



Recovery of soil biological properties after skidding operations along an altitudinal gradient in pure Oriental Beech (*Fagus orientalis* Lipsky) forests stands

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. E-mail: tohid.ghassemi@ut.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: 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. E-mail: 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. E-mail: hadi.sohrabi@ut.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 04 April 2025

Received in revised form 01

August 2025

Accepted 31 August 2025

Published online 21 September
2025

Keywords:

Earthworm density and dry

biomass,

Fine root biomass,

Hyrcanian forests,

Soil microbial respiration.

ABSTRACT

Short-term and long-term disturbances following forest harvesting, such as soil disturbances, damage to soil and trees, reduce the resilience of forest ecosystems to climate change. This study evaluated the process of soil biological indicators (including earthworm density and dry biomass, soil microbial respiration, and fine root biomass) in compacted soils across five elevational gradients (700, 900, 1100, 1300, and 1500 meters asl) and three traffic intensities (low, moderate, and high) seven years after logging operations in skid trails, compared to undisturbed (control) areas in the Kheyroud and Watershed No. 46, pure beech forest in northern Iran at a soil depth of 0–10 cm. Results from two-way ANOVA revealed that the influence of elevational gradient and traffic intensity on soil biological indicators in pure beech forests indicated a sharp decline in biological indicators with increasing elevation. Elevation increases from 700 to 1500 meters led to a 56–73% reduction in earthworm density ($n\ m^{-2}$) and biomass ($mg\ m^{-2}$), microbial respiration, and fine root biomass (the highest decline was in fine root biomass (72.2%) and the lowest in microbial respiration (56.8%)). Pearson correlation analysis demonstrated strong, significant negative correlations ($P < 0.05$) between all biological indicators and the interaction effect of altitudinal gradient and traffic intensity. The elevational gradient emerged as a key determinant of soil health in beech forests, with elevations above 1300 meters displaying the highest vulnerability due to harsh environmental conditions and sensitivity to machine traffic. The impacts of machinery traffic persisted even after seven years, and recovery at higher elevations is projected to require > 7 years. These findings underscore the necessity for comprehensive forest management approaches that explicitly account for altitudinal gradients, soil characteristics, and plant species.

Cite this article: Ghassemi, T., Jourgholami, M., Jafari, M., & Sohrabi, H. (2025). Recovery of soil biological properties after skidding operations along an altitudinal gradient in pure Oriental Beech (*Fagus orientalis* Lipsky) forests stands. *Journal of Natural Environment*, 78 (2), 169-184. DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2025.392879.2794>



بازیابی مشخصه‌های زیستی خاک بعد از عملیات چوبکشی در گرادیان ارتفاعی توده‌های جنگلی خالص راش (*Fagus orientalis* Lipsky)

توحید قاسمی^۱ | مقداد جورغلامی^۲ | محمد جعفری^۳ | هادی سهرابی^۴

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

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۹ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰ کلیدواژه‌ها: تراکم و زی‌توده خشک کرم خاکی، تنفس میکروبی خاک، جنگل‌های هیرکانی، زی‌توده ریشه‌های موبین.	آشفته‌گی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت پس از بهره‌برداری جنگل، مانند بهم‌خوردگی خاک، با آسیب به خاک و درختان، تاب‌آوری بوم‌سازگان‌های جنگلی در برابر تغییرات اقلیمی را کاهش می‌دهند. پژوهش حاضر فرایند بازیابی مشخصه‌های زیستی (شامل تراکم و زی‌توده خشک کرم خاکی، تنفس میکروبی خاک و زی‌توده ریشه‌های موبین) خاک‌های فشرده‌شده در پنج گرادیان ارتفاعی (۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر از سطح دریا) و سه شدت تردد (کم، متوسط و زیاد) پس از گذشت ۷ سال از عملیات خروج چوب در مسیرهای چوبکشی در مقایسه با مناطق دست‌نخورده (شاهد) در جنگل‌های خیرود و حوزه ۴۶ در عمق ۱۰-۰ سانتی‌متری خاک آزمون کرد. نتایج آزمون آنالیز واریانس دوطرفه نشان داد که تأثیر گرادیان ارتفاعی و شدت تردد بر شاخص‌های زیستی خاک در جنگل‌های راش خالص نشان از کاهش شدید این شاخص‌ها با افزایش گرادیان ارتفاع داشت و افزایش گرادیان ارتفاع از ۷۰۰ به ۱۵۰۰ متر، سبب کاهش تراکم و زی‌توده کرم‌های خاکی، تنفس میکروبی، و زیست‌توده ریشه‌های نازک در محدوده ۵۶-۷۳ درصد شد (بیشترین کاهش در زی‌توده ریشه‌ها (۷۲/۲ درصد) و کمترین کاهش در تنفس میکروبی (۵۶/۸ درصد). همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های زیستی و اثر متقابل گرادیان ارتفاعی و شدت تردد نشان داد که تمامی شاخص‌های زیستی همبستگی منفی بسیار قوی و معنی‌دار نشان می‌دهد ($P < 0.05$). گرادیان ارتفاعی به‌عنوان عامل کلیدی تعیین‌کننده سلامت خاک در جنگل‌های راش عمل می‌کند، به‌طوری که ارتفاعات بیش از ۱۳۰۰ متر به‌دلیل شرایط سخت محیطی و حساسیت به تردد، بیشترین آسیب‌پذیری را نشان می‌دهند. اثرات تردد ماشین‌آلات بر مشخصه‌های زیستی خاک حتی پس از ۷ سال باقی می‌ماند و بازیابی در ارتفاعات بالا به بیش از هفت سال زمان نیاز دارد. این یافته‌ها بر ضرورت اتخاذ رویکردهای مدیریت جامع جنگل که عوامل گرادیان ارتفاعی، خاک و گونه‌های گیاهی را مد نظر قرار می‌دهند تأکید می‌کنند.

استناد: قاسمی، توحید؛ جورغلامی، توحید؛ جعفری، محمد؛ و سهرابی، هادی (۱۴۰۴). بازیابی مشخصه‌های زیستی خاک بعد از عملیات چوبکشی در گرادیان ارتفاعی توده‌های جنگلی خالص راش (*Fagus orientalis* Lipsky). محیط زیست طبیعی، ۷۸ (۲)، ۱۸۴-۱۶۹.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2025.392879.2794>



مقدمه

استفاده از ماشین‌آلات بهره‌برداری سنگین در طول عملیات قطع و حمل چوب، خطر بالایی برای آسیب رساندن به سطح خاک دارد. آسیب بر سطح خاک زمانی رخ می‌دهد که فشار وارد شده به وسیله ماشین‌آلات از ظرفیت باربری خاک بیشتر شود. استفاده از ماشین‌های قدرتمند و سنگین در جنگلداری در دهه‌های اخیر به‌طور تصاعدی افزایش یافته است (Cambi *et al.*, 2015). علاوه بر این، همه ماشین‌های مورد استفاده در عملیات حمل چوب، الزامات محیط‌زیستی را برآورده نمی‌کنند. تأثیر عملیات بهره‌برداری درختان بر خواص خاک‌های جنگلی سال‌هاست مورد مطالعه قرار گرفته است. با وجود این، محققان کشورهای مختلف (Cambi *et al.*, 2015; Grunberg *et al.*, 2023) اشاره کرده‌اند که درک ما از تأثیر بهره‌برداری جنگل بر خاک به دو دلیل ناقص است: فناوری و تکنیک‌های عملیات بهره‌برداری جنگل در حال تغییر است و تأثیر عملیات بهره‌برداری جنگل تحت تأثیر تغییرات آب و هوا و شرایط اقلیمی غیرعادی است (Sirén *et al.*, 2019). مدیریت پایدار جنگل و روش‌های کاهش تأثیر عملیات بهره‌برداری جنگل، در سال‌های اخیر توجه فزاینده‌ای را به‌خود جلب کرده است و تلاش‌هایی را برای توسعه روش‌های صرفه‌جویی قطع درختان، طراحی ماشین‌های جدید بهره‌برداری و تجدیدنظر در فرآیندهای فناوری مورد استفاده در جنگلداری انجام داده است (Labelle *et al.*, 2022; Grunberg *et al.*, 2023).

تغییرات اقلیمی کنونی، جنگلبانان را ملزم می‌کند تا اثرات انسانی بر بوم‌سازگان‌ها را ارزیابی و آشفته‌گی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت پس از بهره‌برداری جنگل، مانند بهم‌خوردگی خاک، به‌ حداقل برسانند. این آشفته‌گی‌ها با آسیب به خاک و درختان، تاب‌آوری بوم‌سازگان‌های جنگلی در برابر تغییرات اقلیمی را کاهش می‌دهند. در طول عملیات بهره‌برداری، بهم‌خوردگی خاک عمدتاً به فشردگی خاک پس از تردد ماشین‌ها مرتبط است (Latterini *et al.*, 2024). تردد ماشین‌های سنگین بهره‌برداری جنگل باعث فشردگی خاک، ایجاد شیار (Cambi *et al.*, 2015)، و جابجایی یا حذف لایه سطحی خاک می‌شوند (Horn *et al.*, 2004). فشردگی خاک، تخلخل آن را کاهش و ساختارش را تغییر می‌دهد (Sohrabi *et al.*, 2022; Karami *et al.*, 2023). تغییرات ساختار خاک مسیر چوبکشی بعد از تردد ماشین منجر به افزایش مقاومت به نفوذ، وزن مخصوص ظاهری خاک و مقاومت برشی خاک می‌شود (Picchio *et al.*, 2020)، که سبب کاهش حاصلخیزی خاک جنگل شده و منجر به کاهش تولید جنگل می‌شود، زیرا افزایش مقاومت به نفوذ خاک به بیش از ۳ مگاپاسکال (MPa) ممکن است رشد ریشه‌ها را مختل کند (Labelle *et al.*, 2019). چرخ‌ها یا کفشک‌ها شیارهای فشرده‌ای ایجاد می‌کنند که نفوذپذیری آب در آنها کاهش یافته و رواناب سطحی افزایش می‌یابد (Karami *et al.*, 2023). در شیب‌های تند، رواناب سطحی می‌تواند فرسایش شدید و از بین رفتن لایه حاصلخیز سطحی خاک را به دنبال داشته باشد (Etehad Abari *et al.*, 2017).

ریشه‌های نازک، که معمولاً به‌عنوان ریشه‌هایی با قطر کمتر از ۲ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شوند (McCormack *et al.*, 2015)، توانایی سازگاری با محیط‌های در حال تغییر را برای تسهیل رشد گیاه دارند. فعالیت ریشه‌های نازک می‌تواند ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را تغییر دهد، که ممکن است پیامدهایی در سطح گیاه و همچنین در سطح بوم‌سازگان داشته باشد (McCormack *et al.*, 2015). در واقع، ریشه‌های نازک نقش عمده‌ای در چرخه کربن (C) در بوم‌سازگان‌های جنگلی ایفا می‌کنند، با ورود مقادیر زیاد کربن به خاک از طریق ترشحات ریشه و تولید نیکروماس (توده مرده: شامل بقایای گیاهان و جانوران مرده است که در حال تجزیه شدن هستند) (root exudates and necromass production)، و همچنین بازگشت مقادیر زیاد کربن به اتمسفر از طریق تنفس ریشه و فرآیندهای تجزیه. پلاستیسیته بالای سیستم‌های ریشه‌ای، هم از نظر ساختاری و هم عملکردی، می‌تواند به‌شدت تحت تأثیر ویژگی‌های خاک و شرایط اقلیمی قرار گیرد. پویایی ریشه‌های نازک با اندازه‌گیری تولید و مرگومیر، نرخ بازتولید و بقا، پیری و نرخ رشد طولی مطالعه شده است. پویایی ریشه‌های نازک توسط عوامل خارجی مانند دمای خاک و محتوای آب و عوامل داخلی مانند تولید هورمون‌ها و تخصیص فتوسنتزات‌ها و مواد مغذی درون گیاه هدایت می‌شود (Germon *et al.*, 2020).

بسیاری از محققین (Magagnotti *et al.*, 2012; Cambi *et al.*, 2015) تغییرات قابل توجهی را در متغیرهای زیستی به‌دلیل فشردگی خاک تأیید می‌کنند و اینکه واکنش میکرو، مزو و ماکرو ارگانسیم‌های خاک ممکن است متفاوت باشد. Battigelli و همکاران (۲۰۰۴) دریافتند که بهره‌برداری جنگل با فشردگی سنگین خاک، کل ارگانسیم‌های با اندازه متوسط

خاک را تا ۹۳ درصد نسبت به جنگل‌های قطع نشده کاهش می‌دهد. به‌عنوان مثال، فراوانی و فعالیت کرم‌های خاکی و تنوع زیستی و فراوانی ریزبندپایان کاهش می‌یابد (Blasi *et al.*, 2013; Bottinelli *et al.*, 2014). فشردگی خاک به‌طور قابل‌توجهی زی‌توده میکروبی و فعالیت میکروبی (Frey *et al.*, 2009) را به‌دلیل تغییرات منفی در تخلخل کل، اندازه منافذ و توزیع پیوند کاهش می‌دهد (Wronski and Murphy, 1994). فعالیت زیستی خاک‌ها با توزیع اندازه ذرات و وزن مخصوص ظاهری خاک تعیین می‌شود (Latterini *et al.*, 2023). به‌عنوان مثال، فعالیت زیستی لایه سطحی خاک شنی بسیار زیاد است و با افزایش فشردگی تمایل به افزایش دارد. در خاک لومی روند معکوس با کاهش فعالیت با افزایش فشردگی خاک مشاهده می‌شود. بدتر شدن شدید فعالیت میکروبیولوژیکی خاک‌های فشرده‌شده در طول بهره‌برداری جنگل ممکن است نشان‌دهنده بدتر شدن خواص جنگلی آنها و کاهش جذب مواد مغذی توسط گیاهان و میزان مشارکت آنها در چرخه زیستی باشد. Dymov و Startsev (۲۰۱۶) بیان داشتند که در عرصه‌های تازه قطع‌شده، افزایش دمای روزانه و غرقابی خاک منجر به کاهش تعداد گروه‌های اکولوژیکی و تغذیه‌ای میکروارگانیسم‌ها و فعالیت عملکردی موجودات زنده ریز می‌شود. تغییر نور در خاک به‌دلیل برداشت چوب می‌تواند منجر به رشد کوتاه‌مدت فراوانی ریزبندپایان شود. همچنین تغییرات مداوم ناشی از بهره‌برداری، فرآیندهای تعیین‌شده زیستی در خاک مانند تنفس را کاهش می‌دهد (Beylich *et al.*, 2010). از سوی دیگر، موجودات زنده خاک به‌عنوان یکی از عوامل مهم برای ارزیابی کیفیت و سلامت خاک شناخته می‌شوند. در میان اینها، ماکروفون‌ها نقش حیاتی در چرخه‌های غذایی و انرژی ایفا می‌کنند و عمدتاً بر پویایی مواد آلی خاک تأثیر می‌گذارند. در میان ماکروفون‌های خاک، کرم‌های خاکی بیشترین زی‌توده بی‌مهرگان را تشکیل می‌دهند (Blouin *et al.*, 2013). مطالعات پیشین (Suthar, 2012; Sackett *et al.*, 2013) عوامل اصلی تأثیرگذار بر فعالیت کرم‌های خاکی، از جمله گونه‌های درختی، ویژگی‌های خاک و لاشبرگ (مانند pH خاک و قابلیت هضم لاشبرگ) و عوامل محیطی (مانند دمای خاک و رطوبت) را توصیف کرده‌اند. از سوی دیگر، کرم‌های خاکی از طریق متابولیسم خود (افزایش کربن و نیتروژن)، تحریک فعالیت میکروبی و بیوتوربایسون یا اختلاط فیزیکی مواد آلی و معدنی خاک، نقش کلیدی در چرخه مواد مغذی ایفا می‌کنند (Suthar, 2012).

تغییرات گرادیان ارتفاعی در ویژگی‌های خاک تأثیر قابل‌توجهی بر ترکیب جوامع گیاهی دارد. ویژگی‌های خاک ممکن است تحت تأثیر تغییرات پوشش گیاهی در گرادیان ارتفاعی قرار گیرند و بالعکس (Hou *et al.*, 2019). بررسی تعامل بین شرایط خاک و پوشش گیاهی در گرادیان ارتفاعی می‌تواند درک بهتری از جوامع گیاهی در زیستگاه‌های مرتفع ارائه دهد. تفاوت در دمای هوا با گرادیان ارتفاع به‌عنوان عامل مشترک تغییرات وضعیت مواد مغذی در مکان‌های مختلف شناخته می‌شود (Sundqvist *et al.*, 2013). سایر متغیرها مانند دمای خاک، جهت شیب، پوشش گیاهی و گرادیان ارتفاع نیز می‌توانند بر ویژگی‌های خاک تأثیر بگذارند (Bardelli *et al.*, 2017). مطالعات بسیاری تأثیر متفاوت تغییرات اقلیمی در گرادیان ارتفاعی بر ویژگی‌های خاک را تأیید کرده‌اند (Hamid *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2021). کربن آلی کل و نیتروژن با افزایش گرادیان ارتفاع افزایش یافته و با میانگین دمای سالانه و بارش همبستگی مثبت نشان داده‌اند (Zhang *et al.*, 2021). همچنین دمای خاک، pH، هدایت الکتریکی و نسبت C:N در گرادیان ارتفاعی روند افزایشی داشته‌اند (Hamid *et al.*, 2020). کاهش دما و افزایش بارش معمولاً با افزایش گرادیان ارتفاع مشاهده می‌شود (Hassan and Nile, 2021). Simon و همکاران (۲۰۱۸) همبستگی خطی بین ذخیره کربن آلی خاک و pH با گرادیان ارتفاع را گزارش کردند. تغییرات اقلیمی بر ترکیب و زی‌توده گیاهان تأثیر می‌گذارد که در تفاوت‌های ویژگی‌های خاک و گونه‌ها منعکس می‌شود (Hamid *et al.*, 2020).

اگرچه ادبیات پژوهش در مورد فرآیندهای بازسازی مسیرهای چوبکشی غنی است، این موضوع در مورد مناطق با ارتفاعات مختلف صدق نمی‌کند. علاوه بر این، توده‌های جنگلی خالص راش در بسیاری از مناطق جنگل‌های هیرکانی در مطالعات بازبانی مشخصه‌های بیولوژیکی خاک مسیرهای چوبکشی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، اطلاعات کمتری در مورد فرآیندهای بازسازی این مشخصه‌ها پس از عملیات خروج چوب وجود دارد. با این حال، برای تأیید وجود فرآیند بازسازی در خاک‌های جنگل‌های هیرکانی فراتر از چند مطالعه، انجام مطالعات بیشتر ضروری است. بنابراین، هدف این مطالعه شامل درک بهتر فرآیند بازسازی مشخصه‌های زیستی خاک‌های فشرده‌شده در گرادیان‌های ارتفاعی تحت تأثیر شدت‌های تردد مختلف در

مقایسه با مناطق دست‌نخورده (شاهد) است. در این راستا، مطالعه حاضر در مسیرهای چوبکشی در پنج گرادیان ارتفاعی (۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر از سطح دریا) و سه شدت تردد (کم، متوسط و زیاد) پس از گذشت ۷ سال از عملیات چوبکشی انتخاب شد. فرضیه پژوهش حاضر عبارت است از: روند قابل مشاهده‌ای در بازیابی مشخصه‌های زیستی خاک تحت تأثیر اثر متقابل گرادیان ارتفاعی و شدت تردد وجود دارد.

روش‌شناسی پژوهش

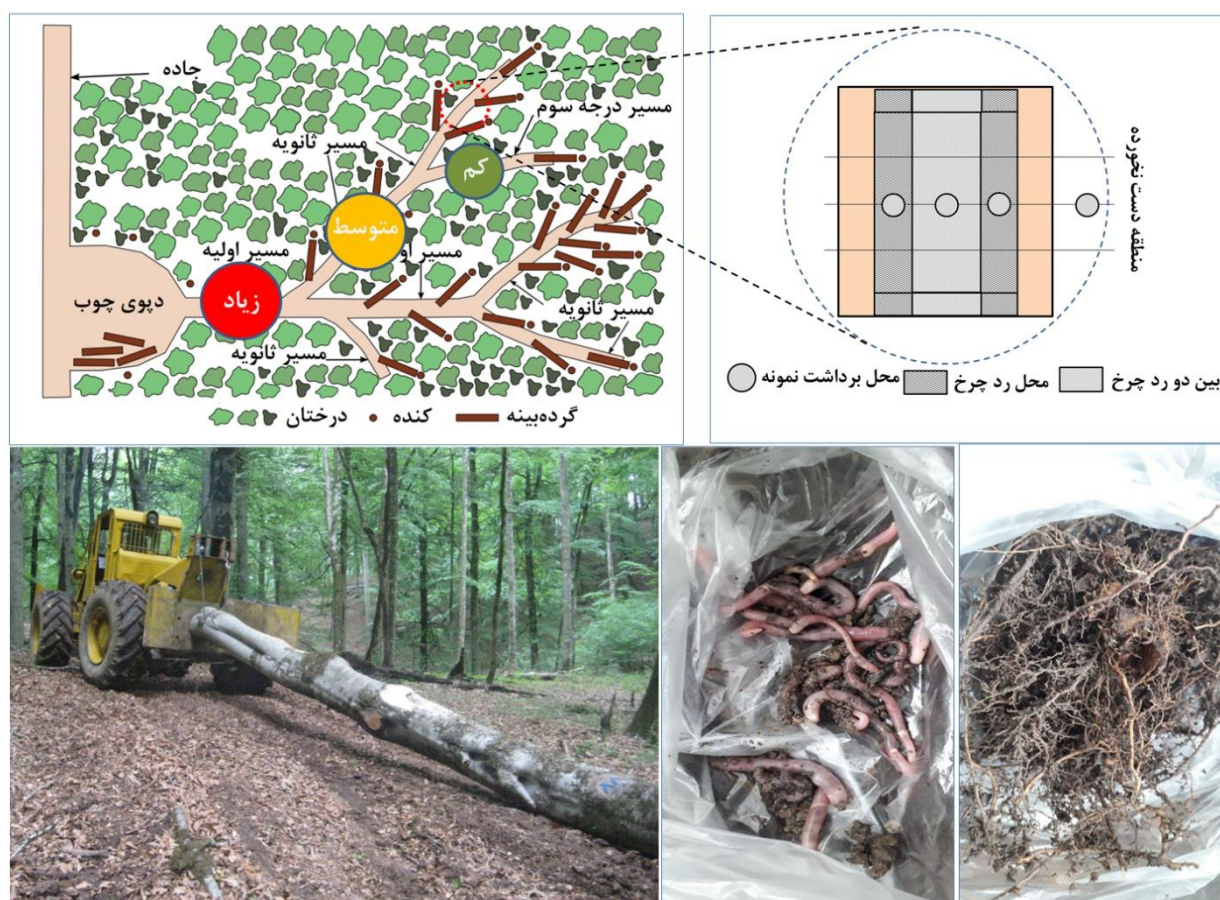
منطقه مورد پژوهش: این بررسی در قطعات ۱۱۴ بخش پاتم، ۲۱۲ و ۲۲۰ بخش نمخانه و ۳۲۰ بخش گرازبن جنگل آموزشی و پژوهشی خیرود واقع در حوزه ۴۵ گلبدن و ۴۱۶-۴۱۷ بخش شیوا دره حوزه ۴۶ کجور انجام شد (کتابچه طرح‌های جنگلداری بخش‌های پاتم، نمخانه، گرازبن جنگل خیرود و طرح شیوا دره حوزه ۴۶ کجور). طبق آخرین اطلاعات از کتابچه طرح جنگلداری در این حوزه‌ها، مسیرهای چوبکشی که در آنها برای آخرین بار عملیات چوبکشی انجام گرفته است، انتخاب شده است. برای این منظور، ۴ مسیر چوبکشی از جنگل خیرود در حوزه ۴۵ و ۱ مسیر هم در توده‌های راش خالص حوزه ۴۶ انتخاب شده است که هر کدام از این مسیرها در گرادیان ارتفاعی مختلفی قرار دارند. اطلاعات مربوط به هر کدام از مسیرهای چوبکشی منتخب در توده‌های جنگلی راش خالص در پنج گرادیان ارتفاعی در جدول ۱ ارائه شده است. تمام مسیرهای چوبکشی در سال ۹۵ به شیوه تک‌گزینی مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند و ۷ سال از آخرین عملیات چوبکشی روی مسیرهای چوبکشی سپری شده است. در بخش پاتم، میانگین بارندگی سالیانه ۱۴۴۹/۵ میلی‌متر بوده که حداقل آن در تیر و حداکثر آن در مهر است و معدل درجه حرارت سالانه هوا ۱۲/۲ درجه سانتی‌گراد است. دو بخش نمخانه و گرازبن دارای اقلیم سرد و مرطوب با متوسط بارندگی سالیانه ۱۱۴۶ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت سالیانه ۸/۵۵ درجه سانتی‌گراد هستند. بخش شیوا دره حوزه ۴۶ کجور دارای اقلیم سرد و کوهستانی با متوسط بارندگی سالیانه ۱۲۷۵ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت سالیانه ۷/۲۲ درجه سانتی‌گراد هستند.

جدول ۱- ویژگی‌های مسیرهای چوبکشی در منطقه مورد مطالعه

ارتفاع از سطح دریا (متر)	پارسل	بخش	مساحت پارسل (هکتار)	موجودی در هکتار (سیلو)	تعداد در هکتار (اصله)	تیب فعلی جنگل	تیب خاک
۷۰۰	۱۱۴	پاتم	۲۸/۴	۳۴۵/۸	۲۳۱	راش-ممرز	راندزین-هومیک کربناته
۹۰۰	۲۱۲	نمخانه	۲۵/۲	۴۱۳/۳	۱۹۲	راش-ممرز	قهوه‌ای جنگلی
۱۱۰۰	۲۲۰	نمخانه	۲۷/۳	۵۰۴	۱۷۳	راش-ممرز به همراه توسکا	قهوه‌ای جنگلی با بافت لیمونی
۱۳۰۰	۳۲۰	گرازبن	۴۲/۲	۴۹۹/۶	۲۶۶/۳	راش-ممرز	قهوه‌ای جنگلی
۱۵۰۰	۴۱۶	شیوا دره	۱۰۹	۳۰۶/۵	۱۴۶/۸	راش خالص	قهوه‌ای جنگلی

روش مطالعه: با مشخص شدن طرح تحقیق در قالب بلوک کاملاً تصادفی با دو فاکتور گرادیان ارتفاعی (هفتصد، نهصد، یکهزار و صد، یکهزار سیصد و یکهزار و پانصد متر از سطح دریا) و سه شدت تردد (کم، متوسط و زیاد)، در پنج قطعه، سه مسیر چوبکشی انتخاب و در هر مسیر چوبکشی سه شدت تردد را مشخص نموده و یک قطعه نمونه مطابق شکل ۱ پیاده و 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 ۰-۱۰ سانتی‌متری خاک (به دلیل وجود بخش عمده‌ای از ریشه‌های درختان)، در مرکز مسیر چوبکشی و محل رد چرخ‌های راست و چپ نمونه‌های خاک برداشت شد تا با نمونه‌گیری در این عمق فرآیند طبیعی بازیابی مشخصه‌های زیستی مورد بررسی شامل تراکم (تعداد در مترمربع) و زی توده خشک کرم خاکی (میلی گرم در مترمربع)، تنفس میکروبی خاک ($\text{mg CO}_2 - \text{C/g soil/day}$) و زی توده ریشه‌های موبین (میلی گرم در مترمربع) تحت تأثیر لاشبرگ راش خالص بررسی شود. معیار و نحوه تشخیص و انتخاب این مسیرها براساس مدارک و نظرات کارشناسان مجری و ناظر طرح و همچنین شواهد عینی موجود در منطقه بود. هر مسیر چوبکشی با ۳ تکرار و در هر مسیر چوبکشی ۳ شدت تردد کم، متوسط و شدید شناسایی شد. با توجه به اینکه تحقیق حاضر یک مطالعه گذشته‌نگر است، بنابراین هر مسیر چوبکشی براساس فاصله از دپو

به شدت تردد زیاد (از محل دپو تا یک سوم طول مسیر با بیشترین تعداد تردد) شدت تردد متوسط (از انتهای 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. همچنین به منظور مقایسه بازیابی مشخصه‌های زیستی مورد بررسی شامل تراکم و زی توده خشک کرم خاکی، تنفس میکروبی خاک و زی توده ریشه‌های موین خاک، در هر قطعه نمونه یک نمونه هم در فاصله ۱۰ متری خارج از مسیر چوبکشی، از منطقه دست نخورده (شاهد) برداشت شد. در نهایت تعداد نمونه‌ها برابر با ۱۸۰ نمونه: ۵ پارسل 3×3 مسیر 3×3 شدت ترافیک $\times$ یک قطعه نمونه در هر شدت (۴ نمونه = ۳ مسیر + ۱ نمونه در منطقه شاهد). عملیات چوبکشی در قطعات مورد نظر در سال ۱۳۹۶ با اسکیدر چرخ لاستیکی تاف مدل E 655 انجام شد و برداشت نمونه‌ها در مرداد و شهریور سال ۱۴۰۳ به انجام رسید. هوا در طول زمان نمونه برداری آفتابی و خشک بود.



شکل ۱- طرح شماتیک از نمونه برداری از خاک مسیرهای چوبکشی و منطقه شاهد در هر گرادیان ارتفاعی، اسکیدر چرخ لاستیکی تاف، برداشت نمونه‌های ریشه‌های موین و کرم خاکی

کرم‌های خاکی با بیلچه و ترکیبی از روش‌های جداسازی دستی در کل منطقه نمونه برداری از نیم مترمربعی و عمق ۱۰ سانتی متر جمع‌آوری شدند و سپس نمونه خاک به صورت دستی مورد بررسی قرار گرفت. نمونه برداری از کرم‌های خاکی در حجم خاک پس از حذف لایه لاشبریگی انجام شد. سپس، تمام خاک مرتبط با یک نمونه به طور کامل در محل (در محدوده ۵/۵ متر مربعی و عمق ۱۰ سانتی متر) مخلوط شد و تنها بخشی از آن (حدود دو کیلوگرم) به آزمایشگاه منتقل شد. کرم‌های خاکی در سه دسته اپیژئیک، آنسیک و آندوژئیک بودند که تراکم گونه اپیژئیک بیشتر از دو دسته دیگر بود. نمونه‌های خاک برای تعیین تنفس میکروبی بلافاصله به یک ظرف عایق و خنک کننده منتقل شدند تا به آزمایشگاه انتقال یابند و در دمای ۴ درجه سانتی گراد تا زمان پردازش نگهداری شدند. کرم‌های خاکی جمع‌آوری شده شسته شدند و پس از خشک کردن در آون در دمای ۶۰ درجه

سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت، با دقت میلی‌گرم توزین شدند تا زی‌توده کرم‌های خاکی تعیین شود (Bayranvand et al., 2017). تنفس میکروبی خاک با اندازه‌گیری دی‌اکسید کربن (CO_2) منتشرشده در یک آزمایش انکوباسیون ۳ روزه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد تعیین شد. به منظور اندازه‌گیری زی‌توده خشک ریشه‌های نازک در محل هر نمونه، در سطحی به اندازه 25×25 سانتی‌متر به عمق ۱۰ سانتی‌متر، ریشه‌های نازکتر از ۲ میلی‌متر برداشت شده و به آزمایشگاه منتقل شدند. نمونه‌های ریشه موئین فقط برای گونه راش بود. در مرحله بعد نمونه‌های ریشه همراه با خاک ابتدا کاملاً با آب شستشو داده شد و بخش‌های مرده از بخش زنده ریشه جدا شد و ریشه‌ها در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت حداقل دو روز خشک و زی‌توده خشک به دست آمد (Sohrabi et al., 2022).

تجزیه و تحلیل داده‌ها: به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها، ابتدا نرمال بودن داده‌ها با آزمون کولموگراف-اسمیرنوف و همگنی واریانس بین تیمارها با آزمون لون در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ انجام می‌شود. به منظور بررسی اثر تیمارهای گرادیان ارتفاعی و تردد ماشین‌آلات در مسیرهای چوبکشی بر مشخصه‌های زیستی مورد بررسی خاک، از تجزیه واریانس دو طرفه و از آزمون مقایسه‌ای چندگانه توکی برای گروه‌بندی مقدار شاخص‌های به دست آمده، استفاده می‌شود. به منظور بررسی همبستگی بین داده‌ها از ضریب همبستگی پیرسون برای بررسی ویژگی‌های مختلف خاک استفاده خواهد شد. کلیه آنالیزهای آماری در سطح اطمینان ۹۵ درصد با به کارگیری نرم‌افزار آماری SPSS ver. 23 و ترسیم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel انجام شد.

یافته‌های پژوهش

نتایج نشان داد که اثر متقابل گرادیان ارتفاعی و شدت تردد بر مشخصه‌های زیستی مورد بررسی شامل تراکم و زی‌توده خشک کرم خاکی، تنفس میکروبی خاک و زی‌توده ریشه‌های موئین در خاک‌های فشرده مسیرهای چوبکشی از نظر آماری در سطح ۰/۰۵ درصد معنی‌دار است (جدول ۲).

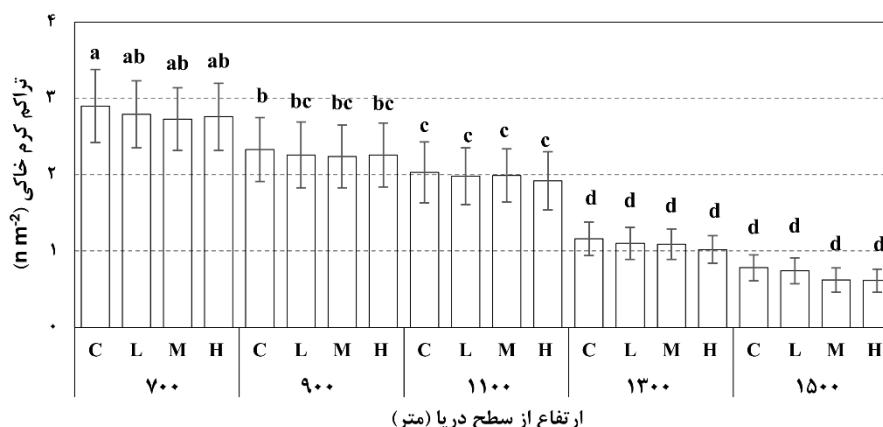
جدول ۲- تجزیه واریانس دو طرفه اثر متقابل ارتفاع از سطح دریا و شدت تردد مشخصه‌های زیستی خاک

مشخصه	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	Sig.
تراکم کرم خاکی	۱۰۷/۷۴	۱۹	۵/۶۷	۴۸/۶۲	**./..
زی‌توده خشک کرم خاکی	۶۷۹۰/۲۶	۱۹	۳۵۷/۳۸	۵۸/۷۹	**./..
تنفس میکروبی خاک	۱/۵۳	۱۹	۰/۰۸	۴۶/۱۴	**./..
زی‌توده ریشه‌های موئین خاک	۷۸۵۱۲/۶۱	۱۹	۴۱۳۲/۲۴	۶۰/۰۸	**./..

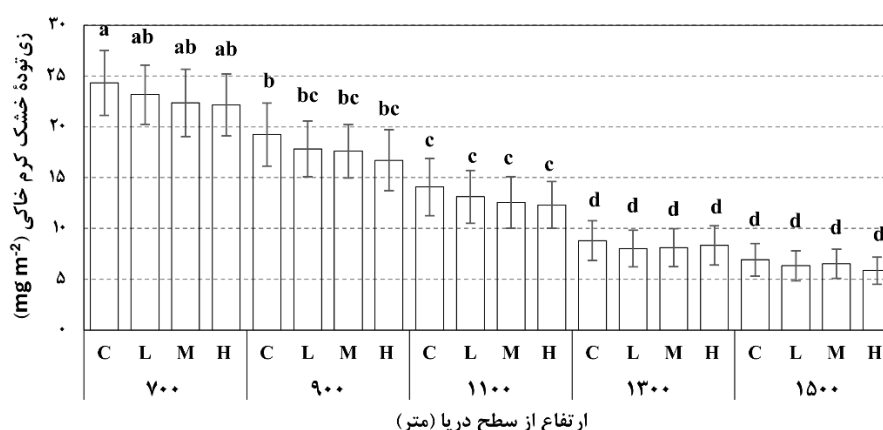
** معنی‌داری در سطح ۹۹ درصد

شکل ۲ مقایسه میانگین تراکم کرم خاکی در گرادیان‌های مختلف از سطح دریا (۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر) و شدت تردد مسیرهای چوبکشی با آزمون توکی را نشان می‌دهد. روند کلی تغییرات تراکم کرم خاکی نشان می‌دهد که تراکم کرم خاکی با افزایش ارتفاع از سطح دریا در تمام سطوح تردد، به طور پیوسته کاهش می‌یابد. مقدار تراکم کرم خاکی از ۲/۹ در هر مترمربع در ارتفاع ۷۰۰ متر به ۰/۷۸ در هر مترمربع در ارتفاع ۱۵۰۰ متر در مناطق شاهد کاهش یافت. این کاهش احتمالاً ناشی از کاهش دما، مواد آلی و کیفیت خاک در ارتفاعات بالاتر است. تأثیر شدت تردد ماشین‌آلات نشان می‌دهد که در تمام ارتفاعات، مناطق شاهد بیشترین تراکم را دارند که نشان‌دهنده تأثیر منفی تردد حتی پس از ۷ سال است. نتایج نشان داد که اختلاف بین سطوح تردد کم/متوسط/زیاد چندان محسوس نیست مثلاً در ارتفاع ۷۰۰ متر مقدار تراکم کرم خاکی ۲/۹ در مقابل ۲/۷۶ در مترمربع، اما در ارتفاعات بالا (۱۵۰۰ متر) این اختلاف آشکارتر می‌شود (شکل ۲). از سوی دیگر، در ارتفاعات پایین (۷۰۰-۹۰۰ متر)، اثر تردد کمتر مشهود است (حداکثر کاهش ۶-۵ درصد نسبت به شاهد) که می‌تواند به دلیل حاصلخیزی بالاتر خاک و توانایی بهتر بوم‌سازگان برای تحمل اختلال باشد. در عوض در ارتفاعات بالا (۱۵۰۰-۱۳۰۰ متر)، کاهش تراکم کرم خاکی در تردد زیاد تا ۲۲-۱۲ درصد نسبت به شاهد است که به دلیل حساسیت بالاتر خاک‌های کوهستانی به فشرده‌گی و تخریب است (شکل ۲). در ارتفاعات بالاتر (بالاتر از ۱۱۰۰ متر)، هیچ تفاوت معنی‌داری بین سطوح تردد مشاهده نمی‌شود. اثر تردد فقط در ارتفاعات پایین (۷۰۰ متر) قابل تشخیص است و در ارتفاعات بالا (۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر)، عوامل ارتفاعی غالب هستند و اثر تردد محو می‌شود.

اثر متقابل گرادیان‌های مختلف از سطح دریا (۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر) و شدت تردد مسیرهای چوبکشی بر میانگین زی‌توده خشک کرم خاکی با آزمون توکی در شکل ۳ نشان می‌دهد که روند کلی تغییرات زی‌توده کرم خاکی کاهش تصاعدی زی‌توده با افزایش ارتفاع را در منطقه مورد مطالعه پژوهش حاضر نشان می‌دهد و از ۲۴/۳۱ میلی گرم در مترمربع در ارتفاع ۷۰۰ متر به ۶/۹۱ میلی گرم در مترمربع در ۱۵۰۰ متر رسیده و کاهش ۷۱/۶ درصدی در مناطق شاهد را نشان می‌دهد (با نرخ کاهش ۳/۴۶ میلی گرم به ازای هر ۲۰۰ متر ارتفاع) (شکل ۲). نتایج نشان داد که طبقه‌بندی ارتفاعی ۷۰۰ متر دارای بالاترین زی‌توده کرم خاکی و بعد از آن طبقه ارتفاعی ۹۰۰ و ۱۱۰۰ متر و طبقه‌های ارتفاعی ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر دارای کمترین مقدار زی‌توده کرم خاکی هستند. از سوی دیگر، اثر تردد ماشین در ارتفاعات میانی (۹۰۰ تا ۱۱۰۰ متر) بیشترین اهمیت را دارد و در ارتفاعات بالا (بیش از ۱۳۰۰ متر) اثر تردد بر مقدار زی‌توده کرم خاکی نامشخص بوده و معنی‌دار نیست. به عبارت دیگر، در ارتفاع ۱۵۰۰ متر، زی‌توده کرم خاکی به حدی کاهش یافته که اثر تردد قابل تشخیص نیست. نقاط بحرانی و بیشترین حساسیت به تردد در ارتفاع ۱۱۰۰ متر با کاهش ۱۲/۴ درصدی، کمترین اثر در ۷۰۰ متر با کاهش ۸/۹ درصدی و کاهش شدید در ارتفاع ۱۵۰۰ متر با کاهش ۱۵/۳ درصدی زی‌توده کرم خاکی اندازه‌گیری شد.

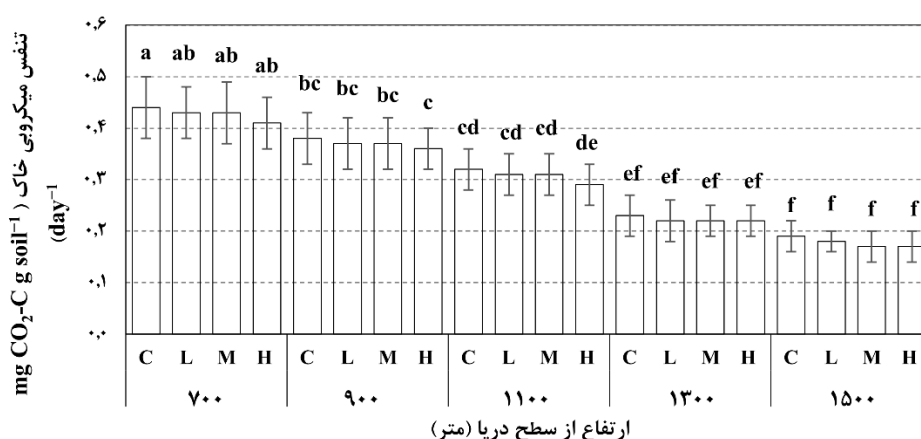


شکل ۲- مقایسه میانگین و انحراف معیار (بازه نشان داده شده) تراکم کرم خاکی در گرادیان‌های مختلف از سطح دریا (۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر) و شدت تردد مسیرهای چوبکشی با آزمون توکی (ب). حروف لاتین ناهمنام بیانگر معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است. شاهد (دست‌نخورده) (C)، مسیر با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



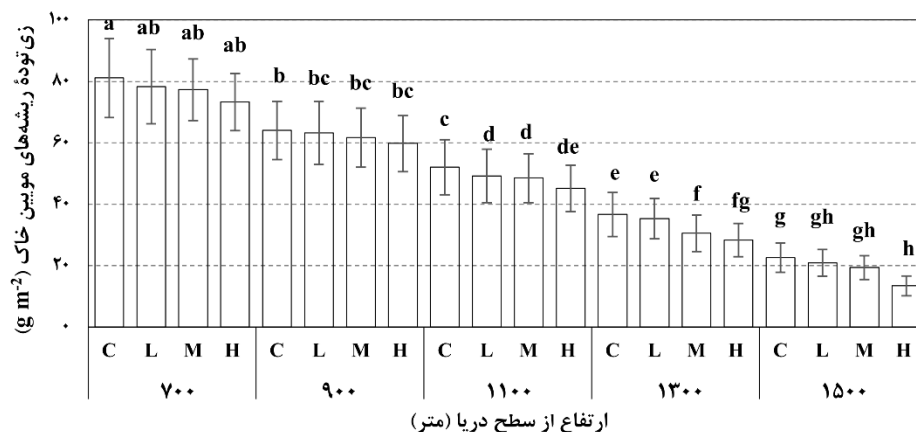
شکل ۳- مقایسه میانگین و انحراف معیار (بازه نشان داده شده) زی‌توده خشک کرم خاکی در گرادیان‌های مختلف از سطح دریا (۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر) و شدت تردد مسیرهای چوبکشی با آزمون توکی (ب). حروف لاتین ناهمنام بیانگر معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است. شاهد (دست‌نخورده) (C)، مسیر با شدت تردد کم (L)، متوسط (M)، زیاد (H).

شکل ۴ مقایسه میانگین تنفس میکروبی خاک در گرادیان‌های مختلف از سطح دریا (۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر) و شدت تردد مسیرهای چوبکشی با آزمون توکی را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که اثر متقابل گرادیان ارتفاعی و شدت تردد در منطقه شاهد دارای اثر معنی‌داری بر تنفس میکروبی خاک است و کاهش پیش‌رونده و معنی‌دار تنفس میکروبی را با افزایش گرادیان ارتفاع نشان می‌دهند که کاهش قابل توجه تنفس میکروبی از ۰/۴۴ در ارتفاع ۷۰۰ در منطقه شاهد به ۰/۱۹ میلی‌گرم دی‌اکسید کربن در ۱۰۰ گرم وزن خشک خاک در روز در ارتفاع ۱۵۰۰ متر نشان از کاهش ۵۶/۸ درصدی دارد. از نظر گرادیان ارتفاعی، ارتفاع ۷۰۰ متری دارای بالاترین و ارتفاع ۱۵۰۰ متری پایین‌ترین مقدار تنفس میکروبی را نشان داد. اثر متقابل گرادیان ارتفاع $\times$ تردد نشان داد که اثر تردد در ارتفاعات میانی (۹۰۰ تا ۱۱۰۰ متر) بیشترین اهمیت را دارد و در ارتفاع ۱۵۰۰ متر تنفس میکروبی به‌حدی کاهش یافته که اثر تردد قابل تشخیص نیست. اثر متقابل گرادیان‌های مختلف از سطح دریا (۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر) و شدت تردد مسیرهای چوبکشی بر میانگین زی‌توده خشک ریشه‌های موپین با آزمون توکی در شکل ۳ نشان می‌دهد که زی‌توده خشک ریشه‌های موپین کاهش معنی‌دار را با افزایش گرادیان ارتفاع نشان می‌دهند. به عبارت دیگر، زی‌توده خشک ریشه‌های موپین در منطقه شاهد در ارتفاع ۷۰۰ متر از ۸۱/۰۸ گرم در متر مربع به ۲۲/۵۶ گرم در متر مربع رسید (شکل ۵) که کاهش ۷۲/۲ درصدی را نشان می‌دهد (به‌ازای هر ۲۰۰ متر، نرخ کاهش برابر با ۱۱/۷ گرم در متر مربع). با افزایش تردد، در طبقه‌های ارتفاعی ۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر، زی‌توده خشک ریشه‌های موپین به‌ترتیب، ۶/۷، ۱۳/۳، ۲۲/۷ و ۴۰/۴ درصد کاهش داشته است. نتایج نشان داد که اثر تردد با افزایش گرادیان ارتفاع تشدید می‌شود و اثر گرادیان ارتفاع بر زی‌توده ریشه قوی‌تر از اثر تردد است.



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

جدول ۳ نتایج همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های زیستی شامل تراکم و زی‌توده خشک کرم خاکی، تنفس میکروبی خاک و زی‌توده ریشه‌های موپین را با اثر متقابل گرادیان ارتفاعی و شدت تردد نشان می‌دهد. اثر متقابل گرادیان ارتفاعی و شدت تردد با تراکم کرم خاکی، زی‌توده کرم خاکی، زی‌توده ریشه‌های موپین در سطح اطمینان ۹۹ درصد همبستگی معنی‌دار از نوع منفی نشان می‌دهد. یعنی با افزایش گرادیان ارتفاعی، مشخصه‌های مذکور کاهش می‌یابند. همچنین تراکم و زی‌توده خشک کرم خاکی دارای همبستگی مثبت و معنی‌دار با تنفس میکروبی خاک و زی‌توده ریشه‌های موپین هستند.



شکل ۵- مقایسه میانگین و انحراف معیار (بازه نشان داده شده) زی توده خشک ریشه های موین در گرادیان های مختلف از سطح دریا (۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ متر) و شدت تردد مسیرهای چوبکشی با آزمون توکی (ب). حروف لاتین ناهمنام بیانگر معنی دار بودن اختلاف میانگین ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است. شاهد (دست نخورده) (C)، مسیر با شدت تردد کم (L)، متوسط (M)، زیاد (H).

جدول ۳- نتایج تحلیل همبستگی پیرسون بین ویژگی های زیستی خاک

زی توده ریشه های موین	تنفس میکروبی خاک	زی توده کرم خاکی	تراکم کرم خاکی
-۰/۹۳**	-۰/۹۱**	-۰/۹۲**	-۰/۹۰**
۰/۹۸**	۰/۹۸**	۰/۹۷**	۱
۰/۹۷**	۰/۹۸**	۱	
۰/۹۸**	۱		
۱			

** معنی داری در سطح ۹۹ درصد

بحث و نتیجه گیری

نتایج نشان داد که تمامی شاخص های مورد بررسی شامل تراکم و زی توده خشک کرم خاکی، تنفس میکروبی و زی توده خشک ریشه های موین در منطقه شاهد کاهش معنی داری با افزایش گرادیان ارتفاع نشان می دهند. توپوگرافی عامل اصلی برای کنترل محتوای کربن آلی خاک است و همچنین به عنوان یک تنظیم کننده، تأثیر مهمی بر چرخه آن دارد. در میان عوامل توپوگرافی، گرادیان ارتفاع عامل تعیین کننده مؤثر برای ارزیابی الگوی مکانی کربن آلی خاک و ویژگی های فیزیکی خاک است. همچنین با تأثیر بر میزان بارش، دما، رطوبت نسبی و تابش خورشیدی، نقش تعیین کننده ای در کارکردهای بیولوژیکی و ترکیب بوم سازگان های جنگلی دارد. ورود کربن، نرخ تجزیه مواد آلی و ترکیب گونه های درختی از عوامل اصلی تأثیرگذار بر محتوای کربن آلی خاک هستند. در جنگل های کوهستانی، تغییرات در محتوای کربن به طور مستقیم وابسته به ورود کربن از طریق تجزیه بقایای گیاهی و تجزیه دگرگونی است. بنابراین، این تغییرات می تواند به نرخ متفاوت تجزیه مواد آلی، فراوانی و فعالیت میکروارگانیسم های خاک، حجم لاشبرگ ها، سیستم ریشه، بافت خاک و سایر عوامل محیطی مانند اشباع پایه، دما و ترکیب گونه ها در امتداد گرادیان ارتفاعی نسبت داده شود (Mangral et al., 2023). تفاوت در گرادیان های ارتفاعی به طور معنی داری بر اجزای زنده و غیرزنده تأثیر می گذارد که با فرآیندهای پیش رونده انسانی مرتبط هستند (Gupta et al., 2019). تغییرات پوشش گیاهی در امتداد گرادیان ارتفاع نشان می دهد که دما، باد، تابش فرابنفش، دسترسی به مواد مغذی و بارش از عوامل اصلی این تغییراتند (Wani et al., 2022). به دلیل شرایط اقلیمی متفاوت، ویژگی های فیزیکی-شیمیایی خاک و پوشش گیاهی نیز به طور چشمگیری متفاوت است که با سطوح پایین تر معدنی شدن نیترات، pH و کربن آلی مرتبط هستند (Kewlani et al., 2021). یکی از عوامل اصلی که با افزایش گرادیان ارتفاع کاهش می یابد، دما است؛ گرادیان های ارتفاعی به عنوان ترموکلاین عمل می کنند و شرایط محیطی بلندمدت را تنظیم می کنند (Mayor et al., 2017). به طور مکرر، گیاهان با انعطاف پذیری

فوتویی بیشتر در ارتفاعات بالاتر مشاهده شده‌اند (Pluess *et al.*, 2016)، که به آنها اجازه می‌دهد با محیط در حال تغییر سازگار شوند. گیاهان در واکنش به نوسانات اقلیمی، ویژگی‌های فیزیولوژیکی، تولیدمثلی و فیزیکی خود را تنظیم می‌کنند (Wani *et al.*, 2022). این انعطاف‌پذیری به گیاهان امکان می‌دهد در زیستگاه‌های مختلف در امتداد گرادیان‌های ارتفاعی ساکن شوند. بنابراین، مطالعه این ویژگی‌های سازشی و ارتباط آنها با عوامل محیطی می‌تواند به درک محدودیت‌های گرادیان ارتفاعی بر پراکنش گیاهان کمک کند (Fatima *et al.*, 2022). بر همین اساس، Pourbabaei و همکاران (۲۰۲۰) با اندازه‌گیری کمی ماده آلی خاک و ارزیابی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و تغییرات پوشش گیاهی در امتداد گرادیان ارتفاعی (نه ترانسکت ارتفاعی از ۱۰۰ متر تا ۱۷۰۰ متر از سطح دریا) در جنگل‌های شمال ایران، نتیجه گرفتند که مقادیر برخی از ویژگی‌های خاک با افزایش ارتفاع، از جمله pH، کربن آلی خاک و محتوای نیتروژن، افزایش یافت. تغییرات معنی‌داری در اشیاء پایه، بافت خاک، وزن مخصوص ظاهری و حقیقی، پتاسیم و فسفر مشاهده نشد. در مقابل Bayranvand و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که اگرچه گونه‌های درختی بر ویژگی‌های شیمیایی خاک (pH، کربن آلی، محتوای نیتروژن کل خاک‌های معدنی) تأثیر گذاشتند، تراکم/زی‌توده کرم‌های خاکی و تنفس میکروبی تحت تأثیر گونه‌های درختی نبوده، بلکه توسط فعالیت درختان و اقلیم با پویایی فصلی قوی در جنگل‌های معتدله شمال ایران کنترل می‌شوند.

به‌طور کلی، روند کاهش تراکم و زی‌توده کرم‌های خاکی با افزایش ارتفاع مشاهده می‌شود. این روند احتمالاً به دلایل زیر مرتبط است: کاهش سرعت تجزیه مواد آلی و کیفیت خاک در ارتفاعات بالاتر به دلیل کاهش تجزیه لاشبرگ و فعالیت میکروارگانیسم‌ها، شرایط سخت محیطی مانند دمای پایین‌تر، رطوبت کمتر و خاک‌های کم‌عمق در مناطق مرتفع و کاهش تنوع گیاهی در ارتفاعات بالا که منبع غذایی کرم‌های خاکی را محدود می‌کند. در ارتباط با تأثیر شدت تردد ماشین‌آلات (چوبکشی) بر تراکم و زی‌توده کرم‌های خاکی می‌توان نتیجه‌گیری نمود که در مناطق با تردد شدید کاهش چشمگیر تراکم و زی‌توده کرم‌های خاکی نسبت به مناطق شاهد (بدون تردد) مشاهده می‌شود که دلایل احتمالی این رخداد یکی فشردگی خاک ناشی از تردد ماشین‌آلات که منجر به کاهش تخلخل خاک و محدودیت حرکت و تنفس کرم‌ها می‌شود. از طرفی دیگر، تخریب لاشبرگ و مواد آلی که منابع غذایی کرم‌ها را کاهش می‌دهد. در مناطق شاهد (کنترل، بدون تردد)، بیشترین تراکم و زی‌توده کرم‌های خاکی مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده سلامت خاک و شرایط مطلوب برای فعالیت کرم‌ها است. در ارتفاعات پایین‌تر با خاک غنی‌تر و شرایط محیطی مناسب‌تر، اثر منفی تردد ماشین‌آلات ممکن است کمی تعدیل شود، اما همچنان کاهش تراکم و زی‌توده کرم‌های خاکی نسبت به مناطق شاهد مشهود است. در ارتفاعات بالاتر، اثر تردد حتی می‌تواند تشدید شود، زیرا خاک‌های این مناطق به‌طور طبیعی حساس‌تر هستند و بازیابی کندتری دارند. عملیات چوبکشی حتی پس از ۷ سال اثرات منفی قابل توجهی بر تراکم و زی‌توده کرم‌های خاکی باقی گذاشته است، به‌ویژه در مناطق با تردد شدید. آستانه بحرانی یا کاهش شدید تراکم و زی‌توده کرم‌های خاکی در ارتفاعات بالای ۱۱۰۰ متر (از ۲/۰۳ به ۱/۱۶ گرم در مترمربع در مناطق شاهد) نشان‌دهنده محدودیت‌های اکولوژیک برای کرم‌ها در این ارتفاعات است. تردد ماشین‌آلات حتی با شدت کم، اثرات بلندمدت بر جوامع کرم‌های خاکی دارد. ارتفاعات بالا (بیش از ۱۳۰۰ متر) آسیب‌پذیرتر هستند و نیاز به مدیریت ویژه مثل ممنوعیت تردد یا استفاده از روش‌های کم‌آسیب دارند. یکی از دلایل کاهش تراکم و زی‌توده کرم‌های خاکی در پژوهش حاضر به گونه راش برمی‌گردد. به‌عبارت دیگر، گونه‌های درختی می‌توانند از طریق چندین مکانیسم بر ویژگی‌های شیمیایی خاک تأثیر بگذارند (Augusto *et al.*, 2002; Hagen-Thorn *et al.*, 2004). تفاوت در کیفیت و وضعیت تغذیه‌ای لاشبرگ، جذب مواد مغذی توسط ریشه، فعالیت ریشه، جذب رسوبات تاجی، تعاملات تاج پوشش و آبشویی، تغییرات ریزاقلیم و جامعه زیستی خاک می‌توانند باعث تفاوت در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های سطحی زیر گونه‌های مختلف شوند (Hagen-Thorn *et al.*, 2004). نتایج پژوهش Hagen-Thorn و همکاران (۲۰۰۴) نشان داد که خاک در یک توده نوئل بیشترین اسیدیته را داشته و لاشبرگ آن باعث افزایش pH خاک سطحی شده است. در بین گونه‌های پهن‌برگ، راش بیشترین شباهت را به نوئل در تأثیر بر لایه سطحی خاک نشان داد (Hagen-Thorn *et al.*, 2004). در همین راستا، Neirynck و همکاران (۲۰۰۰) تفاوت‌های بسیار معنی‌داری در pH خاک معدنی، اشیاء بازها و جامعه زیستی در جنگل‌های با نوع هوموس ورمی‌مول (vermimull humus) (در توده افرا و ون) و جنگل‌های با نوع هوموس مول‌مودر (mullmoder humus) (در توده بلوط و راش) یافتند.

در تحقیق حاضر با افزایش ارتفاع، کاهش زی توده ریشه های موپین مشاهده شد و بازایی پس از ۷ سال در هیچ کدام از طبقات ارتفاعی و شدت های تردد رخ نداد. دلایلی مختلفی برای این موضوع می توان ذکر نمود از جمله کاهش ۰/۶ درجه سانتی گراد دما به ازای هر ۱۰۰ متر ارتفاع، کاهش ۳۵ درصدی مواد آلی خاک در ارتفاعات بالا و محدودیت فعالیت میکروبی و معدنی شدن مواد مغذی. این کاهش، چرخه مواد مغذی را دچار چالش خواهد نمود، افزایش محدودیت نیتروژن برای گیاهان را در پی داشته و کاهش ۱۰ درصدی زی توده ریشه های موپین برابر با کاهش ۲۰-۱۵ درصدی جذب عناصر غذایی است. ریشه های نازک نقش مهمی در چرخه آب، مواد مغذی و کربن در بوم سازگان های جنگلی ایفا می کنند. در مقیاس های زمانی تکاملی، گسترش گیاهان از بوم سازگان های آبی به خشکی مشروط به توسعه راهبردهای مؤثر برای جذب منابع خاکی توسط ریشه ها بوده است، که تأمین کافی آب و مواد مغذی برای فتوسنتز، رشد و نگهداری گیاه را تضمین می کند (McCormack et al., 2015). DeArmond و همکاران (۲۰۲۴) امکان بازایی خاک های فرالسول جنگل های مرطوب حاره ای آمازون برزیل را در طول دوره زمانی بررسی نمود و نتیجه گرفتند که در دوره مطالعه (۱۳ تا ۲۶ سال پس از قطع)، زی توده ریشه های نازک بازایی شد. در جنگل های استوایی، اکثریت زی توده ریشه های موپین (FRB) در ۵ تا ۱۰ سانتی متر بالایی خاک قرار دارد (DeArmond et al., 2024). بنابراین، زی توده ریشه های موپین به شدت در برابر آسیب ناشی از ساخت و استفاده از مسیرهای چوبکشی، به ویژه در رد چرخ ها، آسیب پذیر است (Picchio et al., 2019). این آسیب پذیری زی توده ریشه های موپین در مسیرهای چوبکشی عمدتاً ناشی از برداشتن خاک سطحی برای ایجاد سطح صاف تر و تمیزتر برای ماشین آلات است. اگرچه مسیرهای چوبکشی همیشه کاملاً تمیز نمی شوند، اما وزن خردکننده و چرخش لاستیک ها یا ردپاها، ریشه های نازک شکننده را قطع می کند. به عنوان مثال، در عرض یک سال پس از عملیات قطع در مسیرهای تردد ماشین آلات جنگل های معتدله، زی توده ریشه های موپین کمتری نسبت به جنگل های دست نخورده داشتند (Malo and Messier, 2011). همچنین در جنگل های منطقه تیرومرود تنکابن در شمال ایران، Jourgholami و همکاران (۲۰۱۹) بازایی کامل زی توده ریشه های موپین را در مسیرهای چوبکشی واقع در جنگل کاری های ۲۵ ساله مشاهده نکردند. در جنگل های حاره ای آمازون، مقادیر زی توده ریشه های موپین در محوطه های دپوی چوب آلات حتی پس از ۲۷ سال هنوز با مقدار منطقه شاهد تفاوت معنی داری داشتند (DeArmond et al., 2022). با این حال، بازسازی زی توده ریشه های موپین در مسیرهای چوبکشی زیر تاج پوشش ضخیم در کمتر از ۵ سال پس از عملیات خروج چوب گزارش شده است، در حالی که در همان مطالعه، زی توده ریشه های موپین در مسیرهای چوبکشی واقع در مناطق قطع کامل بازسازی نشده بود (Jourgholami et al., 2021) و شرایط بهبود یافته برای بازایی زیر تاج پوشش را به مواد آلی بیشتر و رطوبت خاک نسبت دادند که به فعالیت زیستی کلی سود می رساند. مسیرهای چوبکشی در مناطق قطع یکسره احتمالاً به دلیل خشک تر بودن سایت، زی توده ریشه های موپین کمتری داشتند، زیرا نشان داده شده است که زی توده ریشه های موپین و تولید ریشه های نازک تحت شرایط آزمایشی خشکسالی کاهش می یابد (Latterini et al., 2023). هنگام ارزیابی تراکم ریشه های نازک در مسیرهای چوبکشی در خاک های با بافت های مختلف در توالی زمانی ۱۰ تا ۴۰ ساله، تفاوتی مشاهده نشد (Ebeling et al., 2017). این نتایج با نتایج مقاله مروری منتشر شده درباره تأثیرات قطع زمین پایه بر ریشه های نازک همخوانی دارد، یعنی هیچ روند قابل مشاهده ای با زمان برای بازایی ریشه های نازک وجود نداشت (Latterini et al., 2023). بر عکس، Girardin و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی دقیق الگوهای مکانی و زمانی ذخایر و جریان های ریشه های موپین در جنگل های گرمسیری در امتداد یک گرادیان ارتفاعی از کوه های آند پرو (۳۰۲۰ متر) تا جنگل های پست آمازون (۱۹۴ متر) پرداختند و نتیجه گرفتند که میانگین تولید خالص اولیه سالانه ریشه های ظریف زیرزمینی در جنگل های کوهستانی (عمق ۳۰-۰۰ سانتی متر) بین 0.56 ± 0.27 مگاگرم کربن در هکتار در سال (ارتفاع ۱۸۵۵ متری) و 0.87 ± 0.17 مگاگرم کربن در هکتار در سال (ارتفاع ۳۰۲۰ متری) در نوسان بود. بهبود دسترسی مواد مغذی، دسترسی کربن، هوادهی و ساختارهای نفوذپذیرتر خاک، همگی به ایجاد محیطی مساعد برای رشد ریشه های موپین در لایه های آلی خاک کمک می کنند. بنابراین، ذخایر کربن ریشه های موپین در ماده آلی خاک بیشتر است (Girardin et al., 2013).

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که اثر متقابل گرادیان ارتفاعی و شدت تردد در منطقه شاهد دارای اثر معنی‌دار و کاهشی بر تنفس میکروبی خاک است. نتایج پژوهش Jasso-Flores و همکاران (۲۰۲۰) نشان داد که جامعه میکروبی لایه آلی در محل کم‌ارتفاع‌تر باید توسط منبع کربن محدود شده باشد، نه توسط نیتروژن و فسفر. با این حال، این نتایج در خاک معدنی مشاهده نشد که نشان می‌دهد عوامل محرک تجزیه ماده آلی بین لایه آلی و خاک معدنی متفاوت است. به عنوان نتیجه‌گیری، نتایج Jasso-Flores و همکاران (۲۰۲۰) نشان می‌دهد که مقاومت شیمیایی ماده آلی (در پایین‌ترین محل) و دما (در بالاترین محل)، فعالیت متابولیک میکروبی در لایه لاشبرگی را کاهش می‌دهد. بنابراین، برای دستیابی به درک کامل آسیب‌پذیری اکوسیستم‌های کوهستانی گرمسیری در برابر تغییرات آب‌وهوایی، مطالعه یکپارچه ماده آلی مشتق‌شده از گیاه و متابولیسم میکروبی لایه لاشبرگ جنگلی ضروری است. تجزیه ماده آلی علاوه بر متابولیسم جوامع میکروبی خاک، تحت تأثیر کیفیت ماده آلی نیز قرار می‌گیرد. این دو عامل، متابولیسم میکروبی خاک و کیفیت ماده آلی، همراه با دما، تجزیه ماده آلی را در امتداد گرادیان‌های ارتفاعی جنگل‌ها تعیین می‌کنند.

همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های زیستی شامل تراکم و زی‌توده خشک کرم خاکی، تنفس میکروبی خاک و زی‌توده ریشه‌های موبین با اثر متقابل گرادیان ارتفاعی و شدت تردد نشان داد که تمامی شاخص‌های زیستی همبستگی منفی بسیار قوی و معنی‌دار با اثر متقابل ارتفاع و تردد نشان دادند. به عبارت دیگر، با افزایش ارتفاع و شدت تردد، تمام شاخص‌های زیستی به‌طور معنی‌داری کاهش یافتند. همبستگی بسیار قوی بین تنفس میکروبی و زی‌توده ریشه‌ها نشان‌دهنده ارتباط تنگاتنگ فعالیت میکروبی و سیستم ریشه‌ای است. از منظر شبکه غذایی خاک نیز همبستگی قوی کرم‌های خاکی با سایر شاخص‌ها نشان‌دهنده نقش محوری آنها در سلامت خاک است. این نتایج نشان می‌دهد که اثر متقابل ارتفاع و تردد تأثیر مخرب قوی بر تمامی جنبه‌های زیستی خاک دارد. همچنین شاخص‌های مختلف سلامت خاک به‌شدت به هم مرتبط هستند و برای کاهش اثرات بهره‌برداری جنگل نیاز به مدیریت یکپارچه و مبتنی بر بوم‌سازگان وجود دارد.

به‌طور کلی تأثیر گرادیان ارتفاعی و شدت تردد ماشین‌آلات بر شاخص‌های زیستی خاک در جنگل‌های راش خالص نشان از کاهش شدید مقادیر شاخص‌های زیستی با افزایش ارتفاع داشت و افزایش ارتفاع از ۷۰۰ به ۱۵۰۰ متر، سبب کاهش تراکم و زی‌توده کرم‌های خاکی، تنفس میکروبی و زی‌توده ریشه‌های نازک در محدوده ۷۳-۵۶ درصد شد (بیشترین کاهش در زی‌توده ریشه‌های موبین (۷۲/۲ درصد) و کمترین کاهش در تنفس میکروبی (۵۶/۸ درصد). اثر تردد در ارتفاعات پایین (۹۰۰-۷۰۰ متر) کمتر از ارتفاعات دیگر بوده اما همچنان معنی‌دار است (کاهش ۱۰-۶ درصدی). همبستگی قوی بین شاخص‌ها و هماهنگی کاهش در تمام پارامترها نشان‌دهنده آشفتگی سیستماتیک در سلامت خاک است. گرادیان ارتفاعی به عنوان عامل کلیدی تعیین‌کننده سلامت خاک در جنگل‌های راش عمل می‌کند، به‌طوری که ارتفاعات بالا (بیش از ۱۳۰۰ متر) به دلیل شرایط سخت محیطی و حساسیت به تردد، بیشترین آسیب‌پذیری را نشان می‌دهند. اثرات تردد ماشین‌آلات حتی پس از ۷ سال باقی می‌ماند و بازیابی در ارتفاعات بالا به دهه‌ها زمان نیاز دارد.

References

- 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(2), 233-253.
- Bardelli, T., Gómez-Brandón, M., Ascher-Jenull, J., Fornasier, F., Arfaioli, P., Francioli, D., 2017. Effects of slope exposure on soil physico-chemical and microbiological properties along an altitudinal climosequence in the Italian Alps. *Science of The Total Environment* 575(10), 1041-1055.
- Battigelli, J.P., Spence, J.R., Langor, D.W., Berch, S.M., 2004. Short-Term Impact of Forest Soil Compaction and Organic Matter Removal on Soil Mesofauna Density and Oribatid Mite Diversity. *Canadian Journal of Forest Research* 34(5), 1136-1149.
- Bayranvand, M., Kooch, Y., Rey, A., 2017. Earthworm population and microbial activity temporal dynamics in a Caspian Hyrcanian mixed forest. *European Journal of Forest Research* 136(6), 447-456.

- 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.
- Blasi, S., Menta, C., Balducci, L., Conti, F.D., Petrini, E., Piovesan, G., 2013. Soil Microarthropod Communities from Mediterranean Forest Ecosystems in Central Italy under Different Disturbances. *Environmental Monitoring and Assessment* 185(10), 1637-1655.
- Blouin, M., Hodson, M.E., Delgado, E.A., Baker, G., Brussaard, L., Butt, K.R., Brun, J.J., 2013. A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. *European Journal of Soil Science* 64(1), 61-182.
- Bottinelli, N., Capowiez, Y., Ranger, J., 2014. Slow Recovery of Earthworm Populations after Heavy Traffic in Two Forest Soils in Northern France. *Applied Soil Ecology* 73(1), 130-133.
- Cambi, M., Certini, G., Neri, F., Marchi, E., 2015. The impact of heavy traffic on forest soils: a review. *Forest Ecology and Management* 338(1), 124-138.
- DeArmond, D., Ferraz, J.B.S., Lima, A.J.N., Higuchi, N., 2024. Surface soil recovery occurs within 25 years for skid trails in the Brazilian Amazon. *Catena* 234(6), 107568.
- DeArmond, D., Ferraz, J.B.S., Lovera, L.H., de Souza, C.A.S., Corrêa, C., Spanner, G.C., Lima, A.J.N., dos Santos, J., Higuchi, N., 2022. Impacts to soil properties still evident 27 years after abandonment in Amazonian log landings. *Forest Ecology and Management* 510(4), 120105.
- Dymov, A.A., Startsev, V.V., 2016. Changes in the Temperature Regime of Podzolic Soils in the Course of Natural Forest Restoration after Clearcutting. *Eurasian Soil Science* 49(5), 551-559.
- 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.
- Etehadi Abari, M., Majnounian, B., Malekian, A., Jourgholami, M., 2017. Effects of forest harvesting on runoff and sediment characteristics in the Hyrcanian forests, northern Iran. *European Journal of Forest Research*, 136, 375-386.
- Fatima, S., Hameed, M., Ahmad, F., Ahmad, M. S. A., Khalil, S., Munir, M., 2022. Structural and functional responses in widespread distribution of some dominant grasses along climatic elevation gradients. *Flora* 289(2), 152034.
- Frey, B., Kremer, J., Rüdte, A., Sclacca, 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.
- Germon, A., Laclau, J.P., Robin, A., Jourdan, C., 2020. Tamm review: Deep fine roots in forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* 466(1), 118135.
- Girardin, C.A.J., Aragão, L.E.O.C., Malhi, Y., Huaraca Huasco, W., Metcalfe, D.B., Durand, L., Mamani, M., Silva-Espejo, J.E., Whittaker, R.J. 2013. Fine root dynamics along an elevational gradient in tropical Amazonian and Andean forests, *Global Biogeochemical Cycles* 27(2), 252-264.
- Grunberg, J., Ghaffariyan, M., Jourgholami, M., Labelle, E., Kaakkurivaara, N., Goncalves Robert, R., Kuhmaier, M., 2023. Criteria and Indicators for Assessing the Sustainability of Timber Harvesting Operations studied from 2017 to 2021 — a systematic Review. *Current Forestry Reports* 112(6), 2114-2128.
- Gupta, A.K., Negi, M., Nandy, S., Alatalo, J.M., Singh, V., Pandey, R., 2019. Assessing the vulnerability of socio-environmental systems to climate change along an altitude gradient in the Indian Himalayas. *Ecological Indicators* 106(4), 105512.
- Hagen-Thorn, A., Callesen, I., Armolaitis, K., Nihlgard, B., 2004. The impact of six European tree species on the chemistry of mineral topsoil in forest plantations on former agricultural land. *Forest Ecology and Management* 195(2), 373-384.
- Hamid, M., Khuroo, A.A., Malik, A.H., Ahmad, R., Singh, C.P., 2020. Elevation and aspect determine the differences in soil properties and plant species diversity on Himalayan Mountain summits. *Ecological Research* 36(3), 340-352.
- Hassan, W.H., Nile, B.K., 2021. Climate change and predicting future temperature in Iraq using CanESM2 and HadCM3 modeling. *Model. Earth Systems and Environment* 7(4), 737-748.
- Horn, R., Vossbrink, J., Becker, S., 2004. Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties. *Soil and Tillage Research* 79(2), 207-219.

- Hou, X., Han, H., Tigabu, M., Cai, L., Meng, F., Liu, A., 2019. Changes in soil physicochemical properties following vegetation restoration mediate bacterial community composition and diversity in Changting, China. *Ecological Engineering* 138(2), 171-179.
- Jasso-Flores, I., Galicia, L., Chávez-Vergara, B., Merino, A., Tapia-Torres, Y., García-Oliva, F., 2020. Soil organic matter dynamics and microbial metabolism along an altitudinal gradient in Highland tropical forests. *Science of the Total Environment* 741(3), 140143.
- Jourgholami, M., Feghhi, 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.
- 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.
- Karami, S., Jourgholami, M., Attarod, P., Venanzi, R., Latterini, F., Stefanoni, W., Picchio, R., 2023. The medium-term effects of forest operations on a mixed broadleaf forest: Changes in soil properties and loss of nutrients. *Land Degradation & Development* 34(10), 2961-2974.
- Kewlani, P., Negi, V.S., Bhatt, I.D., Rawal, R.S., Nandi, S.K., 2021. Soil nutrients concentration along altitudinal gradients in Indian Western Himalaya. *Scandinavian Journal of Forest Research* 36(1), 98-104.
- Labelle, E.R., Poltorak, B.J., Jaeger, D., 2019. The role of brush mats in mitigating machine-induced soil disturbances: an assessment using absolute and relative soil bulk density and penetration resistance. *Canadian Journal of Forest Research* 49(1), 164-178.
- Labelle, E.R. و Hansson, L. و Högbom, L. و Jourgholami, M. و Laschi, A., 2022. Strategies to Mitigate the Effects of Soil Physical Dis-turbances Caused by Forest Machinery: A Comprehensive Review. *Current Forestry Reports*, 8, 20-37.
- Latterini, F., Dyderski, M. K., Horodecki, P., Venanzi, R., Picchio, R., Jagodziński, A.M., 2024. Evaluating small-scale harvesting disturbance to the forest soil in Mediterranean beech high forests. *Land Degradation & Development* pp. 1-9.
- Latterini, F., Dyderski, M.K., Horodecki, P., Rawlik, M., Stefanoni, W., Hogbom, L., Venanzi, R., Picchio, R., Jagodzinski, A.M., 2023. A meta-analysis of the effects of ground-based extraction technologies on fine roots in forest soils. *Land Degradation & Development* pp. 1-13.
- Latterini, F., Dyderski, M.K., Horodecki, P., Rawlik, M., Stefanoni, W., Högbom, L., Venanzi, R., Picchio, R., Jagodzinski, A.M., 2023. A Meta-analysis of the effects of ground-based extraction technologies on fine roots in forest soils. *Land Degradation & Development* pp. 1-13.
- Magagnotti, N., Spinelli, R., Güldner, O., Erler, J., 2012. Site Impact after Motor-Manual and Mechanised Thinning in Mediterranean Pine Plantations. *Biosystems Engineering* 113(2), 140-147.
- Malo, C., Messier, C., 2011. Impact of primary and secondary machinery tracks on fine root growth of sugar maple after selection cutting. *Canadian Journal of Forest Research* 41(4), 892-897.
- Mangral, Z.A., Islam, S.U., Tariq, L., Kaur, S., Ahmad, R., Malik, A.H., Goel, S., Baishya, R., Barik, S.K., Darm T.U.H., 2023. Altitudinal gradient drives significant changes in soil physico-chemical and eco-physiological properties of *Rhododendron anthopogon*: a case study from Himalaya. *Frontiers in Forests and Global Change* 6(1), 1181299.
- Mayor, J.R., Sanders, N.J., Classen, A.T., Bardgett, R.D., Clement, J.C., Fajardo, A., 2017. Elevation alters ecosystem properties across temperate treelines globally. *Nature* 542(1), 91-95.
- McCormack, M.L., Dickie, I.A., Eissenstat, D.M., Fahey, T.J., Fernandez, C.W., Guo, D., Helmisaari, H.-S., Hobbie, E.A., Iversen, C.M., Jackson, R.B., 2015. Redefining fine roots improves understanding of below-ground contributions to terrestrial biosphere processes. *New Phytologist* 207(3), 505-518.
- Neirynck, J., Mirtcheva, S., Sioen, G., Lust, N., 2000. *Acer pseudoplatanus* L., *Quercus robur* L. and *Fagus sylvatica* L. on earthworm biomass and physico-chemical properties of a loamy topsoil. *Forest Ecology and Management* 133(2), 275-86.
- 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(1), 115-128.
- Pluess, A. R., Frank, A., Heiri, C., Lalagüe, H., Vendramin, G.G., and Oddou-Muratorio, S., 2016. Genome–environment association study suggests local adaptation to climate at the regional scale in *Fagus sylvatica*. *New Phytologist* 210(3), 589-601.

- Pourbabaei, H., Salehi, A., Ebrahimi, S.S., Khodaparasrt, 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.
- Sackett, T.E., Smith, S.M., Basiliko, N., 2013. Indirect and direct effects of exotic earthworms on soil nutrient and carbon pools in North American temperate forests. *Soil Biology & Biochemistry* 57(3), 459-467.
- Simon, A., Dhendup, K., Rai, P.B., Gratzner, G., 2018. Soil carbon stocks along elevational gradients in Eastern Himalayan Mountain forests. *Geoderma Regional* 12(1), 28-38.
- Sirén, M., Ala-Ilomäki, J., Lindeman, H., Uusitalo, J., Kiilo, K.E.K., Salmivaara, A., Ryynänen, A., 2019. Soil Disturbance by Cut-to-Length Machinery on Mid-Grained Soils. *Silva Fennica* 53(2), 10134.
- Sohrabi, H., Jourgholami, M., Labelle, E.R., 2022. The effect of forest floor on soil microbial and enzyme indices after forest harvesting operations in Hyrcanian deciduous forests. *European Journal of Forest Research* 141(6), 1013-1027.
- Sundqvist, M.K., Sanders, N.J., Wardle, D.A., 2013. Community and ecosystem response to elevational gradients: processes, mechanisms, and insights for global change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 44(2), 261-280.
- Suthar, S., 2012. Seasonal dynamics in earthworm density, casting activity and soil nutrient cycling under Bermuda grass (*Cynodon dactylon*) in semiarid tropics, India. *Environmentalist* 32(3), 503-511.
- Wani, I.A., Khan, S., Verma, S., Al-Misned, F.A., Shafik, H.M., El-Serehy, H.A., 2022. Predicting habitat suitability and niche dynamics of *Dactylorhiza hatagirea* and *Rheum webbianum* in the Himalaya under projected climate change. *Scientific Reports* 12(2), 13205.
- Wronski, E.B., Murphy, G., 1994. Responses of Forest Crops to Soil Compaction. *Soil Compaction in Crop Production*. Ed. by B.D. Soane, C. van Ouwerkerk. Amsterdam, Elsevier, pp. 317-342.
- Zhang, Y., Ai, J., Sun, Q., Li, Z., Hou, L., Song, L., 2021. Soil organic carbon and total nitrogen stocks as affected by vegetation types and altitude across the mountainous regions in the Yunnan Province, south-western China. *Catena* 196(1), 104872.