University of Tehran Press

Journal of Natural Environment

Online ISSN: 2423-7817

Homepage: https://jne.ut.ac.ir/

The effects of soil disturbance caused by timber skidding operations on the herbaceous vegetation of Hyrcanian forests

(case study: Kheyrud educational and research forest)

Ali Babaei Ahmadabad[1] | **Meghdad Jourgholami**[2]✉

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: ali.babaei.ahmad@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

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 02 January 2026

Received in revised form 21 February 2026

Accepted 11 March 2026

Keywords:

Biodiversity,
Herbaceous vegetation,
Hyrcanian forests,
Logging operations,
Soil disturbance.

ABSTRACT

Mechanized skidding is among the most significant disturbance factors in Hyrcanian forests, causing substantial physical and biological alterations to the forest floor. This study examines the mid-term impacts of skidding on forest floor herbaceous vegetation. The research was conducted in 2025 in the Kheyrud Educational and Research Forest. Four compartments with time since harvest (7, 10, 15, and 20 years) were selected, and within each compartment, sampling plots were established on skid trails with different traffic intensities (low, medium, high, and landing areas) as well as in control areas. Soil physical properties (bulk density, penetration resistance, and soil porosity percentage), litter depth and quality, light intensity, and herbaceous vegetation cover were measured. Simpson's, Shannon-Wiener, Evenness, and Margalef biodiversity indices were also calculated. The results demonstrated that soil compaction resulting from skidder traffic significantly increased soil bulk density (62%) and penetration resistance, while decreasing soil porosity (49%), as well as litter depth and quality. These physical alterations to the soil and litter, coupled with a 4- to 5-fold increase in received light, led to changes in species composition and the structure of the herbaceous community. The density of herbaceous plants on skid trails was, on average, nearly twice that of the control areas; however, this increase was driven by the dominance of pioneer and light-demanding species. The results indicated that vegetation is strongly influenced by skidding operations, and that changes in light availability, litter characteristics, and soil compaction are key factors governing alterations in forest floor herbaceous vegetation.

Cite this article: Babaei Ahmadabad, A., & Jourgholami, M. (2026). The effects of soil disturbance caused by timber skidding operations on the herbaceous vegetation of Hyrcanian forests (case study: Kheyrud educational and research forest). *Journal of Natural Environment*, 79 (1), 107-126. DOI: http//doi.org/10.22059/jne.2026.409321.2880

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

Introduction

The Hyrcanian forests, covering approximately two million hectares, represent one of the world's most valuable and unique forest ecosystems, playing a vital role in maintaining regional ecological balance and providing numerous environmental services. However, in recent decades, pressures from human activities, including timber harvesting, have threatened these valuable ecosystems. Mechanized logging operations are often accompanied by the use of heavy machinery. The machine traffic on skid trails leads to soil compaction, which alters the soil physical structure, reducing porosity, increasing bulk density, and decreasing permeability, thereby creating unfavorable conditions for plant root growth and microbial activity. The adverse effects of machinery traffic can persist for several decades. As a critical component of forest ecosystems, herbaceous understory vegetation is particularly susceptible to soil compaction due to its proximity to the soil surface and sensitivity to environmental changes. Alterations in soil structure can directly, through restricting root development, and indirectly, through modifying access to resources such as water, nutrients, and light, transform the species composition and diversity of herbaceous plants. Despite numerous studies on the impacts of harvesting on soil properties and vegetation in the Hyrcanian forests, a comprehensive investigation about the mid-term effects of soil compaction on the dynamics of herbaceous communities, considering varying disturbance intensities and their interaction with other environmental factors such as litter and light, has received less attention. The objective of this study is to assess the impact of soil disturbance caused by logging operations on the quantitative and qualitative characteristics of herbaceous vegetation in the Hyrcanian forests over a mid-term period (7 to 20 years).

Material and Methods

This research was conducted within the Namkhaneh and Gorazbon districts in the Kheyrud Forest. Four compartments with different time since harvest (7, 10, 15, and 20 years) were selected. In each compartment, sampling plots (1×1 m) were established on skid trails with varying traffic intensities (low, medium, high, and landing areas) and in control areas (located 10 m from the trail edge). A total of 144 quadrats (96 on skid trails and 48 in control areas) were sampled in three replications (May, August, and October 2025). Herbaceous plants within the quadrats were counted and identified using authoritative references. Soil physical properties, including bulk density, porosity, and penetration resistance, were measured using steel cylinders and a pocket penetrometer. Litter depth was measured with a ruler, and samples were collected to determine carbon percentage (Walkley-Black method), nitrogen percentage (Kjeldahl method), and C/N ratio. Light intensity was measured using a lux meter. Biodiversity indices including Simpson, Shannon-Wiener, Evenness, and Margalef were determined. Data were analyzed using two-way analysis of variance (ANOVA), and means were compared using Tukey's test at a significance level of 0.05.

Results

The results showed that logging operations had a significant effect on all soil physical properties (P<0.01). The mean soil bulk density in landing areas was 1.34 g cm^{-3}, which was 49% higher than in control areas (0.95 g cm^{-3}). Total soil porosity on skid trails was decreased by an average of 37.96% compared to control areas (65.19%). Penetration resistance in landing areas was experienced a 91% increase (2.59 MPa compared to 1.36 MPa in control areas), and even after 20 years, low-traffic trails still showed a 50.55% increase compared to the control. Litter depth on skid trails was decreased by approximately 50% relative to control areas. Litter carbon content on skid trails was reduced by 35.45%, and litter nitrogen also showed a 7.87% decrease. Light intensity on skid trails, especially in compartments with a time since harvest of 7 years, was 4 to 5 times higher than in control areas. In total, 41 species of herbaceous plants belonging to 28 families were identified, and 7,987 individual plants were counted. The density of herbaceous plants averaged 129.37 per quadrat on skid trails compared to 18.51 in control areas. Dominant species on skid trails included *Oplismenus undulatifolius* (2,001 individuals), *Euphorbia amygdaloides* (1,684 individuals), and *Viola alba* (1,312 individuals), while in control areas, species such as *Asperula odorata* and *Sanicula europaea* were dominant. The Simpson diversity index ranged from 0.63 to 0.87 on skid trails and from 0.75 to 0.87 in control areas. The mean Shannon-Wiener index was 1.93 on skid trails and 2.01 in control areas. The Evenness index in the 7-

year landing area (0.69) showed a 26.3% decrease compared to its control (0.92). The Margalef index exhibited the highest values in low-traffic trails of the 15-year-old compartment (3.79) and medium-traffic trails of the 20-year-old compartment (3.43).

Discussion and Conclusion

Our findings confirm that logging operations have a profound and enduring impact on the herbaceous vegetation of the Hyrcanian forests. Litter layer degradation and the substantial increase in understory light availability have fundamentally altered the ecological conditions of the forest floor. These changes have led to an ecological shift from a diverse and stable community of shade-tolerant native species to a simplified community dominated by invasive, light-demanding species such as *Oplismenus undulatifolius*, *Euphorbia amygdaloides*, and *Viola alba*. Although the density of herbaceous plants on skid trails increased to nearly double that of control areas, the analysis of biodiversity indices indicates that this increase results from the dominance of a limited number of species, showing the degradation of the natural forest structure. The Evenness index, as a sensitive bioindicator, showed a significant decrease under high disturbance intensities. Notably, higher values of some indices on skid trails compared to controls should not be mistakenly interpreted as improvement; rather, they reflect the replacement of native species by invasive ones. For the sustainable management of Hyrcanian forests, it is essential to implement soil compaction mitigation strategies during the planning and execution phases of logging operations. These include optimizing trail networks, utilizing lighter machinery, and avoiding operations under wet soil conditions. In areas with severe disturbance, particularly landings, active management interventions such as mulching and seeding with native pioneer species can accelerate the ecosystem recovery process. Regular monitoring of herbaceous vegetation and biodiversity indices, especially the Evenness index, should be considered an integral part of forest management programs.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

CRediT authorship contribution statement

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank anonymous reviewers for their valuable suggestions in manuscript revision.

محیط زیست طبیعی

انتشارات دانشگاه تهران

شاپای الکترونیکی: ۲۴۲۳-۷۸۱۷

Homepage: https://jne.ut.ac.ir/

تأثیر آشفتگی خاک ناشی از عملیات چوبکشی بر پوشش علفی کف جنگل‌های هیرکانی (مورد پژوهی: جنگل آموزشی-پژوهشی خیرود)

علی بابایی احمدآباد[۱] | مقداد جورغلامی[۲]✉

۱. گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: ali.babaei.ahmad@ut.ac.ir

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

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۰

کلیدواژه‌ها:

آشفتگی خاک،

پوشش گیاهی علفی،

تنوع زیستی،

جنگل‌های هیرکانی،

عملیات چوبکشی.

چکیده

عملیات چوبکشی مکانیزه از مهم‌ترین عوامل آشفتگی در جنگل‌های هیرکانی است که تغییرات فیزیکی و زیستی قابل‌توجهی در کف جنگل ایجاد می‌کند. این پژوهش به بررسی تأثیر عملیات چوبکشی بر پوشش گیاهی علفی کف جنگل در بازهٔ زمانی میان‌مدت می‌پردازد. این پژوهش در سال ۱۴۰۴ در جنگل آموزشی-پژوهشی خیرود انجام شد. چهار پارسل با سنین مختلف بهره‌برداری (۷، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سال) انتخاب و در هر پارسل، پلات‌های نمونه‌برداری در مسیرهای چوبکشی با شدت‌های مختلف تردد (کم، متوسط، زیاد و دپو) و مناطق شاهد مستقر شد. ویژگی‌های فیزیکی خاک (جرم مخصوص ظاهری، مقاومت به نفوذ و درصد تخلخل خاک)، عمق و کیفیت لاشبرگ، شدت نور و پوشش گیاهی علفی مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. شاخص‌های تنوع زیستی سیمپسون، شانون-وینر، یکنواختی و مارگاف نیز محاسبه شد. نتایج نشان داد کوبیدگی خاک ناشی از تردد ماشین‌های چوبکشی به‌طور معنی‌داری باعث افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک (تا ۶۲٪) و مقاومت به نفوذ (تا ۳ برابر) و کاهش تخلخل خاک (تا ۴۹٪)، عمق و کیفیت لاشبرگ می‌شود. تغییرات فیزیکی خاک و لاشبرگ همراه با افزایش ۵-۴ برابری نور دریافتی، منجر به تغییر ترکیب گونه‌ای و ساختار جامعهٔ علفی شد. تراکم گیاهان علفی در مسیرهای چوبکشی به‌طور میانگین نزدیک به ۲ برابر مناطق شاهد بود، اما این افزایش ناشی از غالبیت گونه‌های پیشرو و نورپسند است. بررسی شاخص‌های تنوع زیستی نشان داد، پوشش گیاهی به‌شدت تحت تأثیر عملیات چوبکشی است و تغییرات نور، لاشبرگ و کوبیدگی خاک از عوامل کلیدی در تغییر پوشش گیاهی علفی کف جنگل هستند.

استناد: بابایی احمدآباد، علی؛ و جورغلامی، مقداد (۱۴۰۵). تأثیر آشفتگی خاک ناشی از عملیات چوبکشی بر پوشش علفی کف جنگل‌های هیرکانی (مطالعهٔ موردی: جنگل آموزشی-پژوهشی خیرود). *محیط زیست طبیعی*، ۷۹ (۱)، ۱۲۶-۱۰۷.

DOI: http//doi.org/10.22059/jne.2026.409321.2880

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

مقدمه

جنگل‌های هیرکانی با وسعت حدود ۲ میلیون هکتار، یکی از ارزشمندترین و منحصربه‌فردترین اکوسیستم‌های جنگلی جهان و به‌عنوان یک ذخیره‌گاه ژنتیکی از گونه‌های گیاهی و جانوری شناخته می‌شوند (Marvie Mohadjer, 2011). جنگل‌ها، نقش حیاتی در حفظ تعادل اکولوژیک منطقه و ارائهٔ خدمات محیط‌زیستی متعدد ایفا می‌کنند. با این وجود، در دهه‌های اخیر فشارهای ناشی از فعالیت‌های انسانی از جمله بهره‌برداری چوب، این بوم‌سازگان‌های با ارزش را تهدید می‌کند (Sohrabi *et al*., 2019). مکانیزاسیون به‌طور فزاینده‌ای باعث تغییرات در جوامع جنگلی خواهد شد (Lundback *et al*., 2021). عملیات چوبکشی به‌عنوان بخش جدایی‌ناپذیر مدیریت جنگل، اغلب همراه با استفاده از ماشین‌های سنگین انجام می‌شود. تردد این ماشین‌ها روی مسیرهای چوبکشی منجر به فشردگی و کوبیدگی خاک شده و این ترددها یکی از مخرب‌ترین آثار جانبی بهره‌برداری محسوب می‌شوند (Ampoorter *et al*., 2011). کوبیدگی با تغییر ساختار فیزیکی خاک، کاهش تخلخل، افزایش جرم مخصوص ظاهری و کاهش نفوذپذیری، شرایط نامناسبی برای رشد ریشهٔ گیاهان و فعالیت میکروارگانیسم‌ها ایجاد می‌کند (Greacen and Sands, 1980). اثرات نامطلوب تردد ماشین‌های بهره‌برداری می‌تواند تا چندین دهه ادامه داشته باشد و خواص فیزیکی خاک حتی تا ۳۰ سال پس از بهره‌برداری نیز به حالت اولیه باز نگردد (DeArmond *et al*., 2023). همچنین مطالعاتی وجود دارد که نشان می‌دهد احیای لایه‌های پوشش گیاهی جنگل پس از قطع درختان، به حدود نیم قرن یا بیشتر زمان نیاز دارد (Mac lean and Wein, 1997). در بیشتر اکوسیستم‌های جنگلی، گیاهان علفی کف جنگل در تنوع گونه‌ای مشارکت دارند و در چرخهٔ مواد غذایی نقش مهمی ایفا می‌کنند (Hardtle *et al*., 2003). پوشش گیاهی علفی کف جنگل به‌عنوان یکی از اجزای حیاتی اکوسیستم‌های جنگلی، نقش مهمی در چرخهٔ مواد مغذی، حفاظت خاک در برابر فرسایش، تنظیم رطوبت دمای خاک و تأمین زیستگاه برای گونه‌های مختلف ایفا می‌کند (Hobbie, 2015). آشفتگی ناشی از عملیات چوبکشی بر تولید و استقرار بذر، جوانه‌زنی و نرخ رشد بسیاری از گونه‌های کف جنگل تاثیرگذار است (Reader and Bricker, 1992; Maschinski *et al*., 1997). پوشش گیاهی به‌دلیل نزدیکی به سطح خاک و حساسیت به تغییرات محیطی، به‌طور ویژه تحت تأثیر فشردگی خاک قرار می‌گیرد (Wei *et al*., 2015). تغییر در ساختار خاک می‌تواند مستقیماً از طریق محدود کردن توسعهٔ ریشه و غیرمستقیم از طریق تغییر در دسترسی به منابعی مانند آب، مواد مغذی و نور، ترکیب و تنوع گونه‌ای، گیاهان علفی را دگرگون سازد (Godefroid and Koedam, 2004).

نور یکی از مهمترین متغیرهای محیطی است که بر توزیع فراوانی گونه‌ها تأثیرگذار است (Elemans, 2004; Whigham, 2004; Bartemucci *et al*., 2006)، بدیهی است که شرایط نور مطلوب نسبت به اینکه گونه، نورپسند یا سایه‌پسند باشد، متفاوت خواهد بود. شدت نور در طبقات جنگل متفاوت (Collins *et al*., 1985; Tinya *et al*., 2009) و بر تولید غذای گیاهی، طول ساقه، رنگ برگ و گلدهی مؤثر و انتقال نور از تاج‌پوشش به کف جنگل برای گیاهان زیرآشکوب و کف جنگل (Bartemucci *et al*., 2006) مهم بوده، ولی نتایج برخی تحقیقات، تأثیر قوی نور بر غنای گونه‌ای را اثبات نکردند (Hardtle *et al*., 2003). محققین دریافتند که داخل میکروسایت‌ها (به‌عنوان مثال در کف جنگل دست‌نخورده) شرایط برای ترکیب گونه‌ها، مهم است (Mills and MacDonald, 2005; Moora *et al*., 2007). تحقیقات در کف جنگل، جهت بررسی شرایط نور در قبل و بعد از آشفتگی اهمیت زیادی داشته (Mills and MacDonald, 2004; Humphrey *et al*., 2020) و دسترسی به نور به‌عنوان یک عامل حیاتی در جابجایی زیر آشکوب درختان ظاهر شده است، به‌طوری که مسیرهای چوبکشی فشردگی خاک بیشتری نسبت به جنگل‌های مجاور نشان می‌دهند و باعث رشد گونه‌های نورپسند و رطوبت‌دوست نسبت به گونه‌های سایه‌پسند می‌شوند. نکتهٔ قابل توجه این است که جنگل‌های مدیریت‌شده‌ای که در معرض برداشت گزینشی درختان قرار دارند، همانند جنگل‌های هیرکانی شمال ایران، به‌دلیل افزایش دسترسی به نور ناشی از کاهش تراکم درختان و روشنه‌های تاج‌پوشش، تنوع گیاهان آوندی بیشتری را نشان می‌دهند (Amiri Dado-Kalaei *et al*., 2025).

لاشبرگ گیاهی، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک جنگل، منشأ بسیاری از تحولات بیوشیمیایی و زیستی است. مقدار عناصر و ترکیبات شیمیایی موجود در لاشبرگ و هوموس و تأثیر بر خاک جنگل با توجه به اقلیم و تیپ درختی تشکیل‌دهندهٔ تودهٔ جنگلی می‌تواند متفاوت باشد (Haghverdi *et al*., 2020). گونه‌های درختی مختلف با داشتن اجزایی مانند برگ، چوب و ریشه با ترکیبات شیمیایی متفاوت، پس از تجزیه، بر ویژگی‌های شیمیایی خاک تأثیر می‌گذارند (Hagen-

Thorn *et al*., 2004). علاوه بر این، نقش شیمیایی و زیستی اثرات مکانیکی لاشبرگ نیز حائز اهمیت است. این لایه با کاستن از شدت ضربهٔ قطرات باران (Jourgholami *et al*., 2020)، بهبود کیفیت و نوع خاک، چرخهٔ عناصر شیمیایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

کیفیت لاشبرگ (که خود وابسته به نوع درختان است)، موضوع مطالعات گسترده‌ای بوده است (Singh and Gupta, 1977; Swift, 1979; Alef and Nannipieri, 1995; Weland, 2009; Ponge *et al*., 2011; Labaz *et al*., 2014; Haghverdi *et al*., 2020; Kianmehr *et al*.,2022). ویژگی‌های شیمیایی خاک کف جنگل، از نخستین نشانه‌های تأثیر تیپ درختی و لاشبرگ بر آن است (Hagen-Thorn *et al*., 2004). درختان مختلف با لاشبرگ ویژهٔ خود، باعث ایجاد تفاوت در مواد غذایی زیر تاج‌پوشش می‌شوند و اثرات متفاوتی بر ویژگی‌های خاک بر جای می‌گذارند. فعالیت‌های آنزیمی در کف جنگل به‌شدت به نوع درختان و ترکیبات شیمیایی برگ‌هایشان وابسته است (Samadzadeh *et al*., 2016).

تنوع گونه‌های گیاهی، معمولاً با تعیین تعداد گونه‌ها (غنای گونه‌ای) و محاسبهٔ میزان توزیع یکنواخت گونه‌ها در یک جامعه (یکنواختی) اندازه‌گیری می‌شود (Zhang *et al*., 2012; Lessa Derci *et al*., 2020). هدف اصلی مدیریت پایدار، افزایش غنا و تنوع زیستی جنگل است (Molder *et al*., 2008). البته باید توجه داشت که تنوع زیستی و تغییرات آن به عواملی مانند pH خاک (Borchsenius *et al*., 2004)، مواد مغذی در دسترس (Small and McCarthy, 2005)، رطوبت خاک (Leniere and Houle, 2006)، نور (Tinya *et al*., 2009) و فاصله تا حاشیهٔ جنگل (Gonzalez *et al*., 2009) بستگی دارد. تحقیقات نشان می‌دهد که یکی از نشانه‌های حاصلخیزی خاک، تنوع گونه‌ای بالا می‌باشد، به‌صورتی‌که در برخی جنگل‌ها به‌حدی رشد و تنوع گیاهی بالاست که در یک هکتار ۲۸۰ گونهٔ درختی مشاهده شد (Nalbandi Qarqiyeh, 2021). در جنگل‌های هیرکانی ایران، اگرچه مطالعات متعددی در زمینهٔ اثرات بهره‌برداری بر خصوصیات خاک و پوشش گیاهی انجام شده است (Tavnkar *et al*., 2009; Ezzati *et al*., 2011; Deljoui *et al*.,2017)، اما اکثر این پژوهش‌ها به بررسی کوتاه‌مدت یا تأثیرات مجزای فشردگی خاک پرداخته‌اند. بررسی جامع تأثیرات میان‌مدت کوبیدگی خاک بر پویایی جامعهٔ گیاهان علفی با در نظر گرفتن شدت‌های مختلف آشفتگی و تعامل آن با فاکتورهای محیطی دیگر مانند لاشبرگ و نور، تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این شکاف دانشی، طراحی و اجرای پژوهش حاضر را ضروری ساخته است. از این‌رو، هدف اصلی این مطالعه، بررسی تأثیر کوبیدگی خاک ناشی از عملیات چوبکشی بر ویژگی‌های کمی و کیفی پوشش گیاهی علفی کف جنگل‌های هیرکانی در یک بازهٔ زمانی میان‌مدت است. اهداف ویژهٔ پژوهش عبارتند از: ۱) ارزیابی تغییرات فیزیکی خاک و لاشبرگ در مسیرهای چوبکشی در بازهٔ زمانی مختلف، ۲) تحلیل تغییرات ترکیب گونه‌ای و شاخص‌های تنوع زیستی جامعهٔ گیاهی علفی کف جنگل در پاسخ به فشردگی خاک و ۳) بررسی روابط بین درجهٔ کوبیدگی خاک با پارامترهای پوشش گیاهی علفی.

روش‌شناسی پژوهش

منطقهٔ مطالعه: این پژوهش در جنگل آموزشی–پژوهشی خیرود واقع در استان مازندران انجام شد. این جنگل به ۷ بخش تقسیم و تحقیق حاضر در دو سری جنگلی نم‌خانه و گرازبن انجام شده که در محدودهٔ جغرافیایی بین ´۵۱°۳۹ تا ´۵۱°۳۳ طول شرقی و ´۳۶°۳۲ تا ´۳۶°۴۵ عرض شمالی قرار دارند. ارتفاع منطقه از سطح دریا بین ۳۵۰ تا ۱۲۹۰ متر متغیر است. میانگین بارندگی سالانه ۱۱۴۶ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۸/۵۵ درجهٔ سانتی‌گراد می‌باشد. تیپ جنگلی غالب منطقه، راش–ممرز ناهمسال دانه‌زاد است. تیپ خاک منطقه عمدتاً آلفی‌سول (قهوه‌ای جنگلی) با بافت رسی تا رسی–لومی گزارش شده است (Sohrabi *et al*., 2019) (جدول ۱). این مطالعه در چهار پارسل با سنین بهره‌برداری ۷، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سال که در بخش نم‌خانه (پارسل ۲۲۰ و ۲۲۱) و بخش گرازبن (پارسل‌های ۳۱۶ و ۳۱۷) و در چهار شدت تردد دپو، زیاد، متوسط و کم انجام شده است. در هر شدت تردد، ۶ قطعه‌نمونه (کوادرات ۱×۱ متر) در مسیر چوبکشی و ۳ قطعه‌نمونه در منطقهٔ شاهد (در فاصلهٔ ۱۰ متری از لبهٔ مسیر چوبکشی) تعیین و نشانه‌گذاری شد.

جدول ۱- مشخصات پارسل‌ها و ماشین‌ها در سری‌های نمخانه و گرازبن

Table 1. Characteristics of compartments and machinery in the Namkhaneh and Gorazbon districts

پارسل	جهت	ارتفاع	تیپ جنگل	نوع خاک	سن بهره‌برداری	ماشین‌های مورد استفاده	طول مسیر (متر)
361	جنوبی	1225	راش-ممرز	قهوه‌ای جنگلی	7	Timberjack 450c کابلی اسکیدر	900
317	جنوبی-شمالی	1140	راش-ممرز	قهوه‌ای جنگلی	10	Timberjack 450c کابلی اسکیدر	1050
220	جنوب و جنوب غربی	1070	راش-ممرز	قهوه‌ای جنگلی	15	TAF E655 کابلی اسکیدر	975
221	شمال غربی و جنوبی	1140	راش-ممرز	قهوه‌ای جنگلی	20	TAF E655 کابلی اسکیدر	1000

در مجموع ۱۴۴ قطعه‌نمونه مشخص (۹۶ قطعه‌نمونه در مسیرهای چوبکشی و ۴۸ قطعه‌نمونه در منطقهٔ شاهد) و نمونه‌برداری از آنها انجام شد. نمونه‌برداری در سه تکرار (اردیبهشت، مرداد و مهر ۱۴۰۴) انجام شد. سپس گیاهان علفی داخل قطعه‌نمونه‌ها شمارش و نمونه‌ای جهت شناسایی برداشت و بعد از انتقال به هرباریوم دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه تهران، با کمک از منابع معتبر مانند فلور ایرانیکا Rechinger (۱۹۹۸-۱۹۶۳) و فلور ایران (Assadi *et al*., 2025) و منابع دیگر شناسایی شدند. سپس جدول فلورستیک برای آنها تهیه شد. نمونه‌برداری خاک از قسمت بالای قطعه‌نمونه با استفاده از سیلندر ۵ سانتی‌متری، جهت بررسی خصوصیات فیزیکی خاک (جرم مخصوص ظاهری، درصد تخلخل و مقاومت به نفوذ) انجام شد و عمق لاشبرگ با استفاده از خط‌کش از وسط قطعه‌نمونه اندازه‌گیری و نمونه‌ای از لاشبرگ جهت بررسی عناصر شیمیایی N، C و C/N برداشت و نیتروژن با روش کجلدال (kjeldahl) اندازه‌گیری (Jackson, 1962) و کربن با استفاده از روش Wackley و Black (۱۹۴۳) اندازه‌گیری شد. نور با دستگاه لوکس‌متر در وسط قطعه‌نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها: تأثیر عملیات چوبکشی بر تنوع زیستی با محاسبهٔ سنجه‌های تنوع سیمپسون، تنوع شانون-وینر، یکنواختی (اکویتابیلیتی) و مارگالف انجام شد. برای بررسی اثر فاکتورهای فیزیکی خاک، عمق و کیفیت لاشبرگ و نور، ابتدا داده‌ها در نرم‌افزار Excel مرتب و داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای SPSS نسخهٔ ۱۸ و SAS JMP تجزیه‌وتحلیل شدند. از آزمون تحلیل واریانس دوطرفه برای بررسی اثرات اصلی و متقابل سن بهره‌برداری و شدت تردد استفاده شد. مقایسهٔ میانگین‌ها با آزمون چنددامنه‌ای توکی در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ انجام گرفت. شاخص‌های تنوع زیستی با نرم‌افزار PAST نسخهٔ ۴/۰۳ محاسبه شد.

یافته‌های پژوهش

تغییرات ویژگی‌های فیزیکی خاک: نتایج نشان داد که عملیات چوبکشی اثر معنی‌داری بر کلیهٔ ویژگی‌های فیزیکی خاک و لاشبرگ داشته است ($P<$۰/۰۵). جرم مخصوص ظاهری خاک در دپوها به‌طور میانگین ۱/۳۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود که ۴۹ درصد بیشتر از مناطق شاهد (۰/۹۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب) بود. این رقم در شدت تردد کم در پارسل با سن بهره‌برداری ۲۰ سال به‌حداقل خود یعنی ۱/۰۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب رسیده، ولی با این وجود هنوز با منطقهٔ شاهد، اختلاف معنی‌داری داشته و در یک گروه آماری قرار نگرفته است. در خصوص تخلخل خاک، نیز داده‌ها نشان دادند که بین منطقهٔ شاهد (دست‌نخورده) جنگل با ۶۵/۱۹ درصد تخلخل و کلیهٔ مسیرهای چوبکشی تحت شدت‌های مختلف و سنین متفاوت بهره‌برداری و اثرمتقابل این دو عامل اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد وجود دارد. به‌طوری‌که میانگین کل تخلخل خاک نسبت به مناطق شاهد ۳۷/۹۶ درصد کاهش داشته است ولی درصد تخلخل خاک از کمترین مقدار آن در دپو ۷ سال (۴۳/۰۱) تا بیشترین مقدار آن در شدت تردد کم سن ۲۰ سال ۲۳/۱۸ درصد رشد داشته است، ولی با این وجود هنوز با منطقهٔ شاهد دارای اختلاف معنی‌داری است. در خصوص مقاومت به نفوذ، مسیرهای چوبکشی در مقایسه با مناطق شاهد افزایش معنی‌داری پیدا کرده بود، به‌طوری‌که در دپوها با افزایش ۹۱ درصدی مواجه بوده‌ایم (۲/۵۹ مگاپاسکال در دپو در مقابل ۱/۳۶ مگاپاسکال در مناطق شاهد). این افزایش تنها در مناطق شاهد نبوده و در بهترین حالت که در مسیرهای کم تردد بوده، این افزایش ۵۰/۶ درصد گزارش شده است و هنوز با منطقهٔ شاهد پس از گذشت ۲ دهه دارای اختلاف معنی‌داری است. البته در خصوص شدت تردد، اختلاف بین محل دپو و شدت تردد کم ۱۳/۱۱ درصد بوده است که کاهش شدت تردد، موجب کاهش در مقاومت به نفوذ خاک شده است. در خصوص سن بهره‌برداری نیز میانگین مقاومت به نفوذ خاک در سن بهره‌برداری ۷ سال ۲/۶۹ مگاپاسکال بوده که این رقم در سن بهره‌برداری ۲۰ سال و با گذشت ۲

دهه به ۲/۰۷ رسیده که بهبود نسبی با کاهش ۲۹/۹ درصدی به‌وضوح قابل مشاهده می‌باشد. ولی با این‌حال هنوز بین نتایج به‌دست آمده در پارسل با سن بهره‌برداری ۲۰ سال و در مقایسه با منطقهٔ شاهد، اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد بوده است. مقاومت به نفوذ خاک نیز در مسیرهای چوبکشی به‌ویژه در دپوها تا ۳ برابر بیشتر از مناطق شاهد افزایش یافته بود (جدول ۲).

جدول ۲- روند تغییرات مشخصه‌های فیزیکی خاک در سال‌ها و شدت‌های مختلف تردد پس از عملیات چوبکشی (میانگین ± انحراف معیار)*

Table 2. Changes in soil physical properties across time since harvest and traffic intensities following skidding operations (mean ± standard deviation*

سن	شدت تردد	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌مترمکعب)	تخلخل (درصد)	مقاومت به نفوذ (مگاپاسکال)
7	دپو	1.45 ± 0.03 [a]	43.01 ± 1.18 [k]	3.11 ± 0.06 [a]
	شدت تردد زیاد	1.21 ± 0.06 [cd]	51.85 ± 2.45 [hi]	2.92 ± 0.10 [b]
	شدت تردد متوسط	1.19 ± 0.01 [d]	52.18 ± 0.71 [hi]	2.54 ± 0.09 [c]
	شدت تردد کم	1.07 ± 0.02 [fg]	56.51 ± 0.72 [c-f]	2.20 ± 0.06 [ef]
	شاهد	0.88 ± 0.02 [ij]	64.39 ± 0.63 [ab]	1.41 ± 0.12 [h]
10	دپو	1.35 ± 0.05 [b]	46.69 ± 2.34 [j]	2.60 ± 0.08 [c]
	شدت تردد زیاد	1.24 ± 0.03 [c]	50.56 ± 1.34 [i]	2.30 ± 0.07 [de]
	شدت تردد متوسط	1.11 ± 0.01 [ef]	55.61 ± 0.28 [ef]	2.20 ± 0.04 [ef]
	شدت تردد کم	1.06 ± 0.02 [fg]	57.11 ± 0.65 [c-e]	2.16 ± 0.07 [ef]
	شاهد	0.89 ± 0.01 [i]	63.77 ± 0.32 [b]	1.39 ± 0.10 [h]
15	دپو	1.32 ± 0.03 [b]	48.18 ± 1.17 [j]	2.38 ± 0.15 [d]
	شدت تردد زیاد	1.21 ± 0.01 [cd]	52.11 ± 0.37 [hi]	2.28 ± 0.06 [de]
	شدت تردد متوسط	1.12 ± 0.03 [e]	54.85 ± 1.34 [fg]	2.17 ± 0.05 [ef]
	شدت تردد کم	1.03 ± 0.01 [h]	58.26 ± 0.43 [cd]	2.08 ± 0.03 [f]
	شاهد	0.83 ± 0.01 [j]	66.24 ± 0.34 [a]	1.32 ± 0.04 [h]
20	دپو	1.25 ± 0.01 [c]	51.13 ± 0.38 [hi]	2.30 ± 0.04 [de]
	شدت تردد زیاد	1.19 ± 0.01 [d]	52.84 ± 0.27 [gh]	2.18 ± 0.03 [ef]
	شدت تردد متوسط	1.09 ± 0.01 [ef]	56.33 ± 0.35 [d-f]	2.06 ± 0.05 [f]
	شدت تردد کم	1.03 ± 0.01 [h]	58.54 ± 0.66 [c]	1.75 ± 0.04 [g]
	شاهد	0.83 ± 0.04 [j]	66.35 ± 1.62 [a]	1.32 ± 0.03 [h]

*حروف ناهمنام بیانگر معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است.

عمق لاشبرگ در مسیرهای چوبکشی نزدیک به ۵۰ درصد نسبت به مناطق شاهد کاهش یافته است. بیشترین آسیب در محل دپو مشاهده شد. ولی هرچه از سن بهره‌برداری ۷ سال به طرف ۲۰ سال امتداد پیدا کرد، شاهد روند بازیابی تدریجی افزایش عمق لاشبرگ بوده و روند افزایشی آن از ۲/۷۵ سانتی‌متر در ۷ سال به ۴/۱۷ سانتی‌متر افزایش یافته است (۳۴/۰۵ درصد افزایش). در خصوص تأثیر سن بهره‌برداری نیز میانگین عمق لاشبرگ در سن بهره‌برداری ۷ سال ۳/۵۸ سانتی‌متر بود که این رقم بعد از گذشت ۲۰ سال به ۵ سانتی‌متر رسیده است و دارای افزایش ۳۹/۶۶ درصدی می‌باشد که از نظر آماری معنی‌دار می‌باشد. ولی هنوز با منطقهٔ شاهد از نظر آماری در یک گروه قرار ندارد. کمترین عمق لاشبرگ در محل دپو (۲/۷۵) و در پارسل با سن بهره‌برداری ۷ سال و بیشترین عمق لاشبرگ در مسیر با تردد، کم (۶/۳۳) در پارسل با سن بهره‌برداری ۲۰ سال مشاهده شد. این تفاوت تأثیر شدت تردد و سن بهره‌برداری و اثر متقابل این دو عامل را در میزان عمق لاشبرگ به‌وضوح نشان می‌دهد.

نتایج مربوط به درصد کربن لاشبرگ نشان داد که در مسیرهای چوبکشی نسبت به مناطق شاهد، کربن لاشبرگ به‌شدت روند کاهشی داشته است. این کاهش کربن در دپوها، با بیشترین آسیب وارده (۵۰/۵۷ درصد) بوده و در شدت تردد کم، کمترین فاصله را با منطقهٔ شاهد داشته است (کاهش درصد کربن به مقدار ۱۷/۹۶ درصد). هیچ یک از نتایج به‌دست آمده با منطقهٔ شاهد در یک

گروه آماری قرار نگرفته‌اند، ولی با بررسی نتایج در سن بهره‌برداری ۷ سال با ۱۶/۵۴ درصد کربن و ۲۰/۲۰ درصد در سن بهره‌برداری ۲۰ سال و همچنین ۱۶/۵۳ درصد در دپو در مقایسه با ۲۰/۴۲ درصد در شدت تردد کم، می‌توان دریافت که با کاهش شدت تردد و افزایش مدت زمان سپری شده، از شدت صدمات وارده به کربن لاشبرگ کاسته و روند بازیابی به‌وضوح مشاهده می‌شود. ولی با این‌حال بعد از گذشت دو دهه از پایان عملیات چوبکشی هنوز درصد کربن لاشبرگ در مناطق شاهد به‌صورت معنی‌داری بیشتر از مسیرهای چوبکشی با سطوح متفاوت تردد، قرار دارد. نیتروژن لاشبرگ نیز تحت سطوح مختلف تردد و سنین متفاوت چوبکشی، کاهش یافته است. در کل بین مسیرهای چوبکشی و منطقهٔ شاهد ۷/۸۷ درصد اختلاف به‌صورت کاهشی مشاهده شد و در بین سنین مختلف بهره‌برداری نیز بیشترین تفاوت بین سن بهره‌برداری ۷ سال و منطقهٔ شاهد با ۱۴/۸۶ درصد کاهش نیتروژن بود و کمترین اختلاف در پارسل با سن بهره‌برداری ۱۰ سال با ۰/۱۷ درصد کاهش مشاهده شد. روند افزایش درصد نیتروژن در کاهش شدت تردد (از ۲۲/۰۹ درصد به صفر) و افزایش سن بهره‌برداری (از ۱۴/۸۶ به ۴/۷۲درصد) نشان‌دهندهٔ تأثیر شدت تردد و سن بهره‌برداری بر بازیابی خواص شیمیایی لاشبرگ است. بالاترین نسبت C/N در مناطق شاهد مشاهده شد، به‌صورتی‌که در تمامی سنین بهره‌برداری و تمام نتایج در یک گروه آماری قرار داشتند. کمترین نسبت C/N در دپوها به‌دست آمد و از سن ۷ تا ۲۰ سال، پس از بهره‌برداری ۳۰/۴۹ درصد رشد را نشان می‌دهد و در سن بهره‌برداری ۲۰ سال این محل (دپو) کاملاً بازیابی شده و حتی از منطقهٔ شاهد نیز اندکی فراتر رفته است (در حد ۰/۰۳). در مسیرهای با تردد کم (که کمترین آشفتگی مربوط به این مسیر بود)، کمترین نسبت C/N در سن بهره‌برداری ۱۰ سال و بیشترین آن در سن بهره‌برداری ۱۵ سال مشاهده شد. این داده‌ها به‌وضوح نشان می‌دهند، عملیات چوبکشی به‌ویژه در سن بهره‌برداری ۷ و ۱۰ سال نسبت C/N لاشبرگ را کاهش داده ولی با گذشت ۱۵ تا ۲۰ سال پس از عملیات چوبکشی، اکوسیستم نشانه‌های واضحی از بهبود و بازگشت نسبی C/N نسبت به مناطق شاهد را نشان می‌دهد (جدول ۳).

عملیات چوبکشی بر تغییر نور دریافتی کف جنگل به‌طور قابل‌توجهی مؤثر بود. در سن بهره‌برداری ۷ سال و در محل دپو با LUX ۶۵۲ با منطقهٔ شاهد (۸۲/۵۰) در یک گروه آماری قرار گرفتند، ولی در سایر شدت‌های تردد (زیاد ۱۸۶۸/۳۳، متوسط ۲۲۵۸/۳۳ و کم LUX ۲۰۳۱/۶۷)، این ارقام نشان‌دهندهٔ میزان شکاف تاج‌پوشش و عدم ترمیم آن پس از گذشت ۷ سال از عملیات چوبکشی است. در پارسل با سن بهره‌برداری ۲۰ سال، تمام مسیرهای چوبکشی با محل دپو در یک گروه آماری قرار گرفته‌اند و به‌جز شدت تردد زیاد و دپو، سایر مناطق داری میزان LUX مشابه بوده که این تشابه نشان‌دهندهٔ بازیابی تاج‌پوشش مسیرهای چوبکشی بعد از گذشت دو دهه است. این نتایج می‌تواند تأثیر شدت تردد و سن بهره‌برداری و اثر متقابل این دو عامل به‌دلیل باز شدن تاج‌پوشش روی شدت نور وارده به کف جنگل است (جدول ۴).

تغییرات پوشش گیاهی علفی: در مجموع ۴۱ گونه گیاه علفی متعلق به ۲۸ خانواده شناسایی شد. از ۷۹۸۷ گیاه علفی شمارش شده، که به‌طور میانگین در هر قطعه‌نمونه در مسیرهای چوبکشی ۱۲۹/۳۷ و در مسیر چوبکشی ۱۸/۵۱ گیاه علفی مشاهده شد. جدول فلورستیک برای این گونه‌ها تهیه شد (جدول ۵).

جدول ۳- تغییرات مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی لاشبرگ در سال‌ها و شدت‌های مختلف تردد پس از عملیات چوبکشی (میانگین ± انحراف معیار) *

Table 3. Changes in depth and physico-chemical properties of litter across time since harvest and traffic intensities following skidding operations (mean ± standard deviation)

سن		عمق لاشبرگ (سانتی‌متر)	کربن لاشبرگ (درصد)	نیتروژن لاشبرگ (درصد)	نسبت کربن به نیتروژن لاشبرگ
7	دپو	2.75 ± 0.69 ^{h}	14.01 ± 0.18 ^{i}	2.07 ± 0.11 ^{hi}	6.79 ± 0.29 ^{gh}
	شدت تردد زیاد	3.00 ± 0.77 ^{gh}	15.53 ± 0.78 ^{hi}	2.15 ± 0.07 $^{g-i}$	7.22 ± 0.41 $^{e-h}$
	شدت تردد متوسط	3.92 ± 0.86 $^{d-h}$	17.99 ± 0.58 $^{e-g}$	2.31 ± 0.02 $^{e-h}$	7.81 ± 0.26 $^{b-f}$
	شدت تردد کم	4.67 ± 0.52 $^{c-f}$	18.62 ± 0.60 $^{d-f}$	2.49 ± 0.05 $^{c-e}$	7.48 ± 0.20 $^{d-h}$
	شاهد	8.75 ± 0.62 ^{a}	24.62 ± 0.95 ^{a}	2.79 ± 0.06 ^{ab}	8.83 ± 0.41 ^{a}
10	دپو	3.08 ± 0.58 ^{gh}	16.43 ± 0.61 ^{gh}	2.39 ± 0.25 $^{d-g}$	6.95 ± 0.83 $^{f-h}$
	شدت ترددزیاد	3.67 ± 0.26 $^{e-h}$	17.69 ± 0.45 ^{fg}	2.57 ± 0.22 $^{b-d}$	6.94 ± 0.64 $^{f-h}$

سن		عمق لاشبرگ (سانتی‌متر)	کربن لاشبرگ (درصد)	نیتروژن لاشبرگ (درصد)	نسبت کربن به نیتروژن لاشبرگ
	شدت تردد متوسط	4.58 ± 0.58 c-f	18.63 ± 0.24 d-f	2.81 ± 0.07 ab	6.63 ± 0.13 h
	شدت تردد کم	5.17 ± 0.82 b-d	19.75 ± 0.72 c-e	2.95 ± 0.22 a	6.73 ± 0.69 gh
	شاهد	8.63 ± 0.80 a	24.79 ± 1.16 a	2.91 ± 0.08 a	8.51 ± 0.41 a-c
15	دپو	3.30 ± 0.47 f-h	17.54 ± 0.78 fg	2.35 ± 0.23 d-g	7.51 ± 0.44 d-h
	شدت ترددزیاد	4.17 ± 0.41 c-h	18.60 ± 0.58 d-f	2.28 ± 0.09 f-i	8.17 ± 0.41 a-e
	شدت تردد متوسط	4.67 ± 0.82 c-f	19.99 ± 0.95 cd	2.44 ± 0.08 d-f	8.21 ± 0.32 a-e
	شدت تردد کم	5.58 ± 0.74 b-d	21.30 ± 0.56 bc	2.54 ± 0.07 a	8.40 ± 0.28 a-d
	شاهد	8.25 ± 0.66 a	24.43 ± 0.57 a	2.84 ± 0.19 a	8.65 ± 0.60 ab
20	دپو	4.17 ± 0.68 c-h	18.10 ± 1.33 d-g	2.04 ± 0.06 i	8.89 ± 0.56 a
	شدت ترد دزیاد	4.42 ± 0.58 c-g	19.77 ± 0.40 c-e	2.37 ± 0.08 d-g	8.36 ± 0.13 a-d
	شدت تردد متوسط	5.08 ± 0.74 b-e	20.93 ± 0.40 bc	2.76 ± 0.04 a-c	7.59 ± 0.23 c-h
	شدت تردد کم	6.33 ± 0.88 b	21.99 ± 0.47 b	2.86 ± 0.04 a	7.70 ± 0.24 b-g
	شاهد	8.71 ± 1.01 a	25.70 ± 2.21 a	2.91 ± 0.04 a	8.86 ± 0.89 a

*حروف ناهمنام بیانگر معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است.

جدول ٤- تغییرات شدت نور (لوکس) در سنین و شدت‌های مختلف تردد (میانگین ± انحراف معیار)*

Table 4. Changes in light intensity (lux) across different ages and traffic intensities (mean ± standard deviation)

	سن	7	10	15	20
سطوح مختلف تردد	دپو	652.00 ± 199.28 b	663.33 ± 128.63 b	2690.00 ± 1448.53 ab	690.00 ± 235.03 b
	شدت تردد زیاد	1868.33 ± 596.13 ab	760.00 ± 159.49 b	3445.33 ± 1123.76 a	791.76 ± 147.70 b
	شدت تردد متوسط	2258.33 ± 1169.06 ab	1910.00 ± 756.39 ab	2551.67 ± 1460.42 ab	1301.67 ± 542.23 ab
	شدت تردد کم	2031.67 ± 281.53 ab	2313.33 ± 906.72 ab	2353.33 ± 915.33 ab	1574.00 ± 635.05 ab
	شاهد	827.50 ± 293.26 b	1536.67 ± 1028.54 ab	1188.33 ± 865.98 ab	1547.92 ± 1011.68 ab

*حروف ناهمنام بیانگر معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است.

گونه‌های غالب در مسیرهای چوبکشی شامل ملف (*Oplismenus undulatifolius*)، فرفیون (*Euphorbia amygdaloides*) و بنفشهٔ سفید (*Viola alba*) بودند، در حالی‌که در مناطق شاهد گونه‌هایی مانند آسپرولا (*Asperula odorata*) و سانیکولا (*Sanicula europaea*) غالب بودند. به‌دلیل کثرت تعداد گونه‌های علفی ۱۰ گونهٔ اول که دارای بیشترین فراوانی بودند در شکل ۱ به تفکیک مناطق شاهد و مسیرهای چوبکشی ارائه شدند.

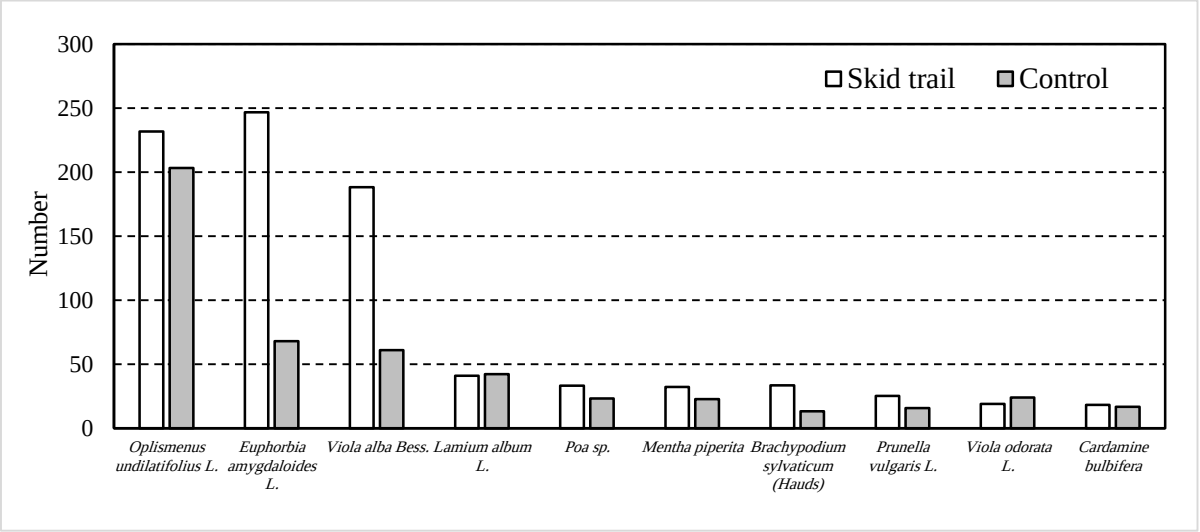
جدول ۵- لیست فلورستیک گونه‌ها در منطقه مورد مطالعه

Table 5. Floristic list of species in the study area

نام علمی	خانواده	نام فارسی	شکل زیستی	کوروتیپ	فرم رویشی	تعداد
Asperula odorata L.	Rubiaceae	زبرینهٔ جنگلی	Geo	PL	پهن‌برگ علفی	131
Asperula odorata L.	Rubiaceae	آسپرولا	Geo	PL	پهن‌برگ علفی	50
Arum maculatum	Araceae	گل شیپوری	Geo	ES	پهن‌برگ علفی	4
Brachypodium sylvaticum (Hauds)	Poaceae	چمن جادوی جنگلی	Hem	PL	گراس	241
Cardamine bulbifera	Cruciferae	ترتیزک باتلاقی	Hem	ES	پهن‌برگ علفی	160
Carex pendula L.	Cyperaceae	جگن جنگلی	Geo	ES	گراس	154
Circaea lutetiana L.	Onagraceae	افسون گر شب	Geo	ES, IT, M	پهن‌برگ علفی	34

نام علمی	خانواده	نام فارسی	شکل زیستی	کوروتیپ	فرم رویشی	تعداد
Cyclamen persicum	Primulaceae	سیکلامین	Hem	ES	پهن‌برگ علفی	26
Cyclamen europaeum L.	Primulaceae	پنجه مریم	Geo	ES	پهن‌برگ علفی	55
Drypotris affines L.	Aspidiaceae	نوعی سرخس	Geo	ES	سرخس	46
Epimedium pinnatum L.	Podophyllaceae	چلرک	Geo	Hyr	پهن‌برگ علفی	25
Epipactis helleborine (L)Crantz	Orchidaceae	خربقان	Geo	PL	پهن‌برگ علفی	37
Euphorbia amygdaloides L.	Euphorbiaceae	فرفیون	Geo	ES	پهن‌برگ علفی	1684
Fragaria vesca L.	Rosaceae	توت فرنگی	Geo	ES, IT	پهن‌برگ علفی	47
Geum urbanum L.	Rosaceae	علف مبارک	Hem	ES	پهن‌برگ علفی	55
Geranium cinereum	Geraniaceae	ژرانیوم	Geo	IT	پهن‌برگ علفی	7
Geranium sp.	Geraniaceae	سوزن چوپان	Hem	ES	پهن‌برگ علفی	18
Hypericum androsaemum L.	Hypericaceae	متامتی	Cha	ES	پهن‌برگ علفی	44
Luzula pilosa (smith)DC.	Juncaceae	سازوی جنگلی	Geo	ES, M	گراس	43
Urtica dioica	Lamiaceae	گزنه	Geo	ES, M	پهن‌برگ علفی	42
Lamium album L.	Lamiaceae	گزنه سفید	Geo	ES, M	پهن‌برگ علفی	376
Lamium amplexicaule L.	Labiatate	گزنهٔ سفید ساقه‌آغوش	Geo	ES, M	پهن‌برگ علفی	9
Lapsana communis	Asteraceae	گل خورشیدی	Th	ES, IT	پهن‌برگ علفی	25
Lathyrus sativus L.	Fabaceae	خلر	Th	IT-ES	پهن‌برگ علفی	1
Menta aquatic L.	Lamiaceae	پونه آبی سوسبز	Hem	IT	پهن‌برگ علفی	36
Mentha sp.	Lamiaceae	پونه جنگلی	Hem	IT	پهن‌برگ علفی	93
Mentha piperita	Lamiaceae	نعناع فلفلی	Hem	ES, IT, M	پهن‌برگ علفی	262
Mercurialis perennis L.	Euphorbiaceae	علف جیوه	Geo	ES, M	پهن‌برگ علفی	19
Oplismenus undilatifolius L.	Poaceae	ملف	He	Es, M	پهن‌برگ	2001
Oplismenus undulatifolius **(**Ard**)**	Poaceae	ارزن جنگلی	Hem	ES, M	گراس	36
Poa sp.	Poaceae	گرامینه	Th	ES, IT	گراس	269
Potentilla reptans L.	Rosaceae	پنجه برگ	Hem	ES, IT	پهن برگ علفی	46
Prunella vulgaris L.	Lamiaceae	نعناع چمنی	Hem	ES, IT, M	پهن برگ علفی	199
Rubus hyrcanus Juz.	Rosaceae	تمشک خزری	Ph	ES	پهن برگ علفی	52
Rumex acetosella L.	Polygonaceae	ترشک	He	PL	پهن‌برگ علفی	23
Sambucus ebulus L.	Caprifuliaceae	آقطی	Geo	ES, IT, M	پهن‌برگ علفی	9
Sanicula europaea L.	Apiaceae	چوبلمه	Hem	PL	پهن‌برگ علفی	69
Scutellaria tournefortii Beneth.	Lamiaceae	بشقابی جنگلی	Th	IT	پهن‌برگ علفی	27
Solanum kieseritzkii C.A. Mey.	Solanaceae	تاجریزی جنگلی	Cha	ES	پهن‌برگ علفی	41
Viola odorata L.	Violaceae	بنفشهٔ جنگلی	Hem	ES–M	پهن‌برگ علفی	186
Viola alba Bess.	Violaceae	بنفشهٔ سفید	Hem	ES	پهن‌برگ علفی	1312

در همهٔ ۱۰ گونهٔ پرتعداد، فراوانی گیاهان علفی مشاهده شده در پلات‌های شاهد کمتر از پلات‌های مسیرهای چوبکشی بود به‌جز بنفشهٔ معطر (*Viola odorata* L.). البته این روند در ۳۸ گونهٔ علفی به‌همین ترتیب بود، ولی در سه گیاه علفی آسپرولا (۷۰/۰ درصد)، ترشک (۹۵/۶۵ درصد) و آقطی (۷۷/۷۸ درصد)، تعداد گیاهان در مناطق شاهد بیشتر از مسیرهای چوبکشی بود.



شکل ۱- تفاوت میانگین تعداد گیاهان علفی مسیرهای چوبکشی با مناطق شاهد به تفکیک گونه‌های علفی (۱۰ گونهٔ پر تعداد)

Figure 1. Differences in mean herbaceous plant abundance between skid trails and control areas, categorized by species (10 most abundant herbaceous species)

جدول ٦- تجزیه واریانس اثر شدت تردد و سن و اثر متقابل آنها بر تراکم گونه‌های علفی

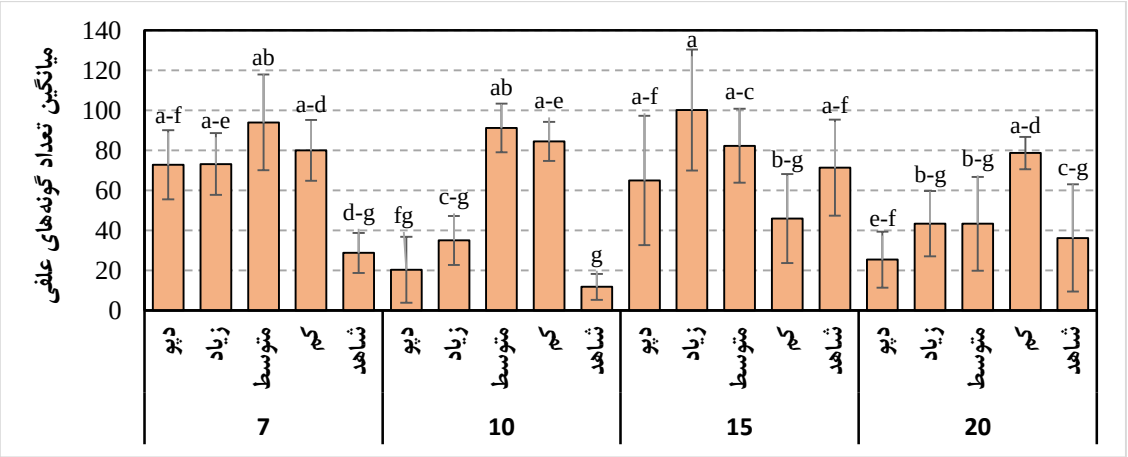
Table 6. Analysis of variance for the effects of traffic intensity, time since harvest, and their interaction on herbaceous species density

منبع	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	*P*
شدت تردد	7	41515.826	9.381	<0.00 **
سن بهره‌برداری	3	26072.5	13.747	<0.00 **
اثر متقابل شدت تردد و سن بهره‌برداری	21	57309.979	4.317	<0.00 **

** نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح احتمال ۹۹ درصد است.

در بازهٔ زمانی ۷ سال میانگین تعداد گیاهان علفی در محل دپو ۷۲/۸۳ و در شدت تردد زیاد ۷۳/۱۷، متوسط ۹۴ و کم ۸۰ در مقابل منطقهٔ شاهد با میانگین ۲۸/۷۵ قطعه گیاه علفی بود که از منطقهٔ شاهد بیشتر بوده و افزایش در بازهٔ زمانی ۱۰ سال در منطقهٔ شاهد به‌طور میانگین تعداد ۱۱/۷۵ گیاه علفی شمارش شده و در محل دپو و مسیر با شدت تردد زیاد با تعداد ۲۰/۳۳ و ۳۵ گیاه مشاهده شد که نشان از تأثیر تردد زیاد در عملیات چوبکشی بر فراوانی گونه‌های علفی دارد، ولی در سطوح تردد کم و متوسط با تعداد ۹۱/۱۷ و ۸۴/۵۰ روند افزایشی فراوانی گیاهان علفی به‌وضوح قابل رویت می‌باشد. در سن بهره‌برداری ۱۵ سال یک الگوی متفاوت مشاهده می‌شود. در مناطق با تردد زیاد بالاترین تعداد گیاهان علفی در بین تمام تیمارها و زمان‌ها مشاهده شد (۱۰۰/۱۷). البته در این پارسل در منطقهٔ شاهد نیز بالاترین تعداد گیاهان علفی در بین تمام مناطق شاهد مورد مطالعه شمارش شد (۷۱/۴۲).

در سن بهره‌برداری ۲۰ سال، با توجه به بسته شدن نسبی تاج‌پوشش و پایداری محیط، با کاهش نسبی گیاهان علفی نسبت به پارسل‌های دیگر شده است. در این پارسل میانگین تعداد گیاهان علفی در هر کورادرات ۴۷/۶۷ بود. در حالی‌که در پارسل‌های با سن بهره‌برداری ۷، ۱۰و ۱۵ سال به‌ترتیب ۸۰، ۵۷/۷۵ و ۷۳/۳۳ قطعه گیاه علفی بوده است. در خصوص شدت تردد نیز در منطقهٔ شاهد میانگین تعداد گیاهان ۳۷/۰۲ بود درحالی‌که در محل‌های دپو، شدت تردد زیاد، متوسط و کم به‌ترتیب ۴۵/۸۷، ۶۲/۹۲، ۷۷/۷۱ و ۶۲/۵ بوده است که بررسی داده‌ها حاکی از آن است که مسیرهای با شدت تردد متوسط بیشترین تعداد گیاهان علفی را پس از عملیات چوبکشی در خود جای داده‌اند (شکل ۲).



شکل۲- مقایسهٔ میانگین و انحراف معیار (بازهٔ نشان داده شده) تعداد گونه‌های علفی در سنین و شدت‌های مختلف تردد. حروف ناهمنام بیانگر معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است.

Figure 2. Comparison of mean and standard deviation (error bars shown) of herbaceous species richness across different ages and traffic intensities. Different letters indicate significant differences between means at the 95% probability level.

شاخص‌های تنوع زیستی: چهار سنجهٔ تنوع زیستی سیمپسون، شانون–وینر، یکنواختی (اکویتابیلی) و مارگالف مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت. در نتایج حاصل از سنجه‌های سیمپسون، مناطق شاهد با ۰/۸۱ دارای بیشترین تنوع بودند، با توجه به قرار گرفتن در بین عدد ۰/۹–۰/۷ از نظر شاخص سیمپسون، نشان از تنوع بالای زیستی دارد. در مسیرهای چوبکشی دپو، شدت تردد زیاد، متوسط و کم نیز میانگین ارقام به‌دست آمده عبارت بود از ۰/۷۴، ۰/۷۶، ۰/۷۵ و ۰/۷۷ که همگی در بین ۰/۹ –۰/۷ قرار گرفته است. کمترین مقدار این شاخص در دپو سن ۱۵ سال و بیشترین رقم آن در شدت تردد کم سن ۱۵ سال و شدت تردد متوسط ۲۰ سال مشاهده شد (۰/۸۷ و ۰/۸۱). البته با افزایش سن بهره‌برداری در پارسل با سن ۲۰ سال، کلیهٔ مسیرهای چوبکشی دارای ارقام بالاتر از منطقهٔ شاهد بودند و در کل ۵/۱۲ درصد بالاتر از منطقهٔ شاهد گزارش شده است.

در خصوص سنجهٔ شانون–وینر نتایج به‌دست آمده نشان داد که تمام ارقام حاصل از سنجهٔ شانون–وینر بین دو عدد ۲/۴۴–۱/۵۵ قرار دارد. در مسیرهای چوبکشی میانگین این شاخص عدد ۱/۹۳ را نشان می‌دهد. این کاهش رقم سنجهٔ شانون–وینر می‌تواند ناشی از تغییرات فاکتورهای محیطی و غلبهٔ سه گونهٔ پرتعداد علفی نورپسند ملف، فرفیون و بنفشهٔ سفید و کاهش گونه‌های سایه‌پسند ترشک و آسپرولا باشد، که نشان‌دهندهٔ تنوع متوسط بوده و در مناطق شاهد میانگین ۲/۰۱ است (۲/۱۹، ۲/۱۵، ۱/۸۳ و ۱/۸۶) که در کل نسبت به مسیرهای چوبکشی تغییر چندانی را نشان نمی‌دهد. بالاترین عدد به‌دست آمده از شدت تردد کم سن بهره‌برداری ۱۵ سال و کمترین آن در محل دپو همین پارسل ۱/۵ گزارش شده است. در سن بهره‌برداری ۲۰ سال با عدد ۲/۱۳ نسبت به پارسل با سن ۷ سال با رقم ۱/۷۲ عدد این شاخص ۲۳/۸۷ رشد داشته که از میانگین کل منطقهٔ شاهد و همچنین منطقهٔ شاهد همین پارسل پیشی گرفته است. مقایسهٔ وضعیت پس از ۲۰ سال با سنین پایین‌تر بهره‌برداری به‌وضوح نشان‌دهندهٔ پویایی و فرآیند بازیابی است. البته افزایش عددی شانون–وینر در مسیرهای چوبکشی، لزوماً نشانهٔ بهبود نیست و ممکن است نشان‌دهندهٔ تهاجم گونه‌های علفی، جایگزینی گونه‌های بومی با گونه‌های کم ارزش و یا تخریب ساختار طبیعی جنگل باشد. بنابراین به‌نظر می‌رسد افزایش تنوع در اینجا نشانهٔ تخریب است نه بهبود.

در این تحقیق شاخص یکنواختی (اکویتابیلیتی) نیز مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت که نتایج آن نشان داد در مسیرهای چوبکشی، گیاهان با قرار گرفتن بین دو عدد ۰/۹۷–۰/۶۵ از توزیع به‌نسبت متوازن تا متوازن برخوردار هستند. در منطقهٔ شاهد این شاخص دارای میانگین ۰/۸۷ است که نشان‌دهندهٔ توزیع متوازن گونه‌ها بوده و حتی در قطعه‌نمونه‌های شاهد این میانگین به ۰/۹۸ رسیده که نشان‌دهندهٔ توزیع کاملاً یکنواخت گونه‌های علفی است. ولی در سطوح تردد شدید (دپو و شدت زیاد) در سنین مختلف بهره‌برداری این اعداد به‌طور نامتوازنی تغییر نموده‌اند، به‌طوری‌که در دپو ۷ سال ۰/۶۹، ولی این رقم در دپو ۱۰ سال ۰/۹۷ (بهترین حالت یکنواختی) را نشان می‌دهد و دوباره این عدد در ۱۵ سال به ۰/۶۷ کاهش و در ۲۰ سال به ۰/۸۹ افزایش یافته است. در

تمامی مسیرهای چوبکشی پارسل با سن بهره‌برداری ۷ سال کاهش معنی‌دار در یکنواختی مشاهده شده است. نتایج به‌دست آمده از تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها و ارقام به‌دست آمده از سنجهٔ مارگالف حاکی از تأثیر سن چوبکشی و اثر متقابل سن و شدت تردد بر یکدیگر بر شاخص تنوع گونه‌ای مارگالف در جوامع گیاهی کف جنگل است. در سن بهره‌برداری ۷ سال و در شدیدترین آشفتگی‌ها که در محل دپو و تردد زیاد بوده، کمترین مقدار شاخص مارگالف به‌دست آمد. در شدت تردد متوسط نتایج، در نزدیکترین حالت به منطقهٔ شاهد بود و بعد از آن شدت تردد کم قرار داشت، ولی با منطقهٔ شاهد دارای تفاوت معنی‌داری نبود. در سن بهره‌برداری ۱۰ سال تمام شدت‌های مختلف تردد با منطقهٔ شاهد در یک گروه آماری قرار داشت و هیچ یک از نتایج با منطقهٔ شاهد اختلاف معنی‌داری نداشتند. در پارسل ۲۲۱ (سن بهره‌برداری ۱۵ سال) و در شدت تردد کم، به‌طور معنی‌داری بالاترین رقم شاخص مارگالف به‌دست آمد. در سن بهره‌برداری ۲۰ سال مقادیر به‌دست آمده شاخص مارگالف، در دپو ۲/۹۵، شدت تردد زیاد ۲/۷۴، متوسط ۳/۴۳ و کم ۳/۲۳ در مقابل منطقهٔ شاهد با ۲/۴۷ قرار داشت که با مناطق شاهد اختلاف معنی‌داری داشت.

جدول ۷- تغییرات شاخص‌های تنوع زیستی (سیمپسون، شانون-وینر، یکنواختی و مارگالف) در سنین و شدت‌های مختلف تردد (میانگین ± انحراف معیار) *

Table 7. Changes in biodiversity indices (Simpson, Shannon-Wiener, Evenness, and Margalef) across different ages and traffic intensities (mean ± standard deviation) *

سن	شدت تردد	سیمپسون	شانون- وینر	یکنواختی (اکویتابیلیتی)	مارگالف
	دپو	0.68 ± 0.09 abc	1.63 ± 0.20 c	0.69 ± 0.07 cdef	2.27 ± 0.43 b
	شدت تردد زیاد	0.67 ± 0.11 bc	1.64 ± 0.26 c	0.66 ± 0.09 ef	2.53 ± 0.20 b
7	شدت تردد متوسط	0.70 ± 0.15 abc	1.82 ± 0.48 abc	0.67 ± 0.11 ef	3.15 ± 1.10 ab
	شدت تردد کم	0.71 ± 0.10 abc	1.78 ± 0.32 abc	0.68 ± 0.08 cdef	2.84 ± 0.57 ab
	شاهد	0.85 ± 0.08 ab	2.19 ± 0.37 abc	0.92 ± 0.13 ab	3.00 ± 0.80 ab
	دپو	0.85 ± 0.06 ab	2.08 ± 0.27 abc	0.97 ± 0.10 a	2.62 ± 0.64 ab
	شدت تردد زیاد	0.85 ± 0.05 ab	2.30 ± 0.28 ab	0.90 ± 0.09 abc	3.28 ± 0.66 ab
10	شدت تردد متوسط	0.69 ± 0.13 abc	1.74 ± 0.33 bc	0.65 ± 0.11 f	2.98 ± 0.29 ab
	شدت تردد کم	0.70 ± 0.13 abc	1.83 ± 0.34 abc	0.68 ± 0.11 cdef	3.04 ± 0.49 ab
	شاهد	0.87 ± 0.04 ab	2.15 ± 0.30 abc	0.98 ± 0.06 a	2.77 ± 0.66 ab
	دپو	0.63 ± 0.11 c	1.55 ± 0.33 c	0.67 ± 0.11 def	2.25 ± 0.54 b
	شدت تردد زیاد	0.74 ± 0.06 abc	1.77 ± 0.27 bc	0.69 ± 0.08 cdef	2.65 ± 0.55 ab
15	شدت تردد متوسط	0.74 ± 0.12 abc	1.83 ± 0.32 abc	0.72 ± 0.09 bcdef	2.62 ± 0.59 ab
	شدت تردد کم	0.87 ± 0.03 a	2.44 ± 0.13 a	0.87 ± 0.06 abcde	3.79 ± 0.39 a
	شاهد	0.75 ± 0.18 abc	1.83 ± 0.46 abc	0.77 ± 0.18 abcdef	2.40 ± 0.62 b
	دپو	0.81 ± 0.15 abc	2.10 ± 0.48 abc	0.89 ± 0.20 abc	2.95 ± 0.58 ab
	شدت تردد زیاد	0.79 ± 0.07 abc	1.96 ± 0.29 abc	0.81 ± 0.10 abcdef	2.74 ± 0.67 ab
20	شدت تردد متوسط	0.87 ± 0.04 ab	2.34 ± 0.23 ab	0.89 ± 0.08 abcd	3.43 ± 0.54 ab
	شدت تردد کم	0.81 ± 0.05 abc	2.11 ± 0.24 abc	0.78 ± 0.06 abcdef	3.23 ± 0.66 ab
	شاهد	0.78 ± 0.08 abc	1.86 ± 0.29 abc	0.82 ± 0.12 abcdef	2.47 ± 0.68 b

* **حروف ناهمنام بیانگر معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است.**

بحث

یافته‌های این پژوهش تأیید می‌کند که تردد ماشین‌های چوبکشی به‌طور معنی‌داری باعث افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک شده و حتی پس از ۲۰ سال هنوز بین مناطق شاهد و مسیرهای چوبکشی اختلاف معنی‌داری وجود دارد و سایر فاکتورهای فشردگی خاک مانند تخلخل خاک و مقاومت به نفوذ نیز به‌شدت تحت تأثیر عملیات چوبکشی قرار داشته‌اند. با توجه به کاهش تخلخل خاک در مسیرهای چوبکشی مقاومت به نفوذ در این مسیرها به‌صورت معنی‌دار و چشمگیری افزایش یافته است. مقاومت به نفوذ

در محل دپو سن بهره‌برداری ۲۰ سال هنوز ۷۴/۲ درصد با منطقهٔ شاهد اختلاف دارد، که نشان‌دهندهٔ فشردگی قابل توجه خاک در این مناطق است. نتایج این پژوهش با نتایج مطالعات قبلی در جنگل‌های هیرکانی (Ezzati *et al*., 2011; Mohammadi *et al*., 2012) و سایر نقاط جهان (Ampoorter *et al*., 2011; Labelle *et al*., 2022) همسو است. تداوم آثار کوبیدگی خاک حتی پس از ۲۰ سال در شدت‌های بالای تردد، نشان‌دهندهٔ ماندگاری و بازیابی بسیار کند این نوع آشفتگی در اکوسیستم‌های جنگلی است. این موضوع با یافته‌های Rab (۲۰۰۴) و DeArmond و همکاران (۲۰۲۳) که بازیابی خاک فشرده را فرآیندی بسیار طولانی‌مدت می‌دانند، مطابقت دارد.

تخریب لاشبرگ به‌عنوان یکی دیگر از پیامدهای مستقیم تردد ماشین‌های چوبکشی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لاشبرگ نه تنها به‌عنوان منبع مواد آلی و مغذی برای خاک عمل می‌کند، بلکه نقش مهمی در حفظ رطوبت خاک، جلوگیری از فرسایش و ایجاد بستر مناسب برای جوانه‌زنی بذر ایفا می‌نماید (Sohrabi and Jourgholami, 2022). کاهش عمق و کیفیت لاشبرگ در مسیرهای چوبکشی، این کارکردهای حیاتی را مختل کرده و شرایط نامناسبی برای استقرار و رشد گیاهان ایجاد می‌کند (Mayer *et al*., 2020). به‌طوری‌که عمق لاشبرگ در مسیرهای چوبکشی نسبت به مناطق شاهد ۵۰ درصد کاهش یافته و این کاهش ناشی از دو فرآیند خردشدگی و فشرده شدن مستقیم است. این پدیده در دپوها و شدت تردد زیاد بیشتر بوده است و به‌همین ترتیب کربن لاشبرگ ۳۵/۴۵ درصد در مسیرهای چوبکشی نسبت به مناطق شاهد کاهش یافته است. این کاهش در کربن لاشبرگ یکی از نشانه‌های کاهش کیفیت لاشبرگ بوده و در بلندمدت به کاهش کربن خاک نیز منجر خواهد شد.

نیتروژن لاشبرگ در مسیرهای دپو و شدت تردد زیاد ۱۰/۲۳ درصد بوده که نشان‌دهندهٔ روند شدید کاهشی می‌باشد ولی در شدت‌های تردد کم، به سطح مناطق شاهد رسیده است که نشان از تأثیر شدت تردد بر کاهش نیتروژن لاشبرگ دارد و C/N لاشبرگ نیز در مسیرهای چوبکشی نسبت به مناطق شاهد کاهش یافته است. علت آن می‌تواند ناشی از تسریع در تجزیه‌پذیری و تغییر در ترکیب شیمیایی لاشبرگ باشد. کاهش نیتروژن و افزایش نسبت C/N دارای اثرات منفی برای سهولت دسترسی سریع‌تر گیاهان علفی تند رشد به نیتروژن معدنی است (Keyser *et al*., 1978; Zenner and Berger, 2008; Berg and McClorty, 2017).

تغییر ترکیب گونه‌ای و ساختار جامعهٔ علفی در مسیرهای چوبکشی، بازتاب مستقیم تغییرات ایجاد شده در فاکتورهای محیطی است. سلطهٔ گونه‌های نورپسند (Baeten *et al*., 2009) مانند ملف و فرفیون در مسیرهای چوبکشی، حاکی از ایجاد شرایط محیطی کاملاً متفاوت نسبت به مناطق دست‌نخورده است. این یافته با نتایج مطالعات Wei و همکاران (۲۰۱۶) و Zenner و Berger (۲۰۰۸) که افزایش گونه‌های مهاجم و نورپسند *Phleum pretense* L.، *Trifolium* spp. L (شبدر) و *Cirsium arvense* Scop. را در مسیرهای چوبکشی گزارش کرده‌اند، همخوانی دارد. افزایش تراکم گیاهان علفی در مسیرهای چوبکشی، به‌ویژه در دپوها، ممکن است در نگاه اول نشانه‌ای از بازیابی سریع پوشش گیاهی تفسیر شود. اما تحلیل دقیق‌تر شاخص‌های تنوع زیستی، تصویر واقعی‌تری ارائه می‌دهد. کاهش ارقام به‌دست آمده از شاخص‌های شانون و سیمپسون و افزایش این ارقام در شاخص غلبهٔ سیمپسون در شدت‌های بالای تردد، نشان می‌دهند که افزایش تراکم، ناشی از سلطهٔ تعداد محدودی از گونه‌های رقابت‌کننده مانند ملف، فرفیون و بنفشه است و ارتباطی با افزایش تنوع گونه‌ای ندارد. این موضوع اهمیت استفاده از چندین شاخص تنوع زیستی برای ارزیابی دقیق‌تر تغییرات پوشش گیاهی را نشان می‌دهد.

به‌همین منظور از چهار سنجهٔ تنوع زیستی سیمپسون، شانون–وینر، یکنواختی (اکویتابیلیتی) و مارگالف برای بررسی روند تغییرات تنوع، غنا و یکنواختی استفاده شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد سن بهره‌برداری، شدت تردد و اثرمتقابل این دو عامل بر شاخص‌های تنوع زیستی مورد استفاده در سطح معنی‌داری یک درصد مؤثر بوده است. در سنجهٔ سیمپسون کلیهٔ مسیرهای چوبکشی در پارسل با سن ۷ سال در مقایسه با مناطق شاهد ۱۸/۸۲ درصد کاهش را نشان داده‌اند و این روند کاهشی در بازهٔ ۱۰ سال ۲۰/۱۱ درصد ادامه داشته است و در سن بهره‌برداری ۱۵ سال با افزایش تنوع ۱۳/۹۷ درصد نسبت به منطقهٔ شاهد رشد را نشان می‌دهد و این روند در پارسل با سن بهره‌برداری ۲۰ سال در مقایسه با منطقهٔ شاهد ۵/۱۳ درصد رشد را نشان می‌دهد. این بهبود بلندمدت احتمالاً تأثیر بازگشت تدریجی مشخصه‌های فیزیکی خاک، لاشبرگ و نور به شرایط نزدیک به عرصه‌های دست‌نخورده باشد.

نتایج به‌دست آمده از سنجهٔ شانون–وینر نیز نشان داد در سال‌های ابتدایی پس از عملیات چوبکشی و در شدت‌های بالای تردد مقادیر این شاخص با کاهش نسبی روبه‌رو بوده ولی بعد از گذشت ۲۰ سال با افزایش ۲۳/۸۷ درصدی به‌سمت همگرایی بیشتر رفته است. حتی در پارسل با سن ۲۰ سال نتایج هیچ تیماری به‌طور معنی‌دار از منطقهٔ شاهد کمتر نبوده و همهٔ مقادیر به‌دست آمده بالاتر از منطقهٔ شاهد قرار داشتند و در یک گروه آماری قرار گرفته‌اند که با نتایج Deljoui و همکاران (۲۰۱۷) و Zenner و Berger (۲۰۰۸) مطابقت دارد.

در خصوص سنجهٔ یکنواختی نیز آشفتگی شدید مسیر دپو و تردد زیاد در سن ۷ و ۱۵ سال به‌وضوح قابل رویت بود. ولی بعد از گذشت ۲۰ سال و با میانگین ۰/۸۴ نسبت به مسیرهای با سن بهره‌برداری ۷ سال ۲۴/۸۱ درصد رشد را نشان می‌دهد که نشان از توزیع متوازن پوشش علفی به‌صورت ظاهری دارد. ولی با جمع‌بندی نتایج به‌دست آمده از مشخصه‌های فیزیکی خاک و فشردگی خاک مسیرهای چوبکشی و تغییرات نور و تغییرات لاشبرگ (عمق و عناصر شیمیایی) و همچنین بررسی تغییرات پوشش علفی بین مسیرهای چوبکشی و مناطق دست‌نخوردهٔ شاهد، به‌وضوح می‌توان دریافت که پوشش علفی به‌شدت تحت تأثیر عوامل و تغییرات محیطی بوده، قرار داشته و فلور این مسیرها در مقایسه با مناطق شاهد از نظر تعداد و تنوع گیاهی، تغییرات عمده‌ای داشته است. مسیرهای چوبکشی عملاً به‌سمت علفی شدن و افزایش تعداد و کاهش تنوع پیش رفته و سه گونهٔ فرفیون، ملف و بنفشهٔ سفید، گونهٔ غالب در این مسیرها شده‌اند و گونه‌هایی مانند آسپرولا و سانی‌کولا در مناطق شاهد وجود داشتند، عملاً کاهش شدید در مسیرهای چوبکشی روبه‌رو بوده‌اند که با نتایج تحقیقات Depauw و همکاران (۲۰۱۹)، Zhang و همکاران (۲۰۱۲) و Hofmeister و همکاران (۲۰۰۹) همخوانی دارد.

کاهش خطی و معنی‌دار شاخص یکنواختی با افزایش شدت تردد، این شاخص را به‌عنوان یک نشانگر زیستی حساس برای پایش شدت آشفتگی‌های ناشی از بهره‌برداری معرفی می‌کند. برخلاف شاخص غنای گونه‌ای که ممکن است در سطوح متوسط آشفتگی افزایش یابد، شاخص یکنواختی به‌طور مستمر و قابل پیش‌بینی با افزایش فشار و آشفتگی کاهش می‌یابد، ولی در پارسل با سن بهره‌برداری ۲۰ سال با افزایش آن روبه‌رو بوده‌ایم. این ویژگی، شاخص یکنواختی را به ابزاری ارزشمند برای مدیران جنگل تبدیل می‌کند تا بتوانند شدت آشفتگی و روند بازیابی اکوسیستم را پایش کنند (Zare *et al.*, 2011; Deljouei *et al.*, 2017).

سن بهره‌برداری و اثر متقابل سن و شدت تردد بر غنای گونهٔ گیاهی و نتایج سنجهٔ مارگالف مؤثر بوده، ولی شدت تردد به تنهایی اثر معنی‌داری بر نتایج این سنجه نداشته است. بازیابی غنای گونه‌ای فرآیندی پیچیده و وابسته به شدت آشفتگی و زمان است و سطوح پایین‌تر تردد می‌توانند در بازه‌های زمانی مشخص (حدود ۱۰ تا ۲۰ سال) حتی منجر به غنای گونه‌ای زیاد و بالاتر از جنگل دست‌نخورده مجاور می‌شود. در مجموع دپو و شدت تردد زیاد کمترین غنای گونه‌ای و تردد متوسط و کم بالاترین عدد را با توجه به نتایج سنجهٔ مارگالف داشته‌اند. بین مسیرهای کم تردد و با تردد شدید ۳۶/۵۲ درصد اختلاف مشاهده شد، که وضعیت بهتری نسبت به مناطق شاهد (۲/۶۶) داشته‌اند. بهترین حالت تحت آزمون مارگالف در مسیرهای با شدت تردد کم ۱۵ سال و متوسط در سن ۲۰ سال مشاهده شد. نکتهٔ قابل توجه در افزایش رقم شاخص مارگالف در مسیرهای چوبکشی نسبت به مناطق شاهد این است که گونه‌های جدید وارد این مسیرها شده‌اند و جای خالی گونه‌های حذف شده را از نظر شمارش پر کرده‌اند و برخلاف چشم‌انداز اولیه، مواجهه با این ارقام بالاتر باید گفت که این افزایش عددی یک هشدار اکولوژیک در خود دارد. نتایج این پژوهش با یافته‌های Wei و همکاران (۲۰۱۶) و Buckley و همکاران (۲۰۰۳) و Deljouei و همکاران (۲۰۱۷) همسویی دارد.

یافته‌های این پژوهش می‌تواند پیام‌های مهمی برای مدیریت پایدار جنگل‌های هیرکانی داشته باشد: ۱) ضرورت کاهش فشردگی خاک در مرحلهٔ طراحی و اجرای عملیات چوبکشی را نشان می‌دهد. استفاده از ماشین‌آلات با فشار ویژهٔ کمتر، محدود کردن تردد به مسیرهای از پیش تعیین شده، و پرهیز از عملیات در زمان‌های مرطوب سال می‌تواند شدت آشفتگی اولیه را کاهش دهد (Jourgholami, Majnounian, 2010; Picchio *et al.*, 2019). ۲) در مناطقی که آشفتگی شدید رخ داده (مانند دپوها)، انتظار برای بازیابی طبیعی ممکن است بسیار طولانی باشد. در چنین مواردی، مداخلات مدیریتی فعال مانند ایجاد پوشش سطحی با مالچ طبیعی و بذرپاشی کاشت گونه‌های پیشگام بومی می‌تواند روند بازیابی خاک و پوشش گیاهی کف جنگل را تسریع بخشد (Tavnkar *et al.*, 2009; Latterini *et al.*, 2023). ۳) پایش منظم پوشش گیاهی علفی و شاخص‌های تنوع زیستی به‌ویژه

شاخص یکنواختی، می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای ارزیابی سلامت اکوسیستم و اثربخشی اقدامات مدیریتی مورد استفاده قرار گیرد. این اختلاف نشان از آشفتگی شدید در ساختار جوامع گیاهی در سال‌های پس از عملیات چوبکشی دارد ولی در سن بهره‌برداری ۲۰ سال نتایج به‌دست آمده در تمام تیمارها، به منطقهٔ شاهد نزدیک یا حتی از آن عبور کرده‌اند که نشان‌دهندهٔ بهبود ظاهری و بازیابی پوشش علفی این مسیرها در مقایسه با منطقهٔ شاهد است. ولی با مراجعه به جدول فلورستیک و پراکندگی حضور گونه‌های علفی در این مناطق، مشخص شد، در فراوانی گونه‌ها تغییرات زیادی صورت گرفته و گونه‌هایی که در مناطق شاهد به‌نسبت غالب‌تر بوده‌اند، جای خود را در مسیرهای چوبکشی به گونه‌های نورپسند و تند رشد (مانند ملف، فرفیون، بنفشهٔ سفید، گزنهٔ سفید، گرامینه، نعناع فلفلی، چمن جاروی جنگلی، نعناع چمنی، بنفشهٔ معطر و ترتیزک باتلاقی) داده‌اند و عملاً بالاتر بودن عدد یکنواختی، نشان‌دهندهٔ تغییرات اساسی در فلور جنگل و در نتیجه تخریب ساختار طبیعی و اکولوژیک جنگل بوده و دلیل آن افزایش مقدار این شاخص در مسیرهای با شدیدترین درجات تخریب است.

نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده از این پژوهش نشان داد کوبیدگی خاک ناشی از عملیات چوبکشی، تأثیر معنی‌دار و پایداری بر پوشش گیاهی علفی کف جنگل‌های هیرکانی دارد. تغییرات فیزیکی خاک و تخریب لاشبرگ، همراه با افزایش نور دریافتی، منجر به جابجایی اکولوژیک از جامعه‌ای متنوع و پایدار این جنگل‌ها، که متشکل از گونه‌های بومی سایه‌پسند است، به جامعه‌ای با سلطهٔ گونه‌های مهاجم و نورپسند تبدیل می‌کند. به‌نظر می‌رسد با کاهش شدت تردد و انجام تمهیدات مدیریتی مانند کاستن از طول و عرض مسیرهای چوبکشی، استفاده از اسکیدرهای سبک‌تر، طراحی دقیق مسیرهای چوبکشی، مالچ پاشی و ریختن مقطوعات و چوب روی مسیرها در زمان چوبکشی می‌توان از ایجاد صدمات بیشتر و پوشش گیاهی کف جنگل و تغییرات آن تا حدودی جلوگیری به‌عمل آورد. برای مدیریت پایدار جنگل‌های هیرکانی، ضروری است که راهبردهای کاهش فشردگی خاک در مرحلهٔ طراحی و اجرای عملیات چوبکشی به‌کار گرفته شود و در مناطقی که آشفتگی شدید رخ داده، مداخلات فعال مدیریتی برای تسریع بازیابی اکوسیستم انجام پذیرد. پایش منظم پوشش گیاهی علفی و شاخص‌های تنوع زیستی نیز باید به‌عنوان بخشی از برنامهٔ مدیریتی جنگل در نظر گرفته شود.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

مقالهٔ حاضر با حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه تهران انجام شد.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان به‌طور مساوی در کلیهٔ مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان (نویسنده مسئول) قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به‌خاطر ارائهٔ نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

References

Alef, K., Nannipieri, P., 1995. Methods in applied soil microbiology and biochemistry. Academic Press, London. 304 p.

Amiri Dado-Kalaei, M., Akbari, H., Lotfalian, M., Asadian, M., 2025. Assessment of the Recovery of Soil Physical Properties and Ground Vegetation Diversity in Abandoned Skid Trails (Case Study:

Hezarjarib Forests-Neka Province). Journal of Wood and Forest Science and Technology 31(4), 21-41. (In Persian)

Ampoorter, E., Goris, R., Cornelis, W.M., Verheyen, K., 2007. Impact of mechanized logging on compaction status of sandy forest soils. Forest Ecology and Management 241(1-3), 162-174.

Baeten, L., Bauwens, B., De Schrijver, A., De Keersmaeker, L., Van Calster, H., Vandekerkhove, K., Roelandt, B., Beeckman, H., Verheyen, K., 2009. Herb layer changes (1954–2000) related to the conversion of coppice-withstandards forest and soil acidification. Applied Vegetation Science 12, 187-197.

Bartemucci, P., Messier, C., Canham, C.D., 2006. Overstory influences on light attenuation patterns and understory plant community diversity and composition in southernboreal forests of Quebec. Canadian Journal of Forest Research 36, 2065-2079.

Berg, B., McClorty, C., 2017. Litter: decomposition, humus formation, carbon sequestration, Tehran University Press, 418 p.

Borchsenius, F., Nielsen, P.K., Lawesson, J.E., 2004. Vegetation structure and diversity of an ancient temperate deciduous forest in SW Denmark. Plant Ecology 175, 121-135.

Collins, B.S., Dunne, K.P., Pickett, S.T.A., 1985. Responses of forest herbs to canopy gaps. In: Pickett STA (ed) The ecology of natural disturbance and patch dynamics. Academic Press Inc., London, pp. 218-234.

DeArmond, D., Baptista Silva Ferraz, J., Rodrigues de Oliveira, L., Nogueira Lima, A.J., Souza Falcão. N.P., Higuchi, N., 2023. Soil compaction in skid trails still affects topsoil recovery 28 years after logging in Central Amazonia. Geoderma 434, 116473.

Deljouei, A., Abdi, E. Majnounian, B., 2018. Effect of forest roads on variability of soil fertility parameters (case study: Kheyroud Forest, Nowshahr). Iranian Journal of Forest 9(4), 445-456. (In Persian)

Depauw, L., Perring, M.P., Landuy, D., Maes, S.L., Blondeel, H., De Lombaerde, E., Brūmeli,G., Brunet, J., Closset-Kopp, D., Czerepko, J., Decocq, G., Ouden, J., Gawrys, R., Härdtle, W., Hédl,R., Heinken, T., Heinrichs, S., Jaroszewicz, B., Kopecký, M., Liepiņa, I., Macek, M., Máliš, F., Schmidt, W., Smart, S.M, Ujházy, K., Wulf, M., Verheyen, K., 2019. Light availability and land-use history drive biodiversity and functional changes in forest herb layer communities. Journal of Ecology 108, 1411-1425.

Elemans, M., 2004. Light, nutrients and the growth of herbaceous forest species. Acta Oecologica-international Journal of Ecology 26, 197-202.

Ezzati, S., Najafi, A., 2011. Effects of 20 years of land logging on physical and hydrological properties of soil (Case study: forests of the Neka-Zalemroud basin in eastern Mazandaran). Journal of Agricultural Sciences and Technologies and Natural Resources, Water and Soil Sciences 16(61), 272-261. (In Persian)

Godefroid, S., Koedam, N., 2004. The impact of forest paths upon adjacent vegetation: effects of the path surfacing material on the species composition and soil compaction. Biological Conservation 119, 405-419.

Gonzalez, M., Deconchat, M., Balent, G., 2009. Woody plant composition of forest layers: the importance of environmental conditions and spatial configuration. Plant Ecology 201, 305-318.

Greacen, E.L., Sands, R., 1980. Compaction of forest soils: a review. Australian Journal of Soil Research 18, 163-189.

Hagen-Thorn, A., Callesen, I., Armolaitis, K., Nihlgård, 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 (3), 373-384.

Haghverdi, K., Samadzadeh, B., Kooch, Y., 2020. The Effect of Different Forest Types on Litter Quality and Soil Enzyme Activity in the Vaz Forest of Noor-Mazandaran Province. Ecology of Iranian Forest 8(15), 72-80.

Hardtle, W., Vonoheimb, G., Westphal, C., 2003. The effects of light and soil conditions on the species richness of theground vegetation of deciduous forests in northern Germany (Schleswig-Holstein). Forest Ecology and Management 182, 327-338.

Hobbie, S.E., 2015. Plant species effects on nutrient cycling: revisiting litter feedbacks. Trends in Ecology & Evolution 30(6), 357-363.

Hofmeister, J., Hosek, J., Modry, M., Rolecek, J., 2009. The influence of light and nutrient availability on herb layer species richness in oak-dominated forests in central Bohemia, Plant Ecology 205, 57-75.

Humphrey, J.W., Davey, S., Peace, A.J., Ferris, R., Harding, K., 2002. Lichens and bryophyte communities of planted and seminatural forests in Britain: the influence of site type. stand structure and deadwood, Biological Conservation 107, 165-180.

Jackson, ML., 1962. Soil chemical analysis. London, England: Constable and Company Ltd. 210 p.

Jourgholami, M., Fathi, K., Labelle, E.R., 2020. Effects of litter and straw mulch amendments on compacted soil properties and Caucasian alder (*Alnus subcordata*) growth. New Forest 51, 349-365.

Jourgholami, M., Majnounian, B., 2010. Soil compaction and disturbance from logging with a wheeled skidder (Case study: in Kheyrud Forest). Iranian Journal of Forest 2(4), 287-298. (In Persian)

Keyser, P., Kirk, T.K., Zeikus, I.G., 1978. Ligninolytic enzyme of Phanerochaete chrysosporium: synthesized in absence of lignin in response to nitrogen starvation. Journal of Bacteriology 135, 790-797.

Kianmehr, A., Hojjati, S. M., Kooch, Y., Ghasemi Aghbash, F., 2022. Investigation of litter nutrient dynamics in pure and mixed stands of beech and hornbeam (Darabkola of Mazandaran). Iranian Journal of Forest 14(1), 89-103.

Labaz, B., Galka, B., Bogacz, A., Waroszewski, J., Kabala, C., 2014. Factors influencing humus forms and forest litter properties in the mid-mountains under temperate climate of southwestern Poland. Geoderma 230(6), 265-273.

Labelle, E.R, Hansson, L., Hgbom, L., Jourgholami, M., Laschi, A., 2022. Strategies to Mitigate the Effects of Soil Physical Disturbances Caused by Forest Machinery: A Comprehensive Review. Current Forestry Reports 8, 20-37.

Latterini, F., Dyderski, M.K., Horodecki, P., Rawlik, M., Stefanoni, W., Högbom, L., Venanzi, R., Picchio, R., Jagodziński, A.M., 2023. A meta-analysis of the effects of ground-based extraction technologies on fine roots in forest soils. Land Degradation and Development 35(1), 9-21.

Lenière, A., Houle, G., 2006. Response of herbaceous plant diversity to reduced structural diversity in maple-dominated (*Acer saccharum* Marsh.) forests managed for sap extraction. Forest Ecology and Management 231, 94-104.

Lessa Derci, A., Gutsch, M., Basile, M., Suckow, F., 2020. Socially optimal forest management and biodiversity conservation in temperate forests under climate change. Ecological Economics 169, 1-16.

Mac Lean, D.A., Wein, R.W. 1977. Changes in understory vegetation with increasing stand age in New Brunswick forests: species composition, cover, biomass, and nutrients. Canadian Journal of Botany 55, 2818-2831.

Marvie Mohadjer, M.R., 2011. Silviculture. University of Tehran Press, Tehran, 418 p. (In Persian)

Maschinski, J.T., Kolb, E., Smith, E., Phillips, B., 1997. Potential impacts of timber harvesting on a rare understory plant, Clematis hirsutissima var. arizonica, Biological Conservation 80, 49-61.

Mayer, M., Prescott, C.E., Abaker, W.E., Augusto, L., C´ecillon, L., Ferreira, G.W., James, J., Jandl, R., Katzensteiner, K., Laclau, J.P., Lagani`ere, J., 2020. Tamm review: influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: a knowledge synthesis. Forest Ecology and Management 466, 118127.

Mills, S.E., MacDonald, S.E., 2005. Factors influencing bryophyte assemblage at different scales in the Western Canadian boreal forest. Bryologist 108, 86-100.

Mohammadi, Z., Naghdi, R., Akef, M., Bagheri, E., Sayadi, A., 2012. Natural recovery assessment of some physical properties of forest soil compacted by ground-based skidding. Iranian Journal of Forest and Poplar Research 20(3), 480-472. (In Persian)

Molder, A., Bernhardt-Romermann, M., Schmidt, W., 2006. Forest ecosystem research in Hainich National Park (Thuringia): first results on flora and vegetation in stands with contrasting tree species diversity. Waldokologie 3, 83-99.

Nalbandi Qarqiyeh, Z., 2021. Ecology of Forest Soils. Iranian Agricultural Science Publication, 412 p. (In Persian)

Picchio, R., Venanzi, R., Tavankar, F., Luchenti, I., Iranparast Bodaghi, A., Latterini, F., Nikooy, M., Di Marzio, N., Naghdi, R., 2019. Changes in soil parameters of forests after windstorms and timber extraction. European Journal of Forest Research 138, 875-888.

Ponge, J.F., Jabiol, B., Gégout. J.C., 2011. Geology and climate conditions affect more humus forms than forest canopies at large scale in temperate forests. Geoderma 162(1), 187-195.

Rab, M.A., 2004. Recovery of soil physical properties from compaction and soil profile disturbance caused by logging of native forest in Victorian Central Highlands, Australia. Forest Ecology and Management 191(1), 329-340.

Reader, R.J., Bricker, B.D., 1992. Response of five deciduous forest herbs to partial canopy removal and patch size. The American Midland Naturalist 127, 149-157.

Samadzadeh, B., Kooch, Y., Hosseini. S.M., 2016. The effect of tree covers on topsoil biological indices in a plain forest ecosystem. Journal of Water and Soil Conservation 23(5), 105-121. (In Persian)

Singh, J.S., Gupta, S.R., 1977. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystem. The Botanical Review 43, 346-349.

Small, C.J., McCarthy, B.C., 2005. Relationship of understory diversity to soil nitrogen, topographic variation, and stand age in an eastern oak forest. Forest Ecology and Management 217, 229-243.

Sohrabi, H., Jourgholami, M., 2022. Humus deformation under the influence of different forest types and different years after logging operations, Iranian Journal of Forest and Poplar Research 30(2), 135-147. (In Persian)

Sohrabi, H., Jourgholami, M., Jafari, M., 2019. Evaluation of changes in physical, chemical and biological characteristics of soil 25 years after logging operations in Kheyrud forest. Forest and Wood Products, Journal of Natural Resources of Iran 73(4), 415 .(In Persian)

Swift, M., Heal, O.W., Anderson, J.M., 1979. Decompositon in terrestrial ecosystems, Blackwell, Oxford. 372 p.

Tavnkar, F., Majnounian, B., Eslam bonyad, A., 2009. Logging Damages on Forest Regeneration and Soil Compaction Using Ground-based System (Case Study: Asalem Forest Aarea, Guilan). Journal of Water and Soil Science 13(48), 449-456. (In Persian)

Tinya, F., Marialigeti, S., Kiraly, I., Nemeth, B., Odor, P., 2009. The effect of light conditions on herbs, bryophytes and seedlings of temperate mixed forests in Orseg. Western Hungary, Plant Ecology 204, 69-81.

Walkley, A., Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil science 37(1), 29-38.

Wei, L., Chen, C., Yu, S., 2015. Effects of soil compaction on forest tree growth and understory vegetation: a review. Annals of Forest Science 72(6), 771-783.

Wei, L., Chevalier, R., Archaux, F., Gosselin, F., 2015. Influence of stand attributes and skid trail area on stand-scale ground flora diversity. Canadian Journal of Forest Research 45(12), 1816-1826.

Wei, L., Hulin, F., Chevalier, R., Archaux, F., Gosselin, F., 2016. Is plant diversity on tractor trails more influenced by disturbance than by soil characteristics? Forest Ecology and Management 379, 173-184.

Weland, N., 2009. Diversity and trophic structure of the soil fauna and its influence on litter decomposition in deciduous forests with increasing tree species diversity, PhD thesis, Gottingen University, 239 p.

Whigham, D.F., 2004. Ecology of woodland herbs in temperate deciduous forests. Annual Review of Ecology Evolution and Systematics 35, 583-621.

Zare, N., Lotfalian, M., Hojjati, M., Fallah, A., 2011. Logging routes on the composition and biodiversity of tree regeneration (case study: rotational forests, Mazandaran basin and paper), Regional Conference on Forests and Environment as a Guarantee of Sustainable Development. 10 p. (In Persian)

Zenner, E.K., Berger, A.L., 2008. Influence of skidder traffic and canopy removal intensities on the ground flora in a clearcut-with-reserves northern hardwood stand in Minnesota. Forest Ecology and Management 256, 1785-1794.

Zenner, E.K., Berger, A.L., 2016. Influence of skidder traffic on soil properties and understory plant diversity in a northern hardwood forest. Northern Journal of Applied Forestry 33(3), 131-137.

Zhang, Y., Chen, H.Y.H., Reich, P.B., 2012. Forest productivity increases with evenness, species richness and trait variation: a global meta-analysis. Ecology 100, 742-749.