University of Tehran

Journal of Forest and Wood Products

Online ISSN: 2383-0530

Home Page: https://jfwp.ut.ac.ir

Evaluation of long-term soil compaction impacts on the restoration of soil physical properties and regeneration in skid trails of the Shirgah forests

Saeb Seifi Ghadi[1] | Meghdad Jourgholami[2] ✉ | Mohammad Jafari[3]

1. Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: vali.seifi1360@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: mjgholami@ut.ac.ir
3. Department of Reclamation of Arid and Mountainous Region, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: jafary@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received: 30 June 2023
Revised: 05 August 2024
Accepted: 14 August. 2024
Published online: 10 September 2024

Keywords:
Forest harvesting,
Ground-based logging,
Natural recovery,
Natural regeneration,
Skid trail.

ABSTRACT

In recent years, the study of recovery processes of skid trails has gained momentum. Therefore, the aim of the present study is to evaluate the long-term effects of soil compaction on the recovery of soil physical properties and regeneration in skid trails. In this research, four skid trails with age classes of 5, 15, 25 and 35 years were selected based on the last year when logging was done on the skids. Each age class was randomly selected with 3 repetitions, and three traffic intensities—low, medium, and heavy—were identified on each skid trail. In total, 72 soil samples were collected from skid trails and 24 soil samples from a control area. To evaluate regeneration on the skid trails, a plot of 40 m² was randomly established in each traffic intensity. Within each plot, regeneration was assessed by determining the species type and counting the number of seedlings of each species. Across all skid trails, bulk density, penetration resistance, and micro-porosity increased, while total porosity, macro-porosity, and soil moisture decreased with increasing traffic intensity from low to high. The natural regeneration of all species differed significantly between the skid trails and the natural forest. The findings confirm that the recovery rate is a long process and more time than 35 years is required for the full recovery of physical characteristics. Since the Hyrcanian forests are biodiversity hotspots, forest managers should pay special attention to mechanized wood harvesting operations in these areas, as the recovery of compacted soils requires decades.

Cite this article: Seifi Ghadi, S., Jourgholami, M., Jafari, M. (2024). Evaluation of long-term soil compaction impacts on the restoration of soil physical properties and regeneration in skid trails of the Shirgah forests. *Journal of Forest and Wood Products*, 77 (2), 201-215. DOI: http//doi.org/10.22059/jfwp.2024.378714.1299

© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/jfwp.2024.378714.1299

دانشگاه تهران

نشریهٔ جنگل و فرآورده‌های چوب

سایت نشریه: https://jfwp.ut.ac.ir

شاپا الکترونیکی: ۰۵۳۰-۲۳۸۳

ارزیابی اثرات بلندمدت کوبیدگی خاک بر ترمیم خصوصیات فیزیکی خاک و استقرار زادآوری در مسیرهای چوبکشی جنگل‌های حوزهٔ شیرگاه

صائب سیفی قادی[۱] | مقداد جورغلامی[۲]✉| محمد جعفری[۳]

۱. گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: vali.seifi1360@ut.ac.ir

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

۳. گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: jafary@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۰۹
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۳
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۲۰

کلیدواژه:
بهره‌برداری جنگل،
بازیابی طبیعی،
چوبکشی زمینی،
زادآوری طبیعی،
مسیر چوبکشی.

چکیده

در سال‌های اخیر، مطالعهٔ فرآیندهای بازیابی مسیرهای چوبکشی شتاب بیشتری گرفته است. بنابراین، مطالعهٔ حاضر به‌دنبال این است که آیا بازیابی کامل مشخصه‌های خاک و زادآوری طبیعی گونه‌های درختی در مسیرهای چوبکشی صورت گرفته است یا خیر. به‌منظور دستیابی به اهداف پژوهش، چهار مسیر چوبکشی با کلاسهٔ سنی ۵، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ سال براساس آخرین سالی که عملیات چوبکشی در مسیرها صورت گرفته بود، انتخاب شدند. هر مسیر چوبکشی با کلاسهٔ سنی معین با ۳ تکرار در جنگل انتخاب و در هر مسیر چوبکشی ۳ کلاسهٔ شدت ترافیک کم، متوسط و شدید مشخص شد. در مجموع در مسیرهای چوبکشی ۷۲ نمونه خاک و در منطقهٔ شاهد ۲۴ نمونه خاک برداشت شد. برای ارزیابی وضعیت زادآوری در مسیرهای چوبکشی، در هر شدت ترافیک، به‌صورت تصادفی یک پلات به ابعاد ۴۰ متر مربع پیاده شد. در تمامی مسیرهای چوبکشی با افزایش شدت ترافیک از کم به زیاد، جرم مخصوص ظاهری خاک، مقاومت به نفوذ و تخلخل ریز افزایش یافته است، درحالی‌که تخلخل کل، تخلخل درشت و درصد رطوبت خاک با افزایش شدت ترافیک از کم به زیاد، کاهش داشته‌اند. زادآوری طبیعی تمام گونه‌های موجود در مسیرهای چوبکشی و جنگل طبیعی تفاوت معنی‌داری داشتند. یافته‌ها تأیید می‌کنند که نرخ بازیابی فرایندی طولانی است و زمان بیشتری از ۳۵ سال برای بهبودی کامل خصوصیات فیزیکی لازم است. از آنجا که جنگل‌های هیرکانی کانون‌های تنوع زیستی هستند، مدیران جنگل باید توجه ویژه‌ای به عملیات برداشت مکانیزهٔ چوب در این مناطق داشته باشند، زیرا احیای خاک‌های جنگلی فشرده، چندین دهه طول می‌کشد.

استناد: سیفی قادی، صائب؛ جورغلامی، مقداد؛ جعفری، محمد (۱۴۰۳). ارزیابی اثرات بلندمدت کوبیدگی خاک بر ترمیم خصوصیات فیزیکی خاک و استقرار زادآوری در مسیرهای چوبکشی جنگل‌های حوزهٔ شیرگاه. *نشریهٔ جنگل و فرآورده‌های چوب*، ۷۷ (۲)، ۲۱۵-۲۰۱. DOI:http//doi.org/10.22059/jfwp.2024.378714.1299

© نویسندگان.
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
DOI: http//doi.org/10.22059/jfwp.2024.378714.1299

۱. مقدمه

خاک جنگل به‌عنوان دریافت‌کنندهٔ اصلی نیروهای حاصل از حمل‌ونقل ماشین‌آلات، شدیدترین تخریب‌ها را در مسیرهای چوبکشی و دپوها متحمل می‌شود [۱]. تخریب خاک ناشی از عملیات بهره‌برداری از جنگل با تغییر در تمام خواص خاک، شرایط را برای زادآوری و رشد درختان با مشکل مواجه ساخته که در نهایت می‌تواند بر تولید و پایداری اکوسیستم جنگل اثرگذار باشد [۲، ۳]. شرایط و عوامل متعددی می‌تواند بر وسعت و شدت تخریب خاک تأثیرگذار باشند که می‌توان به شرایط توده و خاک (شرایط توپوگرافی، سنگ مادر، ساختمان، بافت، میزان رطوبت و تراکم اولیهٔ خاک) و عوامل مربوط به سیستم بهره‌برداری و ماشین‌آلات مورد استفاده (روش بهره‌برداری و چوبکشی، نوع ماشین‌آلات، میزان و نوع فشار و لرزش وارد شده به خاک، تعداد تردد ماشین، جهت چوبکشی و فصل بهره‌برداری) اشاره کرد [۳، ۴].

هرچه فشردگی زیادتر و خاک متراکم‌تر شود، اثرات آن باعث کاهش قابلیت نفوذپذیری آب، افزایش وزن مخصوص خاک، تخریب خلل و فرج و کاهش حفره‌های بزرگ در خاک می‌شود [۵، ۶]. برآیند این اثرات باعث می‌شود تا رطوبت و آب موجود در خاک جنگل از دسترس نهال خارج شده و ریشه‌دوانی و رشد نهال با مشکل مواجه شود و زادآوری جنگل به مخاطره افتد [۷]. مطالعات مختلفی نشان دادند که در اثر فشردگی خاک، اختلاف مقادیر خصوصیات فیزیکی خاک از جمله وزن مخصوص ظاهری، مقاومت به نفوذ و تخلخل کل به‌ترتیب از آستانه‌های بحرانی خود (۱/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب، ۲ مگاپاسکال و حداقل ۱۰ درصد خلل و فرج) کاهش رشد ریشه و حتی در فشردگی شدید خاک، توقف رشد را به‌دنبال خواهد داشت [۴، ۸، ۹].

در مسیرهای چوبکشی به‌دلیل افزایش نور ناشی از باز شدن تاج‌پوشش در بالای مسیرهای چوبکشی، رشد ارتفاعی نهال و تراکم تجدیدحیات افزایش می‌یابد [۱۰]. خاک بدون لاشبرگ سطوح مسیرهای چوبکشی؛ برای استقرار گیاه مفید است. با این حال، ۱ تا ۳ سال پس از رها شدن مسیر چوبکشی در برزیل و کانادا، هیچ تفاوت قابل توجهی در لایهٔ لاشبرگ مسیر چوبکشی وجود نداشت [۱۱، ۱۲]. یکی دیگر از مزایایی که اغلب از اثرات مسیر چوبکشی روی پوشش گیاهی ذکر می‌شود، افزایش تنوع گونه‌ای است [۱۲، ۱۳]، اگرچه بیشتر این تنوع به شکل گیاهان علفی است، با این‌حال مسیرهای چوبکشی محیطی چالش برانگیز برای بازسازی درختان طبیعی است. بسیاری از اثرات منفی ناشی از افزایش جرم مخصوص ظاهری و استحکام خاک بیشتر از جنبه‌های مفید آن است [۱۴]. بنابراین، اثرات مثبت اولیه روی رشد پوشش گیاهی، به‌عنوان یک نتیجه از ساخت مسیرهای چوبکشی، با اثرات منفی طولانی‌مدت جبران می‌شود [۱۴].

توقف بهره‌برداری در جنگل به‌صورت مقطعی به‌عنوان یک سیاست اجرایی برای حفاظت و بازیابی نواحی جنگلی تخریب‌شده در بسیاری از نقاط جهان متداول می‌باشد [۱۵]. اخیراً در مقابل بهره‌برداری از جنگل، دیدگاه توقف بهره‌برداری از آن مطرح شده که به عدم بهره‌برداری از جنگل، دخالت ناچیز برای عملیات پرورشی و برداشت درختان آسیب‌دیده و بهبود و بازگشت جنگل به شرایط اولیهٔ خود اشاره دارد [۳]. در چند سال گذشته پس از اجرای عملیات بهره‌برداری و چوبکشی چوب، بازیابی خاک‌های تخریب‌شده مسیرهای چوبکشی مورد توجه قرار گرفته است [۳، ۴، ۵، ۶، ۱۴]. اکثر این بررسی‌ها، نشان‌دهندهٔ بازیابی طولانی‌مدت خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک هستند، که در غیاب عبور مجدد ماشین‌آلات، بازیابی خاک‌های فشرده‌شده تحت تأثیر فرآیندهای طبیعی از یک تا چندین سال و از سطح خاک شروع و سپس به‌تدریج به عمق خاک گسترش می‌یابد [۱۶].

بسیاری از مطالعاتی که به بررسی بازیابی تجدید حیات پرداخته‌اند، تنها بیان می‌کنند که پوشش گیاهی مورد مطالعه در مسیر چوبکشی بدون مشخص کردن مناطق داخل مسیر مورد ارزیابی قرار گرفته است. در اینجا لازم است که در موقعیت‌های مسیرها، شیارها، شیب مسیر، شدت ترافیک و ناحیهٔ بین مسیرها یا شیارها تمایز قائل شد، زیرا این موقعیت‌های مختلف تأثیر قابل توجه و متفاوتی بر بازسازی پوشش گیاهی دارند [۱۷، ۱۸]. بازسازی در شیار مسیرهای چوبکشی (محل رد چرخ‌ها) نسبت به مناطق دیگر مسیرها (مرکز مسیر) کمتر بوده و حاوی زیست‌تودهٔ کمتری است [۱۴، ۱۸].

در بحث مدیریت جنگل، استانداردی که تعیین می‌کند آیا مسیر چوبکشی بهبود یافته‌است یا خیر، براساس تراکم زادآوری، ارتفاع یا حجم درخت تجاری است [۱۹]. در مطالعه‌ای در رابطه با کاهش حاصخیزی رویشگاه، Wert و Thomas (۱۹۸۱) [۲۰] در تودهٔ کاج داگلاس (*Pseudotsuga menziesii*)، به افت ۷۴ درصدی در مسیرهای چوبکشی پس از ۳۲ سال در مقایسه با

منطقهٔ خارج از مسیرهای چوبکشی (شاهد) پی بردند. از نظر ساختار جنگل و بازیابی زیست‌توده، تخمین زده می‌شود که بازیابی زیست‌تودهٔ روی زمین در جنگل‌های بهره‌برداری شده به‌طور تقریبی ۶۰ سال طول می‌کشد [۲۱]، اگرچه بازیابی زیست‌تودهٔ زیرزمینی ممکن است به‌طور قابل‌توجهی طولانی‌تر شود. در مقابل، زمان بازیابی مورد نیاز برای ترکیب جامعهٔ درختی برای مطابقت با منطقهٔ دست‌نخورده ممکن است از ۵۰ تا چند صد سال طول بکشد [۳، ۱۴].

خصوصیات خاکی متأثر از حرکت ماشین‌آلات در مسیرهای چوبکشی و استقرار تجدید حیات و گونه‌های علفی در این مسیرها پس از اتمام عملیات بهره‌برداری، فرصت مناسبی برای بررسی عکس‌العمل استقرار گونه‌های مختلف گیاهی در برابر شرایط خاکی است. از آنجا که مسیرهای چوبکشی پس از اتمام عملیات بهره‌برداری باید در وهلهٔ نخست پذیرای تجدیدحیات و پوشش‌های رستنی کف جنگل باشند، شکل‌گیری شرایط جدید خاک و تفاوت آن با بسترهای دست‌نخورده و رفت و آمد نشده، نقش مهمی در نوع و نحوهٔ استقرار گونه‌های گیاهی دارد و بدون شک، ظهور و شدت حضور این گونه‌ها ارتباط مستقیم با شرایط خاکی جدید دارد. با توجه به موقعیت خاص جنگل‌های شمال کشور و لزوم حفاظت خاک جنگل، لازم است مطالعاتی در مورد روند تغییرات خاک عرصه‌های جنگلی بعد از عملیات مدیریتی اعم از بهره‌برداری، جاده‌سازی و سایر فعالیت‌های مکانیکی در ارتباط با جنگل صورت گیرد. بنابراین هدف از این مطالعه بررسی تغییرات مشخصه‌های خاک و وضعیت کمی زادآوری در مسیرهای چوبکشی رها شده و مقایسهٔ آن با مناطق شاهد در سال‌های مختلف پس از عملیات چوبکشی است. در راستای این اهداف، فرضیه‌های این پژوهش عبارتند از ۱) بین خصوصیات فیزیکی خاک مسیرهای چوبکشی در دوره‌های زمانی مختلف، تفاوت معنی‌داری وجود دارد و ۲) بین تراکم و تنوع زادآوری گونه‌های درختی در سطح مسیرهای چوبکشی در دوره‌های زمانی مختلف، تفاوت معنی‌داری وجود دارد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. منطقهٔ مورد مطالعه

محل اجرای پژوهش در سری چایباغ حوزهٔ ۶۳ ب شهرستان سوادکوه شمالی (شیرگاه) در شرق استان مازندران در شمال ایران است. منطقهٔ مورد مطالعه بین ″۴۵ ′۵۱ °۵۲ و ″۴۰ ′۵۵ °۵۲ طول شرقی و ″۲۷ ′۱۸ °۳۶ و ″۳۳ ′۲۰ °۳۶ عرض شمالی قرار دارد (شکل ۱). براساس آمار ایستگاه هواشناسی نزدیک به منطقه، میانگین بارندگی سالانه برابر با ۸۱۱/۲ میلی‌متر و متوسط دما، ۱۴/۳ درجهٔ سانتی‌گراد است. ارتفاع از سطح دریا در پارسل‌های مورد مطالعه در محدودهٔ ۲۵۰ تا ۴۵۰ متر و جهت جغرافیایی دامنه‌ها جنوبی است. با استفاده از روش دومارتن، این منطقه دارای اقلیم خیلی مرطوب و همچنین با استفاده از روش آمبرژه، این منطقه دارای اقلیم مرطوب می‌باشد. تشکیلات زمین‌شناسی این سری، کلاً مربوط به دوران سوم زمین‌شناسی و دورهٔ پلیوسن و کوارترنری بوده، سنگ‌های مادری گنکلومرای آهکی، مارن و مارنسیلتی به‌همراه آبرفت‌های جوان است. تیپ خاک موجود قهوه‌ای شسته شده با پسدوگلی و بافت آن سنگین تا بسیار سنگین است. پوشش درختی غالب منطقه، ممرز است و همراه با آن در نقاط مختلف پارسل گونه‌هایی مانند بلوط، توسکا، آزاد، شیردار، نمدار، راش، گیلاس وحشی، شمشاد و افرا دیده می‌شود. شیوهٔ جنگل‌شناسی بکار رفته در منطقهٔ مورد مطالعه، ترکیبی از تک‌گزینی و گروه‌گزینی است که منجر به ایجاد توده‌های ناهمسال شده است. قطع و تبدیل درختان با اره‌موتوری و خروج آنها از عرصه با ماشین‌آلات چوبکشی زمینی انجام شده است. سایر اطلاعات هر کدام از مسیرهای چوبکشی و پارسل‌های که در آن قرار داشتند در جدول یک آمده است.

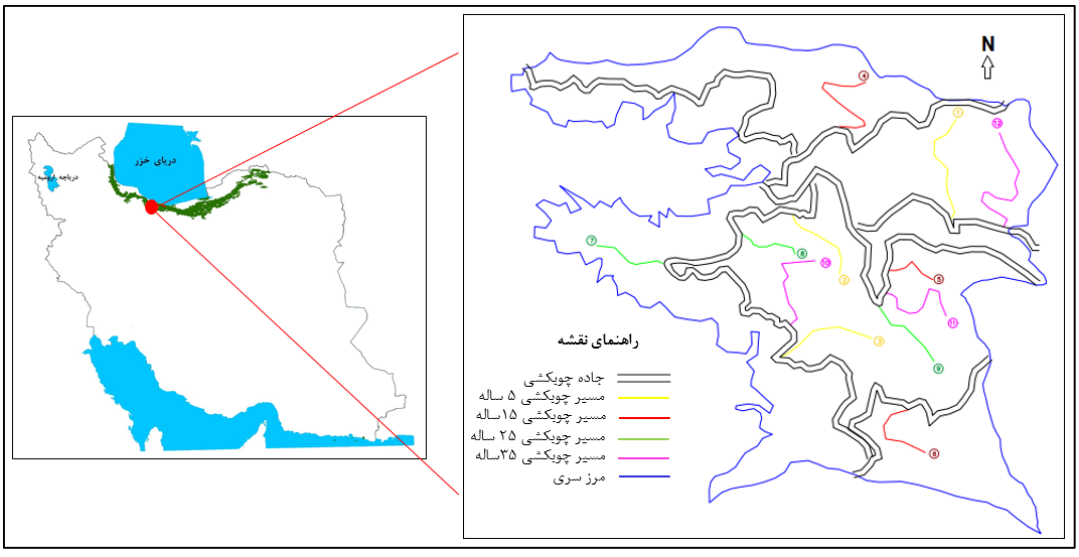
۲-۲. روش پژوهش

به‌منظور دستیابی به اهداف پژوهش، در پارسل‌های مورد مطالعه، چهار مسیر چوبکشی با کلاسه‌های سنی ۵، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ سال با جهت چوبکشی رو به پایین و شیب طولی یکسان (بدون در نظر گرفتن شیب عرضی مسیر، اثر بافت و ساختمان خاک و ارتفاع منطقه) و براساس آخرین سالی که عملیات چوبکشی در مسیرها صورت گرفته، انتخاب شدند (شکل ۱). با توجه به اجرای تحقیق بعد از اجرای طرح تنفس جنگل در جنگل‌های شمال، آخرین مسیری که عملیات چوبکشی روی آن انجام گرفته، سال ۱۳۹۵ بود. معیار و نحوهٔ تشخیص و انتخاب این مسیرها براساس مدارک و نظرات کارشناسان مجری و ناظر طرح و همچنین شواهد عینی موجود در منطقه بود.

هر مسیر چوبکشی با ۳ تکرار و در هر مسیر چوبکشی ۳ شدت ترافیک کم، متوسط و شدید شناسایی شد. با توجه به اینکه تحقیق حاضر یک مطالعهٔ گذشته‌نگر است و اطلاع دقیقی از تعداد تردد روی مسیرهای چوبکشی در دسترس نیست، بنابراین هر مسیر چوبکشی براساس فاصله از دپو به شدت ترافیک زیاد (از محل دپو تا یک سوم طول مسیر با بیشترین تعداد تردد) شدت ترافیک متوسط (از انتهای مسیر اولیه تا دو سوم طول مسیر با شدت تردد متوسط) و شدت ترافیک کم (از انتهای مسیر ثانویه تا انتهای مسیر با کمترین شدت تردد) تقسیم شد. در داخل هر شدت ترافیک، یک قطعه‌نمونه به‌طور تصادفی به ابعاد ۴ × ۱۰ متر پیاده شد و در هر قطعه‌نمونه، پنج خط به فاصلهٔ ۲ متر از هم و با نقطهٔ شروع تصادفی عمود بر مسیر چوبکشی پیاده شده و ۳ خط به‌طور تصادفی انتخاب شد. روی هر یک از این خطوط در دو نقطه، یعنی در محل عبور چرخ چپ و راست ماشین چوبکشی، نمونه‌برداری خاک صورت گرفت. برای تعیین محل برداشت نمونه در داخل جنگل نیز، به‌ازای هر خط داخل مسیر چوبکشی، یک نقطه به فاصلهٔ ۲۵ متر از نقطهٔ وسط مسیر چوبکشی، به‌صورت تصادفی تعیین شد. براساس تیمارهای مورد نظر، در مجموع در مسیرهای چوبکشی ۷۲ نمونه خاک (۴ مسیر چوبکشی × ۳ شدت ترافیک × ۳ خط نمونه × ۲ نمونه) و در منطقهٔ شاهد ۲۴ نمونه خاک برداشت شد. به‌منظور تغییرات کم در خواص خاک سعی شد که برداشت نمونه‌های خاک در مدت زمان کم (یک ماه) انجام گیرد.

جدول ۱. اطلاعات مسیرهای جوبکشی و پارسل‌های مورد مطالعه

زمان پس از عملیات چوبکشی (سال)	شماره پارسل	گونه درختی	شیب مسیر (درصد)	طول مسیر (متر)	ارتفاع از سطح دریا (متر)
۵	۱۹	افرا، توسکا، انجیلی، کلهو	۱۵±۲	۶۸۰	۲۸۰
	۲۰	افرا، انجیلی، کلهو	۱۵±۴	۴۹۵	۲۷۵
	۲۸	ممرز، انجیلی	۱۶±۱	۵۹۰	۲۹۰
۱۵	۵	ممرز، انجیلی، توسکا	۱۶±۴	۶۲۰	۳۰۰
	۱۲	انجیلی، افرا، کلهو	۱۷±۱	۳۲۰	۳۱۵
	۱۷	انجیلی، افرا، کلهو	۱۶±۲	۵۰۵	۳۵۰
۲۵	۲۲	لرگ، کلهو	۱۵±۵	۴۳۰	۲۷۰
	۲۱	ممرز، کلهو، افرا	۱۶±۳	۳۶۰	۲۹۰
	۱۴	افرا، توسکا، ون	۱۷±۱	۴۷۰	۳۷۰
۳۵	۲۷	ممرز، انجیلی	۱۷±۳	۶۰۰	۳۲۰
	۱۳	ممرز، کلهو، انجیلی	۱۶±۴	۶۱۵	۳۶۰
	۹	لرگ، افرا، انجیلی	۱۷±۴	۸۳۰	۲۸۰



شکل ۱. منطقهٔ مورد مطالعه و موقعیت هر کدام از مسیرهای چوبکشی در سری چایباغ

برای ارزیابی وضعیت زادآوری در مسیرهای چوبکشی، در هر شدت ترافیک، به‌صورت تصادفی یک پلات به ابعاد پلات‌های نمونه‌گیری خاک (۴۰ متر مربع) پیاده شد و متناظر با آن، در منطقهٔ شاهد در فاصلهٔ ۲۵ متری در داخل جنگل نیز قطعه‌نمونهٔ دیگری پیاده شد. در داخل هر یک از قطعه‌های نمونه، تجدیدحیات براساس تعیین نوع گونه و تعداد نهال‌های هر گونه که از قبل زادآوری شده بودند، آماربرداری شد.

در محل هر نقطه‌نمونه، عمق یا ضخامت لاشبرگی با استفاده از خط‌کش اندازه‌گیری و برداشته شد تا محل هر کدام از نمونه‌ها برای برداشت از خاک معدنی فراهم شود. برای تعیین میزان مقاومت به نفوذ خاک در محل‌های نمونه‌برداری از دستگاه نفوذسنج مخروطی دستی (مدل Eijkelkamp 06.01.SA) با مخروط ۶۰ درجه و حداکثر عمق نفوذ ۱ متر استفاده شد. به‌منظور اطمینان از شرایط رطوبتی یکسان در محل هر نقطه‌نمونه، سعی شد تا تمام اندازه‌گیری‌های مقاومت به نفوذ در یک روز خشک برداشت شود [۶]. از یک استوانهٔ فولادی دیوارهٔ نازک به طول ۱۰ سانتی‌متر و قطر ۵ سانتی‌متر برای نمونه‌برداری از خاک معدنی (عمق ۱۰-۰ سانتی‌متر) استفاده شد و سپس خاک بلافاصله توزین و در کیسهٔ پلاستیکی ذخیره و برچسب‌گذاری شد تا به آزمایشگاه منتقل شوند. برای تعیین وزن مخصوص ظاهری و مقدار رطوبت، نمونه‌های خاک در اجاق ثابت با دمای ثابت ۱۰۵ درجهٔ سانتی‌گراد به‌مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. برداشت نمونه‌های خاک با توجه به تأثیر شرایط اقلیمی و اکولوژیک بر مشخصه‌های مورد بررسی، در شرایط یکسان (عدم بارندگی و داشتن حالت خشک) به‌مدت یک ماه طول کشید. در این پژوهش، خصوصیات فیزیکی شامل وزن مخصوص ظاهری، تخلخل کل، مقاومت به نفوذ، اجزاء ذرات خاک (درصد رطوبت، درصد شن، سیلت و رس) مطابق جدول ۲ اندازه‌گیری و محاسبه شدند.

جدول ۲. روش‌های اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی خاک

مشخصه	واحد	روش	مرجع
ضخامت لاشبرگ	سانتی‌متر	اندازه‌گیری لایهٔ بالایی لاشبرگ	[۲۲]
جرم مخصوص ظاهری	گرم بر سانتی‌متر مکعب	استوانهٔ فولادی	[۲۳]
رطوبت خاک	درصد	خشک کردن	[۲۴]
مقاومت به نفوذ	مگاپاسکال	اندازه‌گیری با نفوذسنج دستی	[۳]
تخلخل درشت	درصد	روش دفع آب	[۲۵]
تخلخل کل	درصد	$\text{تخلخل کل} = \frac{\text{حجم نمونه خاک}}{1 - \frac{\text{جرم مخصوص ظاهری}}{2/65}}$	[۳]
اجزای ذرات خاک	درصد	روش هیدرومتری	[۲۶]

۲-۳. تجزیه و تحلیل داده‌ها

به‌منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS 17، ابتدا با آزمون کولموگروف- اسمیرنوف، نرمال بودن داده‌ها بررسی شد. به‌منظور بررسی اثر تیمارهای سن و شدت ترافیک بر مقدار بازیابی خصوصیات مورد بررسی خاک و تجدیدحیات، از تجزیه واریانس دو طرفه استفاده شد. همگنی واریانس بین تیمارها با آزمون لون[1] در سطح یک درصد انجام شد. در صورتی‌که داده‌ها دارای توزیع نرمال بوده و اثر هر یک از عوامل در تجزیه و تحلیل واریانس معنی‌دار باشد، از آزمون‌های مقایسه‌ای چندگانه دانکن برای گروه‌بندی مقدار بازیابی مشخصه‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک استفاده شد. برای بررسی رابطهٔ بین خواص خاک و زادآوری گونه‌ها از همبستگی پیرسون در سطح معنی‌داری یک درصد استفاده شد.

[1]Levene test

۳. یافته‌های پژوهش

۳-۱. بازیابی خصوصیات فیزیکی خاک

تجزیه و تحلیل اثر سن مسیر چوبکشی، شدت ترافیک و اثرات متقابل آن‌ها بر مقادیر خصوصیات فیزیکی خاک با استفاده از آنالیز واریانس در جدول ۳، بیانگر وجود تأثیر معنی‌دار سن مسیر چوبکشی، شدت ترافیک و همچنین اثر متقابل آن‌ها بر تمام خصوصیات اندازه‌گیری شده بود.

جدول ۳. تجزیه و تحلیل واریانس اثر سن مسیر چوبکشی، شدت ترافیک و اثر متقابل آن‌ها بر خصوصیات فیزیکی خاک

خصوصیات فیزیکی خاک	سن مسیر			ترافیک			سن مسیر× ترافیک		
	درجه آزادی	F	*P* value	درجه آزادی	F	*P* value	درجه آزادی	F	*P* value
جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌مترمکعب)	۳	۹/۲۹	۰/۰۰۰**	۲	۱۲/۵۴	۰/۰۰۰**	۶	۱۸/۸۳	۰/۰۱۴*
مقاومت به نفوذ (مگاپاسکال)	۳	۲/۸۷	۰/۰۰۰**	۲	۲۳/۴۶	۰/۰۰۰**	۶	۰/۸۷	۰/۰۰۰**
تخلخل کل (درصد)	۳	۱۴/۴۰	۰/۰۰۵**	۲	۰/۸۹	۰/۰۰۰**	۶	۵۰/۷۱	۰/۰۰۰**
تخلخل درشت (درصد)	۳	۱/۳۷	۰/۰۰۰**	۲	۰/۱۴	۰/۰۰۶**	۶	۳۶/۷۳	۰/۰۰۵**
تخلخل ریز (درصد)	۳	۰/۳۸	۰/۰۰۰**	۲	۴/۵۸	۰/۰۰۰**	۶	۱۱/۴۷	۰/۰۰۰**
محتوی رطوبت (درصد)	۳	۰/۸۰	۰/۰۲۱*	۲	۱/۲۶	۰/۰۱۷*	۶	۲۱/۱۹	۰/۰۱۱*

نکته: * $P<$ ۰/۰۵؛ ** $P<$۰/۰۱؛ ^{ns}: عدم تفاوت معنی‌دار.

در تمامی مسیرهای چوبکشی با افزایش شدت ترافیک از کم به زیاد، جرم مخصوص ظاهری، مقاومت به نفوذ و تخلخل ریز افزایش یافته است، یعنی شدت ترافیک زیاد تأثیر منفی روی این خصوصیات گذاشته است (جدول ۴). بیشترین و کمترین مقدار جرم مخصوص ظاهری، مقاومت به نفوذ و تخلخل ریز به‌ترتیب در ترافیک زیاد مسیر ۵ سال (۱/۳۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب، ۳/۸۸ مگاپاسکال و ۲۸/۴۵ درصد) و ترافیک کم مسیر ۳۵ سال (۱/۱۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب، ۲/۲۵ مگاپاسکال و ۱۹/۷۷ درصد) به‌دست آمده است. در مقابل این خصوصیات، تخلخل کل، تخلخل درشت و درصد رطوبت خاک با افزایش شدت ترافیک از کم به زیاد، کاهش داشته‌اند، به‌طوری‌که بیشترین و کمترین مقدار این خصوصیات به‌ترتیب در ترافیک کم مسیر ۳۵ سال (۶۹/۹۱ درصد، ۱۴/۵۰ درصد و ۳۷/۰۹ درصد) و ترافیک زیاد مسیر ۵ سال (۵۳/۷۷ درصد، ۲۵/۳۲ درصد و ۲۰/۷۷ درصد) قرار دارد. در تمامی مسیرهای چوبکشی و در هر سه کلاسهٔ شدت ترافیک، مقادیر جرم مخصوص ظاهری، مقاومت به نفوذ و تخلخل ریز بیشتر از منطقهٔ شاهد و مقادیر تخلخل کل، تخلخل درشت و درصد رطوبت خاک کمتر از منطقهٔ شاهد هستند. ضمن اینکه با گذشت ۳۵ سال از عملیات چوبکشی، مقادیر خصوصیات خاک در هر سه کلاسهٔ ترافیک، با منطقهٔ شاهد تفاوت معنی‌داری دارند.

روند تغییرات مقادیر خصوصیات فیزیکی خاک در ۳۵ سال پس از عملیات چوبکشی نشان داد که این خصوصیات در حال بازیابی هستند، اما این بهبود خواص خاک هنوز با منطقهٔ شاهد تفاوت معنی‌داری دارند. ۳۵ سال پس از عملیات چوبکشی، جرم مخصوص ظاهری، مقاومت به نفوذ و تخلخل ریز در عمق ۱۰-۰ سانتی‌متری خاک به‌ترتیب ۱۵/۴۶، ۴۰/۲۳ و ۱۸/۴۴ درصد بالاتر از منطقهٔ شاهد بود، در حالی‌که برای تخلخل کل، تخلخل درشت و محتوای رطوبت خاک به‌ترتیب به میزان ۱۱/۰۸ درصد و ۱۹/۶۲ درصد و ۱۴/۴۶ درصد کمتر از منطقه شاهد بودند (شکل ۲). با گذشت سال‌های مختلف از عملیات چوبکشی، از مسیر ۵ سال تا ۳۵ سال، روند تغییرات خواص خاک در حال بهبودی است.

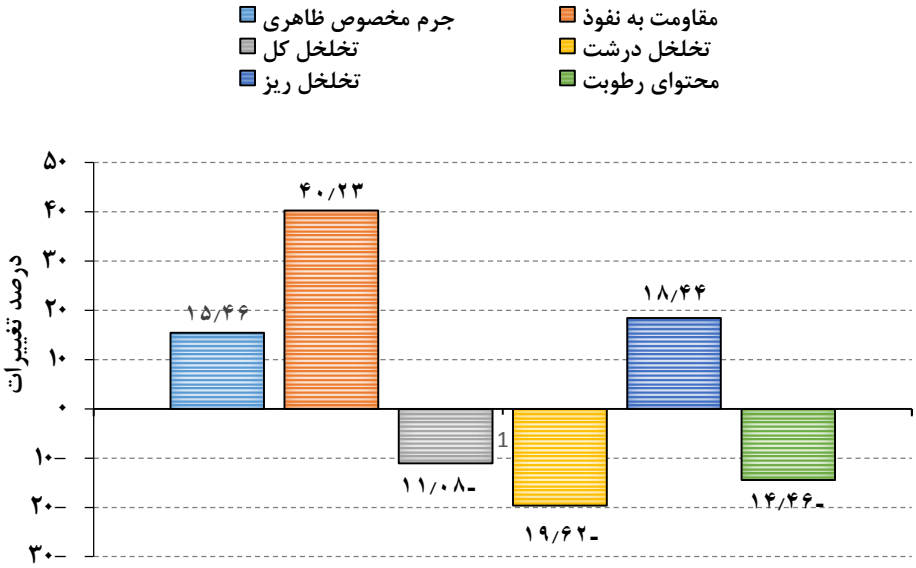
۳-۲. زادآوری مسیرهای چوبکشی

تجزیه و تحلیل مربوط به زادآوری در مسیرهای چوبکشی نشان داد که اثر سن مسیر چوبکشی، شدت ترافیک و همچنین اثر متقابل آنها بر تراکم زادآوری معنی‌دار است (جدول ۵). اما در رابطه با تنوع زادآوری در مسیرهای چوبکشی، فقط سن مسیر چوبکشی اثر معنی‌داری را داشته است.

جدول ٤. میانگین (± اشتباه معیار) خصوصیات فیزیکی خاک در شدت ترافیک‌های مختلف با آزمون دانکن

منبع تغییرات		خصوصیات فیزیکی خاک					
سن مسیر چوبکشی (سال)	شدت ترافیک	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	مقاومت به نفوذ (مگاپاسکال)	تخلخل کل (درصد)	تخلخل درشت (درصد)	تخلخل ریز (درصد)	محتوی رطوبت (درصد)
۵	کم	۱/۲۴ ^{b}±۰/۰۳	۳/۳۷ ^{b}±۰/۰۷	۵۸/۵۳ ^{b}±۰/۶۷	۳۳/۰۹ ^{b}±۱/۰۳	۲۵/۴۴ ^{b}±۱/۰۳	۲۸/۴۱ ^{b}±۲/۲۱
	متوسط	۱/۲۸ ^{b}±۰/۰۳	۳/۵۶ ^{ab}±۰/۰۷	۵۶/۱۵ ^{b}±۰/۷۱	۲۸/۸۳ ^{c}±۰/۹۳	۲۷/۳۲ ^{ab}±۰/۹۳	۲۵/۲۸ ^{bc}±۲/۲۱
	زیاد	۱/۳۴ ^{a}±۰/۰۳	۳/۸۸ ^{a}±۰/۰۹	۵۳/۷۷ ^{c}±۰/۶۷	۲۵/۳۲ ^{c}±۱/۰۳	۲۸/۴۵^{a}±۱/۰۳	۲۰/۷۷ ^{c}±۲/۲۱
	شاهد	۰/۹۵ ^{c}±۰/۰۵	۱/۸۷ ^{c}±۰/۱۱	۷۵/۰۲ ^{a}±۰/۶۷	۵۸/۶۶ ^{a}±۰/۹۳	۱۶/۳۶ ^{c} ±۰/۹۳	۴۱/۸۱ ^{a}±۳/۴۸
۱۵	کم	۱/۲۳ ^{b}±۰/۰۲	۳/۱۷ ^{b}±۰/۰۸	۶۳/۹۱ ^{b}±۰/۶۷	۳۹/۷۹ ^{b}±۱/۰۳	۲۴/۱۲ ^{b}±۱/۰۳	۳۲/۵۷ ^{b}±۲/۲۱
	متوسط	۱/۲۵ ^{b}±۰/۰۲	۳/۳۳ ^{ab}±۰/۰۸	۶۰/۱۵ ^{bc}±۰/۶۷	۳۳/۶۳ ^{c}±۰/۹۳	۲۶/۵۲ ^{ab}±۰/۹۳	۲۶/۱۳ ^{c}±۲/۲۱
	زیاد	۱/۳۱ ^{a}±۰/۰۳	۳/۴۲ ^{a}±۰/۰۸	۵۸/۷۷ ^{c}±۰/۶۷	۳۱/۶۳ ^{c}±۱/۰۳	۲۷/۱۴ ^{a}±۱/۰۳	۲۲/۳۳ ^{c}±۲/۲۱
	شاهد	۰/۹۸ ^{c}±۰/۰۴	۱/۶۲ ^{c}±۰/۱۱	۷۷/۴۰ ^{a}±۰/۶۷	۶۰/۲۳ ^{a}±۰/۹۳	۱۷/۱۷ ^{c}±۰/۹۳	۴۲/۷۶ ^{a}±۳/۴۸
۲۵	کم	۱/۱۹ ^{b}±۰/۰۲	۲/۹۲ ^{c}±۰/۰۸	۶۶/۹۱ ^{b}±۰/۶۷	۴۵/۳۷ ^{b}±۱/۰۳	۲۱/۵۴ ^{b}±۱/۱۳	۳۴/۱۳ ^{b}±۲/۲۱
	متوسط	۱/۲۲ ^{b}±۰/۰۲	۳/۰۶ ^{b}±۰/۰۸	۶۲/۱۵ ^{c}±۰/۶۷	۳۸/۴۰ ^{c}±۰/۹۳	۲۳/۷۵ ^{ab}±۱/۰۲	۳۲/۶۲ ^{bc}±۲/۲۱
	زیاد	۱/۲۸ ^{a}±۰/۰۲	۳/۲۳ ^{a}±۰/۰۸	۶۰/۷۷ ^{c}±۰/۶۷	۳۵/۲۱ ^{c}±۱/۰۳	۲۵/۵۶ ^{a}±۱/۱۳	۳۰/۵۶ ^{c}±۲/۲۱
	شاهد	۰/۹۶ ^{c}±۰/۰۴	۱/۷۵ ^{d}±۰/۱۵	۷۸/۴۰ ^{a}±۰/۶۷	۶۰/۲۰ ^{a}±۰/۹۳	۱۸/۲۰ ^{c}±۱/۰۲	۴۲/۴۳ ^{a}±۳/۴۸
۳۵	کم	۱/۱۳ ^{b}±۰/۰۲	۲/۲۵ ^{b}±۰/۰۸	۶۹/۹۱ ^{b}±۰/۶۷	۵۰/۱۴^{b}±۱/۰۲۸	۱۹/۷۷ ^{b}±۱/۱۳	۳۷/۰۹ ^{b}±۲/۲۱
	متوسط	۱/۱۷ ^{ab}±۰/۰۲	۲/۴۷ ^{ab}±۰/۰۸	۶۶/۱۵ ^{b}±۰/۶۷	۴۵/۵۲ ^{c}±۰/۹۳	۲۰/۶۳ ^{b}±۱/۰۲	۳۵/۸۶ ^{bc}±۲/۲۱
	زیاد	۱/۲۰ ^{a}±۰/۰۲	۲/۷۲ ^{a}±۰/۰۸	۶۲/۷۷ ^{c}±۰/۶۷	۴۰/۰۲ ^{c}±۱/۰۳	۲۲/۷۵ ^{a}±۱/۱۳	۳۲/۴۲ ^{c}±۲/۲۱
	شاهد	۰/۹۷ ^{c}±۰/۰۴	۱/۷۱ ^{c}±۰/۱۵	۷۷/۸۶ ^{a}±۰/۶۷	۶۰/۴۱ ^{a}±۰/۹۳	۱۷/۴۵ ^{c}±۱/۰۲	۴۳/۹۲ ^{a}±۳/۴۸

حروف لاتین نامتشابه، نشانه معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد است



شکل ۲. درصد تغییرات بازیابی خصوصیات فیزیکی خاک در ۳۵ سال پس از عملیات چوبکشی

جدول ۵. تجزیه و تحلیل واریانس اثر سن مسیر چوبکشی، شدت ترافیک و اثر متقابل آن‌ها بر زادآوری

منبع تغییرات	تراکم زادآوری			تنوع زادآوری		
	درجه آزادی	F	*P* value	درجه آزادی	F	*P* value
سن مسیر	۳	۱۷/۷۰	۰/۰۰۰**	۳	۱۴/۴۰	۰/۰۲۱*
ترافیک	۲	۹/۲۹	۰/۰۰۵**	۲	۱/۳۷	۰/۱۴۳ns
سن مسیر× ترافیک	۶	۲/۸۷	۰/۰۱۴*	۶	۰/۳۸	۰/۲۶۶ns

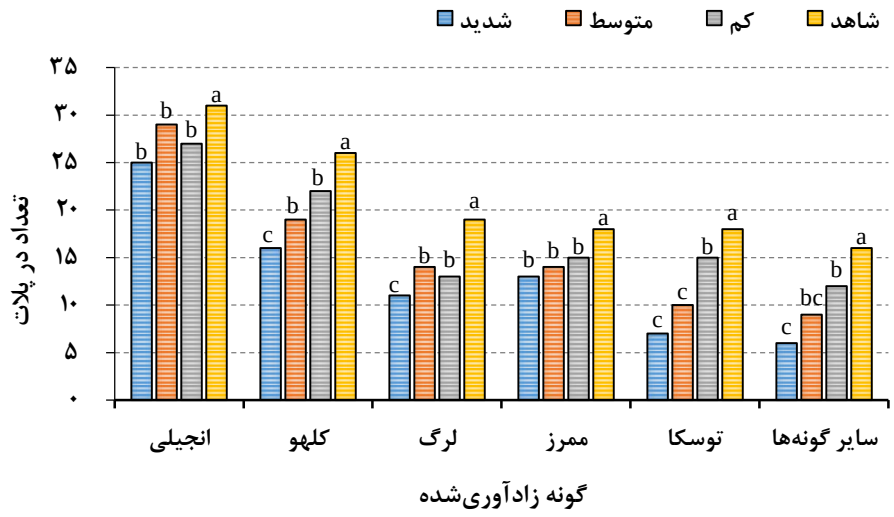
نتایج بررسی زادآوری مستقر شده در شدت ترافیک‌های مسیرهای چوبکشی نشان داد که با افزایش شدت ترافیک در هر چهار مسیر چوبکشی، تعداد زادآوری کاهش یافته است (جدول ۶). همچنین در مسیرهای چوبکشی با سن کم، تراکم زادآوری کمتر از مسیر چوبکشی با سن زیاد است. مشخص است که با افزایش سن مسیر چوبکشی و کاهش شدت ترافیک از زیاد به کم تعداد زادآوری افزایش یافته است. به‌طوری‌که کمترین تعداد زادآوری در مسیر چوبکشی ۵ ساله و در شدت ترافیک زیاد به‌دست آمد (۴۴ اصله در پلات)، در حالی‌که بیشترین تعداد زادآوری در مسیر چوبکشی ۳۵ ساله و شدت ترافیک کم (۱۰۲ اصله در پلات) به‌دست آمد. تراکم زادآوری در تمام مسیرهای چوبکشی و هر سه کلاسه شدت ترافیک، کمتر از منطقهٔ شاهد (تخریب‌نشده) بود و با آن تفاوت معنی‌داری داشتند (جدول ۶).

جدول ٦. میانگین (± اشتباه معیار) تراکم زادآوری (تعداد در پلات) در ترافیک‌های مختلف مسیرهای چوبکشی

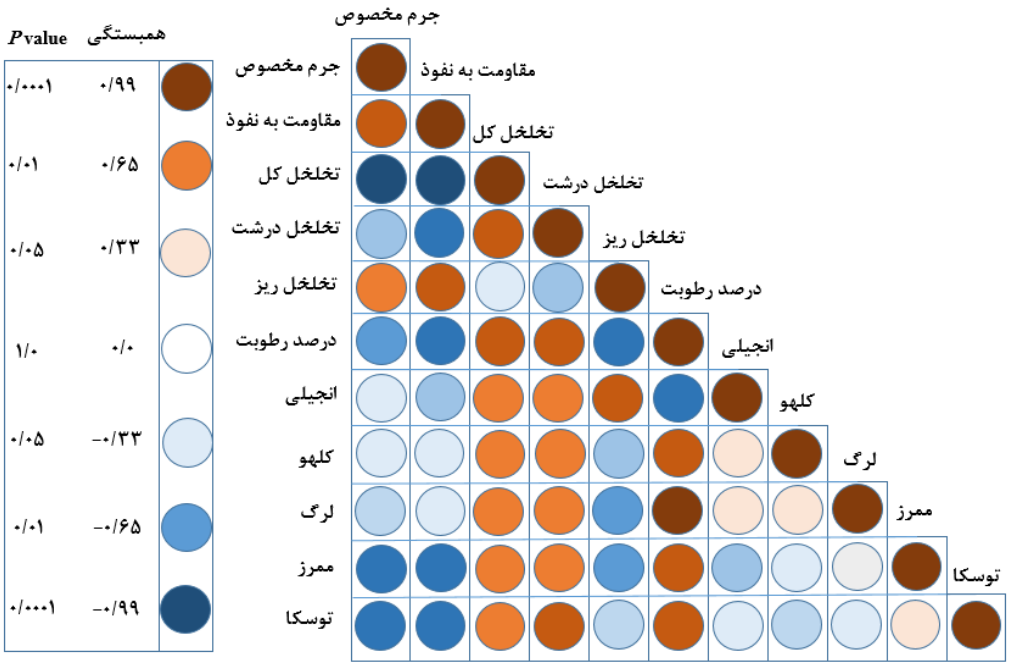
مسیرچوبکشی (سال)	شدت ترافیک			
	شاهد	شدید	متوسط	کم
۵	۱۱۵ ^{a}±۱۳	۴۴ ^{c}±۱۲	۵۷ ^{bc}±۱۲	۶۴ ^{b}±۱۲
۱۵	۱۲۱ ^{a}±۱۳	۵۶ ^{c}±۱۳	۶۶ ^{b}±۱۳	۷۱ ^{b}±۱۳
۲۵	۱۱۰ ^{a}±۱۴	۶۹ ^{c}±۱۴	۷۴ ^{c}±۱۴	۸۵ ^{b}±۱۴
۳۵	۱۲۷ ^{a}±۱۳	۸۲ ^{c}±۱۲	۹۳ ^{bc}±۱۲	۱۰۲ ^{b}±۱۲

بررسی تغییرات گونه‌ای با گذشت ۳۵ سال پس از عملیات چوبکشی در شکل ۳ نشان داد که زادآوری گونه‌های انجیلی (اکثراً ریشه‌جوش)، کلهو، لرگ، ممرز و توسکا دارای بیشترین زادآوری بودند. بیشترین زادآوری گونه انجیلی مربوط به شدت ترافیک متوسط بود، در حالی‌که بیشترین زادآوری کلاسهٔ سایر گونه‌ها در شدت ترافیک کم به‌دست آمده است. تحت تأثیر عملیات چوبکشی و با گذشت ۳۵ سال از این عملیات، فراوانی هر کدام از گونه‌ها در مسیرهای چوبکشی و هر سه کلاسه ترافیک، کمتر از منطقهٔ شاهد بوده است و با آن تفاوت معنی‌دار دارند.

نتایج تجزیه‌وتحلیل همبستگی نشان داد که بیشتر خصوصیات اندازه‌گیری‌شده خاک و زادآوری مستقر شده در مسیرهای چوبکشی با یکدیگر همبستگی معنی‌داری دارند (شکل ۴). جرم مخصوص ظاهری، مقاومت به نفوذ و تخلخل ریز با هم همبستگی معنی‌دار مثبتی دارند، در حالی‌که این خصوصیات با تخلخل کل، تخلخل درشت، درصد رطوبت و زادآوری گونه‌های درختی، همبستگی‌معنی‌دار منفی دارند. تخلخل کل، تخلخل درشت و محتوای رطوبت خاک با همدیگر و با زادآوری گونه‌ها همبستگی مثبت دارند. زادآوری انجیلی با زادآوری کلهو و لرگ، همبستگی مثبت و با زادآوری ممرز و توسکا، همبستگی منفی دارد. همبستگی زادآوری کلهو با لرگ مثبت، اما با ممرز و توسکا منفی است. همبستگی لرگ با ممرز و توسکا منفی و همبستگی ممرز و توسکا با هم مثبت بوده است.



شکل ۳. میانگین فراوانی زادآوری گونه‌های مختلف در شدت ترافیک‌های مختلف ۳۵ سال پس از عملیات چوبکشی



شکل ٤. رابطهٔ همبستگی پیرسون بین خصوصیات فیزیکی خاک و زادآوری گونه‌ها در مسیرهای چوبکشی در سطح یک درصد

۴. بحث

۴-۱. بازیابی خصوصیات فیزیکی خاک

با افزایش شدت ترافیک از کم به زیاد در تمام مسیرهای چوبکشی، جرم مخصوص ظاهری، مقاومت به نفوذ و تخلخل ریز افزایش می‌یابد که این نتایج با تحقیقات Sohrabi و همکاران (۲۰۲۲) [۳]، Ezzati و همکاران (۲۰۱۲) [۵] و Zenner و همکاران (۲۰۰۷) [۲۷]، همخوانی دارد. جرم مخصوص ظاهری، مقاومت به نفوذ و تخلخل ریز در مسیرهای چوبکشی بیشتر از منطقهٔ دست‌نخورده است که این مسئله رابطهٔ مستقیم با کوبیدگی خاک دارد. از آنجا که نیروی وارده به خاک سبب تغییر مکان ذرات

شده و اثرات کوبیدگی و تنش‌های برشی به‌دنبال آن ایجاد می‌شود، سبب نزدیک شدن و به هم پیوستن ذرات خاک و به‌دنبال آن، افزایش این خصوصیات می‌شود که این افزایش در شدت ترافیک زیاد بیشتر از حالت‌های دیگر است.

تشدید تغییرات خاک و بیشتر بودن جرم مخصوص ظاهری، مقاومت به نفوذ و تخلخل ریز در ترافیک شدید نسبت به ترافیک کم، ممکن است به دلایلی از جمله بالا بودن رطوبت خاک حین عملیات چوبکشی در مقایسه با تردد کم، حجم چوب‌آلات خروجی بیشتر از عرصهٔ مورد نظر و تعداد تردد بیشتر، کمتر شدن ضخامت لایهٔ لاشبرگ، میزان اختلاط مواد آلی با خاک و در نهایت فعالیت کم موجودات خاکزی مرتبط باشد [۱۴]. بازیابی خصوصیات خاک غیرمنتظره نبود، زیرا نشان داده شده است که خاک‌های سطحی، خواص فیزیکی مختلفی را در انواع بافت‌ها و اقلیم‌ها بازیابی می‌کنند [۱۴]. همچنین عدم بازیابی کامل این خصوصیات بعد از ۳۵ سال از عملیات چوبکشی با مطالعهٔ قبلی انجام شده در جنگل خیرود مطابقت دارد [۳].

مقاومت به نفوذ در تمام مسیرهای چوبکشی و در هر سه کلاسهٔ ترافیک (به‌خصوص در ترافیک شدید) بیشتر از منطقهٔ دست‌نخورده است و با همدیگر و منطقهٔ دست‌نخورده تفاوت معنی‌داری دارند. شاخص مقاومت به نفوذ خاک (که اندازه‌گیری غیر مستقیم ارتباط بین منافذ خاک و رشد ریشه درختان است)، با کاهش منافذ خاک در اثر کوبیدگی، افزایش می‌یابد. تغییرات بیشتر (افزایش) در جرم مخصوص ظاهری در شدت ترافیک کم و برای مقاومت به نفوذ در شدت ترافیک زیاد، می‌تواند به این دلیل باشد که زمانی‌که تغییرات جرم مخصوص ظاهری تقریباً ثابت شده و افزایش معنی‌داری ندارد، مقاومت به نفوذ همچنان به روند صعودی خود ادامه می‌دهد. رابطهٔ غیر خطی بین این دو فاکتور در کلاسه‌های بافتی مختلف، از ماسه‌ای تا رسی، توسط محققانی چون Ampoorter و همکاران (۲۰۱۰) [۴] و Whalley و همکاران (۲۰۰۵) [۲۹] گزارش شده است.

در مقابل جرم مخصوص ظاهری، مقاومت به نفوذ و تخلخل ریز، نتایج نشان داد که تخلخل کل، درشت و درصد رطوبت در شدت ترافیک زیاد در تمام بازه‌های زمانی پس از عملیات چوبکشی کمتر شده است که با نتایج Naghdi و همکاران (۲۰۱۶) [۲] و Sohrabi و همکاران (۲۰۲۲) [۳]، Ezzati و همکاران (۲۰۱۲) [۵] و Jourgholami و همکاران (۲۰۱۸) [۶] مطابقت دارد. در اثر چوبکشی زمینی و اعمال فشار بیش از ظرفیت باربری، خاک در معرض فشار قرار گرفته و حجم منافذ خاک کاهش پیدا می‌کند. این تنش بیشتر روی تخلخل‌های درشت به نسبت تخلخل‌های ریز تأثیرگذار بوده که باعث کاهش تخلخل‌های درشت و افزایش تخلخل‌های ریز می‌شود [۳]. کمترین میزان تخلخل خاک در مسیر ۵ ساله و شدت ترافیک زیاد، ۵۳/۷۷ درصد است که می‌توان گفت به مقدار بحرانی حداقل ۱۰ درصد حجم کل خاک نرسیده [۴] ولی با منطقهٔ شاهد تفاوت معنی‌داری دارد.

رطوبت خاک، میزان باربری و تراکم‌پذیری خاک را تعیین کرده و به‌عنوان مهمترین عامل تعیین‌کنندهٔ شدت و بزرگی جرم مخصوص ظاهری در موقعی که بار بر خاک اعمال می‌شود، محسوب می‌شود [۳۰]. کاهش بیشتر رطوبت خاک را در شدت ترافیک زیاد می‌توان این‌طور توجیه کرد که بین جرم مخصوص ظاهری و ظرفیت رطوبتی خاک همبستگی منفی وجود دارد و این همبستگی نشان‌دهندهٔ کاهش ظرفیت رطوبتی به‌دلیل نزدیک شدن ذرات حین کوبیدگی و جهت‌گیری مجدد ذرات خاک با افزایش جرم مخصوص ظاهری است. در مسیرهای چوبکشی، پایین بودن رطوبت خاک به‌خصوص در شدت ترافیک زیاد، نسبت به منطقهٔ دست‌نخورده و تفاوت معنی‌دار با آن ممکن است به‌دلیل حذف لایهٔ لاشبرگی در طی فرآیند تردد ماشین باشد. عدم وجود لایهٔ لاشبرگ از یک طرف باعث کاهش رطوبت خاک (به‌دلیل عدم نفوذ آب و رواناب)، تخلخل و نفوذپذیری شده و از طرف دیگر باعث کاهش قابلیت تحمل خاک در اثر تنش وارده به آن و در نهایت کوبیده شدن خاک می‌شود [۳۱].

با گذشت ۳۵ سال از عملیات چوبکشی، جرم مخصوص ظاهری، مقاومت به نفوذ و تخلخل ریز در عمق ۱۰-۰ سانتی‌متری خاک بهبود یافته‌اند اما هنوز هم به‌ترتیب ۱۵/۴۶ درصد، ۴۰/۲۳ درصد و ۱۸/۴۴ درصد بیشتر از منطقهٔ دست‌نخورده است. در حالی‌که تخلخل کل، درشت و درصد رطوبت به‌ترتیب به‌میزان ۱۱/۰۸ درصد، ۱۹/۶۲ درصد و ۱۴/۴۶ درصد بیشتر از منطقهٔ دست‌نخورده هستند. مشخص است که در میان این خصوصیات، مشخصه مقاومت به نفوذ به مدت زمان بیشتری تا بازیابی کامل نیاز دارد و با این روند بازیابی، تخلخل کل سریع‌تر از سایر خصوصیات به بازیابی کامل خواهد رسید. ۳۵ سال پس از عملیات چوبکشی، جرم مخصوص ظاهری از مقدار آستانهٔ ۱/۵۵-۱/۴۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب پایین‌تر است [۳۲]، که بیانگر روند بازیابی برای این ویژگی است.

بازیابی تخلخل خاک در این مطالعه با نتایج Croke و همکاران (۲۰۰۱) [۳۳] که اعلام کردند رسیدن به بازیابی کامل برای تخلخل کل بعد از یک دوره ۲۰ تا ۳۰ ساله محقق می‌شود، همخوانی دارد. تجمع لاشبرگ مناسب (نسبت C/N پایین) در سطح خاک با ایجاد یک میکروکلیما، باعث ایجاد شرایط مناسب برای فعالیت موجودات خاکزی می‌شود و موجودات خاکزی با ایجاد حفره‌هایی در خاک باعث به گردش درآمدن اکسیژن و تبادل هوای خاک با اتمسفر، تسریع ریشه‌دوانی گیاه و تجزیهٔ لایهٔ لاشبرگ آلی، هم به حفظ قوام و دوام خاکدانه‌های خاک [۳۴] و به تسریع کاهش کوبیدگی و بهبود تخلخل و تهویه خاک کمک می‌کند [۳۱]. محتوی رطوبت خاک در سال‌های مختلف پس از اجرای عملیات چوبکشی، از مسیر چوبکشی ۵ ساله به‌سمت مسیر چوبکشی ۳۵ ساله افزایش یافته است که این ممکن است به‌دلیل کاهش تراکم خاک و افزایش لایهٔ لاشبرگ سطح خاک (با توجه به پهن‌برگ بودن درختان و ریزش برگ در فصل خزان)، افزایش زبری سطح خاک، جذب ضربات باران، افزایش نفوذپذیری آب و کاهش رواناب سطح خاک از طریق منافذ بیشتر باشد [۵]. باتوجه به اجرای شیوهٔ تک‌گزینی در حدود ۳ الی ۴ دههٔ گذشته در جنگل‌های شمال، این مطالعه در مقایسه با سایر مطالعات مدت زمان طولانی‌تری را برای ارزیابی ترمیم خصوصیات خاک بعد از عملیات چوبکشی در نظر گرفت و نتایج به‌طور کلی نشان داد که خصوصیات فیزیکی خاک هنوز به بازیابی کامل و شرایط اولیهٔ خود، یعنی قبل از بهره‌برداری نرسیدند.

۴-۲. زادآوری مسیرهای چوبکشی

نتایج این تحقیق نشان داد که تمام بازه‌های مختلف پس از عملیات چوبکشی در مسیرهای چوبکشی با شدت ترافیک‌های مختلف، اختلاف در تراکم و تنوع زادآوری گونه‌های مختلف به اندازه‌ای که بین جنگل طبیعی و مسیر چوبکشی وجود دارد، نیست. همانگونه که آنالیز واریانس نشان داد، اثر سن مسیر چوبکشی روی تراکم و تنوع زادآوری اثر معنی‌داری دارد، در حالی‌که شدت ترافیک و اثر متقابل سن مسیر و شدت ترافیک روی تنوع زادآوری معنی‌دار نیست. Salehi و همکاران (۲۰۱۲) [۳۵] در مطالعهٔ خود به این نتیجه رسیدند که در رابطه با وضعیت زادآوری بین مسیر چوبکشی و جنگل طبیعی اختلاف معنی‌دار وجود دارد و پس از گذشت حدود ۱۰ سال، شدت‌های مختلف تردد در ایجاد تغییرات زادآوری چندان تأثیرگذار نیست (به‌جز سال‌های نخستین بعد از اتمام عملیات چوبکشی).

بیشترین و کمترین تعداد نهال به‌ترتیب در بخش ترافیک کم و زیاد قرار دارد که با نتایج Ezzati و همکاران (۲۰۱۲) [۵] و Zenner و همکاران (۲۰۰۷) [۲۷] مطابقت دارد. تغییرات خواص خاک و کف جنگل ممکن است به‌طور غیر مستقیم بر تولید و رشد پوشش گیاهی و درختی تأثیر بگذارد. تخریب وارد شده به ساختمان خاک در اثر رفت و آمد ماشین‌های چوبکشی، حجم تخلخل‌های درشت را کاهش داده و سهم تخلخل‌های ریزدانه را افزایش می‌دهد و در نهایت قدرت نگهداری آب در خاک برای مدت کوتاهی افزایش می‌یابد که این تغییرات باعث کاهش ریشه‌دوانی، رشد قطری و ارتفاعی نهال‌ها در طولانی مدت می‌شود [۳، ۵، ۳۲].

زادآوری طبیعی تمام گونه‌های موجود در مسیرهای چوبکشی و جنگل طبیعی تفاوت معنی‌داری داشتند. نتایج نشان داد که ۳۵ سال پس از عملیات چوبکشی، زادآوری دو گونهٔ انجیلی و کلهو در هر دو منطقهٔ مسیر چوبکشی و جنگل طبیعی، زیاد است اما اختلاف آنها در شدت ترافیک‌های مختلف مسیر چوبکشی با منطقهٔ شاهد معنی‌دار است. این نتیجه نشان می‌دهد که این دو گونه، به‌ویژه کلهو، در منطقهٔ مورد بررسی نسبت به شرایط خاکی حساسیت خاصی ندارند و می‌توانند در شرایط مختلف خاکی مورد نظر در این تحقیق (شرایط خاکی در جنگل شاهد و مسیرهای چوبکشی)، زادآوری مناسبی داشته باشند. رابطهٔ بین خواص خاک و زادآوری گونه‌ها نشان داد که گونهٔ کلهو و انجیلی همبستگی معنی‌داری با جرم مخصوص ظاهری و مقاومت به نفوذ که شرایط خاک را برای استقرار زادآوری نامناسب می‌کنند، نداشتند (شکل ۴). اما این گونه‌ها با تخلخل و درصد رطوبت که شرایط مساعدی را برای استقرار زادآوری به‌وجود می‌آورد، همبستگی بالایی نشان دادند.

زادآوری گونه‌های ممرز و توسکا به‌طور معنی‌دار و واضح در جنگل طبیعی بیشتر از مسیر چوبکشی است. این نتایج مشخص می‌کند که تجدیدحیات این گونه‌ها نسبت به شرایط خاکی ایجاد شده در مسیر چوبکشی بسیار حساس بوده و عکس‌العمل‌های معنی‌دار و مشخصی را نشان می‌دهند. همان‌گونه که در شکل ۴ مشخص است زادآوری این گونه‌ها با تمامی خصوصیات خاک

همبستگی معنی‌داری داشتند. کمتر بودن زادآوری توسکا در این مطالعه برخلاف نتایج Salehi و همکاران (۲۰۱۲) [۳۵] است که اعلام کردند زادآوری توسکا در حاشیهٔ جاده‌ها به‌عنوان گونهٔ پیشگام افزایش یافته است. زیرا شرایط اکولوژیک کنار جاده با مسیرهای چوبکشی کاملاً متفاوت است. در تبیین این موضوع می‌توان گفت که در کنار جاده با توجه به هدایت آب به جوی کنار جاده، نسبت به مسیرهای چوبکشی که خشک‌تر هستند، شرایط رطوبتی بهتری برای استقرار زادآوری این گونه ایجاد شده است.

تحقیقات زیادی به بررسی تأثیر عملیات چوبکشی روی مسیرهای چوبکشی بر تراکم، تنوع و کیفیت زادآوری گونه‌های جنگلی پرداخته‌اند [۳، ۲۷، ۳۴]. نتایج مطالعهٔ Zenner و همکاران (۲۰۰۷) [۲۷] نشان داد که تحت تأثیر عملیات چوبکشی در مسیرهای چوبکشی، تراکم زادآوری، ارتفاع و قطر پایهٔ تمام زادآوری انجام شده به‌طور قابل توجهی با افزایش شدت ترافیک کاهش می‌یابد. Sohrabi و همکاران (۲۰۲۲) [۳] در مطالعهٔ خود نشان دادند که تعداد نهال در متر مربع در تمامی مسیرهای چوبکشی و برای تمامی طبقات ارتفاعی کمتر از منطقهٔ شاهد بود، و همچنین نسبت نهال‌های موجود در ترافیک کم بیشتر از ترافیک متوسط و زیاد بود. در این مطالعه می‌توان گفت که گونه‌های مورد بررسی، خاک‌هایی با تخلخل بیشتر و جرم مخصوص کمتر را که در جنگل طبیعی (شاهد) موجود است به خاک‌های فشرده با تخلخل کمتر در مسیرهای چوبکشی ترجیح می‌دهند. با گذشت ۳۵ سال از عملیات چوبکشی اختلاف تراکم زادآوری به‌خصوص در شدت ترافیک کم مسیرهای چوبکشی با منطقهٔ شاهد کم شده است که نشان از بازیابی شرایط خاک برای استقرار زادآوری خواهد بود. این مطالعه با بررسی Heninger و همکاران (۲۰۰۲) [۳۶] که اعلام کردند اثر تخریب مسیر چوبکشی روی رشد نهال‌ها در کوتاه‌مدت است، همخوانی ندارد که این نتیجه ممکن است به‌دلیل متفاوت بودن شرایط اقلیمی، فیزیوگرافی، خصوصیات خاک و طول زمان مورد مطالعه بوده باشد.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

مدیریت پایدار جنگل‌ها را نمی‌توان بدون اجرای عملیات بهره‌برداری پایدار به‌طور مؤثر اجرا کرد. از این منظر، ارزیابی اثرات روی خاک‌های جنگلی مربوط به عملیات قطع درختان، موضوعی حیاتی است که باید در مطالعات امروزه به آنها توجه ویژه‌ای داشت. این مطالعه، بازیابی ویژگی‌های فیزیکی خاک و استقرار زادآوری را تحت ترکیبی از تیمارها، از جمله شدت ترافیک و سن مسیر چوبکشی، پس از توقف عملیات بهره‌برداری ارزیابی کرد. نتایج نشان داد که بیشتر آشفتگی‌های خاک در سطوح بالای شدت ترافیک رخ داده است. خصوصیات خاک‌ها به‌ویژه خصوصیات فیزیکی آنها در مسیرهای چوبکشی حتی پس از گذشت ۳۵ سال به‌طور کامل بازیابی نشده و می‌تواند بر زادآوری گونه‌های مختلف جنگلی که موضوع مهم در مدیریت جنگل‌هاست تأثیر آشکاری داشته باشد. نسبت زادآوری مستقرشده در شدت تردد کم بیشتر از شدت تردد متوسط و زیاد بود. با گذشت ۳۵ سال از عملیات چوبکشی، اختلاف تراکم زادآوری به‌خصوص در شدت ترافیک کم مسیرهای چوبکشی با منطقهٔ شاهد، کم شده است که نشان از بازیابی شرایط خاک برای استقرار زادآوری خواهد بود.

بازیابی خاک‌های جنگلی به‌دنبال عملیات مکانیزهٔ زمینی به‌طور طبیعی البته با سرعت کمتری با حضور فرآیندهای اقلیمی و تعامل ریشه–خاک و فعالیت جانوران خاک صورت می‌گیرد. بنابراین، به‌دست آوردن یک اندازه‌گیری دقیق از اختلال خاک برای ارزیابی پس از برداشت عملیات چوبکشی ضروری است. از عملیات مکانیزهٔ برداشت چوب باید در شرایط خاک مرطوب اجتناب شود و فقط در دوره‌هایی انجام شود که خاک به اندازهٔ کافی خشک است، به‌طوری که تنش‌های مکانیکی ناشی از وسایل نقلیهٔ جنگلی از ظرفیت باربری خاک تجاوز نکند. به‌طور کلی، مدیران و سیاست‌گذاران جنگل‌ها باید به زمان‌بندی عملیات برداشت مکانیزهٔ چوب در مناطق معتدل که ممکن است در الگوهای فصلی تغییراتی داشته باشند، توجه ویژه‌ای داشته باشند.

۶. منابع

[1] Grünberg, J., Ghaffariyan, M.R., Jourgholami, M., Labelle, E.R., Kaakkurivaara, N., Robert, R.C.G., Kühmaier, M. (2023). Criteria for Assessing the Sustainability of Logging Operations—A Systematic Review. *Current Forestry Reports*, 9, 350-369.

[2] Naghdi, R., Solgi, A., & Ilstedt, U. (2016). Soil chemical and physical properties after skidding by rubber-tired skidder in Hyrcanian forest, Iran. *Geoderma*, 265, 12-18.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] Jourgholami, M., Nasirian, A., & Labelle, E.R., 2018. Ecological restoration of compacted soil following the application of different leaf litter mulches on the skid trail over a five-year period. *Sustainability*, 10(7), p.2148.

[7] Kormanek, M., Banach, J., & Sowa, P. (2015). Effect of soil bulk density on forest tree seedlings. *International Agrophysics*, 29(1).

[8] Whalley, W. R., Dumitru, E., & Dexter, A. R. (1995). Biological effects of soil compaction. Soil and Tillage research, 35(1-2), 53-68.

[9] Alameda, D., & Villar, R. (2009). Moderate soil compaction: implications on growth and architecture in seedlings of 17 woody plant species. *Soil and Tillage Research*, 103(2), 325-331.

[10] Soriano, M., Kainer, K.A., Staudhammer, C.L., & Soriano, E. (2012). Implementing multiple forest management in Brazil nut-rich community forests: Effects of logging on natural regeneration and forest disturbance. *Forest Ecology and Management*, 268, 92-102.

[11] Beaudet, M., Angers, V. A., & Messier, C. (2014). Seedbed proportions in and outside skid trails: temporal variation following selection cutting in northern hardwood forests. *Forest Ecology and Management*, 318, 151-157.

[12] Mercier, P., Aas, G., & Dengler, J. (2019). Effects of skid trails on understory vegetation in forests: a case study from Northern Bavaria (Germany). *Forest Ecology and Management*, 453, 117579.

[13] Wei, L., Villemey, A., Hulin, F., Bilger, I., Yann, D., Chevalier, R., & 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.

[14] DeArmond, D., Ferraz, J. B., & Higuchi, N. (2021). Natural recovery of skid trails: a review. Canadian *Journal of Forest Research*, 51(7), 948-961.

[15] Bertzky, B., Corrigan, C., Kemsey, J., Kenney, S., Ravilious, C., Besançon, C., & Burgess, N. (2012). Protected Planet Report 2012: tracking progress towards global targets for protected areas.

[16] von Wilpert, K., & Schäffer, J. (2006). Ecological effects of soil compaction and initial recovery dynamics: a preliminary study. *European Journal of Forest Research*, 125(2), 129-138.

[17] Brais, S., & Camire, C. (1998). Soil compaction induced by careful logging in the claybelt region of northwestern Quebec (Canada). *Canadian Journal of Soil Science*, 78(1), 197-206.

[18] Hansson, L., Šimůnek, J., Ring, E., Bishop, K., & Gärdenäs, A. I. (2019). Soil compaction effects on root-zone hydrology and vegetation in boreal forest clearcuts. *Soil Science Society of America Journal*, 83, S105-S115.

[19] Hatchell, G. E. (1981). Site preparation and fertilizer increase pine growth on soils compacted in logging. *Southern Journal of Applied Forestry*, 5(2), 79-83.

[20] Wert, S., & Thomas, B. R. (1981). Effects of skid roads on diameter, height, and volume growth in Douglas- fir. *Soil Science Society of America Journal*, 45(3), 629-632.

[21] Philipson, C., Cutler, M., Brodrick, P.G., Asner, G.P., Boyd, D.S., Costa, P.M., Fiddes, J., Foody, G.M., van der Heijden, G.M.F., Ledo, A., Lincoln, P.R., Margrove, J.A., Martin, R.E., Milne, S., Pinard, M.A., Reynolds, G., Snoep, M., Tangki, H., Wai, Y.S., Burslem, D.F.R.P. (2020). Active restoration accelerates the carbon recovery of human-modified tropical forests. *Science*, 369(6505), 838-841.

[22] Sohrabi, H., Jourgholami, M., & Labelle, E. R. (2022). The effect of forest floor on soil microbial and enzyme indices after forest harvesting operations in Hyrcanian deciduous forests. *European Journal of Forest Research*, 141(6), 1013-1027.

[23] Kemper, W.D., & Rosenau, R.C. (1986). Aggregate stability and size distribution. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, 5, 425-442.

[24] Thien, S.J., & Graveel, J.G. (2008). Laboratory manual for soil science: Agriculture & environmental principles. Preliminary.

[25] Danielson, R.E., & Southerland, P.L. (1986). 18-2.2 Gas Pycnometer Method. Methods of Soil Analysis. Part 1, Physical and Mineralogical Methods.

[26] Gee, G.W., & Bauder, J.W. (1986). Particle- size analysis. Methods of soil analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods, 5, 383-411.

[27] Zenner, E.K., Fauskee, J.T., Berger, A.L., & Puettmann, K.J. (2007). Impacts of skidding traffic intensity on soil disturbance, soil recovery, and aspen regeneration in north central Minnesota. *Northern Journal of Applied Forestry*, 24(3), 177-183.

[28] Mohieddinne, H., Brasseur, B., Spicher, F., Gallet-Moron, E., Buridant, J., Kobaissi, A., & Horen, H. (2019). Physical recovery of forest soil after compaction by heavy machines, revealed by penetration resistance over multiple decades. *Forest Ecology and Management*, 449, 117472.

[29] Whalley, W.R., Leeds-Harrison, P.B., Clark, L.J., & Gowing, D.J.G. (2005). Use of effective stress to predict the penetrometer resistance of unsaturated agricultural soils. *Soil and Tillage Research*, 84(1), 18-27.

[30] Terzaghi, K., & Peck, R.B. (1967). Soil Mechanics in Engineering Practice [by] Karl Terzaghi [and] Ralph B. Peck. Wiley.

[31] Greacen, E.L., & Sands, R. (1980). Compaction of forest soils. A review. *Soil Research*, 18(2), 163-189.

[32] Kozlowski, T.T. (1999). Soil compaction and growth of woody plants. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 14(6), 596-619.

[33] Croke, J., Hairsine, P., & Fogarty, P. (2001). Soil recovery from track construction and harvesting changes in surface infiltration, erosion and delivery rates with time. *Forest Ecology and Management*, 143(1-3), 3-12.

[34] Blouin, V. M., Schmidt, M. G., Bulmer, C. E., & Krzic, M. (2005). Mechanical disturbance impacts on soil properties and lodgepole pine growth in British Columbia's central interior. *Canadian Journal of Soil Science*, 85(5), 681-691.

[35] Salehi, A., Abkenar, K.T., & Basiri, R. (2012). Study of the recovery soil physical properties and establishment of natural regeneration in skid trails (case study: Nav-E Asalem forests). (In Persian)

[36] Heninger, R., Scott, W., Dobkowski, A., Miller, R., Anderson, H., & Duke, S. (2002). Soil disturbance and 10-year growth response of coast Douglas-fir on nontilled and tilled skid trails in the Oregon Cascades. *Canadian Journal of Forest Research*, 32(2), 233-246.