مجلهٔ جنگل ایران، انجمن جنگلبانی ایران
سال هجدهم، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۴۰۵
ص ۲۶۹-۲۵۱
مقاله پژوهشی

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22034/ijf.2026.566999.2098
CC BY 4.0

نقش نوئل (*Picea abies* (L.) Karst.) در بازیابی خاک: تأثیرات بلندمدت بر ویژگی‌های فیزیکی خاک مسیرهای چوبکشی و ریزریشه

روشنک دهقان[۱]، مهرداد نیکوی[۲*]، خسرو ثاقب طالبی[۳]، علی صالحی[۴] و فرزام توانکار[۵]

[۱]دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه گیلان.
[۲]استاد گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه گیلان. صومعه‌سرا، ایران.
[۳]استاد پژوهش، مؤسسهٔ تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.
[۴]دانشیار گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه گیلان. صومعه‌سرا، ایران.
[۵]دانشیار گروه جنگلداری، واحد خلخال، دانشگاه آزاد اسلامی، خلخال، ایران.

(تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۹/۲۹؛ تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۱۱/۲۷)

چکیده

مقدمه: خاک‌ها از اجزای حیاتی اکوسیستم‌های جنگلی هستند که با تنظیم چرخه‌های آب و مواد مغذی، بهره‌وری جنگل و حفاظت از تنوع زیستی را تضمین می‌کنند. کوبیدگی خاک جنگل از بارزترین پیامدهای عملیات مکانیزهٔ بهره‌برداری است که در اثر تنش‌های عمودی و افقی اعمال‌شده بر خاک ایجاد می‌شود. مدیران جنگل باید برای جنگلداری پایدار، تأثیر عملیات برداشت چوب بر خاک را به کمترین حد برسانند. پیش‌نیاز دستیابی به این هدف، دانش دقیق و عمیق از تأثیر عملیات برداشت چوب بر خاک جنگل است. استفاده از خاک‌ورزی زیستی یکی از راه‌های تسریع بازیابی خاک در مسیرهای چوب‌کشی است. در سال‌های اخیر تأکید زیادی بر بهبود شرایط خاک مسیرهای چوب‌کشی با کاشت درختان شده است. علی‌رغم پژوهش‌های متعدد دربارهٔ بازیابی خاک، تعداد کمی از آنها به تغییرات بلندمدت (حدود ۴۰ سال) پرداخته یا نقش ریزریشه‌ها را در زمینه‌های بازسازی طبیعی کمّی کرده‌اند. این پژوهش به ارزیابی بازیابی بلندمدت خاک‌های مسیرهای چوب‌کشی جنگلکاری‌شده با نوئل پرداخته است.

مواد و روش‌ها: این پژوهش در پارسل ۷۶ سری دو ناو در حوزهٔ هفت جنگل‌های شمال ایران در غرب استان گیلان انجام گرفت. در سه تیمار مسیر چوبکشی جنگلکاری‌شده با نوئل (NSIST)، نوئل در داخل جنگل (NSIF) و مسیر چوبکشی بدون جنگلکاری (UST) و در چهار طبقهٔ عمق خاک (۱۰-۰، ۲۰-۱۰، ۳۰-۲۰، ۴۰-۳۰ سانتی‌متر) اثر کاشت نوئل بر خصوصیات فیزیکی خاک و تراکم ریزریشه با سه تکرار بررسی شد.

یافته‌ها: نتایج پژوهش نشان داد که بین میانگین درصد رطوبت دو تیمار طبقهٔ NSIST (۷/۵۳ ± ۱۹/۰۰) و NSIF (۴/۷۵ ± ۱۸/۳۵) تفاوت معنی‌داری وجود ندارد همچنین مقدار این متغیر در طبقهٔ عمق ۱۰-۰ سانتی‌متر (۸/۶۶±۲۴/۳۳) به‌طور معنی‌داری بیشتر از بقیهٔ عمق‌هاست. نتایج مقایسهٔ میانگین اجزای بافت خاک هم تفاوت معنی‌داری را بین تیمارهای مختلف نشان نداد ($p\geq$۰/۰۵). میانگین جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب) در تیمارهای UST (۰/۱۲ ± ۱/۱۵) و NSIST (۰/۱۱ ± ۱/۱۴) به‌طور معنی‌داری بیشتر از مقدار آن در تیمار NSIF (۰/۰۸ ± ۱/۱۰) بود. همچنین با افزایش عمق خاک مقدار جرم مخصوص ظاهری افزایش معنی‌داری یافت، به‌طوری که کمترین مقدار جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب) در عمق ۱۰-۰ سانتی‌متری (۰/۰۱ ± ۱/۰۲) و بیشترین مقدار آن در طبقهٔ ۴۰-۳۰ سانتی‌متری (۰/۰۵ ± ۱/۲۸) مشاهده شد. روند مشابهی در نتایج درصد تخلخل کل در نتایج پژوهش به دست آمد. بیشترین مقدار ریزریشه در تیمار NSIF (۰/۰۵ ± ۰/۱۱۱۹ گرم بر دسی‌متر مکعب) و کمترین مقدار آن در تیمار UST (۰/۰۰۹ ± ۰/۰۱۳۴ گرم بر دسی‌متر مکعب) مشاهده شد.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که کاشت این گونه به بازیابی کامل ویژگی‌های فیزیکی خاک و وزن ریزریشه منجر نشد، اما موجب بهبود معنی‌دار جرم مخصوص ظاهری و مقدار ریزریشه در عمق ۱۰-۰ سانتی‌متر شد. این نتایج صرفاً بیانگر رفتار این گونه در شرایط بررسی‌شده است و به‌هیچ‌وجه به‌معنای توصیهٔ کاربرد آن برای احیای مسیرهای چوبکشی در جنگل‌های هیرکانی نیست؛ به‌ویژه با توجه به ملاحظات بوم‌شناسی و اولویت استفاده از گونه‌های بومی در برنامه‌های زیست‌مهندسی این اکوسیستم‌ها. این یافته‌ها می‌تواند مبنایی برای مقایسهٔ عملکرد گونه‌های بومی در پژوهش‌های آینده فراهم آورد.

واژه‌های کلیدی: برداشت چوب، جرم مخصوص ظاهری، جنگلکاری، چوبکشی زمینی، زیست‌مهندسی، کوبیدگی خاک.

*نویسندهٔ مسئول
شمارهٔ تماس: ۰۹۱۱۳۳۸۸۳۰۵
ایمیل: nikooy@guilan.ac.ir

مقدمه

خروج چوب، فرایند انتقال تمام یا بخشی از درختان قطع‌شده به دپو است که از طریق مسیرهای چوبکشی، جاده‌های چوبکشی و مسیرهای پیش‌حمل[1] انجام می‌گیرد (Nikooy et al., 2023). با وجود توقف برداشت چوب در جنگل‌های هیرکانی، آثار باقی‌مانده از تردد ماشین‌آلات چوبکشی در مسیرهای چوبکشی همچنان از عوامل مؤثر بر تخریب فیزیکی خاک و کاهش کیفیت رویشگاه‌هاست و بازیابی این عرصه‌ها به یکی از چالش‌های مدیریتی مهم در این اکوسیستم‌ها تبدیل شده است. پژوهش‌ها نشان داده است که ماشین‌آلات خروج چوب ممکن است بهره‌وری رویشگاه را به‌دلیل فشردگی خاک و از دست رفتن مادهٔ آلی خاک کاهش دهند (Nazari et al., 2021). نگرانی‌ها دربارهٔ تأثیر برداشت چوب بر خاک ناشی از تردد ماشین‌آلات سنگین تقریباً به قدمت ورود ماشین آلات چوبکشی به عملیات برداشت چوب است. نخستین پژوهش‌ها دربارهٔ تأثیر کوبیدگی خاک ناشی از ماشین‌آلات برداشت چوب در اواخر دههٔ ۱۹۴۰ در اتحاد جماهیر شوروی سابق و همچنین در ایالات متحده آغاز شد و در دههٔ ۱۹۵۰ ادامه یافت (DeArmond et al., 2021). حتی پیش از این دوره، مسیرهای چوبکشی با شیب تند، منبع بالقوهٔ فرسایش شناخته می‌شدند و نیاز به اقدامات حفاظتی داشتند (DeArmond et al., 2021). در نخستین پژوهش‌ها در زمینهٔ حفاظت از مسیرهای چوبکشی برای کاهش فرسایش و رسوب استفاده از مازاد مقطوعات برداشت چوب مانند شاخه‌ها، سرشاخه‌ها و پوست و برگ درختان به‌عنوان روشی برای تثبت خاک پیشنهاد شد (Gjertson, 1949). هرچند پژوهش‌های بعدی در جنگل‌های همسال، خاک‌ورزی[2] را راهکاری برای کاهش کوبیدگی خاک مسیرهای چوبکشی معرفی کردند (Page-Dumroese et al., 2006; Passauer et al., 2013; Albaugh et al., 2015; Lang et al., 2016). با توجه به طولانی بودن زمان بازیابی خاک در مسیرهای چوبکشی جنگل‌های ناهمسال (Naghdi et al., 2018) به‌کارگیری روش‌های بهترین فعالیت‌های مدیریتی[3] مانند استفاده از انحراف‌دهنده‌های آب و مالچ‌های گیاهی مانند خاکاره و بقایای مقطوعات توصیه شده است (Hashemi et al., 2021; Jourgholami et al., 2018; Jourgholami et al., 2021; Fernández et al., 2019). یکی از روش‌های تسریع بازیابی خاک در مسیرهای چوبکشی استفاده از خاک‌ورزی بیولوژیکی است (Khoramizadeh et al., 2021). تسریع بازیابی خاک مسیرهای چوبکشی از راه کاشت درختان و اثر آن در اصلاح خاک در پژوهش‌های مختلفی بررسی شده و نتایج آنها نشان داده است که کاشت گونه‌های درختی در مسیرهای چوبکشی می‌تواند شرایط چالش‌برانگیز آنها را تعدیل کند (Lorenc-Plucinska et al., 2013; He et al., 2013; Haigh et al., 2015; Parsapour et al., 2018). Warlo et al. (2019) با بررسی کاشت گونهٔ توسکای قشلاقی (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn) Black Alder در مسیرهای چوبکشی ۱۵ ساله در جنگل‌های شمال شرقی سوئیس دریافتند که کاشت این گونه در مسیرهای چوبکشی می‌تواند به بهبود ساختار خاک و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کند. Meyer et al. (2014) به بررسی کاشت گونهٔ توسکای قشلاقی و تأثیر آن بر بازیابی خاک متراکم‌شدهٔ مسیرهای چوبکشی در سوئیس پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که این گونهٔ درختی پتانسیل زیادی برای تسریع بازیابی ساختار خاک متراکم‌شده در جنگل‌های با اقلیم مرطوب معتدل دارد. نتایج تحقیق Fernández et al. (2019) نشان داد که کاشت درختان توسکای خاکستری (*Alnus incana* (L.) Moench) در مسیرهای چوبکشی به بازیابی خاک مسیرهای چوبکشی کمک می‌کند و با افزایش تخلخل درشت و کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک، قابلیت رشد ریشه را بهبود می‌بخشد و

1. Forwarding
2. Tillage
3. Best management practices

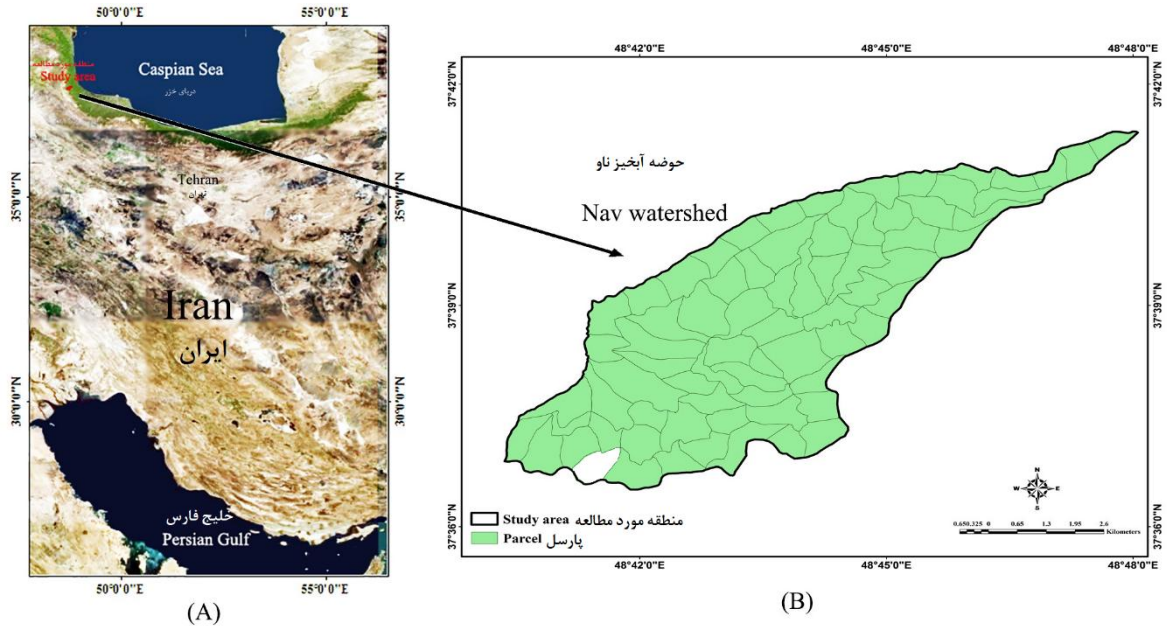
سبب بهبود ساختار خاک می‌شود. Minore et al. (1969) تأثیر کاشت توسکای قرمز (*Alnus rubra* Bong.) را در بهبود تخلخل درشت خاک مسیرهای چوبکشی مشاهده کردند. آنها همچنین نشان دادند که کاشت درختان جرم مخصوص ظاهری خاک را در مسیرهای چوبکشی در مقایسه با مسیرهای جنگلکاری‌نشده کاهش می‌دهد. Jourgholami et al. (2019) گزارش کردند که ۲۵ سال پس از قطع درختان، در مسیرهای چوبکشی کاشته‌شده با پلت (*Acer velutinum* Boiss) و توسکای ییلاقی (*Alnus subcordata* C.A.Mey.) زیست‌تودهٔ کرم خاکی بیشتر از مناطق جنگلکاری‌نشده بود. Jourgholami et al. (2018) نیز پتانسیل بازیابی خاک مسیر چوبکشی را با ترکیبات مختلف لاشبرگ از گونهٔ پلت (*Acer velutinum* Boiss.)، راش (*Fagus orientalis* Lipsky) و ممرز (*Carpinus betulus* L.) آزمایش کردند. آنها دریافتند که بهترین نتایج، ترکیبی از هر سه گونه برای احیای فیزیکی خاک (تخلخل درشت، جرم مخصوص ظاهری و مقاومت در برابر نفوذ)، شیمیایی (مواد غذایی) و خواص بیولوژیکی (فراوانی کرم خاکی و زیست‌توده) است و بهترین نتایج در بازیابی خاک شامل خواص فیزیکی (تخلخل درشت، جرم مخصوص ظاهری و مقاومت در برابر نفوذ)، خواص شیمیایی (مقدار مواد غذایی) و ویژگی‌های بیولوژیکی (فراوانی کرم خاکی و زیست‌تودهٔ ریزریشه)، در هنگام استفاده از کشت تلفیقی سه گونه حاصل می‌شود. در سال‌های اخیر، بهبود شرایط بازیابی خاک مسیرهای چوب‌کشی از راه کاشت درخت نویدبخش بوده است (Parsapour et al., 2018) و دربارهٔ گونه‌هایی مانند توسکای قشلاقی (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) در آلمان (Warlo et al., 2019) و سوئیس (Meyer et al., 2014)، توسکای خاکستری (*Alnus incana* (L.) Moench) در جنوب آلمان (Fernández et al., 2019)، توسکای قرمز (*Alnus rubra*) در آمریکا (Minore et al., 1969)، پلت (*Acer velutinum*)، توسکای ییلاقی (*Alnus subcordata*) (Jourgholami et al., 2019)، گونهٔ پلت (*Acer velutinum*)، راش (*Fagus orientalis*)، ممرز (*Carpinus betulus*) (Jourgholami et al., 2018) و توسکای ییلاقی (*Alnus subcordata*) در ایران (Rahmani Haftkhani et al., 2025) پژوهش شده است. در زمینهٔ تسریع بازیابی خاک مسیرهای چوبکشی با کاشت گونه‌های درختی در ایران کمتر تحقیق شده است (Jourgholami et al., 2018; Jourgholami et al., 2019; Rahmani Haftkhani et al., 2025). گونهٔ نوئل (*Picea abies* (L.) H. Karst.) از گونه‌های سوزنی‌برگی است که بعد از برداشت چوب به روش تدریجی پناهی در برخی مناطق جنگلی در سری ۲ ناو اسالم جنگلکاری شده است. این جنگلکاری‌ها روی مسیرهای چوبکشی هم انجام گرفته است. سیستم ریشه‌ای نوئل تأثیر مهمی در برهم‌کنش این گونه با محیط خاک دارد و می‌تواند بر ویژگی‌های فیزیکی و زیستی خاک مرتبط با فرایندهای بازیابی تأثیرگذار باشد. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که الگوی گسترش ریشه در این گونه به‌شدت تحت تأثیر شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک قرار دارد و ریزریشه‌ها اغلب در افق‌های سطحی غنی از هوموس و لایه‌های معدنی بالایی خاک تجمع می‌یابند، اگرچه در شرایط مناسب نفوذ ریشه به عمق‌های بیشتر نیز مشاهده می‌شود (Puhe, 2003). چرخهٔ سریع تولید و تجزیهٔ ریزریشه‌ها موجب ورود مستمر مادهٔ آلی به خاک می‌شود و تحریک فعالیت میکروبی، فرایند تجزیه مادهٔ آلی و چرخهٔ عناصر غذایی را تقویت می‌کند (Li et al., 2020). این ویژگی‌ها سبب بهبود تشکیل خاکدانه‌ها، افزایش پایداری ساختاری، بهبود تهویهٔ خاک و ارتقای فعالیت زیستی در ناحیهٔ ریشه می‌شوند. بنابراین شبکهٔ متراکم ریزریشه‌های نوئل این گونه را به گزینه‌ای مناسب برای بررسی نقش درختان در راهبردهای زیست‌مهندسی بازیابی خاک‌های کوبیده و تخریب‌شده در مسیرهای چوبکشی تبدیل می‌کند. این

پژوهش با هدف مقایسهٔ خصوصیات فیزیکی خاک و ریزریشه در مسیرهای چوبکشی جنگلکاری‌شده با گونهٔ نوئل، عرصهٔ جنگلکاری‌شده با گونهٔ نوئل و مسیر چوبکشی بدون جنگلکاری انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ پژوهش

سری دو ناو حوزهٔ هفت ناو در محدودهٔ حوزهٔ جنگلداری شهرستان تالش بین طول‌های جغرافیایی "۳۶ ۴۴' ۴۸° تا "۵۸ ۴۹' ۴۸° درجهٔ شرقی و عرض‌های جغرافیایی"۲۳ ۳۷' ۳۷° تا "۳۱ ۴۲' ۳۷° درجهٔ شمالی در استان گیلان در حدود ارتفاعی ۲۸۰ تا ۲۱۲۰ متر بالاتر از سطح دریا واقع شده است. متوسط بارش سالانهٔ منطقه ۹۵۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانهٔ آن، ۱۰/۹ درجهٔ سانتی‌گراد است. این پژوهش در پارسل ۷۶ این سری انجام گرفت (شکل ۱). ارتفاع این پارسل از سطح دریا ۱۷۰۰متر، جهت عمومی شرقی، بافت خاک لومی ماسه‌ای، تیپ جنگل راشستان همراه با جنگلکاری‌های نوئل، کاج سیاه و لاریکس، با تعداد در هکتار ۱۱۴ اصله و حجم در هکتار ۲۶۸ متر مکعب است. در این پارسل ۹۵۰ متر مسیر چوبکشی وجود دارد که بعد از پایان عملیات برداشت درختان در سال ۱۳۶۵ به روش تدریجی- پناهی، سطح آنها با استفاده از گونه‌های سوزنی‌برگ نوئل (*Picea abies* (L.) Karst.)، کاج سیاه (*Pinus nigra* Arnold) و لاریکس (*Larix decidua* Mill.) جنگلکاری شده و تاکنون برداشت دیگری در این پارسل انجام نگرفته است. عملیات قطع با استفاده از اره‌موتوری و به‌صورت نیمه‌مکانیزه و خروج چوب به‌صورت گرده‌بینهٔ بلند با استفاده از اسکیدر چرخ‌زنجیری زتور LTT 100A انجام گرفت. متوسط شیب مسیرهای چوبکشی ۱۴ درصد، حجم بار در هر نوبت ۳/۵ متر مکعب و تعداد گرده‌بینه در هر نوبت ۲ اصله بود. چوبکشی در فصل تابستان و در شرایط خشک خاک انجام گرفت. طبقهٔ ترافیک مسیر چوبکشی زیاد (بیش از ۱۵ تردد) و متوسط شیب آن ۱۵ درصد بود.

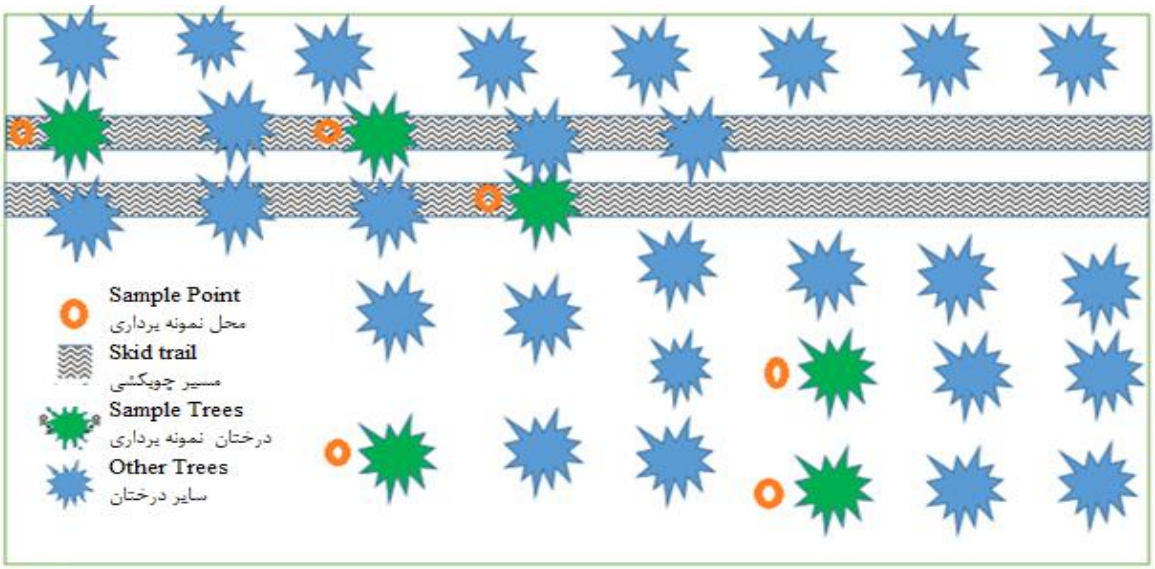


شکل ۱- موقعیت منطقهٔ پژوهش در ایران و سری دو ناو اسالم

Figure 1. Location of study area on a map of Iran (left) and on a map of the Nav forests (right)

شیوهٔ اجرای پژوهش

برای بررسی اثر کاشت گونهٔ نوئل بر خصوصیات فیزیکی خاک و ریزریشه، سه قطعه نمونهٔ مستطیل‌شکل با ابعاد ۴×۲۰ متر به‌صورت تصادفی مشخص و در داخل هر قطعه نمونه یک درخت نوئل برای پژوهش انتخاب شد (NSIST). در هر قطعه زمین دو نقطهٔ کنترل انتخاب شدند؛ اولین نقطه در فاصلهٔ ۲۰ متری خارج از مسیر چوبکشی در منطقه‌ای با درختان نوئل (NSIF) و دومی در داخل مسیر چوبکشی در منطقه‌ای بدون درختان نوئل (UST). شکل ۲ یکی از قطعات نمونهٔ انتخاب‌شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲- موقعیت درختان روی مسیر چوبکشی، داخل جنگل و مسیر چوبکشی بدون درخت و محل‌های نمونه‌برداری

Figure 2. Location of the studied trees on the skid trail, inside the forest and on the skid trail without trees, and sampling locations

تمام درختان انتخاب‌شده تقریباً قطر (۳۰-۲۵ سانتی‌متر) و ارتفاع (۱۵-۱۲ متر) یکسانی داشتند. در فاصلهٔ یک متری از ساقه‌های درختان نوئل و رو به پایین شیب دامنه (Deljouei et al., 2020; Rahmani Haftkhani et al., 2025)، نمونه‌های خاک در طبقات عمق به‌وسیلهٔ سیلندری به طول ۱۰ و قطر ۵/۶ سانتی‌متر (۲۴۶ سانتی‌متر مکعب) جمع‌آوری (Tavankar et al., 2022) و درون کیسه‌های پلاستیکی به آزمایشگاه منتقل شدند. برای تعیین زیست‌تودهٔ ریزریشه، نمونه‌هایی با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر و تا عمق ۴۰ سانتی‌متر جمع‌آوری شدند (Rahmani Haftkhani et al., 2025). با استفاده از الک (با قطر ۲ میلی‌متر) و روش شست‌وشو، ریشه‌های ریز با قطر کمتر از ۲ میلی‌متر از نمونه‌های خاک جدا شدند. نمونه‌های الک‌شده به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجهٔ سانتی‌گراد در آون خشک شدند (Malo & Messier, 2011). از جرم نمونه‌های خشک‌شده برای محاسبهٔ تراکم آنها در هر متر مکعب برای هر نمونه استفاده شد. وزن مخصوص ظاهری هر نمونه خاک به کمک رابطهٔ ۱، تخلخل کل از رابطهٔ ۲ و درصد رطوبت از رابطهٔ ۳ به دست آمد.

رابطهٔ ۱
$$BD = \frac{m}{v}$$

m جرم خاک خشک‌شده در کورهٔ الکتریکی برحسب گرم و v حجم سیلندر برحسب سانتی‌متر مکعب است.

رابطهٔ ۲
$$AP = (1 - BD / 2.65) \times 1$$

AP تخلخل کل به درصد، BD جرم مخصوص ظاهری و ۲/۶۵ وزن مخصوص ظاهری برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب است.

رابطهٔ ۳ $$MC(\%) = \frac{W_{wet} \times W_{dry}}{W_{dry}} \times 100$$

MC درصد رطوبت، W_{wet} جرم نمونهٔ مرطوب و W_{dry} جرم نمونهٔ خشک است.

برای تجزیه‌وتحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS 17، ابتدا با آزمون کولموگراف- اسمیرنوف نرمال بودن داده‌ها بررسی شد. برای بررسی اثر تیمارهای محل نمونه‌برداری و عمق خاک بر مقدار بازیابی خصوصیات خاک از تجزیهٔ واریانس دوطرفه استفاده شد. همگنی واریانس بین تیمارها با آزمون لون در سطح ۰/۰۱ بررسی شد. برای داده‌های دارای توزیع نرمال که اثر هر یک از عوامل در تجزیهٔ واریانس معنی‌دار بود، از آزمون مقایسه‌ای چندگانهٔ دانکن برای گروه‌بندی استفاده شد.

نتایج

رطوبت نسبی خاک

مقایسهٔ میانگین درصد رطوبت در طبقات موقعیت، عمق و اثر متقابل آنها با استفاده از آنالیز واریانس دوعامله نشان داد که اثر موقعیت، عمق خاک و اثر متقابل آنها بر این متغیر تأثیر معنی‌داری دارد (جدول ۱).

جدول ۲ نتایج مربوط به میانگین درصد رطوبت تیمارهای بررسی‌شده را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار رطوبت در NSIF و در عمق ۱۰-۰ سانتی‌متری (۴۹/۰۶±۳۷/۵) و کمترین مقدار آن در UST و عمق ۲۰-۱۰ سانتی‌متری (۱۱/۰۸±۱۱/۵) مشاهده شد. مقدار این متغیر در تیمارهای NSIF و NSIST تفاوت معنی‌داری نشان نداد؛ اما این دو تیمار با تیمار UST تفاوت معنی‌داری داشتند. همچنین مقدار درصد رطوبت در طبقهٔ عمق ۱۰-۰ سانتی‌متر به‌طور معنی‌داری بیشتر از طبقات دیگر عمق خاک بود (جدول ۲).

بافت خاک

نتایج آزمون آنالیز واریانس دوعامله نشان داد که اثر عمق خاک بر مقدار درصد رس تأثیر معنی‌داری دارد؛ اما موقعیت و اثر متقابل دو تیمار بر مقدار این متغیر تأثیر معنی‌داری نداشت (جدول ۳). بیشترین مقدار رس در عمق ۱۰-۰ سانتی‌متری و در تیمار NSIST (۳/۰۶±۲۲/۱۰) و کمترین مقدار آن در عمق ۴۰-۳۰ سانتی‌متری و در تیمار NSIST (۲/۴۵±۱۳/۷۶) مشاهده شد. مقدار این متغیر در طبقات عمق ۱۰-۰ و ۲۰-۱۰ به‌طور معنی‌داری بیشتر از طبقات عمق ۳۰-۲۰ و ۴۰-۳۰ سانتی‌متر بود (جدول ۳). بیشترین درصد سیلت در عمق ۳۰-۲۰ سانتی‌متری و تیمار NSIST مشاهده شد، ولی اثر تیمارها و اثر متقابل آنها بر متغیر درصد سیلت معنی‌دار نبود (جدول ۴). این روند در درصد ماسه هم مشاهده شد (جدول ۴).

جدول ۱- آنالیز واریانس دوعاملهٔ اثر موقعیت، عمق و اثر متقابل آنها بر درصد رطوبت

Table 1. Results of two-way analysis of variance (ANOVA) for the effects of location, depth and their interaction (location × depth) on moisture percent

منبع	مجموع مربعات Sum-of-Squares	درجهٔ آزادی Degrees of Freedom	میانگین مربعات Mean Squares	آمارهٔ F F Ratio	معنی‌داری *p*-Value
موقعیت Location	349.608	2	174.804	15.260	0.000
عمق Depth	740.915	3	246.972	21.560	0.000
اثر متقابل موقعیت و عمق Depth × Location	787.501	6	131.250	11.458	0.000
خطا Error	274.917	24	11.455		
مجموع Total	11924.593	36			

جدول ۲- میانگین رطوبت خاک (میانگین±انحراف معیار) در تیمارهای مختلف

Table 2. Average soil moisture (mean ± standard error) by treatment

عمق خاک Soil Depth	داخل جنگل (NSIF) Inside Forest	داخل مسیر چوبکشی (NSIST) Inside Skid Trail	مسیر فاقد تیمار (UST) Untreated Skid Trail	مجموع Total
0-10	37.49±5.06^{a}	23.76±4.25^{b}	11.73±1.30^{c}	24.33±8.66^{A}
10-20	15.29±1.99^{c}	15.75±4.75^{c}	11.11±5.08^{c}	14.05±4.24^{B}
20-30	11.17±1.26^{c}	17.67±2.23^{c}	12.08±3.09^{c}	13.64±3.65^{B}
30-40	12.03±1.51^{c}	16.20±4.09^{c}	13.42±2.19^{c}	13.88±3.05^{B}
مجموع Total	19.00±7.53^{A}	18.35±4.75^{A}	12.08±2.89^{B}	

توجه: حروف کوچک متفاوت نشان‌دهندهٔ تفاوت معنی‌دار میانگین‌ها در تیمارها و عمق‌های مختلف خاک و حروف بزرگ متفاوت نشان‌دهندهٔ تفاوت معنی‌دار میانگین‌ها در تیمارها (بدون در نظر گرفتن عمق خاک) و عمق‌های مختلف خاک (بدون در نظر گرفتن تیمار) از طریق آزمون دانکن در سطح α=۰/۰۵ است.

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among the means in treatments and different soil depths, while different uppercase letters indicate significant differences among the means of treatments (regardless of soil depth) and among different soil depths (regardless of treatment), based on Duncan's test at $\alpha = 0.05$.

جدول ۳- آنالیز واریانس دوعاملهٔ اثر موقعیت، عمق و اثر متقابل آنها بر درصد رس، سیلت و ماسه

Table 3. Results of two-way analysis of variance (ANOVA) for the effects of location, depth and their interaction (location × depth) on clay, silt, and gravel

	منبع	مجموع مربعات Sum-of-Squares	درجهٔ آزادی Degrees of Freedom	میانگین مربعات Mean Squares	آمارهٔ F F Ratio	معنی‌داری p-Value
رس Clay	موقعیت Location	13.65	2	6.83	0.24	0.795
	عمق Depth	208.28	3	69.43	2.40	0.095
	اثر متقابل موقعیت و عمق Depth × Location	150.78	6	25.13	0.87	0.535
	خطا Error	636.29	24	28.92		
	مجموع Total	63203.14	36			
سیلت Silt	موقعیت Location	20.07	2	10.04	0.33	0.728
	عمق Depth	119.09	3	39.70	1.32	0.295
	اثر متقابل موقعیت و عمق Depth × Location	90.22	6	15.04	0.50	0.803
	خطا Error	663.25	24	30.15		
	مجموع Total	54964.63	36	-		
ماسه sand	موقعیت Location	15.08	2	7.54	0.90	0.460
	عمق Depth	223.48	3	74.49	8.85	0.01
	اثر متقابل موقعیت و عمق Depth × Location	38.17	6	6.36	0.76	0.613
	خطا Error	185.18	24	8.42		
	مجموع Total	10849.26	36			

جدول ۴- توزیع اندازهٔ ذرات (درصد) نمونه‌های خاک که میانگین ± انحراف معیار را برای بخش‌های رس (<۲ میکرومتر)، سیلت (۵۰-۲ میکرومتر) و ماسه (۲۰۰۰-۵۰ میکرومتر) در تیمارهای مختلف در منطقهٔ تحقیق نشان می‌دهد.

Table 4. Particle size distribution (%) of soil samples, showing the mean ± standard error for clay (<2 μm), silt (2–50 μm), and sand (50–2000 μm) fractions across different treatments in the study area

	عمق خاک Soil Depth	داخل جنگل (NSIF) Inside Forest	داخل مسیر چوبکشی (NSIST) Inside Skid Trail	مسیر فاقد تیمار (UST) Untreated Skid Trail	مجموع Total
رس Clay	0-10	21.16±3.37	22.10±3.06	19.43±2.51	20.90±2.85^{A}
	10-20	18.83±1.25	20.36±3.12	19.86±1.51	19.68±1.96^{A}
	20-30	16.86±2.08	16.36±2.47	14.76±.56	16.00±1.89^{B}
	30-40	15.90±1.92	13.76±2.45	14.46±.76	14.71±1.86^{B}
	مجموع Total	18.19±2.87	18.15±4.17	17.13±2.94	
سیلت Silt	0-10	37.56±9.61	36.13±8.45	38.33±7.39	37.34±7.45
	10-20	36.10±5.04	38.80±5.81	41.30±1.47	38.73±4.51
	20-30	39.50±4.16	41.93±2.97	40.53±3.85	40.65±3.37
	30-40	37.43±3.34	40.13±5.41	37.36±2.28	38.31±3.64
	مجموع Total	37.65±5.31	39.25±5.56	39.38±4.09	
ماسه Sand	0-10	41.27±7.42	41.77±7.37	42.23±5.64	41.76±5.96
	10-20	45.07±3.83	40.83±3.17	38.83±2.40	41.58±3.90
	20-30	43.63±2.25	41.70±0.60	44.70±4.40	43.34±2.82
	30-40	46.67±5.19	46.10±4.54	48.17±3.01	46.98±3.87
	مجموع Total	44.16±4.77	42.60±4.49	43.48±4.97	

توجه: حروف کوچک متفاوت نشان‌دهندهٔ تفاوت معنی‌دار میانگین‌ها در تیمارها و عمق‌های مختلف خاک و حروف بزرگ متفاوت نشان‌دهندهٔ تفاوت معنی‌دار میانگین‌ها در تیمارها (بدون در نظر گرفتن عمق خاک) و عمق‌های مختلف خاک (بدون در نظر گرفتن تیمار) از طریق آزمون دانکن در سطح α=۰/۰۵ است.

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among the means in treatments and different soil depths, while different uppercase letters indicate significant differences among the means of treatments (regardless of soil depth) and among different soil depths (regardless of treatment), based on Duncan's test at α = 0.05.

جرم مخصوص ظاهری

مقایسهٔ میانگین جرم مخصوص ظاهری در طبقات موقعیت، عمق و اثر متقابل آنها با استفاده از آنالیز واریانس دوعامله نشان داد که اثر موقعیت، عمق خاک و اثر متقابل آنها بر تغییرات جرم مخصوص ظاهری معنی‌دار است (جدول ۵).

جدول ۵- آنالیز واریانس دوعاملهٔ اثر موقعیت، عمق و اثر متقابل آنها بر جرم مخصوص ظاهری

Table 5. Results of two-way analysis of variance (ANOVA) for the effects of location, depth and their interaction (location × depth) on bulk density

منبع	مجموع مربعات Sum-of-Squares	درجهٔ آزادی Degrees of Freedom	میانگین مربعات Mean Squares	آمارهٔ F F Ratio	معنی‌داری *p*-Value
موقعیت Location	0.010	2	0.005	6.12	0.036
عمق Depth	0.440	3	0.147	182.89	0.001
اثر متقابل موقعیت و عمق Depth × Location	0.062	6	0.010	12.88	0.001
خطا Error	0.018	24	0.001		
مجموع Total	116.690	36			

بیشترین مقدار جرم مخصوص ظاهری متعلق به تیمار UST (۱/۱۶±۰/۰۱) و کمترین مقدار آن متعلق به تیمارNSIF (۱/۰۱±۰/۰۰) بود. مقایسهٔ میانگین جرم مخصوص ظاهری در مناطق مختلف با آزمون دانکن انجام گرفت و نتایج نشان داد که مقدار جرم مخصوص ظاهری در تیمار UST و عمق ۴۰-۳۰ سانتی‌متر به‌طور معنی‌داری دارای بیشترین مقدار است (جدول ۶).

مقایسهٔ میانگین درصد تخلخل در طبقات موقعیت، عمق و اثر متقابل آنها با استفاده از آنالیز واریانس دوعامله نشان داد که اثر موقعیت و عمق خاک بر تغییرات جرم مخصوص ظاهری معنی‌دار است، اما اثر متقابل آنها بر این متغیر معنی‌دار نبود (جدول ۷).

بیشترین مقدار درصد تخلخل متعلق به عمق ۱۰-۰ سانتی‌متر و تیمار NSIF (60.52±0.50) (۶۰/۵۲±۰/۵۰) و کمترین مقدار آن متعلق به تیمار UST و عمق ۳۰-۲۰ سانتی‌متر (۴۲/۳۹±۳/۶۸) بود. مقادیر درصد تخلخل در سه تیمار NSIF، NSIST و UST تفاوت معنی‌داری داشتند، ولی در عمق ۱۰-۰ دو تیمار NSIF و NSIST تفاوت معنی‌داری نشان ندادند (جدول ۸).

جدول ۶- میانگین جرم مخصوص ظاهری (میانگین±انحراف معیار) در تیمارهای مختلف

Table 6. Average soil bulk density (mean ± standard error) by treatment

عمق خاک Soil Depth	داخل جنگل (NSIF) Inside Forest	داخل مسیر چوبکشی (NSIST) Inside Skid Trail	مسیر فاقد تیمار (UST) Untreated Skid Trail	مجموع Total
0-10	1.006±0.025^{a}	1.013±0.020^{a}	1.083±0.015^{cd}	1.04±0.037^{A}
10-20	1.063±0.015^{b}	1.036±0.015^{ab}	1.110±0.020^{d}	1.062±0.045^{B}
20-30	1.110±0.020^{d}	1.160±0.020^{e}	1.163±0.015^{e}	1.144±0.030^{C}
30-40	1.203±0.025^{f}	1.293±0.015^{g}	1.330±0.010^{i}	1.275±0.058^{D}
مجموع Total	1.096±0.077^{A}	1.126±0.118^{B}	1.172±0.100^{C}	

توجه: حروف کوچک متفاوت نشان‌دهندهٔ تفاوت معنی‌دار میانگین‌ها در تیمارها و عمق‌های مختلف خاک و حروف بزرگ متفاوت نشان‌دهندهٔ تفاوت معنی‌دار میانگین‌ها در تیمارها (بدون در نظر گرفتن عمق خاک) و عمق‌های مختلف خاک (بدون در نظر گرفتن تیمار) از طریق آزمون دانکن در سطح α=۰/۰۵ است.

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among the means in treatments and different soil depths, while different uppercase letters indicate significant differences among the means of treatments (regardless of soil depth) and among different soil depths (regardless of treatment), based on Duncan's test at $\alpha = 0.05$.

جدول ۷- آنالیز واریانس دوعاملهٔ اثر موقعیت، عمق و اثر متقابل آنها بر درصد تخلخل

Table 7. Results of two-way analysis of variance (ANOVA) for the effects of location, depth and their interaction (location × depth) on total porosity

منبع	مجموع مربعات Sum-of-Squares	درجهٔ آزادی Degrees of Freedom	میانگین مربعات Mean Squares	آمارهٔ F F Ratio	معنی‌داری *p*-Value
موقعیت Location	80.68	2	40.34	1.09	0.392
عمق Depth	2173.69	3	724.56	19.57	0.001
اثر متقابل موقعیت و عمق Depth × Location	123.90	6	20.65	0.56	0.760
خطا Error	814.59	24	37.03		
مجموع Total	134539.05	36			

جدول ۸- میانگین تخلخل کل (میانگین±انحراف معیار) در تیمارهای مختلف

Table 8. Average soil total porosity (mean ± standard error) by treatment

عمق خاک Soil Depth	داخل جنگل (NSIF) Inside Forest	داخل مسیر چوبکشی (NSIST) Inside Skid Trail	مسیر فاقد تیمار (UST) Untreated Skid Trail	مجموع Total
0-10	60.52±0.50^{a}	59.86±6.90^{a}	52.19±4.36^{b}	57.53±4.68^{A}
10-20	58.28±2.18^{a}	51.58±2.07^{bc}	47.57±3.96^{bcd}	52.47±5.83^{B}
20-30	44.55±1.86^{d}	46.15±3.71^{cd}	42.38±3.68^{d}	45.94±3.63^{C}
30-40	50.94±7.80^{bc}	44.07±4.88^{cd}	42.83±2.18^{d}	44.36±5.84^{C}
مجموع Total	53.57±7.48^{A}	50.41±5.91^{B}	46.24±6.31^{C}	

توجه: حروف کوچک متفاوت نشان‌دهندهٔ تفاوت معنی‌دار میانگین‌ها در تیمارها و عمق‌های مختلف خاک و حروف بزرگ متفاوت نشان‌دهندهٔ تفاوت معنی‌دار میانگین‌ها در تیمارها (بدون در نظر گرفتن عمق خاک) و عمق‌های مختلف خاک (بدون در نظر گرفتن تیمار) از طریق آزمون دانکن در سطح α=۰/۰۵ است.

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among the means in treatments and different soil depths, while different uppercase letters indicate significant differences among the means of treatments (regardless of soil depth) and among different soil depths (regardless of treatment), based on Duncan's test at α = 0.05.

مقایسهٔ میانگین وزن ریزریشه در تیمارهای مختلف با استفاده از آنالیز واریانس دوعامله نشان داد که اثر موقعیت، عمق خاک و اثر متقابل آنها بر تغییرات وزن ریزریشه معنی‌دار است (α=۰/۰۰) (جدول ۹).

جدول ۱۰ نتایج مربوط به میانگین وزن ریزریشه به گرم بر دسی‌متر مکعب را در تیمارهای بررسی‌شده نشان می‌دهد. کمترین مقدار وزن ریزریشه مربوط به تیمار UST و عمق ۴۰-۳۰ سانتی‌متر (۰/۰۱±۰/۰۱ گرم بر دسی‌متر مکعب) و بیشترین مقدار ریزریشه مربوط به تیمار NSIF و عمق ۱۰-۰ سانتی‌متر (۰/۰±۱۶/۰۴ گرم بر دسی‌متر مکعب) بود.

جدول ۹- آنالیز واریانس دوعاملهٔ اثر موقعیت، عمق و اثر متقابل آنها بر وزن ریزریشه

Table 9. Results of two-way analysis of variance (ANOVA) for the effects of location, depth and their interaction (location × depth) on fine root mass

منبع	مجموع مربعات Sum-of-Squares	درجهٔ آزادی Degrees of Freedom	میانگین مربعات Mean Squares	آمارهٔ F F Ratio	معنی‌داری *p*-Value
موقعیت Location	0.141	2	0.070	390.99	0.000
عمق Depth	0.036	3	0.012	66.73	0.000
اثر متقابل موقعیت و عمق Depth × Location	0.003	6	0.001	3.71	0.000
خطا Error	0.004	24	0.0002		
مجموع Total	0.0002	36			

جدول ۱۰- میانگین وزن ریزریشه (میانگین±انحراف معیار) در تیمارهای مختلف
Table 10. Average fine root mass (mean ± standard error) by treatment

عمق خاک Soil Depth	داخل جنگل (NSIF) Inside Forest	داخل مسیر چوبکشی (NSIST) Inside Skid Trail	مسیر فاقد تیمار (UST) Untreated Skid Trail	مجموع Total
0-10	0.16 ± 0.04^{a}	0.14 ± 0.02^{ab}	0.03 ± 0.01^{de}	0.1114 ± 0.07^{A}
10-20	0.13 ± 0.02^{b}	0.09 ± 0.01^{c}	0.01 ± 0.01^{e}	0.0778 ± 0.05^{B}
20-30	0.10 ± 0.02^{c}	0.05 ± 0.02^{de}	0.01 ± 0.01^{e}	0.0530 ± 0.043^{C}
30-40	0.05 ± 0.02	0.02 ± 0.01^{de}	0.01 ± 0.01^{e}	0.227 ± 0.0204^{D}
مجموع Total	0.1119 ± 0.05^{A}	0.0733 ± 0.05^{B}	0.0134 ± 0.009^{C}	

توجه: حروف کوچک متفاوت نشان‌دهندهٔ تفاوت معنی‌دار میانگین‌ها در تیمارها و عمق‌های مختلف خاک و حروف بزرگ متفاوت نشان‌دهندهٔ تفاوت معنی‌دار میانگین‌ها در تیمارها (بدون در نظر گرفتن عمق خاک) و عمق‌های مختلف خاک (بدون در نظر گرفتن تیمار) از طریق آزمون دانکن در سطح α=۰/۰۵ است.

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among the means in treatments and different soil depths, while different uppercase letters indicate significant differences among the means of treatments (regardless of soil depth) and among different soil depths (regardless of treatment), based on Duncan's test at $\alpha = 0.05$.

بحث

در شرایط طبیعی، بازیابی خواص فیزیکی خاک پس از چوبکشی زمینی، فرایندی کند است که ممکن است از چند سال تا چند دهه طول بکشد (Ramineh et al., 2023). ماشین‌های چوبکشی زمینی اغلب به دلایل اقتصادی و صرفاً برای انتقال چوب از عرصه‌های جنگلی استفاده می‌شوند و در این فرایند، تغییراتی در ساختار خاک مسیرهای چوبکشی ایجاد می‌کنند (Eisenbies et al., 2007). روند بازیابی خاک مسیرهای چوبکشی متأثر از عواملی مانند شرایط آب‌وهوایی، شدت کوبیدگی، سطح رطوبت، نوع خاک، پوشش گیاهی، انبساط و انقباض خاک، دورهٔ انجماد و ذوب یخ، ریشه‌زایی گیاهان، مقدار مادهٔ آلی، مقدار بارندگی و عوامل فیزیوگرافی (ارتفاع از سطح دریا، شیب منطقه و جهت جغرافیایی) است (DeArmond et al., 2021). برای تسریع روند بازیابی خاک مسیرهای چوبکشی از روش‌های مختلفی از جمله خاک‌ورزی بیولوژیک استفاده می‌شود (Rahmani Haftkhani et al., 2025). در این پژوهش اثر طولانی‌مدت کاشت درخت نوئل بر بازیابی خصوصیات فیزیکی خاک مسیرهای چوبکشی بررسی شد. نتایج پژوهش نشان داد که مقادیر رس، سیلت و ماسه در تیمارهای مختلف بازیابی شده است و تفاوت معنی‌داری در مقادیر این سه متغیر در مناطق مختلف مشاهده نشد (جدول ۴). به نظر می‌رسد که ۴۰ سال زمان کافی برای بازیابی مقادیر بافت خاک بوده است. بازیابی بافت خاک احتمالاً از طریق فرایندهای طبیعی شامل تجزیهٔ مواد آلی، فعالیت میکروبی، رشد ریشه‌ها و نفوذ آب به لایه‌های سطحی و عمیق خاک اتفاق افتاده است. Jourgholami et al. (2018) در بررسی احیای اکولوژیکی خاک کوبیده‌شده پس از کاربرد مالچ‌های مختلف برگ در مسیر چوبکشی طی یک دورهٔ پنج‌ساله این زمان را برای بازیابی خصوصیات بافت خاک کافی ندانستند. نتایج پژوهش نشان داد که جرم مخصوص ظاهری در طبقات مختلف موقعیت تفاوت معنی‌داری دارند (جدول ۶). کمترین مقدار جرم مخصوص ظاهری در تیمار NSIF و بیشترین مقدار آن در تیمار UST مشاهده شد (جدول ۶). بهبود وضعیت هوادهی خاک و تسریع بازیابی ناشی از تکنیک‌های بازسازی و مالچ‌پاشی، آهک‌پاشی، کاشت درختان توسکای خاکستری و ترکیبی از آنها در پژوهش Fernández et al. (2019) گزارش شده است. Warlo et al. (2022) در بررسی بازیابی خاک مسیرهای چوبکشی در شمال شرقی سوئیس با توسکای قشلاقی کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش تخلخل خاک را گزارش کردند که نشان‌دهندهٔ بازیابی جزئی خصوصیات

فیزیکی خاک است و نتایجی همسو با این پژوهش دارد. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که تحت تغییرات محیطی، گرچه توزیع عملکردی ریزریشه‌ها در گونه‌هایی مانند نوئل تغییر نمی‌کند، شاخص‌های مورفولوژیک ریزریشه مانند شدت انشعاب به‌طور معنی‌داری تغییر می‌یابد که نشان‌دهندهٔ پاسخ سازگاری ریشه‌ها به شرایط محیطی است. این تطابق مورفولوژیک ممکن است به افزایش ایجاد منافذ در خاک و بهبود خصوصیات فیزیکی مانند تخلخل و کاهش جرم مخصوص ظاهری کمک کند و با نتایج این پژوهش همسو باشد (Boycheva, 2024). همسو با نتایج این پژوهش Meyer et al. (2014) اثر کاشت توسکای قشلاقی با و بدون استفاده از کمپوست بر مسیرهای چوبکشی را بررسی کردند و دریافتند که ترکیب کاشت درختان توسکا و کمپوست سبب بازیابی جزئی خاک مسیرهای چوبکشی می‌شود، هرچند در مقایسه با داخل جنگل بازیابی کامل انجام نمی‌گیرد. همچنین این پژوهش نشان داد که رشد توسکای قشلاقی در مسیرهای چوبکشی می‌تواند ساختار، نفوذپذیری و جرم مخصوص ظاهری خاک را بهبود بخشد و پتانسیل تسریع بازیابی خاک در این شرایط را داراست. Jourgholami et al. (2018) در پژوهش خود به نقش تیمار حفاظتی خاک اره و انحراف‌دهندهٔ آب اشاره کردند و نقش آنها را در تسریع بازیابی خاک مسیر چوبکشی نشان دادند، هرچند این تیمارها هم موجب بازیابی کامل خاک مسیرهای چوبکشی نشد. نتایج درصد تخلخل کل تیمارها نشان داد که کاشت گونهٔ نوئل بر افزایش درصد تخلخل کل مؤثر بود و مقدار آن با تیمار UST تفاوت معنی‌داری داشت (جدول ۸). هرچند بهبود ویژگی‌های خاک در عمق‌های بیشتر همچنان به زمان نیاز دارد تا به شرایط مشابه داخل جنگل نزدیک شود. البته در عمق ۱۰-۰ سانتی‌متری مقادیر این متغیر تفاوت معنی‌داری با تیمار NSIF نشان نداد (جدول ۸). کاشت درخت نوئل و رشد ریشهٔ این درخت بر درصد تخلخل کل خاک مسیر چوبکشی تأثیر معنی‌داری داشت؛ هر چند این تأثیر در زمان طولانی اتفاق افتاد. ریشه‌های درختان با ایجاد حفره‌های زیستی[1]، تجزیهٔ خاک و افزودن مواد آلی به‌تدریج تخلخل درشت خاک را افزایش و مقاومت مکانیکی خاک را کاهش می‌دهند. البته سرعت و مقدار بازیابی وابسته به شدت کوبیدگی، بافت خاک، نوع گونه و مدیریت پس از برداشت چوب است (Schäffer, 2022; Meyer et al., 2014). ریزریشه‌های درختان با حفر کانال‌هایی در خاک، نفوذ آب و هوا را افزایش می‌دهند (Schäffer, 2022). همچنین این ریشه‌ها در شکل‌دهی خاکدانه و پایداری خاک تأثیر مهمی دارند (Nash et al., 2021). افزایش مواد آلی و فعالیت زیستی ناشی از برگ‌ریزی و شاخه‌ریزی درختان سبب تحریک میکروارگانیسم‌ها می‌شود و به ایجاد حفره‌ها و افزایش تخلخل موضعی در خاک مسیر چوبکشی کمک می‌کند (Nash et al., 2021).

نتایج رطوبت خاک نشان داد که بیشترین درصد رطوبت در عمق ۱۰-۰ سانتی‌متری و تیمارهای NSIF و NSIST بود (جدول ۲). زیاد بودن درصد رطوبت در این مناطق نشان‌دهندهٔ بهبود شرایط خاک برای حفظ آب است. برخی پژوهش‌ها مانند Chen et al. (2014) و Jourgholami et al. (2021) به تأثیر کاشت درختان در حفظ آب و افزایش درصد رطوبت خاک اشاره کرده‌اند که در نهایت ممکن است به بازیابی خصوصیات فیزیکی خاک بینجامد (Nazari et al., 2021). هرچند درصد رطوبت خاک به‌عنوان یک شاخص نسبی، تنها تصویر محدودی از وضعیت خاک ارائه می‌دهد و ممکن است تحت تأثیر شرایط محیطی و زمان برداشت نمونه‌ها قرار گیرد. در این پژوهش، نمونه‌ها در زمان‌های متفاوت جمع‌آوری شدند و بنابراین برخی تفاوت‌های مشاهده‌شده بین تیمارها ممکن است تا حدی ناشی از تغییرات زمانی و شرایط محیطی باشد. به همین دلیل، رطوبت خاک باید همراه با شاخص‌های دیگر مانند جرم مخصوص

1. Biopore

ظاهری، تخلخل و زیست‌تودهٔ ریزریشه برای ارزیابی جامع بازیابی خاک در نظر گرفته شود.

در پژوهش حاضر، اثرهای کاشت گونهٔ نوئل بر توزیع زیست تودهٔ ریزریشه در تیمارهای NSIF، NSIST و UST در چهار طبقهٔ عمق (۱۰-۰، ۲۰-۱۰، ۳۰-۲۰، ۴۰-۳۰ سانتی‌متری) بررسی شد. زیست‌تودهٔ ریزریشه در تیمار NSIF بیشترین مقدار و در مسیر تیمار UST کمترین مقدار را داشت. همچنین مقدار این متغیر در تیمار NSIST به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار UST بود (جدول ۱۰). این نتایج تأییدکنندهٔ تأثیر ریزریشهٔ گونهٔ نوئل در افزایش تخلخل خاک کوبیده‌شدهٔ مسیر چوبکشی است. این نقش هم به‌صورت فیزیکی از راه نفوذ در خاک و هم به‌صورت بیوشیمیایی از راه ترشحات ریشه فراهم می‌شود (Rahmani Haftkhani et al., 2025). Fernández et al. (2015) با پژوهش دربارهٔ کاشت درختان توسکا در حاشیهٔ مسیر چوبکشی بیشترین مقدار وزن ریزریشه را در بین رد چرخ مشاهده کردند. Warlo et al. (2022) پس از بررسی ویژگی‌های ساختار خاک در یک مسیر چوبکشی ده‌ساله با و بدون تیمار توسکای قشلاقی در سوئیس، بیشترین زیست‌تودهٔ ریزریشه را در مناطق شاهد و کمترین آن را در مناطق تیمارنشده گزارش کردند که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. یافتهٔ مشابهی را Malo & Messier (2011) برای رشد ریشهٔ افرای قندی (*Acer saccharum* Marsh.) درکبک کانادا گزارش کرده‌اند. طبق یافته‌های ما، بیشترین مقدار ریزریشه در عمق ۱۰-۰ سانتی‌متر وجود داشت و با افزایش عمق، مقدار آنها کاهش یافت که با نتایج پژوهش‌های قبلی مطابقت دارد (Malo & Messier, 2011; Encinas-Valero et al., 2022; Rahmani Haftkhani et al., 2025). Fernández et al. (2017) نیز بیشترین مقدار زیست‌تودهٔ ریزریشه را در عمق ۱۰-۰ سانتی‌متری گزارش کردند، اگرچه در پژوهش خود، نبود تفاوت معنی‌دار در اعماق خاک را یادآور شدند. این الگوها با رفتارهای اکولوژیکی شناخته‌شدهٔ ریزریشه‌ها سازگار است؛ آنها تمایل دارند در لایه‌های بالایی خاک که آب، مواد مغذی و تبادل گاز بیشتر در دسترس است متمرکز شوند (Fernández et al., 2019). ریزریشه‌ها مسئول جذب منابع غذایی، چرخهٔ کربن و تشکیل خاکدانه‌های خاک از طریق ترشحات ریشه و تعاملات میکروبی هستند (Fernández et al., 2019). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که کربن و مواد مغذی آزادشده به خاک از راه تجزیهٔ ریزریشه ممکن است از تجزیهٔ برگ‌ها بیشتر باشد (Eldhuset et al., 2017)؛ الگویی که در خاک‌های جنگلی مختلف با ویژگی‌های فیزیکی متفاوت مشاهده شده است (Ding et al., 2019; Freschet et al., 2021). پژوهشی در جنگل‌های سوزنی‌برگ Hemiboreal (شامل Picea abies و Pinus sylvestris) نشان داد که تجزیهٔ ریزریشه‌ها و برگ‌ها به آزادسازی مواد مغذی و کربن کمک می‌کند و نرخ آزادسازی نیتروژن و فسفر به نسبت ترکیب شیمیایی مادهٔ اولیه وابسته است. همچنین ریزریشه‌ها نسبت به برگ‌ها مقادیر متفاوتی از نیتروژن و فسفر را حفظ یا آزاد می‌کنند که نشان‌دهندهٔ نقش مهم ریزریشه در چرخهٔ مواد مغذی است (Kriiska et al., 2021). توسعهٔ ریزریشه‌ها اغلب توسط فشردگی خاک محدود می‌شود، وضعیت نامطلوبی که به‌طور معمول توسط ماشین‌آلات چوبکشی زمینی ایجاد می‌شود (Jagodzinski & Kalucka, 2011; Clemmensen et al., 2013) خاک‌های فشرده با کاهش فضای منافذ و در دسترس بودن اکسیژن، ریشه‌زایی را محدود می‌کنند و بر رشد و حرکت ریزریشه‌ها تأثیر مستقیم می‌گذارند. Esmaiili et al. (2023) در پژوهشی دربارهٔ ذخیرهٔ آب و پراکنش ریشه در عمق‌های مختلف خاک در جنگلکاری‌های زبان‌گنجشک و پیسه‌آ در جنگل آموزشی پژوهشی خیرود نشان دادند که درصد سطح ریشه به سطح خاک و تعداد ریشه در گونهٔ پیسه‌آ با افزایش عمق خاک کاهش می‌یابد که منطبق بر نتایج این تحقیق است. پژوهش‌های عملکردی ریزریشه در گونهٔ نوئل نشان داده‌اند که این گونه در پاسخ به شرایط محیطی،

توزیع عملکردی و مورفولوژی ریزریشه‌های خود را تغییر می‌دهد، به‌طوری که افزایش فعالیت ریزریشه در لایه‌های سطحی خاک در ارتباط با شرایط تنش‌زا مشاهده شده است. این تغییرات عملکردی ممکن است سبب بهبود ساختمان خاک و افزایش تخلخل شود که یافته‌های این پژوهش با آن همخوانی دارد (Boycheva, 2024). تا کنون هیچ پژوهش مستقیمی دربارهٔ اثر گونهٔ نوئل بر بازیابی خصوصیات فیزیکی، شیمیایی یا بیولوژیکی خاک مسیرهای چوبکشی منتشر نشده است. با توجه به ویژگی‌های زیستی و فیزیولوژیکی این گونه و کندی تجزیهٔ برگ‌ها و لاشبرگ آن، بازیابی خاک تحت پوشش نوئل نسبت به گونه‌های پهن‌برگ مانند توسکا محدودتر است (Puhe, 2003; Malo & Messier, 2011). بنابراین نتایج این پژوهش صرفاً نشان‌دهندهٔ رفتار این گونه در شرایط بررسی‌شده است و می‌توان از آن به‌عنوان مبنایی برای پژوهش‌های آینده در ارزیابی تأثیر گونه‌های سوزنی‌برگ در بازیابی خاک مسیرهای چوبکشی استفاده کرد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که کاشت گونهٔ پیسه‌آ می‌تواند برخی خصوصیات خاک مسیرهای چوبکشی را تحت شرایط خاص بهبود بخشد، هرچند با توجه به حساسیت گونه‌های سوزنی‌برگان غیربومی به عوامل محیطی و رقابت محدود با گونه‌های بومی، این یافته تنها مربوط به شرایط منطقهٔ پژوهش است و برای برنامه‌های زیست‌مهندسی مسیرهای چوبکشی، استفاده از گونه‌های بومی تندرشد مانند توسکا توصیه می‌شود. تراکم خاک ناشی از تردد ماشین‌آلات چوبکشی عامل اصلی کاهش ریزریشه‌ها در مسیرهای چوبکشی است، از این‌رو استفاده از بهترین شیوه‌های مدیریتی برای بازیابی خاک‌های متراکم باید در طول مرحلهٔ برنامه‌ریزی و اجرای عملی فعالیت‌های چوبکشی در اولویت قرار گیرد. بر اساس یافته‌های ما، کاشت نهال‌های درخت نوئل در سرعت بخشیدن به بازیابی خاک‌های جنگلی فشرده در طول عملیات چوبکشی می‌تواند مؤثر باشد. افزون‌بر این، انتظار می‌رود توسعهٔ ریزریشه‌های این گونه در بازیابی عملکردهای شیمیایی و بیولوژیکی خاک و به حداقل رساندن فرسایش (همراه با اصلاح‌کننده‌های آلی مانند مالچ‌های گیاهی، لاشبرگ و ... و ساخت انحراف دهنده‌های آب) مؤثر باشد. برای درک کامل سازوکارها و پتانسیل بلندمدت حمایتی برای رشد ریزریشه‌ها برای بازیابی خاک، تحقیقات آینده باید گسترهٔ وسیع‌تری از متغیرهای محیطی و مدیریتی را در دوره‌های نظارت طولانی‌تر بررسی کنند. در این زمینه، بررسی پتانسیل احیای گونه‌های دیگر مانند پلت و برخی از درختان سوزنی‌برگ دیگر که در منطقهٔ پژوهش برای احیای خواص خاک در مسیرهای چوبکشی استفاده شده‌اند ارزشمند خواهد بود.

سپاسگزاری

این مقاله برگرفته از رسالهٔ دکتری دانشگاه گیلان است. نویسندگان مراتب سپاسگزاری خود را از دانشگاه گیلان، ادارهٔ کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گیلان و مؤسسهٔ تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور اعلام می‌دارند. همچنین از راهنمایی‌ها و کمک‌های ارزشمند سرکار خانم دکتر کمالی، آقای دکتر صادقی‌پور، آقای دکتر کوچکی، مهندس مرادی و آقایان فاتح ناصری و فائز ناصری صمیمانه سپاسگزارند.

References

Albaugh, T.J., Alvarez, J., Rubilar, R.A., Fox, T.R., Allen, H.L., Stape, J.L., & Mardones, O. (2015). Long-term Pinus radiata productivity gains from tillage, vegetation control, and fertilization. *Forest Science*, *61*(4), 800–808. https://doi.org/10.5849/forsci.14-030

Boycheva, V. (2024). Fine-root functional distribution and morphology in Norway spruce (Picea abies) and silver birch (*Betula pendula*) in future climate (Master's thesis). Institute of Agricultural and Environmental Sciences, Estonian University of Life Sciences. 61p.

Chen, B., Liu, E., Tian, Q., Yan, C., & Zhang, Y. (2014). Soil nitrogen dynamics and crop residues: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *34*, 429–442. https://doi.org/10.1007/s13593-013-0180-0

Clemmensen, K., Bahr, A., Ovaskainen, O., Dahlberg, A., Ekblad, A., Wallander, H., Stenlid, J., Finlay, R., & Wardle, D. (2013). Roots and associated fungi drive long-term carbon sequestration in boreal forest. *Science*, *339*(6127), 1615–1618. https://doi.org/10.1126/science.1231923

DeArmond, D., Ferraz, J.B., & Higuchi, N. (2021). Natural recovery of skid trails: A review. *Canadian Journal of Forest Research*, *51*(8), 948–961. https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0416

Deljouei, A., Abdi, E., Schwarz, M., Majnounian, B., Sohrabi, H., & Dumroese, R.K. (2020). Mechanical characteristics of the fine roots of two broadleaved tree species from the Temperate Caspian Hyrcanian Ecoregion. *Forests*, *11*(3), 345. https://doi.org/10.3390/f11030345

Ding, M., Flaig, R.W., Jiang, H.L., & Yaghi, O.M. (2019). Carbon capture and conversion using metal–organic frameworks and MOF-based materials. *Chemical Society Reviews*, *48*(8), 2783–2828. https://doi.org/10.1039/C8CS00999J

Eisenbies, M., Aust, W., Burger, J., & Adams, M.B. (2007). Forest operations, extreme flooding events, and considerations for hydrologic modeling in the Appalachians: A review. *Forest Ecology and Management*, *242*(1), 77–98. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.01.034

Eldhuset, T.D., Kjønaas, O.J., & Lange, H. (2017). Decomposition rates and nutrient dynamics of Picea abies needles, twigs and fine roots after stem-only harvesting in eastern and western Norway. *Plant and Soil*, *418*(1), 357-375. https://doi.org/10.1007/s11104-017-3302-1

Encinas-Valero, M., Esteban, R., Hereş, A.M., Vivas, M., Fakhet, D., Aranjuelo, I., Solla, A., Moreno, G., & Curiel Yuste, J. (2022). Holm oak decline is determined by shifts in fine root phenotypic plasticity in response to belowground stress. *New Phytologist*, *235*(6), 2237–2251. https://doi.org/10.1111/nph.18217.

Esmaiili, M., Abdi, E., Saravi, M.M., & Hayati, E. (2023). Soil water storage and root distribution under Picea abies and *Fraxinus excelsior* plantations. *Iranian Journal of Forest*, *14*(4), 355–369. https://doi.org/10.22034/ijf.2022.313303.1810. (In persian)

Fernández, J.F., Hartmann, P., Schäffer, J., Puhlmann, H., & von Wilpert, K. (2017). Initial recovery of compacted soil—Planting and technical treatments decrease CO2 concentrations in soil and promote root growth. *Annals of Forest Science*, *74*(4), 1–12. https://doi.org/10.1007/s13595-017-0643-3

Fernández, J.F., Rubin, L., Hartmann, P., Puhlmann, H., & von Wilpert, K. (2019). Initial recovery of soil structure of a compacted forest soil can be enhanced by technical treatments and planting. *Forest Ecology and Management*, *431*, 54–62. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.09.049

Fernández, J.F., von Wilpert, K., Schäffer, J., & Hartmann, P. (2015). Growth and establishment of woody subsidiary plants for regeneration of compacted soils. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, *186*(7–8), 137–150. https://doi.org/10.2376/043.186.2015-0173

Freschet, G.T., Roumet, C., Comas, L.H., Weemstra, M., Bengough, A.G., Rewald, B., Bardgett, R.D., De Deyn, G.B., Johnson, D., & Klimešová, J. (2021). Root traits as drivers of plant and ecosystem functioning: Current understanding, pitfalls and future research needs. *New Phytologist*, *232*(3), 1123–1158. https://doi.org/10.1111/nph.17572

Gjertson, J.O. (1949). Practical guides for seeding grass on skid roads, trails, and landings, following logging on east-side forests of Washington and Oregon. *PNW Old Series Research Notes*, *49*, 1-5.

Haigh, M., Reed, H., Flege, A., D'Aucourt, M., Plamping, K., Cullis, M., Woodruffe, P., Sawyer, S., Panhuis, W., Wilding, G., Farrugia, F., & Powell, S. (2015). Effect of planting method on the growth of Alnus glutinosa and *Quercus petraea* in compacted opencast coal-mine spoils, South Wales. *Land Degradation & Development*, *26*(3), 227–236. https://doi.org/10.1002/ldr.2213

Hashemi, M., Nikooy, M., Salehi, A., & Naghdi, R. (2021). Investigation of soil physical properties 11 years after water-bar construction on skid trail. *Forest Research and Development*, *7*(2), 169–182. (in Persian)

He, L., Fang, X., Meng, G., Li, G., Shao, J., Chai, Y., & Kong, J. (2013). Effect of *Alnus nepalensis* cultivation on soil biological and physicochemical properties during restoration near a phosphate smelter in Kunyang, Yunnan Province, SW China. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 13*(2), 355–366. https://doi.org/10.4067/S0718-95162013005000029.

Jagodzinski, A.M., & Kalucka, I. (2011). Fine root biomass and morphology in an age-sequence of post-agricultural Pinus sylvestris L. stands. *Dendrobiology,* (66), 71-84.

Jourgholami, M., Feghhi, J., Picchio, R., Tavankar, F., & Venanzi, R. (2021). Efficiency of leaf litter mulch in the restoration of soil physiochemical properties and enzyme activities in temporary skid roads in mixed high forests. *Catena*, *198*, Article 105012. https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105012

Jourgholami, M., Ghassemi, T., & Labelle, E.R. (2019). Soil physio-chemical and biological indicators to evaluate the restoration of compacted soil following reforestation. *Ecological Indicators*, *101*, 102–110. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.009

Jourgholami, M., Khajavi, S., & Labelle, E.R. (2018). Mulching and water diversion structures on skid trails: Response of soil physical properties six years after harvesting. *Ecological Engineering, 123*, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.08.023

Jourgholami, M., Khoramizadeh, A., Lo Monaco, A., Venanzi, R., Latterini, F., Tavankar, F., & Picchio, R. (2021). Evaluation of leaf litter mulching and incorporation on skid trails for the recovery of soil physico-chemical and biological properties of mixed broadleaved forests. *Land, 10*(6), 625. https://doi.org/10.3390/land10060625

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*(7), Article 2148. https://doi.org/10.3390/su10072148

Khoramizadeh, A., Jourgholami, M., Jafari, M., Venanzi, R., Tavankar, F., & Picchio, R. (2021). Soil restoration through the application of organic mulch following skidding operations causing vehicle-induced compaction in the Hyrcanian Forests, Northern Iran. *Land*, *10*(10), Article 1060. https://doi.org/10.3390/land10101060 .

Kriiska, K., Lõhmus, K., Frey, J., Asi, E., Kabral, N., Napa, Ü., & Ostonen, I. (2021). The dynamics of mass loss and nutrient release of decomposing fine roots, needle litter and standard substrates in hemiboreal coniferous forests. *Frontiers in Forests and Global Change, 4,* 686468. https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.686468.

Lang, A.J., Cristan, R., Aust, W.M., Bolding, M.C., Strahm, B.D., Vance, E.D., & Roberts, E.T.Jr. (2016). Long-term effects of wet and dry site harvesting on soil physical properties mitigated by mechanical site preparation in coastal plain loblolly pine (*Pinus taeda*) plantations. *Forest Ecology and Management*, *359*, 162–173. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.09.034 .

Li, J., Zhou, M., Alaei, S., & Bengtson, P. (2020). Rhizosphere priming effects differ between Norway spruce (*Picea abies*) and Scots pine seedlings cultivated under two levels of light intensity. *Soil Biology and Biochemistry, 145*, 107788.

Lorenc-Plucińska, G., Walentynowicz, M., & Niewiadomska, A. (2013). Capabilities of alders (*Alnus incana* and *A. glutinosa*) to grow in metal-contaminated soil. *Ecological Engineering*, *58*, 214–227.

Malo, C., & Messier, C. (2011). Impact of primary and secondary machinery tracks on fine root growth of sugar maple after selection cutting. *Canadian Journal of Forest Research*, *41*, 892–897.

Meyer, C., Lüscher, P., & Schulin, R. (2014). Recovery of forest soil from compaction in skid tracks planted with black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.). *Soil and Tillage Research*, *143*, 7–16. https://doi.org/10.1016/j.still.2014.05.006.

Minore, D., Smith, C.E., & Woollard, R.F. (1969). Effects of high soil density on seedling root growth of seven northwestern tree species (Research Paper PNW-119). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station. https://www.fs.usda.gov/pnw/pubs/pnw_rp119.pdf

Naghdi, R., Solgi, A., Zenner, E.K., & Keivan Behjou, F. (2018). Soil physical properties degrade further on skid trails in the year following operations. *Journal of Forestry Research*, *29*, 93–101.

Nash, M., Foltz, M., Page-Dumroese, D., & Napper, C. (2021). Soil disturbance rehabilitation: A desk guide to techniques and monitoring. 2025-1804-NTDP. San Dimas, CA: US Department of Agriculture, Forest Service, National Technology and Development Program. 56 p.

Nazari, M., Eteghadipour, M., Zarebanadkouki, M., Ghorbani, M., Dippold, M.A., Bilyera, N., & Zamanian, K. (2021). Impacts of logging-associated compaction on forest soils: a meta-analysis. *Frontiers in Forests and Global Change, 4,* 780074. https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.780074

Nikooy, M., Mohammadi Shahrestani, E., Tavankar, F., & Pourbabaei, H. (2023). Long-term effects of timber extraction by a crawler tractor on soil condition recovery in a mixed forest. *Iranian Journal of Forest*, *15*(1), 37–51. (in Persian)

Page-Dumroese, D.S., Jurgensen, M.F., Tiarks, A.E., Ponder, F.Jr., Sanchez, F.G., Fleming, R.L., Kranabetter, J.M., Powers, R.F., Stone, D.M., Elioff, J.D., & Scott, D.A. (2006). Soil physical property changes at the North American long-term soil productivity study sites: 1 and 5 years after compaction. *Canadian Journal of Forest Research*, *36*(3), 551–564. https://doi.org/10.1139/x05-273

Parsapour, M.K., Kooch, Y., Hosseini, S.M., & Alavi, S.J. (2018). Litter and topsoil in *Alnus subcordata* plantation on former degraded natural forest land: A synthesis of age-sequence. *Soil and Tillage Research*, *179*, 1–10.

Passauer, D.P., Aust, W.M., Bolding, M.C., Strahm, B.D., Burger, J.M., Patterson, S.C., Vance, E., & Roberts, E.T., Jr. (2013). Potential above-ground biomass losses from severe soil rutting during wet weather timber harvests of coastal plain loblolly pine (*Pinus taeda*) plantations mitigated by mechanical site preparation. *Forest Ecology and Management*, *307*, 266–273.

Puhe, J. (2003). Growth and development of the root system of Norway spruce (*Picea abies*) in forest stands—a review. *Forest ecology and management, 175*(1-3), 253-273.

Rahmani Haftkhani, Z., Nikooy, M., Salehi, A., Tavankar, F., & Tsioras, P.A. (2025). Post-harvest evaluation of logging-induced compacted soils and the role of Caucasian alder (*Alnus subcordata* C.A. Mey) fine-root growth in soil recovery. *Forests*, *16*(7), 1044. https://doi.org/10.3390/f16071044

Ramineh, A., Jourgholami, M., Etemad, V., Jafari, M., & Picchio, R. (2023). Effect of different vegetation restoration on recovery of compaction-induced soil degradation in Hyrcanian mixed forests: Influence on soil C and N pools and enzyme activities. *Forests*, *14*(3), 603. https://doi.org/10.3390/f14030603

Schäffer, J. (2022). Recovery of soil structure and fine root distribution in compacted forest soils. *Soil Systems*, *6*(2), 49. https://doi.org/10.3390

Tavankar, F., Nikooy, M., Ezzati, S., Jourgholami, M., Latterini, F., Venanzi, R., & Picchio, R. (2022). Long-term assessment of soil physicochemical properties and seedlings establishment after skidding operations in mountainous mixed hardwoods. *European Journal of Forest Research, 141*(4), 571-585. https://doi.org/10.1007/s10342-022-01461-9

Warlo, H., von Wilpert, K., Lang, F., & Schack-Kirchner, H. (2019). Black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) on compacted skid trails: A trade-off between greenhouse gas fluxes and soil structure recovery?. *Forests*, *10*(9), 726. https://doi.org/10.3390/f10090726

Warlo, H., Zimmermann, S., Lang, F., & Schack-Kirchner, H. (2022). Characteristics of soil structure and greenhouse gas fluxes on ten-year old skid trails with and without black alders (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.). *Soil Systems*, *6*, 43. https://doi.org/10.3390/soilsystems6020043

Iranian Journal of Forest
Vol. 18, No. 2, Summer 2026
pp. 251-269
Research Article

DOI: 10.22034/ijf.2026.566999.2098
CC BY 4.0

Impact of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) for Soil Restoration: Long-Term Influence on Skid Trail Soil Physical Properties and Fine Roots

R. Dehghan[1], M. Nikooy[2*], KH. Sagheb Talebi[3], A. Salehi[4], and F. Tavanakar[5]

[1]Ph.D. Student., Faculty of natural resources, the University of Guilan, Sowmeh Sara, Iran.
[2]Prof., Dept. of forest science and engineering, Faculty of natural resources, the University of Guilan, Sowmeh Sara, Iran
[3]Prof., Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran
[4]Associated Prof., Dept. of forest science and engineering, Faculty of natural resources, the University of Guilan, Sowmeh Sara, Iran
[5]Associated Prof., Dept. of Forestry, Kha.C., Islamic Azad University, Khalkhal, Iran.

(Received: 19 December 2025; Accepted: 15 February 2026)

Abstract

Introduction: Soils, as non-renewable resources, are crucial components of forest ecosystems that ensure forest productivity and biodiversity conservation by regulating water and nutrients cycles. Soil compaction is one of the most pronounced consequences of mechanized logging operations, caused by imposed vertical and horizontal stresses on the soil. Forest managers have to minimize the impact of logging operations on soil for sustainable forestry. A necessary prerequisite for achieving this goal is the access to precise and profound knowledge of the influence of logging operations on forest soils. The application of biological tillage is one of the methods to accelerate soil recovery on skid trails. In recent years, there has been a strong emphasis on enhancing the soil conditions of skid trails by planting trees. In recent years, much emphasis has been placed on improving soil conditions on logging routes by planting trees. Despite numerous studies on soil restoration, few have addressed long-term changes (approximately 40 years) or quantified the role of fine roots in natural regeneration contexts. This study evaluated the long-term restoration of soils on logging routes using Norway spruce planted inside Skid Trail.

Material and Methods: The effect of planting Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) on soil physical properties and fine roots was investigated in three treatments: skid trail planted with Norway spruce (NSIST), Norway spruce inside the forest (NSIF), and unplanted skid trail (UST) and in four soil depth classes (0-10, 10-20, 20-30, 30-40 cm).

Results: The results of the study showed that there was no significant difference between the average moisture percentages of the two treatments, NSIST (19.00 ± 7.53) and NSIF (18.35 ± 4.75), whereas the value of this variable in the 0-10 cm depth class (24.33 ± 8.66) was significantly higher than those at the other depths studied. The results of the comparison of the average soil texture components did not show any significant difference between the treatments ($\alpha \geq 0.05$). The average soil bulk density (g/cm3) was highest in the (UST) (1.15 ± 0.12), (NSIST) (1.14 ± 0.11) and (NSIF) (1.10±0.08) classes, respectively, and the values differed significantly. Also, with increasing depth, the soil bulk density increased significantly, so that the lowest soil bulk density (g/cm3) was observed at a depth of 0-10 cm (1.02 ± 0.01) and the highest value was observed in the 30-40 cm class (1.28 ± 0.05). A similar trend was observed in the results for the percentage of total porosity. The investigation of the weight of the fine roots (gr/dm^3) in the treatments showed that the highest amount of fine roots was observed in the (NSIF) (0.1119 ± 0.05 gr/dm^3) and the lowest amount of fine roots was observed in the treatment (UST) (0.0134 ± 0.009 gr/dm^3) with a significant difference among treatments.

Conclusion: The results of this study showed that planting this species did not lead to the complete restoration of soil physical properties or fine-root biomass. However, it significantly improved soil bulk density and fine-root abundance in the 0–10 cm soil layer. These findings only reflect the behavior of this species under the specific conditions of the present study and do not constitute a recommendation for its use in the restoration of skid trails in Hyrcanian forests, particularly given ecological considerations and the priority of using native species in bioengineering programs within these ecosystems. Nevertheless, the results provide a useful basis for future comparative studies on the performance of native species.

Keywords: Bioengineering, Forest plantation, Ground-based skidding, Soil bulk density, Soil compaction, Reforestation, Timber harvesting.

*Corresponding author Tel: +98 9113388305 Email: nikooy@uilan.ac.ir