

Research Paper

**Assessment of soil permeability in an exploited area of natural mountain forest
(case study: Shanderman Forest - Guilan Province)****Pejman Dalir Kouhi^{*1}, Ramin Naghdi², Hanieh Alinejad³ and Sanaz Jafari Haftkhani⁴**

1,*- (Corresponding author) Ph.D. Graduate, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Sowmeh Sara, I. R. Iran. (pejman_d67@yahoo.com)

2- Professor, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Sowmeh Sara, I. R. Iran. (rnaghdi@guilan.ac.ir)

3- Undergraduate Student, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Sowmeh Sara, I. R. Iran. (hanialinezhad82@gmail.com)

4- M.Sc. in Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, I. R. Iran. (sanaz.jafarihaftkhani@gmail.com)

Received: 16 September 2024

Accepted: 21 April 2025

Extended Abstract

Background and Objective: Forest harvesting, particularly through the use of heavy machinery, can disrupt soil balance and cause significant physical and chemical alterations. Skidding operations and logging activities often lead to increased bulk density, reduced porosity, and decreased soil permeability, which ultimately result in higher surface runoff, reduced soil moisture, and accelerated erosion. These changes may also negatively affect soil fertility and plant growth. Given the importance of soil permeability in maintaining forest ecosystem stability, this study aimed to assess the effects of logging activities on soil infiltration and selected physical properties across skid trails, log landings, felling sites, and a control area.

Material and Methods: The research was conducted in 2019 in Parcel 7 of the Siyahkesh forests (Series 11) within the Shanderman watershed, which underwent large-scale clear-cutting between 1985 and 1993. Four treatments were examined: log landing, skid trail, felling site, and control (natural forest). In each treatment, three random sampling points were selected, and water infiltration tests were performed using a double-ring infiltrometer. Water column height was recorded at specified intervals until the infiltration rate decline stabilized below 10% over one hour. Soil samples (0–10 cm depth) were collected to determine bulk density, organic carbon content, and texture. Bulk density was measured using the clod method, organic carbon by the Walkley–Black method, and soil texture by Bouyoucos hydrometry. Data were processed in Excel 2016 and statistically analyzed in SPSS, while stepwise regression was used to identify variables influencing infiltration rates. Additionally, cumulative infiltration means were calculated for each treatment, and infiltration curves were drawn. Using PC-ORD 5, relationships between soil physical and chemical properties (organic carbon, bulk density, porosity, sand, silt, and clay content) and treatments were analyzed to evaluate spatial patterns and similarity responses.

Results: Significant differences ($p < 0.01$) in soil texture were observed among treatments. The highest clay content (26.66%) occurred in the control area, while the lowest (8.57%) was recorded in skid trails. The mean organic carbon was highest in the control (4.06%) and lowest in skid trails (1.18%). Analysis of variance revealed significant differences in soil bulk density and porosity

across treatments, with log landings exhibiting a significantly higher bulk density compared to the control ($p < 0.05$). Stepwise regression indicated that bulk density was the only variable significantly affecting infiltration rates ($p = 0.00$). The lowest cumulative infiltration (38.7 mm) occurred in log landings, while the highest (57 mm) was found in the control. Similarly, infiltration trends showed that log landings had the lowest mean infiltration rate (2.4 mm), whereas the control exhibited the highest (57 mm).

Conclusion: The findings demonstrate that forest harvesting and machinery traffic substantially alter soil physical properties, particularly by reducing infiltration capacity. The most pronounced decline in soil permeability was observed in log landings and skid trails, mainly due to compaction from machinery movement and log pressure. In contrast, natural forest areas maintained the highest infiltration capacity, attributed to greater soil porosity. To mitigate these negative impacts, appropriate management practices such as restricting machinery traffic and adopting soil rehabilitation methods are recommended.

Keywords: Bulk density, Depot, Double ring method, Skidding trail.

How to Cite This Article: Dalir Kouhi, P., Naghdi, R., Alinejad, H., and Jafari Haftkhani, S. (2025). Assessment of soil permeability in an exploited area of natural mountain forest (case study: Shanderman Forest - Guilan Province). Forest Research and Development, 11(2), 149-164. DOI: [10.30466/jfrd.2025.55575.1738](https://doi.org/10.30466/jfrd.2025.55575.1738)



Copyright ©2024 Dalir Kouhi et al. Published by Urmia University.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

ارزیابی نفوذپذیری خاک در عرصه بهره‌برداری شده جنگل کوهستانی طبیعی (بررسی موردی: جنگل شاندرمن - استان گیلان)

پژمان دلیر کوهی^{۱*}، رامین نقدی^۲، هانیه علینژاد^۳ و ساناز جعفری هفتخوانی^۴

- ۱- دانش‌آموخته دکتری، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه سرا، ایران. (pejman_d67@yahoo.com)
۲- استاد، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه سرا، ایران. (rnaghdi@guilan.ac.ir)
۳- دانشجوی کارشناسی، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه سرا، ایران. (hanialinezhad82@gmail.com)
۴- کارشناسی ارشد، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران. (sanaz.jafarihaftkhani@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۶

چکیده

مقدمه و هدف: بهره‌برداری از جنگل، به‌ویژه استفاده از ماشین‌آلات سنگین، می‌تواند تعادل خاک را بر هم زده و موجب تغییرات فیزیکی و شیمیایی در آن شود. تردد ماشین‌آلات چوبکشی و عملیات بهره‌برداری، با افزایش جرم مخصوص ظاهری، کاهش تخلخل و کاهش نفوذپذیری خاک همراه است که در نهایت منجر به افزایش رواناب سطحی، کاهش رطوبت خاک و تشدید فرسایش می‌شود. این تغییرات می‌توانند بر حاصلخیزی خاک و رشد گیاهان نیز تأثیر منفی داشته باشند. با توجه به اهمیت نفوذپذیری خاک در حفظ پایداری بوم‌سازگان‌های جنگلی، این پژوهش با هدف بررسی تأثیر فعالیت‌های بهره‌برداری بر نفوذپذیری خاک و برخی ویژگی‌های فیزیکی آن در مسیرهای چوبکشی، دیو، محوطه قطع و مقایسه آن با ناحیه شاهد انجام شد.

مواد و روش‌ها: این پژوهش در سال ۱۳۹۸ در پارسل هفت جنگل‌های سری ۱۱ سیاهکش، حوزه آبخیز شاندرمن، که در اجرای طرح تبدیل طی سال‌های ۱۳۷۲-۱۳۶۴ تحت برداشت گسترده و قطع یکسره در مقیاس وسیع قرار گرفته بود، انجام شد. در این پژوهش، چهار تیمار، شامل دیو، مسیر چوبکشی، محوطه قطع و شاهد (جنگل طبیعی) بررسی شد. در هر تیمار، سه نقطه به‌صورت تصادفی انتخاب شد و آزمایش نفوذ آب با استفاده از نفوذسنج رینگ دویل انجام شد. ارتفاع ستون آب در فواصل زمانی مختلف ثبت شد. آزمایش‌ها تا زمانی ادامه یافت که نرخ کاهش نفوذ طی یک ساعت به کمتر از ۱۰ درصد برسد. برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند جرم مخصوص ظاهری و درصد کربن آلی، از عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری نمونه‌برداری شده و با روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شدند. جرم مخصوص ظاهری (BD) به روش کلوخه،

مقدار کربن آلی به روش والکی و بلک، و بافت خاک به روش هیدرومتری بایکاس تعیین شد. داده‌ها در Excel 2016 پردازش و در SPSS تحلیل آماری شدند. همچنین، متغیرهای مؤثر بر نرخ نفوذپذیری با استفاده از روش رگرسیون گام به گام شناسایی شدند. میانگین مقدار نفوذ تجمعی در زمان‌های مختلف برای چهار تیمار محاسبه و منحنی‌های نفوذ آنها ترسیم شد. علاوه بر این، در نرم‌افزار PC-ORD 5 ارتباط بین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک (درصد کربن آلی، جرم مخصوص ظاهری، درصد تخلخل و درصد شن، رس و سیلت) با تیمارهای پژوهش، بررسی شد و الگوی پراکنش مکانی نمونه‌ها برای تعیین اندازه تشابه در واکنش به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مورد ارزیابی قرار گرفت.

یافته‌ها: بین تیمارهای مختلف از نظر بافت خاک اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد وجود داشت؛ به‌طوری که بیشترین و کمترین درصد رس به‌ترتیب در تیمار شاهد (۲۶/۶۶ درصد) و تیمار مسیر چوبکشی (۸/۵۷ درصد) مشاهده شد. بیشترین میانگین درصد کربن آلی (۴/۰۶) متعلق به منطقه شاهد و کمترین میانگین درصد کربن آلی ۱/۱۸ متعلق به مسیر چوبکشی بود. همچنین نتایج تجزیه واریانس و مقایسه میانگین داده‌های مربوط به جرم مخصوص ظاهری و تخلخل خاک نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای مورد بررسی وجود دارد و میانگین جرم مخصوص ظاهری خاک در تیمار دپو به‌طور معنی‌داری (در حد ۹۵ درصد) بیش از منطقه شاهد بود. در تعیین مهم‌ترین عوامل فیزیکی - شیمیایی خاک مؤثر بر نرخ نفوذپذیری با استفاده از تحلیل رگرسیون گام به گام مشخص شد که تنها متغیر جرم مخصوص ظاهری وارد معادله رگرسیونی شد ($\text{sig} = 0.00$). کمترین میانگین نفوذپذیری تجمعی (۳۸/۷ میلی‌متر) در دپو بود. در بررسی روند نفوذپذیری تجمعی خاک تفاوت معنی‌داری بین مقدار نرخ نفوذپذیری خاک در تیمارهای مورد بررسی با شاهد (جنگل طبیعی) مشاهده شد و نمودار روند نفوذپذیری تجمعی خاک نشان داد که کمترین مقدار میانگین نفوذپذیری تجمعی در دپو (۲/۴ میلی‌متر) و بیشترین میانگین نفوذپذیری تجمعی در تیمار شاهد (۵۷ میلی‌متر) اتفاق افتاده است.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که، بهره‌برداری از جنگل و تردد ماشین‌آلات منجر به تغییرات قابل توجهی در ویژگی‌های فیزیکی خاک، به‌ویژه کاهش نفوذپذیری آن می‌شود. بیشترین کاهش نفوذپذیری خاک در مناطق دپو و مسیر چوبکشی مشاهده شد که ناشی از فشردگی خاک بر اثر تردد ماشین‌آلات و فشار چوب‌آلات بود. در مقابل، جنگل طبیعی بیشترین نفوذپذیری را نشان داد که به دلیل تخلخل بالاتر خاک در این منطقه است. بر این اساس برای کاهش اثرهای منفی بهره‌برداری جنگل بر ویژگی‌های خاک، اتخاذ روش‌های مدیریتی مناسب، مانند محدودسازی تردد ماشین‌آلات و استفاده از روش‌های احیای خاک، توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: جرم مخصوص ظاهری، دپو، روش رینگ دابل، مسیر چوبکشی.

مقدمه

جنگل‌های طبیعی همواره به‌عنوان بهترین پوشش برای حفظ، نگهداری و نفوذپذیری آب مطرح بوده است. اما بنا به نیاز انسان از جنگل‌ها، این عرصه‌ها همیشه دست خوش تغییرات می‌شوند، این تغییرات برای سهولت دسترسی و کاهش هزینه در زمان بهره‌برداری از جنگل انجام می‌شود (Dalir et al., 2021). با ایجاد تغییرات در ویژگی‌های طبیعی جنگل بدون شک کارکردهای آن نیز دچار تغییر می‌شوند. برای جلوگیری یا به حداقل رساندن این تغییرات باید اثرهای این تغییرات به خوبی بررسی و شناسایی شود. یکی از ویژگی‌های اصلی جنگل خاصیت تولید آب، نفوذپذیری خاک جنگل و جلوگیری از تولید رواناب و فرسایش است. پوشش جنگلی با تثبیت خاک، کاهش انرژی جنبشی باران، سبب جذب مقداری زیادی از آب باران می‌شود، که این عمل علاوه بر جلوگیری از تولید رواناب و کاهش تولید رسوب موجب تولید آب سالم و با کیفیت در دسترس مصارف دیگر می‌شود. جنگل‌ها و مراتع سهم قابل توجهی در جلوگیری از فرسایش خاک و بروز سیلاب دارند (Zuazo and Pleguezuelo, 2009). عوامل متعددی در اندازه نفوذپذیری خاک دخالت دارند که از این بین می‌توان به مقدار رطوبت، مقدار مواد آلی موجود در خاک، مقدار فشردگی، بافت و ساختمان خاک به‌عنوان مهم‌ترین آنها نام برد (Shestak and Buss, 2005; Startev and McNabb, 2000). ضروریات اصلی بهره‌برداری مکانیزه از جنگل ایجاد مسیرهای چوبکشی، محل دپوی چوب‌آلات و رفتن افراد بهره‌بردار به داخل جنگل برای انجام مراحل بهره‌برداری است. برای ساختن مسیرهای چوبکشی و دپو، خاک سطحی و مواد آلی موجود در جنگل باید حذف شود و در اثر تردد ماشین‌آلات مختلف و افراد

بهره‌بردار به روی مسیرها، دپو و عرصه‌های بهره‌برداری، خاک در این نواحی دچار تغییراتی می‌شود که این تغییرات اغلب برای افزایش کوبیدگی خاک، کاهش نفوذپذیری و افزایش تولید رسوب و رواناب است (Solgi and Najafi, 2014; Startsev and McNabb, 2000). با تردد ماشین‌آلات بر مسیرهای چوبکشی خاک، در اثر وزن این ماشین‌آلات و وزن بار آنها و با توجه به تعداد تردها بر روی مسیر دچار تغییراتی مانند افزایش تراکم و وزن مخصوص (Matangaran and Kobayashi, 1999)، کاهش خلل و فرج، کاهش ظرفیت نگهداری آب و در نتیجه سبب کاهش مقدار نفوذپذیری می‌شود این قضیه نیز برای دپوی چوب‌آلات جنگلی صادق است (Rab, 2004; Greacen and Sands, 1980; Startsev and McNabb, 2000; Herbuats et al., 1996). در عرصه‌های بهره‌برداری خارج از مسیرهای مشخص شده، تردد ماشین‌آلات به جز در موارد خاص که ضرورت ایجاد می‌کند، انجام نمی‌شود، اما برای امور مراحل مختلف بهره‌برداری مانند قطع، سرشاخه‌زنی و تبدیل و بستن و کشیدن چوب‌آلات به خارج از عرصه کارگران و بهره‌برداران رفت و آمدهایی تا پای درختان دارند که به نوعی می‌تواند کاهش خلل و فرج و کاهش ظرفیت نگهداری آب را بر روی خاک اعمال کند (Giahparvar Foumani et al., 2023). این عوامل همگی با هم سبب می‌شوند مقدار نفوذپذیری در خاک جنگل دچار تغییر شود و در نتیجه کاهش نفوذپذیری پس از وقوع بارندگی اگر مقدار بارش بیشتر از ظرفیت نفوذ خاک باشد آب اضافی به‌صورت رواناب در روی سطح خاک جریان می‌یابد که می‌تواند سبب تولید رسوب و فرسایش و اثرهای زیان‌بار دیگر شود (Gomi et al., 2006; Kolka and Smidt, 2004; Nugent et al., 2003; Hartanto et al., 2003). در طی چند دهه اخیر

(Larsson and Eliasson 2006) نیز در تحقیقی کاربردی‌های مختلف را با کاربری جنگل طبیعی با استفاده از رینگ دوبل مورد بررسی قرار دادند و نتایج آنان نشان داد که کاربری جنگل از بین دیگر کاربری‌ها دارای نرخ نفوذ بیشتری است. (Neris et al. 2012) در تحقیقی تأثیر نوع پوشش‌های جنگلی بر روی ویژگی‌های خاک و نفوذپذیری با استفاده از رینگ دوبل پرداختند، نتایج آنها نشان داد که ویژگی‌های خاک در اثر تغییر نوع پوشش و درصد پوشش‌ها تغییر می‌کند و این نیز سبب تغییر در نرخ نفوذ خاک می‌شود. با توجه به مشکلاتی که در زمینه خطرات ناشی از بهره‌برداری از جنگل وجود دارد، بررسی مقدار نفوذپذیری خاک قسمت‌های مختلف جنگل که مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد، می‌تواند نگاه ما را به طبیعت بهتر کرده و از مشکلات و تأثیرات فعالیت‌های انسانی بر روی عرصه‌های طبیعی آگاه کند. با توجه به مطالب گفته‌شده در بالا هدف از این پژوهش، بررسی ویژگی‌های خاک و مقدار نفوذپذیری آن در بخش‌های مختلف یک عرصه بهره‌برداری که شامل منطقه بهره‌برداری شده در داخل پارسل و پای درختان مورد بهره‌برداری، مسیرهای چوبکشی و دپوی چوب‌آلات جنگلی و مقایسه آنها با منطقه شاهد و دست نخورده است.

مواد و روش‌ها

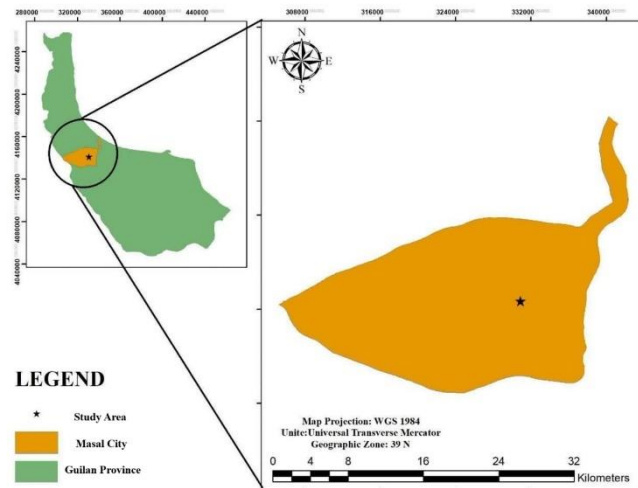
منطقه مورد بررسی

پارسل هفت جنگل‌های سری ۱۱ سیاهکش به وسعت ۴۰ هکتار در حوزه آبخیز شاندرمن در حدود ارتفاعی ۹۵۰-۵۰ متر از سطح دریا، جزء جنگل‌های پایین‌بند تا میان‌بند است که طی سال‌های ۷۲-۶۴ به شیوه قطع یکسره بهره‌برداری شد. این بررسی در سال ۱۳۹۸ و پس از گذشت ۲۶ سال از زمان بهره‌برداری انجام شد. این منطقه در طول ۴۹ درجه تا ۴۹ درجه و ۳۰ دقیقه و

استفاده از ماشین‌آلات مکانیزه در عملیات‌های بهره‌برداری و حمل‌ونقل چوب برای بهبود بخشیدن به کمیت و کیفیت تولید چوب و نیز کاهش هزینه‌های تولید افزایش چشمگیری داشته است (Giahparvar et al., 2023). هر چند در زمینه تأثیرات بهره‌برداری مکانیزه بر روی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک جنگل بررسی‌های زیادی انجام شده است (Najafi et al. 2008) و (Naghdi et al. 2013)، اما در زمینه تأثیر بهره‌برداری مکانیزه چوب بر روی مقدار نفوذپذیری خاک در جنگل‌های کشور ما بررسی‌های زیادی انجام نشده است و مواردی از پژوهش‌ها که بر روی تأثیر دام بر نفوذپذیری انجام شده می‌توان به بررسی (Kohandel et al. 2010) شدت نفوذپذیری و رطوبت خاک را در سه تیمار مورد بررسی قرار دادند و (Daghestani et al. 2005) تأثیر قطع گروهی را بر روی ویژگی‌های هیدرولوژیکی خاک جنگل پرداختند و نتایج آنان نشان داد پس از قطع و چوبکشی جرم حجمی، مقدار رطوبت افزایش و مقدار نفوذپذیری کاهش یافته است، اشاره کرد. در زمینه تأثیر بهره‌برداری چوب بر روی مقدار نفوذپذیری تنها می‌توان به پژوهش (Khoramyzadeh and Jorgholami 2013) اشاره کرد که در جنگل آموزشی نم‌خانه خیرود به بررسی تأثیر بهره‌برداری تلفیقی به صورت مکانیزه و سنتی بر روی ویژگی‌های و به هم خوردگی خاک و همچنین شدت نفوذ خاک انجام دادند، نتایج آنان نشان داد نوع به هم خوردگی خاک و عمق آن در مقدار نفوذپذیری تأثیر معنی‌دار می‌گذارد. (Shaw et al. 2006) رابطه میان ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و مقدار نفوذپذیری را در بین کاربری‌های مختلف مورد مقایسه قرار دادند و نتایج آنان نشان داد که کاربری کشاورزی دارای نرخ نفوذ کمتر از دیگر کاربری‌ها است. تغییرات در عرصه‌های طبیعی موجب کاهش مقدار نفوذ آب در خاک می‌شود.

شده و مسیرهای چوبکشی فراوانی برای سهولت دسترسی به درختان موجود است. تعداد قطعات بهره‌برداری ۲۳ قطعه از ۲۶ قطعه است که فراوانی تعداد در هکتار ۵۹۳/۳ اصله و حجم در هکتار ۸۷/۸ درصد است. متوسط بارندگی سالانه منطقه ۹۲۶ میلی‌متر در سال است.

عرض جغرافیایی ۳۷ درجه تا ۳۷ درجه و ۳۰ دقیقه واقع شده است. در کل سطح منطقه مورد بررسی با توجه به شیب مجاز برای ماشین‌آلات چوبکشی زمینی مساحت ۴۵/۶ درصد منطقه مجاز و ۳۴/۴ درصد از سطح منطقه غیر مجاز برای چوبکشی است. در مجموع ۳۲/۹ کیلومتر جاده برای بهره‌برداری در منطقه احداث



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد بررسی

Figure 1. Location of the study area

برای هر تیمار انتخاب شد. در محل هر قطعه نمونه، نمونه‌برداری خاک از عمق صفر الی ۱۰ سانتی‌متری با استفاده از سیلندرهای نمونه‌برداری (قطر داخلی پنج سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر) برداشته شد و با استفاده از ترازوی دیجیتالی وزن اولیه نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. نمونه خاک به آزمایشگاه منتقل شد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در آون قرار گرفتند تا کاملاً خشک شوند (Kalra and Maynard, 1991). برای ارزیابی جرم مخصوص ظاهری (BD) از روش کلوخه (Clod method) و از رابطه ۱ استفاده شد (Ghazan shahi, 2016).

روش

تیمارهای مورد بررسی در این پژوهش شامل چهار تیمار، محوطه قطع که شامل محوطه‌ای بود که درختان آن برداشت و خارج شده بودند، تیمار مسیرهای چوبکشی، تیمار دپوی چوب‌آلات که در انتهای چندین مسیر چوبکشی و در کنار جاده اصلی جنگلی واقع شده و در نهایت تیمار شاهد که شامل جنگل طبیعی بدون بهره‌برداری بود، است. هر تیمار دارای سه تکرار بود که به صورت کاملاً تصادفی انتخاب شدند. برای انتخاب تیمار سعی شد موارد تأثیرگذار مانند شیب، جهت، ارتفاع، تعداد تردد ماشین‌آلات و حجم برداشت‌ها مورد توجه قرار گیرد. تیمارها در نقاطی با ویژگی‌های مشابه

وزن کلوخه خشک شده

$$\text{رابطه (۱)} = \frac{\text{جرم مخصوص پارافین} / (\text{وزن کلوخه} - \text{وزن کلوخه و پارافین}) - \text{حجم آب جابجا شده}}{\text{جرم مخصوص ظاهری}}$$

جرم مخصوص حقیقی به روش پیکنومتر و با استفاده از رابطه ۲ برآورد شد (Ghazan shahi, 2016).

$$\text{رابطه ۲} \quad \text{وزن مخصوص حقیقی} = \frac{\text{وزن خاک خشک}}{\text{حجم سیلندر یا نمونه خاک}} \quad (۲)$$

برای تعیین توزیع ذرات خاک ابتدا مواد چسباننده خاک سطحی به خصوص مواد آلی خاک با آب اکسیژنه

$$\text{رابطه ۳} \quad ۱۰۰ - \left(۱۰۰ \times \frac{\text{وزن مخصوص حقیقی}}{\text{وزن مخصوص ظاهری}} \right) = \text{درصد تخلخل} \quad (۳)$$

حذف شد و با استفاده از محلول هگزامتافسفات سدیم ذرات خاک پراکنده شدند، سپس تعیین بافت خاک به روش هیدرومتری بایکاس انجام شد. تعیین مقدار کربن آلی به روش والکی و بلک انجام شد که بر پایه اکسیداسیون تر (*Wet ashing*) مواد آلی استوار است. درصد تخلخل خاک با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد.

یک طرفه و همچنین برای مدل سازی از رگرسیون خطی استفاده شد. تمامی تحلیل ها با استفاده از نرم افزار SPSS انجام شد. همچنین برای تحلیل PCA از نرم افزار PC-ORD ورژن پنج استفاده شد.

نتایج

بافت خاک

نتایج تجزیه واریانس یک طرفه مربوط به ذرات رس، سیلت و شن اندازه گیری شده در جدول ۱ ارائه شده است. همان طور که نتایج نشان می دهد بین تیمارهای مختلف از نظر بافت خاک اختلاف معنی داری در سطح یک درصد وجود دارد؛ به طوری که بیشترین و کمترین میانگین درصد رس به ترتیب در تیمار شاهد (۲۶/۶۶ درصد) و تیمار مسیر چوبکشی (۸/۵۷ درصد) مشاهده شد. همچنین بیشترین درصد شن در تیمار دپو با مقدار (۸۰/۹۶ درصد) و کمترین در تیمار محوطه قطع با مقدار (۶۱/۴۴ درصد) گزارش شد. بیشترین و کمترین درصد سیلت به ترتیب متعلق به تیمار مسیر چوبکشی و دپو بود.

در این بررسی، برای بررسی نفوذپذیری، به صورت تصادفی سه نقطه از مناطق مختلف در هر تیمار (چهار تیمار) در نقاط متناظر و کنار نقاط برداشت نمونه خاک در منطقه مورد بررسی انتخاب شد، در این نقاط آزمایش نفوذسنجی به روش استوانه انجام پذیرفت. با توجه به استاندارد تعریف شده توسط USDA-NRCS (2005) در این آزمایش ها برداشت مقدار نفوذ تا زمان رسیدن به سرعت نفوذ نهایی، یعنی تا هنگامی که آهنگ کاهش سرعت نفوذ طی یک ساعت به کمتر از ۱۰ درصد برسد ادامه پیدا کرد. همچنین در کل زمان آزمایش ارتفاع آب روی سطح خاک در داخل استوانه داخلی به ارتفاع ۲۰ سانتی متر حفظ شد. قرائت های مقدار نفوذ از روی خطکش مدرج در ۱۰ دقیقه ابتدای آزمایش با فاصله زمانی یک دقیقه و سپس با فاصله دو و پنج دقیقه ای انجام پذیرفت. پس از احراز نرمال بودن و همگنی داده ها به ترتیب با استفاده از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف و آزمون لون برای مقایسه میانگین ها از تحلیل واریانس

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس و مقایسه میانگین ($\pm$ انحراف معیار) مشخصه‌های بافت خاک در تیمارهای مورد بررسی

Table 1. Results of variance analysis and comparison of mean ($\pm$ standard deviation) of soil texture properties in the studied treatments

sig.	F	شاهد Control	محوطه قطع Cutting Area	مسیر چوبکشی Skidding trail	منطقه دپو Depot Area	خصوصیات بافت Texture Characteristics
0.00	255.38	0.72 ^a ±26.66	0.33 ^b ±15.28	0.16 ^c ±8.57	0.51 ^b ±13.59	میانگین درصد رس Mean percentage of clay
0.00	71.18	0.28 ^b ±9.44	0.54 ^{ab} ±10.26	0.18 ^a ±11.4	0.58 ^c ±3.39	میانگین درصد سیلت Mean Silty Percentage
0.00	218.70	0.86 ^c ±59.84	0.86 ^b ±71.69	0.32 ^a ±78.79	0.29 ^a ±80.96	میانگین درصد شن Mean percentage of sand
		شنی لومی رسی Sandy clay loam	لومی شنی Sandy loam	شنی لومی Loamy sand	شنی لومی Loamy sand	بافت خاک Soil Texture

میانگین‌هایی که در هر ستون با حروف متفاوت مشخص شده‌اند، در سطح احتمال ۱ درصد اختلاف معنی‌دار دارند.

Means followed by different letters in each column are significantly different at the 1% probability level.

وجود دارد و به موازات افزایش جرم مخصوص ظاهری در دپو به مقدار ۱/۵۵ درصد و در مسیر چوبکشی ۱/۳۷ درصد مقدار تخلخل خاک کاهش یافته است؛ به‌طوری که بیشترین کاهش درصد تخلخل خاک در منطقه دپو ۴۵/۴۸ و کمترین کاهش درصد تخلخل در منطقه شاهد به مقدار ۶۵/۵۱ درصد است.

درصد کربن آلی و وزن مخصوص ظاهری

نتایج مقایسه میانگین حاکی از آن است که بیشترین میانگین درصد کربن آلی ۴/۰۶ متعلق به منطقه شاهد و کمترین میانگین درصد کربن آلی ۱/۱۸ متعلق به مسیر چوبکشی است. همچنین تجزیه و تحلیل داده‌های مربوط به جرم مخصوص ظاهری و تخلخل خاک نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای مورد بررسی

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس و مقایسه میانگین ($\pm$ انحراف معیار) برخی از مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در

تیمارهای مورد بررسی

Table 2. Results analysis of variance and comparison of mean ($\pm$ standard deviation) of some physical and chemical properties of soil in the studied treatments

sig.	F	شاهد Control	محوطه قطع Cutting Area	مسیر چوبکشی Skidding trail	منطقه دپو Depot Area	
0.00	142.48	0.1 ^a ±4.06	0.08 ^b ±2.77	0.09 ^d ±1.18	0.13 ^c ±2.06	درصد کربن Carbon percentage
0.00	39.05	0.05 ^b ±0.81	0.04 ^b ±1.09	0.08 ^a ±1.37	0.03 ^a ±1.55	جرم مخصوص ظاهری Bluk density
0.00	56.17	0.35 ^a ±65.51	0.33 ^b ±57.97	0.35 ^c ±46.65	0.32 ^c ±45.48	درصد تخلخل Porosity percentage

میانگین‌هایی که در هر ستون با حروف متفاوت مشخص شده‌اند، در سطح احتمال ۱ درصد اختلاف معنی‌دار دارند.

Means followed by different letters in each column are significantly different at the 1% probability level.

مدل سازی نفوذپذیری

وارد معادله رگرسیونی شد ($\text{sig}=0.00/0$). این متغیر توانست حدود ۶۸ درصد از تغییرات نفوذپذیری خاک را توجیه کند (جدول ۳).

در تعیین مهم ترین عوامل فیزیکی - شیمیایی خاک مؤثر بر نرخ نفوذپذیری با استفاده از تحلیل رگرسیون گام به گام مشخص شد که تنها متغیر جرم مخصوص ظاهری

جدول ۳- نتایج تحلیل رگرسیون گام به گام مقادیر نفوذپذیری با مشخصه های خاک (متغیرهای مستقل)

Table 3. Results of the stepwise regression analysis of permeability values with soil properties (independent variables)

ضریب تبیین R^2	Sig.	F	معادله رگرسیون Regression Equation	مدل Model
Coefficient of Determination				
0.68	0.00	19.30	$Y = 1.75 - 1 \text{ BD}$	1

Y: جرم مخصوص ظاهری؛ BD: نفوذپذیری خاک؛ مدل رگرسیونی حدود ۶۸ درصد از تغییرات نفوذپذیری خاک را توضیح می دهد.

Y: Soil Infiltration (Permeability); BD: Bulk Density; The regression model explains approximately 68% of the variation in soil permeability.

نفوذپذیری تجمعی

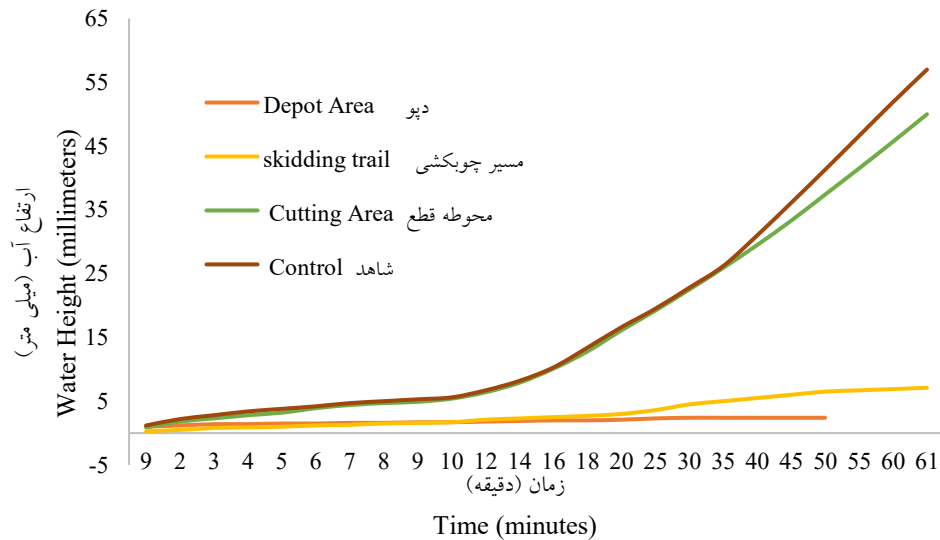
به حدود ۵۷ میلی متر رسیده است. در محوطه قطع پس از گذشت یک ساعت مقدار نفوذپذیری اندکی از جنگل طبیعی کمتر و به مقدار ۵۰ میلی متر ثبت شد. به طور کلی، نمودار روند نفوذپذیری تجمعی خاک نشان داد که کمترین مقدار میانگین نفوذپذیری تجمعی در دپو ۲/۴ میلی متر و بیشترین میانگین نفوذپذیری تجمعی در تیمار شاهد ۵۷ میلی متر اتفاق افتاده است.

تحلیل PCA

با استفاده از تحلیل PCA در محیط نرم افزاری PC-ORD 5 ارتباط بین ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک با تیمارهای مورد بررسی و همچنین الگوی پراکنش نمونه های مورد بررسی نسبت به هم برای تعیین مقدار شباهت در پاسخ به ویژگی های فیزیکی و شیمیایی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل مؤلفه اصلی نشان داد که در همه تیمارهای مورد بررسی در این پژوهش، از نظر مشخصه های بافت خاک (رس، سیلت و شن)، جرم مخصوص ظاهری، درصد تخلخل و درصد کربن اختلاف وجود دارد و همین امر سبب شده است تا از دیگر تیمارها متمایز شدند (شکل ۳).

بررسی روند نفوذپذیری تجمعی خاک جنگل در بین چهار تیمار مورد بررسی حاکی از آن است که مقدار نرخ نفوذپذیری خاک در تیمارهای مورد بررسی با شاهد (جنگل طبیعی) اختلاف معنی داری دارد. همچنین رفتار دو تیمار دپو و مسیر چوبکشی شبیه هم بوده و نسبت به دو تیمار جنگل طبیعی و محوطه قطع همواره نرخ نفوذپذیری پایین تری داشته است؛ به طوری که پس از گذشت یک ساعت در مجموع مقدار نفوذپذیری مسیر چوبکشی و دپو به ترتیب به ۷/۱ و ۲/۴ میلی متر افزایش یافته است. از این رو، نرخ نفوذپذیری مسیر چوبکشی از دپو بیشتر بوده است. همچنین نتایج نشان داد که در این دو تیمار بیشترین مقدار نفوذپذیری در همان دقایق اولیه مشاهده شده است و با افزایش زمان از سرعت نفوذپذیری به شدت کاسته شده است. در مقابل در جنگل طبیعی و محوطه قطع همواره نفوذپذیری ادامه داشت که رفتار این دو تیمار تا دقیقه ۴۰ شبیه هم بوده (حدود ۳۰ میلی متر) و بعد از آن جنگل طبیعی روند صعودی به خود گرفته است؛ به طوری که پس از گذشت یک ساعت مقدار نفوذپذیری

سهم کل تغییرات واریانس کل محور اول و دوم اصلی به ترتیب ۷۸/۳۵ و ۱۶/۱۶ درصد است (جدول ۴).



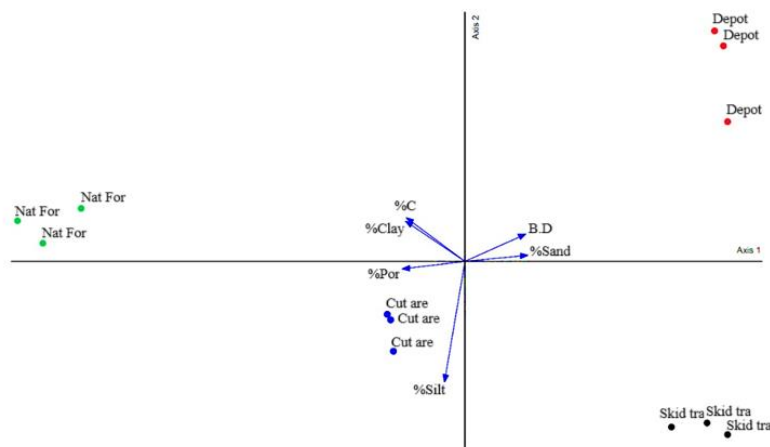
شکل ۲- روند نفوذپذیری تجمعی خاک جنگل در بین تیمارهای مورد بررسی

Figure 2. The trend of cumulative soil permeability in forest areas among the studied treatments

جدول ۴- مقادیر ویژه و سهم تغییرات محورها در تحلیل PCA

Table 4. Eigenvalues and the Contribution of Variations in Axes in PCA Analysis

محور	مقادیر ویژه	درصد سهم تغییرات
Axis	Eigenvalues	Percentage of Change Share
1	4.70	78.35
2	1.15	19.16
3	0.09	1.56
4	0.04	0.69
5	0.01	0.23



شکل ۳- ارتباط بین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک با تیمارهای مورد بررسی در PCA

Figure 3. Relationship between the physical and chemical properties of soil with the studied treatments in PCA

بحث

هدف از این پژوهش، ارزیابی مقدار نفوذپذیری خاک در عرصه بهره‌برداری شده از یک جنگل کوهستانی طبیعی است که با بررسی برخی از ویژگی‌های فیزیکی و مقدار نفوذپذیری خاک جنگل در چهار تیمار دپو، مسیر چوبکشی، محوطه قطع و جنگل طبیعی انجام شد. به‌طور کلی، وجود و رفت و آمد ماشین‌آلات بهره‌برداری در جنگل سبب ایجاد تغییرات بسیاری در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های جنگلی می‌شود (Behjou et al., 2024). در این پژوهش با استفاده از آزمایش نفوذسنجی با روش استوانه به مقایسه مقدار نفوذپذیری در دپو، مسیر چوبکشی، محوطه قطع و ناحیه شاهد پرداخته شد. مقدار نفوذپذیری تجمعی با گذشت زمان کاهش یافته و سیر کاهشی داشته (شکل ۲)، اما در تمامی زمان‌ها نفوذپذیری در تیمار شاهد دارای مقدار بیشتری در مقایسه با دیگر تیمارها بوده است. (Shahriari et al. 2019) در این پژوهش نیز شاهد بیشترین نفوذپذیری در جنگل طبیعی بود. علت تفاوت مقدار نفوذ آب در منطقه شاهد با سه منطقه دیگر، می‌تواند تخلخل بیشتر خاک در این منطقه نسبت به دیگر مناطق باشد. هنگامی که یک توده خاک فشرده یا ارتعاش می‌یابد، حجم اشغال شده توسط ذرات جامد خاک تغییر نمی‌کند، بلکه در این حالت حجم حفرات خالی موجود در خاک کاهش یافته و در نتیجه نفوذپذیری خاک نیز کاهش می‌یابد. (Rahimi 2014) چنانچه در این پژوهش کمترین درصد تخلخل خاک و نیز نفوذپذیری در منطقه دپو مشاهده شد. رفتار دو تیمار دپو و مسیر چوبکشی در نفوذپذیری شبیه هم بوده و در همان دقایق اول متوقف شده است. یکی از مهم‌ترین عوامل کاهش نفوذپذیری خاک، تراکم لایه سطحی خاک به‌علت تردد ماشین‌های چوبکشی و فشرده شدن

خاک است (Daghestani et al. 2005) در این بررسی بیشترین افزایش وزن مخصوص ظاهری ابتدا در دپو و سپس در مسیر چوبکشی مشاهده شده (جدول ۲) که نشان از تراکم سطحی لایه خاک به‌علت تردد ماشین‌ها، فشار چوب‌آلات و کشیدن تنه‌ها در این دو منطقه است. رفتار نفوذپذیری عرصه بهره‌برداری شده و جنگل طبیعی تا دقیقه ۴۰ شبیه به هم بوده و از آن به بعد جنگل طبیعی حالت صعودی گرفته که تشابه رفتار این دو ناحیه می‌تواند در اثر بافت سنگین‌تر عرصه بهره‌برداری شده و منطقه شاهد نسبت به دو ناحیه دیگر (دپو و مسیر چوبکشی) باشد (جدول ۱). (Salehi et al. 2012) نیز بیان کرد درصد شن در مسیر چوبکشی بیشتر و در نتیجه خاک سبک‌تر بوده و برعکس خاک جنگل طبیعی دارای درصد رس و سیلت بیشتر و خاک سنگین‌تر است، نتایج پژوهش حاضر نیز نشان می‌دهد نفوذپذیری خاک نتوانسته به حالت بازیابی برسد. (Ezzati and Najafi 2012) این پژوهش نیز نشان داد نفوذپذیری خاک در جنگل‌های هیرکانی بیست سال پس از چوبکشی زمینی در مقایسه با ناحیه شاهد در تردد کم تا اندازه‌ای بازیابی شده است اما در تردد شدید نتوانسته به حالت بازیابی برسد. هم‌چنان‌که (Perry 1964) در کارولینا حداقل مدت زمان بازیابی نفوذپذیری خاک را ۴۰ سال عنوان کرده بود. نتایج بررسی مشخصه‌های بافت خاک (رس، سیلت و شن) نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین درصد رس، سیلت و شن خاک مسیر چوبکشی، منطقه دپو و محوطه قطع با منطقه شاهد وجود دارد. (Rab 2004) این تغییر در ذرات بافت خاک ممکن است در ارتباط با مخلوط شدن خاک لایه سطحی با لایه‌های تحتانی در طی چوبکشی زمینی، بالا بودن رطوبت خاک حین عملیات و شاید بکسپاد چرخ‌ها ناشی از چوبکشی در خاک مرطوب باشد.

Sadeghi et al. (2024) عنوان کرد بقایای مواد آلی سبب افزایش کربن آلی می‌شوند در بررسی حاضر بیشترین میانگین درصد کربن آلی متعلق به منطقه شاهد و کمترین متعلق به مسیر چوبکشی بود. Jafari and Najafi (2015) نتایج این پژوهش نشان داد که تخریب مواد آلی خاک در اثر عملیات چوبکشی بیش از حد آستانه تخریب است و حتی پس از گذشت ده سال این تغییرات به‌طور کامل بازایی نشدند و اختلافاتی را با تیمار شاهد نشان دادند. بالا بودن جرم مخصوص ظاهری در ترافیک شدید در مقایسه با ناحیه شاهد توسط دیگر نویسندگان (Ezzati et al. 2012) و Zenner et al. (2007) گزارش شد، که همسو با این پژوهش است. افزایش جرم مخصوص ظاهری به- ترتیب در دپو، مسیر چوبکشی و محوطه قطع مشاهده شد (جدول ۲). Hashemi et al. (2021) وزن مخصوص ظاهری در تمام طبقه‌های ترافیکی از کم به زیاد افزایش یافت. افزایش جرم مخصوص ظاهری در دپو می‌تواند به دلایلی مثل قرار داشتن دپو در حاشیه جاده شن‌ریزی شده و در نتیجه بالا بودن درصد شن و همچنین تخریب خاکدانه‌ها و در نتیجه نفوذ مواد آلی و مواد حاصل از تخریب خاکدانه‌ها به لایه زیرین خاک (جدول ۱) و فشار چوب‌آلات به خاک و استقرار ماشین‌های بارگیری و کامیون‌ها باشد، افزایش جرم مخصوص ظاهری در مسیر چوبکشی در اثر تردد ماشین‌ها و کشیدن تنه‌ها ایجاد شده است و در انتها این افزایش در عرصه بهره‌برداری شده در اثر عملیات قطع، کشیدن تنه‌ها و بینه‌های درختان ایجاد شده است (Tavankar and Mjnonian, 2009). به موازات افزایش جرم مخصوص ظاهری مقدار تخلخل به‌ترتیب در دپو، مسیر چوبکشی و عرصه بهره‌برداری شده کاهش یافته است (جدول ۲). Lotfalian and Parskhoo (2009)

افزایش وزن مخصوص ظاهری تخلخل کل کاهش می‌یابد که ناشی از کاهش منافذ خاک و فشار زیاد به خاک است (Dalir et al., 2022)، Hashemi et al. (2021) در تمام تیمارهای ترافیکی با افزایش شدت ترافیک مقدار تخلخل خاک کاهش یافت. در این بررسی بیشترین کاهش تخلخل خاک در منطقه دپو است که در اثر تردد ماشین‌های حمل اولیه و ثانویه و اعمال فشار چوب‌آلات به خاک حجم منافذ خاک کاهش پیدا می‌کند. حدود ۲۶ سال پس از بهره‌برداری، جرم مخصوص ظاهری در هیچ کدام از تیمارهای محوطه قطع، منطقه دپو و مسیر چوبکشی بازایی نشد. این یافته با نتایج پژوهش دیگر پژوهشگران Shestak and Buss (2005) و Froehlich (1978) در مورد عدم بازایی وزن مخصوص ظاهری در لایه سطحی خاک به دنبال توقف کامل عملیات بهره‌برداری با گذشت زمان مطابقت دارد. نتایج مدل رگرسیونی نیز نشان داد که از بین عوامل فیزیکی و شیمیایی مورد بررسی در این پژوهش تنها متغیر وزن مخصوص ظاهری تأثیر به‌سزایی برای پیش‌بینی نرخ نفوذپذیری در خاک دارد (جدول ۳). همانطور که مشاهده شد رابطه بین نفوذپذیری با وزن مخصوص معکوس است به‌طوری که با کاهش وزن مخصوص بر مقدار نرخ نفوذپذیری افزوده می‌شود. به‌عنوان مثال در جنگل طبیعی بیشترین نفوذپذیری را داشتیم که از بین چهار تیمار کمترین وزن مخصوص هم متعلق به همین تیمار بود. بدیهی است این واقعیت که مقدار مقاومت به نفوذ در راستای جرم مخصوص ظاهری تغییر می‌کند که در این بررسی هم مشاهده شد (Hashemi et al., 2021). نتایج بررسی مشخصه‌های بافت خاک (رس، سیلت و شن) نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین درصد رس، سیلت و شن خاک مسیر چوبکشی، منطقه دپو و محوطه قطع با منطقه شاهد

حساسیت مناطق جنگلی و کاهش نفوذپذیری خاک حین و پس از بهره‌برداری، پیش‌بینی تمهیداتی برای کاهش آسیب به خاک در مسیرهای پر تردد و دپو می‌تواند از این تأثیرات نامطلوب بکاهد. این بررسی نشان داد نفوذپذیری خاک در این منطقه ۲۶ سال پس از توقف کامل بهره‌برداری توانسته به حالت بازیابی برسد البته ۲۶ سال مدت زمان کمی برای داوری در مورد بازیابی خاک است و برای تصمیم قطعی در مورد مدت زمان بازیابی خاک جنگل باید دوره‌های دیگری را نیز مورد ارزیابی قرار داد. در این پژوهش موارد اندکی از ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک مورد بررسی قرار گرفت و با توجه به اهمیت نفوذپذیری خاک در مناطق جنگلی و در مقابل کاهش آن در مناطقی مثل مسیر چوبکشی و دپو پیشنهاد می‌شود چنین مطالعاتی در دیگر مناطق جنگل‌های شمال بر روی ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک در مورد خاک‌هایی با بافت‌های مختلف به‌خصوص در نواحی شیب‌دار، در طبقات شیبی مختلف و در سطوح ترافیکی کم، متوسط و شدید برای مشخص کردن تأثیرات نامطلوب بهره‌برداری و تعیین زمان کامل بازیابی خاک انجام شود.

References

- Behjou, K.; Masarat, F.; Ghanbari, S.; Sasanifar, S. The Effect of Logging Activities on the Soil Characteristics of Islam Forests in Guilan. *Journal of Environmental Science and Studies* **2024**, 9(3), 9158–9147. (In Persian)
- Daghestani, M.; Sobhani, H.; Saravi, M.; Mohajer, M. The effect of group selection as a cutting method on soil physical factors. *Forest Ecology and Management* **2005**. (In Persian)
- Dalir, P.; Naghdi, N.; Gholami, V.; Tavankar, F.; Latterini, F.; Venanzi, R.; Picchio, R. Risk assessment of runoff generation using artificial neural network and field plots in the area of roads and forest lands. *Natural Hazards*, **2022**, 113, 1451-1469.

وجود دارد. Rab (2004) این تغییر در ذرات بافت خاک ممکن است در ارتباط با مخلوط شدن خاک لایه سطحی با لایه‌های تحتانی در طی چوبکشی زمینی، بالا بودن رطوبت خاک حین عملیات و احتمالاً بکسباده چرخ‌ها ناشی از چوبکشی در خاک مرطوب باشد. در پژوهش حاضر بیشترین میانگین درصد کربن آلی متعلق به منطقه شاهد و کمترین متعلق به مسیر چوبکشی بود (Jafari and Najafi, 2015). نتایج این تحقیق نشان داد که تخریب مواد آلی خاک در اثر عملیات چوبکشی بیش از حد آستانه تخریب است و حتی پس از گذشت ده سال این تغییرات به‌طور کامل بازیابی نشدند و اختلافاتی را با تیمار شاهد نشان دادند.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد در مقایسه مقدار نفوذپذیری سه منطقه با جنگل طبیعی کمترین نفوذپذیری تجمعی متعلق به منطقه دپو و سپس مسیر چوبکشی است، که بر اساس نتایج مدل رگرسیونی، مهم‌ترین علت کاهش نفوذپذیری در این مناطق در نتیجه افزایش وزن مخصوص خاک است. با توجه به وزن ماشین‌آلات و ادوات بهره‌برداری جنگل و همچنین با توجه به

- Dalir, P.; Naghdi, R.; Gholami, V. Assessing the rice straw effects on the soil erosion rate in forest road cut slope embankments', *Caspian Journal of Environmental Sciences*, **2021**, 19(2), 325-339. (In Persian)
- Ezzati, S.; Najafi, A.; Rab, M.; Zenner, E. K., Recovery of soil bulk density, porosity and rutting from ground skidding over a 20-year period after timber harvesting in Iran. *Silva Fennica* **2012**, 46 (4), 521-538.
- Ezzati, S.; Najafi, A. Recovery of Soil Bulk Density, Porosity and Rutting from Ground Skidding Over a 20-Year Period after Timber Harvesting in Iran. *Silva Fennica* **2012**, 46 (4), 521–538.
- Froehlich, H. A., Soil compaction from low ground-pressure, torsion-suspension logging vehicles on three forest soils. **1978**.

- Ghazan Shahi, *Journal of Soil and Plant Analysis*; Javad Ghazan Shahi: **2016**; p 312. (In Persian)
- Giahparvar Foumani, R.; Naghdi, R.; Nikooy, M.; Mirzaei, M. Visual Assessment of Soil Disturbance Causing Forest Operation by Short Wood and Full Tree Methods in Western Plantations of Guilan. *Forest Research and Development* **2023**, 9 (3), 303–316. (In Persian)
- Gomi, T.; Sidle, R. C.; Noguchi, S.; Negishi, J. N.; Nik, A. R.; Sasaki, S. Sediment and Wood Accumulations in Humid Tropical Headwater Streams: Effects of Logging and Riparian Buffers. *Forest Ecology and Management*. **2006**, 224 (1–2), 166–175.
- Greacen, E. L.; Sands, R. *Compaction of forest soils*. A review. *Soil Research* **1980**, 18 (2), 163-189.
- Hartanto, H.; Prabhu, R.; Widayat, A. S.; Asdak, C. Factors affecting runoff and soil erosion: plot-level soil loss monitoring for assessing sustainability of forest management. *Forest ecology and management* **2003**, 180 (1-3), 361-374.
- Hashemi, M.; Nikooy, M.; Salehi, A.; Naghdi, R., Investigation of soil physical properties 11 years after water-bar construction on skid trail. *Forest Research and Development* **2021**, 7 (2), 169-182. (In Persian)
- Herbauts, J.; El Bayad, J.; Gruber, W. Influence of logging traffic on the hydromorphic degradation of acid forest soils developed on loessic loam in middle Belgium. *Forest Ecology and Management* **1996**, 87 (1-3), 193-207.
- Jafari, A.; Najafi, A. Recovery of Disturbed Soil Organic Matter over a 10-Year Period after Timber Skidding Operation in Forest. *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research* **2015**, 13 (1), 11–19. (In Persian)
- Kalra, Y. P.; Maynard, D. G. *Soil Sampling and Methods of Analysis*; Canadian Society of Soil Science: **1991**.
- Khoramzadeh, A.; Jorholami, M. Environmental Effects of Timber Extraction on Soil Disturbance and Infiltration Rate in Kheyroud Forest. *Jornal of Environmental Assessment*. **2013**, 4 (8), 101–112. (In Persian)
- Kohandel, A.; Arzani, H.; Hosseini Tavassol, M. Effect of grazing intensity on soil and vegetation characteristics using Principal components Analysis. *Iranian Journal of Range and Desert Research* **2010**, 17 (4), 518-526. (In Persian)
- Kolka, R.; Smidt, M. Effects of forest road amelioration techniques on soil bulk density, surface runoff, sediment transport, soil moisture and seedling growth. *Forest Ecology and Management* **2004**, 202 (1-3), 313-323.
- Larsson, M.; Eliasson, S. The Influence of Land-Use Change, Root Abundance and Macropores on Saturated Infiltration Rate—A Field Study on Western Java, Indonesia. *Hydrol. Hydrology and Earth System Sciences*. **2006**, 10 (5), 755–763.
- Lotfalian, M.; Parsakhoo, A., Investigation of forest soil disturbance caused by rubber-tired skidder traffic. *International Journal of Natural and Engineering Sciences* **2009**, 3 (1), 01-04.
- Matangaran, J. R.; Kobayashi, H. The effect of tractor logging on forest soil compaction and growth of Shorea selanica seedlings in Indonesia. *Journal of Forest Research* **1999**, 4 (1), 13-15.
- Naghdi, R.; Maleki, S.; Abdi, E.; Mousavi, R.; Nikooy, M. Assessing the effect of Alnus roots on hillslope stability in order to use in soil bioengineering. *Journal of forest Science* **2013**, 59 (11), 417-423.
- Najafi, A.; Sobhani, H.; Saeed, A.; Makhdom, M.; Mohajer, M. M. Planning and assessment of alternative forest road and skidding networks. *Croatian Journal of Forest Engineering*. **2008**, 29 (1), 63-73.
- Neris, J.; Jiménez, C.; Fuentes, J.; Morillas, G.; Tejedor, M. Vegetation and land-use effects on soil properties and water infiltration of Andisols in Tenerife (Canary Islands, Spain). *Catena* **2012**, 98, 55-62.
- Nugent, C.; Kanali, C.; Owende, P. M.; Nieuwenhuis, M.; Ward, S., Characteristic site disturbance due to harvesting and extraction machinery traffic on sensitive forest sites with peat soils. *Forest Ecology and Management* **2003**, 180 (1-3), 85-98.
- Perry, T. O. Soil Compaction and Loblolly Pine Growth. *Tree Plant. Notes* **1964**, 15 (4), 9–67.
- Rab, M. Recovery of soil physical properties from compaction and soil profile disturbance caused by logging of native forest in Victorian Central Highlands ,Australia. *Forest ecology and management* **2004**, 191 (1-3), 329-340.

- Rahimi, H. *Soil Mechanics*; Danesh and Fan Publications: **2014**; p 624. (In Persian)
- Sadeghi, A.; Salehi, A.; Pourbabaei, H.; Kooch, Y. Investigation of changes in soil properties in pure and mixed beech type in the western forests of Guilan. *Forest Research and Development* **2024**, 9(4), 571-591. (In Persian)
- Salehi, A.; Taheri Abkenar, K. T.; Basiri, R., Study of the recovery soil physical properties and establishment of natural regeneration in skid trails (case study: Nav-E Asalem forests). *Iranian Journal of Forest*. **2012**. (In Persian)
- Shahriari, A.; Moghadami Rad, M.; Abdie, E., The effects of logging on forest soil (Azad Shahr Kuhmian Forest). *Journal of Plant Ecosystem Conservation* **2019**, 6 (13), 233-250. (In Persian)
- Shaw, J. N.; Fesha, D.; Wayne, R. C.; Wesley, W.; Feng, Y.; Lee Norfleet, M. Soil Change in Southeastern USA Ultisols. In *Proceedings of the 18th World Congress of Soil Science*, Philadelphia, PA, USA, July 9–15, **2006**.
- Shestak, C.; Busse, M. Compaction alters physical but not biological indices of soil health. *Soil Science Society of America Journal*. **2005**, 69 (1), 236-246.
- Solgi, A.; Najafi, A. The impacts of ground-based logging equipment on forest soil. *Journal of Forest Science*. **2014**
- Startsev, A.; McNabb, D. Effects of skidding on forest soil infiltration in west-central Alberta. *Canadian Journal of Soil Science* **2000**, 80 (4), 617-624.
- Tavankar, F.; Mjnonian, B., Logging Damages on Forest Regeneration and Soil Compaction Using Ground-based System (Case Study: Asalem Forest Aarea, Guilan). Isfahan University of Technology-*Journal of Crop Production and Processing* **2009**, 13 (48), 449-456. (In Persian)
- US Department of Agriculture Natural Resources and Conservation Service. Website. 2005. Available at: <https://www.nrcs.usda.gov/> (accessed February 20, 2025).
- Zenner, E. K.; Fauskee, J. T.; Berger, A. L.; Puettmann, K. J., Impacts of skidding traffic intensity on soil disturbance, soil recovery, and aspen regeneration in north central Minnesota. *Northern Journal of Applied Forestry* **2007**, 24 (3), 177-183.
- Zuazo, V. c. H. D.; Pleguezuelo, C. R. o. R. Soil-erosion and runoff prevention by plant covers: a review. *Sustainable agriculture* **2009**, 785-811.