



Lorestan University

Applied Research in Natural Resources Engineering

Journal Homepage: <https://arne.lu.ac.ir/>



Investigation of the Effect of Slope Position on the Recovery Level of Physical Properties of Compacted Soils Caused by Harvesting Operations Using Ground

Moghdad Jourgholami ¹ and Mehdi Babaloo ¹

1. Professor, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, Corresponding Author. Email: migholami@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 27 February 2026
Received in revised form 12 June 2026
Accepted 29 May 2026
Available online 29 June 2026

Keywords:
Forest harvesting, skid trail, slope position, ground-based skidding

ABSTRACT

Any interference in the forest ecosystem, if not carried out systematically and rationally, disrupts the ecological balance. Forest soil, as the origin of all fundamental changes in the forest, holds particular importance. Forest soils, due to their high organic matter content, have low bulk density, high porosity, high permeability, and low resistance, making them sensitive to compaction and shear stresses. Soil compaction is a term often used to describe general conditions in a forest stand after skidding operations, although various conditions including soil muddiness and slippage, disturbance, and soil displacement may occur. This study investigated the effect of slope position (shoulder, backslope, footslope, and toeslope) on the recovery rate of soil physical and chemical properties, four years after harvesting operations that were designed on machine wheel ruts compared to undisturbed areas in the Hyrcanian forests of northern Iran. The physical and chemical properties of compacted soils in machine wheel ruts showed significant differences among slope positions. Bulk density, penetration resistance, soil moisture, total stability, and sand were significantly lower at the toeslope position than the values recorded at the shoulder and backslope positions. Conversely, total porosity, macroporosity, silt, and clay were higher at the toeslope than at the shoulder and backslope positions. The highest levels of recovery of soil physical properties were found at the toeslope, followed by the backslope, and lastly at the shoulder position. However, the results indicated that complete recovery of soil physical and chemical properties compared to undisturbed areas was not achieved even after a four-year period.

Cite this article: Jourgholami, M., & Babaloo, M., (2026). Investigation of the Effect of Slope Position on the Recovery Level of Physical Properties of Compacted Soils Caused by Harvesting Operations Using Ground. *Applied Research in Natural Resources Engineering*, 1 (1), <https://doi.org/10.22034.arne.2026.1.1.8>



© Author(s) retain the copyright.

DOI: <https://doi.org/10.22034.arne.2026.1.1.8>

Publisher: University of Lorestan.

Introduction

Any human intervention in forest ecosystems, if not conducted according to fundamental and reasonable principles, disrupts the ecological balance, with forest soil—the origin of all essential transformations in the forest—being of particular importance. Forest soils, characterized by high organic matter content, low bulk density, high porosity, high permeability, and low mechanical resistance, are inherently sensitive to compaction and shear stresses induced by heavy machinery operations. Soil compaction, defined as the reduction of pore space through the compression of soil particles, is a widespread consequence of ground-based skidding operations during timber harvesting. This process decreases macroporosity, increases bulk density, reduces hydraulic conductivity and infiltration capacity, and impairs root penetration and gas exchange, ultimately affecting forest productivity and ecosystem health. While numerous studies have examined the immediate effects of skidding on soil properties, the recovery dynamics of compacted forest soils remain insufficiently understood, particularly regarding the influence of topographic factors. Landscape position plays a critical role in regulating hydrological processes, soil formation, organic matter accumulation, and nutrient cycling through mechanisms including water redistribution, erosion, and sediment transport. Understanding how slope position affects the natural recovery of compacted soils is essential for developing sustainable forest management practices and planning appropriate restoration interventions. The Hyrcanian forests of northern Iran, recognized as a UNESCO World Heritage site, represent ecologically valuable ecosystems where ground-based skidding is commonly practiced. This study investigates the effects of slope position (shoulder, mid-slope, and toe-slope) on the recovery of soil physical properties four years after skidding operations in these forests, providing critical insights for managing compaction impacts and guiding future harvesting practices.

Methodology

This study was conducted in the Gorazbon section of the Kheyroud Educational and Research Forest in the Hyrcanian forests of northern Iran. Four skid trails with concave slope morphology, similar in elevation, aspect, and vegetation composition, were selected, all subjected to skidding operations during summer 2014. Three slope positions (shoulder, mid-slope, and toe-slope) were identified on each trail, with undisturbed reference plots established 20 meters adjacent to each skid trail. Within each slope position, 20 m × 4 m (trail width) plots were randomly established. Along each plot, three measurement lines were randomly selected at 4-meter intervals, with three sampling points per line: one on the right wheel track, one on the left wheel track, and one between tracks. Soil samples were collected from the 0-10 cm depth using metal cylinders (5 cm diameter, 5 cm height) for bulk density determination, along with 2-3 kg bulk samples for physical analysis. Measured parameters included bulk density, total porosity, macroporosity, penetration resistance, soil moisture content, and particle size distribution (sand, silt, and clay percentages). Statistical analysis employed one-way ANOVA following normality (Kolmogorov-Smirnov) and homogeneity of variance (Levene's test) verification, with significant differences determined using Tukey's test at $\alpha=0.05$.

Results and Discussion

The results demonstrated that slope position significantly influenced the recovery of soil physical properties four years after skidding operations. Bulk density and penetration resistance were significantly lower at the toe-slope position (1.21 g/cm³ and 1.14 MPa, respectively) compared to shoulder (1.29 g/cm³ and 1.73 MPa) and mid-slope positions (1.25 g/cm³ and 1.41 MPa). Conversely, total porosity, macroporosity, silt, and clay content were highest at the toe-slope, reflecting greater recovery and sediment deposition. Soil moisture content followed a similar pattern, with the toe-slope (36.51%) showing significantly higher moisture than the shoulder (21.47%) and mid-slope (29.34%) positions. All measured parameters remained significantly different from undisturbed reference values after four years, indicating incomplete recovery. The shoulder position exhibited the lowest recovery across all parameters, attributed to greater surface runoff, soil erosion, and organic matter depletion from upper slope positions. The concave slope morphology facilitated water and sediment accumulation at the toe-slope, enhancing physical recovery through improved moisture conditions and organic matter retention. These findings align with previous studies demonstrating that topographic position fundamentally regulates soil formation processes, hydrological dynamics, and nutrient redistribution. The observed recovery gradient (toe-slope > mid-slope > shoulder) reflects the combined effects of water-driven translocation, erosion intensity, and organic matter redistribution along the slope. The persistent differences between treated plots and reference areas emphasize that four years is insufficient for complete soil recovery, particularly for penetration resistance and macroporosity, which may require 10-20 years for surface layers and up to 50-100 years for deeper compacted horizons.

Conclusion

This study confirms that slope position significantly influences the recovery of soil physical properties following ground-based skidding operations in the Hyrcanian forests. The toe-slope exhibited the highest recovery levels for bulk density, porosity, penetration resistance, moisture content, and texture parameters, followed by mid-slope and shoulder positions. However, complete recovery to pre-harvest conditions was not achieved within the four-year period across any slope position, underscoring the long-term nature of soil compaction impacts in forest ecosystems. These findings have important implications for sustainable forest management, suggesting that harvesting operations should consider topographic position when planning skid trail locations and timing. To minimize long-term soil degradation, managers should avoid skidding on upper slopes and shoulder positions where recovery is slowest, prioritize operations during dry conditions to reduce compaction severity, and implement protective measures such as brush mats and water diversion structures. The results support the hypothesis that slope position serves as a critical driver of soil recovery processes through its influence on hydrology, erosion, and organic matter dynamics. Future research should extend these investigations to convex slopes and longer temporal scales, while exploring the role of site-specific factors including soil type, vegetation composition, and operational intensity in modulating recovery rates across different topographic settings.



بررسی اثر موقعیت شیب بر سطح بازیابی مشخصه های فیزیکی خاک های فشرده در اثر عملیات بهره برداری با استفاده از ماشین آلات چوبکشی زمین-پایه

مقداد جورغلامی^۱ و مهدی بابالو^۱

۱. گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، نویسنده مسئول. رایانامه: mjgholami@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۲ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۸ کلیدواژه ها: بهره برداری جنگل، مسیر چوبکشی، موقعیت شیب، چوبکشی زمین-پایه	هر گونه دخالت در اکوسیستم جنگل اگر به طور اصولی و معقولانه صورت نگیرد، سبب به هم خوردن تعادل اکوسیستم می شود. در این میان خاک جنگل که مبدا همه تحولات اساسی در جنگل است از اهمیت خاصی برخوردار است. خاک های جنگلی به دلیل داشتن مواد آلی زیاد، دارای وزن مخصوص کم، خلل و فرج زیاد، نفوذپذیری زیاد و مقاومت کم هستند، در نتیجه نسبت به کوبیدگی و تنش های برشی حساس اند. کوبیدگی خاک عبارتی است که اغلب برای توضیح شرایط کلی در یک توده جنگلی بعد از عملیات چوبکشی استفاده می شود، اگر چه شرایط مختلفی شامل گلی و لغزنده شدن خاک، بهم خوردگی و جابجایی خاک ممکن است رخ دهد. در این تحقیق عوامل موقعیت شیب (یال، وسط شیب؛ شیب پستی و پایین شیب؛ پنجه شیب) بر سرعت بازیابی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، ۴ سال پس از عملیات بهره برداری که در محل رد چرخ های ماشین در مقایسه با مناطق دست نخورده در جنگل های هیرکانی شمال ایران طراحی شده بود، بررسی شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک های فشرده در محل رد چرخ های ماشین تفاوت های معنی داری در میان موقعیت های شیب از خود نشان دادند. وزن مخصوص ظاهری، مقاومت به نفوذ، رطوبت خاک، پایداری کل و ماسه به طور معنی داری در موقعیت پایین شیب کمتر از مقادیر ثبت شده در موقعیت های یال و وسط شیب بودند. بر عکس، تخلخل کل، تخلخل درشت، لای و رس در پایین شیب از موقعیت یال و وسط شیب بالاتر بودند. بالاترین سطوح بازیابی خصوصیات فیزیکی خاک در پایین شیب و بعد به ترتیب وسط شیب و در آخر در موقعیت یال یافت شدند. هرچند نتایج نشان داد که بازیابی کامل خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در مقایسه با مناطق دست نخورده حتی بعد از یک دوره چهار ساله نیز محقق نشده است.

استناد: جورغلامی، مقداد و بابالو، مهدی. (۱۴۰۵). بررسی اثر موقعیت شیب بر سطح بازیابی مشخصه های فیزیکی خاک های فشرده در اثر عملیات بهره برداری با استفاده از ماشین آلات چوبکشی زمین-پایه. *پژوهش های کاربردی مهندسی منابع طبیعی*، ۱ (۱)، ۹۶-۱۰۸. <https://doi.org/10.22034.arne.2026.1.1.8>



© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه لرستان.

مقدمه

هر گونه دخالت در اکوسیستم جنگل اگر به طور اصولی و معقولانه صورت نگیرد، سبب به هم خوردن تعادل اکوسیستم می‌شود (Jourgholami et al., 2018a). در این میان خاک جنگل که مبدا همه تحولات اساسی در جنگل است از اهمیت خاصی برخوردار است. خاک‌های جنگلی به دلیل داشتن مواد آلی زیاد، دارای وزن مخصوص کم، خلل و فرج زیاد، نفوذپذیری زیاد و مقاومت کم هستند، در نتیجه نسبت به کوبیدگی و تنش‌های برشی حساس‌اند (Jourgholami et al., 2018b). کوبیدگی خاک عبارتی است که اغلب برای توضیح شرایط کلی در یک توده جنگلی بعد از عملیات چوبکشی استفاده می‌شود، اگر چه شرایط مختلفی شامل گلی و لغزنده شدن خاک، بهم خوردگی و جابجایی خاک ممکن است رخ دهد (Majnounian and Jourgholami, 2013). وقتی که خاک کوبیده می‌شود، ذرات و کلوخه‌ها به هم نزدیک‌تر شده و فضاهای خالی کاهش یافته و تراکم خاک افزایش می‌یابد (وزن واحد حجم در سطح معینی از خاک). کوبیدگی حجم فضاهای خالی یا منافذ را در خاک کاهش می‌دهد، به ویژه حجم منافذ بین ذرات که از مولفه‌های موثر بر انتشار گازها در درون خاک هستند. در هنگام کوبیدگی خاک، نسبت فضای منافذ بزرگ کاهش می‌یابد و نسبت منافذ کوچک افزایش می‌یابد. فرایندهای هیدرولوژیکی و مراحل تشکیل خاک توسط شاخص‌های توپوگرافی تنظیم می‌شوند (Krasilnikov et al., 2007; Seibert et al., 2005). موقعیت‌های مختلف منظر اثرات قابل توجهی بر خصوصیات خاک دارند (Brubaker et al., 2018; Zhu et al., 1993). تغییرات در ویژگی‌های توپوگرافی مانند ارتفاع، درصد شیب و جهت شیب به تغییرات زیادی در عوامل اقلیمی و خاک کمک می‌کند که بر تنوع کربن آلی خاک تأثیرگذار است (Chen et al., 2016; Karaca et al., 2018; Zhu et al., 2018). به‌طور کلی، شاخص‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک و همچنین فعالیت‌های آنزیمی تحت تأثیر مواد مادری، پوشش گیاهی، آب و هوا و شرایط توپوگرافی قرار می‌گیرند (Fazlollahi Mohammadi et al., 2017; Zhu et al., 2018). به‌طور کلی، موقعیت شیب و جهت شیب، فرایندهای هیدرولوژیکی و انرژی تابشی خورشید را تنظیم می‌کنند که به نوبه خود میکروکلیمها را در سطوح کوچک‌تر معرفی می‌کند (Chen et al., 2016; Zhu et al., 2018). ویژگی‌های توپوگرافی مانند درصد شیب، شکل (محدب یا مقعر)، موقعیت (یال، وسط شیب و پایین شیب)، و آبراهه‌ها از عوامل مهم، که به نوبه خود، در توسعه و تنوع خواص خاک، چرخه مواد مغذی، نرخ تجزیه مواد آلی و تبادل گازی بین خاک و هوا تأثیرگذار است (Chen et al., 2016; Karaca et al., 2018). در جنگل‌های شمال ایران، میزان رطوبت خاک، کربن آلی و کل نیتروژن و همچنین تنفس میکروبی خاک به‌طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر شکل و موقعیت شیب دامنه قرار دارد (Fazlollahi Mohammadi et al., 2017). در حوزه دریاچه وان ترکیه، Karaca et al. (2018) نشان دادند که موقعیت‌های توپوگرافی مختلف به علت پدیده آبشویی، حمل و انباشت مواد، به‌طور قابل توجهی بر خواص خاک شامل بافت خاک، EC، pH، آهک، مواد آلی و مواد مغذی تأثیر گذاشته است. توپوگرافی از سه طریق بر فرایندهای تشکیل و توسعه خاک تأثیرگذار است: از طریق جذب و حفظ آب در خاک و تأثیر آن بر رطوبت خاک، از دست دادن مواد مغذی خاک توسط فرسایش و انتقال مواد معلق و محلول در آب از یک نقطه به دیگری (Brubaker et al., 1993; Krasilnikov et al., 2018; Zhu et al., 2005). Zhu et al. (2018) نتیجه‌گیری می‌کنند که در منطقه‌ای با پوشش مرتع، کربن آلی خاک به شدت تحت تأثیر ارتفاع و شیب منطقه قرار گرفته است. علاوه بر این، Lozano-García and Parras-Alcantara (2014) دریافتند که کربن آلی خاکی و نیتروژن کل به‌طور قابل ملاحظه‌ای با حرکت از یال به سمت پایین شیب افزایش می‌یابد. خاک جنگل یکی از مولفه‌های مهم در اکوسیستم‌های جنگلی است که دارای ماده آلی زیاد، وزن مخصوص ظاهری کمتر و تخلخل بالاتر هستند (Horn et al., 2004). با وارد کردن تنش مکانیکی از طریق ترافیک ماشین‌های چوبکشی، وزن مخصوص ظاهری خاک افزایش (Ampoorter et al., 2011)، خلل و فرج خاک فشرده شده (Horn et al., 2004) و فشرددگی خاک رخ می‌دهد (Poltorak et al., 2018). پوشش گیاهی کف و لایه لاشبرگی (به عنوان مثال؛ لایه L، F و H) در اثر تردد ماشین‌های چوبکشی به طور قابل ملاحظه‌ای تخریب شده که به نوبه خود منجر به در معرض قرارگیری خاک معدنی در مقابل اثرات بارندگی شده، که منجر به افزایش رواناب و رسوب می‌شود (Jourgholami et al., 2018a).

در بازیابی خاک های تخریب شده ناشی از عملیات چوبکشی و تردد ماشین آلات تمامی خصوصیات فیزیکی خاک شامل وزن مخصوص ظاهری، تخلخل (Marshall, 2000; Lister et al., 2004)، نفوذپذیری (Briggs et al., 2000; Crock et al., 2001)، مقاومت به نفوذ (Han et al., 2006)، شیار یا رد چرخ ناشی از ماشین و کشیدن بینه روی زمین (Sylvia and James, 2006)، رواناب و هدر رفتن خاک (Crock et al., 2001)، عناصر غذایی خاک، نفوذ ریشه در خاک (Greacen and Sands, 1980)، و فعالیت میکروارگانیسم ها (Makineci et al., 2007) و فعالیت میکروارگانیسم ها (Battigelli et al., 2004) مورد بررسی قرار می گیرند. تداوم کوبیدگی خاک و بازیابی خصوصیات فیزیکی خاک بسته به درجه تراکم خاک، عمق لایه های خاک، نوع خاک، پوشش گیاهی و آب و هوا متفاوت است (Rab, 2004). برای بازیابی کوبیدگی لایه های سطحی (۰-۱۰ سانتی متر) ممکن است ۱۰ تا ۲۰ سال زمان یا بیشتر لازم باشد (Jourgholami et al., 2018b) و فشردگی لایه های عمیق تر خاک، برای بازیابی به ۵۰ تا ۱۰۰ سال زمان نیاز است (Greacen and Sands, 1980). مطالعات متعددی از جمله (Rab et al., 2005) نشان دادند که بیشترین تغییرات در لایه سطحی خاک اتفاق می افتد و چون این لایه غنی از عناصر غذایی است، لذا در حاصلخیزی و میزان تولید جنگل نقش حیاتی را داراست. با توجه به تاثیر منفی کوبیدگی بر موجودات زنده خاک، گیاهان و درختان بهبود سریع آن مد نظر است. با این حال تنها در موارد استثنایی که خاک جنگل به شدت کوبیده شده است می توان از ماشین های سست کننده مانند رپیرها (Sinnet et al., 2008) استفاده کرد که این روش ممکن است سبب آسیب شدید به ریشه درختان و جانوران، اختلال در استقرار بذرها، نابودی لایه گیاهی حاضر و تغییر ترکیب لایه علفی شود. بنابراین برای حفظ تنوع و عملکرد اکوسیستم جنگل این روش باید در شدت آسیب و کوبیدگی خاک زیاد و یا هنگامی که سرعت بازیابی طبیعی ناکافی است استفاده شود. در تمامی دیگر خاک های جنگلی، بازیابی خاک وابسته به فرآیند طبیعی است. این مطالعه با هدف تعیین تأثیرات موقعیت شیب دامنه در سطوح بهبود خواص خاک های فشرده شده در مدت چهار سال پس از عملیات چوبکشی در مسیرهای چوبکشی نسبت به منطقه دست نخورده یا کنترل صورت می گیرد.

مواد و روش ها

برای دستیابی به اهداف بیان شده، این تحقیق در بخش گرازین در جنگل آموزشی پژوهشی خیرود انجام می شود. به منظور مطالعه موقعیت شکل دامنه در مقدار بازیابی خاک فشرده شده، چهار مسیر چوبکشی با شکل دامنه مقعر ۴ سال پس از عملیات چوبکشی انتخاب شدند که هر کدام از این مسیرهای چوبکشی از لحاظ ارتفاع، جهت دامنه و گونه گیاهی یکسان هستند. عملیات چوبکشی در این چهار مسیر ذکر شده در تابستان ۱۳۹۳ انجام شد. سه موقعیت شکل دامنه در هر تکرار شامل یال، وسط شیب و پایین شیب و همچنین ناحیه دست نخورده یا شاهد انتخاب شد. در هر موقعیت شیب دامنه، سه قطعه به طور تصادفی پیاده شده و به طور تصادفی یک قطعه نمونه با طول ۲۰ متر و عرض ۴ متر (عرض مسیر) انتخاب می شود که در این قطعه نمونه، ۵ خط اندازه گیری با فاصله ۴ متری از هم جدا می شود و ۳ خط به طور تصادفی برای نمونه برداری انتخاب می شود (Jourgholami et al., 2018b). روی هر خط، سه محل برای نمونه گیری در نظر گرفته می شود، به طوری که یک نمونه در مرکز شیار سمت راست (چرخ راست)، یک نمونه در مرکز شیار سمت چپ (چرخ چپ) و یک نمونه هم در وسط دو شیار در عمق ۰-۱۰ سانتی متری گرفته می شود. در مجاورت هر پلات به فاصله ۲۰ متری از مسیر چوبکشی، در منطقه شاهد در چهار تکرار نیز نمونه برداری انجام می شود تا مقادیر اندازه گیری شده با نمونه شاهد مقایسه شود و روند اثرات، ارزیابی شود. نمونه برداری برای تعیین جرم مخصوص ظاهری خشک خاک با استفاده از سیلندرهایی فلزی با قطر داخلی ۵ و طول ۵ سانتی متر انجام می شود. نمونه های خاک در کیسه های پلاستیکی قرار داده شده و بلافاصله به آزمایشگاه خاکشناسی منتقل می شود تا در مرحله بعد مقدار رطوبت و جرم خشک ظاهری نمونه ها بدست آید و بر اساس آن، جرم مخصوص ظاهری خاک محاسبه شود. در محل هر نمونه، نمونه های خاک پس از برداشتن لایه لاشبرگ از سطح خاک در عمق ۰-۱۰ سانتی متری، به مقدار ۲ تا ۳ کیلوگرم برداشت و در داخل پلاستیک بسته بندی و برچسب گذاری شده و به آزمایشگاه منتقل می شود تا آزمایشات روی این نمونه ها انجام شود و خصوصیات فیزیکی خاک شامل وزن مخصوص ظاهری، تخلخل کل، تخلخل درشت، مقاومت به نفوذ، درصد رطوبت، درصد شن، سیلت و رس مورد اندازه گیری قرار گیرد. طرح آزمایشی با توجه به اینکه پلات ها در تیمارها بطورت تصادفی انتخاب می شوند کاملاً تصادفی خواهد بود. به منظور

تجزیه و تحلیل داده‌ها، ابتدا با آزمون کولموگراف-اسمیرنوف نرمال بودن داده‌ها بررسی می‌شود. همبستگی واریانس بین تیمارها با آزمون لون بررسی می‌شود. به‌منظور بررسی اثر موقعیت شیب دامنه بر مقدار خصوصیات مورد بررسی خاک از تجزیه واریانس استفاده می‌شود. در صورتی که داده‌ها دارای توزیع نرمال بوده و اثر هر یک از عوامل در تجزیه و تحلیل واریانس معنی‌دار باشد، از یکی از آزمون‌های مقایسه‌ای چندگانه برای گروه‌بندی مقدار شاخص‌های بدست‌آمده استفاده می‌شود. در صورتی که عدم نرمال بودن داده‌ها، از آزمون‌های ناپارامتری معادل تجزیه واریانس استفاده می‌شود.

نتایج

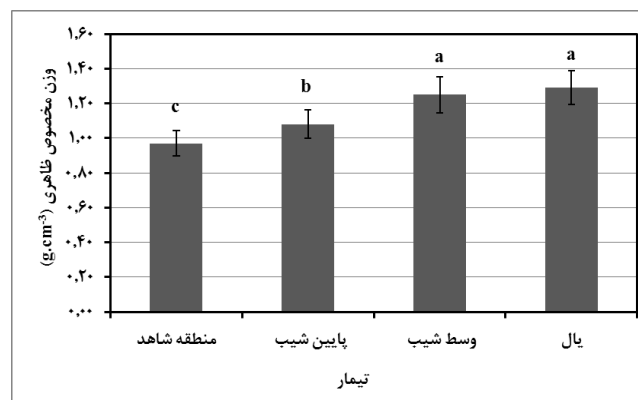
جدول ۱ نتایج تجزیه واریانس یک طرفه اثر تیمارهای موقعیت شیب مختلف بر خصوصیات فیزیکی خاک شامل وزن مخصوص ظاهری، تخلخل کل، تخلخل درشت، مقاومت به نفوذ، رطوبت، ماسه، لای (سیلت) و رس را نشان می‌دهد. نتایج حاصله نشان داد که اثر تیمارهای موقعیت شیب بر شاخصه‌های فیزیکی مورد نظر خاک در سطح اطمینان ۹۹٪ معنی‌دار است.

جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس یک طرفه اثر تیمارهای موقعیت شیب مختلف بر خصوصیات فیزیکی خاک

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	Sig.
وزن مخصوص ظاهری	۲/۴۱	۳	۰/۸	۹۸/۲۴	**۰/۰۰
تخلخل کل	۳۵۶۰/۷	۳	۱۱۸۶/۹	۹۸/۲۴	**۰/۰۰
تخلخل درشت	۴۹۳۳/۰۵	۳	۱۶۴۴/۳۵	۱۴۱/۹۳	**۰/۰۰
مقاومت به نفوذ	۱۲/۶۹	۳	۴/۲۳	۱۵۲/۷۲	**۰/۰۰
رطوبت خاک	۹۳۷۰/۴۵	۳	۳۱۲۳/۴۸	۹۵/۴۸	**۰/۰۰
ماسه	۱۲۴۹/۷۱	۳	۴۱۶/۵۷	۵۴۴/۶۲	**۰/۰۰
لای	۱۶۸۶/۵۷	۳	۵۶۲/۱۹	۴۳۹/۳۳	**۰/۰۰
رس	۶۶/۲۲	۳	۲۲/۰۷	۹/۰	**۰/۰۰

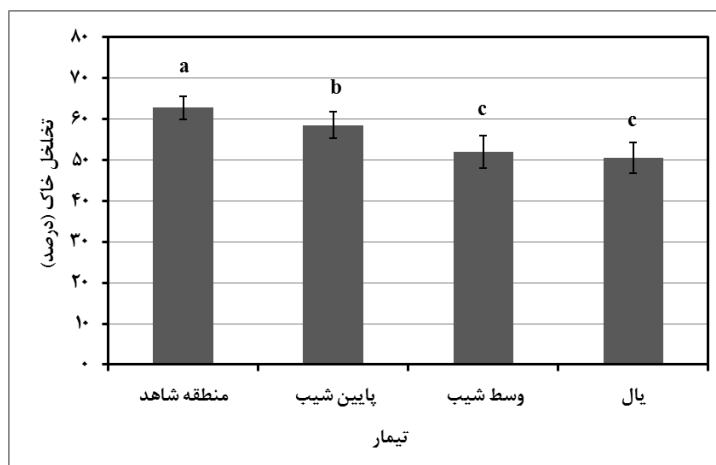
ns عدم معنی‌داری در سطح ۹۵ درصد، * معنی‌دار در سطح ۹۵ درصد و ** معنی‌دار در سطح ۹۹ درصد

شکل ۱ نمودار اثر تیمارهای موقعیت شیب مختلف بر عامل وزن مخصوص ظاهری را نشان می‌دهد. نتایج حاصله نشان داد که تاثیر تیمارهای موقعیت شیب روی عامل وزن مخصوص ظاهری در منطقه شاهد با سه موقعیت شیب در سطح اطمینان ۹۵٪ دارای اختلاف معنی‌داری است. وزن مخصوص ظاهری بین موقعیت‌های یال و وسط شیب به‌ترتیب با مقادیر ۱/۲۹ و ۱/۲۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب دارای بیشترین مقدار بوده ولی اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند (حروف لاتین مشابه). موقعیت پایین شیب بیشترین میزان بازیابی وزن مخصوص ظاهری را از خود نشان می‌دهد، ولی هنوز دارای اختلاف معنی‌داری با منطقه شاهد است.



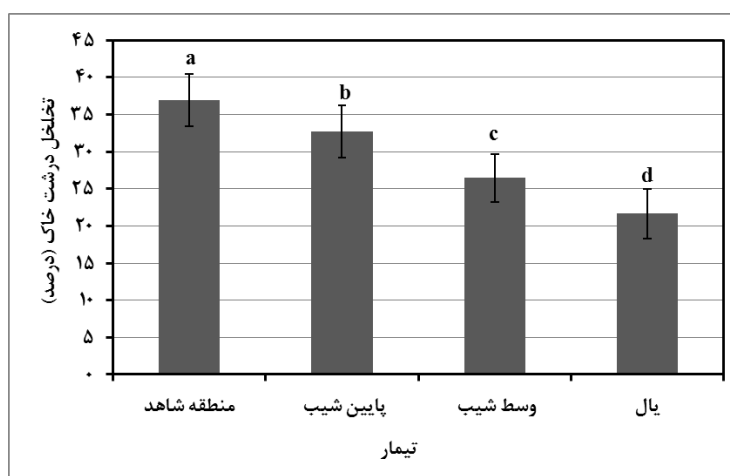
شکل ۱. مقایسه میانگین متغیر وزن مخصوص ظاهری خاک در تیمارهای موقعیت شیب مختلف خاک با آزمون توکی. حروف لاتین نامتشابه نشانگر معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است. بازه نشان داده شده در هر ستون نشان‌دهنده انحراف معیار است.

شکل ۲ اثر تیمارهای موقعیت شیب مختلف بر درصد تخلخل کل خاک را نشان می دهد. نتایج حاصل نشان داد که بین منطقه شاهد و موقعیت های سه گانه یال، وسط شیب و پایین شیب از نظر آماری اختلاف معنی داری وجود دارد. بین مناطق یال و وسط شیب اختلاف معنی دار نیست. به عبارت دیگر در بین سه موقعیت شیب، منطقه پایین شیب با مقدار تخلخل ۵۸/۴۶ درصد، بالاترین میزان تخلخل را دارا بوده، ولی همچنان با منطقه کنترل (شاهد) با مقدار تخلخل ۶۲/۶۹ درصد دارای اختلاف معنی دار است. این بدان معنی است که با گذشت ۴ سال از عملیات چوبکشی میزان تخلخل کل هنوز از مقدار طبیعی (منطقه شاهد) فاصله داشته و به بیانی بازبایی به طور کامل انجام نشده است. در واقع گذشت مدت زمان ۴ سال برای بازبایی تخلخل خاک زمان کمی است.



شکل ۲. مقایسه میانگین متغیر تخلخل خاک در تیمارهای موقعیت شیب مختلف خاک با آزمون توکی

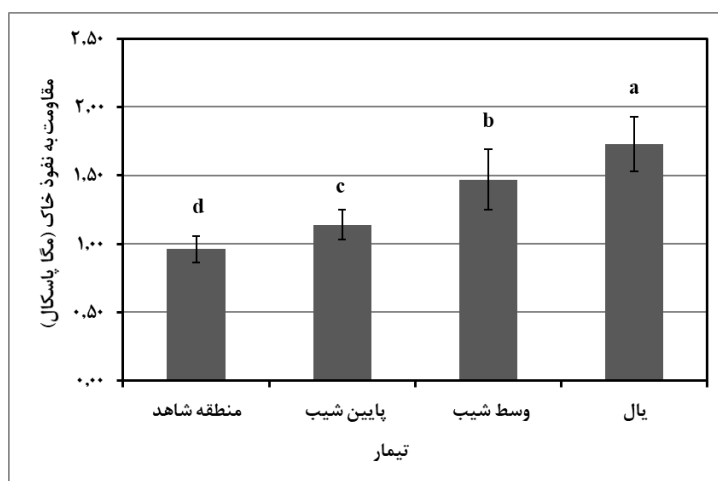
شکل ۳ اثر تیمارهای موقعیت شیب مختلف بر میزان تخلخل درشت خاک را نشان می دهد. نتایج نشان داد که بین منطقه شاهد با سه موقعیت شیب از نظر آماری اختلاف معنی داری وجود دارد. بیشینه تخلخل درشت در پایین شیب با مقدار ۳۲/۷۴ درصد بوده که با تخلخل درشت منطقه شاهد با مقدار ۳۶/۹۸ درصد، اختلاف معنی داری دارد. کمینه میزان ماکروپروزیته (تخلخل درشت) در منطقه یال با مقدار ۲۱/۶۶٪ اندازه گیری شد. در واقع با اینکه تخلخل درشت خاک در موقعیت پایین شیب بیشترین بازبایی را داشته ولی کماکان با منطقه کنترل (شاهد) تفاوت آشکار و معنی داری را نشان داده که می توان چنین توضیح داد که زمان چهار سال برای بازبایی خصوصیت ماکروپروزیته خاک زمان ناکافی است.



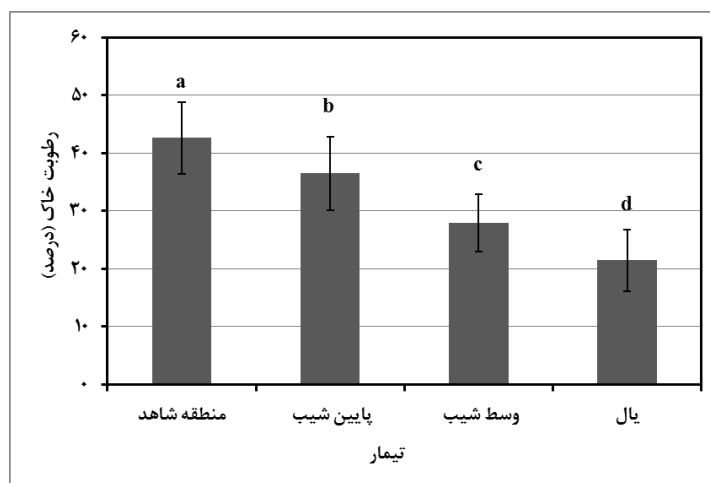
شکل ۳. مقایسه میانگین متغیر تخلخل درشت خاک در تیمارهای موقعیت شیب مختلف خاک با آزمون توکی

شکل ۴ نمودار اثر تیمارهای موقعیت شیب مختلف بر مقاومت به نفوذ خاک را نشان می‌دهد. نتایج حاصل نشان داد که بین موقعیت‌های مختلف شیب، مقدار مقاومت به نفوذ اختلاف معنی‌داری با یکدیگر و با منطقه شاهد دارد. پایین شیب با مقدار مقاومت به نفوذ ۱/۱۴ مگاپاسکال (که کمینه سه موقعیت شیب بوده) با منطقه شاهد (مقدار ۰/۹۶ مگاپاسکال) اختلاف معنی‌داری دارد. بیشینه مقاومت به نفوذ با مقدار ۱/۷۳ مگاپاسکال مربوط به موقعیت یال است که اختلاف معنی‌داری با موقعیت‌های دیگر دامنه و نیز با منطقه کنترل (شاهد) دارد. در واقع می‌توان گفت که با گذشت ۴ سال بیشترین میزان بازیابی خاک در پایین شیب مشاهده شده، با این حال هنوز از حالت طبیعی اولیه (منطقه شاهد) فاصله داشته یا به عبارتی خاک به‌طور کامل بازیابی نشده و مدت زمان ۴ سال برای بازیابی مقاومت به نفوذ خاک، زمان کمی است.

شکل ۵ نمودار اثر تیمارهای موقعیت شیب مختلف بر میزان رطوبت خاک را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که میزان رطوبت خاک در منطقه کنترل (شاهد) با موقعیت‌های سه گانه (یال، وسط شیب و پایین شیب) اختلاف معنی‌داری دارد. با افزایش شیب از موقعیت پایین شیب به طرف یال از میزان رطوبت کاسته شده، بیشینه درصد رطوبت (با مقدار ۴۲/۶۱٪ در منطقه شاهد) اندازه‌گیری شد. در میان موقعیت‌های شیب، کمینه درصد رطوبت با ۲۱/۴۷٪ در یال و بیشینه آن با ۳۶/۵۱٪ در پایین شیب ثبت شد. همانطور که مشخص است بیشترین میزان بهبود در تری (رطوبت) خاک در پایین شیب به وقوع پیوسته، با اینحال هنوز هم اختلاف زیاد (معنی‌داری) با منطقه شاهد داشته که حاکی از آنست که مدت زمان سپری شده (چهار سال) برای بازیابی خصوصیت رطوبت خاک زمان کمی است.

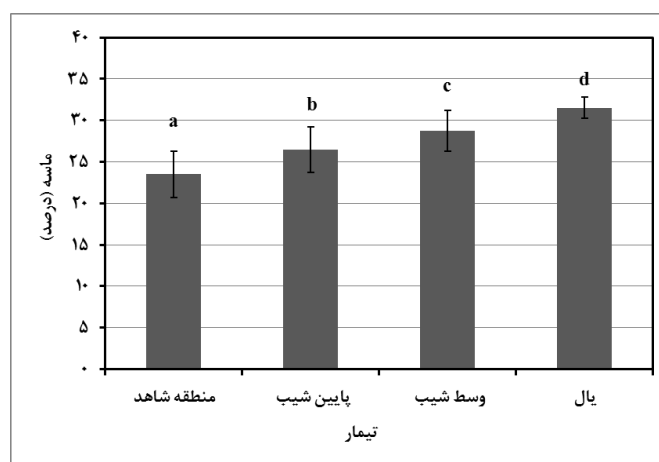


شکل ۴. مقایسه میانگین متغیر مقاومت به نفوذ خاک در تیمارهای موقعیت شیب مختلف خاک با آزمون توکی



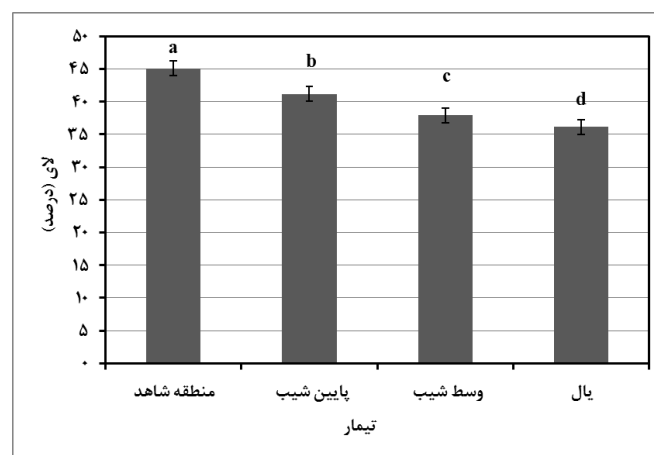
شکل ۵. مقایسه میانگین متغیر درصد رطوبت خاک در تیمارهای موقعیت شیب مختلف خاک با آزمون توکی

شکل ۶ اثر تیمارهای موقعیت شیب مختلف بر میزان ماسه موجود در خاک را نشان می دهد. نتایج حاصله نشان داد که اثر موقعیت شیب بر میزان ماسه موجود در خاک، موقعیت های مختلف مورد ارزیابی معنی دار است. با افزایش شیب از منطقه شاهد به منطقه یال درصد ماسه افزایش می یابد. در بین سه موقعیت شیب، بیشترین میزان ماسه در موقعیت یال با $31/50\%$ و کمترین میزان ماسه در موقعیت پایین شیب با $26/48\%$ ثبت شد. در منطقه کنترل (شاهد) نیز مقدار ماسه موجود در خاک برابر با $23/48\%$ بود که اختلاف معنی داری را در بین نواحی مورد ارزیابی نشان می دهد. همانطوریکه از نتایج مشخص است میزان درصد ماسه (که نماد فرسایش و رخنمون لایه های زیرین خاک است) در منطقه پایین شیب کمترین مقدار را داشته که نشان از انجام بازیابی بیشتر در این موقعیت از شیب می باشد اما هنوز هم با منطقه شاهد دارای اختلاف معنی داری می باشد. به عبارت دیگر گذشت چهار سال برای بازگشت خاک به حالت طبیعی (کنترل فرسایش) و بازیابی خصوصیات آن زمان کمی است.



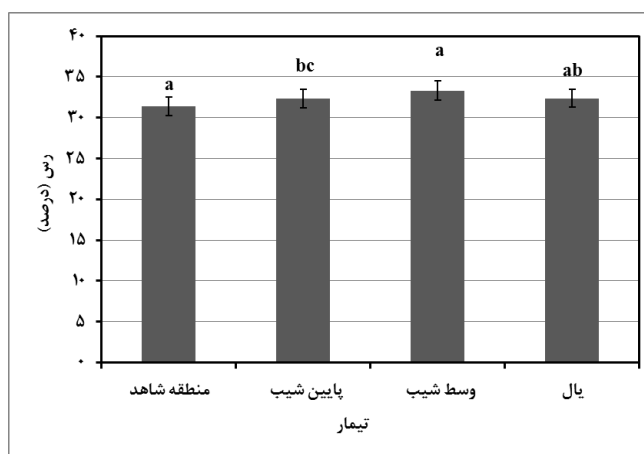
شکل ۶. مقایسه میانگین متغیر درصد ماسه خاک در تیمارهای موقعیت شیب مختلف خاک با آزمون توکی

شکل ۷ اثر موقعیت های شیب مختلف بر میزان لای موجود در خاک را نشان می دهد. نتایج حاصل نشان داد که اثر تیمارهای موقعیت شیب بر میزان درصد لای موجود در خاک موقعیت های مورد ارزیابی معنی دار بوده است. بیشترین میزان لای در منطقه شاهد با $45/08\%$ درصد و کمترین میزان لای در موقعیت یال با مقدار $36/11\%$ درصد اندازه گیری شد. در بین موقعیت های سه گانه شیب، بیشترین مقدار لای در موقعیت پایین شیب و کمترین میزان آن در موقعیت یال اندازه گیری شد. نتایج ثابت می نماید که میزان لای (سیلت) که از اجزاء ریز خاک می باشد با گذشت مدت زمان چهار سال در موقعیت پایین شیب بهبود بیشتری یافته، ولی هنوز با میزان طبیعی آن (منطقه شاهد) تفاوت معنی داری داشته که نشان دهنده کم بودن مدت زمان سپری شده برای بازیابی کامل خصوصیات خاک می باشد.



شکل ۷. مقایسه میانگین متغیر درصد لای خاک در تیمارهای موقعیت شیب مختلف خاک با آزمون توکی

شکل ۸ اثر تیمارهای موقعیت شیب مختلف بر میزان رس موجود در خاک را نشان می‌دهد.



شکل ۸. مقایسه میانگین متغیر درصد رس خاک در تیمارهای موقعیت شیب مختلف خاک با آزمون توکی

نتایج حاصله نشان داد که اثر موقعیت‌های شیب بر میزان رس موجود در خاک در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار بوده است. بیشترین میزان رس در موقعیت وسط شیب با مقدار ۳۳/۳۳ درصد و کمترین مقدار آن در منطقه شاهد با مقدار ۳۱/۴۲ درصد اندازه‌گیری شد. کمینه میزان رس در میان موقعیت‌های شیب، در منطقه پایین شیب با مقدار ۳۲/۳۲ درصد مشاهده شد. در واقع نتایج بدست آمده نشان از ته‌نشینی یا جذب بیشتر ذرات رس خاک در موقعیت میانه (وسط شیب) بوده که این نتیجه علاوه بر انطباق با نتایج پژوهش‌های پیشین با توجه به شکل ذرات رس خاک (پولک‌مانند) و انحناى شیب در موقعیت میانه و شانه شیب (در نوع دامنه مقعر مورد بررسی در این تحقیق) طبیعی بوده و میزان پایین بودن این ذرات ریز رس در موقعیت پایین شیب، حکایت از کاهش روند فرسایش و بهبود خصوصیات خاک را داشته ولی چون هنوز با منطقه کنترل اختلاف معنی‌داری دارد، بیانگر ناکافی بودن مدت زمان سپری شده (چهارسال) به منظور بازیابی خواص خاک است.

بحث

مطالعه حاضر نشان داد که ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک تحت تأثیر توپوگرافی و موقعیت شیب قرار می‌گیرند. به طور خاص، رطوبت خاک و محتوای مواد آلی توسط موقعیت توپوگرافی و شیب تنظیم می‌شود (Krasilnikov et al., 2005; Fazlollahi Mohammadi et al., 2017; Zhu et al., 2018). از آنجا که آب به طور مستقیم در فعالیت‌های شیمیایی و بیولوژیکی و تجزیه و همچنین در تخریب فیزیکی نقش دارد، بنابراین، تغییر رطوبت خاک به طور مستقیم بر تکامل پروفایل خاک و فعالیت‌های بیولوژیکی خاک تأثیر می‌گذارد (Hancock et al. 2010; Chen et al., 2016). همچنین مطالعات قبلی نشان داد که توپوگرافی و موقعیت‌های شیب می‌تواند ناهمگونی را در خواص خاک و فعالیت آنزیم‌ها نشان دهد (Brubaker et al., 1993; Chen et al., 2016; Karaca et al., 2018). بیشترین میزان بازیابی خواص فیزیکی خاک از جمله وزن مخصوص ظاهری خاک، تخلخل کل، تخلخل درشت، مقاومت به نفوذ و پایداری خاکدانه در تیمارهای پایین شیب مشاهده شد. با این حال، مقدار بهبودی خواص فیزیکی خاک در چهار سال پس از عملیات چوبکشی هنوز کمتر از مقادیر منطقه شاهد یا دست‌نخورده است. این نتایج با نتایج مطالعه Moorman et al. (2004) سازگار است که یافتند مواد ذرات و محلول در شکل‌های کاتنا و موقعیت شیب جابجا می‌شوند که به نوبه خود منجر به جداسازی ذرات و فرسایش خاک در یال و وسط شیب و همچنین ته‌نشینی رسوب در پایین شیب می‌شود. به همین ترتیب، نتایج مطالعه حاضر نشان داد که مقادیر بازیابی بیشتر خواص فیزیکی خاک و رطوبت خاک در موقعیت پایین شیب به طور معنی‌داری بیشتر از موقعیت یال و وسط شیب است. از نظر مکانیک خاک، کوبیدگی خاک می‌تواند به صورت کاهش در حجم خلل و فرج خاک (Jahnson & Sallberg, 1960)، تهویه (McNabb & starsev, 1994; McNabb, 1994)

2001) و توانایی نگهداری آب (Froehlich & McNabb, 1983; Rohand et al., 2003)، نسبت پوکی و کاهش در استحکام یا مقاومت خاک (Sand & Greacen, 1980) بیان شود. در نتیجه کوبیدگی خاک، وزن مخصوص ظاهری افزایش پیدا کرده (Horn et al., 2004; Rab et al., 1992) و خاکدانه های خاک جهت گیری جدیدی به خود گرفته (Horn et al., 2004; Rab et al., 1992) و باعث کاهش نفوذپذیری (Grip & Malmer, 1990)، هدایت اشباع هیدرولیکی (Rab, 1994) می شود. این افزایش در وزن مخصوص باعث تغییر در خصوصیات فیزیکی خاک (Rab, 2004; Zhang et al., 2006)، اندازه و حجم تخلخل های خاک به ویژه تخلخل های درشت (Rab et al., 1992) و تبدیل آنها به تخلخل های ریز و افزایش سهم آنها در خاک می شود (McNabb & starsew, 2001). این کاهش در اندازه منافذ خاک کاهش سرعت نفوذپذیری و پایین آمدن قدرت نگهداری آب در خاک و در مناطق شیبدار افزایش حساسیت به رواناب و فرسایش خاک (Crock et al., 2001) را در پی دارد. در مجموع می توان اعلام کرد که برای اتفاق افتادن کوبیدگی در خاک می توان به دلایل مختلفی از جمله اعمال بار بیش از حد ظرفیت باربری خاک، تردد بیش از حد بر روی خاک، پایین بودن قدرت استحکام خاک و کاهش حفرات خاک (میکرو و ماکروپروزیته) اشاره داشت. وزن مخصوص منجر به تغییراتی در ساختمان و هیدرولوژی خاک از جمله کاهش کل خلل و فرج به ویژه منافذ بزرگ (Ares et al., 2005)، افزایش استحکام خاک (Horn et al., 1994)، کاهش نفوذ (Froehlich & McNabb, 1984)، کاهش مبادلات گازی و هوادهی خاک (Horn et al., 1994)، افزایش مقاومت به نفوذ (Ampoorter et al., 2007)، کاهش هدایت الکتریکی اشباع (Greacen & Sands, 1980; Gayoso & Iroume, 1991; Grace et al., 2006)، افزایش خلل و فرج ریز (Kolkaa & Smidt, 2004) گردیده، اثر بسیار مهم ناشی از کاهش نفوذپذیری خاک های به شدت کوبیده شده، رواناب است که باعث کاهش موازنه آب خاک شده و اغلب منجر به فرسایش خاک (Kozłowski, 1999)، کاهش مواد غذایی قابل دسترس، کاهش حاصلخیزی خاک (Adams & Froehlich, 1984) و کارکرد نامناسب فیزیولوژیکی در گیاهان می شود. این شرایط سبب تغییر آب در دسترس، عناصر معدنی، هورمون های رشد و کربوهیدرات ها در توده های مریستمی شده و در نهایت منجر به کاهش رشد گیاهان می شود (Lewis, 1991; Kozłowski, 1999). عملیات چوبکشی تاثیر زیادی بر میزان خواص فیزیکی خاک در مسیرهای چوبکشی در سه تیمار مورد بررسی داشته است. نتایج ما بر اهمیت موقعیت شیب در سطح بازبایی خواص فیزیکی و شیمیایی خاک فشرده در طی یک دوره ۴ ساله پس از برداشت چوب اشاره می کند. پس از تردد ماشین چوبکشی، وزن مخصوص ظاهری خاک و مقاومت به نفوذ قابل توجهی در مسیرهای چوبکشی در هر سه موقعیت شیب متفاوت (شامل: یال، وسط شیب و پایین شیب)، در مقایسه با منطقه شاهد یا دست نخورده افزایش یافته است. مطابق با یافته های ما، مطالعات متعدد نشان داده است که خواص فیزیکی خاک (به عنوان مثال، وزن مخصوص ظاهری خاک و مقاومت به نفوذ) پس از عملیات چوبکشی، افزایش قابل توجهی دارند (Goutal et al., 2013; Fründ & Averdiek, 2016; Jourgholami et al., 2018a). بنابر نتایج حاصل از این تحقیق، تردد ماشین آلات جنگل باعث فشردگی و تخریب خاک های سطحی عمدتاً در لایه ۰ - ۱۰ سانتی متری خاک شده، که متناسب با شیب و جهت چوبکشی درصد فشردگی و تخریب خاک نیز متفاوت است، بیشترین میزان افزایش این عامل در چوبکشی رو به بالا و در موقعیت های بالاتر دامنه و بخصوص در دامنه ای نوع محدب اتفاق می افتد. در دامنه های مقعر با اضافه شدن شیب و نیز عمق این افزایش در وزن مخصوص بیشتر شده و نتایج حاصله نیز این روند افزایش وزن مخصوص ظاهری از پایین شیب به سمت یال را دقیقاً اثبات می نماید. دلیل این موضوع را می توان در کاهش بیشتر خلل و فرج خاک در مناطق بالاتر و نیز افزایش بیشتر میزان مواد آلی در موقعیت های پایین شیب که جزو کلوئیدهای خاک محسوب می شود، جستجو نمود. در تعیین اثر فاکتورهای محیطی بر روند بازبایی این خاکها نیز با توجه به اطلاعات کسب شده در این پژوهش مشخص شد که با افزایش شیب به طرف یال، میزان بازبایی وزن مخصوص ظاهری خاک کمتر و ضعیف تر شده که این موضوع با مقادیر قابل قبول بازبایی در موقعیت پایین شیب (که نزدیکتر به منطقه کنترل بود) تأیید می شود. به نظر می رسد که با افزایش شیب دامنه در دامنه های مقعر روند بازبایی خاک، کمتر شده که علت را می توان با افزایش آبشویی و انتقال مواد آلی از مناطق بالادستی به سمت پایین و کمتر شدن پروزیته (تخلخل) و نیز بالا بودن میزان مقاومت به نفوذ موقعیت های بالاتر نسبت به مناطق پای شیب توجیه نمود. نتایج بدست آمده مربوط به

دامنه‌های مقعر بوده که در دامنه‌های محدب دلیل تشدید آبشویی در این نوع دامنه‌ها، این روند بازگشت خصوصیات خاک به حالت طبیعی قبلی، حتی به مراتب کندتر و در مدت زمان طولانی‌تری انجام می‌گیرد.

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، اثرات موقعیت شیب (به عنوان مثال؛ پایین شیب، وسط شیب و یال) بر سطوح بازایی خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک‌های فشرده‌شده در مسیرهای اسکیدرو طی یک دوره ۴ ساله نسبت به منطقه شاهد یا دست‌نخورده اندازه‌گیری شده است. در مقایسه با مقدار خصوصیات خاک در منطقه شاهد یا دست‌نخورده، بیشترین مقدار بازایی تمام خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک در تیمار پایین شیب و پس از آن به‌ترتیب در تیمارهای وسط شیب و یال رخ داده است. با این وجود، بازایی کامل خواص خاک، در مقایسه با مقادیری که در منطقه شاهد یا دست‌نخورده ثبت شده بودند، در میان تیمارهای موقعیت شیب (به عنوان مثال؛ پایین شیب، وسط شیب و یال) در طی دوره ۴ ساله پس از تردد ماشین رخ نداد. فرضیه تحقیق حاضر، مبنی بر اینکه بازایی خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک‌های فشرده‌شده در مسیرهای چوبکشی، به‌طور قابل توجهی در طول موقعیت‌های شیب متفاوت است، به‌طور قابل توجهی توسط داده‌های این تحقیق پشتیبانی می‌شود. نتایج مطالعه حاضر می‌تواند در چندین منطقه با شرایط ایستگاهی مشابه مورد استفاده قرار گیرد (توده‌های پهن‌برگ با درختان قشور، زمین شیب‌دار، مدیریت جنگل نزدیک به طبیعت)، چون شیب موقعیت مفهومی است که به عنوان پیش‌ران فرایندهای فیزیولوژیکی و هیدرولوژیکی خاک پذیرفته شده است و اثرات مرتبط با آن در ایجاد خواص مختلف خاک ثابت شده است.

References

- Ampoorter, E., De Schrijver, A., De Frenne, P., Hermy, M., Verheyen, K., 2011. Experimental assessment of ecological restoration options for compacted forest soils. *Ecol. Eng.* 37, 1734–1746.
- Ampoorter, E., De Schrijver, A., De Frenne, P., Hermy, M., Verheyen, K., 2011. Experimental assessment of ecological restoration options for compacted forest soils. *Ecol. Eng.* 37, 1734–1746.
- Baldrian, P. 2017. Forest microbiome: diversity, complexity and dynamics. *FEMS Microbiology Reviews*, 41(2): 109–130.
- Bottinelli, N., Capowiez, Y., Ranger, J. 2013. Slow recovery of earthworm populations after heavy traffic in two forest soils in northern France. *Applied Soil Ecology* 73: 130–133.
- Bottinelli, N., Hallaire, V., Goutal, N., Bonnaud, P., Ranger, J. 2013. Impact of heavy traffic on soil macroporosity of two silty forest soils: Initial effect and short-term recovery. *Geoderma* 217–218: 10–17.
- Brubaker S.C., Jones A.J., Lewis D.T., Frank K., (1993). Soil properties associated with landscape position. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:235–239.
- Chen LF, He ZB, Du J, Yang JJ, Zhu X (2016) Patterns and environmental controls of soil organic carbon and total nitrogen in alpine ecosystems of northwestern China. *Catena* 137:37–43
- Ezzati, S., A. Najafi, M.A. Rab and E. Zenner. 2012. Recovery of soil bulk density, porosity and rutting from ground skidding over a 20-year period after timber harvesting in Iran. *Silva Fenn.* 45(4): 521-538.
- Fazlollahi Mohammadi, M., Jalali, S.G., Kooch, Y., Said-Pullicino, D., 2017. The effect of landform on soil microbial activity and biomass in a Hyrcanian oriental beech stand. *Catena* 149: 309–317.
- Han, H-S., Page-Dumroese, D., S-Khan., Tirocke, J. 2006. Effect of slash, machine passes, and soil wetness on soil strength in a cut-to-length harvesting. *International Journal of Forest Engineering*, 17(2): 11-24.
- Horn R., Vossbrink J., Becker S., 2004: Modern Forestry Vehicles and Their Impacts on Soil Physical Properties. *Soil and Tillage Research*, Vol. 79: 207-219
- Horn, R., Vossbrink, J., Becker, S., 2004. Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties. *Soil Till. Res.* 79, 207–219.
- Jourgholami, M., Khajavi, S., Labelle, E.R., 2018a. Mulching and water diversion structures on skid trails: Response of soil physical properties six years after harvesting. *Ecol. Eng.* 123, 1–9.
- Jourgholami, M., Nasirian, A., Labelle, E.R., 2018b. Ecological restoration of compacted soil following the application of different leaf litter mulches on the skid trail over a five-year period. *Sustainability* 10(7), 2148.
- Karaca, S., Gülsel, F., Selçuk, R., 2018. Relationships between soil properties, topography and land use in the Van Lake Basin, Turkey. *Eurasian J Soil Sci* 7: 115–120.
- Kleibl, M., Klvač, R., Lombardini, C., Porhaly, J., Spinelli, R. 2014. Soil Compaction and Recovery after Mechanized Final Felling of Italian Coastal Pine Plantations. *Croat. j. for. eng.* 35:1.
- Krasilnikov PV, García Calderón NE, Sedov SN, Vallejo Gómez E, Ramos BR. 2005. The relationship between pedogenic and geomorphic processes in mountainous tropical forested area in Sierra Madre del Sur, Mexico. *Catena* 62(1): 14–44.
- Lozano-García B, Parras-Alcantara L (2014) Variation in soil organic carbon and nitrogen stocks along a toposequence in a traditional Mediterranean olive grove. *Land Degrad Dev* 25:297–304

- Meyer, C., Luscher, P., Schulin, R., 2014. Enhancing the regeneration of compacted forest soils by planting black alder in skid lane tracks. *Eur. J. For. Res.* 133, 453–465.
- Missanjo, E and Kamanga-Thole, G. 2014. Impact of Site Disturbances from Harvesting and Logging on Soil Physical Properties and *Pinus kesiya* Tree Growth. Hindawi Publishing Corporation. International Scholarly Research Notices. Volume 2014, Article ID 323626.
- Poltorak BJ, Labelle ER, Jaeger D (2018) Soil displacement during ground-based mechanized forest operations using mixed-wood brush mats. *Soil Tillage Res* 179:96–104.
- Reichert, J.M., da Rosa, V.T., Vogelmann, E.S., da Rosa, D.P., Horn, R., Reinert, D.J., Sattler, A., Denardin, J.E. 2015. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. *Soil & Tillage Research* 158: 123–136.
- Seibert, J., Stendahl, J., Sørensen, R., 2007. Topographical influences on soil properties in boreal forests. *Geoderma* 141: 139–148.
- von Wilpert, K and Schaffer, J. 2005. Ecological effects of soil compaction and initial recovery dynamics: a preliminary study. *Eur J Forest Res*, 125: 129–138.
- Wang, S., Wang, X., Ouyang, Z., 2012. Effects of land use, climate, topography and soil properties on regional soil organic carbon and total nitrogen in the Upstream Watershed of Miyun Reservoir, North China. *J Environ Sci* 24: 387–395.
- Zhu, M., Feng, Q., Zhang, M., Liu, W., Qin, Y., Deo, R.C., Zhang, C. (2018). Effects of topography on soil organic carbon stocks in grasslands of a semiarid alpine region, northwestern China. *J Soils Sediments* <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2203-0>