



University of Tehran

Recovery of litter layer and physical properties of compacted soil after skidding operations in pure beech forests along an elevation gradient

Tohid Ghassemi¹ | Meghdad Jourgholami^{2*} | Mohammad Jafari³ | Hadi Sohrabi⁴

1. Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: tohid.ghassemi@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Forestry and Forest Economics, University College of Agriculture and 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 College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: jafari@ut.ac.ir
4. Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: hadi.sohrabi@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:

Research Article

Article History:

Received: 27 March 2025

Revised: 18 May 2025

Accepted: 05 June 2025

Published online: 16 September 2025

Keywords:

Elevation gradient,
Forest floor,
Kheyroud Forest,
Recovery,
Skid trail.

ABSTRACT

The variation in litter layer and forest soil characteristics along elevation gradients is a critical factor in restoring degraded soils, as climatic conditions differ across elevations and their effects on litter decomposition and soil changes are not uniform. This study aimed to quantify the recovery of the litter layer and soil physical properties in skid trails after logging and in undisturbed areas along an elevation gradient (700, 900, 1100, 1300, and 1500 m a.s.l.) and under varying traffic intensities (low, moderate, high) in pure beech stands. The investigation was conducted in Parcel No. 114 (Patom District), 212 and 220 (Namkhaneh District), 320 (Gorazbon District) of the Kheyroud Forest in the Golband watershed, and 416–417 (ShivaDareh District) of the Kojour watershed. ANOVA results revealed that the interaction between elevation and traffic intensity significantly affected both the litter layer (thickness, organic carbon, organic nitrogen, C/N ratio, phosphorus, and potassium) and soil physical properties (bulk density, total porosity, and penetration resistance). Despite seven years since skidding operations, neither the litter layer nor soil properties had recovered at any elevation or traffic intensity. The recovery process of the litter layer and soil characteristics along elevation gradients reflects the sensitive interplay between climate, vegetation, and biogeochemical processes. With global warming, understanding these dynamics is essential for predicting ecosystem responses and implementing adaptive management strategies.

Cite this article: Ghassemi, T., Jourgholami, M., Jafari, M., Sohrabi, H. (2025). Recovery of litter layer and physical properties of compacted soil after skidding operations in pure beech forests along an elevation gradient. *Journal of Forest and Wood Products*, 78 (2), 117-131. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2025.392652.1343>



© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2025.392652.1343>



دانشگاه تهران

نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۰۵۳۰

سایت نشریه: <https://jfw.ut.ac.ir>

بازیابی لایه لاشبرگی و خصوصیات فیزیکی خاک‌های فشرده بعد از عملیات چوبکشی در گرادیان ارتفاعی توده‌های راش خالص

توحید قاسمی^۱ | مقدار جورغلامی^{۲*} | محمد جعفری^۳ | هادی سهرابی^۴

۱. گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. tohid.ghassemi@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. mjgholami@ut.ac.ir
۳. گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. jafary@ut.ac.ir
۴. گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. hadi.sohrabi@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

تغییرات مشخصه‌های لایه لاشبرگ و خاک جنگل با گرادیان ارتفاعی از عواملی مهمی است که باید در روند بازیابی خاک‌های تخریب‌شده مورد بررسی قرار گیرد، زیرا در ارتفاعات مختلف جنگل، شرایط آب‌وهوایی متفاوت بوده و اثرات آن در تجزیه لاشبرگ کف جنگل و تغییرات خصوصیات خاک یکسان نیست. بنابراین پژوهش حاضر با هدف کمی کردن بازیابی لایه لاشبرگ و خصوصیات فیزیکی خاک در عمق ۰ تا ۱۰ سانتی‌متری در مسیرهای چوبکشی بعد از عملیات بهره‌برداری و منطقه دست‌نخورده در گرادیان ارتفاعی (۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر از سطح دریا) و شدت تردد (کم، متوسط، زیاد) در توده‌های راش خالص انجام شد. این بررسی در پارسل‌های ۱۱۴ بخش پاتم، ۲۱۲ و ۲۲۰ بخش نمخانه، ۳۲۰ بخش گرازین جنگل خیرود واقع در حوزه ۴۵ گلیند و ۴۱۶-۴۱۷ بخش شیوا دره حوزه ۴۶ کجور انجام شد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل ارتفاع از سطح دریا و شدت تردد دارای اثر معنی‌داری بر مشخصه‌های لایه لاشبرگی شامل ضخامت، کربن آلی، نیتروژن آلی، نسبت C/N، فسفر و پتاسیم و مشخصه‌های فیزیکی خاک شامل وزن مخصوص ظاهری خاک، تخلخل کل خاک و مقاومت به نفوذ است. نتایج نشان داد که با وجود گذشت ۷ سال از فعالیت چوبکشی، مشخصه‌های لاشبرگ و فیزیکی خاک در هیچ طبقه ارتفاعی و تردد ماشین بازیابی نشدند. فرآیند بازیابی لایه لاشبرگی و ویژگی‌های خاک در امتداد گرادیان‌های ارتفاعی، بازتابی از تعامل ظریف بین اقلیم، پوشش گیاهی و فرآیندهای بیژئوشیمیایی است. با گرمایش جهانی، درک این پویایی‌ها برای پیش‌بینی پاسخ اکوسیستم‌ها و اجرای مدیریت سازگار، حیاتی است.

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵

کلیدواژه‌ها:

بازیابی،

جنگل خیرود،

گرادیان ارتفاعی،

لایه لاشبرگ،

مسیر چوبکشی.

استناد: قاسمی؛ توحید، جورغلامی؛ مقدار، جعفری؛ محمد، سهرابی؛ هادی (۱۴۰۴). بازیابی لایه لاشبرگی و خصوصیات فیزیکی خاک‌های فشرده بعد از عملیات چوبکشی در گرادیان ارتفاعی توده‌های راش خالص. نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب، ۷۸ (۲)، ۱۱۷-۱۳۱. DOI: <https://doi.org/10.22059/jfw.2025.392652.1343>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

<https://doi.org/10.22059/jfw.2025.392652.1343>



۱. مقدمه

در چند دهه اخیر عملیات بهره‌برداری جنگل به دلایلی از جمله بالا بودن حجم برداشت، وجود گونه‌های صنعتی و دارای ارزش افزوده بالا، شیب‌دار بودن قسمت اعظم جنگل‌های شمال ایران، کاهش هزینه حمل‌ونقل اولیه، کوتاه کردن مدت زمان چوبکشی و توسعه مکانیزاسیون بهره‌برداری جنگل در حال حرکت به سوی استفاده از ماشین‌آلات سنگین و پرقدرت برای قطع و خارج کردن محصولات چوبی از جنگل بوده است که بکارگیری آنها بدون تخریب و آسیب جدی به خاک ممکن نیست [۱، ۲]. با توجه به اینکه عملیات بهره‌برداری جنگل با احداث مسیر چوبکشی و تردد ماشین‌آلات برای خروج محصولات جنگلی در این مسیرها همراه است، باعث ایجاد صدمات گسترده‌ای به سطح وسیعی از خاک می‌شود [۳]. بنابراین حفاظت و نگهداری منابع خاکی به عنوان مهمترین اصل برای حاصلخیزی جنگل و مدیریت پایدار عنوان شده است. مدیریت خاک‌های جنگلی در طی عملیات بهره‌برداری در حال حاضر بر روی کاهش اثرات بهره‌برداری و تسریع مدت زمان بازیابی آن در خاک‌های حساس به کوبیدگی متمرکز شده است [۴].

مطالعات قبلی گزارش دادند که سطوح مختلف لاشبرگ درختان، ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک کف جنگل و همچنین چرخه مواد مغذی را تنظیم می‌کند [۵، ۶]. با این حال، عواملی مانند سنگ بستر، آب و هوا، درختان و درختچه‌ها نیز می‌توانند بر باروری خاک تأثیر بگذارند [۵]. لایه لاشبرگی باعث افزایش محتوای ماده آلی خاک پس از تجزیه می‌شود که به طور قابل توجهی بر خواص فیزیکی و شیمیایی خاک تأثیر می‌گذارد، زبری سطح را بهبود می‌بخشد، نفوذ آب به خاک را افزایش می‌دهد و منجر به کاهش جریان آب سطحی و هدررفت خاک می‌شود [۷]. لایه لاشبرگی می‌تواند تا حد زیادی با پوشاندن سطح خاک، کنترل میزان انرژی وارد شده به خاک و تنظیم نوسانات دمای خاک، تابش خورشید را جذب کند و در نهایت منجر به کاهش تبخیر آب خاک شود [۸]. در مطالعه Jourgholami و همکاران (۲۰۱۸) مشاهده شد که با استفاده از مقادیر متفاوتی از لاشبرگ روی خاک فشرده شده طی یک دوره ۵ ساله، خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک به طور قابل توجهی بهبود یافته و ترمیم می‌شوند [۹]. همچنین این نتیجه حاصل شد که کیفیت خواص خاک به طور عمده با کمیت و کیفیت لایه لاشبرگ تحت تأثیر گونه‌های مختلف درختی و شرایط اقلیمی توده جنگلی تنظیم می‌شود [۱۰، ۱۱].

پژوهش‌های متعددی در مورد بازیابی خصوصیات فیزیکی خاک مسیرهای چوبکشی بعد از تردد ماشین‌آلات در جنگل‌های شمال انجام شده است [۱۲، ۱۳]. به علاوه، مطالعاتی با هدف استفاده از مالچ‌های آلی شامل لاشبرگ، سرشاخه‌ها، خاک‌اره و کاه و کلش به منظور محافظت از سطح خاک مسیرهای چوبکشی و کاهش رواناب سطحی و هدررفت خاک به انجام رسیده است که نتایج مثبتی به همراه داشته است [۵، ۶]. بازیابی فیزیکی و شیمیایی خاک‌های فشرده شده در شرایط طبیعی یک روند آهسته و زمان‌بر برای خواص است و معمولاً از چندین سال تا چند دهه طول می‌کشد [۱۲، ۱۴، ۱۵]. برای سرعت بخشیدن به روند بهبودی خاک‌های متراکم، بعضی از اقدامات مهندسی مانند مالچ [۱۶، ۱۷]، افزودن لاشبرگ و اصلاح اسیدیته خاک [۱۶، ۱۸]، تلقیح کرم‌های خاکی [۱۸] و کاشت نهال [۱۹] قابل انجام است. نتایج تحقیقات موجود در مورد بازیابی خاک‌های کوبیده شده متنوع می‌باشد که این ممکن است به دلیل تفاوت در ویژگی‌های توده یا رویشگاه باشد. یکی از عواملی که باید در روند بازیابی خاک‌های تخریب شده مورد بررسی قرار بگیرد، گرادیان ارتفاعی است، زیرا در ارتفاعات مختلف جنگل، شرایط آب‌وهوایی متفاوت بوده و اثرات آن در تجزیه لاشبرگ کف جنگل و تغییرات خصوصیات خاک یکسان نیست. گرادیان ارتفاعی با ایجاد تغییرات در دما، رطوبت و پوشش گیاهی، به طور غیرمستقیم خصوصیات لایه لاشبرگ و خاک جنگل را تحت تأثیر قرار می‌دهد. درک این تغییرات برای مدیریت پایدار جنگل‌ها، پیش‌بینی تأثیرات تغییرات اقلیمی و حفظ تنوع زیستی ضروری است. علاوه بر این، مطالعات کمی در زمینه تأثیر نوع گونه خالص بر روند بازیابی خاک صورت گرفته است و از این رو باید پتانسل بازیابی محیط زیستی خاک فشرده جنگل‌ها در اثر کاشت گونه‌های خالص در جزئیات بیشتری مورد بررسی قرار بگیرد. در جنگل‌های شمال ایران، شاخ و برگ‌های ایجاد شده در طول پاییز منجر به افزایش تجمع لاشبرگ می‌شود و فرآیند تجزیه لاشبرگ به شدت، ضخامت لایه لاشبرگ را تغییر می‌دهد [۱۷].

پژوهش حاضر، با هدف کمی کردن بازیابی لایه لاشبرگ، وزن خشک آن و خصوصیات فیزیکی خاک در مسیرهای چوبکشی

بعد از عملیات بهره‌برداری در گرادیان ارتفاعی توده‌های راش خالص و شدت ترافیک‌های مختلف در جنگل خیرود انجام شد.

۲. روش شناسی پژوهش

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

این بررسی در پارسل‌های ۱۱۴ بخش پاتم، ۲۱۲ و ۲۲۰ بخش نمخانه، ۳۲۰ بخش گرازین جنگل آموزشی و پژوهشی خیرود دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در حوزه ۴۵ گلبد و ۴۱۷-۴۱۶ بخش شیوا دره حوزه ۴۶ کجور انجام شد. طبق آخرین اطلاعات از کتابچه طرح جنگلداری در این حوزه‌ها، مسیرهای چوبکشی که در آنها برای آخرین بار عملیات چوبکشی انجام گرفته است، انتخاب شد. برای این منظور، چهار مسیر چوبکشی از جنگل خیرود در حوزه ۴۵ و یک مسیر هم در توده‌های راش خالص حوزه ۴۶ انتخاب شد که هر کدام از این مسیرها در طبقه ارتفاعی مختلفی قرار دارند. اطلاعات مربوط به هر کدام از مسیرهای چوبکشی منتخب در توده‌های راش خالص در پنج گرادیان ارتفاعی در جدول ۱ ارائه شده است. تمام مسیرهای چوبکشی در سال ۹۵ مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند و ۷ سال از آخرین عملیات چوبکشی روی مسیرهای چوبکشی سپری شده است. در حوزه ۴۶، برداشت از درختان شکسته و افتاده در سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ انجام شد.

جدول ۱. مشخصات مسیرهای چوبکشی مورد مطالعه

ارتفاع از سطح دریا (متر)	پارسل	بخش	موجودی در هکتار (سیلو)	تعداد در هکتار (اصله)	تیپ فعلی جنگل	تیپ خاک
۷۰۰	۱۱۴	پاتم	۳۴۵/۸	۲۳۱	راش-ممرز	راندزین-هومیک کریناته
۹۰۰	۲۱۲	نمخانه	۴۱۳/۳	۱۹۲	راش-ممرز	قهوه‌ای جنگلی
۱۱۰۰	۲۲۰	نمخانه	۵۰۴	۱۷۳	راش-ممرز به همراه توسکا	قهوه‌ای جنگلی با بافت لیمونی
۱۳۰۰	۳۲۰	گرازین	۴۹۹/۶	۲۶۶/۳	راش-ممرز	قهوه‌ای جنگلی
۱۵۰۰	۴۱۶-۴۱۷	شیوا دره	۳۰۶/۵	۱۴۶/۸	راش خالص	قهوه‌ای جنگلی

۲-۲. روش پژوهش

با مشخص شدن طرح تحقیق در قالب بلوک کاملاً تصادفی با دو عامل گرادیان ارتفاعی و شدت ترافیک، در پنج پارسل، سه مسیر چوبکشی انتخاب و در هر مسیر چوبکشی سه شدت تردد، مشخص شد و یک قطعه نمونه مطابق شکل یک پیاده شد. در داخل هر یک از این قطعه نمونه‌ها، ۳ خط افقی اندازه‌گیری با فاصله ۳ متر از هم جدا شد و سپس به‌طور تصادفی یک خط مشخص و روی هر یک از این خطوط، در عمق ۱۰-۰ سانتی متری خاک، در مرکز مسیر چوبکشی و محل رد چرخ‌های راست و چپ، نمونه‌های خاک گرفته شد و با نمونه‌گیری در این عمق، فرآیند طبیعی بازیابی لایه لاشبرگ و خصوصیات خاک تحت تأثیر لاشبرگ راش خالص بررسی شد (شکل ۱). همچنین به‌منظور مقایسه بازیابی مشخصه‌های لایه لاشبرگی و فیزیکی خاک، در هر قطعه نمونه یک نمونه هم در فاصله ۱۰ متری از مسیر چوبکشی و از منطقه دست‌نخورده (شاهد) برداشت شد. در نهایت تعداد نمونه‌ها برابر با ۱۸۰ نمونه بود: ۵ پارسل $\times$ ۳ مسیر $\times$ ۳ شدت ترافیک $\times$ یک قطعه نمونه در هر شدت (۴ نمونه = ۳ مسیر + ۱ نمونه در منطقه شاهد). عملیات چوبکشی در پارسل‌های مورد نظر در سال ۱۳۹۶ با اسکیدر چرخ‌لاستیکی تاف برای خروج گرده‌بینه از عرصه قطع به کنار جاده انجام شد و نمونه‌ها در مرداد و شهریور سال ۱۴۰۳ برداشت شد. هوا در طول زمان نمونه‌برداری آفتابی و خشک بود. متوسط شیب مسیر در پارسل‌های مورد مطالعه، ۲۱ درصد، حجم برداشت در پارسل‌های مورد مطالعه، ۲۱۰۰ مترمکعب و میانگین حجم بار در هر نوبت برابر با ۱/۳۴ مترمکعب بود.

قبل از برداشت نمونه‌های خاک روی هر کدام از خطوط اندازه‌گیری، یک قطعه نمونه با ابعاد 1×1 متر در محل نمونه‌گیری طراحی شد. در داخل این قطعات نمونه، لایه‌ها یا افق‌های پوشش کف جنگل مشخص و ضخامت لایه‌ها با متر نواری اندازه‌گیری شد و در کیسه‌های پلاستیکی جمع‌آوری و بلافاصله توزین شدند و سپس برای تعیین زی توده خشک، لایه‌های لاشبرگ به آزمایشگاه (خشک کردن در دمای ۶۵ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت و توزین مجدد) منتقل شدند. کربن و نیتروژن آلی لایه لاشبرگی به ترتیب با روش والکلی‌بلاک و روش کجلدال و پتاسیم و فسفر لایه لاشبرگی هم با روش اسپکتروفتومتر جذب اتمی پس از احتراق خشک، اندازه‌گیری شد. برای تعیین جرم مخصوص ظاهری، نمونه‌های خاک در عمق ۱۰-۰ سانتی متر با استفاده از سیلندر فلزی با ابعاد مشخص از خاک معدنی گرفته شد [۲]. تخلخل کل خاک با استفاده از مقادیر جرم مخصوص ظاهری، حقیقی [۲] و حجم نمونه‌های

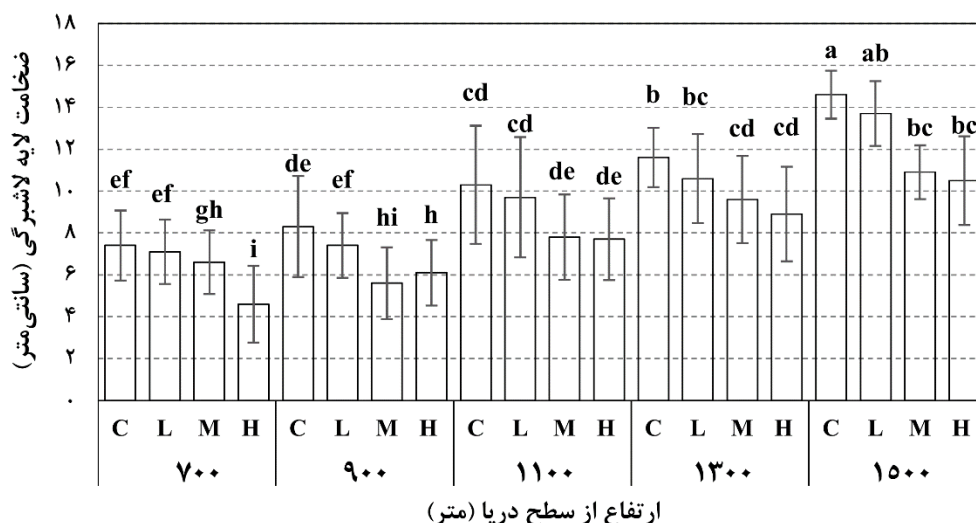
۲-۳. تجزیه و تحلیل داده‌ها

۳. یافته‌های پژوهش

جدول ۲. تجزیه واریانس اثر متقابل ارتفاع از سطح دریا و شدت تردد بر مشخصه‌های لایه لاشبریگی و فیزیکی خاک

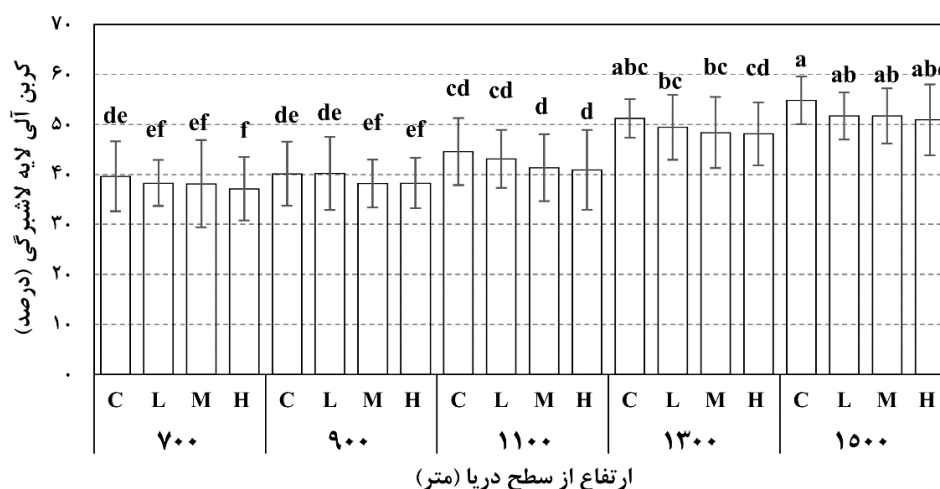
**** معنی داری در سطح ۹۹ درصد**

نتایج نشان داد که ضخامت لایه لاشبرگی، به‌طور معنی‌داری با افزایش ارتفاع از سطح دریا افزایش یافته است، هرچند بعد از گذشت ۷ سال از عملیات چوبکشی، در هیچ طبقه ارتفاعی، بازیابی کامل ضخامت لایه لاشبرگی رخ نداده است، اما در شدت‌های تردد کم، بیشترین مقدار بازیابی ضخامت لایه لاشبرگی اتفاق افتاده است ولی با ضخامت لایه لاشبرگی منطقه دست‌نخورده (شاهد) اختلاف معنی‌داری وجود دارد (شکل ۲).

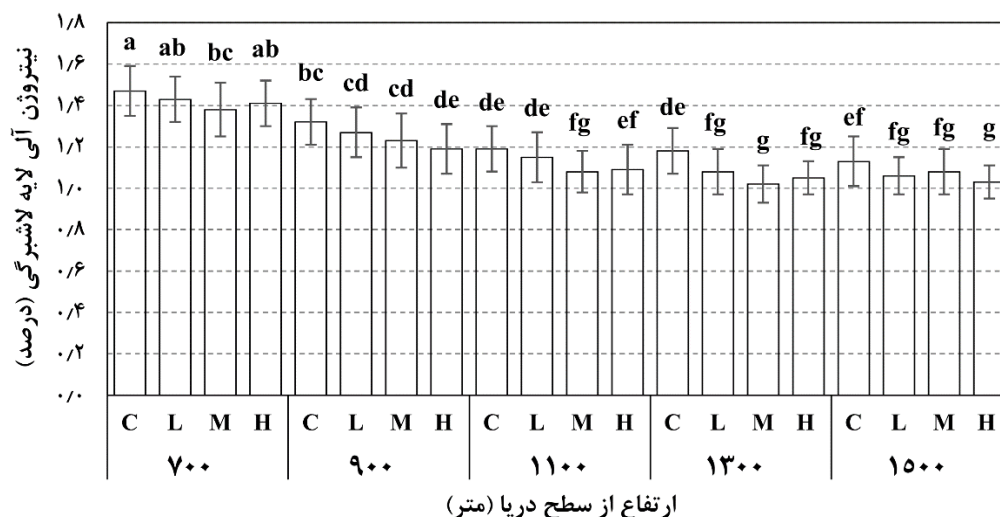


شکل ۲. مقایسه میانگین و انحراف معیار (بازه نشان داده شده) ضخامت لایه لاشبرگی در گرادان‌های مختلف از سطح دریا (۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر) و شدت تردد مسیرهای چوبکشی با آزمون توکی (ب). حروف لاتین غیرهمنام، بیانگر معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد است. شاهد (دست‌نخورده) (C)، مسیر با شدت تردد کم (L)، متوسط (M) و زیاد (H).

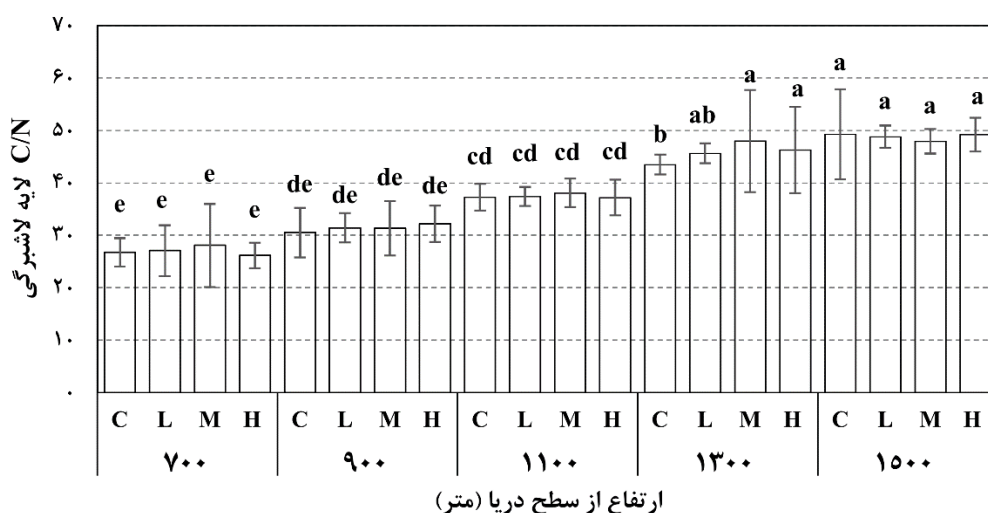
نتایج نشان داد که کربن و نسبت C/N لایه لاشبرگی با افزایش ارتفاع افزایش یافته ولی بازیابی در مقایسه با منطقه شاهد رخ نداده است، در حالی‌که با افزایش ارتفاع از سطح دریا، نیتروژن لایه لاشبرگی کاهش یافته است. این در حالی است که نرخ بازیابی با افزایش شدت تردد کاهش یافته و مسیرهای با شدت تردد کم، بیشترین مقدار بازیابی را در مقایسه با منطقه دست‌نخورده (شاهد) نشان دادند (شکل‌های ۳، ۴ و ۵).



شکل ۳. مقایسه میانگین و انحراف معیار (بازه نشان داده شده) کربن آلی لایه لاشبرگی در گرادان‌های مختلف از سطح دریا (۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر) و شدت تردد مسیرهای چوبکشی با آزمون توکی (ب). حروف لاتین غیرهمنام، بیانگر معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد است. شاهد (دست‌نخورده) (C)، مسیر با شدت تردد کم (L)، متوسط (M) و زیاد (H).

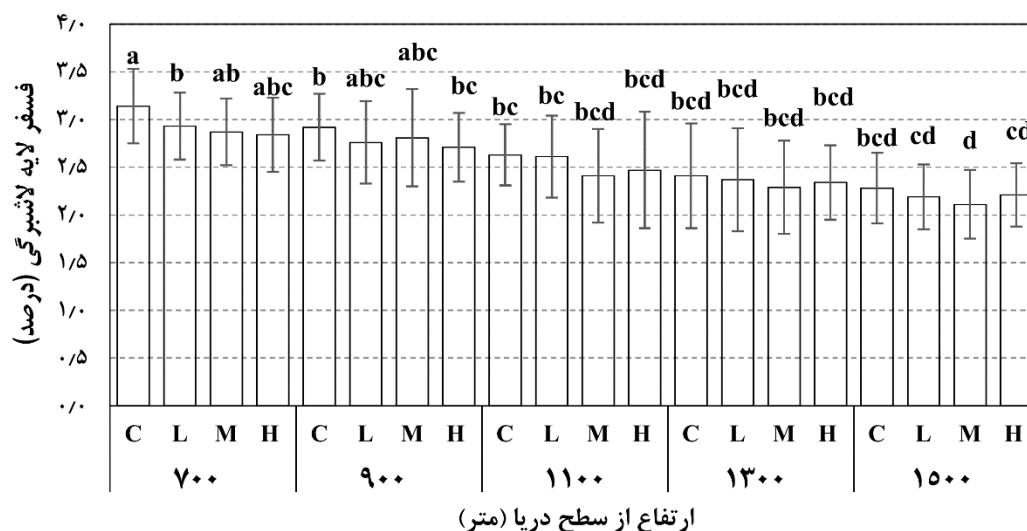


شکل ۴. مقایسه میانگین و انحراف معیار (بازه نشان داده شده) نیتروژن لایه لاشبریگی در گرادین های مختلف از سطح دریا (۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر) و شدت تردد مسیرهای چوبکشی با آزمون توکی (ب). حروف لاتین غیرهمنام، بیانگر معنی دار بودن اختلاف میانگین ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد است. شاهد (دست نخورده) (C)، مسیر با شدت تردد کم (L)، متوسط (M) و زیاد (H).

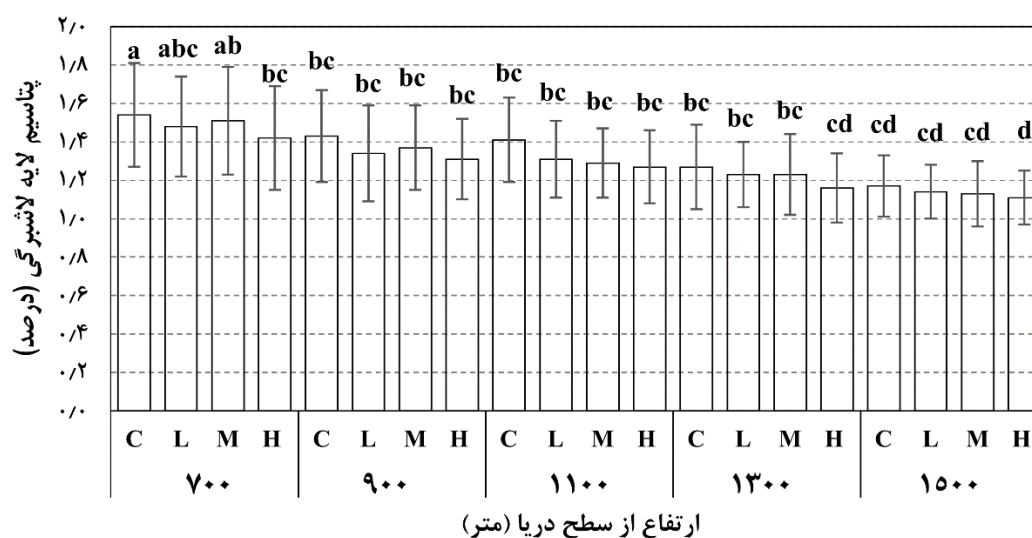


شکل ۵. مقایسه میانگین و انحراف معیار (بازه نشان داده شده) نسبت C/N لایه لاشبریگی در گرادین های مختلف از سطح دریا (۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر) و شدت تردد مسیرهای چوبکشی با آزمون توکی (ب). حروف لاتین غیرهمنام، بیانگر معنی دار بودن اختلاف میانگین ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد است. شاهد (دست نخورده) (C)، مسیر با شدت تردد کم (L)، متوسط (M) و زیاد (H).

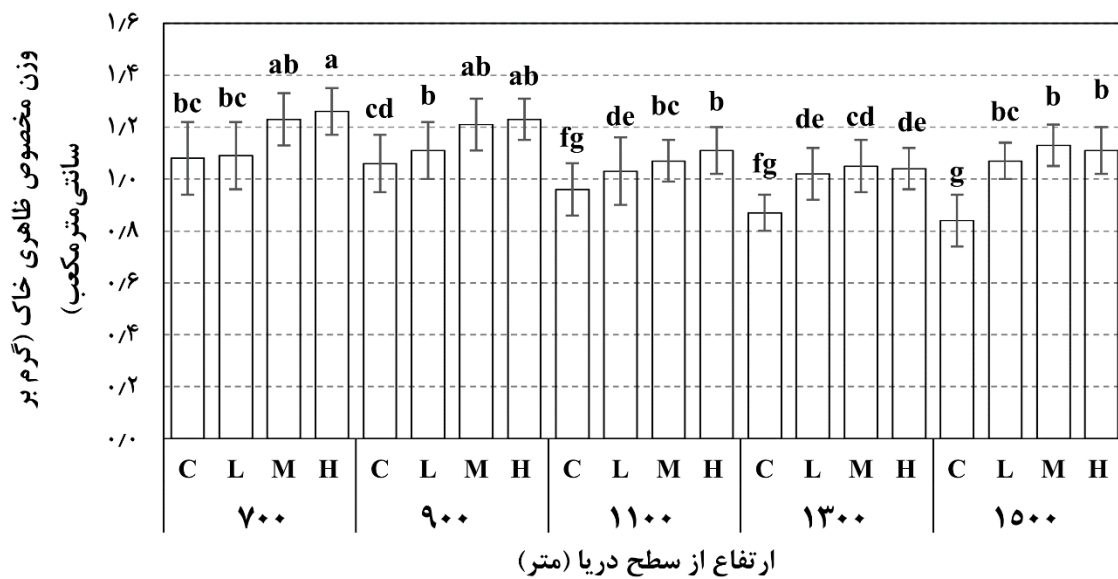
با افزایش ارتفاع از سطح دریا، درصد فسفر و پتاسیم لایه لاشبریگی در منطقه شاهد کاهش داشته و با افزایش شدت تردد نیز، مشخصه های اندازه گیری شده کمتر از مقدار شاهد بودند و بعد از ۷ سال، هنوز باز یابی کامل رخ نداده است (شکل های ۶ و ۷). نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع از سطح دریا، وزن مخصوص ظاهری خاک و مقاومت به نفوذ در منطقه شاهد کاهش یافته و ۷ سال بعد از عملیات چوبکشی، مقادیر وزن مخصوص ظاهری خاک و مقاومت به نفوذ، با افزایش شدت تردد، افزایش یافته و دارای اختلاف معنی داری با منطقه دست نخورده (شاهد) هستند (شکل های ۸ و ۱۰). به طور متناظر، تخلخل لایه ۰ تا ۱۰ سانتی متری خاک، با افزایش ارتفاع از سطح دریا افزایش یافته و بعد از تردد ماشین چوبکشی، هنوز به سطح منطقه شاهد برگشته است (شکل ۹).



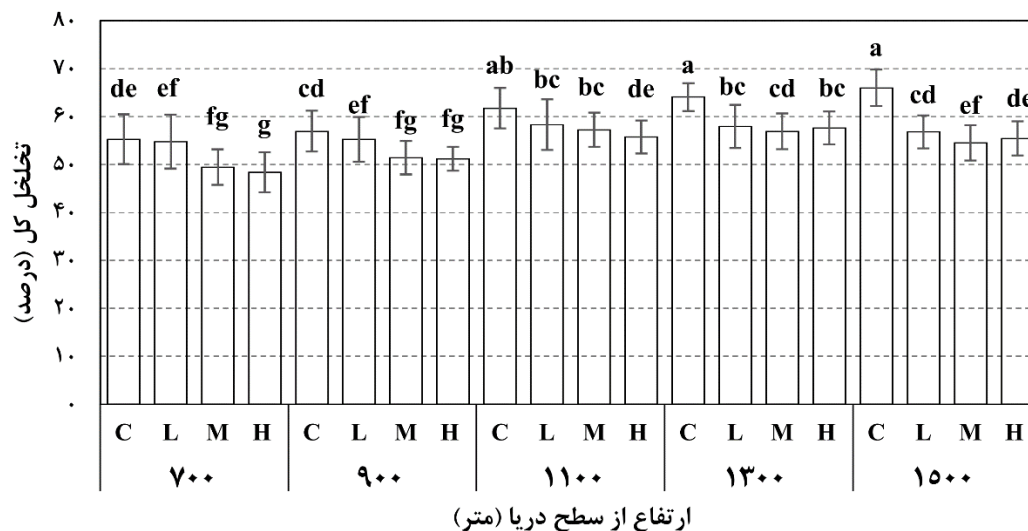
شکل ۶. مقایسه میانگین و انحراف معیار (بازه نشان داده شده) مقدار فسفر لایه لاشبریگی در گرادیان‌های مختلف از سطح دریا (۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر) و شدت تردد مسیرهای چوبکشی با آزمون توکی (ب). حروف لاتین غیرهمنام، بیانگر معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد است. شاهد (دست نخورده) (C)، مسیر با شدت تردد کم (L)، متوسط (M) و زیاد (H).



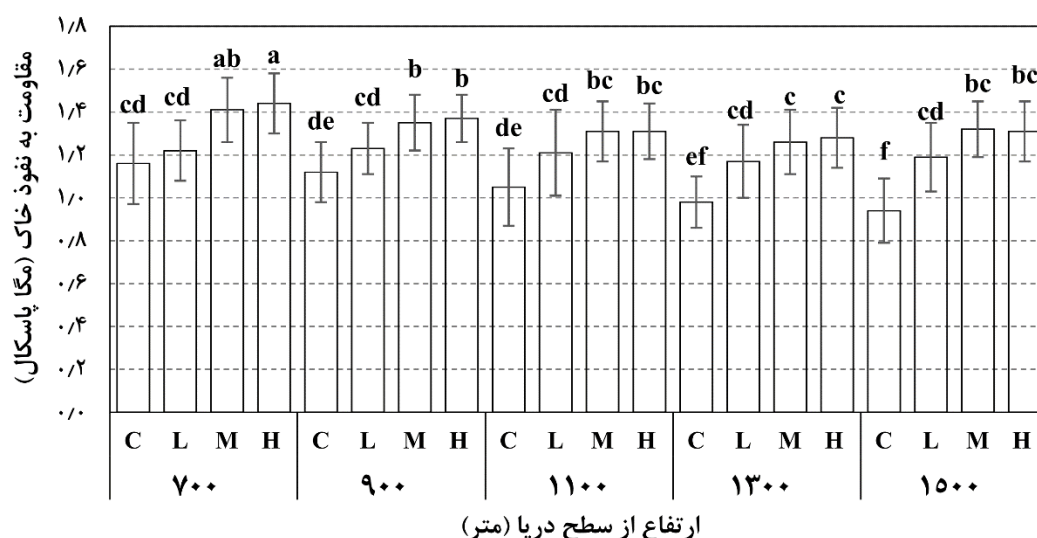
شکل ۷. مقایسه میانگین و انحراف معیار (بازه نشان داده شده) مقدار پتاسیم لایه لاشبریگی در گرادیان‌های مختلف از سطح دریا (۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر) و شدت تردد مسیرهای چوبکشی با آزمون توکی (ب). حروف لاتین غیرهمنام، بیانگر معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد است. شاهد (دست نخورده) (C)، مسیر با شدت تردد کم (L)، متوسط (M) و زیاد (H).



شکل ۸. مقایسه میانگین و انحراف معیار (بازه نشان داده شده) وزن مخصوص ظاهری خاک در گرادیان‌های مختلف از سطح دریا (۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر) و شدت تردد مسیرهای چوبکشی با آزمون توکی (ب). حروف لاتین غیرهمنام، بیانگر معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد است. شاهد (دست نخورده) (C)، مسیر با شدت تردد کم (L)، متوسط (M) و زیاد (H).



شکل ۹. مقایسه میانگین و انحراف معیار (بازه نشان داده شده) تخلخل کل خاک در گرادیان‌های مختلف از سطح دریا (۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر) و شدت تردد مسیرهای چوبکشی با آزمون توکی (ب). حروف لاتین غیرهمنام، بیانگر معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد است. شاهد (دست نخورده) (C)، مسیر با شدت تردد کم (L)، متوسط (M) و زیاد (H).



شکل ۱۰. مقایسه میانگین و انحراف معیار (بازه نشان داده شده) مقاومت به نفوذ خاک در گرادیان‌های مختلف از سطح دریا (۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر) و شدت تردد مسیرهای چوبکشی با آزمون توکی (ب). حروف لاتین غیرهمنام، بیانگر معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد است. شاهد (دست نخورده) (C)، مسیر با شدت تردد کم (L)، متوسط (M) و زیاد (H).

۴. بحث

وزن مخصوص ظاهری خاک و مقاومت به نفوذ در مسیرهای چوبکشی پرتراфик به‌طور معنی‌داری بیشتر بود و حتی هفت سال پس از تردد ماشین‌آلات در مقایسه با مناطق دست‌نخورده، این حالت مشاهده شد. همسو با مطالعه حاضر، پژوهش‌های DeArmond و همکاران (۲۰۱۹) و Cambi و همکاران (۲۰۱۷)، Flores Fernández و همکاران (۲۰۱۷) و Nikooy و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که وزن مخصوص ظاهری خاک و مقاومت به نفوذ آن پس از تردد ماشین‌آلات بر سطح خاک افزایش می‌یابد [۱۳، ۱۶، ۲۰، ۲۱]. برخی مطالعات نشان دادند که درصد عمده ریشه‌های نازک تعدادی از گونه‌های درختی در بخش‌هایی از خاک با مقدار مقاومت به نفوذ تا سه مگاپاسکال حضور دارند [۲۲، ۲۳]. از این منظر، در هیچ گرادیان ارتفاعی و در هیچ شدت ترددی، تردد ماشین چوبکشی تغییرات محسوسی ایجاد نکرد و خاک طبیعی خود منطقه نیز میانگین مقاومت نفوذپذیری بالاتر از دو مگاپاسکال نشان نداد که این مقدار مربوط به عمق تا ۱۰ سانتی‌متری خاک بود. همچنین DeArmond و همکاران (۲۰۱۹) اثرات تراکم خاک را ۳۰ سال پس از انجام عملیات چوبکشی در حوزه آمازون مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بازبایی جزئی خاک تخریب‌شده پس از ۲۴ و ۳۰ سال اتفاق افتاده است، افق سطحی خاک در شیار مسیر چوبکشی هیچ تفاوتی با خاک منطقه دست‌نخورده ندارد. با این حال، نتایج نشان می‌دهد که حتی ۳۰ سال برای بازبایی کامل مشخصه‌های خاک کافی نیست [۳]. براساس Flores Fernández و همکاران (۲۰۱۷)، Cambi و همکاران (۲۰۱۷)، هنگامی که تراکم خاک رخ می‌دهد، حجم منافذ و پیوستگی آنها کاهش می‌یابد [۱۶، ۲۰]. این پدیده منجر به اختلال در انتشار گاز، شرایط نامناسب رطوبت و هوادهی خاک، افزایش غلظت CO_2 ، کاهش نرخ تجزیه ماده آلی، کاهش معدنی شدن کربن و نیتروژن خاک، و افت جمعیت جوامع میکروبی می‌شود که در نهایت کاهش تنفس میکروبی خاک را به دنبال دارد. افزایش وزن مخصوص ظاهری و مقاومت به نفوذ خاک، رشد طولی و گسترش سیستم ریشه‌ای را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد [۱۶، ۲۰]. دلایل اصلی این پدیده احتمالاً ناشی از محدودیت‌های انتشار گاز، تجمع بیشتر CO_2 در لایه‌های سطحی خاک و کاهش نرخ تنفس خاک است. تراکم خاک، همچنین توانایی ریشه‌ها برای رشد طولی و نفوذ به عمق خاک را کاهش داد که نتیجه آن محدودیت دسترسی به جذب آب و مواد مغذی است.

بازبایی خاک‌های فشرده‌شده به شرایط طبیعی، فرآیندی بلندمدت است و ممکن است چندین سال تا چند دهه به طول بیانجامد [۱۶، ۳]. این فرآیند تحت تأثیر عواملی مانند نیروی رشد ریشه گیاهان، فعالیت زیست‌بوم خاک، انبساط و انقباض ذرات رس، و چرخه‌های انجماد و ذوب آب خاک رخ می‌دهد [۳]. عملیات خروج چوب با استفاده از ماشین‌آلات سنگین اغلب منجر به تراکم

خاک و حذف لایه لاشبرگ می‌شود که تأثیر چشمگیری بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک دارد. بازیابی این ویژگی‌ها، بسته به عواملی مانند نوع لاشبرگ اعمال شده، شدت تردد ماشین‌ها و شیب مسیرهای قطع درختان، متفاوت است. بازیابی لایه لاشبرگ در جنگل‌های راش خالص پس از قطع درختان، به شدت تحت تأثیر فشردگی خاک و شرایط ارتفاعی است. در ارتفاعات بالا، ترکیب عوامل اقلیمی (یخبندان، بارش زیاد) و کاهش تنوع گونه‌ای، بازیابی مشخصه‌های خاک را به فرآیندی پیچیده و طولانی تبدیل می‌کند. از سوی دیگر، استفاده از مداخلات احیایی هدفمند (مانند افزایش درصد آمیختگی گونه‌ها) و مدیریت پایدار ماشین‌آلات می‌تواند بازیابی را حتی در شرایط نامساعد تسهیل کند [۶]. با این حال، دستیابی به سطوح پیش از چوبکشی، نیازمند گذشت زمان طولانی (۲۰ تا ۵۰ سال) و ادغام دانش اکولوژیک با فناوری‌های بهره‌برداری کم‌آسیب است.

در ارتفاعات بالاتر (مثلاً بالای ۱۵۰۰ متر)، کاهش دما و افزایش بارش، کاهش نرخ تجزیه لاشبرگ (تا ۵۰ درصد نسبت به ارتفاعات پایین) را به دنبال دارد که این مسئله، نیز بازسازی لایه لاشبرگ را کند می‌کند. در ارتفاعات پایین‌تر (زیر ۱۰۰۰ متر)، فعالیت بیشتر میکروارگانیسم‌ها و کرم‌های خاکی، تجزیه لاشبرگ و بازسازی خاک را تسریع می‌بخشد. تأثیر ترکیب گونه‌ای بر تجزیه لاشبرگ نیز مهم است. در جنگل‌های راش خالص، کاهش تنوع شیمیایی لاشبرگ (مثلاً غلظت بالاتر لیگنین) منجر به تجزیه آهسته‌تر (تا ۴۰ درصد کندتر از مخلوط گونه‌ها) و کاهش دسترسی به مواد مغذی می‌شود. در مقابل، حضور گونه‌هایی مانند افرا یا ممرز در کنار راش، تعادل بهتری در آزادسازی کربن، نیتروژن و فسفر ایجاد می‌کند و نرخ تجزیه لاشبرگ را تا ۳۵ درصد افزایش می‌دهد.

لایه لاشبرگی یا لایه آلی سطحی خاک، متشکل از بقایای گیاهی مانند برگ‌ها، شاخه‌ها، میوه‌ها و دیگر مواد آلی در حال تجزیه است که نقش حیاتی در چرخه مواد مغذی، حفظ رطوبت خاک و پشتیبانی از زیست‌بوم جنگل ایفا می‌کند. این لایه به عنوان پلی بین زیست‌کره (گیاهان) و خاک عمل کرده و فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در گرادیان ارتفاعی، تغییرات عوامل محیطی مانند دما، بارش، تابش خورشیدی و پوشش گیاهی منجر به تغییرات قابل توجهی در ویژگی‌های لاشبرگ و خاک می‌شود. براساس مطالعات پیشین مرتبط با ارتفاع، انتظار می‌رفت که ضخامت لاشبرگ در ارتفاعات بالاتر، بیشتر باشد [۲۴، ۲۵، ۲۶]، که این روند معنی‌دار در پژوهش حاضر نیز مشاهده شد. این واقعیت که ضخامت لاشبرگ با ارتفاع تفاوت معنی‌داری دارد، نشان می‌دهد که تولید اولیه خالص لاشبرگ و نرخ تجزیه تقریباً برای این مخزن کربنی در تعادل نیستند. بین لاشبرگ و خاک جنگل یک رابطه چرخه‌ای وجود دارد. به‌طور مثال، در ارتفاعات بالا: لایه لاشبرگ ضخیم → تجزیه کند → افزایش اسیدیته خاک → فعالیت میکروبی محدود → انباشت بیشتر مواد آلی را در پی دارد. این چرخه باعث تشدید شرایط اسیدی و کاهش حاصلخیزی خاک در بلندمدت می‌شود. در مقابل، در ارتفاعات پایین، تجزیه سریع لاشبرگ، مواد مغذی را به چرخه بازگردانده و خاک حاصلخیزتر می‌شود. در همین راستا، Bayranvand و همکاران (۲۰۲۱) نتیجه گرفتند که شیب ارتفاعی تأثیر معنی‌داری بر فراوانی هوموس و اشکال هوموسی داشت. ضخامت لایه‌های آلی شامل OL، OF و OH با افزایش ارتفاع به‌طور چشمگیری افزایش یافت، در حالی که ضخامت لایه آلی-معدنی روند کاهشی را نشان داد. ضخامت لایه‌های OL و OF در ارتفاع ۱۵۰۰ متری تقریباً ۲/۵ برابر بیشتر از سایر ارتفاعات بود. بیشترین ضخامت لایه OH در ارتفاع ۱۵۰۰ متری از سطح دریا ثبت شد، در حالی که این لایه در ارتفاعات ۰، ۵۰۰ و ۲۰۰۰ متری مشاهده نشد [۲۵].

نتایج این پژوهش نشان داد که ارتباط مثبتی بین ارتفاع و ماده آلی لایه لاشبرگی و لایه ۰ تا ۱۰ سانتی‌متری خاک مشاهده شد که بیشترین افزایش معنی‌دار در ارتفاعات بالای ۹۰۰ متر رخ داد. در مطالعاتی، Sims و Nielsen (۱۹۸۶) نیز همین رابطه را در خاک‌های کوهستانی مونتانا تأیید کردند [۲۷]، همان‌طور که Garten و همکاران (۱۹۹۹) در مطالعه‌ای روی مخازن کربن خاک در جنگل‌های پهن‌برگ کوه‌های آپالچای جنوبی به این نتیجه رسیدند [۲۸]. علاوه بر این، Kane و همکاران (۲۰۰۵) نیز رابطه معکوسی بین کربن آلی خاک و دما در جنگل‌های نوئل سیاه (*Picea mariana*) آلاسکای مرکزی گزارش کردند [۲۹]. بر همین اساس، Dai و Huang (۲۰۰۶) با بررسی تأثیر ارتفاع بر ماده آلی خاک در ۸۸۶ مجموعه داده از سراسر چین، همبستگی مثبت بین ماده آلی خاک با میانگین بارش سالانه و ارتفاع، و همبستگی منفی با میانگین دمای سالانه نشان داده شد [۳۰]. همچنین، Bayranvand و همکاران (۲۰۲۱) نتیجه گرفتند که هیچ رابطه مشخصی بین ویژگی‌های لایه خاک (کربن، نیتروژن و نسبت C/N)

و ارتفاع مشاهده نشد، اگرچه تفاوت‌های معنی‌داری بین انواع جنگل‌ها شناسایی شد. بالاترین مقدار کربن در لایه خاک، در جنگل‌های خالص کوهستانی مرتفع مشاهده شد، در حالی که نیتروژن لایه خاک در جنگل‌های آمیخته واقع در مناطق مسطح به‌طور معنی‌داری بالاتر بود [۲۵].

کاهش دما، افزایش رطوبت و همچنین جنس و ماهیت لاشبرگ احتمالاً از عوامل اصلی کاهش نرخ تجزیه و در نتیجه تجمع ماده آلی خاک در ارتفاعات بالاتر هستند. کاهش دمای خاک عموماً منجر به کاهش نرخ تجزیه لاشبرگ، نرخ تجزیه ماده آلی خاک و نرخ معدنی شدن نیتروژن می‌شود. تجمع ماده آلی خاک ارتفاعات بالا ممکن است ناشی از افزایش تولید اولیه خالص نیز باشد، اگرچه این فرضیه چندان محتمل به‌نظر نمی‌رسد [۲۶]. غلظت ماده آلی خاک همچنین می‌تواند تحت تأثیر عمق خاک قرار گیرد، به‌طوری که خاک‌های کم‌عمق، غلظت بالاتری از ماده آلی خاک را در خود جای می‌دهند. با این حال، از آنجا که هیچ روند معنی‌داری در رابطه با عمق خاک و ارتفاع مشاهده نشد، این عامل نمی‌تواند الگوی تجمع ماده آلی خاک را توضیح دهد. وزن مخصوص ظاهری خاک، رابطه معکوس با ماده آلی خاک نشان داد که پیش‌تر نیز توسط Amponsah و Meyer (۲۰۰۰) گزارش شده بود [۳۱]. از این نتایج می‌توان پیش‌بینی کرد که با افزایش ارتفاع، وزن مخصوص ظاهری خاک کاهش و رطوبت خاک افزایش می‌یابد که دقیقاً مطابق با مشاهدات بود. در مقیاس جهانی، نسبت کل کربن به کل نیتروژن در جنگل‌های معتدله سرد با افزایش رطوبت کاهش می‌یابد [۲۶]. در همین راستا، Bohlen و همکاران (۲۰۰۱) نیز دریافتند که معدنی شدن کربن خاک با ارتفاع تغییر نمی‌کند، اما معدنی شدن نیتروژن به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. آنها همچنین همبستگی مثبت قوی بین پتانسیل (نترات زدایی) و غلظت نترات با ارتفاع را گزارش کردند. نتیجه‌گیری آنها این بود که توپوگرافی (به‌جای تفاوت در گونه‌های درختی)، عامل اصلی چرخه نیتروژن خاک است [۳۲]. علاوه بر این، Fisk و همکاران (۱۹۹۸) نیز در مطالعاتی درباره تأثیر توپوگرافی بر چرخه مواد مغذی در یک جنگل پهن‌برگ و سیستم‌های توندرا آلی، به نتیجه مشابهی رسیدند. به گفته آنها، افزایش دسترسی به نیتروژن در خاک‌های جنگلی ارتفاعات بالا هم به کاهش نسبت C/N لاشبرگ و هم به کاهش جذب نیتروژن توسط درختان به‌دلیل رشد کندتر مرتبط است. این شرایط منجر به کاهش تقاضا برای نیتروژن معدنی و افزایش نترات و فعالیت آنزیم دنیتریفیکاسیون می‌شود [۲۴].

تغییرات شرایط آب‌وهوایی در امتداد گرادیان ارتفاعی، به توزیع پوشش جنگلی و میکروزیست‌بوم خاک کمک می‌کند. به احتمال زیاد، تغییرات ناشی از اقلیم در جوامع قارچی و باکتریایی خاک و ورودی‌های کربن ناشی از گیاهان به خاک، سرنوشت ذخایر کربن در عرصه‌های کوهستانی را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. علی‌رغم کاهش بارندگی در ارتفاعات بالای ۲۰۰۰ متر در شمال ایران، دمای پایین خاک (۵ تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد) از کاهش رطوبت خاک جلوگیری می‌کند. اما با تشدید گرمایش جهانی، خشکی خاک رخ خواهد داد که ممکن است به فعالیت مفید میکروبی مرتبط با چرخه کربن و نیتروژن آسیب برساند. جوامع باکتریایی در خاک‌های جنگلی به تأثیرات تغییرات جهانی مانند گرمایش اقلیمی، افزایش سطح دی‌اکسیدکربن یا رسوب نیتروژن واکنش نشان می‌دهند. با افزایش گرمایش جهانی، دمای خاک و تبخیر افزایش یافته و ماده آلی گیاهی در ارتفاعات بالای ۲۰۰۰ متر کاهش می‌یابد. بنابراین، کاهش پوشش گیاهی ممکن است به کاهش تنوع و فعالیت جوامع قارچی و باکتریایی منجر شود [۳۳].

در میان شرایط متنوع آب‌وهوایی، پوشش گیاهی و محیطی و نیز ویژگی‌های خاک تأثیر معنی‌داری بر توزیع جوامع قارچی و باکتریایی در امتداد شیب ارتفاعی در جنگل‌های هیرکانی دارد. نتایج پژوهش‌های Bayranvand و همکاران (۲۰۲۱) تفاوت‌های واضحی در ساختار جوامع باکتریایی و قارچی در امتداد شیب ارتفاعی نشان داد [۲۵]. بیشترین تنوع باکتریایی و قارچی در سطوح ارتفاعی میانی تحت پوشش جنگل‌های راش مخلوط مشاهده شد. سطوح ارتفاعی پایین‌تر، شامل درختان انجیلی، بلندمازو و مرمر شرایط مطلوب‌تری برای تجزیه ماده آلی نشان دادند و همچنین حاوی مقادیر بالاتر نیتروژن، pH، کلسیم و زیست‌توده میکروبی نیتروژن بودند. تنوع و فراوانی نسبی باکتری‌ها و قارچ‌ها در ارتفاعات بالاتر (بیش از ۲۰۰۰ متر) کاهش یافت که همبستگی مثبتی با کاهش کیفیت خاک (مانند پایین بودن رس، pH، Ca، MBN-C و نسبت C/N بالا)، ماده آلی خاک و مواد مغذی داشت. تغییرات میکروبیوم خاک در امتداد شیب ارتفاعی همبستگی قوی با ویژگی‌های شیمیایی خاک نشان داد، که بیانگر این است که عوامل خاکی (ادافیک) ممکن است اصلی‌ترین محرک‌های ترکیب جامعه میکروبی در امتداد شیب‌های ارتفاعی باشند [۲۵].

مطالعات نشان داده که فرآیند تجزیه لاشبرگ توسط سه عامل کنترل می‌شود: اقلیم، کیفیت لاشبرگ و جامعه تجزیه‌کنندگان [۵، ۶، ۲۵]. اقلیم؛ با افزایش ارتفاع، دما کاهش می‌یابد (تقریباً 0.6°C درجه سانتی‌گراد به ازای هر ۱۰۰ متر)، که فعالیت آنزیمی و میکروبی را محدود می‌کند. به عنوان مثال، در آلپ سوئیس، نرخ تجزیه لاشبرگ بین ارتفاع ۶۰۰ متر و ۲۰۰۰ متر، ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. کیفیت لاشبرگ؛ درختان سوزنی‌برگ ارتفاعات بالا (مانند نوئل و نراد) لاشبرگی با نسبت کربن به نیتروژن (بالای ۳۰) تولید می‌کنند که در برابر تجزیه مقاوم است. لاشبرگ درختان پهن‌برگ در مناطق کم ارتفاع (کمتر از ۲۰) سریع‌تر تجزیه می‌شود. تجزیه‌کنندگان، با افزایش ارتفاع، قارچ‌ها غالب شده و تجزیه‌کننده لیگنین‌محور را ترجیح می‌دهند. باکتری‌ها در مناطق گرم‌تر و غنی از مواد مغذی کم ارتفاع، رشد بهتری دارند. همچنین، Langenbruch و همکاران (۲۰۱۲) گزارش نمودند که لاشبرگ راش بالاترین نسبت کربن به نیتروژن و نسبت لیگنین به نیتروژن را داشت [۶]. آنها دریافتند که مقدار ذخیره کربن آلی، نیتروژن کل و منیزیم و کلسیم قابل تبادل با افزایش سهم لاشبرگ گونه زبان‌گنجشک به کل لاشبرگ‌ها، همبستگی مثبت نشان دادند. گونه‌های درختی از طریق تفاوت در مقدار و شیمی لاشبرگ، بر ویژگی‌های شیمیایی خاک تأثیر می‌گذارند. علاوه بر این، Augusto و همکاران (۲۰۰۲) در بررسی خود، گونه‌های درختی را بر اساس توانایی اسیدی‌سازی به این ترتیب رتبه‌بندی کردند: سوزنی‌برگ‌ها بیشتر از راش، بلوط و توس بیشتر از افرای نروژی، ممرز، زبان‌گنجشک و نمدار [۵]. آنها چندین مکانیسم را توصیف کردند که از طریق آنها، گونه‌ها می‌توانند خاک را اسیدی کنند، از جمله ترکیب لاشبرگ، ته‌نشست و ترشحات ریشه [۵]. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که لاشبرگ راش، در مقایسه با زبان‌گنجشک و نمدار، حاوی مقادیر کمتری از کاتیون‌های بازی اما محتوای منگنز بیشتر و نسبت‌های زیادتر کربن به نیتروژن و لیگنین به نیتروژن است.

با افزایش ارتفاع از سطح دریا، دما به طور میانگین کاهش می‌یابد، درحالی‌که بارش و رطوبت نسبی معمولاً افزایش می‌یابند. این تغییرات بر نوع پوشش گیاهی، سرعت تجزیه لاشبرگ و فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک تأثیر مستقیم می‌گذارند. به طور مثال، در ارتفاعات بالا، جوامع گیاهی به سمت گونه‌های مقاوم به سرما تغییر می‌کنند که برگ‌هایی با ترکیبات لیگنینی بالاتر تولید می‌نمایند. این ویژگی‌ها، تجزیه لاشبرگ را کند کرده و ضخامت این لایه را افزایش می‌دهند. ویژگی‌های فیزیکی خاک جنگلی در امتداد گرادیان ارتفاعی نیز قابل توجه است. در ارتفاعات پایین، هوازگی شیمیایی شدید در شرایط گرم و مرطوب، خاک‌های با بافت ریز (غنی از رس) ایجاد می‌کند. با این حال، چرخه‌های مکرر یخ‌زدگی و ذوب در ارتفاعات متوسط ($2000-1000$ متر)، سنگ بستر را خرد کرده و خاک‌های لومی تشکیل می‌دهد. در مقابل، در ارتفاعات بالا، هوازگی فیزیکی (مانند ترک‌خوردگی ناشی از یخبندان) غالب است و منجر به خاک‌های دانه‌درشت و سنگی با تجمع ضعیف می‌شود. برای مثال، کاهش ضخامت لاشبرگ در ارتفاعات پایین ممکن است نشان‌دهنده افزایش نرخ تجزیه ناشی از گرمایش جهانی باشد که پیامدهای جدی برای چرخه کربن جنگل‌ها دارد. از این رو، مطالعات دقیق‌تر در مقیاس محلی و جهانی برای تدوین راهبردهای حفاظتی پیشنهاد می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

بازسازی لایه لاشبرگ و ویژگی‌های خاک در مناطق فشرده‌شده پس از قطع درختان، فرآیندی پیچیده است که به نوع لاشبرگ، شدت تردد ماشین‌ها و شیب مسیر بستگی دارد. استفاده از لاشبرگ آمیخته گونه‌ها و روش‌های احیایی مناسب می‌تواند بازسازی را تسریع کند، اما بازسازی کامل تا سطح پیش از اختلال ممکن است چندین دهه طول بکشد. گرادیان‌های ارتفاعی، یک آزمایشگاه طبیعی برای مطالعه تأثیر متغیرهای محیطی (مانند دما، بارش، نوع پوشش گیاهی) بر این اجزاء ارائه می‌دهند. با افزایش ارتفاع، شرایط آب‌وهوایی به طور چشمگیری تغییر می‌کند و این تغییرات، ترکیب جوامع گیاهی، نرخ تجزیه و فرآیندهای تشکیل خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این پژوهش، تغییرات بازیابی ویژگی‌های لایه لاشبرگ و خصوصیات خاک در امتداد گرادیان‌های ارتفاعی، با تمرکز بر جنگل‌های راش خالص را بررسی کرد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل ارتفاع از سطح دریا و شدت تردد، دارای اثر معنی‌داری بر مشخصه‌های لایه لاشبرگی شامل ضخامت، کربن آلی، نیتروژن آلی، نسبت C/N، فسفر و پتاسیم و مشخصه‌های فیزیکی خاک شامل وزن مخصوص ظاهری خاک، تخلخل کل خاک و مقاومت به نفوذ است. نتایج نشان داد که با وجود گذشت ۷ سال از فعالیت چوبکشی، مشخصه‌های لاشبرگ و فیزیکی خاک در هیچ طبقه ارتفاعی و تردد ماشین بازیابی

نشدند. برخی توصیه‌های مدیریتی برای کاهش اثرات محیط‌زیستی عملیات بهره‌برداری، شامل استفاده از ماشین‌آلات با فشار کم بر خاک (ماشین‌هایی با ابعاد لاستیک بزرگ‌تر یا چرخ‌های دویل یا ماشین‌های کفشک‌دار) بویژه در ارتفاعات حساس (در این پژوهش، ارتفاعات بالاتر از ۱۳۰۰ متر از سطح دریا)، ایجاد مناطق حائل در شیب‌های تند برای کاهش فرسایش و پایش بلندمدت پارامترهای خاک و لاشبرگ پس از عملیات چوبکشی، است. به‌طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری نمود که لایه لاشبرگ و ویژگی‌های خاک در امتداد گرادیان‌های ارتفاعی، بازتابی از تعامل بین اقلیم، پوشش گیاهی و فرآیندهای بیوژئوشیمیایی است.

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(5), 350-369.
- [2] 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.
- [3] 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(1), 207-216.
- [4] Bottinelli, N., Hallaire, V., Goutal, N., Bonnaud, P. & Ranger, J. (2014). Impact of heavy traffic on soil macroporosity of two silty forest soils: Initial effect and short-term recovery. *Geoderma*, 217(1), 10-17.
- [5] Augusto, L., Ranger, J., Binkley, D. & Rothe, A. (2002). Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility. *Annals of Forest Science*, 59(3), 233-253.
- [6] Langenbruch, C., Helfrich, M. & Flessa, H., (2012). Effects of beech (*Fagus sylvatica*), ash (*Fraxinus excelsior*) and lime (*Tilia spec.*) on soil chemical properties in a mixed deciduous forest. *Plant and Soil*, 352(2), 389-403.
- [7] Jourgholami, M., Ghassemi, T. & Labelle, E.R. (2019). Soil physio-chemical and biological indicators to evaluate the restoration of compacted soil following reforestation. *Ecological Indicators*, 101(1), 102-110.
- [8] Gomyo, M. & Kuraji, K. (2016). Effect of the litter layer on runoff and evapotranspiration using the paired watershed method. *Journal of Forest Research*, 21(6), 306-313.
- [9] 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), 2148.
- [10] Guckland, A., Jacob, M., Flessa, H., Thomas, F.M. & Leuschner, C. (2009). Acidity, nutrient stocks, and organic - matter content in soils of a temperate deciduous forest with different abundance of European beech (*Fagus sylvatica* L.). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172(4), 500-511.
- [11] Salehi, M., Zahedi Amiri, G., Attarod, P., Salehi, A., Brunner, I., Schleppe, P. & Thimonier, A. (2016). Seasonal variations of throughfall chemistry in pure and mixed stands of Oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) in Hyrcanian forests (Iran). *Annals of Forest Science*, 73(2), 371-380.
- [12] 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), 21-538.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Ebeling, C., Fründ, H.C., Lang, F. & Gaertig, T. (2017). Evidence for increased P availability on wheel tracks 10 to 40 years after forest machinery traffic. *Geoderma*, 297(1), 61-69.
- [16] Flores Fernández, J.L., Hartmann, P., Schäffer, J., Pulhmann, H. & von Wilpert, K. (2017). Initial recovery of compacted soil – planting and technical treatments decrease CO₂ concentrations in soil and promote root growth. *Annals of Forest Science*, 74(2), 73.

- [17] 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), 2148.
- [18] Ampoorter, E., De Frenne, P., Hermy, M. & Verheyen, K. (2011). Effects of soil compaction on growth and survival of tree saplings: A meta-analysis. *Basic and Applied Ecology*, 12(5), 394-402.
- [19] Meyer, C., Lüscher, P. & Schulin, R. (2014). Recovery of forest soil from compaction in skid tracks planted with black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.). *Soil and Tillage Research*, 143(2), 7-16.
- [20] Cambi, M., Hoshika, Y., Mariotti, B., Paoletti, E., Picchio, R., Rachele, R. & Marchi, E. (2017). Compaction by a forest machine affects soil quality and *Quercus robur* L. seedling performance in an experimental field. *Forest Ecology and Management*, 384(3), 406–414
- [21] Nikooy, M., Ahrari, S., Salehi, A. & Naghdi, R. (2015). Effects of rubber-tired skidder and farm tractor on physical properties of soil in plantation areas in the north of Iran. *Journal of Forest Sciences*, 61, 393–398.
- [22] Sinnett, D., Morgan, G., Williams, M. & Hutchings, T.R. (2008). Soil penetration resistance and tree root development. *Soil Use and Management*, 24(2), 273-280.
- [23] Presecan, M.F., Forkuo, G.O. & Borz, S.A. (2024). Soil Compaction Induced by Three Timber Extraction Options: A Controlled Experiment on Penetration Resistance on Silty-Loamy Soils. *Applied Sciences*, 14(1), 5117.
- [24] Fisk, M.C., Schmid, S.K. & Seastedt, T.R. (1998). Topographic patterns of above and below ground production and nitrogen cycling in alpine tundra. *Ecology*, 79(10), 2253-2266.
- [25] Bayranvand, M., Akbarinia, M., Salehi Jouzani, G., Gharechahi, J., Kooch, Y. & Baldrian, P. (2021). Composition of soil bacterial and fungal communities in relation to vegetation composition and soil characteristics along an altitudinal gradient, *FEMS Microbiology Ecology*, 97(1), 1-16.
- [26] Griffiths, R.P., Madritch, M.D. & Swanson, A.K. (2009). The effects of topography on forest soil characteristics in the Oregon Cascade Mountains (USA): Implications for the effects of climate change on soil properties. *Forest Ecology and Management*, 257(1), 1-7.
- [27] Sims, Z.R. & Nielsen, G.A. (1986). Organic carbon in Montana soils related to clay content and climate. *Soil Science Society of America Journal*, 50(11), 1261-1271.
- [28] Garten, C.T., Post III, W.M., Hanson, P.J. & Cooper, L.W. (1999). Forest carbon inventories and dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian Mountains. *Biogeochemistry*, 45(1), 115-145.
- [29] Kane, E.S., Valentine, D.W., Schuur, E.A.G. & Dutta, K. (2005). Soil carbon stabilization along climate and stand productivity gradients in black spruce forests of interior Alaska. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(12), 2118-2189.
- [30] Dai, W. & Huang, Y. (2006). Relation of soil organic matter concentration to climate and altitude in zonal soils of China. *Catena*, 65(1), 87-94.
- [31] Amponsah, I. & Meyer, W. (2000). Soil characteristics in teak plantations and natural forests in Ashanti region, Ghana. *Comm. Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 31(3), 355-373
- [32] Bohlen, P.J., Groffman, P.M., Driscoll, C.T., Fahey, T.J. & Siccama, T.G. (2001). Plant–soil–microbial interactions in a northern hardwood forest. *Ecology*, 82(7), 965-978.
- [33] Glassman, S.I., Weihe, C. & Li, J. (2018). Decomposition responses to climate depend on microbial community composition. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 115(4), 11994-11999.