

(OPEN ACCESS)

## The influence of elevation gradient and machine traffic intensity on recovery of soil biochemical and microbial indicators in 7-year-old skid trails

Tohid Ghassemi<sup>1</sup>, Meghdad Jourgholami<sup>\*2</sup>

1. Ph.D. Student of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: [tohid.ghassemi@ut.ac.ir](mailto:tohid.ghassemi@ut.ac.ir)
2. Corresponding Author, Professor, Dept. of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: [mjgholami@ut.ac.ir](mailto:mjgholami@ut.ac.ir)

---

---

### Article Info

#### Article type:

Full Length Research Paper

#### Article history:

Received: 09.09.2025

Revised: -----

Accepted: 11.26.2025

#### Keywords:

Ammonium,  
Microbial biomass,  
Nitrate,  
Oriental beech,  
Recovery

### ABSTRACT

**Background and Objectives:** Hyrcanian beech forests, as sensitive mountain ecosystems, are vulnerable to disturbances caused by logging operations. The traffic of skidding machinery leads to soil compaction and alterations in its biochemical and microbial properties, which can persist for decades. Elevation above sea level, by influencing climatic conditions, vegetation, and pedogenic processes, plays a crucial role in modulating these effects and determining the trajectory and rate of soil recovery. Despite the importance of this issue, there is limited information on the interactive effect of elevation gradient and traffic intensity on the recovery of microbial indicators and nutrient cycling in the soil of skid trails. This study aimed to investigate the effect of elevation gradient (700 to 1500 m a.s.l.) and machinery traffic intensity (low, moderate, high) on the recovery of soil biochemical and microbial properties in 7-year-old skid trails within pure Oriental beech (*Fagus orientalis*) stands of the Hyrcanian forests.

**Materials and Methods:** Soil sampling was conducted seven years after logging operations on skid trails and adjacent undisturbed areas across five elevation gradients (700, 900, 1100, 1300, and 1500 m) in the Kheyroud and Kojur forests. In each trail, three levels of traffic intensity (low, moderate, high) were distinguished based on distance from the landing. Soil samples were taken from a depth of 0-10 cm. Microbial biomass carbon (MBC), nitrogen (MBN), and phosphorus (MBP) were determined using the fumigation-extraction method. Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) and nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) concentrations were measured colorimetrically, and the net rate of nitrogen mineralization was determined through incubation. Data were analyzed using Kolmogorov-Smirnov, Levene's, two-way ANOVA, and Tukey's HSD tests.

**Results:** The interaction effect of elevation gradient and traffic intensity was statistically significant for all studied indicators ( $P < 0.01$ ). In control (undisturbed) areas, MBC showed a substantial increase of 246% with increasing elevation from 700 to 1500 m. In contrast, MBN (68%), MBP (57%),  $\text{NH}_4^+$  (60%),  $\text{NO}_3^-$  (76.3%), and N mineralization rate (65%)

---

decreased significantly. At lower elevations (700-900 m), MBC and MBN exhibited complete recovery; however,  $\text{NH}_4^+$  concentrations remained significantly lower than the control under moderate and high traffic intensities (6.5-7% reduction). At 900 m elevation,  $\text{NO}_3^-$  levels in all traffic intensity treatments (low, moderate, high) showed persistent reductions of 7.3%, 11.1%, and 7.7%, respectively, indicating sustained disruption of the nitrification process. At mid-elevations (1100 and 1300 m), high traffic intensity led to lasting decreases in  $\text{NO}_3^-$  (9-19%), N mineralization (11.5-14.5%), and MBP (21-26%). At the highest elevation (1500 m), high traffic intensity resulted in a 25% reduction in MBP and a significant increase in microbial biomass C/N and C/P ratios, signifying profound disruption of the phosphorus cycle and exacerbated P limitation. Pearson correlation analysis revealed that the interaction effect of traffic and elevation exhibited a very strong negative correlation with MBC ( $r = -0.88$ ) and  $\text{NO}_3^-$  ( $r = -0.93$ ), and a very strong positive correlation with the microbial biomass C/N ratio ( $r = 0.95$ ).

**Conclusion:** Seven years after logging operations, none of the elevation zones or traffic intensity levels had fully recovered to pre-disturbance conditions. Mid-elevations (900-1300 m) are particularly vulnerable to high traffic intensity, with persistent disruptions in nitrogen and phosphorus cycles posing a threat to long-term soil fertility. Management of skidding operations must adopt an approach based on elevational sensitivity, with strict limitations on traffic intensity, especially at mid and high elevations, to prevent irreversible degradation of these valuable ecosystems.

---

Cite this article: Ghassemi, Tohid, Jourgholami, Meghdad. 2026. The influence of elevation gradient and machine traffic intensity on recovery of soil biochemical and microbial indicators in 7-year-old skid trails. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 33 (1), 19-49.



© The Author(s).

DOI:

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

---

## اثر گرادیان ارتفاعی و شدت تردد بر بازیابی شاخص‌های بیوشیمیایی و میکروبی خاک در مسیرهای چوبکشی هفت‌ساله

توحید قاسمی<sup>۱</sup>، مقدار جورغلامی<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی دکتری جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: [tohid.ghassemi@ut.ac.ir](mailto:tohid.ghassemi@ut.ac.ir)

۲. نویسنده مسئول، استاد گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: [mjgholami@ut.ac.ir](mailto:mjgholami@ut.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
<b>نوع مقاله:</b> مقاله کامل علمی- پژوهشی	<b>سابقه و هدف:</b> جنگل‌های راش هیرکانی به‌عنوان اکوسیستم‌های کوهستانی حساس، در برابر اختلالات ناشی از عملیات بهره‌برداری آسیب‌پذیر هستند. تردد ماشین‌آلات چوبکشی باعث فشردگی خاک و تغییر در ویژگی‌های بیوشیمیایی و میکروبی آن می‌شود که می‌تواند برای دهه‌ها پایدار بماند. ارتفاع از سطح دریا با تأثیر بر شرایط اقلیمی، پوشش گیاهی و فرآیندهای خاک‌سازی، نقش مهمی در تعدیل این اثرات و تعیین مسیر و سرعت بازیابی خاک ایفا می‌کند. با وجود اهمیت این موضوع، اطلاعات کمی درباره اثر متقابل گرادیان ارتفاعی و شدت تردد بر بازیابی شاخص‌های میکروبی و چرخه عناصر غذایی در خاک مسیرهای چوبکشی وجود دارد. این پژوهش با هدف بررسی اثر گرادیان ارتفاعی (۷۰۰ تا ۱۵۰۰ متر) و شدت تردد ماشین‌آلات (کم، متوسط و زیاد) بر بازیابی ویژگی‌های بیوشیمیایی و میکروبی خاک در مسیرهای چوبکشی هفت‌ساله در توده‌های راش خالص جنگل‌های هیرکانی انجام شد.
<b>تاریخ دریافت:</b> ۱۴۰۴/۰۶/۱۸ <b>تاریخ ویرایش:</b> ----- <b>تاریخ پذیرش:</b> ۱۴۰۴/۰۹/۰۵	<b>مواد و روش‌ها:</b> نمونه‌برداری هفت سال پس از عملیات بهره‌برداری، در مسیرهای چوبکشی و مناطق دست‌نخورده مجاور در پنج گرادیان ارتفاعی (۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر) در جنگل‌های خیرود و کجور انجام شد. در هر مسیر، سه سطح شدت تردد (کم، متوسط و زیاد) بر اساس فاصله از دپو تفکیک گردید. نمونه‌های خاک از عمق ۱۰-۰ سانتی‌متری برداشت شدند. زیست‌توده میکروبی کربن، نیتروژن و فسفر به روش تدخین- استخراج، غلظت آمونیوم و نیترات با روش‌های رنگ‌سنجی و نرخ خالص معدنی‌شدن نیتروژن طی انکوباسیون تعیین گردید. تجزیه و تحلیل داده‌ها با آزمون‌های کولموگروف- اسمیرنوف، لوین، تجزیه واریانس دوطرفه و توکی انجام شد.
<b>واژه‌های کلیدی:</b> آمونیم، بازیابی، راش، زی توده میکروبی، نیترات	<b>یافته‌ها:</b> اثر متقابل گرادیان ارتفاعی و شدت تردد بر تمام شاخص‌های مورد بررسی معنی‌دار بود ( $P > 0.01$ ). در مناطق شاهد، زیست‌توده میکروبی کربن با افزایش ارتفاع از ۷۰۰ به ۱۵۰۰ متر،

افزایش چشمگیر ۲۴۶ درصدی نشان داد، درحالی که زیست توده میکروبی نیتروژن (۶۸ درصد)، زیست توده میکروبی فسفر (۵۷ درصد)، آمونیوم (۶۰ درصد)، نترات (۷۶/۳ درصد) و معدنی شدن نیتروژن (۶۵ درصد) کاهش یافتند. در ارتفاعات پایین (۷۰۰-۹۰۰ متر)، زیست توده میکروبی کربن و نیتروژن بازیابی کامل نشان دادند، اما غلظت آمونیوم در تردد متوسط و زیاد با کاهش ۶/۵ تا ۷ درصدی نسبت به شاهد، همچنان پایدار ماند. در ارتفاع ۹۰۰ متر، نترات در تمام سطوح تردد (کم، متوسط و زیاد) به ترتیب با کاهش ۷/۳، ۱۱/۱ و ۷/۷ درصدی، اختلال پایدار در فرآیند نیتریفیکاسیون را نشان داد. در ارتفاعات میانی (۱۱۰۰ و ۱۳۰۰ متر)، تردد زیاد باعث کاهش پایدار نترات (۹-۱۹ درصد)، معدنی شدن نیتروژن (۱۱/۵-۱۴/۵ درصد) و زیست توده میکروبی فسفر (۲۱-۲۶ درصد) شد. در ارتفاع ۱۵۰۰ متر، تردد زیاد منجر به کاهش ۲۵ درصدی زیست توده میکروبی فسفر و افزایش معنی دار نسبت های  $C/N$  و  $C/P$  زیست توده میکروبی گردید که نشانه اختلال عمیق در چرخه فسفر و تشدید محدودیت این عنصر است. نتایج همبستگی پیرسون نشان داد اثر متقابل تردد و ارتفاع با زیست توده میکروبی کربن (۰/۸۸-)، نترات (۰/۹۳-) و نسبت  $C/N$  زیست توده میکروبی (۰/۹۵) به ترتیب همبستگی منفی و مثبت بسیار قوی دارد.

**نتیجه گیری:** هفت سال پس از عملیات چوبکشی، هیچ یک از طبقات ارتفاعی و سطوح تردد به وضعیت اولیه بازنگشته اند. ارتفاعات میانی (۹۰۰-۱۳۰۰ متر) به ویژه در برابر تردد شدید آسیب پذیرترین مناطق هستند و اختلال پایدار در چرخه نیتروژن و فسفر در این ارتفاعات، حاصلخیزی بلندمدت خاک را تهدید می کند. مدیریت عملیات چوبکشی باید با رویکردی مبتنی بر حساسیت ارتفاعی و با محدودیت شدید تردد به ویژه در ارتفاعات میانی و بالا انجام شود تا از تخریب برگشتناپذیر این اکوسیستم های ارزشمند جلوگیری گردد.

استناد: قاسمی، توحید، جورغلامی، مقدار (۱۴۰۵). اثر گرادیان ارتفاعی و شدت تردد بر بازیابی شاخص های بیوشیمیایی و میکروبی خاک در مسیرهای چوبکشی هفت ساله. نشریه پژوهش های علوم و فناوری چوب و جنگل، ۳۳ (۱)، ۴۹-۱۹.

DOI:



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

## مقدمه

جنگل‌ها حدود ۳۰ درصد از مناطق خشکی زمین را تشکیل می‌دهند. اکوسیستم‌های جنگلی برای بقای بسیاری از موجودات زنده ضروری بوده و خدمات اکوسیستمی مهمی مانند تأمین غذا، چوب، پیشگیری از سیل، چرخه آب و مواد مغذی و تنظیم اقلیم را ارائه می‌دهند. با این حال، تقاضای انسانی برای محصولات جنگلی در حال افزایش است که می‌تواند ارائه برخی از این خدمات اکوسیستمی را مختل کرده و مشکلات زیست‌محیطی و اجتماعی ایجاد کند (۱). چوب و فرآورده‌های چوبی، مهم‌ترین محصولات جنگلی هستند که برای اهداف صنعتی و اقتصادی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. مدیریت سریع و کارآمد جنگل و برداشت چوب در مقیاس بزرگ، نیازمند استفاده از ماشین‌آلاتی مانند اسکیدرها و فورواردرها است. تردد ماشین‌آلات مرتبط با برداشت چوب، ۱۰ تا ۷۰ درصد از منطقه برداشت‌شده را تحت تأثیر قرار می‌دهد که نشان‌دهنده ریسک بالای آسیب به خاک جنگلی و اکوسیستم است (۲). در سال‌های اخیر، قدرت و عملکرد ماشین‌آلات برداشت چوب افزایش یافته، اما وزن بیش‌تر آن‌ها (تا ۴۵ مگاگرم) خطر فشردگی خاک را تشدید کرده است (۳). فشردگی خاک زمانی رخ می‌دهد که تنش‌های مکانیکی ناشی از ماشین‌آلات از مقاومت خاک فراتر رفته و منجر به تخریب ساختار خاک می‌شود. این پدیده یکی از بارزترین پیامدهای ناخواسته برداشت مکانیزه چوب است (۴). فشردگی خاک باعث ایجاد شیارها و اختلاط لایه‌های سطحی خاک شده و اثرات منفی بر عملکرد فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک دارد که در نهایت هماهنگی اکوسیستم جنگلی را برهم می‌زند. چنین اختلالات ناشی از ماشین‌آلات بر سلامت خاک و جنگل می‌تواند برای دهه‌ها پایدار بماند؛ بنابراین، کاهش اثرات فشردگی خاک ناشی از

برداشت مکانیزه چوب، برای مدیریت پایدار جنگل ضروری است (۵). کاهش منافذ هوایی بزرگ تا ۹۰ درصد و افزایش هم‌زمان حجم منافذ ریز تا ۴۰ درصد (۶، ۷، ۸) نیز در افزایش کلی فضای منافذ پر از آب منعکس می‌شود. از آن‌جاکه منافذ بزرگ کانال‌های مهم زهکشی هستند و سهم آن‌ها برای میزان تهویه خاک حیاتی است، فشردگی باعث کاهش نفوذپذیری گاز و تبادل گاز در مسیرهای چوبکشی می‌شود که در دسترسی کم‌تر به اکسیژن (۹) و غلظت بالاتر CO<sub>2</sub> نمایان می‌شود (۷).

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که فعالیت‌های قطع درختان و ساخت و استفاده از مسیرهای چوبکشی، گاهی اوقات تأثیرات نامطلوبی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک دارند (۴، ۱۰). این موضوع به‌ویژه در مسیرهای چوبکشی مشهود است، جایی که تردد ماشین‌آلات سنگین این تأثیرات را تشدید می‌کند (۱۱). از آن‌جاکه بسیاری از این تأثیرات بر خاک ممکن است سال‌ها یا دهه‌ها پایدار بمانند، مطالعات متعددی به دنبال درک بهتر فرآیندها و زمان‌بندی بازیابی خاک بوده‌اند (۱۲). در حالی که برخی مطالعات بازیابی ویژگی‌های خاک (مانند وزن مخصوص ظاهری خاک، زیست‌توده ریشه‌های ظریف و تخلخل درشت) را تنها در ۵ تا ۱۵ سال پس از قطع درختان گزارش کرده‌اند، همین پژوهش‌ها هم‌چنین تأثیرات باقیمانده بر ویژگی‌های شیمیایی خاک را نیز تأیید کرده‌اند (۱۳). به تازگی، مطالعات مبتنی بر توالی زمانی بلندمدت در مسیرهای چوبکشی نشان داده‌اند که اگرچه بسیاری از ویژگی‌های خاک پس از ۲۵ تا ۳۰ سال به‌طور کامل بازیابی نشده‌اند، بهبود تدریجی آن‌ها حاکی از فرآیند مستمر بازیابی است (۱۴).

در لایه معدنی سطحی فوقانی فشرد شده (۱۰ سانتی‌متر بالایی)، فراوانی میکروارگانیسم‌ها، اندازه‌گیری شده با زیست‌توده کربن میکروبی در برخی مطالعات

مهم‌ترین آن‌ها ارتفاع است. در همین راستا، یانگ و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای، با استفاده از فراتحلیل، اثرات برداشت چوب بر تنفس خاک، شامل اجزای خودپرورد (اتوتروف) و دگرپرورد (هتروتروفیک) آن و حساسیت دمایی‌شان را در مقیاس جهانی بررسی نمودند (۲۴) و داده‌های ۱۶۵۶ مشاهده زوجی از ۱۴۳ مطالعه در سراسر جهان ترکیب شدند. به‌طور متوسط، بهره‌برداری جنگل سبب افزایش تنفس خاک به مقدار ۶ درصد شد که این افزایش در جنگل‌های سوزنی‌برگ و مناطق نیمه‌گرمسیری چشمگیرتر بود. پاسخ تنفس کل خاک به تغییرات جزء دگرپرورد آن وابستگی بیش‌تری داشت تا جزء خودپرورد. اثرات مثبت برداشت بر هر دو جزء تنفس با افزایش شدت برداشت کاهش یافت و با تغییرات نیتروژن خاک، زیست‌توده ریشه و زیست‌توده میکروبی کربن همبستگی مثبت نشان داد. علاوه بر این، کلاین-راوفهاکه و همکاران (۲۰۲۴) به‌صورت سیستماتیک تأثیر مسیرهای چوبکشی را بر پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و میکروبیولوژیکی خاک در ۸۴ پلات جفتی در چهار نوع جنگل اروپای مرکزی بررسی کردند (۲۵). نتایج نشان داد که مسیرهای چوبکشی در مناطق کوهستانی کم‌ارتفاع کاهش نسبت کربن به نیتروژن زیست‌توده میکروبی (MBC/MBN) و هم‌چنین افزایش فعالیت‌های میکروبی (MBC/SOC) و آنزیمی را نشان دادند که منجر به چرخش سریع‌تر کربن (کاهش C/N و EOC/EN) و افزایش تلفات CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>/SOC) از خاک شد. پژوهش‌ها نشان داد که افزایش نسبی وزن مخصوص ظاهری در خاک‌های با بافت ریزدانه مسیرهای چوبکشی به‌عنوان عاملی مهمی است که تغییرات تعداد زیادی از پارامترهای خاک را کنترل می‌کند (۲۵).

ارتفاع نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌دهی به ویژگی‌های خاک و جوامع میکروبی ایفا می‌کند که عمدتاً ناشی از

کاهش یافته (۶) و در برخی دیگر بدون تغییر گزارش شده است (۱۵). به همین ترتیب، زیست‌توده نیتروژن میکروبی نیز در برخی موارد بدون تغییر (۱۵) و در برخی کاهش یافته است (۱۶). ترکیب جامعه میکروبی، ارزیابی‌شده با نسبت MBC/MBN در خاک فشرده‌شده جنگلی یا به سمت باکتری‌ها (نسبت MBC/MBN باریک؛ (۱۷)) یا به سمت قارچ‌ها (نسبت MBC/MBN گسترده؛ (۱۶)) تغییر یافته است.

ذخایر کربن، پتاسیم و فسفر در خاک معدنی مسیرهای چوبکشی پوشیده از مازاد مقطوعات (brush mats)، به‌طور معناداری بالاتر از مناطق دست‌نخورده بود (۱۸). با این حال، ادبیات موجود حاوی اطلاعات متناقضی درباره تأثیر مسیرهای چوبکشی بر تأمین مواد مغذی است و اطلاعات کمی در مورد دینامیک مواد مغذی وجود دارد. کربن آلی خاک (SOC) یا تحت تأثیر فشرده‌گی قرار نگرفت (۱۹، ۲۰) یا کاهش یافت (۲۱). یافته اخیر با کاهش معدنی شدن کربن گزارش‌شده توسط بایلیش و همکاران (۲۰۱۰) نیز همخوانی دارد (۲۲). محتوای نیتروژن کل یا بالاتر (۱۶)، پایین‌تر (۲۱) یا بدون تغییر بود (۱۹). معدنی شدن نیتروژن یا بدون تغییر ماند (۱۶) یا کاهش یافت (۱۷). نظری و همکاران (۲۰۲۰) کاهش نسبت C/N را گزارش کردند (۱۹)، درحالی‌که تان و همکاران (۲۰۰۸) افزایش آن را مشاهده کردند (۱۵). ابلینگ و همکاران (۲۰۱۷) محتوای بالاتر فسفر را در مسیرهای چوبکشی یافتند (۲۳)، درحالی‌که دیگران کاهش را گزارش دادند (۲۱). به‌طورکلی، ادبیات موجود حاوی نتایج متنوعی درباره شدت و جهت تأثیر مسیرهای چوبکشی بر ویژگی‌ها و فرآیندهای خاک است.

عوامل محیطی مختلفی می‌توانند شدت و پیامدهای فشرده‌گی خاک را تعدیل کنند که یکی از

افزایش ارتفاع در کوهستان‌های سراسر جهان کاهش می‌یابد و نرخ کاهش دمای با افزایش ارتفاع به‌طور گسترده مطالعه شده است (۳۱). در مقابل، تغییرات ارتفاعی خواص شیمیایی خاک کمتر مطالعه شده، وابسته به منطقه بوده و به عوامل متعددی مانند سنگ بستر، سن خاک و شرایط اقلیمی بستگی دارد (۲۸). این عوامل می‌توانند بر اسیدیته خاک و چرخه‌های بیوشیمیایی تأثیر گذاشته و در نتیجه غلظت مواد مغذی قابل‌دسترس گیاه را تغییر دهند. از آنجاکه شرایط محیطی شکل‌دهنده خواص شیمیایی خاک (مانند بارش) لزوماً به‌صورت خطی با ارتفاع تغییر نمی‌کنند (۳۰)، تغییرات خواص شیمیایی خاک نیز ممکن است همبستگی خطی با ارتفاع نداشته باشد. ارتفاع یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی است که خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک را در اکوسیستم‌های طبیعی، به‌ویژه جنگل‌های خالص، تحت تأثیر قرار می‌دهد. تغییرات ارتفاعی با ایجاد گرادیان‌های دمایی، رطوبتی و تغییر در پوشش گیاهی، به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر فرآیندهای خاکسازي، تجزیه مواد آلی و چرخه عناصر غذایی تأثیر می‌گذارند. تأثیرات ارتفاع هنگامی که اختلالاتی مانند عملیات حمل چوب در جنگل‌داری مدنظر قرار گیرد، پیچیده‌تر می‌شود. مناطق مرتفع اغلب نرخ‌ها و فرآیندهای بازیابی خاک منحصربه‌فردی را به دلیل شرایط ذاتی محیطی خود تجربه می‌کنند. عواملی مانند شدت فشردگی خاک و نوع ماشین‌آلات مورد استفاده می‌توانند پیامدهای حمل چوب را تشدید کنند که بالقوه به دوره‌های بازیابی طولانی‌تر برای شاخص‌های بیوشیمیایی خاک و جوامع میکروبی منجر می‌شود (۱، ۲). با توجه به اهمیت سلامت خاک و تنوع میکروبی برای عملکرد اکوسیستم، درک چگونگی تعامل ارتفاع با شدت تردد ماشین‌آلات برای راهبردهای مؤثر مدیریت جنگل و حفاظت از خاک ضروری است (۳، ۴).

تأثیر آن بر عوامل اقلیمی و محیطی است. مطالعات نشان می‌دهند ارتفاع از طریق تعاملات پیچیده بین متغیرهای متعددی مانند pH خاک، دما و الگوهای بارندگی، بر تنوع و ترکیب میکروبی خاک اثرگذار است (۲۶). به‌طور مثال، pH خاک به‌عنوان نیروی محرک اصلی تنوع میکروبی در طول شیب‌های ارتفاعی شناسایی شده است که بر ترکیب جوامع باکتریایی و یوکاریوتی تأثیر می‌گذارد. با افزایش ارتفاع، عوامل اقلیمی مانند دمای میانگین سالانه و بارش میانگین سالانه تغییر کرده و متعاقباً بر ویژگی‌های خاک و فعالیت میکروبی اثر می‌گذارند (۲۷). این تغییرات اقلیمی نه‌تنها بر پاسخ‌های فیزیولوژیک موجودات خاک، بلکه بر دسترسی به منابع حیاتی برای بقا و عملکرد آن‌ها مؤثر است. به‌طور ویژه، ارتفاع‌های بالاتر معمولاً با کاهش دما و تغییر رژیم رطوبتی همراه‌اند که مستقیماً بر فرآیندهای متابولیک میکروبی و چرخه مواد مغذی در خاک تأثیر می‌گذارند. ارتفاع هم‌چنین با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک همبستگی نشان می‌دهد. پژوهش‌ها بیانگر آن است که برخی خصوصیات خاک مانند هدایت الکتریکی و دسترسی به مواد مغذی (مانند  $\text{NH}_4^+$ ) می‌توانند با افزایش ارتفاع تغییر کنند که غالباً منجر به نوسانات در فعالیت آنزیم‌های خاک می‌شود (۲۸). به‌طور مشخص، فعالیت آنزیم‌های مرتبط با چرخه مواد مغذی نظیر  $\beta$ -گلوکوزیداز و فسفاتازها در ارتفاع‌های میانی افزایش یافته‌اند که نشان‌دهنده نقش این مناطق به‌عنوان کانون‌های فعالیت میکروبی و بازچرخش مواد مغذی است (۲۹).

ارتفاع به‌خودی‌خود مستقیماً بر پوشش گیاهی تأثیر نمی‌گذارد، بلکه نماینده مجموعه‌ای از شرایط محیطی است (۳۰). دو جزء اصلی محیطی که با ارتفاع تغییر کرده و در شکل‌دهی جوامع گیاهی نقش دارند، دما و خواص شیمیایی خاک هستند. دما با

راش خالص خیرود است. فرضیه تحقیق عبارتند از: گرادیان ارتفاع و شدت ترافیک اثر معنی‌داری بر ویژگی‌های خاک دارند و این اثرات در مقایسه با مناطق دست‌نخورده تفاوت‌های بارزی نشان می‌دهد.

### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد مطالعه:** این مطالعه در محدوده پارسل‌های ۱۱۴ (بخش پاتم)، ۲۱۲ و ۲۲۰ (بخش نمخانه)، ۳۲۰ (بخش گرازبن جنگل آموزشی-پژوهشی خیرود، حوزه ۴۵ گلبند) و پارسل‌های ۴۱۶-۴۱۷ (بخش شیوا دره، حوزه ۴۶ کجور) انجام پذیرفت. بر مبنای آخرین مستندات کتابچه طرح جنگلداری این حوزه‌ها، مسیرهای چوبکشی که آخرین عملیات بهره‌برداری چوب در آن‌ها صورت گرفته بود، مورد گزینش قرار گرفتند. در این راستا، چهار مسیر چوبکشی از جنگل خیرود در حوزه ۴۵ و یک مسیر در توده‌های راش خالص حوزه ۴۶ انتخاب شدند که هر یک در طبقات ارتفاعی متفاوتی استقرار داشتند. داده‌های مربوط به هر مسیر منتخب در توده‌های راش خالص، در پنج گرادیان ارتفاعی در جدول ۱ ارائه شده است. کلیه این مسیرها در سال ۱۳۹۵ تحت بهره‌برداری قرار گرفته‌اند و هفت سال از آخرین فعالیت چوبکشی در آن‌ها سپری شده است. عواملی مانند شیب و جهت مسیرهای چوبکشی به‌طور یکسان در نظر گرفته شدند.

جنگل هیرکانی در شمال ایران به‌عنوان یک اکوسیستم کوهستانی حساس، بسیار آسیب‌پذیر است و ویژگی‌های بیوشیمیایی و میکروبی خاک، واکنش‌های قابل‌توجهی به تغییرات در امتداد گرادیان‌های ارتفاعی نشان می‌دهد. اختلالات ناشی از عملیات بهره‌برداری بر خاک جنگل در این اکوسیستم‌های جنگلی چشمگیر است و تخریب‌های خاک مسیرهای چوبکشی به دلیل عملیات بهره‌برداری جنگل به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تهدیدکننده در برابر حفاظت از اکوسیستم‌های جنگلی هیرکانی شناخته می‌شود. لازم به ذکر است که این اختلالات منجر به تغییرات ویژگی‌های بیوشیمیایی و میکروبی خاک شده است. اگرچه تخریب خاک یک فرآیند طبیعی و تجدیدپذیر است، تخریب ناشی از تردد ماشین‌آلات چوبکشی با شدت بالا و کاهش کربن و سایر مواد آلی می‌تواند به چالش‌های زیست‌محیطی جدی در سیستم‌های جنگلی بینجامد. در جنگل هیرکانی، به‌ویژه در رابطه با گرادیان‌های ارتفاعی، مطالعات کم‌تری انجام شده است. از سوی دیگر، به دلیل پیچیدگی واکنش‌های اکوسیستم جنگلی به تغییرات ارتفاعی، توانایی ما برای پیش‌بینی الگوهای تغییرات ویژگی‌های بیوشیمیایی و میکروبی خاک در امتداد گرادیان ارتفاعی هنوز محدود است. هدف این مطالعه بررسی اثر گرادیان‌های ارتفاعی و شدت ترافیک ماشین‌آلات بر ویژگی‌های بیوشیمیایی و میکروبی خاک در مسیرهای چوبکشی جنگل‌های

جدول ۱- مشخصات هر کدام از مسیرهای چوبکشی مورد مطالعه.

Table 1. Specifications of each of the studied skid trails.

ارتفاع از سطح دریا (متر) Elevation (m a.s.l.)	پارسل Compartment	بخش District	موجودی در هکتار (سیلو) Growing stock (sylve ha <sup>-1</sup> )	تعداد در هکتار (اصله) Stem per hectare (stem ha <sup>-1</sup> )	تیپ فعلی جنگل Current forest type	تیپ خاک Soil type
700	114	پاتم Patom	345.8	231	راش - ممرز Beech - Hornbeam	راندزین - هومیک کربناته Rendzina - Humic Carbonate
900	212	نمخانه Namkhaneh	413.3	192	راش - ممرز Beech - Hornbeam	قهوه‌ای جنگلی Forest Brown
1100	220	نمخانه Namkhaneh	504	173	راش - ممرز به همراه توسکا Beech - Hornbeam with Alder	قهوه‌ای جنگلی با بافت لیمونی Forest Brown with silty texture
1300	320	گرازبن Gorazbon	499.6	266.3	راش - ممرز Beech - Hornbeam	قهوه‌ای جنگلی Forest Brown
1500	417-416	شیوا دره Shiva Darreh	306.5	146.8	راش خالص Pure Beech	قهوه‌ای جنگلی Forest Brown

مسیر اولیه تا دو سوم طول مسیر با شدت تردد متوسط) و شدت تردد کم (از انتهای مسیر ثانویه تا انتهای مسیر با کمترین شدت تردد) تقسیم شد. مطابق شکل ۱، در هر شدت تردد، یک قطعه نمونه مستقر شد که در آن سه خط اندازه‌گیری افقی با فواصل ۳ متری تعبیه شد. سپس یک خط به صورت تصادفی انتخاب شد و در عمق ۰-۱۰ سانتی متری خاک، نمونه برداری در سه موقعیت شامل: مرکز مسیر، مسیر چرخ راست و مسیر چرخ چپ انجام پذیرفت. این روش به منظور ارزیابی بازیابی طبیعی لایه لاشبرگ و ویژگی‌های خاک تحت تأثیر لاشبرگ راش خالص طراحی شد. جهت مقایسه بازیابی خصوصیات لاشبرگی و فیزیکی خاک، در هر قطعه نمونه، یک نمونه شاهد نیز از منطقه دست‌نخورده (در فاصله ۱۰ متری مسیر) برداشت شد.

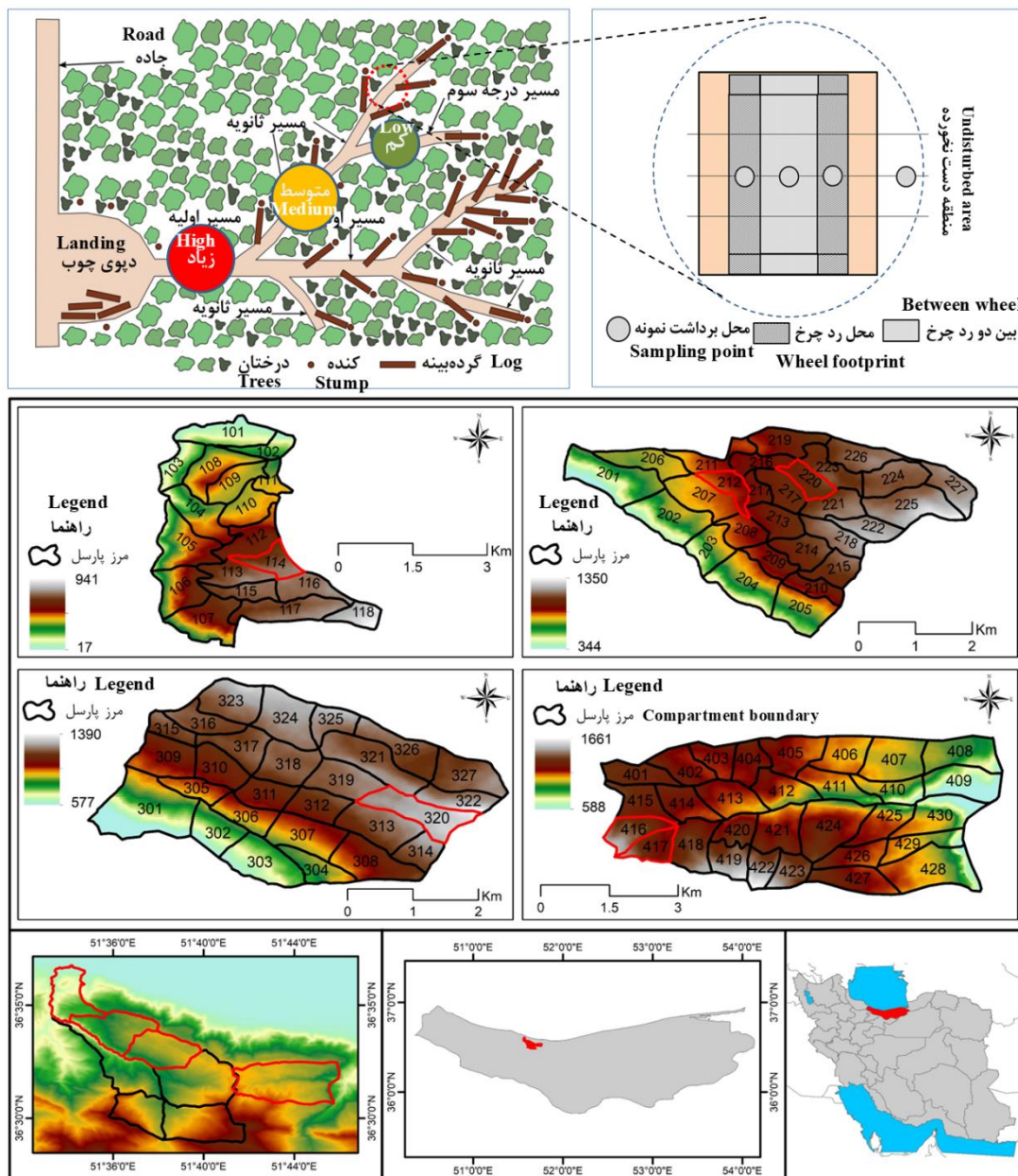
روش‌شناسی پژوهش: پژوهش حاضر در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با دو فاکتور گرادیان ارتفاعی و شدت تردد طراحی شد. در پنج پارسل، سه مسیر چوبکشی انتخاب شد و برای هر مسیر، سه سطح شدت ترافیک تعریف شد. معیار و نحوه تشخیص و انتخاب این مسیرها بر اساس مدارک و نظرات کارشناسان مجری و ناظر طرح و همچنین شواهد عینی موجود در منطقه بود. هر مسیر چوبکشی با ۳ تکرار و در هر مسیر چوبکشی ۳ شدت تردد کم، متوسط و شدید شناسایی شد. با توجه به این‌که پژوهش حاضر یک مطالعه گذشته‌نگر است، بنابراین هر مسیر چوبکشی بر اساس فاصله از دپو به شدت تردد زیاد (از محل دپو تا یک سوم طول مسیر با بیش‌ترین تعداد تردد) شدت تردد متوسط (از انتهای

مجموعاً ۱۸۰ نمونه مطابق فرمول: ۵ پارسل  $3 \times 3$  مسیر  $3 \times 3$  شدت ترافیک  $4 \times 4$  نمونه (۳ نمونه مسیر + ۱ نمونه شاهد) جمع‌آوری شد. عملیات چوبکشی در سال ۱۳۹۶ با اسکیدر چرخ لاستیکی تاف مدل E 655 با وزن (با تجهیزات کامل) برابر ۶۸۰۰-۶۳۲۵ کیلوگرم (برحسب لوازم نصب‌شده روی آن) انجام شد و نمونه‌برداری در مرداد و شهریور ۱۴۰۳ تحت شرایط جوی پایدار و عاری از بارش صورت پذیرفت.

بخشی از نمونه‌های خاک جهت سنجش شاخص‌های میکروبی در محفظه‌های یخ به آزمایشگاه منتقل و تا زمان آنالیز در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. جهت تعیین زی‌توده میکروبی کربن به روش تدخین-استخراج، ابتدا نمونه‌های مرطوب به مدت ۲۴ ساعت در دسیکاتور با کلروفرم تدخین شدند (۲۵، ۲۶). سپس خاک‌های تدخین‌شده و شاهد (تدخین‌نشده) با ۲۰ میلی‌لیتر سولفات پتاسیم ۰/۵ مولار به مدت ۳۰ دقیقه شیکر شده و عصاره‌گیری شدند. از هر عصاره، ۴ میلی‌لیتر به لوله‌های هضم منتقل و پس از افزودن ۲ میلی‌لیتر پتاسیم دی‌کرومات و ۵ میلی‌لیتر اسید سولفوریک غلیظ، ۰/۳ میلی‌لیتر شناساگر دی‌فنیل آمین (محلول حاوی ۱ گرم دی‌فنیل آمین در ۴۰ میلی‌لیتر آب مقطر و ۲۰۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک) اضافه شد. تیتراسیون نهایی با فروآمونیم سولفات انجام و زی‌توده میکروبی کربن بر اساس اختلاف کربن آلی نمونه‌های تدخین‌شده و شاهد (بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم) محاسبه شد. برای سنجش زی‌توده میکروبی نیتروژن و فسفر، پس از تدخین مشابه، عصاره‌ها با سولفات پتاسیم تهیه و در  $4^{\circ}\text{C}$  نگهداری شدند که به روش ایندوفنل (بر

حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم) اندازه‌گیری گردیدند. نترات و آمونیوم به ترتیب با روش‌های احیای کادمیوم و رنگ‌سنجی پس از عصاره‌گیری با کلرید پتاسیم ۲ مولار سنجیده شدند که در آن از MgO به‌عنوان عامل قلبایی برای آمونیوم و دواردا آلی به‌عنوان کاهنده برای نترات استفاده شد. نرخ خالص معدنی‌شدن نیتروژن طی دوره انکوباسیون یک‌ماهه با کیسه‌های مدفون و از طریق سنجش غلظت نترات (روش احیای کادمیوم) و آمونیوم (روش کلریمتریک) تعیین شد. جهت محاسبه این نرخ، پس از آماده‌سازی نمونه‌ها (خشک‌کردن، همگن‌سازی و الک ۲ میلی‌متری)، ازت کل و ازت معدنی (نترات + آمونیوم) اندازه‌گیری شدند.

**تجزیه و تحلیل داده‌ها:** جهت تحلیل داده‌ها، ابتدا پیش‌فرض نرمالیتی با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و همگنی واریانس‌ها بین تیمارها با آزمون لَوْن در سطح معناداری ۰/۰۵ بررسی شد. به‌منظور ارزیابی تأثیر تیمارهای گرادیان ارتفاعی و شدت تردد ماشین‌آلات در مسیرهای چوبکشی بر بازیابی مشخصه‌های بیوشیمیایی و میکروبی خاک، از تجزیه واریانس دوطرفه و برای مقایسات چندگانه میانگین‌ها از آزمون توکی استفاده شد. هم‌چنین تحلیل همبستگی خطی بین متغیرهای فیزیکیوشیمیایی و مشخصه‌های بیوشیمیایی و میکروبی خاک با ضریب همبستگی پیرسون انجام پذیرفت. کلیه تحلیل‌های آماری در سطح اطمینان ۹۵ درصد با نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۳ اجرا و ترسیم نمودارها با نرم‌افزار Excel صورت گرفت.



شکل ۱- طرح شماتیک از نمونه برداری از لایه لاشبریگی و خاک مسیرهای چوبکشی و منطقه شاهد در هر گرادیان ارتفاعی.  
 Figure 1. Schematic diagram of sampling from the litter layer and soil of skid trails and the control area in each elevation gradient.

### نتایج

میکروبی فسفر خاک، نسبت زی توده میکروبی کربن به نیتروژن، نسبت زی توده میکروبی کربن به فسفر، نسبت زی توده میکروبی نیتروژن به فسفر در خاک های فشرده مسیرهای چوبکشی از نظر آماری معنی دار است (جدول ۲).

نتایج نشان داد که اثر متقابل گرادیان ارتفاعی و شدت تردد بر مشخصه های بیوشیمیایی و میکروبی مورد بررسی شامل زی توده میکروبی کربن خاک، آمونیوم خاک، نترات خاک، معدنی شدن نیتروژن خاک، زی توده میکروبی نیتروژن خاک، زی توده

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر متقابل ارتفاع از سطح دریا و شدت تردد بر مشخصه‌های بیوشیمیایی و میکروبی خاک.

**Table 2. Analysis of variance (ANOVA) for the interaction effect of elevation above sea level and traffic intensity on soil biochemical and microbial characteristics.**

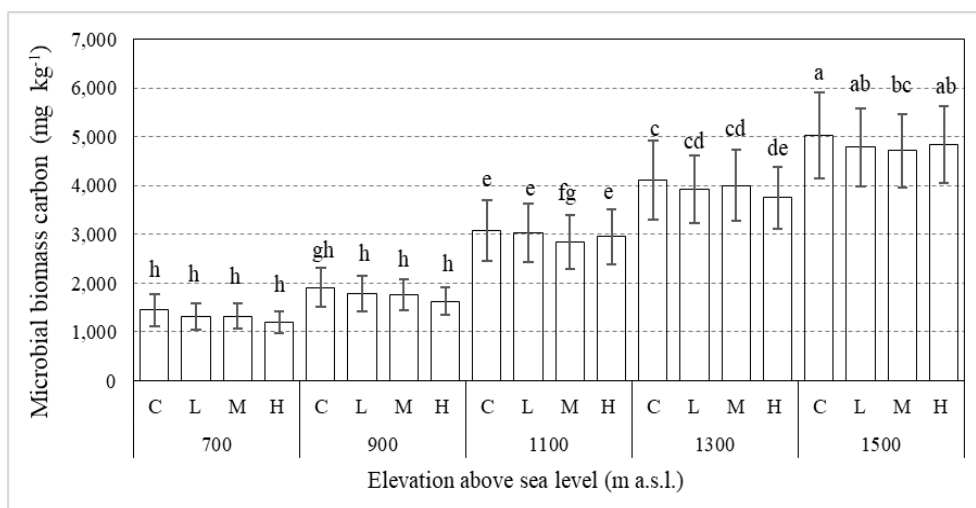
Sig.	F	میانگین مربعات Mean square	درجه آزادی df	مجموع مربعات Sum of squares	مشخصه Source of variation
0.00**	48.09	16370180.06	19	31103342.1	زی توده میکروبی کربن خاک Microbial biomass carbon (MBC)
0.00**	42.6	197.77	19	3757.61	آمونیم خاک Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )
0.00**	70.2	421.24	19	8003.51	نیترات خاک Nitrate (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )
0.00**	37.85	522.19	19	9921.57	معدنی شدن نیتروژن خاک Nitrogen mineralization
0.00**	25.83	42233.64	19	802439.12	زی توده میکروبی نیتروژن خاک Microbial biomass nitrogen (MBN)
0.00**	25.31	2356.7	19	47777.35	زی توده میکروبی فسفر خاک Microbial biomass phosphorus (MBP)
0.00**	1860.98	1530.41	19	29077.76	نسبت زی توده میکروبی کربن به نیتروژن Microbial biomass C/N ratio
0.00**	2628.85	33368.57	19	634002.92	نسبت زی توده میکروبی کربن به فسفر Microbial biomass C/P ratio
0.00**	5.17	0.4	19	7.52	نسبت زی توده میکروبی نیتروژن به فسفر Microbial biomass N/P ratio

\*\*Significant at the 0.01 probability level

\*\* معنی داری در سطح ۹۹ درصد

آماري معنادار با مناطق شاهد هستند. در ارتفاع ۱۳۰۰ متری، زیست توده میکروبی کربن خاک در تیمارهای تردد کم و متوسط، اختلاف آماری معناداری با منطقه شاهد ندارند که نشان دهنده بازیابی موفقیت آمیز پس از ۷ سال برای این سطوح است. در مقابل، زیست توده میکروبی کربن خاک در تردد زیاد به طور معنادار کم تر از منطقه شاهد است. در ارتفاع ۱۵۰۰ متری، تردد زیاد و تردد کم اختلاف آماری معناداری با منطقه شاهد ندارند که نشان دهنده بازیابی خوب زیست توده میکروبی کربن خاک در این سطوح است.

نتایج تجزیه واریانس بیانگر وجود اثر متقابل معنادار آماری بین گرادیان ارتفاعی و شدت تردد ماشین چوبکشی بر زیست توده میکروبی کربن خاک پس از ۷ سال از وقوع اختلال است (شکل ۲). میانگین زیست توده میکروبی کربن خاک در مناطق شاهد به طور چشمگیری با افزایش ارتفاع از سطح دریا افزایش می یابد. در ارتفاعات پایین تر (۷۰۰ و ۹۰۰ متر)، پس از ۷ سال زیست توده میکروبی کربن، بازیابی بسیار خوب تا کامل را نشان دادند. در این ارتفاعات، زیست توده میکروبی کربن خاک در تمامی سطوح شدت تردد (کم، متوسط و زیاد)، فاقد تفاوت



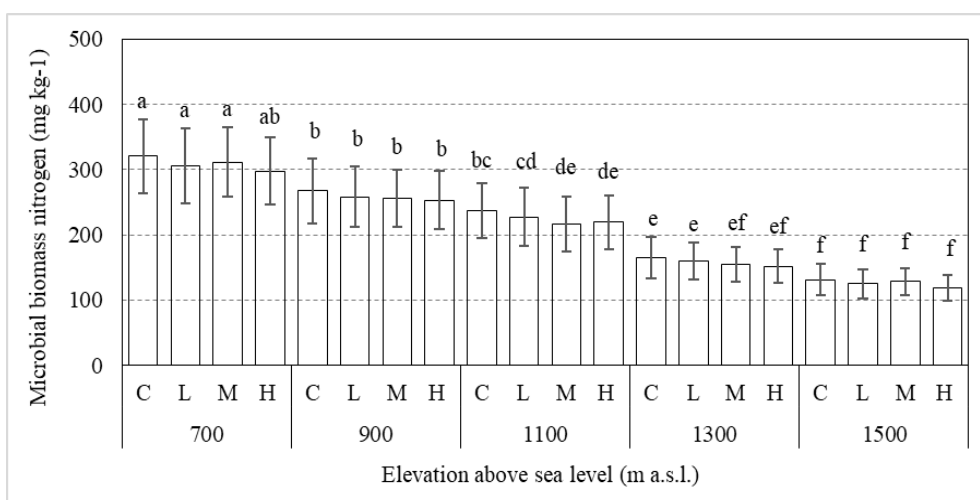
شکل ۲- مقایسه میانگین و انحراف معیار (بازه نشان داده شده) زیست توده میکروبی کربن خاک در گرادیان‌های مختلف از سطح دریا (۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر) و شدت تردد مسیرهای چوبکشی با آزمون توکی (ب). حروف لاتین نامتشابه نشانگر معنی دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است. شاهد (دست‌نخورده) (C)، مسیر با شدت تردد کم (L)، متوسط (M)، زیاد (H).

**Figure 2. Comparison of mean and standard deviation (indicated range) of soil microbial biomass carbon (MBC) across different elevation gradients (700, 900, 1100, 1300, and 1500 m a.s.l.) and skid trail traffic intensities using Tukey's HSD.**

Dissimilar lowercase letters indicate significant differences between means at the 95% confidence level. C: Control (undisturbed area); L: Low traffic intensity; M: Moderate traffic intensity; H: High traffic intensity.

اثر ماندگار معناداری ندارد. در ارتفاع ۱۱۰۰ متر، بازیابی زیست توده میکروبی نیتروژن برای تردد کم مناسب است، اما تردد متوسط و زیاد منجر به کاهش پایدار معنادار می‌شود. در ارتفاع ۱۳۰۰ متر، تردد کم بازیابی می‌یابد، اما تردد متوسط و زیاد اثر منفی ماندگار دارند. در ارتفاع ۱۵۰۰ متر، استرس محیطی شدید ارزیابی بازیابی زیست توده میکروبی نیتروژن را پیچیده می‌کند و تفاوت‌های آماری بین تیمارها وجود ندارد.

نتایج تجزیه واریانس و آزمون توکی بیانگر اثر متقابل معنادار گرادیان ارتفاعی از سطح دریا و شدت تردد ماشین‌آلات چوبکشی بر زیست توده میکروبی نیتروژن خاک در توده‌های راش خالص پس از ۷ سال است (شکل ۳). الگوی کلی داده‌ها نشان‌دهنده کاهش چشمگیر و پیوسته زیست توده میکروبی نیتروژن خاک با افزایش ارتفاع از سطح دریا است. بازیابی زیست توده میکروبی نیتروژن در ارتفاعات پایین (۷۰۰ و ۹۰۰ متر) کامل است و حتی تردد زیاد



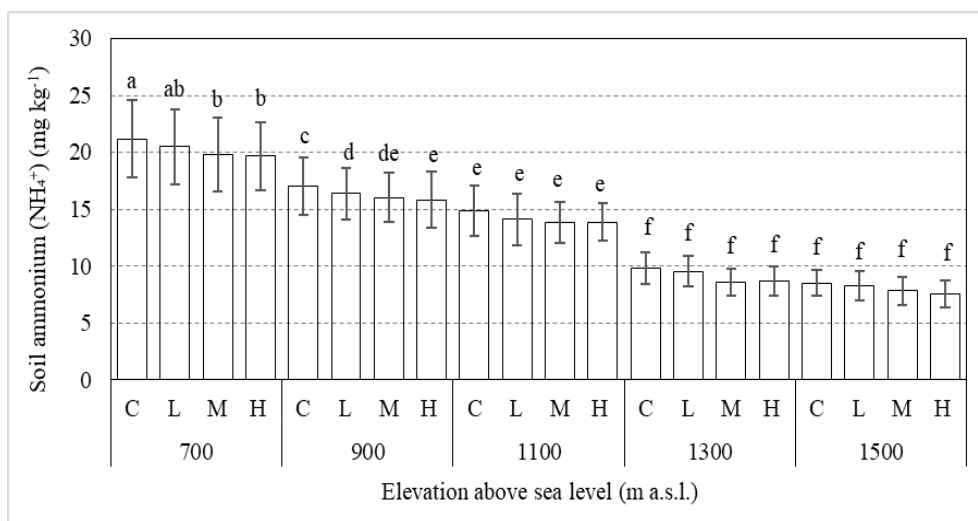
شکل ۳- مقایسه میانگین و انحراف معیار (بازه نشان داده شده) زیست توده میکروبی نیتروژن خاک در گرادیان‌های مختلف از سطح دریا (۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر) و شدت تردد مسیرهای چوبکشی با آزمون توکی (ب). حروف لاتین نامتشابه نشانگر معنی دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است. شاهد (دست‌نخورده) (C)، مسیر با شدت تردد کم (L)، متوسط (M)، زیاد (H).

**Figure 3. Comparison of mean and standard deviation (indicated range) of soil microbial biomass nitrogen (MBN) across different elevation gradients (700, 900, 1100, 1300, and 1500 m a.s.l.) and skid trail traffic intensities using Tukey's HSD.**

Dissimilar lowercase letters indicate significant differences between means at the 95% confidence level. C: Control (undisturbed area); L: Low traffic intensity; M: Moderate traffic intensity; H: High traffic intensity.

باقی‌مانده‌اند (کاهش ۶/۵-۷ درصد). این روند در ارتفاع ۹۰۰ متری تشدید می‌شود، جایی که تمامی سطوح تردد (کم، متوسط و شدید) به‌طور معنادار و گام‌به‌گام کم‌تر از شاهد هستند (کاهش ۳/۷-۷/۱ درصد). در ارتفاع ۱۱۰۰ متری، غلظت آمونیوم خاک در هیچ‌یک از سطوح تردد (حتی زیاد) تفاوت آماری معناداری با شاهد ندارند. این عدم تفاوت آماری در ارتفاعات ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متری نیز تداوم می‌یابد. این یافته نشان‌دهنده بازیابی نسبی یا کامل چرخه تولید آمونیوم در این ارتفاعات پس از ۷ سال است.

نتایج تجزیه واریانس بیانگر وجود اثر متقابل معنادار آماری بین گرادیان ارتفاعی و شدت تردد ماشین چوبکشی بر غلظت آمونیوم خاک هفت سال پس از اختلال است (شکل ۴). در مناطق شاهد، غلظت آمونیوم از ارتفاع ۷۰۰ متری تا ۱۵۰۰ متری حدود ۶۰ درصد کاهش می‌یابد. در ارتفاعات پایین‌تر (۷۰۰ و ۹۰۰ متر)، اثرات منفی تردد بر غلظت آمونیوم خاک حتی پس از ۷ سال پایدار مانده است. در ارتفاع ۷۰۰ متری، غلظت آمونیوم خاک در تیمارهای تردد متوسط و شدید به‌طور معنادار کم‌تر از منطقه شاهد



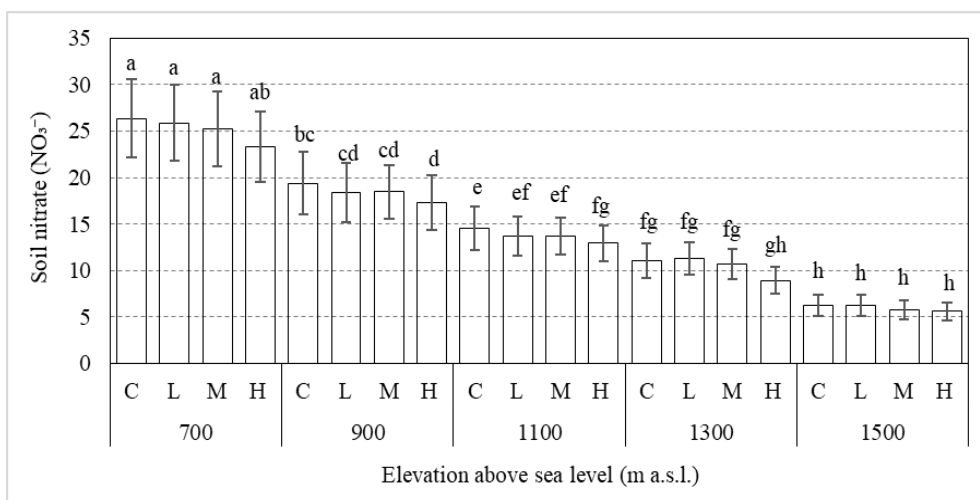
شکل ۴- مقایسه میانگین و انحراف معیار (بازه نشان داده شده) آمونیوم خاک در گرادبان‌های مختلف از سطح دریا (۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر) و شدت تردد مسیرهای چوبکشی با آزمون توکی (ب). حروف لاتین نامتشابه نشانگر معنی دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است. شاهد (دست‌نخورده) (C)، مسیر با شدت تردد کم (L)، متوسط (M)، زیاد (H).

**Figure 4.** Comparison of mean and standard deviation (indicated range) of soil ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) concentration across different elevation gradients (700, 900, 1100, 1300, and 1500 m a.s.l.) and skid trail traffic intensities using Tukey's HSD.

Dissimilar lowercase letters indicate significant differences between means at the 95% confidence level. C: Control (undisturbed area); L: Low traffic intensity; M: Moderate traffic intensity; H: High traffic intensity.

شاهد باقی‌مانده‌اند که نشان‌دهنده اختلال پایدار در فرآیندهای نیتریفیکاسیون حتی پس از ۷ سال است. این روند در ۱۱۰۰ متری به‌طور انتخابی بر تردد زیاد متمرکز می‌شود، درحالی‌که در ۱۳۰۰ متری مجدداً تردد زیاد با کاهش ۱۸/۹ درصد معنادار، بازیابی ناقص نیترات خاک را نشان می‌دهد. در ارتفاعات بالا (۱۵۰۰ متر)، نیترات خاک در تمامی سطوح تردد (حتی زیاد) فاقد تفاوت آماری معنادار با منطقه شاهد هستند.

نتایج تجزیه واریانس نشان‌دهنده اثر متقابل معنادار آماری بین گرادبان ارتفاعی و شدت تردد ماشین‌آلات بر غلظت نیترات خاک پس از ۷ سال از عملیات چوبکشی است (شکل ۵). در مناطق شاهد، غلظت نیترات از ارتفاع ۷۰۰ متری تا ۱۵۰۰ متری ۷۶/۳ درصد کاهش می‌یابد. در ارتفاعات پایین (۷۰۰ متر)، حتی تردد شدید اگرچه کاهش عددی ۱۱/۶ درصدی نیترات خاک را نشان می‌دهد، فاقد تفاوت آماری معنادار با شاهد است. در ۹۰۰ متری، نیترات خاک در تمامی سطوح تردد، به‌طور معنادار کم‌تر از منطقه



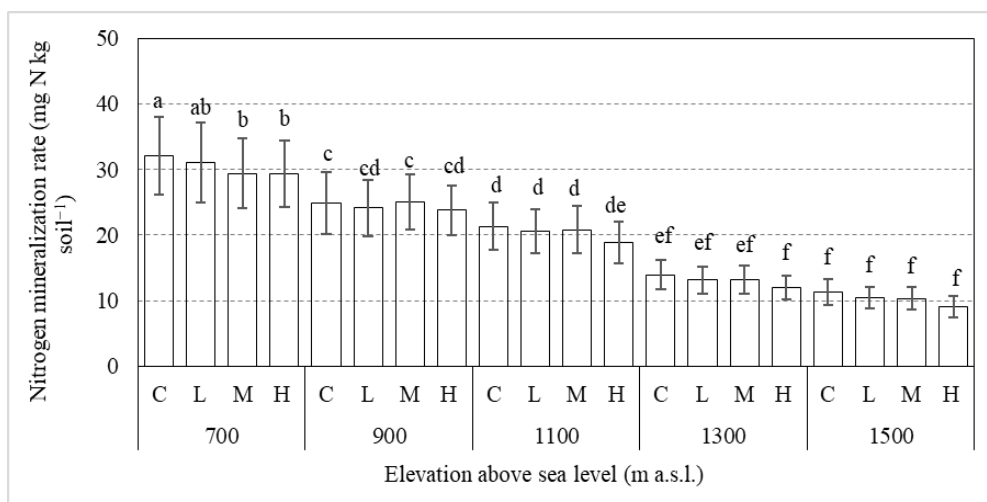
شکل ۵- مقایسه میانگین و انحراف معیار (بازه نشان داده شده) نیترات خاک در گرادیان‌های مختلف از سطح دریا (۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر) و شدت تردد مسیرهای چوبکشی با آزمون توکی (ب). حروف لاتین نامتشابه نشانگر معنی دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است. شاهد (دست‌نخورده) (C)، مسیر با شدت تردد کم (L)، متوسط (M)، زیاد (H).

**Figure 5. Comparison of mean and standard deviation (indicated range) of soil nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) concentration across different elevation gradients (700, 900, 1100, 1300, and 1500 m a.s.l.) and skid trail traffic intensities using Tukey's HSD.**

Dissimilar lowercase letters indicate significant differences between means at the 95% confidence level. C: Control (undisturbed area); L: Low traffic intensity; M: Moderate traffic intensity; H: High traffic intensity.

نتایج تجزیه واریانس بیانگر وجود اثر متقابل معنادار آماری بین گرادیان ارتفاعی و شدت تردد ماشین‌آلات بر نرخ معدنی‌سازی نیتروژن خاک هفت سال پس از عملیات چوبکشی است (شکل ۶). داده‌ها دو روند کلیدی را آشکار می‌سازند؛ کاهش پیش‌رونده نرخ معدنی‌سازی با افزایش ارتفاع در تمامی سطوح تردد و الگوهای متفاوت پاسخ به شدت تردد در ارتفاعات مختلف. در مناطق شاهد، معدنی‌سازی نیتروژن از ارتفاع ۷۰۰ متری تا ۱۵۰۰ متری، ۶۵ درصد کاهش می‌یابد. در ارتفاعات پایین (۷۰۰ متر)، تردد متوسط و زیاد کاهش معنادار پایدار (۸-۹ درصد) را نشان می‌دهند که بیانگر بازیابی ناقص

معدنی‌سازی نیتروژن خاک است. در ۹۰۰ متر، تردد متوسط بازیابی کامل داشته، حال آنکه تردد کم و زیاد کاهش‌های عددی نشان می‌دهند. ارتفاعات میانی (۱۱۰۰ و ۱۳۰۰ متر) الگوی مشابهی دارند؛ تردد زیاد به ترتیب ۱۱/۵ و ۱۴/۵ درصد کاهش معنادار معدنی‌سازی نیتروژن خاک نشان می‌دهد (بازیابی ناقص)، در حالی که سطوح خفیف‌تر تردد بازیابی نسبی دارند. در ۱۵۰۰ متر، علیرغم کاهش‌های عددی (۸-۲۰ درصدی)، نرخ معدنی‌سازی نیتروژن خاک، عدم تفاوت آماری نشان‌دهنده بازیابی نسبی عملکرد چرخه نیتروژن است.



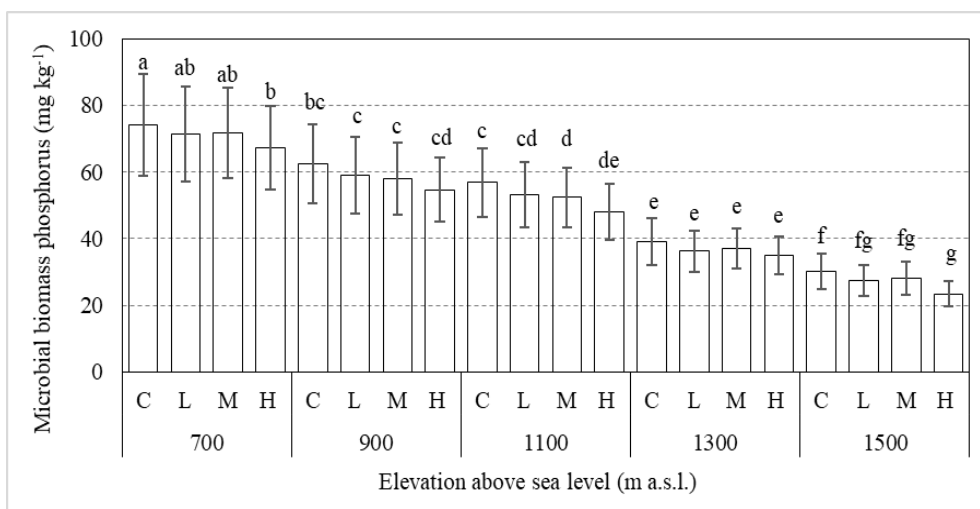
شکل ۶- مقایسه میانگین و انحراف معیار (بازه نشان داده شده) معدنی شدن نیتروژن خاک در گرادیان‌های مختلف از سطح دریا (۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر) و شدت تردد مسیرهای چوبکشی با آزمون توکی (ب). حروف لاتین نامتشابه نشانگر معنی دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است. شاهد (دست‌نخورده) (C)، مسیر با شدت تردد کم (L)، متوسط (M)، زیاد (H).

**Figure 6. Comparison of mean and standard deviation (indicated range) of soil nitrogen mineralization rate across different elevation gradients (700, 900, 1100, 1300, and 1500 m a.s.l.) and skid trail traffic intensities using Tukey's HSD.**

Dissimilar lowercase letters indicate significant differences between means at the 95% confidence level. C: Control (undisturbed area); L: Low traffic intensity; M: Moderate traffic intensity; H: High traffic intensity.

داده است ولی بازیابی ناقص در تردد زیاد مشاهده شده است. در ارتفاع ۹۰۰ متر، عدم بازیابی کامل زی‌توده میکروبی فسفر خاک در تمام سطوح تردد رخ داده است. در ارتفاع ۱۱۰۰ متر، شدیدترین کاهش پایدار با سلسله‌مراتب زی‌توده میکروبی فسفر خاک وابسته به شدت تردد مشاهده می‌شود. در ارتفاع ۱۳۰۰ متر، بازیابی آماری کامل زی‌توده میکروبی فسفر خاک رخ داده است. در ارتفاع ۱۵۰۰ متر، بازیابی ناقص زی‌توده میکروبی فسفر خاک تنها در تردد زیاد به دلیل اثرات تجمعی مشاهده می‌شود.

نتایج تجزیه واریانس و آزمون توکی نشان‌دهنده اثر متقابل معنادار گرادیان ارتفاعی از سطح دریا و شدت تردد ماشین‌آلات چوبکشی بر زیست‌توده میکروبی فسفر خاک توده‌های راش خالص پس از گذشت ۷ سال است (شکل ۷). داده‌ها الگوی کاهش قوی زیست‌توده میکروبی فسفر خاک را با افزایش ارتفاع از سطح دریا آشکار می‌کنند، به طوری که مقدار آن در مناطق شاهد در ارتفاع ۷۰۰ تا ۱۵۰۰ متری کاهش می‌یابد. در ارتفاع ۷۰۰ متر، بازیابی کامل زی‌توده میکروبی فسفر خاک در تردد کم/متوسط رخ



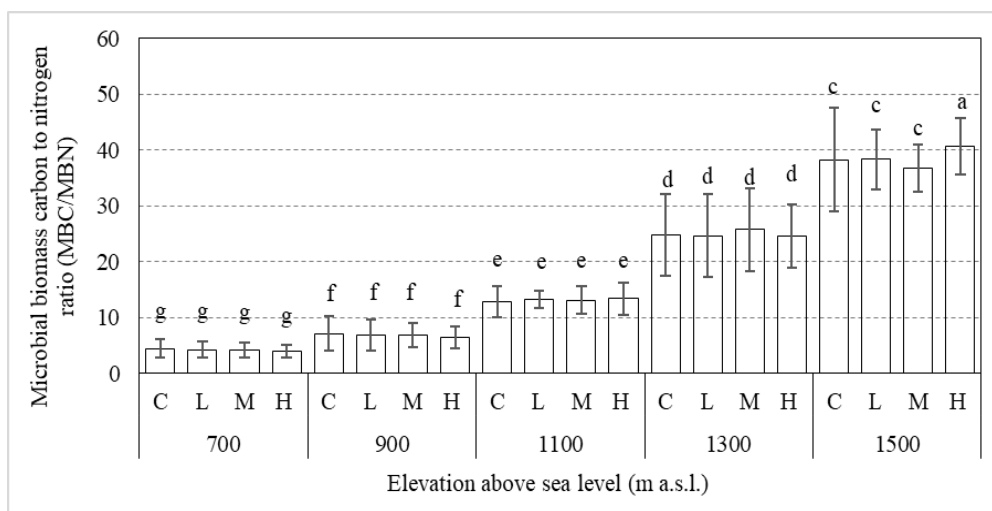
شکل ۷- مقایسه میانگین و انحراف معیار (بازه نشان داده شده) زی توده میکروبی فسفر خاک در گرادیان‌های مختلف از سطح دریا (۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر) و شدت تردد مسیرهای چوبکشی با آزمون توکی (ب). حروف لاتین نامتشابه نشانگر معنی دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است. شاهد (دست‌نخورده) (C)، مسیر با شدت تردد کم (L)، متوسط (M)، زیاد (H).

**Figure 7. Comparison of mean and standard deviation (indicated range) of soil microbial biomass phosphorus (MBP) across different elevation gradients (700, 900, 1100, 1300, and 1500 m a.s.l.) and skid trail traffic intensities using Tukey's HSD.**

Dissimilar lowercase letters indicate significant differences between means at the 95% confidence level. C: Control (undisturbed area); L: Low traffic intensity; M: Moderate traffic intensity; H: High traffic intensity.

۷ سال در تمام سطوح ترافیکی مشاهده می‌شود. در ارتفاع بالا (۱۵۰۰ متر)؛ بازیابی نسبت زی توده میکروبی کربن به نیتروژن به شدت وابسته به سطح ترافیک است. ترافیک سنگین منجر به افزایش پایدار و معنادار نسبت زی توده میکروبی کربن به نیتروژن (واکنش معکوس و عدم بازیابی) شده است. این ارتفاع به ویژه نسبت به تردد سنگین بسیار آسیب پذیر است و اثرات منفی آن حتی پس از ۷ سال نیز تداوم دارد.

نتایج نشان دهنده یک الگوی معنادار در نسبت زی توده میکروبی کربن به نیتروژن خاک تحت تأثیر متقابل ارتفاع از سطح دریا و شدت تردد ماشین آلات چوبکشی در جنگل‌های راش خالص است (شکل ۸). در ارتفاعات پایین (۷۰۰ و ۹۰۰ متر)، بازیابی نسبت زی توده میکروبی کربن به نیتروژن از نظر آماری کامل است، اما یک روند کاهشی عددی خفیف با افزایش شدت ترافیک باقی مانده است. در ارتفاعات میانی (۱۱۰۰ و ۱۳۰۰ متر)؛ بازیابی کامل و پایدار نسبت زی توده میکروبی کربن به نیتروژن پس از



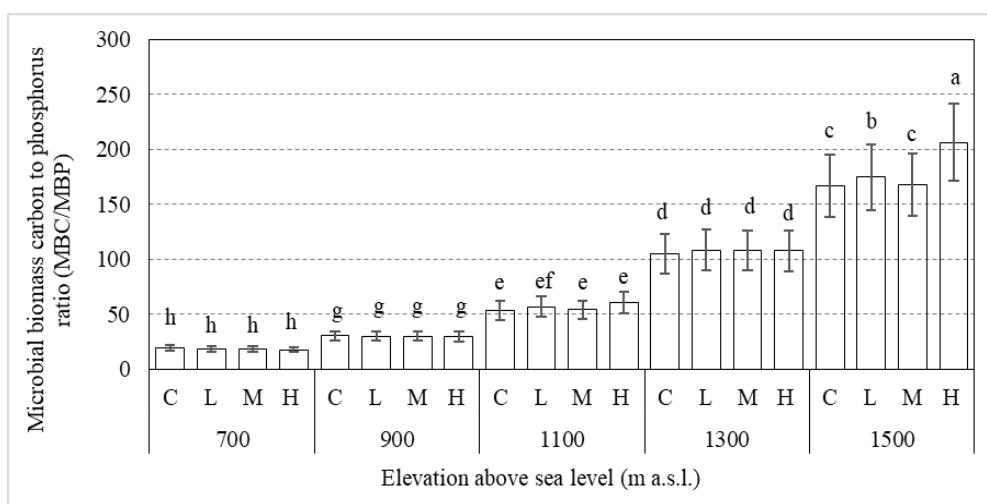
شکل ۸- مقایسه میانگین و انحراف معیار (بازه نشان داده شده) زی توده میکروبی کربن به نیتروژن خاک در گرادیان‌های مختلف از سطح دریا (۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر) و شدت تردد مسیرهای چوبکشی با آزمون توکی (ب). حروف لاتین نامتشابه نشانگر معنی دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است. شاهد (دست‌نخورده) (C)، مسیر با شدت تردد کم (L)، متوسط (M)، زیاد (H).

**Figure 8. Comparison of mean and standard deviation (indicated range) of soil microbial biomass carbon to nitrogen ratio (MBC/MBN) across different elevation gradients (700, 900, 1100, 1300, and 1500 m a.s.l.) and skid trail traffic intensities using Tukey's HSD.**

Dissimilar lowercase letters indicate significant differences between means at the 95% confidence level. C: Control (undisturbed area); L: Low traffic intensity; M: Moderate traffic intensity; H: High traffic intensity.

به صورت کاهش جزئی و غیرمعنادار نسبت زی توده میکروبی کربن به فسفر خاک مشاهده شده است. درحالی که نسبت زی توده میکروبی کربن به فسفر خاک در ارتفاعات پایین تر، عموماً بازیابی کامل را نشان می دهند، ارتفاعات بالاتر (۱۱۰۰ و به ویژه ۱۵۰۰ متر) آسیب پذیری قابل توجهی به ویژه در برابر شدت تردد زیاد از خود نشان می دهند. نگران کننده ترین یافته، اثرات ماندگار حتی در ترافیک کم در ارتفاع ۱۵۰۰ متر است که بر حساسیت فوق العاده چرخه فسفر در این اکوسیستم‌های مرتفع تأکید دارد.

نتایج تجزیه واریانس و داده‌های جدول، گویای اثر متقابل معنادار ارتفاع از سطح دریا و شدت تردد ماشین‌آلات چوبکشی بر نسبت زی توده میکروبی کربن به فسفر خاک، هفت سال پس از وقوع اختلال است (شکل ۹). مشابه الگوی مشاهده شده در نسبت C/N، یک افزایش نمایی قوی در میانگین نسبت زی توده میکروبی کربن به فسفر خاک با افزایش ارتفاع از سطح دریا (از ۷۰۰ متر به ۱۵۰۰ متر) دیده می شود. تأثیر شدت تردد در ارتفاعات پایین و میانی، بر نسبت زی توده میکروبی کربن به فسفر خاک،



شکل ۹- مقایسه میانگین و انحراف معیار (بازه نشان داده شده) نسبت زی توده میکروبی کربن به فسفر 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 نامتشابه نشانگر معنی دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است.

شاهد (دست‌نخورده) (C)، مسیر با شدت تردد کم (L)، متوسط (M)، زیاد (H).

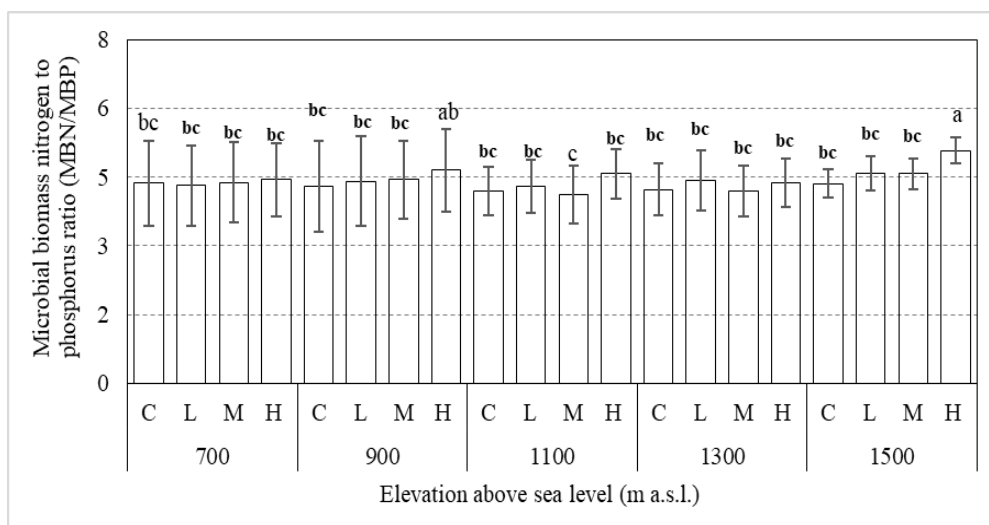
**Figure 9. Comparison of mean and standard deviation (indicated range) of soil microbial biomass carbon to phosphorus ratio (MBC/MBP) across different elevation gradients (700, 900, 1100, 1300, and 1500 m a.s.l.) and skid trail traffic intensities using Tukey's HSD.**

Dissimilar lowercase letters indicate significant differences between means at the 95% confidence level.

C: Control (undisturbed area); L: Low traffic intensity; M: Moderate traffic intensity; H: High traffic intensity.

ندارد. بازیابی نسبت زی توده میکروبی نیتروژن به فسفر خاک پس از هفت سال عمدتاً موفقیت‌آمیز بوده و تنها در دو مورد خاص، تیمار شدت تردد زیاد در ارتفاع ۹۰۰ متر و به‌طور بسیار برجسته‌تر شدت تردد زیاد در ارتفاع ۱۵۰۰ متر، عدم بازیابی معنادار مشاهده می‌شود. در ارتفاعات ۷۰۰، ۱۱۰۰ و ۱۳۰۰ متر، تمام سطوح شدت تردد و در ارتفاع ۱۵۰۰ متر، سطوح شدت تردد کم و متوسط، به وضعیت شاهد بازگشته‌اند.

نتایج تجزیه واریانس و داده‌های جدول نشان‌دهنده اثر متقابل معنادار ارتفاع از سطح دریا و شدت تردد ماشین‌آلات بر نسبت زی توده میکروبی نیتروژن به فسفر خاک، هفت سال پس از عملیات چوبکشی در جنگل‌های راش خالص است (شکل ۱۰). برخلاف نسبت‌های زی توده میکروبی C/N و C/P خاک که افزایش چشمگیری با ارتفاع نشان می‌دادند، میانگین نسبت زی توده میکروبی نیتروژن به فسفر خاک در محدوده باریک‌تری (۴/۱۲ تا ۵/۰۸) در نوسان است و الگوی کلی افزایشی آشکاری با ارتفاع



شکل ۱۰- مقایسه میانگین و انحراف معیار (بازه نشان داده شده) زی توده میکروبی نیتروژن به فسفر خاک در گرادیانهای مختلف از سطح دریا (۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر) و شدت تردد مسیره‌های چوبکشی با آزمون توکی (ب). حروف لاتین نامتشابه نشانگر معنی دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است. شاهد (دست‌نخورده) (C)، مسیر با شدت تردد کم (L)، متوسط (M)، زیاد (H).

**Figure 10.** Comparison of mean and standard deviation (indicated range) of soil microbial biomass nitrogen to phosphorus ratio (MBN/MBP) across different elevation gradients (700, 900, 1100, 1300, and 1500 m a.s.l.) and skid trail traffic intensities using Tukey's HSD.

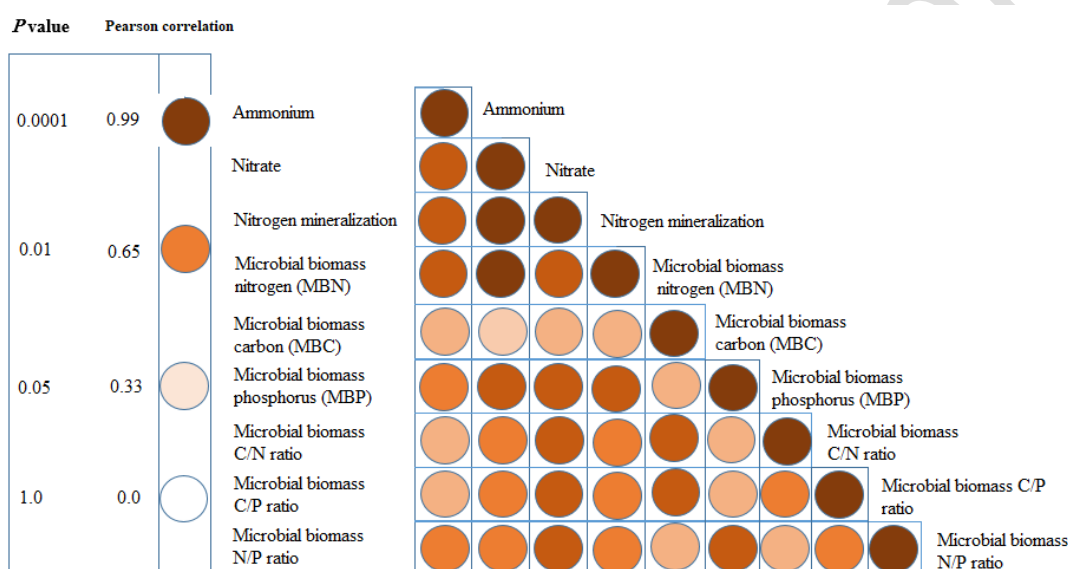
Dissimilar lowercase letters indicate significant differences between means at the 95% confidence level. C: Control (undisturbed area); L: Low traffic intensity; M: Moderate traffic intensity; H: High traffic intensity.

ارتفاع نشان می‌دهد. نتایج نشان‌دهنده همبستگی منفی بسیار قوی اثر متقابل تردد و ارتفاع با تمامی شاخص‌های حیاتی میکروبی و چرخه نیتروژن شامل زیست‌توده میکروبی کربن ( $r = -0.88$ )، زیست‌توده میکروبی نیتروژن ( $r = -0.86$ )، زیست‌توده میکروبی فسفر ( $r = -0.86$ )، معدنی شدن نیتروژن ( $r = -0.89$ )، آمونیوم ( $r = -0.89$ )، نیترات ( $r = -0.93$ ) و نیتروژن آلی خاک ( $r = -0.91$ ) است. همزمان، همبستگی مثبت بسیار قوی اثر متقابل شدت تردد ماشین‌آلات و شیب ارتفاع با نسبت زی‌توده میکروبی C/N ( $r = 0.95$ ) و نسبت زی‌توده میکروبی C/P ( $r = 0.94$ ) رخ داده است. وزن مخصوص ظاهری خاک، به‌عنوان شاخص کلیدی تخریب فیزیکی، رابطه مثبت معناداری با شاخص‌های شیمیایی و برخی اشکال نیتروژن نشان می‌دهد. این الگوی به‌ظاهر متناقض، در واقع بیانگر پیامدهای فشرده‌گی خاک است. هم‌چنین همبستگی

نتایج همبستگی پیرسون، روابط پیچیده و معناداری را بین اثر متقابل شدت تردد ماشین‌آلات و شیب ارتفاع با مشخصه‌های بیوشیمیایی و میکروبی خاک در توده‌های راش خالص هیرکانی پس از ۷ سال آشکار می‌کند (شکل ۱۱). همبستگی منفی بسیار قوی متغیر اثر متقابل شدت تردد  $\times$  ارتفاع با زیست‌توده میکروبی کربن، نیتروژن و فسفر بیانگر کاهش قابل توجه اندازه و فعالیت جامعه میکروبی خاک است. همبستگی منفی بسیار قوی متغیر اثر متقابل شدت تردد  $\times$  ارتفاع با معدنی‌سازی نیتروژن، آمونیوم و نیترات نشانگر اختلال جدی در چرخه نیتروژن است. همبستگی مثبت بسیار قوی متغیر اثر متقابل شدت تردد  $\times$  ارتفاع با نسبت زی‌توده میکروبی C/N و C/P نشان‌دهنده تغییر در ساختار جامعه میکروبی است. نسبت زی‌توده میکروبی N/P همبستگی ضعیف و غیرمعنادار با متغیر اثر متقابل شدت تردد  $\times$

جامعه میکروبی به مواد آلی باکیفیت (نیترژن بالا) وابسته است. نتایج همبستگی مثبت بسیار قوی زیست‌توده میکروبی کربن با نسبت زی‌توده میکروبی C/P ( $r=0/89$ ) و نسبت زی‌توده میکروبی C/N ( $r=0/88$ ) و همبستگی منفی بسیار قوی زیست‌توده میکروبی کربن با  $\text{NH}_4^+$  ( $r=-0/69$ ) و  $\text{NO}_3^-$  ( $r=-0/74$ ) را نشان می‌دهد.

منفی فشردگی خاک (افزایش وزن مخصوص ظاهری) با زیست‌توده کربن میکروبی ( $r=-0/22$ )، نسبت زی‌توده میکروبی C/N ( $r=-0/36$ ) و نسبت زی‌توده میکروبی C/P ( $r=-0/32$ ) تأیید می‌کند. همبستگی مثبت بسیار قوی کربن آلی خاک و نسبت C/N خاک ( $r=0/93$ ) و زیست‌توده میکروبی کربن ( $r=0/77$ ) و همبستگی منفی بسیار قوی نیترژن آلی خاک با زیست‌توده میکروبی کربن ( $r=-0/68$ )، نشان می‌دهد



شکل ۱۱- رابطه همبستگی پیرسون بین مشخصه‌های بیوشیمیایی و میکروبی خاک در مسیرهای چوبکشی در سطح یک درصد در گرادیان‌های مختلف از سطح دریا (۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر) و شدت تردد مسیرهای چوبکشی.

Figure 11. Pearson correlation relationship between soil biochemical and microbial characteristics in skid trails at the one percent significance level across different elevation gradients (700, 900, 1100, 1300, and 1500 m a.s.l.) and skid trail traffic intensities.

به‌ویژه به تردد شدید حساس بودند و مشخصه‌های  $\text{NO}_3^-$  (nitrate)، معدنی‌سازی نیترژن و زیست‌توده میکروبی فسفر کاهش ماندگاری را تجربه کردند. در ارتفاعات بالا (۱۵۰۰ متر)، استرس‌های محیطی ذاتی (دمای پایین، فصل رشد کوتاه) اثرات تردد را در برخی پارامترها پوشش داد، ولی تردد شدید اختلال عمیقی در چرخه فسفر و نسبت‌های استوکیومتری میکروبی (کربن به فسفر و نیترژن به فسفر) ایجاد

## بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر نشان می‌دهد که پاسخ خاک به تردد ماشین‌آلات در جنگل‌های راش به‌شدت وابسته به ارتفاع است. در ارتفاعات پایین (۷۰۰ متر)، جوامع میکروبی کربن و نیترژن پس از ۷ سال بازیابی نسبی نشان دادند، اما فرآیندهای کلیدی مانند معدنی‌سازی نیترژن و غلظت  $\text{NH}_4^+$  (ammonium) به‌طور پایدار مختل شدند. ارتفاعات میانی (۹۰۰-۱۳۰۰ متر)

شاهد با افزایش ارتفاع کاهش یافتند که بیانگر غلبه و محدودیت شرایط سخت محیطی ارتفاعات بالاتر (کاهش دما، فصل رشد کوتاه‌تر، تغییر کیفیت مواد آلی) بر این جوامع است. الگوی کاهشی مشابهی نیز برای غلظت  $\text{NH}_4^+$  (ammonium) و  $\text{NO}_3^-$  (nitrate) و نرخ معدنی‌سازی نیتروژن در مناطق شاهد با افزایش ارتفاع مشاهده شد که با کاهش فعالیت میکروبی و کندی فرآیندهای تجزیه در ارتفاعات بالاتر همخوانی دارد. خواص فیزیکی و شیمیایی خاک به‌عنوان بازتابی از شرایط محیطی، به‌ویژه در امتداد گرادیان‌های ارتفاعی، دستخوش تغییرات پیچیده‌ای می‌شوند. مطالعات متعدد نشان می‌دهد که عواملی مانند اسیدیته، ظرفیت تبادل کاتیونی، غلظت کاتیون‌های بازی و محتوای مواد آلی و مغذی (کربن آلی، نیتروژن، فسفر) تحت تأثیر مستقیم تغییرات ارتفاعی قرار دارند. این تغییرات ناشی از تغییرات توأم دما، بارش، پوشش گیاهی و فرآیندهای خاک‌زایی است که با افزایش ارتفاع رخ می‌دهد (۳۰). با این حال، الگوهای مشاهده شده خطی نبوده و به‌شدت تحت تأثیر عوامل منطقه‌ای مانند سنگ بستر مادر، سن خاک، جهت دامنه و فعالیت‌های انسانی قرار می‌گیرند (۲۸).

در ارتفاعات پایین‌تر (۷۰۰ و ۹۰۰ متر)، زیست‌توده میکروبی کربن و نیتروژن نشان‌دهنده بازیابی بسیار خوب تا کامل پس از ۷ سال بودند. این امر حاکی از انعطاف‌پذیری بالا و توانایی بازیابی قوی جوامع میکروبی در این شرایط محیطی پس از اختلال مکانیکی است. با این حال، این پایداری نسبی در ذخایر میکروبی نباید به‌منزله مجوزی برای تردد بی‌رویه تلقی شود، چراکه سایر جنبه‌های عملکرد خاک مانند غلظت  $\text{NH}_4^+$  (ammonium) و معدنی‌سازی نیتروژن، حتی در این ارتفاعات، در سطوح متوسط و زیاد تردد کاهش معنادار و ماندگاری را نشان دادند و پس از ۷ سال به‌طور کامل بازیابی نشده بودند. به‌ویژه،

کرد. آسیب‌پذیری خاک‌های جنگلی به اختلالات مکانیکی به شرایط محیطی وابسته است. جنگل‌های گرمسیری و معتدل به دلیل بارش بالا، ماده آلی خاک زیاد و رطوبت غالب، بیش‌ترین حساسیت را به فشرده‌گی ناشی از تردد ماشین‌آلات دارند (۳۲). دی‌آرموند و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که حتی پس از ۲۷ سال، خاک‌های رسی مناطق دپوی چوب‌آلات در آمازون، بازیابی کامل ویژگی‌های فیزیکی و زیست‌توده ریشه‌های ظریف را نشان نمی‌دهند (۳۳). لایه فشرده زیرین (۵-۱۰ سانتی‌متر) با افزایش رطوبت و تجمع مواد مغذی، بر لایه سطحی بازیابی‌شده تأثیر می‌گذارد. کلاین-راوفهاکه و همکاران (۲۰۲۴) نیز گزارش کردند که مسیرهای چوبکشی در جنگل‌های کوهستانی کم‌ارتفاع اروپا، فعالیت میکروبی و چرخش کربن را افزایش داده و منجر به تلفات  $\text{CO}_2$  بیش‌تر می‌شوند (۲۵). افزایش وزن مخصوص ظاهری خاک به‌عنوان شاخص طلایی این تأثیرات، با کاهش مواد آلی خاک، نیتروژن و زیست‌توده میکروبی همبستگی داشت.

پژوهش حاضر به بررسی تأثیر ارتفاع از سطح دریا و شدت تردد ماشین‌آلات چوب‌کشی بر ویژگی‌های بیوشیمیایی خاک، به‌ویژه جوامع میکروبی و چرخه‌های عناصر غذایی، در جنگل‌های راش پرداخته است. نتایج نشان‌دهنده وابستگی شدید این پارامترها به ارتفاع و تفاوت‌های چشمگیر در توانایی بازیابی آن‌ها پس از ۷ سال از وقوع اختلال است. در مناطق شاهد (بدون تردد)، زیست‌توده میکروبی کربن به‌طور چشمگیری با افزایش ارتفاع افزایش یافت (افزایش حدود ۲۴۶ درصد). این پدیده عمدتاً ناشی از تجمع مواد آلی با کیفیت بالاتر (به دلیل کاهش دمای خاک و کندی تجزیه)، افزایش رطوبت و شرایط بیوشیمیایی مساعدتر در ارتفاعات بالاتر بود. در مقابل، زیست‌توده میکروبی نیتروژن و فسفر در مناطق

افزایش pH خاک را تا مرز جنگلی (~۲۱۰۰ متر) ثبت کردند که با الگوی معکوس بارش (اوج بارش ~۱۰۵۰ میلی‌متر در ارتفاعات میانی) توضیح داده شد (۳۵).

تحلیل نسبت‌های عنصری زیست‌توده میکروبی (نسبت زی‌توده میکروبی کربن به نیتروژن، کربن به فسفر و نیتروژن به فسفر)، اطلاعات ارزشمندی در مورد تغییرات ترکیب یا فعالیت جامعه میکروبی و پویایی عناصر غذایی ارائه داد. میانگین نسبت زی‌توده میکروبی کربن به نیتروژن در مناطق شاهد با افزایش ارتفاع به‌طور چشمگیری افزایش یافت که نشان‌دهنده تغییرات بنیادین در جامعه میکروبی (مانند افزایش نسبت قارچ‌ها به باکتری‌ها) و پویایی تجزیه مواد آلی در ارتفاعات بالاتر است. در ارتفاعات پایین، تردد شدید این نسبت را کاهش داد، احتمالاً به دلیل تغییر ترکیب جامعه میکروبی یا افزایش موقت معدنی‌سازی نیتروژن. در مقابل، در ارتفاع ۱۵۰۰ متر، تردد شدید منجر به افزایش معنادار این نسبت شد که احتمالاً ناشی از ایجاد شرایط بی‌هوایی و سرکوب میکروب‌های نیتریفایرکننده یا کاهش شدید در دسترس بودن نیتروژن معدنی بود. این افزایش نشان‌دهنده اختلال ماندگار در توازن درونی نیتروژن و فسفر زیست‌توده میکروبی به نفع نیتروژن و احتمالاً تشدید محدودیت فسفر در این شرایط خاص است. پایداری نسبی این نسبت در سایر ارتفاعات و سطوح تردد (کم و متوسط) پس از ۷ سال، نشان‌دهنده مقاومت بالاتر آن نسبت به دو نسبت دیگر بود. محتوای کربن آلی خاک و ماده آلی عموماً با افزایش ارتفاع تمایل به افزایش نشان می‌دهند. پوربائی و همکاران (۲۰۲۰) در جنگل‌های شمال ایران کاهش معنادار pH و افزایش معنادار محتوای کربن آلی خاک را با افزایش ارتفاع (از ۱۰۰ تا ۱۷۰۰ متر) ثبت کردند (۲۶). این افزایش محتوای کربن آلی خاک عمدتاً

حساسیت فرآیند معدنی‌سازی نیتروژن به تردد در ارتفاعات پایین و میانی و واکنش غیرخطی آن در ارتفاع ۹۰۰ متری، نیاز به بررسی‌های عمیق‌تر مکانیسم‌های میکروبی در این زیست‌بوم‌ها را برجسته می‌سازد. در ارتفاعات بالا (۱۵۰۰ متر)، شرایط محیطی سخت ذاتی (دمای بسیار پایین، رطوبت بالا، فصل رشد کوتاه، خاک‌های کم‌عمق‌تر یا با بافت متفاوت، مواد آلی مقاوم‌تر) به‌عنوان فاکتورهای محدودکننده غالب عمل می‌کنند. این استرس‌های محیطی اثرات اختلاف‌های ناشی از تردد را در برخی پارامترها مانند زیست‌توده میکروبی نیتروژن خاک و غلظت (nitrate)  $\text{NO}_3^-$  تحت‌الشعاع قرار داده و منجر به عدم تفاوت آماری معنادار بین تیمارهای تردد و شاهد در این ارتفاع شد. با این حال، تردد شدید در این ارتفاع تأثیرات منفی مضاعفی داشت و منجر به کاهش بیش‌تر زیست‌توده میکروبی فسفر خاک و همچنین اختلالات عمیق‌تری در نسبت‌های عنصری زیست‌توده میکروبی شد. خواص خاک در امتداد گرادپان‌های ارتفاعی به دلیل تغییرات شدید محیطی (دما، بارش، پوشش گیاهی) به‌طور قابل‌توجهی تغییر می‌کنند، اما الگوهای جهانی واحدی وجود ندارد. راتیه باکس و همکاران (۲۰۲۱) در جنوب کوه تید (تریف) کاهش معناداری در ظرفیت تبادل کاتیونی، غلظت کاتیون‌های بازی و pH خاک با افزایش ارتفاع مشاهده کردند (۲۷). این روند با افزایش بارش از ساحل (~۱۰۰۰ میلی‌متر) به کمربند جنگلی (~۵۰۰ میلی‌متر) مرتبط بود. در مقابل، اونگر و همکاران (۲۰۱۲) در کوه‌های آند استوایی تغییرات ارتفاعی مشخصی در کاتیون‌های بازی گزارش نکردند (۳۴). این تناقض‌ها ناشی از عوامل منطقه‌ای متعددی مانند تفاوت در سنگ بستر، سن خاک، شرایط اقلیمی و پوشش گیاهی است (۲۸، ۳۰). به‌طور مثال، کوهرل و همکاران (۲۰۰۶) در دامنه شمال شرقی کوه تید

ارتفاع تأکید دارد که در آن شدت و فراوانی تردد ماشین‌آلات چوب‌کشی به‌طور دقیق بر اساس حساسیت اکولوژیک ذاتی هر محدوده ارتفاعی تنظیم شود تا از اختلالات پایدار در جوامع میکروبی خاک، به‌عنوان بازیگران کلیدی چرخه مواد مغذی و پایداری اکوسیستم جنگل‌های راش، جلوگیری گردد. نسبت‌های عنصری خاک (مانند C:N، C:P، N:P) شاخص‌های حساسی از محدودیت‌های غذایی و کارایی چرخه مواد مغذی هستند. راتیه باکس و همکاران (۲۰۲۱) اوج نسبت C:P خاک را در کمر بند جنگلی کاج فناری (ارتفاعات میانی) یافتند (۲۷). این نسبت بالا می‌تواند نشان‌دهنده استفاده کارآمد از فسفر توسط گیاهان و میکروب‌ها تحت شرایط مرطوب‌تر باشد (۳۹)، یا ناشی از کندی تجزیه سوزن کاج و انتقال ضعیف فسفر به خاک باشد. در ارتفاعات بالاتر، دمای سردتر تجزیه را بیشتر کند کرده و نسبت C:P را افزایش می‌دهد، همان‌گونه که شو و همکاران (۲۰۱۹) در شمال چین مشاهده کردند (۴۰). در مقابل، پوربائی و همکاران (۲۰۲۰) هیچ الگوی مشخصی برای فسفر در امتداد گرادیان نیافتند (۲۶) که با یافته‌های ادیریویرا و همکاران (۲۰۰۸) همخوانی دارد (۴۱). آن‌ها بالاترین مقدار فسفر را در ارتفاع ۱۳۰۰ متری مرتبط با تراکم بالاتر درختان و ذخیره فسفر در زیست‌توده درختی دانستند (۴۲). نسبت N:P در مطالعه راتیه باکس و همکاران (۲۰۲۱) تغییر معناداری نداشت که احتمالاً به‌دلیل تمرکز نمونه‌برداری بر خاک معدنی (با نیتروژن کم‌تر) و عدم تفاوت معنادار در غلظت نیتروژن در نمونه‌ها، علی‌رغم بقایای گیاهی بیشتر در ارتفاعات میانی بود (۲۷). این یافته با گزارش کوهلر و همکاران (۲۰۰۶) مبنی بر حداکثر غلظت نیتروژن در لایه‌های آلی همخوانی دارد (۳۵).

تحلیل جدول همبستگی پیرسون پس از هفت سال، روابط عمیق و معناداری را بین اثر ترکیبی شدت

ناشی از محدودیت دمایی (سردتر شدن) و رطوبتی (غالباً مرطوب‌تر) در ارتفاعات بالاتر است که سرعت تجزیه مواد آلی توسط میکروارگانیسم‌ها را کند می‌کند، حتی اگر دوره رشد گیاهی کوتاه‌تر و تولید اولیه خالص کم‌تر باشد (۳۶). ناشی و همکاران (۲۰۱۹) نیز در هیمالیای شرقی (۳۱۷ تا ۳۳۰۰ متر) افزایش معنادار ذخایر کل کربن و نیتروژن خاک با ارتفاع را تأیید کرده و نشان دادند که دما ۷۳ درصد از تغییرات کربن خاک و ارتفاع ۴۷ درصد از تغییرات N خاک را تبیین می‌کند (۳۷). pH و CEC نیز همبستگی مثبتی با این ذخایر داشتند. افزایش غلظت کربن در برگ‌ها (۲/۱ درصد به ازای هر ۱۰۰۰ متر) و لاشبرگ‌ها (۲/۳ درصد) با ارتفاع، همراه با کاهش تجزیه، توضیح‌دهنده تجمع SOC است. با این حال، استثنائاتی وجود دارد؛ کومار و همکاران (۲۰۱۳) کاهش SOC با ارتفاع را گزارش کردند که احتمالاً به‌دلیل تغییرات در سرعت تجزیه مرتبط با رطوبت یا ترکیب لاشبرگ بود. این تنوع نتایج، عدم وجود یک الگوی جهانی واحد را تأیید می‌کند (۳۸).

یافته‌های این پژوهش به‌وضوح پیچیدگی پاسخ اکوسیستم‌های جنگلی راش به اختلال ناشی از تردد ماشین‌آلات و نقش محوری ارتفاع از سطح دریا در تعدیل این پاسخ‌ها و توانایی بازیابی را نشان می‌دهد. این نتایج لزوم مبرم تدوین دستورالعمل‌های مدیریتی مبتنی بر واحدهای اکولوژیک ارتفاع‌محور را برای حفظ سلامت درازمدت چرخه‌های مواد مغذی و پایداری این جنگل‌ها تأیید می‌کند؛ بنابراین، پرهیز مطلق از تردد شدید در این ارتفاع ضروری است. تردد متوسط نیز باید با احتیاط فراوان صورت گیرد. پایش نسبت‌های عنصری به‌ویژه نسبت زی‌توده میکروبی نیتروژن به فسفر می‌تواند شاخص حساسی برای سلامت خاک در این مناطق باشد. به‌طور کلی، این پژوهش بر ضرورت رویکرد مدیریتی حساس به

باعث تجمع نسبی عناصر در لایه سطحی می‌شود. همبستگی منفی تراکم خاک با زیست‌توده میکروبی کربن و نسبت‌های C/N و C/P زیست‌توده میکروبی، به‌وضوح تأیید می‌کند که فشردگی خاک به‌طور کلی برای جامعه میکروبی مضر است. علاوه بر ارتفاع، جهت دامنه به‌عنوان عاملی کلیدی در تعدیل میکروکلیم و در نتیجه خواص خاک عمل می‌کند. حمید و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که اسپکت تأثیر معناداری بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک و غنای گونه‌ای قله‌ها دارد (۲۹). دمای خاک (که تحت تأثیر جهت است) به‌وضوح توزیع پارامترهای خاک و تنوع گیاهی را تعیین می‌کرد. تحلیل‌های آن‌ها نشان داد که ارتفاع، دمای خاک، pH، هدایت الکتریکی و نسبت C:N نقش برجسته‌ای در تعیین تنوع گیاهی دارند. هایله‌ماریام و همکاران (۲۰۲۳) در جنگل سیدا (اتیوپی) تغییرات معناداری را در بافت خاک با ارتفاع گزارش کردند (۴۳)؛ الگوهای تغییر کاتیون‌های بازی و ریزمغذی‌ها (Fe, Mn, Zn) در خاک و گیاهان در گرادیان‌های ارتفاعی پیچیده و فاقد یکنواختی است. وانگ و همکاران (۲۰۱۸) در امتداد سه گرادیان ارتفاعی در اقلیم‌های مختلف چین، هیچ الگوی ارتفاعی ثابتی برای این عناصر در خاک یا بافت‌های گیاهی (برگ، ریشه، شاخه، چوب) نیافتند (۴۴).

تردد ماشین‌آلات با ایجاد مواد آلی با کیفیت پایین، فشردگی خاک و شرایط بی‌هوایی، زنجیره تأمین غذای میکروب‌ها و محیط‌زیست آن‌ها را نابود کرده و منجر به کاهش چشمگیر زیست‌توده میکروبی می‌شود. همبستگی مثبت بسیار قوی زیست‌توده میکروبی کربن با نسبت‌های C/N و C/P زیست‌توده میکروبی نشان می‌دهد میکروب‌های باقی‌مانده در استرس تغذیه‌ای شدید بوده و قادر به استفاده کارآمد از منابع کربن یا تولید آنزیم‌های لازم برای معدنی‌سازی نیتروژن نیستند. این وضعیت یک چرخه

تردد ماشین‌آلات چوبکشی و شیب زمین با ویژگی‌های فیزیکی، بیوشیمیایی و میکروبی خاک در جنگل‌های راش خالص هیرکانی آشکار می‌کند. این الگوها روندی هشداردهنده از تخریب سیستماتیک سلامت خاک و اختلال در کارکردهای حیاتی اکوسیستم ارائه می‌دهند. کاهش شدید در زیست‌توده میکروبی، معدنی‌سازی نیتروژن و سطوح (ammonium)  $\text{NH}_4^+$ ، (nitrate)  $\text{NO}_3^-$  و نیتروژن آلی خاک، همگی بیانگر سرکوب شدید فعالیت، فراوانی و تنوع جامعه میکروبی و اختلال جدی در چرخه حیاتی نیتروژن، عنصر محدودکننده اصلی رشد راش، هستند. همزمان، همبستگی مثبت بسیار قوی اثر ترکیبی تردد و شیب با نسبت‌های C/N و C/P زیست‌توده میکروبی، نشانگر به‌هم‌خوردن تعادل عناصر در جامعه میکروبی باقی‌مانده است. این میکروب‌ها در حالت استرس شدید تغذیه‌ای قرار دارند که کارایی متابولیک و نقش آن‌ها در چرخه عناصر را به‌شدت کاهش داده است. تغییرات در کیفیت مواد آلی نیز مشهود است. همبستگی مثبت قوی اثر ترکیبی تردد و شیب با نسبت C/N لاشبرگ و کربن آلی خاک و همبستگی بسیار قوی با نسبت C/N خاک، نشان می‌دهد که تردد ماشین‌آلات منجر به کاهش کیفیت لاشبرگ و تغییر ترکیب مواد آلی خاک به سمت ترکیبات با تجزیه‌پذیری کم‌تر (مانند بقایای چوبی خردشده) شده است. تردد ماشین‌آلات در مسیرها، با از بین بردن فضاهای منفذی خاک، نفوذ آب‌وهوا را به‌شدت کاهش داده و شرایط بی‌هوایی ایجاد می‌کند. در این شرایط، فعالیت میکروب‌های هوازی مسئول معدنی‌سازی نیتروژن و تجزیه مواد آلی به‌شدت سرکوب می‌شود و میکروب‌های بی‌هوایی کم‌کارایی فعال‌تر می‌گردند. تجمع  $\text{NH}_4^+$  و کاهش نسبی  $\text{NO}_3^-$  نشانه‌ای کلاسیک از شرایط بی‌هوایی و اختلال در فرآیند نیتریفیکاسیون است. کاهش نفوذپذیری نیز

منحصربه‌فرد جهانی می‌باشد. حفاظت پایدار مستلزم اجرای فوری مدیریت بسیار دقیق و کم‌آسیب عملیات چوبکشی، شامل اعمال محدودیت‌های شدید بر شدت و گستره تردد، طراحی مسیرهای ثابت کم‌عرض، استفاده از ماشین‌آلات کم‌فشار، زمان‌بندی عملیات در شرایط مناسب خاک، پرهیز از تردد در شیب‌های تند و مناطق حساس و اجرای برنامه‌های فعال احیای خاک است. پایش بلندمدت شاخص‌های حساس سلامت خاک، به‌ویژه شاخص‌های میکروبی و فیزیکی، برای ارزیابی اثربخشی این اقدامات و حفظ این گنجینه‌های طبیعی حیاتی است.

نتایج پژوهش حاضر بر اهمیت حیاتی مدیریت بسیار دقیق و کم‌آسیب عملیات چوبکشی، به‌ویژه در ارتفاعات حساس، تأکید می‌کند. محدودیت شدت تردد، استفاده از ماشین‌آلات با فشار کم بر خاک، تعیین شبکه‌های ثابت و مشخص مسیرهای چوبکشی و اجتناب از عملیات در شرایط مرطوب خاک، از جمله اقدامات ضروری برای به حداقل رساندن این اثرات مخرب عمیق و بلندمدت بر اکوسیستم‌های ارزشمند جنگل‌های راش هستند. احیای کامل سلامت خاک و جوامع بیولوژیکی پس از چنین اختلالاتی ممکن است دهه‌ها به طول بیانجامد.

### نتیجه‌گیری کلی

مطالعات متعدد بر روی جنگل‌های راش هیرکانی نشان داده که اثرات اختلال ناشی از تردد ماشین‌آلات به‌شدت وابسته به ارتفاع است. در مناطق شاهد، زی‌توده میکروبی کربن با ارتفاع افزایش می‌یابد (به‌دلیل تجمع مواد آلی با کیفیت بالاتر و شرایط مرطوب‌تر)، درحالی‌که زی‌توده میکروبی نیتروژن و فسفر کاهش می‌یابند (به دلیل محدودیت‌های دمایی). در ارتفاعات پایین (۷۰۰-۹۰۰ متر)، زی‌توده میکروبی کربن و نیتروژن بازیابی نسبی نشان دادند، اما غلظت

معیوب تخریب ایجاد می‌کند. همبستگی مثبت بسیار قوی بین تمام شاخص‌های نیتروژنی و همبستگی منفی بسیار قوی همه آن‌ها با اثر ترکیبی تردد و شیب و نسبت‌های استوکیومتری میکروبی، گواه توقف سیستماتیک چرخه نیتروژن است. کاهش زیست‌توده میکروبی نیتروژن ظرفیت خاک برای ذخیره و تبدیل نیتروژن را کاهش داده و کاهش معدنی‌سازی نیتروژن به معنای کاهش در دسترس بودن این عنصر حیاتی برای درختان راش است. همبستگی مثبت قوی وزن مخصوص ظاهری خاک با نسبت‌های  $C/P$  و  $C/N$  زیست‌توده میکروبی نیز نشان‌دهنده تغییر در ترکیب و وضعیت تغذیه‌ای جامعه میکروبی به سمت جوامعی مقاوم‌تر اما کم‌کارآمدتر و تحت استرس کمبود نیتروژن و فسفر است. همبستگی منفی بسیار قوی وزن مخصوص ظاهری و مقاومت به نفوذ خاک با معدنی‌سازی نیتروژن نشانگر کاهش شدید تبدیل نیتروژن آلی به اشکال معدنی قابل‌جذب برای گیاهان است که مستقیماً ناشی از سرکوب فعالیت میکروبی است. در نتیجه، داده‌ها به‌طور قاطع نشان می‌دهند که تردد ماشین‌آلات چوبکشی پس از هفت سال، پایه‌های حیاتی اکوسیستم یعنی خاک و جامعه میکروبی آن را دچار نقصان کرده است. این یک تخریب سیستماتیک بیولوژیکی و بیوشیمیایی است که هسته کارکردهای اکوسیستم، به‌ویژه چرخه نیتروژن را هدف قرار داده است. فروپاشی جامعه میکروبی و توقف چرخه نیتروژن بحرانی‌ترین جنبه‌ها هستند، زیرا بازیابی این جوامع پیچیده و کارکردهایشان فرآیندی بسیار کند و طولانی است. پیامدهای این تخریب گسترده بوده و شامل کاهش شدید حاصلخیزی خاک، تضعیف رشد و سلامت درختان موجود، کاهش توانایی احیای طبیعی جنگل، افزایش آسیب‌پذیری درختان در برابر آفات و بیماری‌ها، کاهش تنوع زیستی خاکزی و درنهایت، تهدید پایداری بلندمدت این اکوسیستم‌های

برابر تغییرات ارتفاعی و اختلالات بسیار حساس هستند. درک تفصیلی الگوهای تغییر خواص خاک در گرادیان ارتفاعی و مکانیسم‌های پاسخ آن‌ها به استرس‌هایی مانند فشردگی، برای تدوین استراتژی‌های مدیریتی پایدار ضروری است. شواهد علمی غیرقابل‌انکار نشان می‌دهد که اثرات منفی تردد ماشین‌آلات، به‌ویژه در ارتفاعات میانی و شرایط مرطوب، می‌تواند برای دهه‌ها پایدار بماند و سلامت اکوسیستم را به‌طور بنیادی تهدید کند. تنها با اجرای یک مدیریت بسیار دقیق، مبتنی بر علم، حساس به شرایط اکولوژیک خاص هر سایت (به‌خصوص ارتفاع) و همراه با پایش مستمر می‌توان از ذخایر غنی کربن، تنوع زیستی منحصربه‌فرد و کارکردهای حیاتی این اکوسیستم‌های ارزشمند برای نسل‌های آینده حفاظت کرد. هزینه‌های کوتاه‌مدت اجرای چنین مدیریتی به‌مراتب کم‌تر از هزینه‌های بلندمدت بازیابی اکوسیستم‌های تخریب‌شده است.

$\text{NH}_4^+$  و معدنی‌سازی نیتروژن کاهش ماندگار داشتند. در ارتفاعات میانی (۹۰۰-۱۳۰۰ متر)، کاهش پایدار  $\text{NO}_3^-$ ، معدنی‌سازی N، زی‌توده میکروبی فسفر و اختلال در نسبت‌های استوکیومتری میکروبی (C/N, C/P, N/P) حتی پس از ۷ سال، به‌ویژه تحت تردد شدید رخ داده است. این اختلال در عناصر محدودکننده کلیدی (نیتروژن و فسفر) تهدیدی جدی برای حاصلخیزی بلندمدت است. در ارتفاعات بالا (۱۵۰۰ متر)، استرس‌های محیطی ذاتی (سرما، رطوبت بالا، فصل رشد کوتاه) اثرات تردد را در برخی پارامترها (زی‌توده میکروبی نیتروژن و  $\text{NO}_3^-$ ) پوشش داد، اما تردد شدید باعث کاهش زی‌توده میکروبی فسفر و افزایش نسبت‌های زیست‌توده میکروبی C/P و N/P زیست‌توده (نشانه اختلال عمیق در چرخه فسفر و تشدید محدودیت فسفر) شد. خاک‌های مناطق کوهستانی، به‌عنوان بستر حیات و تنظیم‌کننده‌های کلیدی چرخه‌های بیوژئوشیمیایی، در

#### منابع

- Acharya, R.P., Maraseni, T., & Cockfield, G. (2019). Global trend of forest ecosystem services valuation – an analysis of publications. *Ecosystem Services*. 39, 100979.
- Picchio, R., Neri, F., Petrini, E., Verani, S., Marchi, E., & Certini, G. (2012). Machinery-induced soil compaction in thinning two pine stands in central Italy. *Forest Ecology and Management*. 285, 38-43.
- Ramantswana, M., Guerra, S. P. S., & Ersson, B. T. (2020). Advances in the mechanization of regenerating plantation forests: a review. *Current Forestry Reports*. 6, 143-158.
- Cambi, M., Certini, G., Neri, F., & Marchi, E. (2015). The impact of heavy traffic on forest soils: a review. *Forest Ecology and Management*. 338, 124-138.
- Picchio, R., Mederski, P. S., & Tavankar, F. (2020). How and how much, do harvesting activities affect forest soil, regeneration and stands? *Current Forestry Reports*. 6, 115-128.
- Frey, B., Kremer, J., Rüdert, A., Sciacca, S., Matthies, D., & Lüscher, P. (2009). Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. *European Journal of Soil Biology*. 45(4), 312-320.
- 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.
- Teepe, R., Brumme, R., Beese, F., & Ludwig, B. (2004). Nitrous oxide emission and methane consumption

- following compaction of forest soils. *Soil Science Society of America Journal*. 68(2), 605-611.
9. Goutal, N., Renault, P., & Ranger, J. (2013). Forwarder traffic impacted over at least four years soil air composition of two forest soils in northeast France. *Geoderma*. 193-194, 29-40.
10. Jourgholami, M., Fegghi, J., Tavankar, F., Latterini, F., Venanzi, R., & Picchio, R. (2021). Short-term effects in canopy gap area on the recovery of compacted soil caused by forest harvesting in old-growth oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) stands. *iForest*. 14(4), 370-377.
11. 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(5), 949-962.
12. DeArmond, D., Ferraz, J. B. S., & Higuchi, N. (2021). Natural recovery of skid trails: A review. *Canadian Journal of Forest Research*. 51(7), 948-961.
13. Warlo, H., von Wilpert, K., Lang, F., & Schack-Kirchner, H. (2019). Black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) on compacted skid trails: A trade-off between greenhouse gas fluxes and soil structure recovery? *Forests*. 10, 726.
14. Sohrabi, H., Jourgholami, M., Jafari, M., Shabaniyan, 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.
15. Tan, X., Chang, S. X., & Kabzems, R. (2008). Soil compaction and forest floor removal reduced microbial biomass and enzyme activities in a boreal aspen forest soil. *Biology and Fertility of Soils*. 44(3), 471-479.
16. Tan, X., Chang, S. X., & Kabzems, R. (2005). Effects of soil compaction and forest floor removal on soil microbial properties and N transformations in a boreal forest long-term soil productivity study. *Forest Ecology and Management*. 217 (2-3), 158-170.
17. Li, Q., Lee Allen, H., & Wollum, A. G. (2004). Microbial biomass and bacterial functional diversity in forest soils: Effects of organic matter removal, compaction, and vegetation control. *Soil Biology and Biochemistry*. 36(4), 571-579.
18. Stutz, K. P., Schack-Kirchner, H., Kändler, G., Landes, L., Linz, M., Warlo, H., & Lang, F. (2017). Available nutrients can accumulate in permanent skid trails. *Forests*. 8 (10), 1-14.
19. Nazari, M., Horvat, M., Joergensen, R. G., & Peth, S. (2020). Soil organic matter mobilization by re-compaction of old forest skid trails. *European Journal of Soil Biology*. 98, 103173.
20. Demir, M., Makineci, E., & Yilmaz, E. (2007). Investigation of timber harvesting impacts on herbaceous cover, forest floor and surface soil properties on skid road in an oak (*Quercus petraea* L.) stand. *Building and Environment*. 42(3), 1194-1199.
21. Ilstedt, U., Nordgren, A., & Malmer, A. (2006). Soil chemical and microbial properties after disturbance by crawler tractors in a Malaysian forest plantation. *Forest Ecology and Management*. 225(1-3), 313-319.
22. Beylich, A., Oberholzer, H. R., Schrader, S., Höper, H., & Wilke, B. M. (2010). Evaluation of soil compaction effects on soil biota and soil biological processes in soils. *Soil and Tillage Research*. 109(2), 133-143.
23. 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, 61-69.
24. Yang, L., Zhang, H., Qin, J., Liu, X., & Mayer, M. (2024). A global meta-analysis of forest harvesting effects on soil respiration, its components, and temperature sensitivity. *Agricultural and Forest Meteorology*. 358, 110259.

25. Klein-Raufhake, T., Hölzel, N., Schaper, J.J., Hortmann, A., Elmer, M., Fornfeist, M., Linnemann, B., Meyer, M., Rentemeister, K., Santora, L., Wöllecke, J., & Hamer, U. (2024). Severity of topsoil compaction controls the impact of skid trails on soil ecological processes. *Journal of Applied Ecology*. 61, 1817-1828.
26. Pourbabaei, H., Salehi, A., Ebrahimi, S. S., & Khodaparast, F. (2020). Variations of soil physicochemical properties and vegetation cover under different altitudinal gradient, western Hyrcanean forest, north of Iran. *Journal of Forest Science*. 66(4), 159-169.
27. Ratier Backes, A., Frey, L., Arévalo, J. R., & Haider, S. (2021). Effects of soil properties, temperature and disturbance on diversity and functional composition of plant communities along a steep elevational gradient on tenerife. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 9, 758160.
28. Dinter, T. C., Gerzabek, M. H., Puschenreiter, M., Strobel, B. W., Strahlhofer, M., Couenberg, P. M., et al. (2020). Changes in topsoil characteristics with climate and island age in the agricultural zones of the Galápagos. *Geoderma*. 376, 114534.
29. Hamid, M., Khuroo, A. A., Malik, A. H., Ahmad, R., & Singh, C. P. (2021). Elevation and aspect determine the differences in soil properties and plant species diversity on Himalayan Mountain summits. *Ecological Research*. 36, 340-352.
30. Körner, C. (2007). The use of 'altitude' in ecological research. *Trends in Ecology and Evolution*. 22, 569-574.
31. Barry, R. G. (2008). *Mountain Weather and Climate*. 3<sup>rd</sup> edition. Cambridge: Cambridge University Press.
32. Nazari, M., Arthur, E., Lamandé, M., Keller, T., Bilyera, N., & Bickel, S. (2023). A meta-analysis of soil susceptibility to machinery-induced compaction in forest ecosystems across global climatic zones. *Current Forestry Reports*. 9(5), 370-381.
33. DeArmond, D., Ferraz, J. B. S., de Oliveira, L. R., Lima, A. J. N., Falcão, N. P. D. S., & Higuchi, N. (2023). Soil compaction in skid trails still affects topsoil recovery 28 years after logging in Central Amazonia. *Geoderma*. 434, 116473.
34. Unger, M., Homeier, J., & Leuschner, C. (2012). Effects of soil chemistry on tropical forest biomass and productivity at different elevations in the equatorial Andes. *Oecologia*. 170, 263-274.
35. Köhler, L., Gieger, T., & Leuschner, C. (2006). Altitudinal change in soil and foliar nutrient concentrations and in microclimate across the tree line on the subtropical island mountain Mt. Teide (Canary Islands). *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*. 201, 202-214.
36. Meliyo, J. L., Msanya, B. M., Kimaro, D. N., Massawe, B. H. J., Hieronimo, P., Mulungu, L., & Gulinck, H. (2016). Variability of soil organic carbon with landforms and land use in the Usambara Mountains of Tanzania. *Journal of Soil Science and Environmental Management*. 7, 123-132.
37. Tashi, S., Singh, B., Keitel, C., & Adams, M. (2016). Soil carbon and nitrogen stocks in forests along an altitudinal gradient in the eastern Himalayas and a meta-analysis of global data. *Global Change Biology*. 22, 2255-2268.
38. Kumar, B., Asadi, M., Pisasale, D., Sinha-Ray, S., Rosen, B. A., Haasch, R., & Salehi-Khojin, A. (2013). Renewable and metal-free carbon nanofibre catalysts for carbon dioxide reduction. *Nature Communications*. 4, 2819.
39. Zhang, P., Cui, Y., Zhang, Y., Jia, J., Wang, X., & Zhang, X. (2016). Changes in soil physical and chemical properties following surface mining and reclamation. *Soil Science Society of America Journal*. 80, 1476-1485.
40. Xu, Z., Chang, Y., Li, L., Luo, Q., Xu, Z., Li, X., et al. (2019). Climatic and topographic variables control soil

- nitrogen, phosphorus, and nitrogen: phosphorus ratios in a *Picea schrenkiana* forest of the Tianshan Mountains. *PLoS ONE*. 14, e0211839.
41. Ediriweera, S., Singhakumara, B. M. P., & Ashton, M. S. (2008). Variation in canopy structure, light and soil nutrition across elevation of a Sri Lankan tropical rain forest. *Forest Ecology and Management*. 256, 339-1349.
42. Grant, C., Bittman, S., Montreal, M., Plenchette, C., & Morel, C. (2005). Soil and fertilizer phosphorus: Effects on plant P supply and mycorrhizal development. *Canadian Journal of Plant Science*. 85, 3-14.
43. Hailemariam, M. B., Woldu, Z., Asfaw, Z., & Lulekal, E. (2023). Impact of elevation change on the physicochemical properties of forest soil in south Omo zone, Southern Ethiopia. *Applied and Environmental Soil Science*. 2023, 1-12.
44. Wang, R., Wang, X., Jiang, Y., Cerdà, A., Yin, J., Liu, H., Feng, X., Shi, Z., Dijkstra, F. A., & Li, M. H. (2018). Soil properties determine the elevational patterns of base cations and micronutrients in the plant–soil system up to the upper limits of trees and shrubs. *Biogeosciences*. 15, 1763-1774.

Uncorrected Proof