



Effect of Forest Harvesting and Soil Disturbance on Natural Regeneration in the Forested Watershed of Hyrcanian Forests

Ali Babaei Ahmadabad¹ | Meghdad Jourgholami^{1*}  

1. Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran
Correspond E-mail: mjgholami@ut.ac.ir

Article Info

Abstract

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 18 Jan. 2026

Revised: 13 Mar. 2026

Accepted: 04 Apr. 2026

Published online: 01 Oct. 2026

Keywords:

Watershed,

Skidding operation,

Litter,

Biodiversity indices,

Multivariate analyses.

Natural restoration of forest after harvesting operations is one of the most important goals in forest sustainability. Forestry machine traffic by considering weight, speed, and intensity have significant impact on forest regeneration and consequently, biodiversity indices such as dominance, and equitability in the plant communities of forest floor drastically influenced. The current study has been carried out in the watershed no. 45 in the Hyrcanian forest and aim to study the skidding operation effect on diversity and tree species regeneration over a long-term period. Hence, four compartments with time since harvest of 7, 10, 15, 20 years in the Kheyroud forest (compartments no. 316, 317, 220, and 221) were selected and sampled. Also, the effect of soil physical properties (porosity and penetration resistance), pH, litter (C, N, N/N), and light under different traffic intensity (landing, low, medium, high), and its influence on biodiversity indexes using dominance, Shannon, Simpson, Margalef, and equitability were assessed. Results revealed that skidding operations had drastic effect on forest regeneration and change species composition as well as plants quantitate. Velvet maple as light-demanding species increased by 8 percent and shade-tolerant species such as beech diminished by 68 percentages, which can be considered as ecological alarm in the Hyrcanian forest. Results demonstrated that traffic intensity and time since harvest significantly influenced on forest regeneration, and also all on the environmental factors were influenced by these parameters. PCA analyses showed that soil properties including soil penetration resistance and biodiversity indexes significantly influenced by skidding operations. There was a positive correlation between litter properties, light and porosity.

Cite this article: Babaei Ahmadabad, A., Jourgholami, M. (2026). Effect of forest harvesting and soil disturbance on natural regeneration in the forested watershed of Hyrcanian forests. *Journal of Range & Watershed Management*, 79 (3), 361-381. DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2026.409798.1865>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: The Hyrcanian forests of northern Iran, covering approximately two million hectares, represent one of the world's most valuable temperate deciduous forest ecosystems and serve as important genetic reservoirs of plant and animal species. However, in recent decades, anthropogenic pressures, particularly timber harvesting, have increasingly threatened these valuable ecosystems. Harvesting operations constitute an intervention in natural forest areas that creates disturbance, typically accompanied by risks and damage to the ecosystem. The intensity of these impacts depends on soil characteristics, stand type and age, machinery weight, and number of machine passes. Undisturbed forest soils, having high porosity and low bulk density, are particularly susceptible to compaction from machine traffic. Soil compaction alters physical structure, reducing porosity, increasing bulk density, and decreasing permeability, thereby creating unfavorable conditions for root growth and microbial activity. The adverse effects of logging machinery traffic on forest soils can persist for several decades, with some studies suggesting that vegetation recovery following tree harvesting may require half a century or more. Skid trails differ from interior forest areas due to canopy opening, soil compaction, nutrient loss, and altered soil moisture, potentially creating differences in vegetation diversity compared to undisturbed areas. Light, as one of the most important environmental variables affecting species distribution and abundance, is a critical factor in understory dynamics, with skid trails promoting the growth of light-demanding species over shade-tolerant species. Forest litter, as one of the most important factors influencing soil physical and chemical properties, is the source of many biochemical and biological transformations. This study was conducted to investigate the mid-term effects of forest harvesting and changes in soil physical properties, pH, light, and litter characteristics on biodiversity indices of tree species in beech-dominated stands over 20 years under different skidder traffic intensity levels.

Materials and Methods: This research was conducted in the Kheyroud Educational and Research Forest, Mazandaran Province, within compartments 316 and 317 of Gorazbon District (time since harvest of 7 and 10 years) and compartments 220 and 221 of Namkhaneh District (time since harvest of 15 and 20 years). All compartments had beech-hornbeam forest type with beech dominance and were selected with approximately similar slope, aspect, elevation, soil type, and forest type conditions. Within each compartment, four traffic intensity levels were identified: log landing, high, medium, and low. Sampling was conducted using 1×1 m quadrats. For each traffic intensity level, six quadrats were established on skid trails, and three control quadrats were placed 10 m laterally from trail edges in undisturbed areas, resulting in 144 total quadrats. Within each quadrat, all tree seedlings were identified and counted. Soil physical properties measured included porosity and penetration resistance (using a pocket penetrometer). Soil pH was measured using a pH meter. Litter depth was measured, and litter samples were collected for analysis of carbon (Walkley-Black method), nitrogen (Kjeldahl method), and C/N ratio. Light intensity was measured using a lux meter. Biodiversity indices including Shannon-Wiener, Simpson, Margalef, Dominance, and Evenness were calculated. Data were analyzed using two-way ANOVA and multivariate principal component analysis (PCA) with SAS JMP software.

Results and Discussion: A total of 1,217 tree seedlings belonging to six species were counted across 144 quadrats. Hornbeam, velvet maple, and lime seedlings were more abundant on skid trails than in control areas, while beech, Cappadocian maple, and elm were more abundant in controls. Velvet maple, a light-demanding species, exhibited 252 seedlings on skid trails compared to only 31 in controls, indicating that skidding operations created favorable conditions for its germination. Analysis of variance revealed significant interaction effects between time since harvest and traffic intensity on tree species diversity ($P < 0.01$), indicating that tree vegetation response depends on both traffic intensity and ecosystem recovery time. At 7 and 10 years since harvest, all traffic treatments showed significant reductions in tree seedling numbers compared to controls. At 20 years, low-traffic areas showed 9.67 seedlings compared to 11.33 in controls, while landing areas remained severely degraded with only 4.17 seedlings. Control areas across all time since harvest intervals were statistically homogeneous, indicating stable tree species composition in undisturbed forests. Soil physical properties showed significant differences between skid trails and controls ($P < 0.01$). Landing areas consistently exhibited the lowest porosity across all time since harvest intervals (43.01% to 51.13%), indicating severe soil compaction. Soil penetration resistance averaged 1.36 MPa in controls, while values for 7, 10, 15, and 20-year since harvest were 2.69, 2.32, 2.23, and 2.07 MPa, respectively, demonstrating greatest damage at 7 years and in landing areas. Recovery was evident but incomplete after two decades. Soil pH became significantly more acidic in skid trails compared to controls. Mean pH in controls was 6.83-6.87, while skid trails showed values of 5.45-5.54 at 7-10 years, with partial recovery after 20 years but remaining below control levels. Litter properties were severely affected by skidding operations. Litter depth in 7-year landing areas was 2.75 cm compared to 8.75 cm in controls. Litter carbon in 7-year landing areas was 14.01% compared to 24.62% in controls, improving to 18.10% at 20 years but remaining significantly below controls. Litter nitrogen in 7-year landing areas was 2.07% compared to 2.79% in controls, with some recovery by 20 years. Light intensity at the forest floor was significantly affected by skidding operations. At 7 years, light intensity in landing areas

was 652 LUX and in high-traffic areas 1868 LUX, compared to 827 LUX in controls. By 20 years, significant canopy recovery was evident, with low-traffic areas showing 1574 LUX and landing areas 690 LUX. PCA analysis revealed that the first two components explained 65.46% of total variance. The first component showed strong positive loadings for soil porosity, litter carbon, litter depth, and litter nitrogen, while bulk density and penetration resistance showed strong negative loadings. The second component showed strong positive loadings for Simpson, Shannon, and Margalef indices, while Dominance showed strong negative loading. PCA ordination showed that 7 and 10-year sites with high traffic intensity were strongly correlated with degraded soil physical properties, while 15 and 20-year sites showed stronger correlations with recovering litter properties and pH. Pearson correlation analysis revealed strong positive correlations between soil porosity and litter carbon, and between penetration resistance and bulk density. Strong negative correlations were found between porosity and bulk density, and between penetration resistance and litter carbon, highlighting the critical role of litter in soil nutrient cycling. Among biodiversity indices, strong positive correlations were observed between Shannon and Simpson, and Shannon and Margalef, while strong negative correlations existed between Shannon and Dominance.

Conclusion: This study demonstrates that ground-based skidding operations have profound, multidimensional, and long-term effects on natural regeneration in Hyrcanian forests. The most critical finding is the dramatic shift in species composition: velvet maple, a light-demanding species, exhibited an 8-fold increase in skid trails, while beech, the dominant shade-tolerant species, showed a 68% reduction. This represents a serious ecological alarm for the sustainability of this foundation species. Soil compaction from machinery traffic impedes root penetration and seed establishment of sensitive species like beech while creating favorable conditions for pioneer species. Litter layer destruction, with 50% depth reduction and 35% carbon loss, reflects both direct physical damage and accelerated decomposition due to canopy opening. Reduced C/N ratios signal long-term depletion of soil organic matter pools. Light intensity increases of 284-620% in skid trails persist for up to 20 years, fundamentally altering understory microclimate. The extremely slow recovery of soil physical properties indicates that natural restoration processes are insufficient for severely compacted soils. The theoretical implication is that forest disturbance creates multiple, relatively independent dimensions of impact; physical, microclimatic, and nutritional, requiring simultaneous improvement across all dimensions for complete ecosystem recovery. Practically, sustainable forest management must prioritize soil protection during logging operations through optimized trail networks, appropriate machinery selection, limiting traffic to designated trails, and avoiding operations under wet soil conditions. For severely disturbed areas, particularly landings, active restoration interventions such as surface tillage, mulching with native organic materials, and planting native pioneer species may be necessary to accelerate recovery. Regular monitoring of soil properties, litter characteristics, and tree regeneration using multiple biodiversity indices should be integrated into forest management programs. Future research should focus on longer-term monitoring beyond 20 years and experimental testing of restoration techniques.

Keywords: Watershed, skidding operation, Litter, Biodiversity indices, Multivariate analyses.

Conflicts of Interest: The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.



دوره ۷۹ (۳)

شاپا الکترونیکی: ۷۷۹۵-۲۴۲۳

نشریه مرتع و آبخیزداری



اثر بهره‌برداری جنگل و آشفته‌گی خاک بر زادآوری طبیعی در حوزه آبخیز جنگل‌های شمال ایران

علی بابایی احمدآباد^۱ | مقدار غلامی^{۱*}

۱. گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

رایانامه: mjgholami@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۱۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۹

کلیدواژه‌ها:

حوزه آبخیز،

عملیات چوبکشی،

لاشبرگ،

شاخص‌های تنوع زیستی،

آنالیز چندمتغیره.

بازایی طبیعی جنگل بعد از بهره‌برداری، از مهم‌ترین اهداف پایدار جنگل است. تردد ماشین‌های چوبکشی با در نظر گرفتن وزن، سرعت و شدت تردد تاثیر زیادی بر زادآوری جنگل گذاشته و در اثر تغییرات صورت گرفته در فاکتورهای محیطی، شاخص‌های تنوع زیستی مانند تنوع، غنا و یکنواختی در جامعه گیاهی کف جنگل تغییراتی ایجاد می‌نمایند. این پژوهش در حوزه ۴۵ آبخیز جنگل‌های هیرکانی انجام شده و هدف آن بررسی تاثیر عملیات چوبکشی بر تنوع و زادآوری گونه‌های درختی در میان مدت است. به‌همین منظور ۴ پارسل با سنین بهره‌برداری ۷، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سال در جنگل خیرود (پارسل‌های ۳۱۶، ۳۱۷، ۳۲۰ و ۲۲۱) انتخاب و مورد مطالعه قرار گرفتند. تاثیر مشخصه‌های فیزیکی خاک (درصد تخلخل و مقاومت به نفوذ خاک)، pH و لاشبرگ (C/N و N، C) و نور تحت سطوح مختلف تردد (دپو، زیاد، متوسط و کم) و تاثیر آنها بر شاخص‌های تنوع زیستی با استفاده از پنج سنجه دومیننس، شانون، سیمپسون، مارگالف و یکنواختی بررسی شد. نتایج نشان داد عملیات چوبکشی تاثیر مخربی بر زادآوری جنگل داشته و علاوه بر تعداد گیاهان، ترکیب گونه‌ای را نیز تغییر داده است، گونه نورپسند پلت ۸ درصد افزایش و گونه سایه‌پسند راش ۶۸ درصد کاهش را نشان می‌دهد و این امر یک زنگ خطر اکولوژیکی در جنگل‌های هیرکانی محسوب می‌شود. نتایج نشان داد شدت تردد و سن بهره‌برداری و اثر متقابل شدت تردد و سن بهره‌برداری به‌صورت معنی‌داری بر زادآوری جنگل موثر بوده و همه فاکتورهای محیطی این تحقیق، تحت تاثیر شدت تردد و سنین بهره‌برداری بودند. نتایج آنالیز چند متغیره PCA نیز نشان داد، مشخصه‌های خاک مانند مقاومت به نفوذ و شاخص‌های تنوع زیستی به‌شدت تحت تاثیر عملیات چوبکشی قرار داشته‌اند و بین خصوصیات لاشبرگ، نور و میزان تخلخل خاک همبستگی مثبت وجود دارد.

استناد: بابایی احمدآباد؛ علی، جورغلامی؛ مقدار (۱۴۰۵). اثر بهره‌برداری جنگل و آشفته‌گی خاک بر زادآوری طبیعی در حوزه آبخیز جنگل‌های شمال ایران. نشریه مرتع و آبخیزداری، ۷۹ (۳)، ۳۶۱-۳۸۱.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2026.409798.1865>



© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

جنگل‌های هیرکانی با وسعت حدود ۲ میلیون هکتار، یکی از ارزشمندترین و منحصربه‌فردترین اکوسیستم‌های جنگلی جهان محسوب می‌شوند (Marvi-Mohajer, 2006). این جنگل‌ها به‌عنوان ذخیره‌گاه ژنتیکی مهمی از گونه‌های گیاهی و جانوری شناخته می‌شوند (Amiri Dado-Kalaei *et al.*, 2025). نقش حیاتی در حفظ تعادل اکولوژیکی منطقه و ارائه خدمات محیط‌زیستی متعدد ایفا می‌کنند. با این وجود، در دهه‌های اخیر فشارهای ناشی از فعالیت‌های انسانی از جمله بهره‌برداری چوب، این اکوسیستم‌های بارز را تهدید می‌کند (Sohrabi *et al.*, 2019). از آنجا که پوشش گیاهی یکی از ارکان تنظیم اکوسیستم است، نظارت بر تغییرات در تنوع زیستی از طریق مشاهدات اکولوژیکی میدانی، امری ضروری است و تغییرات پوشش گیاهی جنگل در قطعات نمونه ثابت در مقیاس زمان، فرصتی را فراهم می‌آورد تا تحولات فلور منطقه در طول زمان مورد بررسی قرار گرفته و نسبت به آن آگاهی کسب نمود (Kapfer *et al.*, 2017).

تحقیقات نشان داده‌اند که درختان جنگل در برابر تغییر خصوصیات فیزیکی از خود واکنش و حساسیت نشان می‌دهند (توانکار و همکاران، ۱۳۸۸). در عین حال، این بهره‌برداری و انتفاع، یک نوع مداخله و دستکاری در عرصه طبیعی جنگل بوده و باعث ایجاد آشفته‌گی و معمولاً همراه با مخاطرات و صدماتی به این اکوسیستم خواهد شد (Hope, 2007). شدت این صدمات به خصوصیات خاک (Crawford *et al.*, 2021)، نوع و سن توده (Mariotti *et al.*, 2020)، وزن ماشین و تعداد دفعات عبور ماشین‌های چوبکشی (Labelle *et al.*, 2022) بستگی داشته و از آنجا که خاک جنگل‌های دست‌نخورده، فضاهای خالی زیاد و وزن مخصوص کمی دارند، به راحتی تحت تاثیر عبور ماشین‌ها قرار گرفته و فشرده می‌شوند (Ampoorter *et al.*, 2011; Jourgholami *et al.*, 2018). کوبیدگی با تغییر ساختار فیزیکی خاک، کاهش تخلخل، افزایش جرم مخصوص ظاهری و کاهش نفوذپذیری، شرایط نامناسبی برای رشد ریشه گیاهان و فعالیت میکروارگانیسم‌ها ایجاد می‌کند (Greacen and Sands, 1980). وزن ماشین‌های بهره‌برداری و شدت عبور، هر یک عواملی مستقل در بوجود آوردن پیامدهای منفی بیشتری در فشردگی و خطری برای موجودات زنده خاک و زادآوری طبیعی بوده و بهره‌وری درختان و پوشش گیاهی کف جنگل را تحت تاثیر قرار می‌دهند (Cambi *et al.*, 2015).

اثرات نامطلوب تردد ماشین‌های بهره‌برداری روی خاک جنگل می‌تواند برای چندین دهه ادامه داشته باشد. مطالعاتی نیز وجود دارد که احیای لایه‌های پوشش گیاهی جنگل، پس از قطع درختان را نیازمند گذشت حدود نیم قرن و یا بیشتر دانسته است (Mac Lean and Wein, 1997). مسیرهای چوبکشی احتمالاً با محیط داخلی جنگل بدلیل باز شدن تاج‌پوشش، فشردگی خاک، از دست دادن مواد مغذی خاک، افزایش رطوبت خاک، تفاوت‌هایی داشته است (Buckley *et al.*, 2003; Hattori *et al.*, 2013; Zenner and Berger, 2008) و این تفاوت‌ها ممکن است در تنوع و پوشش گیاهی این مسیرها با مناطق دست‌نخورده تغییرات و تفاوت‌هایی ایجاد کنند (Wolf *et al.*, 2008; Avon *et al.*, 2013; Mercier *et al.*, 2019). آشفته‌گی ناشی از عملیات چوبکشی بر تولید و استقرار بذرها، جوانه‌زنی و نرخ رشد بسیاری از گونه‌های کف جنگل تاثیر گذاشته (Reader and Bricker, 1992; Maschinski *et al.*, 1997) و با آشفته‌گی در خواص فیزیکی خاک و تغییر در دسترسی به منابع نور، هوا، دمای خاک و سرعت تجزیه مواد آلی (Bormann and Likens, 1979) و همچنین از دست دادن زیستگاه مناسب، استرس فیزیولوژیکی، نرخ پایین تولید مثل و توانایی پراکندگی ضعیف و آهنگ رشد آهسته (Meier *et al.*, 1995; Ehrlén and Eriksson, 2000)، ممکن است باعث محدود شدن احیای طبیعی مسیرهای چوبکشی شود (Zenner and Berger, 2008).

آشفته‌گی، رطوبت، فشردگی خاک، نور، نوع پایه و سطح پایه عوامل مهمی هستند که بر تنوع گیاهی کف جنگل موثر هستند (Skov, 1997; Nagaike *et al.*, 2005). حذف پوشش گیاهی و عدم باران‌ربایی، به‌هم‌خوردگی توده‌ها و کوبیدگی خاک در اثر تردد ماشین‌های بهره‌برداری و چوبکشی در جنگل، چرخه تغذیه مواد مغذی خاک را تغییر داده و این امر بر تنوع گیاهان، میزان جذب توسط گیاه، نوسانات رطوبت، درجه حرارت سطح خاک موثر است (Feller, 2005). با این توضیح، خصوصیات مسیرهای چوبکشی بدلیل باز شدن تاج‌پوشش، فشردگی بیشتر خاک، از دست دادن مواد مغذی و یا افزایش رطوبت خاک، در مقایسه با مناطق دست‌نخورده متفاوت است (Buckley *et al.*, 2003; Lenière *et al.*, 2006; Zenner and Berger, 2008; Hattori *et al.*, 2013).

نور یکی از مهمترین متغیرهای محیطی است که بر توزیع فراوانی گونه‌ها تاثیرگذار است (Elemans, 2004; Whigham, 2004; Bartemucci et al., 2006)، بدیهی است که شرایط نور مطلوب نسبت به اینکه گونه، نورپسند یا سایه پسند باشد، متفاوت بوده و دسترسی به نور به عنوان یک عامل حیاتی در جابجایی زیر اشکوب درختان ظاهر شده است، به طوری که مسیرهای چوبکشی فشرده‌گی خاک بیشتری نسبت به جنگل‌های مجاور نشان می‌دهند و باعث رشد گونه‌های نورپسند و رطوبت‌دوست نسبت به گونه‌های سایه‌پسند می‌شوند (Amiri Dado-Kalaei et al., 2025).

لاشبرگ گیاهی، به عنوان 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 تشکیل‌دهنده توده جنگلی می‌تواند متفاوت باشد (Alef and Nannipieri, 1995). 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 ضربات قطرات باران (Jourgholami et al., 2020)، بهبود کیفیت و نوع خاک، چرخه 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; Labaz et al., 2014; Kianmehr et al., 2021).

این پژوهش در حوزه آبخیز ۴۵ جنگل‌های شمال ایران و جهت بررسی میان‌مدت اثر بهره‌برداری جنگل و تغییرات خصوصیات فیزیکی خاک، pH، نور، خصوصیات لاشبرگ بر شاخص‌های تنوع زیستی گونه‌های درختی در توده راش و در میان (۲۰ سال)، تحت سطوح مختلف تردد ماشین‌های چوبکشی انجام شده است.

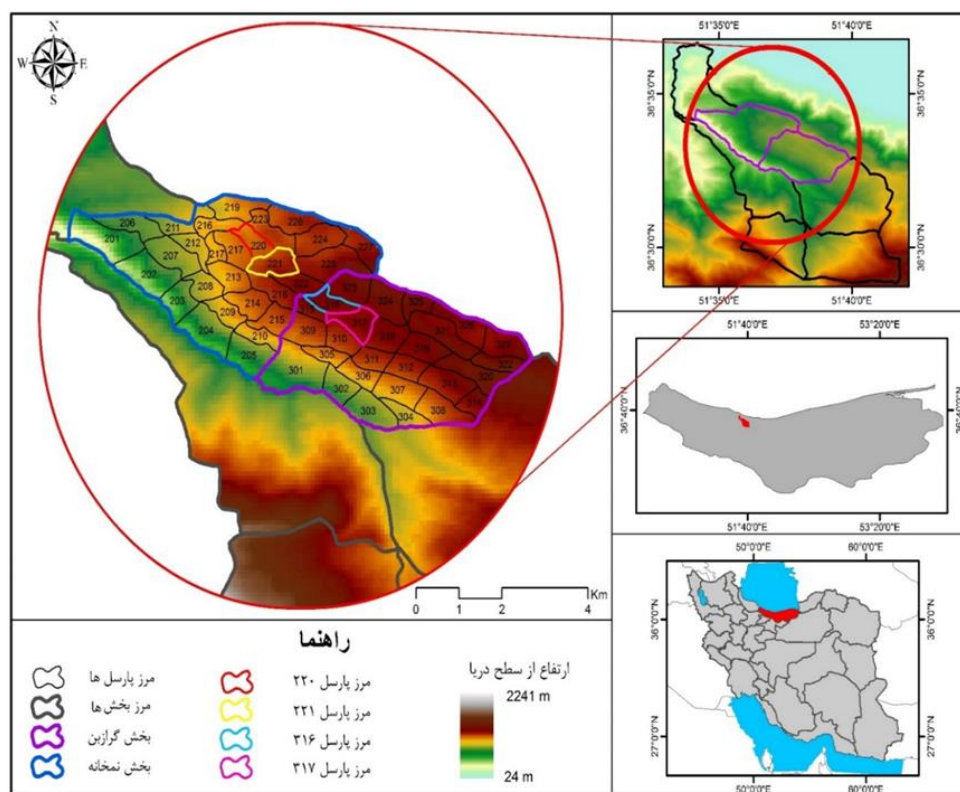
۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

این پژوهش حوضه آبخیز ۴۵ جنگل‌های شمال ایران واقع در استان مازندران و در جنگل آموزشی-پژوهشی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران (جنگل خیرود) انجام شده است. این حوضه آبخیز ۳۴ هزار هکتار مساحت دارد و جنگل خیرود با ۸۰۰۰ هکتار یکی از زیرحوضه‌های آن محسوب می‌شود. جنگل خیرود به ۷ سری به نام‌های پاتم، نمخانه، گرازین، دارنو، چلیر، منیاسنگ و بهارین تقسیم شده و در ۷ کیلومتری شرق شهرستان نوشهر با مختصات جغرافیایی شرقی $56^{\circ}39'51''$ و $12^{\circ}33'51''$ و عرض‌های جغرافیایی شمالی $32^{\circ}36'08''$ و $45^{\circ}36'36''$ در مجاورت روستای نجارده قرار گرفته است. ارتفاع این جنگل از ۱۰ متر (از سطح دریا)، شروع شده و تا حدود ۲۲۰۰ متر در بیلاق بالامی‌رود (اطلاعات طرح جنگلداری بخش گرازین، ۱۳۸۹). این پژوهش در دو سری: نمخانه، در پارسل‌های ۲۲۰ و ۲۲۱ با سن بهره‌برداری ۱۵ و ۲۰ سال و گرازین و در پارسل‌های ۳۱۶ و ۳۱۷ با سن بهره‌برداری ۷ و ۱۰ سال انجام شده است. جامعه گیاهی در پارسل‌های ۲۲۰، ۲۲۱، ۳۱۶ و ۳۱۷ همگی راش-ممرز، با غالبیت راش است (شکل ۱).

۲-۲. روش پژوهش

بر اساس اهداف پژوهش، چهار پارسل با سنین بهره‌برداری ۷ (پارسل ۳۱۶)، ۱۰ (پارسل ۳۱۷)، ۱۵ (پارسل ۲۲۰) و ۲۰ (پارسل ۲۲۱) سال انتخاب و سعی شد پارسل‌ها از نظر شیب، جهت، ارتفاع، خاک و تیپ جنگلی تقریباً برابر باشند. مسیرهای چوبکشی همسو با اهداف تحقیق، انتخاب شدند. هر یک از این مسیرها، دارای سطوح مختلف عبور ماشین‌های چوبکشی (شدت تردد کم، متوسط، زیاد و محل دپو) بودند.



شکل ۱. نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه (جنگل خیرود) شامل بخش‌های نم‌خانه (پارسل ۲۲۰ و ۲۲۱) و گرازین (پارسل ۳۱۶ و ۳۱۷)

برای نمونه‌برداری از کوادراتی به ابعاد یک متر مربع استفاده شد. هر کوادرات در دپو با فاصله عرضی یک متر با کوادرات بعدی به صورت خطی انتخاب شد و در مسیرهای چوبکشی نیز محل قطعات نمونه، بعد از ورود به مسیر و طی ۱۰ متر، با شروع از سمت راست، مشخص شدند. یک درخت به عنوان شاخص انتخاب و با اولین قطعه نمونه با آزمون مشخص نشانه گذاری شد. قطعات نمونه، علامتگذاری پیکه کوبی و محل آنها به صورت دائمی معین شد. با هدف کاستن از اثرات تاج پوشش و تغییرات نور، به صورت اریب در طول و عرض با فاصله یک متر، سه قطعه نمونه برداشت شد. سپس سه قطعه نمونه دیگر به همین صورت در همان شدت تردد و مسیر به فاصله ۲۰ متر طولی برداشت شد (در هر شدت تردد جمعاً ۶ کوادرات) و به موازات همین مسیرها، سه قطعه نمونه به عنوان شاهد با طی ۱۰ متر عرضی از لبه مسیر چوبکشی و ۱۰ متر طولی به موازات مسیر برداشت شد. سپس نمونه‌برداری از خاک در بالای هر کوادرات با سیلندر به عمق ۵ سانتی‌متر جهت بررسی خصوصیات فیزیکی و نمونه‌ای برای بررسی خواص شیمیایی خاک انجام شد و گیاهان درختی درون هر کوادرات نیز از نظر تعداد و نوع شناسایی و شمارش شدند (شکل ۲).

۲-۳. تحلیل آماری

برای تحلیل آماری در این پژوهش، داده‌های بدست آمده از ۱۴۴ قطعه نمونه که در ماه‌های اردیبهشت، مرداد و مهر سال ۱۴۰۴، بصورت تصادفی سیستماتیک برداشت شده بود، باتوجه به نرمال بودن داده‌ها ابتدا در نرم‌افزار اکسل مرتب و به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها از تجزیه واریانس یکطرفه با ادغام زمان‌ها برای مشخص شدن اثرمتقابل عوامل با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۸، SAS JMP نسخه ۱۳، برای محاسبه شاخص‌های تنوع زیستی از نرم‌افزار PAST نسخه ۴/۰۳ استفاده شد. همچنین برای آنالیز چند متغیره از روش PCA برای بررسی تمام فاکتورهای محیطی (خاک، نور، شاخص‌های تنوع زیستی) و لاشبرگ بر تنوع گونه‌های درختی و علفی استفاده شد.



شکل ۲. قطعه نمونه‌های یک متر مربعی برداشت پوشش گیاهی، خاک، لاشبرگ و نور

۳. نتایج

۳-۱. نتایج فلورستیک

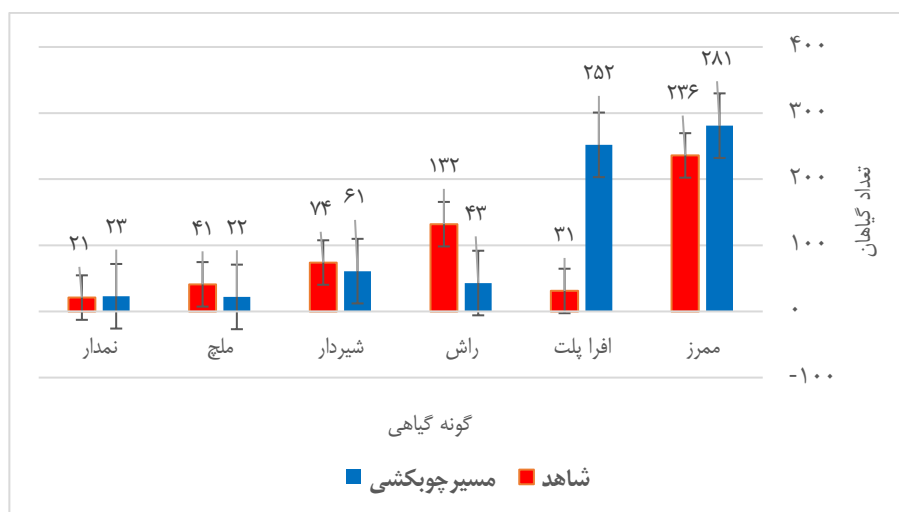
در ۱۴۴ قطعه نمونه معین شده، جمعاً تعداد ۱۲۱۷ قطعه گیاه از گونه‌های درختی که به ۶ گونه تعلق داشتند، شناسایی و شمارش شدند. گیاهان درختی که شامل گونه‌های ممرز، پلت، راش، شیردار، ملج و نمدار بود و از این تعداد ۶۸۲ نهال در مسیرهای چوبکشی و ۵۳۵ نهال در قطعات شاهد مشاهده شد. برای این گونه‌ها جدول فلورستیک و نمودار مقایسه فراوانی هریک از گونه‌ها تهیه شد (جدول ۱).

جدول ۱. جدول فلورستیک

نام علمی	خانواده	نام فارسی	شکل زیستی	کوروتیپ	فرم رویشی	تعداد
<i>Carpinus betulus L.</i>	<i>Betulaceae</i>	ممرز	Ph	ES	پهن برگ	۵۱۷
<i>Acer velutinum Boiss.</i>	<i>Aceraceae</i>	پلت	Ph	ES	پهن برگ	۲۸۳
<i>Fagus orientalis Lipesky.</i>	<i>Fagaceae</i>	راش	Ph	ES	پهن برگ	۱۷۵
<i>Acer cappadocicum Gled.</i>	<i>Aceraceae</i>	شیردار	Ph	ES	پهن برگ	۱۳۵
<i>Ulmus glabra Hudson.</i>	<i>Ulmaceae</i>	ملج	Ph	ES	پهن برگ	۶۳
<i>Tilia platyphyllos Scop.</i>	<i>Tiliaceae</i>	نمدار	Ph	ES	پهن برگ	۴۴

۳-۲. فراوانی گونه‌های درختی

تعداد نهال‌های ممرز، پلت و نمدار در مسیرهای چوبکشی بیشتر از مناطق شاهد و تعداد گونه‌های راش، شیردار و ملج در مناطق شاهد بیشتر از مسیرهای چوبکشی بود. در ضمن در گونه ممرز با توجه به اینکه بین تعداد نهال‌ها در مناطق شاهد و مسیرهای چوبکشی از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود ندارد، این امر نشان‌دهنده این مهم است که جوانه‌زنی و رشد این گونه ممکن است تحت تاثیر آشفته‌گی خاک، نور ناشی از عملیات چوبکشی قرار ندارد، ولی گونه‌ای نورپسند مانند پلت با تفاوت بسیار زیاد ۲۵۲ نهال در مسیر چوبکشی در مقایسه با ۳۱ نهال در مناطق شاهد نشان‌دهنده ایجاد بستر مناسب برای جوانه‌زنی این گونه تحت تاثیر عملیات چوبکشی است (شکل ۳).



شکل ۳. تعداد گونه‌های درختی در مسیرهای چوبکشی در مقایسه با مناطق شاهد

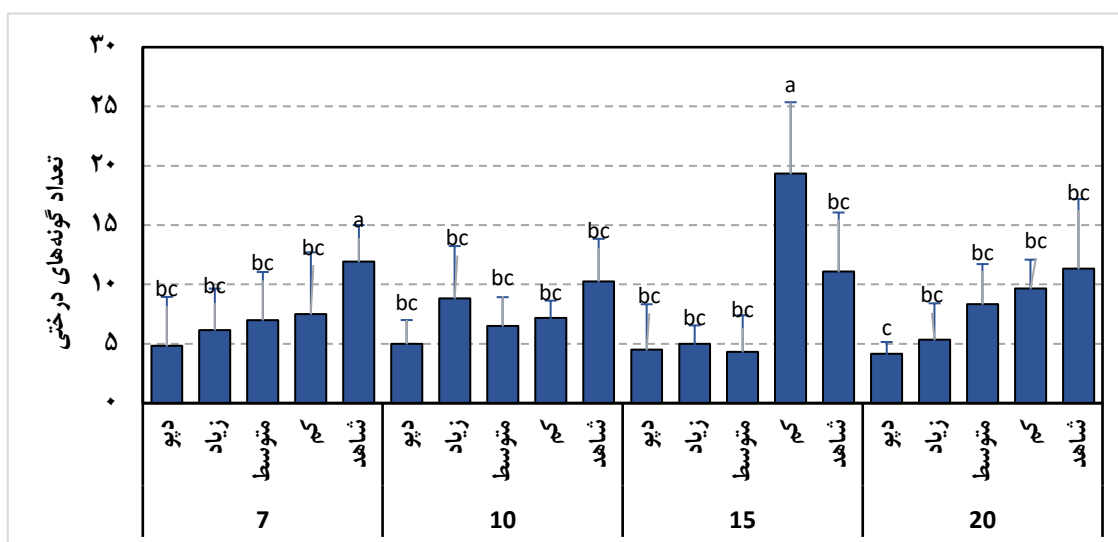
نتایج حاصل از تجزیه واریانس و آزمون توکی نشان داد که اثر متقابل و معنی‌داری بین سن بهره‌برداری و اثر متقابل شدت تردد بر سن بهره‌برداری بر تنوع گونه‌های درختی در مسیرهای چوبکشی در مقایسه با مناطق شاهد وجود دارد. این یافته‌ها حاکی از آن است که پاسخ پوشش درختی به آشفته‌گی ناشی از عملیات چوبکشی نه تنها به شدت تردد و همچنین اثر متقابل سن بهره‌برداری و شدت تردد، بلکه به زمان بازیابی اکوسیستم نیز وابسته است، ولی شدت تردد به تنهایی بر تنوع گونه‌های درختی موثر نبود (جدول ۲).

جدول ۲. تجزیه واریانس اثر سن بهره‌برداری و شدت تردد و اثر متقابل سن و شدت تردد بر تعداد گونه‌های درختی

منبع	Df	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F	P-value
شدت تردد	۴	۴۰/۵۳	۱۳/۵۱	۰/۸۹	۰/۴۵
سن بهره‌برداری	۳	۱۰۴۰/۹۳	۲۶۰/۲۳	۱۷/۲۴	<۰/۰۰ **
اثر متقابل شدت تردد و سن بهره‌برداری	۱۲	۶۸۱/۷۴	۵۶/۸۱	۳/۷۶	<۰/۰۰ **

در سن بهره‌برداری ۷ و ۱۰ سال، تمامی تیمارهای تردد شامل محل دیو، شدت‌های تردد زیاد، متوسط و کم در یک گروه آماری قرار داشتند و در همه این مسیرها اثر منفی شدید و گسترده عملیات چوبکشی بر تعداد گیاهان درختی به صورت معنی‌داری مشاهده شد. در سن ۷ سال میانگین نونهال‌های درختی دارای تفاوت معنی‌دار با یکدیگر بودند. در سن بهره‌برداری ۱۰ سال نیز نتایج بدست آمده در مقایسه با منطقه شاهد، دارای تفاوت معنی‌دار بود. در سن ۱۵ سال و در شدت‌های مختلف تردد دیو، زیاد، متوسط و کم، میانگین کل تعداد گیاهان به ۸/۲۹ در مقابل منطقه شاهد با ۱۱/۰۸ بود که تفاوت زیادی بین مسیرهای چوبکشی با منطقه شاهد منطقه شاهد وجود نداشت ولی در بررسی هر شدت تردد نتایج در شدت‌های تردد دیو، زیاد و متوسط به صورت معنی‌داری با منطقه شاهد دارای اختلاف بود، ولی در مسیر با شدت تردد کم با حضور ۱۹/۳۳ نونهال بیشتر از منطقه شاهد بود. در سن ۲۰ سال، اگرچه در تیمار تردد کم با میانگین ۹/۶۷ دارای بیشترین تعداد گیاهان درختی نسبت به سایر مسیرها مشاهده شد و با منطقه شاهد نیز دارای اختلاف معنی‌داری نبود، ولی تعداد نونهال‌های این مسیر نسبت به پارسال با سن بهره‌برداری ۱۵ سال کمتر بود. همچنین در سایر شدت‌های تردد، کاهش تعداد نونهال‌ها مشاهده شد و تعداد آن‌ها با منطقه شاهد دارای اختلاف معنی‌داری بود. از نظر آماری نیز با توجه به اینکه در منطقه شاهد همه سنین بهره‌برداری در یک گروه آماری قرار

دارند که این امر نشان از ثبات پایدار گونه‌های درختی در عرصه جنگل‌های هیرکانی دارد (شکل ۴).



شکل ۴. روند تغییرات تعداد گونه‌های درختی در سنین و شدت‌های مختلف تردد

۳-۳. مشخصه‌های فیزیکی خاک

مشخصه‌های فیزیکی خاک شامل درصد تخلخل (TP) و مقاومت به نفوذ (PR) خاک مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصله نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین مقادیر بدست آمده تحت سطوح مختلف تردد و سنین بهره‌برداری و برهمکنش این دو عامل، بین مسیرهای چوبکشی و مناطق شاهد وجود دارد (جدول‌های ۳ و ۴). با بررسی روند بازایی خصوصیات فیزیکی مسیرهای چوبکشی با مناطق شاهد مشخص شد، در شدت‌های تردد کمتر و با سپری شدن ۱۵ و ۲۰ سال از عملیات چوبکشی فاکتورهای فیزیکی خاک نسبت به مناطق دیو و سنین ۷ و ۱۰ سال تا حدودی ترمیم شدند، ولی کماکان اثر متقابل شدت تردد و سن بهره‌برداری در روند تغییرات کلیه مشخصه‌های مورد بررسی مشهود است.

درخصوص تخلخل خاک نیز نتایج نشان دادند که دیوها، به‌طور مداوم و در تمام سنین ۷، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سال پایین‌ترین درصد تخلخل کل خاک را داشتند. این موضوع گویای فشردگی بسیار شدید خاک در محل دیو است. در شدت تردد کم که بهبود یافته‌ترین وضعیت را در بین مسیرهای چوبکشی تحت سطوح مختلف تردد داشت، میانگین تخلخل خاک در این مسیرها از ۵۶/۵۱ درصد در سن بهره‌برداری ۷ سال به ۵۸/۵۴ درصد در سال بیستم افزایش پیدا کرد که این افزایش پس از دو دهه، بالاترین میزان تخلخل را در بین تمامی سطوح تردد و دیوها به خود اختصاص داده است (جدول‌های ۳ و ۴).

جدول ۳. جدول آنالیز واریانس تاثیر شدت تردد و سن بهره‌برداری و برهمکنش شدت تردد بر سن بهره‌برداری مشخصه‌های فیزیکی خاک

مشخصه	درصد تخلخل		مقاومت به نفوذ	
	P-value	F	P-value	F
شدت تردد	۰/۰۰*	۱۴۰۹/۰۷	۰/۰۰*	۱۵۱۷/۹۲
سن بهره‌برداری	۰/۰۰*	۶۶/۴۵	۰/۰۰*	۲۸۴/۶۷
برهمکنش سن بهره‌برداری و شدت تردد	۰/۰۰*	۱۰/۴۲	۰/۰۰*	۳۱/۹۷

جدول ۴. روند تغییرات مشخصه‌های فیزیکی خاک در سال‌ها و شدت‌های مختلف تردد پس از عملیات چوبکشی (انحراف معیار $\pm$ میانگین)

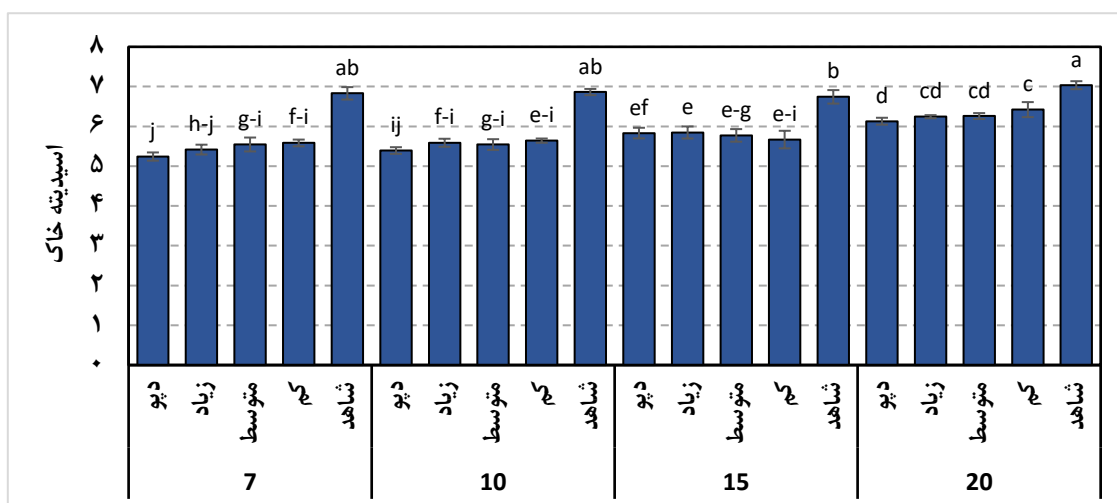
سن	تخلخل (TP)	مقاومت به نفوذ (PR)
۷	دیو	$۳/۱۱ \pm ۰/۰۶^a$
	شدت تردد زیاد	$۲/۹۲ \pm ۰/۱۰^b$
	شدت تردد متوسط	$۲/۵۴ \pm ۰/۰۹^c$
	شدت تردد کم	$۲/۲۰ \pm ۰/۰۶^{ef}$
	شاهد	$۱/۴۱ \pm ۰/۱۲^h$
۱۰	دیو	$۴۶/۶۹ \pm ۲/۳۴^j$
	شدت تردد زیاد	$۵۰/۵۶ \pm ۱/۳۴^i$
	شدت تردد متوسط	$۲/۲۰ \pm ۰/۰۴^{ef}$
	شدت تردد کم	$۲/۱۶ \pm ۰/۰۷^{ef}$
	شاهد	$۱/۳۹ \pm ۰/۱۰^h$
۱۵	دیو	$۴۸/۱۸ \pm ۱/۱۷^j$
	شدت تردد زیاد	$۵۲/۱۱ \pm ۰/۳۷^{hi}$
	شدت تردد متوسط	$۲/۱۷ \pm ۰/۰۵^{ef}$
	شدت تردد کم	$۲/۰۸ \pm ۰/۰۳^f$
	شاهد	$۱/۳۳ \pm ۰/۰۴^h$
۲۰	دیو	$۵۱/۱۳ \pm ۰/۳۸^{hi}$
	شدت تردد زیاد	$۵۲/۸۴ \pm ۰/۲۷^{gh}$
	شدت تردد متوسط	$۲/۰۶ \pm ۰/۰۵^f$
	شدت تردد کم	$۱/۷۵ \pm ۰/۰۴^g$
	شاهد	$۱/۳۳ \pm ۰/۰۳^h$

نتایج تحلیل آماری داده‌های مربوط به مقاومت به نفوذ، به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی فشردگی خاک، نشان می‌دهند که برای بازیابی خاک جنگل به مدت زمانی بیش از دو دهه نیاز دارد و در این مدت اگرچه تا حدودی روند بهبود دیده می‌شود، ولی در مقایسه با مناطق شاهد این روند بسیار کند است. در کلیه مناطق شاهد متناظر با سنین بهره‌برداری و شدت‌های مختلف تردد، میانگین مقاومت به نفوذ $۱/۳۶$ مگاپاسکال بوده است و میانگین ارقام بدست آمده برای سنین بهره‌برداری ۷، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سال نشان داد بالاترین آسیب به خاک در سن ۷ سال و در میان شدت‌های مختلف تردد نیز محل دیو، بیشترین آسیب را متحمل شده است (جدول‌های ۳ و ۴). ولی با گذشت سال‌های مختلف و کاهش شدت تردد از (دیو به شدت تردد کم)، مشخصه‌های فیزیکی خاک روند محسوس بازیابی تدریجی خود را نشان داده‌اند، مثلاً در مشخصه مقاومت به نفوذ و در محل دیو پارسل باسن بهره‌برداری ۷ سال، دارای میانگین $۳/۱۱$ بوده که این رقم در مسیر با شدت تردد کم سن بهره‌برداری ۲۰ سال به $۱/۷۵$ رسیده است و در مشخصه تخلخل مقادیر بدست آمده با مناطق شاهد اختلاف معنی‌داری دارند (جدول ۴).

۳-۴. اسیدیته خاک (pH)

عملیات چوبکشی باعث اسیدی‌تر شدن قابل توجه خاک در مسیرهای چوبکشی نسبت به مناطق دست‌نخورده جنگل می‌شود. میانگین pH خاک مناطق شاهد در سن بهره‌برداری (۷ و ۱۰ سال) به‌صورت چشمگیری بالاتر از مسیرهای چوبکشی در سنین بهره‌برداری ۷ و ۱۰ سال قرار داشتند. با گذشت ۱۵ و ۲۰ سال از زمان عملیات چوبکشی؛ روند بهبود نسبی pH خاک در اکثر تیمارها (به‌خصوص در محل‌های

دپو و شدت تردد زیاد)، به وضوح قابل مشاهده بود. نکته حائز اهمیت این است که حتی پس از ۲۰ سال، pH خاک در هیچ یک از سطوح تردد به سطح مناطق شاهد با میانگین ۶/۸۷ نرسیدند. از لحاظ گروه بندی آماری نیز مناطق شاهد در یک گروه آماری قرار داشتند که نشان دهنده ثابت و پایدار بودن pH خاک جنگل در عرصه های دست نخورده جنگلی است (شکل ۵).



شکل ۵. روند تغییرات اسیدیته خاک (pH) در سنین و شدت های مختلف تردد

۳-۵. خصوصیات لاشبرگ

نتایج بدست آمده از داده های خصوصیات لاشبرگ نشان داد که عمق لاشبرگ مسیرهای چوبکشی به شدت تحت تاثیر سن بهره برداری و شدت تردد و همچنین اثر متقابل سن بهره برداری و شدت تردد قرار داشت. میانگین کربن لاشبرگ منطقه دپو با سن ۷ سال، ۱۴/۰۱ بود که در سن ۲۰ سال این رقم به ۱۸/۱۰ افزایش یافته ولی همچنان با مناطق شاهد با ۲۴/۸۹ دارای اختلاف معنی دار است. در شدت های تردد متوسط و کم، میانگین کل این مشخصه نشان دهنده وضعیت بهتر این مناطق نسبت به مناطق شاهد است، ولی هنوز نتایج بدست آمده با منطقه شاهد دارای اختلاف شدیدی است. نیتروژن لاشبرگ نیز در سن بهره برداری ۷ سال و شدت تردد دپو، درصد نیتروژن لاشبرگ عدد ۲/۱۵ را نشان می دهد که در مقایسه با منطقه دپو در سن بهره برداری ۲۰ سال تفاوت معنی داری دارد ولی باید گفت میزان نیتروژن لاشبرگ در سن بهره برداری ۲۰ سال و در تمام شدت های تردد از مقدار منطقه شاهد همان پارسل فراتر رفته است (جدول ۵).

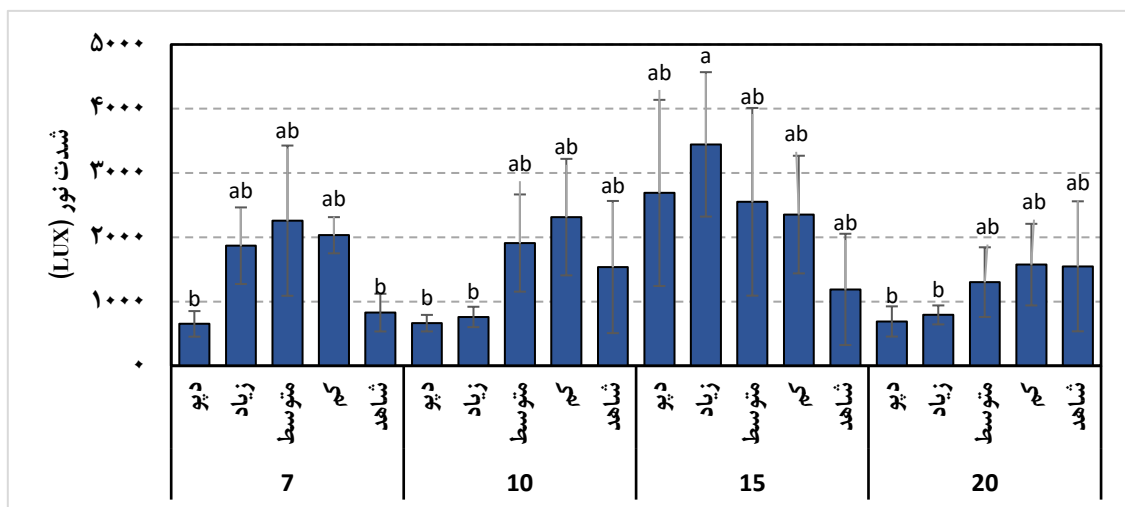
۳-۶. شدت نور (LUX)

میزان نفوذ نور ورودی به کف جنگل بعد از عملیات چوبکشی، تغییرات محسوسی داشته و در محل دپو و شدت تردد زیاد پارسل با سن بهره برداری ۷ سال به ترتیب برابر با ۶۵۲/۰۰ و ۱۸۶۸/۳۳ LUX بوده است و این امر نشان می دهد که اثرات اولیه تردد سنگین و فعالیت در محل دپو هنوز منجر به اختلاف معنی داری در نور کف جنگل نسبت به منطقه شاهد نشده است. در شدت های تردد کم و متوسط، اگرچه میانگین بالاتری دارند ولی در گروه آماری یکسان با منطقه شاهد قرار می گیرند. در سن ۱۰ سال کاهش نور در مسیر با تردد زیاد و دپو روبرو هستیم و دلیل آن آغاز فرایند بازیابی تاج پوشش در برخی مناطق باشد و این کاهش در شدت های تردد کم و متوسط نیز در مقایسه با سن بهره برداری ۷ سال به وضوح دیده می شود. در سن ۱۵ سال و در شدت تردد زیاد، داده ها با میانگین ۳۴۴۵/۳۳ LUX بالاتر از منطقه شاهد (۱۱۸۸/۳۳ LUX) است. این اختلاف معنی دار در تیمارهای تردد کم و متوسط در همین دوره نیز وجود دارد. تردد در این مسیرها مانع تشکیل تاج پوشش متراکم حتی بعد از ۱۵ سال شده است. در سن ۲۰ سال تجزیه و تحلیل ها نشان می دهد که در تردد کم با میانگین

۱۵۷۴/۰۰ LUX، متوسط ۱۳۰۱/۶۷ LUX، زیاد ۷۹۱/۶۷ LUX و دیو ۶۹۰/۰۰ LUX در مقایسه با سن بهره‌برداری ۷، ۱۰، ۱۵ سال، پیشرفت قابل توجهی در فرایند بازیابی تاج پوشش گیاهی اتفاق افتاده است (شکل ۶).

جدول ۵. روند تغییرات عمق و مشخصه‌های شیمیایی لاشبرگ در سال‌ها و شدت‌های مختلف تردد پس از عملیات چوبکشی (انحراف معیار $\pm$ میانگین)

سن	شدت تردد	عمق لاشبرگ	کربن لاشبرگ	نیترژن لاشبرگ	نسبت کربن به نیترژن لاشبرگ
۷	دیو	$۲/۷۵ \pm ۰/۶۹^h$	$۱۴/۰۱ \pm ۰/۱۸^i$	$۲/۰۷ \pm ۰/۱۱^{hi}$	$۶/۷۹ \pm ۰/۲۹^{gh}$
	زیاد	$۳/۰۰ \pm ۰/۷۷^{gh}$	$۱۵/۵۳ \pm ۰/۷۸^{hi}$	$۲/۱۵ \pm ۰/۰۷^{g-i}$	$۷/۲۲ \pm ۰/۴۱^{h-e}$
	متوسط	$۳/۹۲ \pm ۰/۸۶^{d-h}$	$۱۷/۹۹ \pm ۰/۵۸^{c-g}$	$۲/۳۱ \pm ۰/۰۲^{c-h}$	$۷/۸۱ \pm ۰/۲۶^{f-b}$
	کم	$۴/۶۷ \pm ۰/۵۲^{c-f}$	$۱۸/۶۲ \pm ۰/۶۰^{d-f}$	$۲/۴۹ \pm ۰/۰۵^{c-e}$	$۷/۴۸ \pm ۰/۲۰^{h-d}$
	شاهد	$۸/۷۵ \pm ۰/۶۲^a$	$۲۴/۶۲ \pm ۰/۹۵^a$	$۲/۷۹ \pm ۰/۰۶^{ab}$	$۸/۸۳ \pm ۰/۴۱^a$
۱۰	دیو	$۳/۰۸ \pm ۰/۵۸^{gh}$	$۱۶/۴۳ \pm ۰/۶۱^{gh}$	$۲/۳۹ \pm ۰/۲۵^{d-g}$	$۶/۹۵ \pm ۰/۸۳^{h-f}$
	زیاد	$۳/۶۷ \pm ۰/۲۶^{e-h}$	$۱۷/۶۹ \pm ۰/۴۵^{fg}$	$۲/۵۷ \pm ۰/۲۲^{b-d}$	$۶/۹۴ \pm ۰/۶۴^{h-f}$
	متوسط	$۴/۵۸ \pm ۰/۵۸^{c-f}$	$۱۸/۶۳ \pm ۰/۲۴^{d-f}$	$۲/۸۱ \pm ۰/۰۷^{ab}$	$۶/۶۳ \pm ۰/۱۳^h$
	کم	$۵/۱۷ \pm ۰/۸۲^{b-d}$	$۱۹/۷۵ \pm ۰/۷۲^{c-e}$	$۲/۹۵ \pm ۰/۲۲^a$	$۶/۷۳ \pm ۰/۶۹^{gh}$
	شاهد	$۸/۶۳ \pm ۰/۸۰^a$	$۲۴/۷۹ \pm ۱/۱۶^a$	$۲/۹۱ \pm ۰/۰۸^a$	$۸/۵۱ \pm ۰/۴۱^{c-a}$
۱۵	دیو	$۳/۳۰ \pm ۰/۴۷^{f-h}$	$۱۷/۵۴ \pm ۰/۷۸^{fg}$	$۲/۳۵ \pm ۰/۲۳^{d-g}$	$۷/۵۱ \pm ۰/۴۴^{h-d}$
	زیاد	$۴/۱۷ \pm ۰/۴۱^{c-h}$	$۱۸/۶۰ \pm ۰/۵۸^{d-f}$	$۲/۲۸ \pm ۰/۰۹^{f-i}$	$۸/۱۷ \pm ۰/۴۱^{e-a}$
	متوسط	$۴/۶۷ \pm ۰/۸۲^{c-f}$	$۱۹/۹۹ \pm ۰/۹۵^{cd}$	$۲/۴۴ \pm ۰/۰۸^{d-f}$	$۸/۲۱ \pm ۰/۳۳^{e-a}$
	کم	$۵/۵۸ \pm ۰/۷۴^{bd}$	$۲۱/۳۰ \pm ۰/۵۶^{bc}$	$۲/۵۴ \pm ۰/۰۷^a$	$۸/۴۰ \pm ۰/۲۸^{d-a}$
	شاهد	$۸/۲۵ \pm ۰/۶۶^a$	$۲۴/۴۳ \pm ۰/۵۷^a$	$۲/۸۴ \pm ۰/۱۹^a$	$۸/۶۵ \pm ۰/۶۰^{ab}$
۲۰	دیو	$۴/۱۷ \pm ۰/۶۸^{c-h}$	$۱۸/۱۰ \pm ۱/۳۳^{d-g}$	$۲/۰۴ \pm ۰/۰۶^i$	$۸/۸۹ \pm ۰/۵۶^a$
	زیاد	$۴/۴۲ \pm ۰/۵۸^{c-g}$	$۱۹/۷۷ \pm ۰/۴۰^{c-e}$	$۲/۳۷ \pm ۰/۰۸^{d-g}$	$۸/۳۶ \pm ۰/۱۳^{d-a}$
	متوسط	$۵/۰۸ \pm ۰/۷۴^{b-e}$	$۲۰/۹۳ \pm ۰/۴۰^{bc}$	$۲/۷۶ \pm ۰/۰۴^{a-c}$	$۷/۵۹ \pm ۰/۲۲^{c-h}$
	کم	$۶/۳۳ \pm ۰/۸۸^b$	$۲۱/۹۹ \pm ۰/۴۷^b$	$۲/۸۶ \pm ۰/۰۴^a$	$۷/۷۰ \pm ۰/۲۲^{b-g}$
	شاهد	$۸/۷۱ \pm ۱/۰۱^a$	$۲۵/۷۰ \pm ۲/۲۱^a$	$۲/۹۱ \pm ۰/۰۷^a$	$۸/۸۶ \pm ۰/۸۹^a$



شکل ۶. روند تغییرات نور در سنین و شدت‌های مختلف تردد

۳-۷. آنالیز چندمتغیره (PCA)

تغییرات ایجاد شده در زادآوری گونه‌های درختی در مسیرهای چوبکشی و نقش هریک از فاکتورهای محیطی در نتایج شاخص‌های تنوع زیستی با PCA تحلیل شد و تاثیر متغیرهای محیطی خاک، لاشبرگ، pH و نور در مسیرهای چوبکشی از نظر سطوح مختلف تردد و سنن بهره‌برداری بر شاخص‌های تنوع زیستی (دومیننس، شانون، سیمپسون، مارگالف، یکنواختی) بررسی و نتایج این محورها در این پژوهش آورده شد. میزان بردارهای ویژه در هر یک از تیمارها و فاکتورهای محیطی و شاخص‌های تنوع زیستی نشان‌دهنده مجموعه‌ای از ارزش‌ها است که هر یک نشان‌دهنده و ارائه‌کننده وزن متغیرها روی هر محور هستند. ارزش بردارهای ویژه بین +۱، ۰، -۱ متغیر بوده و بسته به دوری یا نزدیکی به +۱ یا -۱ اهمیت آن مشخص می‌شود.

با مشاهده جدول، مشخص می‌شود محوره‌های ۱ تا ۴، بیش از ۸۴ درصد از واریانس تجمعی قابل تفسیر می‌باشد ولی برای تفسیر ۱۰۰ درصد واریانس تجمعی باید ۱۳ مولفه را تفسیر کرد. اولین شکست نمودار در مولفه دوم اتفاق افتاده و با بررسی این نتایج می‌توان با ۲۸/۲۸ درصد واریانس و ۶۵/۴۵ واریانس تجمعی را تفسیر نمود. مولفه اول دارای مقدار ویژه ۵/۵۷ است که به‌طور چشمگیری از سایر مولفه‌ها بالاتر است. این بدان معنی است که این مولفه به تنهایی قوی‌ترین الگوی ساختاری موجود در میان داده‌های بررسی شده است. مولفه دوم با مقدار ویژه ۴/۲۴ و مولفه سوم با مقدار ویژه ۱/۸۵ در مرتبه‌های دوم و سوم قرار داشتند. به عبارت دیگر مولفه اول با ۳۷/۱۶ درصد و مولفه دوم با ۲۸/۲۸ درصد و مولفه سوم با ۱۲/۳۶، مولفه چهارم ۶/۶۰ درصد واریانس را توضیح می‌دهند، سایر مولفه‌های پنج به بعد سودمندی چندانی برای توضیح واریانس واقعی ندارند و عملاً از نظر علمی و آماری تمرکز به دو مولفه نخست کاملاً بهینه و کافی می‌باشد ولی در مجموع، مولفه‌های اول تا چهارم سهم بسیار بالایی از واریانس کل را تحت پوشش خود قرار می‌دهند و بر این اساس در این تحقیق تا مولفه چهارم تفسیر خواهد شد (جدول ۶).

جدول ۶. مقادیر ویژه، درصد واریانس و درصد واریانس تجمعی برای هر محور

محور	Eigenvalue	واریانس (درصد)	واریانس تجمعی	ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
۱	۵/۵۷۵	۳۷/۱۶۹	۳۷/۱۶۹	۱۶۴۳/۵۵	۱۰۴/۸۹۱	<۰/۰۰۱ *
۲	۴/۲۴۳	۲۸/۲۸۹	۶۵/۴۵۹	۱۲۹۰/۳۷	۱۰۰/۰۳۷	<۰/۰۰۱ *
۳	۱/۸۵۴	۱۲/۳۶۵	۷۷/۸۲۴	۸۴۱/۱۰۵	۹۲/۹۲۳	<۰/۰۰۱ *
۴	۰/۹۹۰	۶/۶۰۲	۸۴/۴۲۶	۵۸۸/۴۷۲	۸۱/۹۴۵	<۰/۰۰۱ *
۵	۰/۸۹۹	۵/۹۹۷	۹۰/۴۲۳	۴۴۱/۲۵۹	۷۰/۳۸۷	<۰/۰۰۱ *
۶	۰/۶۰۱	۴/۰۱۲	۹۴/۴۳۵	۲۲۸/۳۵۶	۵۹/۹۲۰	<۰/۰۰۱ *
۷	۰/۳۳۱	۲/۰۷۹	۹۶/۵۱۵	۱۸/۲۸۶	۴۹/۸۸۷	۱/۰۰۰
۸	۰/۲۳۳	۱/۵۵۴	۹۸/۰۶۹	۰	۴۰/۵۶۶	۰

متغیرهای با بالاترین مقادیر مثبت نزدیک به ۳/۰+ شامل درصد تخلخل خاک، کربن لاشبرگ، عمق لاشبرگ و نیتروژن لاشبرگ بودند که بیشترین سهم را در تعیین جهت مثبت محور دارند. متغیرهای وزن مخصوص ظاهری و مقاومت به نفوذ قوی‌ترین رابطه منفی را داشتند. در مولفه دوم، سنج سیمپسون، شانون و مارگالف دارای قوی‌ترین رابطه مثبت و دومیننس دارای بیشترین رابطه منفی بودند. در مولفه سوم، مجموع واریانس تبیین شده توسط سه مولفه اول به حدود ۷۷/۸۲ درصد می‌رسد و این بدان معنی است که با استفاده از تنها سه محور اصلی می‌توان بیش از ۷۷ درصد از پیچیدگی و اطلاعات سیستم تاثیر عملیات بهره‌برداری در مسیرهای چوبکشی جنگلی را به صورت خلاصه تفسیر نمود. در این مولفه C/N لاشبرگ بیشترین ارزش را داشتند و pH خاک و رطوبت با و نیتروژن لاشبرگ با

بیشترین ارقام منفی را داشتند. در مولفه چهارم که ۶/۶۰ ۸۴/۴۳ درصد واریانس تجمعی را نشان می‌دهد، شدت نور بیشترین ارزش در میان همه متغیرها دارا بود و بعد از آن نسبت کربن به نیتروژن لاشبرگ با قرار داشت و بیشترین رابطه منفی نیز در نیتروژن لاشبرگ دیده شد (جدول ۷).

جدول ۷. مقادیر بردارهای ویژه برای خصوصیات فیزیکی، شیمیایی خاک، لاشبرگ و سنجه‌های زیستی

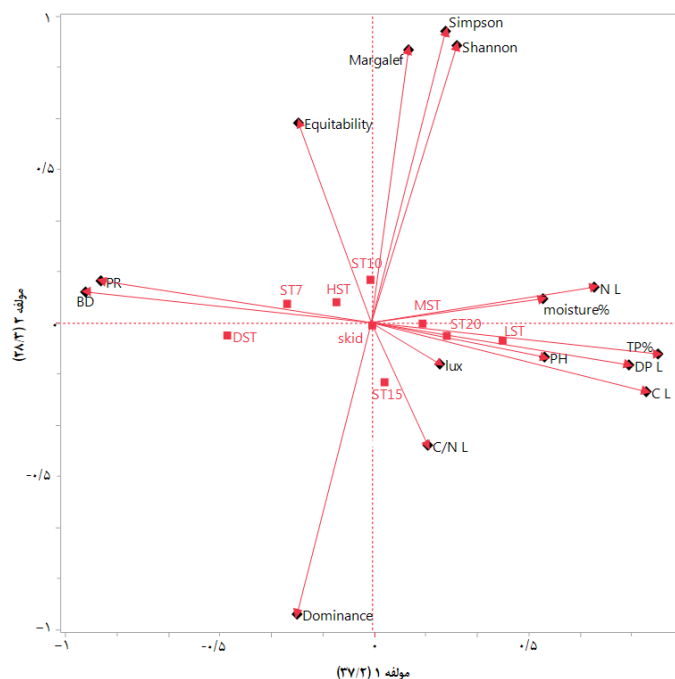
محور ۱	محور ۲	محور ۳	محور ۴
۰/۳۵۶	-۰/۰۶۷	۰/۰۱۵	-۰/۰۲۶
۰/۳۸۰	-۰/۱۱۰	۰/۱۷۱	-۰/۰۶۲
۰/۳۰۸	۰/۰۵۶	-۰/۲۸۰	-۰/۴۳۲
۰/۰۷۸	-۰/۱۹۵	۰/۵۲۲	۰/۴۰۴
۰/۰۹۴	-۰/۰۶۶	-۰/۱۲۶	۰/۷۰۰
۰/۲۳۷	۰/۰۳۸	-۰/۴۹۵	۰/۲۱۶
-۰/۳۹۶	۰/۰۴۹	۰/۱۲۱	-۰/۱۲۷
۰/۳۹۷	-۰/۰۴۹	-۰/۰۸۷	۰/۱۱۶
-۰/۳۷۴	۰/۰۶۶	-۰/۱۸۷	۰/۱۵۷
۰/۲۳۹	-۰/۰۵۴	۰/۴۸۹	-۰/۱۸۲
-۰/۱۰۲	-۰/۴۶۶	-۰/۰۶۲	-۰/۰۸۶
۰/۱۰۲	۰/۴۶۶	۰/۰۶۲	۰/۰۸۶
۰/۱۱۸	۰/۴۴۳	۰/۰۳۰	۰/۰۴۶
۰/۰۵۱	۰/۴۳۶	۰/۰۸۹	۰/۰۴۳
-۰/۱۰۱	۰/۳۱۹	۰/۲۰۹	۰/۰۱۵
عمق لاشبرگ			
کربن لاشبرگ			
نیتروژن لاشبرگ			
نسبت کربن به نیتروژن لاشبرگ			
شدت نور			
درصد رطوبت			
وزن مخصوص ظاهری			
درصد تخلخل			
مقاومت به نفوذ			
اسیدیته			
شاخص دومیننس			
شاخص سیمپسون			
شاخص شانون			
شاخص مارگالف			
شاخص ایکویتابیلیتی			

نمودار تجزیه و تحلیل PCA نشان داد که محورهای اول و دوم ۶۵/۴۶ درصد از کل واریانس را توضیح می‌دهند. مسیرهای با سن ۷ و ۱۰ سال و با شدت تردد زیاد، بیشترین همبستگی را با خصوصیات فیزیکی خاک داشته و مسیرهای چوبکشی با سن ۱۵ و ۲۰ سال بیشترین همبستگی با pH، LUX و خصوصیات لاشبرگ (عمق، C/N) داشتند. با گذشت زمان، میزان تاثیرگذاری خصوصیات فیزیکی خاک در مقایسه با مناطق شاهد کاهش می‌یابد. مسیرهای با شدت تردد کم و متوسط و سنین ۱۵ و ۲۰ سال، هم جهت با خصوصیات لاشبرگ و اسیدیته خاک قرار گرفتند. مسیرهای چوبکشی با شدت تردد دپو و زیاد، فاکتورهای وزن مخصوص ظاهری، مقاومت به نفوذ در یک راستا قرار گرفته‌اند. شدت‌های تردد کم و متوسط نیز با رطوبت، نیتروژن لاشبرگ، تخلخل خاک هم جهت و مقاومت به نفوذ و وزن مخصوص ظاهری و تخلخل خاک در جهت مخالف هم قرار دارند که نشان‌دهنده همبستگی منفی بالای این مشخصه با دو مشخصه دیگر است. شاخص‌های تنوع زیستی سیمپسون و شانون در مقایسه با نتایج سنجه دومیننس دارای بیشترین اختلاف و سنجه یکنواختی دارای رویکرد متفاوت نسبت به نتایج سایر سنجه‌ها بود (شکل ۷).

۳-۸. نتایج تحلیل همبستگی پیرسون

جدول نتایج تحلیل همبستگی پیرسون بین متغیرهای خاک، رطوبت، لاشبرگ و نور بر شاخص‌های تنوع زیستی شانون-وینر، سیمپسون، مارگالف، دومیننس و یکنواختی تحت تاثیر شدت‌های مختلف تردد و مدت زمان‌های متفاوت سپری شده از عملیات چوبکشی نشان داد که بین تخلخل خاک و کربن لاشبرگ با ۰/۸۱ و کربن لاشبرگ ۰/۷۶، مقاومت به نفوذ با وزن مخصوص ظاهری با ۰/۷۶ یک همبستگی قوی مثبت و بین تخلخل و وزن مخصوص ظاهری خاک با ۰/۹۹-، مقاومت به نفوذ و کربن لاشبرگ ۰/۸۹- و وزن مخصوص ظاهری و

کربن لاشبرگ ۰/۷۹- یک همبستگی قوی منفی وجود دارد و همچنین این نتایج نشان داد که لاشبرگ در چرخه مواد مغذی خاک نقش کلیدی دارد. در خصوص شاخص‌های تنوع زیستی نیز بین نتایج سنجه‌های شانون و سیمپسون ۰/۹۷، شانون و مارگالف ۰/۸۹ و سیمپسون و مارگالف ۰/۸۸ بیشترین همبستگی مثبت و بین نتایج سنجه‌های شانون و دومیننس ۰/۹۷- و دومیننس و مارگالف ۰/۸۸- بیشترین همبستگی منفی را با هم داشتند.



شکل ۷. تجزیه و تحلیل PCA از شدت تردد در مسیرهای چوبکشی (۷، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سال) و در شدت تردد (دپو، زیاد، متوسط و کم) و مشخصه‌های فیزیکی خاک (جرم مخصوص ظاهری، تخلخل و مقاومت به نفوذ) و pH، LUX، و مشخصه‌های لاشبرگ (عمق، کربن، نیتروژن و C/N)

۴. بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی میان مدت عملیات چوبکشی زمین پایه بر زادآوری کف جنگل خاک در حوضه آبخیز ۴۵ جنگل‌های هیرکانی و در مسیرهای چوبکشی، در چهار سن بهره‌برداری (۷، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سال) و چهار شدت تردد (دپو، زیاد، متوسط و کم) در مقایسه با مناطق شاهد انجام شد.

نتایج این پژوهش نشان داد که تمام فاکتورهای محیطی اندازه‌گیری شده خاک و لاشبرگ شامل، درصد تخلخل، مقاومت به نفوذ، pH خاک و خصوصیات لاشبرگ (عمق، کربن، نیتروژن و C/N) و شدت نور تحت تاثیر شدت عملیات چوبکشی در سنین و سطوح مختلف تردد و همچنین اثر متقابل سن بهره‌برداری و شدت تردد قرار داشتند و شاخص‌های تنوع زیستی شانون، سیمپسون، مارگالف و اکویتایی نیز متأثر از عملیات چوبکشی بودند. این تحقیق به وضوح نشان می‌دهد که عملیات چوبکشی نه تنها آشفستگی و تخریب موقت، بلکه عامل بلندمدت در تغییرات اکوسیستم جنگل بوده و پیامدهای اکولوژیک آن حتی پس از دو دهه نیز به طور کامل محو نشده است که با تحقیقات مک‌لین^۱ و واین^۲ (۱۹۹۷) مطابقت داشت. عملیات چوبکشی تاثیر مخربی بر زادآوری طبیعی جنگل دارد. اگرچه تعداد کل نهال‌های درختی در

^۱. Mac Lean

^۲. Wein

مسیرهای چوبکشی کاهش کلی را نشان می‌دهد (۵۶ درصد در مقابل ۴۴ درصد شاهد) و نکته بحرانی آن تغییر در ترکیب گونه‌ای است. مثلاً گونه نورپسند پلت رشد ۸ برابری داشته و از شرایط ایجاد شده (نور بیشتر) بهره برده و در مقابل گونه سایه‌پسند، راش کاهش ۶۸ درصدی داشته و این امر یک زنگ خطر اکولوژیکی جدی برای تداوم نسل این گونه پایه، در جنگل‌های هیرکانی محسوب می‌شود. این یافته‌ها تاییدی بر تحقیقات زنر^۱ و برگر^۲ (۲۰۰۸) است. فشردگی خاک ناشی از تردد ماشین‌های چوبکشی، نفوذ ریشه و استقرار بذر گونه‌های حساسی مانند راش را با مشکل مواجه می‌کند. این تغییر، حاکی از برهم خوردن تعادل طبیعی و زادآوری و تهدیدی برای حفظ ذخایر ژنی گونه‌های اصلی است. این تفاوت در تعداد نشان‌دهنده تأثیر عملیات چوبکشی بر ترکیب گونه‌های درختی است. هرچه شدت تردد بیشتر می‌شود، تعداد گیاهان درختی کاهش می‌یابد. در سن بهره‌برداری ۷ تا ۱۵ سال روند افزایشی (از ۶/۳۸ به ۸/۲۹) و از سن ۲۰ سال، روند کاهش نسبی مشاهده شده است (۶/۸۸). این داده‌ها به‌وضوح نشان‌دهنده بازیابی از نظر تعداد و تنوع گونه‌ای درختی در مسیرهای چوبکشی است. در محل‌های دیو (در هر چهار سن بهره‌برداری) کمترین تعداد نهال درختی مشاهده شد که نشان‌دهنده آشفته‌گی شدید و غلبه گیاهان علفی و مغلوب شدن گونه‌های درختی است که با تحقیقات ارلن^۳ و اریکسون^۴ (۲۰۰۰) همخوانی داشت. این امر حکایت از تخریب بالا و غیرقابل بازگشت این مناطق حتی پس از گذشت دو دهه دارد.

لاشبرگ به‌عنوان اولین و حساس‌ترین لایه در تماس با عملیات چوبکشی، به‌شدت تحت تأثیر آشفته‌گی ناشی از عملیات چوبکشی قرار گرفته است. کاهش ۵۰ درصدی عمق لاشبرگ در مسیرهای چوبکشی در مقایسه با مناطق شاهد گویای یک تخریب فیزیکی مستقیم است، این کاهش ناشی از دو فرایند اصلی، خردشدگی و فشردگی و فشرده شدن مستقیم است. همچنین کاهش ۳۵/۴۹ درصدی کربن لاشبرگ در مسیرهای چوبکشی، نشان‌دهنده تخریب کیفی لاشبرگ است. علت این کاهش می‌تواند در اثر بازشدن تاج‌پوشش، تسریع در تجزیه لاشبرگ و خروج فیزیکی کربن باشد. محل‌های دیو به‌طور مداوم و در تمام سنین بهره‌برداری کمترین درصد نیتروژن آلی لاشبرگ را داشتند. با کاهش شدت تردد، یعنی در شدت‌های تردد کم و متوسط و با سپری شدن مدت زمان ۲۰ سال از سن بهره‌برداری بهبود نسبی حاصل شده است. ولی با این حال تمام تیمارها با مناطق شاهد دارای اختلاف معنی‌دار هستند. تغییرات C/N لاشبرگ، یکی از حساس‌ترین شاخص‌ها برای درک سرعت و کیفیت چرخه مواد مغذی در اکوسیستم است. کاهش نسبت C/N لاشبرگ مسیرهای چوبکشی عمدتاً ناشی از کاهش کربن (که شدیدتر بوده) و در برخی موارد کاهش نسبی نیتروژن است که دو علت عمده دارد: تسریع در تجزیه‌پذیری و تغییر در ترکیب شیمیایی لاشبرگ. کاهش نسبت C/N لاشبرگ می‌تواند دو اثر مثبت و منفی داشته باشد. اثر مثبت آن می‌تواند دسترسی سریع‌تر به نیتروژن معدنی برای گیاهان (مانند گیاهان علفی) باشد که به رشد سریع این گونه‌ها کمک می‌کند و اثر منفی آن در بلندمدت (با توجه به کاهش ذخیره کربن، نشان‌دهنده تخلیه سریع بانک مواد آلی خاک باشد) به کاهش حاصلخیزی خاک و جوانه‌زنی و رشد درختانی مانند راش منجر شود. نتایج این پژوهش با تحقیقات برگ^۵ و همکاران (۱۹۹۷)، سهرابی و جورغلامی (۱۴۰۱)، همسو بوده، ولی با تحقیقات نادو^۶ و همکاران (۲۰۱۵) همخوانی ندارد.

شدت نور ورودی به سطح جنگل تحت تأثیر عملیات چوبکشی قرار گرفته است. میانگین شدت نور در مسیرهای چوبکشی به تناسب شدت تردد و مدت زمان سپری شده از سن بهره‌برداری و همچنین اثر متقابل سن بهره‌برداری و شدت تردد متفاوت بود، مثلاً در شدت تردد کم به ۲۸۴ درصد، متوسط ۳۴۰ درصد، در زیاد ۴۷۶ درصد و در دیو به ۶۲۰ درصد افزایش شدت نور (در مقایسه با مناطق شاهد) اندازه‌گیری شد. علاوه بر این با افزایش سن بهره‌برداری، یک روند کاهشی در شدت نور ایجاد نموده، به‌طوری‌که پس از سپری شدن ۲۰ سال میانگین شدت نور در مسیرهای چوبکشی حدود ۲۵-۳۰ درصد کمتر از سن ۷ سال بود، اگرچه نتایج هنوز به‌طور معنی‌داری بالاتر از

1. Zenner

2. Berger

3. Ehrlén

4. Eriksson

5. Berg

6. Nadeau

مناطق شاهد قرار داشت. این تغییرات می‌تواند دلایل متعددی داشته باشد که یکی از آن‌ها باز شدن تاج‌پوشش در مسیرهای چوبکشی، حذف فیزیکی درختان و شاخه‌های پایین است. در حین عملیات چوبکشی در تاج‌پوشش شکاف ایجاد می‌شود و این شکاف باعث بوجود آمدن مسیر مستقیمی برای نفوذ نور خورشید به کف جنگل می‌شود. نتایج این پژوهش به وضوح نشان داد که با افزایش تردد، میزان نور ورودی به داخل توده افزایش می‌یابد. نتایج این تحقیق با پژوهش‌های هاتوری^۱ و همکاران (۲۰۱۳)، باکلی^۲ و همکاران (۲۰۰۳)، ویو^۳ و همکاران (۲۰۱۵) و زمر و برگر (۲۰۰۸) همخوانی دارد.

درصد تخلخل خاک در مسیرهای چوبکشی در مقابل مناطق شاهد تفاوت معنی‌داری را نشان می‌دهد. بر میانگین تخلخل خاک در مناطق شاهد ۶۵/۱۹ درصد بوده، در حالی که این شاخص در مسیرهای چوبکشی ۱۸/۹۶ درصد پایین‌تر از مناطق شاهد بوده است. این امر نشان‌دهنده حساسیت بالای ساختار خاک حتی در ترددهای محدود است و عدم بازیابی تخلخل خاک است. در مسیرهای با تردد شدید، بهبود تخلخل خاک بسیار محدود بوده است. تخلخل خاک در محل دپو مسیر ۲۰ سال به ۵۱/۱۳ درصد رسیده است. این یافته‌ها با نتایج مطالعه سهرابی و همکاران (۱۳۹۴)، توانکار و همکاران (۱۳۸۸)، عزتی (۱۳۹۰)، آمپورتر^۴ و همکاران (۲۰۱۰)، نقدی^۵ و همکاران (۲۰۱۰) و پیچیو^۶ و همکاران (۲۰۱۹) همخوانی دارد.

مقاومت به نفوذ خاک نیز در مسیرهای چوبکشی بیشتر از مناطق شاهد گزارش شد. در محل دپو ۷ سال با ۳/۱۱ (مگاپاسکال) کمترین میزان بازیابی را داشت. این رقم علی‌رغم افزایش بهبودی و کاهش مقدار مقاومت به نفوذ در دپوی ۲۰ سال، همچنان ۷۴/۲ درصد بالاتر از منطقه شاهد است. در مسیرهای دیگر چوبکشی نیز روند بازیابی به‌شدت کند و در تمامی تیمارهای سن و شدت تردد و همچنین اثر متقابل سن بهره‌برداری و شدت تردد، نتایج بدست‌آمده با مناطق شاهد در یک گروه آماری قرار نمی‌گیرند.

pH خاک تحت تاثیر عملیات چوبکشی بوده و خاک این مناطق نسبت به منطقه شاهد اسیدی‌تر شده است. این تغییر از شدت تردد کم به دپو تشدید شده و با گذشت زمان روند افزایش جزئی در pH و کاهش اسیدیته خاک مشاهده شده است. مقایسه روند بازیابی در طول زمان، تفاوت بین تیمارها را برجسته ساخته است. در حالی که مناطق کم تردد با سن ۷ سال تا ۲۰ سال افزایش ۰/۸۴ واحد را نشان دادند (۱۴/۸۶ درصد)، مسیرهای با تردد متوسط حدود ۰/۷۱، تردد زیاد ۰/۸۲ و دپو ۰/۸۹ واحد را نشان دادند. این ارقام نشان می‌دهند که سرعت افزایش pH (نرخ بهبود) در طول ۲۰ سال و در تمامی تیمارهای تخریب شده، تقریباً مشابه و در حدود ۰/۷ تا ۰/۹ واحد است. نکته کلیدی اینجاست که نقطه شروع pH اولیه پس از تخریب در تعیین pH نهایی پس از ۲۰ سال تعیین‌کننده است.

آنالیز مولفه‌های اصلی PCA به‌عنوان یک ابزار چندمتغیره امکان استخراج و تفسیر ابعاد پنهان حاکم بر تغییرات گونه‌های درختی تحت تاثیر فاکتورهای محیطی در مسیرهای چوبکشی را فراهم نموده است. این تحلیل نه تنها روابط پیچیده بین متغیرها را آشکار کرد، بلکه الگوی ساختاریافته‌ای از توالی بازیابی اکوسیستم پس از آشفستگی را ارائه نمود. چهار مولفه اصلی که در مجموع ۶۷ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین می‌کند. البته باید بیان نمود که نقش اصلی در توزیع داده‌ها در مولفه‌های اول و دوم با حدود ۵۰ درصد از کل واریانس که نقطه شکست در نمودار را آشکار می‌کند، اتفاق افتاده است. مقادیر بدست آمده نشان دادند که ۱۵ متغیر موجود در مولفه اول دارای ارزش‌های متفاوتی بودند و درصد تخلخل خاک، کربن لاشبرگ، عمق و نیتروژن لاشبرگ بیشترین سهم را در تعیین جهت مثبت محور دارند. متغیرهای وزن مخصوص ظاهری و مقاومت به نفوذ دارای قوی‌ترین رابطه منفی بودند. در مولفه دوم، سنجح سیمپسون، شانون و مارگالف دارای قوی‌ترین رابطه مثبت و دومینس بیشترین رابطه منفی را نشان دادند. در نمودار PC۱ و PC۲ خوشه‌بندی وزن مخصوص ظاهری، مقاومت به نفوذ در کنار هم قرار گرفته‌اند که نشان از همبستگی درونی بسیار قوی بین این شاخص‌های فشردگی خاک است.

1. Hattori

2. Buckley

3. Wei

4. Ampoorter

5. Naghdi

6. Picchio

این نمودار رابطه معکوس قوی بین تخریب فیزیکی خاک و حفظ لاشبرگ و تخلخل خاک را تایید می‌کند. همچنین بردارهای مربوط به درصد کربن لاشبرگ و C/N لاشبرگ در مجاورت pH و تخلخل خاک نشان‌دهنده این مهم است که به‌شدت به یکدیگر وابسته هستند. تحلیل PCA در این پژوهش نه تنها روابط پیچیده بین متغیرها را کمی‌سازی کرد، بلکه چهارچوبی مفهومی برای درک چند بعدی اثرات چوبکشی ارائه داد. نتایج نشان داد که شدت تردد عاملی تعیین‌کننده تراز گذشت زمان است (ضرورت کاهش تعداد تردد) و اثرات چوبکشی چند بعدی است و ابعاد فیزیکی، ریزاقلمی و تغذیه‌ای به‌نسبت مستقلی ایجاد کرده و بازیابی کامل اکوسیستم نیازمند بهبود همزمان همه ابعاد است (این امر ممکن است دهه‌ها بطول انجامد).

جدول نتایج تحلیل همبستگی پیرسون نشان داد که بین تخلخل خاک و کربن لاشبرگ و کربن لاشبرگ و عمق لاشبرگ، مقاومت به نفوذ با وزن مخصوص ظاهری یک همبستگی قوی مثبت وجود داشته و این مشخصه‌ها به شدت تحت تاثیر کاهش یا افزایش نتایج یکدیگر هستند و بین تخلخل و وزن مخصوص ظاهری خاک، مقاومت به نفوذ و کربن لاشبرگ و وزن مخصوص ظاهری و کربن لاشبرگ یک همبستگی قوی منفی وجود داشته دارد. همچنین این نتایج نشان داد که لاشبرگ در چرخه مواد مغذی خاک نقش کلیدی دارد. در خصوص شاخص‌های تنوع زیستی، نیز بین نتایج سنجه‌های شانون و سیمپسون، شانون و مارگالف و سیمپسون و مارگالف بیشترین همبستگی مثبت و بین نتایج سنجه‌های شانون و دومیننس و دومیننس و مارگالف بیشترین همبستگی منفی وجود داشت.

عملیات چوبکشی مکانیزه منجر به تخریب شدید کیفیت فیزیکی و شیمیایی خاک جنگل‌های هیرکانی می‌شود که مهم‌ترین نمودهای آن افزایش مقاومت به نفوذ، کاهش تخلخل، کربن آلی و نیتروژن کل خاک است. ۲. شدت تردد اولیه و مدت زمان سپری شده از روی عملیات چوبکشی، عامل تعیین‌کننده‌ای در میزان این تخریب است؛ به طوری که مناطق دپو و با تردد زیاد بیشترین آسیب را متحمل شده‌اند. ۳. روند بازیابی طبیعی خاک پس از ترک عملیات، فرآیندی کند و تدریجی است. اگرچه پس از ۲۰ سال بهبودهایی مشاهده می‌شود، اما خاک در مناطق پرتردد به وضعیت اولیه و مشابه مناطق شاهد بازنگشته است. این امر نشان می‌دهد آثار منفی چوبکشی می‌تواند در مقیاس دهه‌ها پایدار بماند. ۴. بین سن بهره‌برداری و شدت تردد اثر متقابل وجود دارد، به این معنا که سرعت و میزان بازیابی در مناطق مختلف، به شدت آسیب اولیه وابسته است.

این پژوهش نشان داد که دو عامل شدت تردد و زمان و همچنین اثر متقابل سن بهره‌برداری و شدت تردد در روند بازیابی متغیرهای اندازه‌گیری‌شده موثر هستند، ولی عامل شدت تردد دارای اثرات بیشتری بوده و گاهاً شدت صدماتی که در اثر شدت‌های تردد بالا بر عرصه‌های جنگلی وارد می‌شود بسیار زیاد بوده و در طول مدت زمان (حتی دو دهه پس از عملیات چوبکشی) ترمیم نیافته‌اند. این پژوهش نشان می‌دهد، عملیات چوبکشی عامل تغییردهنده اکوسیستم با اثرات شدید، چندبعدی و بلندمدت است. اثرات آن فراتر از تخریب فیزیکی موضعی است و با ایجاد آشفته‌گی ترکیبی و پیچیده، باعث تغییر در الگوی نور، فشردگی خاک، تخریب لاشبرگ، آشفته‌گی در چرخه مواد مغذی و در نهایت توالی جامعه گیاهی می‌شود. دستاورد مهم این تحقیق شناخت تاثیر هر یک از عوامل در مواجهه با سایر عوامل و متغیرها و شناخت اثر متقابل هر یک از متغیرها بر متغیرهای دیگر و پوشش گیاهی و تنوع زیستی است.

از نظر مدیریتی نیز پیشنهاد می‌گردد حتی الامکان از ایجاد دپو یا محل‌های تجمع و چرخش مکرر ماشین‌آلات در داخل جنگل جداً پرهیز شود و طراحی مسیرهای چوبکشی و همچنین تعیین شدت‌های عبور و برنامه‌ریزی عملیات باید به‌گونه‌ای باشد که کمترین تردد بر روی هر مسیر صورت پذیرد. مدیران جنگل باید کاربرد سیستم‌های چوبکشی کابلی در عرصه‌های با شیب زیاد و حساس و استفاده از اسکیدرهای سبک‌تر و با چرخ‌های پهن و زنجیری و استفاده از وینچ برای کشیدن چوب را جهت کاهش صدمات به خاک و پوشش گیاهی مد نظر داشته باشند و با توجه به اهمیت لاشبرگ در حفظ چرخه مواد غذایی و عناصر شیمیایی خاک و همچنین جلوگیری از صدمات فیزیکی به خاک در اثر صدمه به لاشبرگ، باید تمهیداتی اندیشیده شود تا حداقل صدمات به این لایه مهم وارد شود.

References

- 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)
- Avon, C., Dumas, Y., & Berges, L. (2013). Management practices increase the impact of roads on plant communities in forests. *Biol, Conserv*, 159, 24–31.
- Ampoorter, E., De Schrijver, A., De Frenne, P., Hermy, M., & Verheyen, K. (2011). Experimental assessment of ecological restoration options for compacted forest soils. *Ecological Engineering*, 37(11): 1734-1746.
- Alef, K., & Nannipieri, P. (1995). *Methods in applied soil microbiology and biochemistry* Academic Press. London.
- 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. *Can J Res* 36:2065–2079.
- Buckley, D.S., Crow, T.R., Nauertz, E.A., & Schulz, K.E. (2003). Influence of skid trails and haul roads on understory plant richness and composition in managed forest landscapes in Upper Michigan. *USA. For. Ecol. Manage*, 175, 509–520.
- Bormann, F.H., & Likens, G.E. (1979). *Pattern and Process in a Forested Ecosystem*, Springer-Verlag, New York.
- Crawford, L.J., Heinse, R., Kimsey, M.J., & Page-Dumroese, D.S. (2021). Soil sustainability and harvest operations: A review. *USDA Forest Service, Fort Collins, CO*.
- Cambi, M., Certini, G., Neri, F., & Marchi, E. (2015). The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest Ecol Manag*, 338, 124–138.
- Ezzati, S. and 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.
- Elemans, M. (2004). Light, nutrients and the growth of herbaceous forest species. *Acta Oecol*, 26, 197–202.
- Ehrlen, J., & Eriksson, O. (2000). Dispersal limitation and patch occupancy in forest herbs. *Ecology* 81, 1667–1674.
- Feller, M.C. (2005). Forest harvesting and streamwater inorganic chemistry in western North America: a review. *J. Am. Water Resour. Assoc*, 41, 785–811.
- Greacen, E.L., & Sands, R. (1980). Compaction of forest soils: a review. *Australian Journal of Soil Research*, 18, 163-189.
- Hattori, D., Kenzo, T., Inino, K.O., Kendawang, J.J., Ninomiya, I., & Sakurai, K. (2013). Effects of soil compaction on the growth and mortality of planted dipterocarp seedlings in a logged-over tropical rainforest in Sarawak, Malaysia. *For. Ecol.Manage*, 310, 770–776.
- Hope, G.D. (2007). Changes in soil properties, tree growth, and nutrition over a period of 10 years after stump removal and scarification on moderately coarse soils in interior British Columbia. *Forest Ecology and Management*, 242, 625-635.
- 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.
- 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., Nasirian, A., & Labelle, E.R. (2018). Ecological restoration of compacted soil following the application of different leaf litter mulches on the skid trail over a five-year period. *Sustainability*, 10, 2148.
- Jarret, P. (2004). *Guide des Sylvicultures*. Office National des Forêts, Chênaie atlantique, Lavoisier.
- Kian Mehr, A., Hojjati, M., & Mahmoudi, M.B. (2021). Study of quantitative and qualitative characteristics of trees and soil fertility in pure and mixed stands of beech and hornbeam. *Scientific Quarterly of Forest Research and Development*, 8(1), 81-95. (in Persian)
- Kapfer, J., Hédli, R., Jurasinski, G., Kopecký, M., Schei, F.H., & Grytnes, J.A. (2017). Resurveying historical vegetation data – opportunities and challenges. *Appl Veg Sci* 20, 164–171.
- 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. *FOREST ENGINEERING (R PICCHIO, SECTION EDITOR)*, 8, 20–37.
- Lundbäck, M., Häggström, C., & Nordfjell, T. (2021). Worldwide trends in methods for harvesting and extracting industrial roundwood. *Int J Forest Eng* 32, 202-215.

- 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.
- 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. *For Ecol Manage* 231, 94-104.
- Lindenmayer, D.B., Margules, C.R., & Botkin, D.B. (2000). Indicators of biodiversity for ecologically sustainable forest management. *Conserv. Biol*, 14(4), 941-950.
- Mariotti, B., Hoshika, Y., Cambi, M., Marra, E., Feng, Z., Paoletti, E. & Marchi, E. (2020). Vehicle-induced compaction of forest soil affects plant morphological and physiological attributes: A meta-analysis. *Forest Ecol Manag* 462, 118004.
- Mercier, P., Aas, G. & Dengler, J. (2019). Effects of skid trails on understory vegetation in forests: A case study from Northern Bavaria (Germany). *Forest Ecol Manag* 453, 117579.
- Marvi-Mohajer, M. (2006). *Forestry and Forest Breeding*. Tehran University Press, 388.
- Maschinski, J.T., Kolb, E., Smith, E. & Phillips, B. (1997). Potential impacts of timber harvesting on a rare understory plant, *Clematis hirsutissima* var. *arizonica*. *Biol. Conserv.* 80, 49-61.
- Meier, A.J., Bratton, S.P. & Duffy, D.C. (1995). Possible ecological mechanisms for loss of vernal herb diversity in logged.
- 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.
- Nadeau, O., Stevenson, R., Jébrak, M. (2016). Evolution of Montviel alkaline-carbonatite complex by coupled fractional crystallization, fluid mixing and metasomatism — part I: Petrography and geochemistry of metasomatic aegirine-augite and biotite: Implications for REE-Nb mineralization, *Ore Geology Reviews*, 72, 1143-1162.
- Naghdi, R., Lotfalian, M., Bagheri, I., & Jalali, A.M. (2009). Damages of skidder and animal logging to forest soils and natural regeneration. *Croat. J. For. Eng.* 30: 141-149.
- Nagaike, T., Kamitani, T., & Nakashizuka, T., (2005). Effects of different forest management systems on plant species diversity in a *Fagus crenata* forested landscape of central Japan. *Can. J. For. Res.* 35, 2832-2840.
- 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.
- Reader, R.J., & Bricker, B.D. (1992). Response of five deciduous forest herbs to partial canopy removal and patch size. *Am. Midl. Nat.* 127, 149-157.
- Sohrabi, H., Jourgholami, M., & Jafari, M. (2019). Evaluation of changes in physical, chemical and biological characteristics of soil 25 years after logging operations in Khairud forest. *Forest and Wood Products. Journal of Natural Resources of Iran*, 73(4), 415.
- Solgi, A., & Najafi, A., (2014). The impacts of ground-based logging equipment on forest soil. *J. For. Sci.* 60, 28-34.
- Skov, F. (1997). Stand and neighbourhood parameters as determinants of plant species richness in a managed forest. *J. Veg. Sci.* 8, 573-578.
- Swift, M., Heal, o.W., & Anderson J.M. (1979). *Decompositon in terrestrial ecosystems*, Blackwell, Oxford.
- Singh, J.S., & Gupta, S.R. (1977). Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystem. *The Botanical Review*, 43, 346-349.
- Weland, N. (2009). Diversity and trophic structure of the soil fauna and its influence on litterdecomposition in deciduous forests with increasing tree species diversity, PhD thesis, Gottingen University, 239.
- Wolf, A.T., Parker, L., Fewless, G., Corio, K., Sundance, J., Howe, R. & Gentry, H. (2008). Impacts of summer versus winter logging on understory vegetation in the Chequamegon-Nicolet National Forest. *For. Ecol. Manage.* 254, 35-45.
- Whigham, D.F. (2004). Ecology of woodland herbs in temperate deciduous forests. *Ann Rev Ecol Evol*, 35, 583-621.
- Wei, L., Villemey, A., Hulin, F., Bilge, I., Yann, D., Chevalier, R., Archaux, F. & Gosselin, F. (2015). Plant diversity on skid trails in oak high forests: A matter of disturbance, micro-environmental conditions or forest age? *Forest Ecology and Management*, 338, 20-31.
- 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. *USA. For. Ecol. Manage.* 256, 1785-1794.