظاهری در سه کلاس تردد در مسیرهای چوبکشی ۱۰ و ۱۵ سال هنوز اختلاف معنی‌دار با منطقه شاهد دارد. وزن مخصوص ظاهری در تردد شدید در هیچ‌یک از سنین مسیر چوبکشی بهبود نیافته و هنوز اختلاف معنی‌دار به‌اندازه ۳۴، ۲۷ و ۱۴ درصد در مقایسه با منطقه شاهد از خود نشان می‌دهد. حداکثر وزن مخصوص ظاهری در بین سه

کلاس سنی مطالعه شده در مسیر ۱۰ سال ثبت شد، حال‌آن‌که در سه کلاس تردد روند کاهشی این عامل در طول زمان مشاهده می‌شود. بهبود جزئی وزن مخصوص ظاهری در این تیمارها ممکن است به دلیل اختلاط لایه لاشبرگ آلی با لایه‌های خاک، ریشه دوانی پوشش گیاهی به‌علت عدم تردد ماشین‌آلات در این مسیرها از زمان توقف بهره‌برداری، انبساط و انقباض خاک در طول زمستان و فعالیت ریزموجودات خاکی (کرم‌ها، مورچه‌ها و ...) باگذشت زمان باشد که شرایط مساعدی را برای فعالیت این موجودات و درنهایت کاهش فشردگی خاک را به دنبال داشته است (۳، ۱۸). هرچند که ممکن است ۳۰ سال، زمان کافی برای قضاوت در زمینه بهبودی کامل وزن مخصوص ظاهری خاک نباشد.

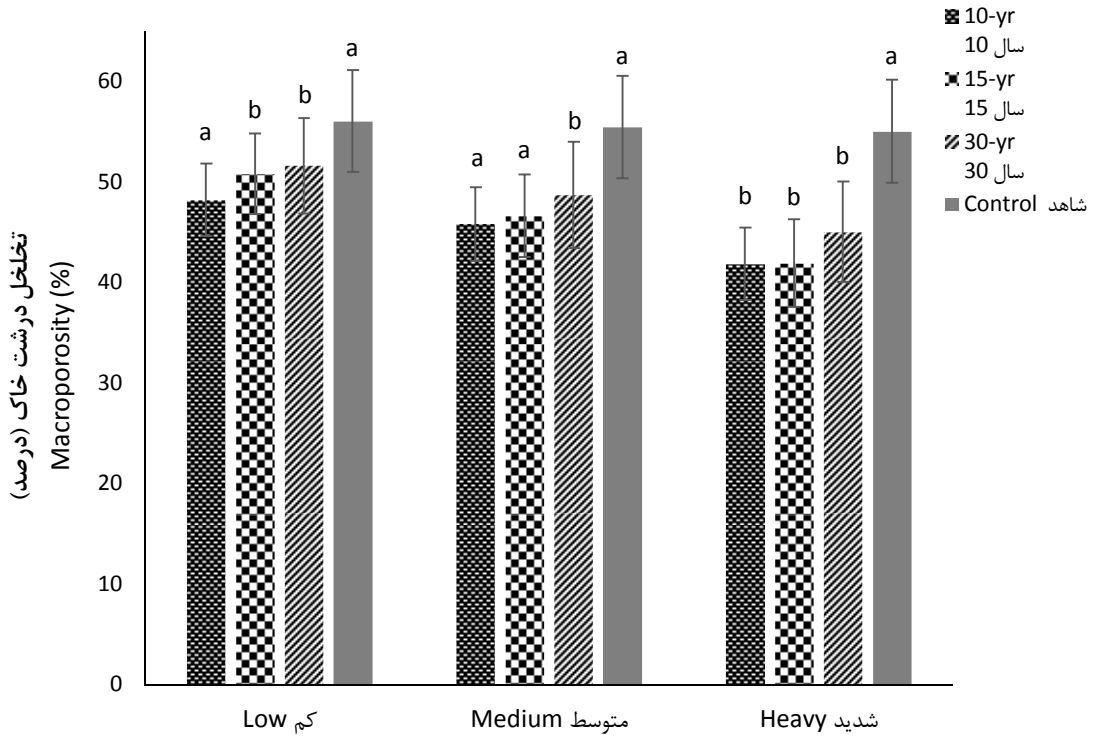


شکل ۲- تأثیر شدت تردد بر وزن مخصوص ظاهری در مسیرهای مطالعه شده، حروف بالای ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در کل کلاسه‌ها است.

Figure 2. The effect of traffic intensity on soil bulk density in the studied trails, the upper letters of the column indicate a significant difference among all classes.

بیش‌ترین درصد تخلخل‌های درشت‌دانه در تردد کم مسیر ۳۰ سال (۵۲ درصد) و کم‌ترین درصد آن در تردد شدید مسیر ۱۰ سال (٤۲ درصد) مشاهده شد (شکل ۳). درصد کاهش تخلخل درشت‌دانه در مقایسه با منطقه شاهد در سه تردد کم، متوسط و زیاد به ترتیب ۱۰، ۱۵ و ۲۳ درصد بوده است. تخلخل درشت‌دانه در تردد متوسط در مسیر ۱۰ و ۱۵ سال و در تردد کم مسیر ۱۰ سال بهبودی جزئی داشته و روندی را طی نموده است، حال‌آن‌که در تردد شدید در هیچ‌یک از سنین مسیر چوبکشی بهبودی حاصل نشده است. عدم بهبود تخلخل‌های درشت‌دانه در تردد شدید ممکن است به این دلیل باشد که هنگام

کوبیده شدن خاک‌های جنگلی، آرایش منافذ خاک به هم می‌خورد و در این میان تخلخل‌های درشت‌دانه که مسئول تبادلات گازی هستند بیش‌ترین تأثیر را می‌پذیرد و سهم تخلخل‌های ریزدانه که مسئول نگهداری آب در خاک هستند افزایش می‌یابد (۲، ۳، ۱۹). عدم بهبود تخلخل‌های درشت‌دانه به دلیل بالا بودن فشردگی خاک بالای ۰/۷۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب است که حتی باگذشت زمان ۳۰ سال از اجرای چوبکشی در تردد شدید هنوز بهبود نیافته است.

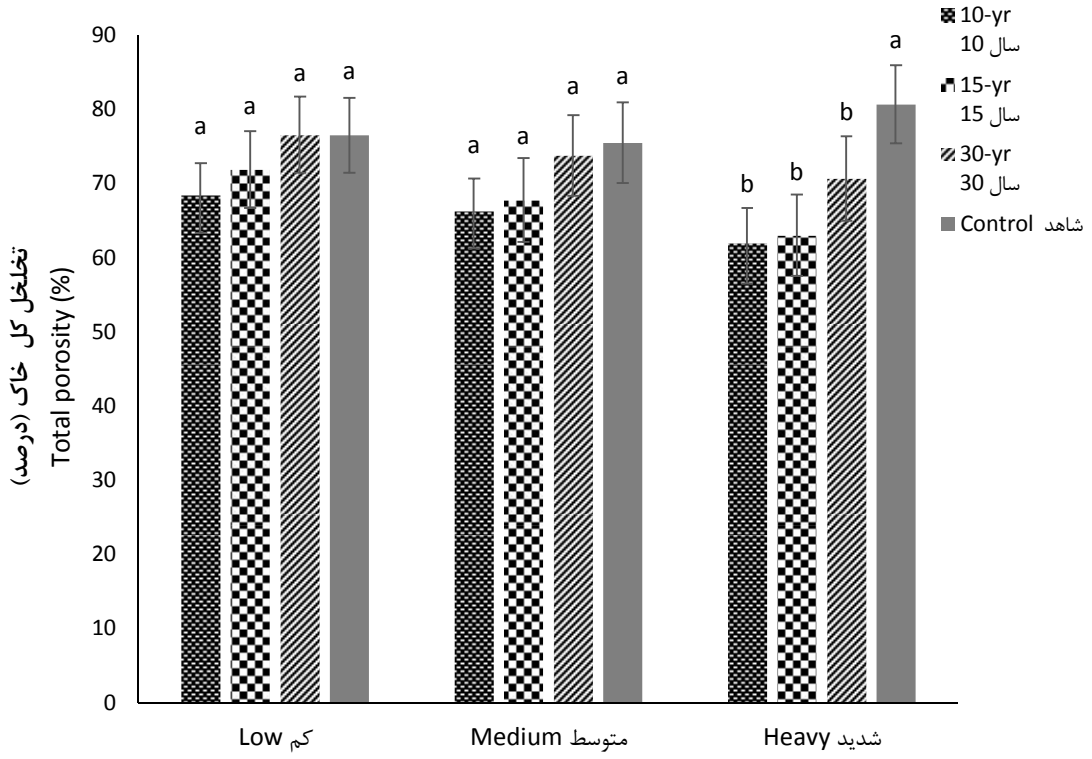


شکل ۳- تأثیر شدت تردد بر درصد تخلخل‌های درشت‌دانه در مسیرهای مطالعه شده، حروف بالای ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در کل کلاسه‌ها است.

Figure 3. The effect of traffic intensity on microporosity in the studied trails, the upper letters of the column indicate a significant difference among all classes.

تخلخل کل که شامل مجموع تخلخل ریز و درشت‌دانه است روندی مشابه با تخلخل درشت‌دانه را طی کرده است. درصد کاهش تخلخل کل در سه تردد کم، متوسط و شدید به‌طور میانگین معادل ۷، ۱۱ و ۱۶ درصد در مقایسه با منطقه شاهد بوده است (شکل ٤). تخلخل کل در تردد کم و متوسط در سه سن مسیر چوبکشی فاقد اختلاف معنی‌دار بین خود و هم‌چنین با منطقه شاهد بوده است؛ اما در تردد شدید در هر سه سن مسیر دارای اختلاف معنی‌دار آماری بوده و تفاوتی به‌اندازه ۱۹، ۱۷ و ۱۲ درصد کم‌تر در مقایسه با منطقه شاهد پس از گذشت ۱۰، ۱۵ و ۳۰ سال از خود نشان می‌دهد. نتایج مطالعه حاضر با یافته‌های (۵) مبنی بر عدم بهبود مجموع تخلخل خاک و کم‌تر بودن مقدار آن به‌اندازه ۳۳ درصد در فاصله زمانی ۲۰ سال پس از عملیات چوبکشی مطابقت دارد. تغییر سهم تخلخل کل خاک مرتبط با وزن

مخصوص ظاهری خاک است، طوری‌که با افزایش وزن مخصوص ظاهری، سهم تخلخل خاک به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد (۱۵، ۲۰). تخلخل کل مربوط به منطقه شاهد در تردد شدید اندکی بیش‌تر (٦ درصد) از تردد متوسط و کم است. این امر ممکن است ناشی از تفاوت جزئی در شرایط میکروکلیمایی منطقه (لاش‌ریزه بیش‌تر، آفتاب‌گیر بودن و حضور ریزموجودات خاکی) بوده باشد.



شکل ٤- تأثیر شدت تردد بر درصد تخلخل کل در مسیرهای مطالعه شده، حروف بالای ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در کل کلاسه‌ها است.

Figure 4. The effect of traffic intensity on total porosity in the studied trails, the upper letters of the column indicate a significant difference among all classes.

تأثیر شیب طولی بر خصوصیات فیزیکی خاک: با افزایش شیب طولی مسیرهای چوبکشی، خصوصیات فیزیکی خاک روند متفاوتی نسبت به‌شدت ترددهای مختلف از خود نشان دادند. تجزیه‌وتحلیل خصوصیات فیزیکی خاک در کلاس‌های مختلف شیب طولی مسیر چوبکشی نشان داد که در تیمار شیب زیر ۱۵ درصد، به‌استثنای وزن مخصوص ظاهری، رطوبت خاک، تخلخل درشت‌دانه، مجموع تخلخل در مقایسه با منطقه شاهد بهبود داشته است و فاقد اختلاف معنی‌دار با منطقه شاهد هستند؛ اما در شیب بالای ۱۵ درصد فقط رطوبت وزنی خاک و تخلخل کل بهبودیافته و سایر خصوصیات ازجمله وزن مخصوص ظاهری و تخلخل درشت‌دانه در هیچ‌یک از مسیرهای مطالعه شده به آستانه بهبود نرسیده است (جدول ۲).

جدول ۲- تأثیر شیب طولی بر روی خصوصیات فیزیکی خاک تخریب‌شده در مسیرهای چوبکشی با استفاده از آزمون دانکن.

Table 2. The effect of slope gradient on disturbed soil physical properties in skid trails using Duncan's test.

شاهد Control	۳۰ سال 15-yr	۱۵ سال 15-yr	۱۰ سال 10-yr	شیب Slope (%)	متغیر Variable
33.47±5.31[a]	36.39±3.37[a]	27.83±5.03[ab]	27.40±4.30[a]	زیر ۱۵ <15	رطوبت خاک (درصد) Moisture content (%)
33.30±5.48[a]	35.17±3.86[a]	25.60±4.87[b]	20.35±4.18[b]	بالای ۱۵ 15<	
0.67±0.05[c]	0.64±0.08[b]	0.70±0.07[b]	0.72±0.07[b]	زیر ۱۵ <15	جرم مخصوص ظاهری (گرم/سانتی‌مترمکعب) Bulk density ($g.cm^3$)
0.66±0.05[b]	0.73±0.08[a]	0.86±0.06[a]	0.90±0.05[a]	بالای ۱۵ 15<	
56.04±5.09[a]	50.10±4.60[ab]	48.94±3.82[ab]	50.19±4.29[ab]	زیر ۱۵ <15	تخلخل درشت‌دانه (درصد) Macroporosity (%)
55.47±5.10[a]	48.02±4.55[b]	44.13±3.37[b]	41.02±4.15[b]	بالای ۱۵ 15<	
76.45±5.03[a]	75.40±5.31[a]	70.05±5.10[ab]	69.91±4.37[ab]	زیر ۱۵ <15	تخلخل کل (درصد) Total porosity (%)
75.64±5.48[a]	73.08±5.15[a]	65.05±5.02[b]	62.41±4.30[b]	بالای ۱۵ 15<	

رطوبت خاک در مسیرهای با سن ۱۰ سال در دو کلاس شیب باهم اختلاف معنی‌دار دارند، حال‌آن‌که در سایر مسیرها اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. رطوبت خاک در مسیرهای بالای ۱۵ سال به‌طور کامل بهبودیافته و فاقد اختلاف معنی‌دار هم در بین دو کلاس شیب و هم با منطقه شاهد است. نتایج این مطالعه با یافته‌های (۵) مبنی بر بهبود کامل رطوبت خاک در شیب‌های بالای ۱۵ درصد مطابقت دارد. با افزایش شیب طولی، وزن مخصوص ظاهری خاک روند افزایشی داشته است. بیش‌ترین وزن مخصوص ظاهری خاک (۰/۹ گرم بر سانتی‌مترمکعب) در شیب بالای ۱۵٪ در مسیر ۱۰ سال و کم‌ترین آن (۰/٦٤ گرم بر سانتی‌مترمکعب) در شیب زیر ۱۵٪ در مسیر ۳۰ سال مشاهده شد (جدول ۲). در مطالعه حاضر، مقدار وزن مخصوص ظاهری در مسیر ۱۰ سال کم‌تر از یک گرم بر سانتی‌مترمکعب بوده است که در مقایسه با پژوهش‌های قبلی معصومیان و همکاران (۱/۳۷ گرم بر سانتی‌مترمکعب بعد از ۲۰ سال)، توانکار و همکاران (۱/۰۹ گرم بر سانتی‌مترمکعب بعد از ۳۰ سال) کم‌تر است (۵، ۱۵). این امر ممکن است ناشی از تفاوت در شرایط رویشگاه، نوع و وزن ماشین، رطوبت خاک وجود لایه لاشبرگ آلی بر روی خاک، حجم بار عبوری از روی مسیر و درنهایت تفاوت در شرایط اقلیمی به دلیل اختلاف ارتفاع مناطق بوده باشد. در پژوهش حاضر ارتفاع از سطح دریا بین ۱۷۰۰-۱۳۵۰ متر بوده و مسیرهای چوبکشی عمدتاً بر روی یال بودند. ضمن این‌که منطقه هر سال برف‌گیر است. این امر منجر به قرار گرفتن خاک سطحی در معرض انبساط و انقباض متوالی و سرد و گرم‌شدن‌های متوالی می‌شود و از این لحاظ وزن مخصوص کم‌تری را داشته است. هر چند که وزن مخصوص منطقه شاهد هم خیلی بالا نبوده (۰/٦٦ گرم

بر سانتی‌مترمکعب) که خود تصدیق‌کننده موضوع بالا است. میانگین درصد افزایش وزن مخصوص ظاهری در شیب‌های زیر و بالای ۱۵ درصد به‌طور متوسط ۳ و ۲٦ درصد در سه سن مسیر چوبکشی مطالعه شده بوده است. وزن مخصوص ظاهری در هر دو کلاس شیب زیر و بالای ۱۵ درصد در هیچ‌یک از سنین مسیرهای چوبکشی بهبود نیافته است. پس از گذشت ۳۰ سال از اجرای چوبکشی زمینی، وزن مخصوص ظاهری در کلاس شیب بالای ۱۵ درصد مقدار آن به‌اندازه ۱۱ درصد بیش‌تر از منطقه شاهد است. بیش‌ترین تخلخل درشت‌دانه (۵۰/۱۹ درصد) در شیب زیر ۱۵ درصد مسیر ۳۰ سال و کم‌ترین (٤۱/۰۲ درصد) در شیب بالای ۱۵ درصد در مسیر ۱۰ سال مشاهده شد. در تمام‌مسیرهای موردمطالعه، تخلخل درشت‌دانه در شیب بالا و کم فاقد اختلاف معنی‌دار باهم هستند، حال‌آن‌که در تیمارهای با شیب بالای ۱۵ درصد، اختلاف معنی‌دار آماری به‌اندازه ۲٦، ۲۰ و ۱۳ درصد در مسیر چوبکشی ۱۰، ۱۵ و ۳۰ سال به ترتیب با منطقه شاهد دارد. پس از گذشت ۳۰ سال، تخلخل درشت‌دانه در دو کلاس شیب زیر و بالای ۱۵ درصد به ترتیب ۱۱ و ۱۳ درصد در مقایسه با منطقه شاهد اختلاف آماری را از خود نشان می‌دهند. میانگین درصد کاهش مجموع تخلخل در دو کلاس شیب کم و زیاد به ترتیب ٦ و ۱۲ درصد در مقایسه با منطقه شاهد بوده است. بیش‌ترین (۷۵/٤ درصد) مجموع تخلخل کل در شیب کم مسیر ۳۰ سال و کم‌ترین (٦۲/٤۲ درصد) در شیب بالا مسیر ۱۰ سال مشاهده شد. در مسیرهای زیر ۱۵ سال، اگرچه در بین دو کلاس شیب، مجموع تخلخل فاقد اختلاف معنی‌دار بوده اما تیمارهای با شیب بالای ۱۵ درصد اختلاف معنی‌داری با منطقه شاهد از خود نشان می‌دهند. در مسیرهای بالای ۱۵ سال مجموع تخلخل به‌طور کامل بهبود شده است و فاقد اختلاف معنی‌دار آماری است. یافته‌های مطالعه حاضر با نتایج (۳، ۱۹، ۲۰) همخوانی دارد. بالا رفتن وزن مخصوص ظاهری خاک باعث کاهش تخلخل درشت‌دانه و تخلخل کل شد و این امر با افزایش شیب طولی مسیر به دلیل کاهش سرعت ماشین درحرکت با بار و مدت‌زمان بیش‌تر قرارگیری پروفیل خاک در حالت لرزش ماشین تشدید می‌شود. طوری که این امر منجر به عدم بهبود تخلخل خاک در درازمدت می‌شود.

تأثیر سن مسیر چوبکشی بر خصوصیات فیزیکی خاک: نتایج آنالیز واریانس مربوط به تأثیر سن بر روی متغیرهای فیزیکی خاک به همراه مقایسات گروهی میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در جدول ۳ ارائه‌شده است. تمام خصوصیات فیزیکی خاک در سنین مختلف اختلاف معنی‌دار با منطقه شاهد از خود نشان دادند. درصد رطوبت خاک در سنین پایین (۱۰ و ۲۰ سال) اختلاف معنی‌دار با منطقه شاهد و مسیر ۳۰ سال دارد. در مسیر ۳۰ سال درصد رطوبت خاک فاقد اختلاف معنی‌دار آماری و به‌اندازه ۸ درصد بیش‌تر از منطقه شاهد است. وزن مخصوص ظاهری در سنین ۱۰ و ۱۵ سال اختلاف معنی‌داری را هم با منطقه شاهد و هم با تیمار ۳۰ سال دارند. حال‌آن‌که بین مسیر ۱۰ و ۱۵ سال و مسیر ۳۰ سال اختلاف معنی‌دار آماری در مقایسه با منطقه شاهد وجود ندارد. پس از گذشت ۳۰ سال، وزن مخصوص ظاهری بهبودیافته ولی هنوز به‌اندازه ٤ درصد بیش‌تر از منطقه شاهد است.

جدول ۳- میانگین ± انحراف معیار مربوط به تأثیر سن بر روی متغیرهای فیزیکی خاک در مسیرهای چوبکشی با استفاده از آزمون دانکن.

Table 3. Mean ± standard related to the effect of ages on soil physical properties in skid trails using Duncan's test.

Sig.	*F*-value	شاهد Control	۳۰ سال 30 - yr	۱۵ سال 15 - yr	۱۰ سال 10 - yr	متغیر Variable
0.000	24.08	33.28±5.97[a]	35.83±4.95[a]	26.72±5.10[b]	24.58±5.42[b]	رطوبت خاک (درصد) Moisture content (%)
0.000	33.42	0.66±0.10[b]	0.69±0.11[b]	0.78±0.11[a]	0.81±0.09[a]	جرم مخصوص ظاهری (گرم/سانتی‌مترمکعب) Bulk density ($g.cm^3$)
0.000	30.22	55.91±5.06[a]	49.13±5.02[b]	46.73±4.14[bc]	45.22±4.70[c]	تخلخل درشت‌دانه (درصد) Macroporosity (%)
0.001	10.60	75.95±6.29[a]	74.38±5.63[a]	67.77±6.19[b]	65.51±4.88[b]	تخلخل کل (درصد) Total porosity (%)

بیش‌ترین مقدار تخلخل درشت‌دانه در مسیر ۳۰ سال و کم‌ترین آن در مسیر ۱۰ سال مشاهده شد. در سنین پایین (۱۰ و ۱۵ سال) تخلخل درشت‌دانه فاقد اختلاف معنی‌دار باهم و به‌اندازه ۱۸ درصد با منطقه شاهد اختلاف دارد. در سنین بالا این فاکتور هنوز به آستانه بهبودی نرسیده و اختلاف معنی‌دار ۱۲ درصد را با منطقه شاهد از خود نشان می‌دهد. نتایج این پژوهش با یافته‌های (۱۵) در جنگل‌های مازندران پس از ۲۰ سال از اجرای چوبکشی زمینی تطابق دارد. آن‌ها اعلام کردند که تخلخل‌های درشت‌دانه در تردد شدید و شیب بالای ۲۰ درصد پس از گذشت زمان ۲۰ سال هنوز به آستانه بهبودی نرسیده است. مجموع تخلخل در مسیر ۱۰ و ۱۵ سال فاقد اختلاف معنی‌دار باهم، اما با منطقه شاهد اختلاف معنی‌دار ۱۳-۱۰ درصد از خود نشان می‌دهند. بیش‌ترین مقدار مجموع تخلخل خاک در مسیر ۳۰ سال مشاهده شد و فاقد اختلاف معنی‌دار با منطقه شاهد است. این نتایج به این معنی است که تخلخل‌های ریزدانه و تخلخل‌های درشت‌دانه در اثر تخریب ساختمان خاک، تعادل آن‌ها نسبت به خاک منطقه شاهد به‌هم‌خورده و فعالیت‌های تنفسی و زیستی خاک را مختل نموده است. این اختلال به‌تبع باعث ایجاد تأثیر منفی بر روی فعالیت ریزموجودات خاکی شده و روند بهبود طبیعی آن را طولانی‌تر می‌نماید. هر چند در این پژوهش مقدار تخلخل‌های درشت‌دانه بالای ٤٠ درصد بود و هنوز به مرحله بحرانی نرسیده است که نشان از بهبود تدریجی آن دارد (۵). از بین مشخصات فیزیکی خاک، تنها تخلخل درشت‌دانه خاک به آستانه بهبودی نرسیده است. سایر خصوصیات مانند وزن مخصوص ظاهری و مجموع تخلخل اگرچه بهبودیافته‌اند اما مقادیر آن‌ها به ترتیب به‌اندازه ٤/۵ درصد بیش‌تر و ۲ درصد کم‌تر از منطقه شاهد است. این تغییرات (هر چند جزئی) ممکن است ناشی از تفاوت در سیستم جنگل‌شناسی (پناهی در مقایسه با تک‌گزینی (در مسیرهای جوان‌تر))، نوع ماشین (تاف در مسیرهای مسن‌تر)، تعداد ترددها، حجم خروجی از پارسل و درنهایت توپوگرافی مسیر بوده باشد.

نتیجه‌گیری

حدود ۳۰ سال پس از اجرای فعالیت‌های چوبکشی زمینی، خصوصیات فیزیکی خاک در مسیرهای چوبکشی رهاشده در جنگل‌های شرق

هیرکانی در شمال ایران با توجه به سه تیمار شدت تردد، شیب طولی مسیر و سن مسیرهای چوبکشی موردمطالعه واقع شد. به‌طورکلی نتایج نشان داد که خصوصیات فیزیکی خاک مسیرهای چوبکشی روند مثبت بهبودی را طی کرده‌اند. مقایسه این خصوصیات در شدت ترددهای مختلف در طول مسیرهای چوبکشی نشان داد خصوصیات فیزیکی خاک، به‌استثنای رطوبت خاک، در تردد شدید نتوانسته بودند بهبود یابند، هرچند که بهبودی جزئی برای رطوبت و تخلخل کل در تردد کم و متوسط مشاهده شد. پس از گذشت ۳۰ سال در تردد شدید، مقدار رطوبت خاک (۸ درصد بیش‌تر)، وزن مخصوص ظاهری (١٤ درصد بیش‌تر)، تخلخل درشت‌دانه (۱۸ درصد کم‌تر) و مجموع تخلخل (۱۲ درصد) در مقایسه با منطقه شاهد بوده است. تغییرات معنی‌داری در خصوصیات فیزیکی خاک در شیب‌های بالای ۱۵ درصد نسبت به منطقه شاهد مشاهده شد که نشان از طولانی بودن زمان بهبود این خصوصیات در این تیمارها دارد. در شیب‌های زیر ۱۵ درصد، رطوبت خاک، تخلخل درشت‌دانه و مجموع تخلخل توانسته بود به آستانه بهبودی برسند، اما در شیب‌های بالای ۱۵ درصد فقط رطوبت وزنی خاک و تخلخل کل بهبودیافته بودند. پس از گذشت ۳۰ سال در شیب بالای ۱۵ درصد، مقدار رطوبت خاک (٦ درصد بیش‌تر)، وزن مخصوص ظاهری، (۱۱ درصد بیش‌تر) تخلخل درشت‌دانه (۱۳ درصد کم‌تر) و مجموع تخلخل (۳ درصد) در مقایسه با منطقه شاهد بوده است.

جدا از خصوصیات فنی مسیرهای چوبکشی (شیب و تردد)، پس از گذشت ۳۰ سال، وزن مخصوص ظاهری، رطوبت و مجموع تخلخل خاک بهبودیافته بود. پس‌ازاین مدت، تخلخل‌های درشت‌دانه بهبود نیافته و مقدار آن هنوز به‌اندازه ۱۲ درصد از منطقه شاهد کم‌تر بوده است و به زمان بیش‌تر از ۳۰ سال برای بهبودی کامل نیاز دارند. پس از گذشت ۳۰ سال از اجرای چوبکشی زمینی، وزن مخصوص ظاهری خاک، مجموع تخلخل و رطوبت خاک بهبودیافته، اما تخلخل درشت‌دانه هنوز بهبود نیافته بود و به زمانی بیش‌تر از ۳۰ سال نیاز دارد. با توجه به اجرای شیوه تک‌گزینی در سطح جنگل‌های هیرکانی، مسیرهای چوبکشی دائمی بوده و لازم است هنگام اجرای عملیات چوبکشی زمینی دقت بیش‌تری در شیوه‌های چوبکشی به خرج داده شود. استفاده از سرشاخه مازاد مقطوعات به‌صورت پراکنده بر روی مسیرهای چوبکشی قبل از اجرای عملیات چوبکشی نه‌تنها به کاهش شدت تخریب و تسریع در بهبود خصوصیات فیزیکی - زیستی خاک در این مسیرها کمک می‌کند بلکه شدت فرسایش و رواناب در این مسیرها می‌تواند به حداقل ممکن سوق دهد. مطالعه خصوصیات شیمیایی خاک در ارتباط با خصوصیات فیزیکی و زیستی خاک (فعالیت آنزیمی- میکروبی و تجدید حیات) و تیمارهای حفاظتی جهت احیای طبیعی این مسیرها ضروری است.

تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه/ علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان از نویسنده اول در قالب پایان‌نامه دانشجویی با کد ۱۲۳٤٥٤۰۱ صورت گرفته است. هم‌چنین بخشی از هزینه‌ها توسط بنیاد ملی نخبگان (طرح دکتر کاظم آشتیانی به شماره ۱٥/۲۸۲۸٤ مصوب خرداد ۱٤۰۲) اختصاص یافته به نویسنده دوم تأمین شده است.

داده‌ها، اطلاعات و دسترسی

این اثر منتج از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد (نویسنده اول)، با عنوان «بررسی خصوصیات فیزیکی خاک تخریب‌شده در اثر عملیات چوبکشی زمینی» در گروه جنگلداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی

گرگان است؛ که زمان انجام آن در سال ۱۴۰۱ بوده است. مکان آن حوزه آبخیز کوهمیان در شهرستان آزادشهر، استان گلستان بوده است.

تعارض منافع

نویسندگان متعهد می‌شود که در رابطه با انتشار مقاله تسلیمی تعارض منافعی وجود ندارد.

مشارکت نویسندگان

علی گنجی وطن (جمع‌آوری داده‌ها و نوشتن نسخه اولیه مقاله)، ستار عزتی (مدیریت، ویرایش و تجزیه‌وتحلیل داده‌ها)، فرزام توانکار (تجزیه‌وتحلیل، طرح تحقیق)، رامین رحمانی (طرح تحقیق).

منابع

1. Ezzati, S., Najafi, A., & Bettinger, P. (2016). Finding feasible harvest zones in mountainous areas using integrated spatial multi-criteria decision analysis. *Land Use Policy*, 59, 478-491. **https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.09.020.**
2. Horn, R., Vossbrink, J., & Becker, S. (2004). Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties. *Soil and Tillage Research*, 79(2), 207-219. **https://doi.org/10.1016/j.still.2004.07.009.**
3. Ampoorter, E., Goris, R., Cornelis, W. M., & Verheyen, K. (2007). Impact of mechanized logging on compaction status of sandy forest soils. *Forest Ecology and Management*, 241(1-3), 162-174. **https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.01.019.**
4. Lacey, S. T., & Ryan, P. J. (2000). Cumulative management impacts on soil physical properties and early growth of Pinus radiata. *Forest Ecology and Management*, 138(1-3), 321-333. **https://doi.org/10.1016/s0378-1127(00)00422-9.**
5. Masumian, A., Rabiee, M. R. S., Solgi, A., Behjou, F. K., Marchi, E., Hájek, M., & Geraeli, H. (2024). Assessment of the impact of ground-based skidding on soil physical properties: initial effect and medium-term recovery. *International Journal of Forest Engineering*, 35(2), 284-295. **https://doi.org/10.1080/14942119.2023.2286394.**
6. Naghdi, R., Solgi, A., Labelle, E. R., & Zenner, E. K. (2016). Influence of ground-based skidding on physical and chemical properties of forest soils and their effects on maple seedling growth. *European Journal of Forest Research*, 135, 949-962. **https://doi.org/10. 1007/s10342-016-0986-3.**
7. DeArmond, D., Ferraz, J. B. S., Lima, A. J. N., & Higuchi, N. (2024). Surface soil recovery occurs within 25 years for skid trails in the Brazilian Amazon. *Catena*, 234, 107568. **https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107568.**
8. Schäffer, B., Stauber, M., Müller, R., & Schulin, R. (2007). Changes in the macro-pore structure of restored soil caused by compaction beneath heavy agricultural machinery: a morphometric study. *European Journal of Soil Science*, 58(5), 1062-1073. **https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2007.00886.x.**
9. Shahriari, A., Moghadami Rad, M., & Abdie, E. (2019). The effects of logging on forest soil (Azad Shahr Kuhmian Forest). *Journal of Plant Ecosystem Conservation*, 6(13), 233-250. **https://doi.org/10.1515/9783110290479-006.**
10. Firozan, A., Hakimi, M., Hashemi, S., & Hemmati, V. (2022). Evaluating the restoration of soil physical properties and natural regeneration in skid trails (Case study: forests of Shanderman area of Giulan province). *Journal of Renewable Natural Resources Research*, 13(1), 97-104. **https://doi.org/10.52547/ifej.10.20.11.**
11. Hashemi, M., Nikooy, M., Salehi, A., & Naghdi, R. (2021). Investigation of soil

physical properties 11 years after water-bar construction on skid trail. *Forest Research and Development*, 7(2), 169-182. **https://doi.org/10.17221/108/2016-jfs**.

12. DeArmond, D., Emmert, F., Lima, A. J. N., & Higuchi, N. (2019). Impacts of soil compaction persist 30 years after logging operations in the Amazon Basin. *Soil and Tillage Research*, 189, 207-216. **https://doi.org/10.1016/j.still.2019.01.010.**
13. Solgi, A., Cerdà, A., Masumian, A., Rabiee, M. R. S., Behjou, F. K., & Vojoodi, R. G. (2023). Effectiveness of Sawdust and Rice Straw Mulch Strips to Control Runoff and Sediment Yield in Skid Trails. *Forest Science*, 69(5), 580-590. **https://doi.org/10.1093/forsci/fxad023.**
14. Sohrabi, H., Jourgholami, M., Jafari, M., Shabanian, N., Venanzi, R., Tavankar, F., & Picchio, R. (2020). Soil recovery assessment after timber harvesting based on the Sustainable Forest Operation (SFO) perspective in Iranian temperate forests. *Sustainability*, 12(7), 2874. **https://doi.org/10.3390/su12072874.**
15. Tavankar, F., Picchio, R., Nikooy, M., Jourgholami, M., Naghdi, R., Latterini, F., & Venanzi, R. (2021). Soil natural recovery process and Fagus orientalis lipsky seedling growth after timber extraction by wheeled skidder. *Land*, 10(2), 113. **https://doi.org/10.3390/land10020113.**
16. 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.**
17. Rivenshield, A., & Bassuk, N. L. (2007). Using organic amendments to decrease bulk density and increase macroporosity in compacted soils. *Arboriculture and Urban Forestry*, 33(2), 140. **https://doi.org/10.48044/jauf.2007.015.**
18. Sohrabi, H., Jourgholami, M., Majnounian, B., & Amiri, G. Z. (2016). Soil moisture recovery after timber harvest cessation on abandoned skid trails after 20 years. 8 (2), 179-174, **https:// doi.org/ 10.5194/ egusphere-egu25-4441.** [In Persian]
19. Solgi, A., Naghdi, R., Zenner, E. K., Tsioras, P. A., & Hemmati, V. (2019). Effects of ground-based skidding on soil physical properties in skid trail switchbacks. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 40(2), 341-350. **https://doi.org/10.5552/crojfe.2019.535.**