

ارزیابی تغییرات مشخصه‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک ۲۵ سال پس از عملیات چوبکشی در جنگل خیرود

هادی سهرابی^۱، مقداد جورغلامی^{۲*}، محمد جعفری^۳

۱. دانشجوی دکتری مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

۲. استاد گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

۳. استاد گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۰۶، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۲

چکیده

تراکم خاک به علت استفاده از ماشین‌آلات سنگین برای برداشت چوب و بی‌توجهی به شرایط خاک در عملیات چوبکشی، مشکلی گسترده در برداشت چوب از جنگل است. در تحقیق حاضر، فرایند بازیابی مشخصه‌های خاک مسیرهای چوبکشی بعد از عملیات چوبکشی در جنگل خیرود بررسی شد. چهار مسیر چوبکشی با سنین مختلف (۳، ۱۰، ۲۰ و ۲۵ سال) با سه تکرار در جنگل انتخاب و در هر یک از آنها سه طبقه شدت ترافیک و سه کلاس شیب مشخص شد و نمونه‌گیری در محل رد چرخ‌ها در عمق‌های ۱۰-۱۰ و ۲۰-۱۰ سانتی‌متری خاک انجام گرفت. یافته‌ها حاکی از آن است که ۲۵ سال پس از عملیات چوبکشی جرم مخصوص ظاهری، مقاومت به نفوذ و تخلخل ریز، ۸/۴، ۲۷/۴ و ۵۰/۴۴ درصد بیشتر و تخلخل کل، تخلخل درشت و رطوبت خاک به ترتیب ۱/۹۶، ۱۷/۱ و ۴/۵۸ درصد کمتر از منطقه دست‌نخورده بود. با گذشت ۲۵ سال از عملیات چوبکشی، مقادیر واکنش (pH)، هدایت الکتریکی، کربن، نیتروژن کل، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم قابل جذب در خاک، تعداد و زی‌توده کرم‌های خاکی کمتر و نسبت کربن به نیتروژن بیشتر از منطقه دست‌نخورده بود. شدت ترافیک زیاد (H3) و کلاس شیب ۳۰-۲۰ درصد (C3) در مسیر چوبکشی سه‌ساله بیشترین اثر را بر مشخصه‌های خاک داشت که از تغییرات بیشتر و طولانی شدن بازیابی مشخصه‌های خاک در این موقعیت‌ها نشان دارد. نتایج این مطالعه مشخص می‌کند که بازیابی مشخصه‌های شیمیایی طولانی‌تر از مشخصه‌های زیستی و فیزیکی است، به طوری که بازیابی کامل این مشخصه‌ها به زمانی بیش از ۲۵ سال نیاز دارد.

واژه‌های کلیدی: جرم مخصوص ظاهری، چوبکشی زمینی، زی‌توده کرم خاکی، شدت ترافیک، شیب مسیر چوبکشی.

مقدمه

خاک جنگل (کاهش تخلخل کل، افزایش مقاومت نفوذ، کاهش تبادل گاز، کاهش نفوذ آب و حذف لایه لاشبرگ) داشته باشد [۱، ۲]. اختلال در خاک که با محدود کردن دسترسی به آب، مواد مغذی و کاهش نفوذ هوا همراه است، با اثر در جوانه‌زنی بذر، استقرار و زنده‌مانی نهال و رشد ریشه بر محصول و رشد توده جنگلی اثر می‌گذارد

فشردگی یا کوبیدگی خاک از پیامدهای منفی خروج چوب از جنگل به وسیله ماشین‌آلات سنگین چوبکشی زمینی است که ممکن است اثرهای شدیدی بر کیفیت

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۲۶۳۲۲۴۹۳۱۲

[۳]. شدت و درجه اختلال خاک هنگام خروج چوب متغیر بوده و به تعداد عبور ماشین، شیب زمین، بافت و رطوبت خاک وابسته است [۴]. دیگر عوامل بالقوه مؤثر بر تراکم خاک هنگام عملیات برداشت جنگل، عبارت‌اند از سرعت ماشین چوبکشی، تخصص اپراتورها و نوع پوشش جنگل که در طی عملیات چوبکشی باید در نظر گرفته شوند [۵].

بازیابی خاک‌های فشرده در شرایط طبیعی فرایندی کند و با تأخیر برای مشخصه‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی است و به‌طور معمول چند سال تا چند دهه طول می‌کشد [۶، ۷]. به همین ترتیب، دانش در زمینه بهبود مشخصه‌های شیمیایی و زیستی خاک پس از تراکم، کمتر از مشخصه‌های فیزیکی است. نتایج تحقیقی در کانادا نشان داد که بسیاری از تغییرات مشهود در یک سال پس از عملیات بهره‌برداری، در ۱۰ سال پس از عملیات ناپدید شدند و اثر تراکم ماشین‌آلات بر مشخصه‌های شیمیایی خاک به‌طور چشمگیری بهبود یافت [۸]. در حالی که کمترین زمان برای بازیابی مشخصه‌های فیزیکی مانند جرم مخصوص ظاهری، پنج سال گزارش شده است. محققان در بررسی بازیابی خاک بعد از عملیات چوبکشی، هیچ نشانی از ترمیم در هوادهی خاک و ریشه‌زایی در خاک‌های لومی را چهارده سال پس از تراکم مشاهده نکردند، در حالی که ترمیم پس از بیست سال در عمق ۳۰ سانتی‌متری حاصل شد [۹].

از راه‌حل‌های موجود برای به حداقل رساندن فشردگی خاک می‌توان به انتخاب ماشین‌آلات سبک‌تر، ماشین‌آلات دارای زنجیر چرخ به‌جای لاستیک و ماشین‌های دارای چرخ‌های لاستیکی کم‌باد اشاره کرد [۱۰]. شدت تراکم و از بین رفتن مواد آلی از سطح خاک ممکن است با تأثیر بر شدت هوادهی مواد معدنی و جذب عناصر غذایی خاک، بازیابی مشخصه‌های شیمیایی و رشد گیاه را مختل کند [۱۱، ۱۲]. مطابق یافته‌ها تراکم خاک و اختلال در خاک‌های

سطحی سبب کاهش موضعی در کربن آلی، نیتروژن، فسفر و پتاسیم و افزایش واکنش (pH) خاک در لایه‌های تازه فشرده‌شده (۱۰ سانتی‌متر بالایی) می‌شود [۱۳]. فشردگی خاک ناشی از ماشین‌آلات، فرایندی طولانی‌مدت است و بازیابی طبیعی آن با تشکیل ترک، شکاف، تناوب انبساط و انقباض یا چرخه ذوب و انجماد آب خاک شروع می‌شود. این فرایند تکه‌تکه شدن در خاک سطحی نسبت به خاک زیرسطحی بیشتر است [۱۴]. زمان لازم برای بازیابی مشخصه‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک به چند عامل وابسته به رویشگاه مانند شیب زمین، ضخامت خاک، بافت، محتوای مواد آلی، زیست‌توده و فعالیت جانداران زنده در خاک بستگی دارد [۷]. محققان نشان دادند که مشخصه‌های خاک در طولانی‌مدت (۲۰ سال) پس از عملیات چوبکشی بازیابی نشده‌اند [۶]، درحالی که در تحقیقی دیگر نتیجه‌گیری شد که مشخصه‌های خاک در خاک‌های شنی به دلیل فعالیت‌های زیستی خاک در کمتر از ۲۰ سال بازیابی می‌شوند [۱۵].

با توجه به ممنوعیت قطع و بهره‌برداری در جنگل‌های ایران، حفاظت، احیا و ترمیم مسیرهای چوبکشی به‌منظور حفظ کارکرد آب و خاک جنگل، کاهش رواناب و رسوب و پایداری جنگل‌های خزری در طول سال‌های آتی وظیفه‌ای بسیار مهم و اساسی است. همچنین بهره‌وری پایدار جنگل به نگهداری مواد مغذی خاک بسیار وابسته است، از این جهت تأثیر روش‌های مدیریت جنگل بر وضعیت مواد مغذی خاک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱۲]. در این تحقیق با فرض اینکه مشخصه‌های خاک نمی‌توانند پس از عملیات چوبکشی در یک دوره ۲۰ ساله در شرایط طبیعی به‌طور کامل بازیابی شوند، یک دوره ۲۵ ساله برای ارزیابی تغییرات و بازیابی خواص خاک با تحلیل سن مسیر چوبکشی در نظر گرفته شد. بنابراین هدف اصلی این تحقیق عبارت است از: ۱. بررسی جامع مشخصه‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در مسیرهای چوبکشی

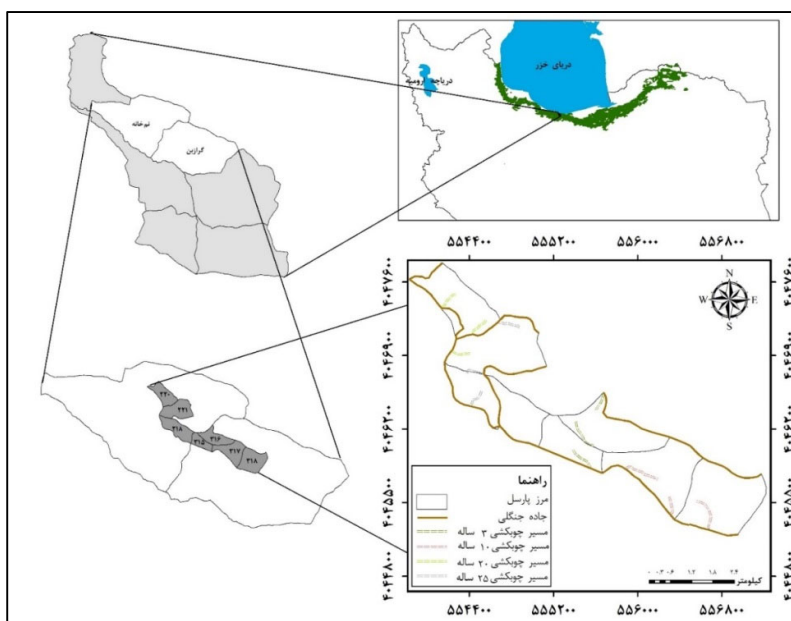
مادر آهکی قرار گرفته و متعلق به دوران ژوراسیک بالایی است و در بعضی نقاط، طبقات سخت شکاف‌دار و طبقات نرم به‌طور متناوب روی هم قرار گرفته‌اند. خاک به‌طور عمده آلفی سول با زهکشی مناسب دارای بافت لومی تا لومی رسی با عمق زیاد است. دو بخش نم‌خانه و گرازین دارای اقلیم سرد و مرطوب با متوسط بارندگی سالیانه ۱۱۴۶ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت سالیانه ۸/۵۵ درجه سانتی‌گراد هستند که نشان می‌دهد رویشگاه فاقد فصل خشک است. تیپ پوشش گیاهی در این دو بخش و پارسل‌های بررسی‌شده، راشستان، راش - ممرزستان، بلوط - ممرزستان و راشستان مخلوط به‌همراه گونه‌های افرا، توسکا، نمدار و بلندمازو و در شیب‌های جنوبی شیردار، بارانک و گیلان و وحشی است. شیوه جنگل‌شناسی به‌کاررفته در منطقه، ترکیبی از تک‌گزینی و گروه‌گزینی است که سبب ایجاد توده‌های ناهمسال شده است. قطع و تبدیل درختان با اهره موتوری و خروج آنها از عرصه با ماشین‌آلات چوبکشی زمینی انجام گرفت.

طی دوره طولانی ۲۵ ساله پس از آخرین عملیات چوبکشی؛ ۲. تعیین روند بازیابی مشخصه‌های خاک با تحلیل سن مسیر چوبکشی پس از عملیات چوبکشی. با توجه به اهداف تحقیق، فرضیه‌های تحقیق عبارت‌اند از: ۱. سن مسیر چوبکشی، شدت ترافیک‌های مختلف، شیب طولی مسیر، عمق نمونه‌گیری و محل رد چرخ اثرهای معنی‌داری بر مشخصه‌های خاک دارند؛ ۲. روند بازیابی مشخصه‌های خاک در مسیرهای چوبکشی با سن‌های مختلف پس از عملیات چوبکشی با منطقه دست‌نخورده تفاوت معنی‌داری دارند.

مواد و روش‌ها

منطقه تحقیق

این تحقیق در دو بخش نم‌خانه و گرازین از جنگل خیرود واقع در جنگل‌های هیرکانی در شمال ایران انجام گرفت (شکل ۱). بخش‌های نم‌خانه و گرازین به‌ترتیب با وسعت ۱۰۳۵ و ۱۰۰۱/۴۸ هکتار در ارتفاع کمتر از ۱۳۶۰ متر از سطح دریا قرار دارند. خاک در این دو بخش روی سنگ



شکل ۱. منطقه تحقیق و موقعیت مکانی هر کدام از مسیرهای چوبکشی در بخش‌های نم‌خانه و گرازین

روش تحقیق

براساس هدف پژوهش، چهار مسیر چوبکشی با سن‌های مختلف پس از عملیات چوبکشی (۳، ۱۰، ۲۰، ۲۵ سال) با جهت چوبکشی و شیب طولی یکسان (بدون در نظر گرفتن شیب عرضی مسیر، اثر بافت و ساختمان خاک و ارتفاع منطقه) با سه تکرار در سطح جنگل انتخاب شد. ملاک و معیار اصلی برای تشخیص سن مسیرها و انتخاب آن، مدارک و نظر کارشناسان مجری و کتابچه طرح‌ها و همچنین شواهد عینی موجود در منطقه بود. دلیل انتخاب مسیر چوبکشی سه‌ساله به‌جای یک‌ساله این بود که با توجه به اجرای تحقیق بعد از اجرای طرح تنفس جنگل در جنگل‌های شمال، از آخرین مسیری که عملیات چوبکشی روی آنها انجام گرفته، سه سال سپری شده بود. در هر یک از مسیرهای چوبکشی براساس فاصله از دیو و تعداد انشعابات فرعی از مسیر، سه شدت تردد (کم، متوسط و زیاد) شناسایی و براساس شیب طولی در هر کلاسه تراфик، سه کلاسه شیب (۱۰-۰، ۲۰-۱۰ و ۳۰-۲۰ درصد) جدا شد. در هر یک از این مسیرها و در هر تیمار، یک قطعه نمونه با ابعاد ۱۰×۴ متر برای نمونه‌گیری انتخاب و در داخل هر یک از این قطعه نمونه‌ها ۵ خط افقی اندازه‌گیری با فاصله ۲ متر از هم جدا شد و سپس به‌طور تصادفی سه خط مشخص [۶، ۱۶] و روی هر یک از این خطوط، در عمق‌های ۱۰-۰ و ۲۰-۱۰ سانتی‌متری خاک، سه نمونه خاک در محل رد چرخ‌های راست، چپ و مرکز مسیر چوبکشی گرفته شد تا با نمونه‌گیری در این عمق‌ها فرایند طبیعی بازیابی با هم مقایسه شود. برای مقایسه روند بازیابی طبیعی بین مسیرهای چوبکشی و منطقه شاهد، در مجاورت هر مسیر چوبکشی در فاصله ۲۰ تا ۳۰ متری (اندازه متوسط ارتفاع درختان غالب در منطقه، جایی که اثر عملیات چوبکشی ناپدید خواهد شد)، نمونه‌های خاک از منطقه دست‌نخورده یا شاهد گرفته شد. برداشت نمونه‌های خاک با توجه به تأثیر شرایط اقلیمی و اکولوژیکی بر مشخصه‌های

خاک از اواخر شهریور آغاز شد و یک ماه ادامه یافت. اندازه‌گیری شیارها روی مسیر اندازه‌گیری خط کوبیدگی انجام گرفت و شیارهایی با عمق ۵ سانتی‌متر در عمیق‌ترین نقطه و حداقل طول ۲ متر به‌عنوان شیار ناشی از تخریب خاک در نظر گرفته شد. در هر شیار در فواصل افقی ۲۵ میلی‌متر عمق شیار اندازه‌گیری و میانگین آنها به‌عنوان شیار ناشی از تخریب خاک در نظر گرفته شد [۶]. بدیهی است که فاصله خطوط تصادفی نمونه‌برداری کوبیدگی و شیار از یکدیگر کمتر از ۲ متر نخواهد بود [۱۷].

اندازه‌گیری مشخصه‌های خاک

مشخصه‌های فیزیکی

نمونه‌های خاک پس از برداشتن لایه لاشبرگ از سطح خاک، در عمق‌های ۱۰-۰ و ۲۰-۱۰ سانتی‌متر با استفاده از سیلندر فلزی با ابعاد مشخص (قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر) از خاک معدنی گرفته شده و در داخل پلاستیک به آزمایشگاه منتقل شد. در این تحقیق نمونه‌های خاک پس از تعیین وزن تر، در آون با حرارت ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲۴ ساعت خشک و دوباره توزین شد که در نهایت از تقسیم وزن خاک خشک (گرم) به حجم سیلندر (سانتی‌متر مکعب)، جرم مخصوص ظاهری و محتوای رطوبت از رابطه ۱ به دست آمد.

$$(1) \quad \text{وزن خشک (گرم)} - \text{وزن مرطوب (گرم)} \\ \text{وزن خشک (گرم)} \times 100 = \text{درصد رطوبت}$$

برای محاسبه تخلخل کل، ابتدا تراکم ذرات خاک براساس استاندارد ASTM D 54-002000 تعیین و سپس از رابطه ۲ به‌صورت زیر استفاده شد.

$$(2) \quad \text{جرم مخصوص ظاهری} \\ 1 - \frac{2/65}{\text{حجم نمونه خاک}} = \text{تخلخل کل}$$

تخلخل ریز از رابطه ۳ به‌دست آمد.

$$(3) \quad \text{محتوی آب خاک} \times \text{جرم مخصوص خشک} = \text{تخلخل ریز}$$

به‌کمک روش اولسن^۴ و پتاسیم، کلسیم و منیزیم قابل جذب در خاک با استفاده از اسپکتروفتومتر جذب اتمی تعیین شد.

مشخصه‌های زیستی

برای تعیین تعداد و زی‌توده کرم‌های خاکی، قطعات نمونه ۲۵ × ۲۵ سانتی‌متری روی خطوط نمونه‌گیری در مسیر چوبکشی و منطقه دست‌نخورده طراحی و تعداد کرم‌های خاکی در عمق ۱۰-۲۰ و ۱۰-۲۰ سانتی‌متر خاک شمارش شد. نمونه‌گیری کرم‌های خاکی در اواخر شهریور که شرایط برای فعالیت آنها مناسب است انجام گرفت. کرم‌های خاکی پس از جمع‌آوری، شسته و وزن شده و سپس برای تعیین وزن خشک، ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند [۱۸].

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS 17 انجام گرفت. به‌منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها، ابتدا با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف نرمال بودن داده‌ها بررسی شد. برای مقایسه مشخصه‌های خاک در تیمارها از آزمون تجزیه واریانس چهارطرفه استفاده شد. در تجزیه واریانس اثر هر یک از تیمارها و اثرهای متقابل آنها بر متغیرها بررسی می‌شود. همبستگی واریانس بین تیمارها با آزمون لون^۵ در سطح ۰/۰۱ انجام گرفت. در صورت نرمال بودن توزیع داده‌ها و معنی‌دار بودن اثر هر یک از عوامل در تجزیه و تحلیل واریانس، از آزمون‌های مقایسه‌ای چندگانه دانکن برای گروه‌بندی مقدار بازیابی مشخصه‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک استفاده شد. همبستگی چندمتغیره برای تعیین رابطه معنی‌دار بین متغیرها و اجزای اصلی با استفاده از نرم‌افزار PC-ORD (نسخه ۴) تعیین شد. تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی (PCA)، نوعی روش تحلیل چندمتغیره است که روابط پیچیده بین متغیرها را بررسی می‌کند.

و از تفاضل بین تخلخل کل و تخلخل ریز، مقدار تخلخل درشت محاسبه شد.

توزیع یا پراکندگی اجزای ذرات خاک برای ذرات کوچک‌تر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر با استفاده از روش هیدرومتری و برای ذرات بزرگ‌تر، با استفاده از سری الک با ابعاد منافذ مختلف تعیین شد. مقاومت به نفوذ خاک با استفاده از نفوذسنج دستی (مدل Eijkelkamp 06.01.SA) با مخروط ۶۰ درجه و حداکثر عمق نفوذ ۱ متر که به‌صورت عمود در خاک فرو می‌رود اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری مقاومت به نفوذ خاک در مسیرهای چوبکشی و منطقه دست‌نخورده در محل هر نقطه نمونه در دو عمق ۱۰-۲۰ و ۱۰-۲۰ سانتی‌متر انجام گرفت. از آنجا که اندازه‌گیری مقاومت به نفوذ به‌شدت تحت تأثیر رطوبت قرار می‌گیرد، روز خشک برای اطمینان از شرایط خاک انتخاب و همه اندازه‌گیری‌ها در همان روز انجام گرفت تا اطمینان حاصل شود که شرایط رطوبت در هر یک از مناطق به‌نسبت یکسان است [۱۸].

مشخصه‌های شیمیایی

قبل از جمع‌آوری نمونه‌های خاک، مواد آلی از سطح خاک حذف شد تا اطمینان حاصل شود که اندازه‌گیری‌ها به سطح خاک معدنی ارجاع داده شده است. نمونه‌های خاک (۱ تا ۲ کیلوگرم) از دو عمق ۱۰-۲۰ و ۱۰-۲۰ سانتی‌متر برداشت و در کیسه‌های پلاستیکی پرچسب‌گذاری شد و به آزمایشگاه انتقال یافت. نمونه‌ها خشک شده و سپس از یک الک دو میلی‌متری عبور داده شدند تا مشخصه‌های شیمیایی خاک تعیین شود. واکنش (pH) و هدایت الکتریکی خاک به ترتیب توسط pH متر و EC متر در یک نسبت خاک به آب ۱:۲/۵ تعیین شد. کربن آلی خاک با استفاده از روش والکل-بلاک^۱ و نیتروژن کل با استفاده از روش کج‌دال^۲ اندازه‌گیری شد. فسفر خاک با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر^۳ و

1. Walkley-Black method
2. Kjeldahl
3. Spectrophotometer

4. Olsen method
5. Levene test

نتایج و بحث

عوامل تأثیرگذار بر مشخصه‌های خاک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تیمارهای سن مسیر چوبکشی و عمق نمونه‌گیری بر همه مشخصه‌های فیزیکی خاک اثر معنی‌داری داشتند (جدول ۱). شدت ترافیک مختلف اثر معنی‌داری در جرم مخصوص ظاهری، مقاومت به نفوذ و تخلخل کل داشت، درحالی که بر دیگر مشخصه‌ها اثر معنی‌داری نداشت. شیب‌های مختلف به‌جز مقاومت به نفوذ و تخلخل کل، اثر معنی‌داری بر مشخصه‌های فیزیکی خاک نداشت (جدول ۱). محل رد

چرخ (به‌جز مقاومت به نفوذ) بر مشخصه‌های فیزیکی خاک تأثیر معنی‌داری نداشت (جدول ۱). بررسی حاضر مؤید آن است که همه تیمارها مشخصه‌های فیزیکی خاک را تغییر می‌دهند، اما اثر سن مسیر چوبکشی، شدت ترافیک و عمق نمونه‌گیری از دیگر تیمارها بیشتر است. شیب مسیر چوبکشی سبب تغییر مشخصه‌های فیزیکی خاک شد، اما به‌دلیل تقسیم شیب به طبقات با دامنه تغییرات کم (۱۰-۲۰ درصد، ۱۰-۲۰ درصد و ۲۰-۳۰ درصد) اثر معنی‌داری نداشت [۱۹].

جدول ۱. تجزیه و تحلیل واریانس (مقادیر P) اثر سن مسیر چوبکشی، شدت ترافیک، شیب، محل رد چرخ، عمق نمونه‌گیری و اثر متقابل آنها بر مشخصه‌های فیزیکی خاک*

منبع تغییرات	سن مسیر		ترافیک		شیب		محل رد چرخ		عمق		اثر متقابل کل تیمارها	
	درجه آزادی	P value	درجه آزادی	P value	درجه آزادی	P value	درجه آزادی	P value	درجه آزادی	P value		
جرم مخصوص ظاهری (g/cm ³)	۳	۰/۰۰۰ ^{***}	۳	۰/۰۰۰ ^{***}	۲	۰/۴۱۸ ^{NS}	۲	۰/۲۵۴ ^{NS}	۱	۰/۰۰۰ ^{***}	۲۴	۰/۶۳۱ ^{NS}
مقاومت به نفوذ (MPa)	۳	۰/۰۰۰ ^{***}	۳	۰/۰۰۰ ^{***}	۲	۰/۰۰۰ ^{***}	۲	۰/۰۰۰ ^{***}	۱	۰/۰۰۰ ^{***}	۲۴	۰/۹۹۸ ^{NS}
تخلخل کل (%)	۳	۰/۰۰۰ ^{***}	۳	۰/۰۰۰ ^{***}	۲	۰/۰۴۱*	۲	۰/۲۳۳ ^{NS}	۱	۰/۰۰۵ ^{**}	۲۴	۰/۹۹۳ ^{NS}
تخلخل درشت (%)	۳	۰/۰۰۰ ^{***}	۳	۰/۵۴۶ ^{NS}	۲	۰/۳۰۵ ^{NS}	۲	۰/۳۵ ^{NS}	۱	۰/۰۰۰ ^{***}	۲۴	۰/۹۹۸ ^{NS}
تخلخل ریز (%)	۳	۰/۰۰۰ ^{***}	۳	۰/۵۴۹ ^{NS}	۲	۰/۴۸۱ ^{NS}	۲	۰/۷۸۱ ^{NS}	۱	۰/۰۰۰ ^{***}	۲۴	۰/۹۹۹ ^{NS}
محتوای رطوبت (%)	۳	۰/۰۰۰ ^{***}	۳	۰/۵۴۹ ^{NS}	۲	۰/۴۸۱ ^{NS}	۲	۰/۷۸۱ ^{NS}	۱	۰/۰۰۰ ^{***}	۲۴	۰/۹۹۹ ^{NS}

نکته: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; NS نبود تفاوت معنی‌دار.

اثر سن مسیر چوبکشی و شدت ترافیک بر همه مشخصه‌های شیمیایی معنی‌دار بود، در حالی که بر مشخصه‌های زیستی اثر معنی‌دار نداشت (جدول ۲). شیب مسیر چوبکشی بر مشخصه‌های شیمیایی اثر معنی‌داری داشت، در حالی که اثر چندانی بر مشخصه‌های زیستی نداشت. محل رد چرخ بر واکنش (pH) و هدایت الکتریکی خاک از مشخصه‌های شیمیایی اثر معنی‌داری داشت و نیز در سطح ۰/۰۱ درصد اثر معنی‌داری بر مشخصه‌های زیستی نشان داد. عمق نمونه‌گیری تأثیر معنی‌داری بر مشخصه‌های شیمیایی و مشخصه‌های زیستی داشت. اثر متقابل کل تیمارها بر مشخصه‌های شیمیایی (به‌جز هدایت الکتریکی و نسبت کربن به نیتروژن) و مشخصه‌های زیستی معنی‌دار نبود

(جدول ۲). در این تحقیق مشخصه‌های شیمیایی خاک نیز به‌شدت تحت تأثیر عملیات چوبکشی قرار گرفتند [۲۰]. تحقیق حاضر نشان داد که اثر تیمارها بر مشخصه‌های شیمیایی شدیدتر از مشخصه‌های فیزیکی است که ممکن است به‌دلیل مخلوط شدن خاک سطحی با لایه‌های پایین، حذف خاک و نمونه‌برداری از لایه‌های عمیق خاک نسبت به منطقه دست‌نخورده باشد [۱۳]. براساس برخی مطالعات، زمان لازم برای بازیابی مشخصه‌های زیستی خاک کمتر از مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی است. در همین زمینه، پژوهشگران نشان دادند که زی‌توده خاک بین ۳ تا ۷ سال پس از عملیات برداشت در کانادا در کف جنگل بازیابی شد [۲۱].

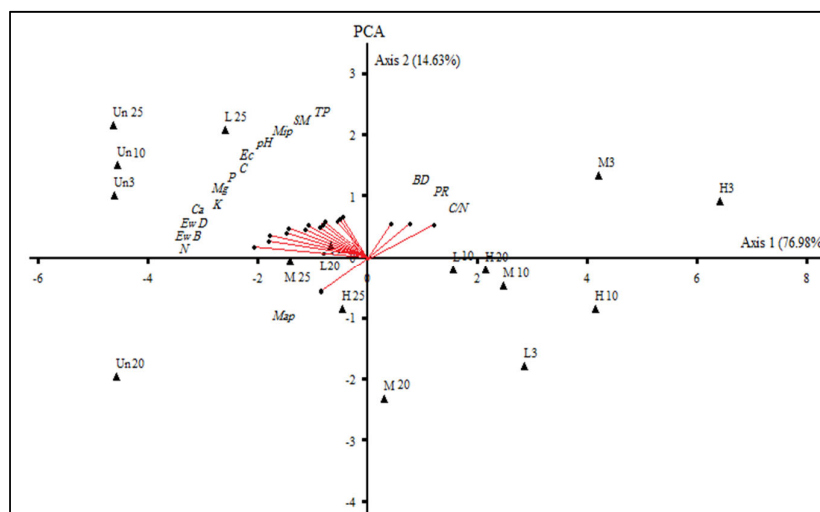
جدول ۲. تجزیه و تحلیل واریانس (مقادیر P) اثر سن مسیر چوبکشی، شدت ترافیک، شیب، محل رد چرخ، عمق نمونه‌گیری و اثر متقابل آنها بر مشخصه‌های شیمیایی و زیستی خاک*

منبع تغییرات	سن مسیر چوبکشی		شدت ترافیک		شیب		محل رد چرخ		عمق نمونه‌گیری		اثر متقابل کل تیمارها	
	درجه آزادی	P value	درجه آزادی	P value	درجه آزادی	P value	درجه آزادی	P value	درجه آزادی	P value	درجه آزادی	P value
واکنش (pH) (1:2.5 H ₂ O)	۳	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۱	./... ^{**}	۲۴	./... ^{**}
هدایت الکتریکی (ds/m)	۳	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۱	./... ^{**}	۲۴	./... ^{**}
کربن (%)	۳	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۱	./... ^{**}	۲۴	./... ^{**}
نیترژن (%)	۳	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۱	./... ^{**}	۲۴	./... ^{**}
نسبت کربن به نیترژن	۳	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۱	./... ^{**}	۲۴	./... ^{**}
فسفر قابل جذب (mg kg ⁻¹)	۳	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۱	./... ^{**}	۲۴	./... ^{**}
پتاسیم قابل جذب (mg kg ⁻¹)	۳	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۱	./... ^{**}	۲۴	./... ^{**}
کلسیم قابل جذب (mg kg ⁻¹)	۳	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۱	./... ^{**}	۲۴	./... ^{**}
منیزیم قابل جذب (mg kg ⁻¹)	۳	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۱	./... ^{**}	۲۴	./... ^{**}
تعداد کرم خاکی (n m ⁻²)	۳	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۱	./... ^{**}	۲۴	./... ^{**}
زی‌توده کرم خاکی (mg m ⁻²)	۳	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۲	./... ^{**}	۱	./... ^{**}	۲۴	./... ^{**}

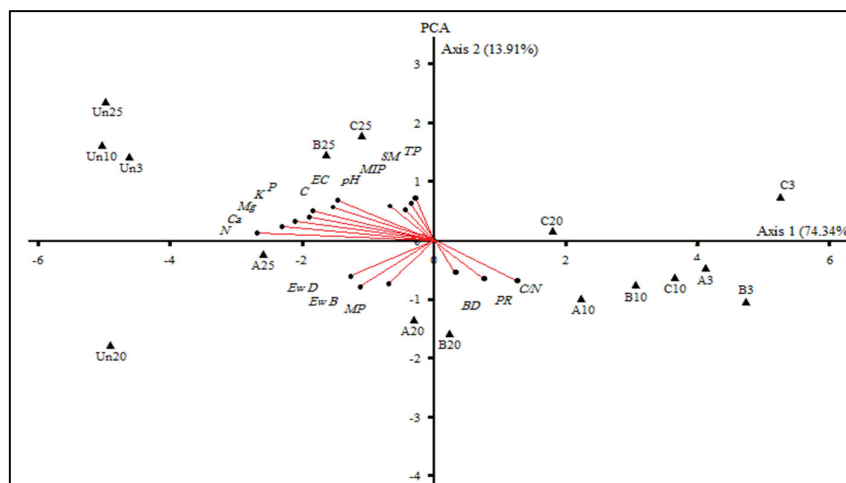
نکته: * $P < 0.05$ ** $P < 0.01$ *** عدم تفاوت معنی‌دار.

ماشین‌آلات باشد. عملیات چوبکشی در مناطق شیبدار موجب لغزش شدید لاستیک ماشین‌آلات می‌شود که شیاری شدن و گلی شدن بیشتر مسیر چوبکشی و از بین رفتن خاک را در پی دارد [۲۲، ۲۳]. افزون‌بر این، سرعت آهسته‌آهسته ماشین‌آلات در زمین‌های شیبدار، به‌ویژه در جهت چوبکشی به سمت بالا، سبب لرزش بیشتر خاک سطحی شده و در مقایسه با زمین‌های کم‌شیب به شدت مختل می‌شود [۲۳]. تغییرات و کاهش سطح کربن و نیترژن بعد از عملیات چوبکشی ممکن است به دلیل جابه‌جایی و اختلاط خاک آلی و معدنی و نیز به دلیل ظاهر شدن لایه‌های عمیق خاک پس از عملیات چوبکشی باشد [۱۳]. تغییرات و کم بودن واکنش (pH) خاک مسیرهای چوبکشی در مقایسه با منطقه دست‌نخورده، ناشی از اختلال، رواناب سطحی و فرسایش خاک است [۲۳] که براساس این فرضیه، غلظت کربن، نیترژن، فسفر، پتاسیم خاک در مسیرهای چوبکشی تا حد زیادی کمتر از مناطق شاهد است [۱۲]. در این تحقیق و دیگر پژوهش‌ها، تغییرات مقدار مواد آلی خاک، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم قابل جذب در خاک پس از عملیات چوبکشی گزارش شده است [۲، ۱۳].

تجزیه و تحلیل PCA (تحلیل مؤلفه‌های اصلی) برای شدت ترافیک (زیاد، متوسط و کم) و شیب‌های مختلف (۱۰-۲۰، ۲۰-۳۰ و ۳۰-۴۰ درصد) در مسیرهای چوبکشی و مشخصه‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی ارائه شده است (شکل‌های ۲ و ۳). نتایج برای شدت ترافیک در مسیرهای چوبکشی و مشخصه‌های خاک بیانگر آن است که محورهای اول و دوم به ترتیب ۷۶/۹۸ و ۱۴/۶۳ درصد از کل واریانس را توضیح می‌دهند (شکل ۲). همچنین نتایج برای شیب‌های مختلف در مسیرهای چوبکشی و مشخصه‌های خاک نشان می‌دهد که محورهای اول و دوم به ترتیب ۷۴/۳۴ و ۱۳/۹۱ درصد از کل واریانس را توضیح می‌دهند (شکل ۳). محل قرارگیری تیمارهای تأثیرگذار بر متغیرهای خاک نشان داد که منطقه دست‌نخورده در سمت چپ نمودار قرار دارد (شکل‌های ۲ و ۳). منطقه دست‌نخورده با مسیرهای چوبکشی قدیمی در کلاسه‌های ترافیک و شیب کم تفاوت کمتر و در مسیرهای با سن کم در کلاسه‌های با ترافیک و شیب زیاد تفاوت بیشتری دارد. تغییرات بیشتر مشخصه‌های خاک در شدت ترافیک زیاد ممکن است به دلیل رطوبت زیاد خاک در حین عملیات چوبکشی، حجم چوب خروجی از عرصه و تعداد عبور



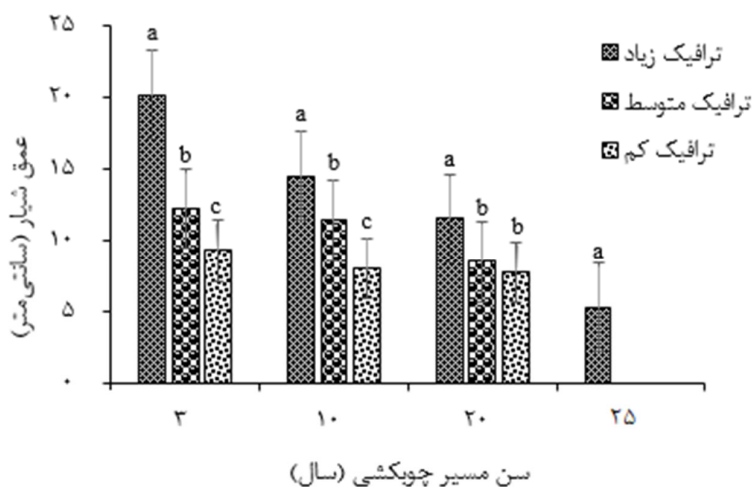
شکل ۲. تجزیه و تحلیل PCA از شدت ترافیک در مسیرهای چوبکشی (۳، ۱۰، ۲۰ و ۲۵: سن مسیرهای چوبکشی؛ Un و L، M، H، به ترتیب شدت ترافیک زیاد، متوسط، کم و منطقه دست‌نخورده) و مشخصه‌های فیزیکی (BD: جرم مخصوص ظاهری، TP: تخلخل کل، MP: تخلخل درشت، MIP: تخلخل ریز، PR: مقاومت به نفوذ، SM: محتوای رطوبت)، شیمیایی (PH: واکنش خاک، EC: هدایت الکتریکی، C: کربن آلی، N: نیتروژن کل، C/N: نسبت کربن به نیتروژن، P: فسفر قابل جذب، K: پتاسیم قابل جذب، Ca: کلسیم قابل جذب، Mg: منیزیم قابل جذب) و زیستی خاک (EW D: تعداد کرم خاکی و EW B: زی توده کرم خاکی).



شکل ۳. تجزیه و تحلیل PCA از شیب‌های مختلف در مسیرهای چوبکشی (۳، ۱۰، ۲۰ و ۲۵: سن مسیرهای چوبکشی؛ Un و C، B، A، به ترتیب کلاسه شیب ۱۰+، ۲۰-، ۱۰+، ۳۰-، ۲۰+ درصد و منطقه دست‌نخورده) و مشخصه‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک.

ترافیک‌های مختلف از نظر عمق شیار اختلاف معنی‌داری دارند. نتیجه این پژوهش نشان داد که بازیابی عمق شیار، به زمان کمتری نسبت به مشخصه‌های فیزیکی خاک نیاز دارد.

بررسی عمق شیار در شدت ترافیک‌های مختلف، نشان‌دهنده روند افزایشی آن با بیشتر شدن شدت ترافیک در مسیرهای چوبکشی بوده است (شکل ۴). در همه مسیرهای چوبکشی (به‌جز مسیر ۲۵ سال) شدت



شکل ۴. عمق شیار مشاهده شده در شدت ترافیک‌های مختلف از مسیرهای چوبکشی

درصد کمتر از ناحیه دست‌نخورده بود. ۲۵ سال پس از عملیات چوبکشی، جرم مخصوص ظاهری از مقدار آستانه ۱/۴۰-۱/۵۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب [۲] کمتر بود که بیانگر روند بازیابی برای این ویژگی است. در این مطالعه، ۲۵ سال پس از عملیات چوبکشی، مقاومت به نفوذ کمتر از ۲ مگاپاسکال بود که نشان‌دهنده بهبود آن در طی زمان است. یکی از تأثیرات مهم تراکم خاک، کاهش تخلخل کل با کاهش در سهم تخلخل درشت و افزایش سهم تخلخل ریز است [۶]. افزایش نسبت تخلخل کل و درشت، ۲۵ سال پس از عملیات چوبکشی غیرمنتظره نیست. تخلخل درشت در این مطالعه از مقدار آستانه ۱۰ درصد تجاوز می‌کند [۱] که پیش‌نیاز جریان هوا، فعالیت میکروبی و ریشه‌زایی است. محتوای رطوبت خاک در سال‌های مختلف پس از اجرای عملیات چوبکشی از مسیر چوبکشی سه‌ساله به سمت مسیر چوبکشی ۲۵ ساله افزایش یافت که ممکن است به دلیل کاهش تراکم خاک و افزایش لایه لاشبرگ سطح خاک برای نفوذ آب و کاهش رواناب سطح خاک از طریق منافذ بیشتر باشد [۶].

روند تغییرات یا بازیابی با تحلیل توالی سنی (سن مسیرهای چوبکشی)

با گذشت سال‌های مختلف از عملیات چوبکشی، مشخصه‌های فیزیکی خاک از مسیر چوبکشی سه‌ساله به مسیر چوبکشی ۲۵ ساله بهبود می‌یابد، اگرچه با منطقه دست‌نخورده تفاوت معنی‌داری دارند. از مسیر چوبکشی سه‌ساله تا مسیر چوبکشی ۲۵ ساله، جرم مخصوص ظاهری، مقاومت به نفوذ و تخلخل ریز کاهش یافت و در مقابل، تخلخل کل، تخلخل درشت و رطوبت خاک افزایش پیدا کرد (جدول ۳). سه سال پس از عملیات چوبکشی تخلخل کل، تخلخل درشت و رطوبت خاک به ترتیب ۲/۴۷، ۲۳/۳ و ۱۰/۲۳ درصد کمتر از منطقه دست‌نخورده بود، در حالی که ۲۵ سال پس از عملیات، ۱/۹۶، ۱۷/۱ و ۴/۵۸ درصد کمتر از منطقه دست‌نخورده بود (جدول ۳). نتایج این تحقیق، همسو با یافته‌های پژوهشی دیگر [۶] است که گزارش شد ۲۰ سال پس از عملیات چوبکشی در شدت ترافیک زیاد و کلاس شیب ملایم (۲۰٪ <)، جرم مخصوص ظاهری ۴۲-۳۵ درصد بیشتر و تخلخل کل و درشت به ترتیب ۲۴-۱۸ و ۲۸-۱۹

جدول ۳. روند تغییرات یا بازیابی مشخصه‌های فیزیکی خاک (میانگین \pm اشتباه معیار) در سال‌های مختلف پس از عملیات چوبکشی

سال‌های مختلف پس از عملیات چوبکشی	۲۵	۲۰	۱۰	۳	مشخصه فیزیکی
جنگل دست‌نخورده					
	۱/۰±۰۳/۰۱ ^a	۱/۰±۰۵/۰۱ ^a	۱/۰±۱۲/۰۱ ^b	۱/۰±۰۷/۰۱ ^a	جرم مخصوص ظاهری (g cm ⁻³)
	۱/۰±۵۷/۰۳ ^d	۰±۲/۰۴ ^c	۳/۰±۰۴/۰۴ ^b	۳/۰±۲۵/۰۶ ^a	مقاومت به نفوذ (MPa)
	۸۶/۰±۱۶/۰۳ ^a	۸۴/۰±۴۷/۱۵ ^{ab}	۸۴/۰±۰۴/۱۵ ^b	۸۴/۰±۰۳/۲۳ ^b	تخلخل کل (%)
	۶۶/۰±۷۸/۰۳ ^a	۵۵/۰±۳۶/۳۸ ^b	۵۳/۰±۱۴/۳۸ ^b	۵۱/۰±۲۳/۵۷ ^c	تخلخل درشت (%)
	۱۹/۰±۳۵/۰۳ ^c	۲۹/۰±۱۱/۴۲ ^b	۳۰/۰±۹/۴۲ ^b	۳۲/۰±۸/۶۳ ^a	تخلخل ریز (%)
	۴۴/۰±۷۸/۰۳ ^a	۴۲/۰±۷۳/۸۲ ^b	۴۱/۰±۷۶/۸۲ ^b	۴۰/۱±۲/۲۴ ^c	محتوای رطوبت (%)

مشخصه‌های شیمیایی خاک با نوع و کاهش تراکم پوشش گیاهی و میزان لایه لاشبرگ رابطه مستقیم وجود دارد، تغییرات پوشش کف جنگل و لایه آلی خاک اثرهای مستقیمی بر مشخصه‌های شیمیایی خاک می‌گذارد.

با گذشت ۲۵ سال از عملیات چوبکشی، مشخصه‌های زیستی خاک در مسیرهای چوبکشی، بهبود می‌یابد، اما تفاوت آن با منطقه دست‌نخورده معنادار است. تعداد (۰/۴۸) گرم‌های خاکی در مسیرهای چوبکشی ۲۵ ساله نسبت به مسیرهای چوبکشی ۲۰ < ۱۰ < سه‌ساله بیشتر بود.

با گذشت سال‌های مختلف پس از عملیات چوبکشی، مشخصه‌های شیمیایی و زیستی خاک از مسیر چوبکشی سه‌ساله به سمت مسیر چوبکشی ۲۵ ساله بهبود یافت (جدول ۴). با گشت ۲۵ سال از عملیات چوبکشی، مشخصه‌های شیمیایی و زیستی خاک با منطقه شاهد تفاوت معنی‌داری داشت (جدول ۴). بهبود مشخصه‌های شیمیایی خاک در طی زمان ممکن است به دلیل شرایط آب‌وهوایی جنگل‌های شمال، کاهش تأثیر تراکم با گذشت زمان، ضخامت لایه لاشبرگ، نوع و کیفیت لایه لاشبرگ و فعالیت ارگانسیم‌های خاک باشد. از آنجا که بین

جدول ۴. روند تغییرات یا بازیابی مشخصه‌های شیمیایی و زیستی خاک (میانگین \pm اشتباه معیار) در سال‌های مختلف پس از عملیات چوبکشی

سال‌های مختلف پس از عملیات چوبکشی	۲۵	۲۰	۱۰	۳	مشخصه‌های شیمیایی و زیستی خاک
جنگل دست‌نخورده					
	۷/۰±۰۴/۰۷ ^a	۶/۰±۵۹/۰۴ ^b	۶/۰±۳۲/۰۴ ^b	۵/۰±۹۶/۰۴ ^c	واکنش (pH) (1:2.5 H ₂ O)
	۰/۰±۴/۳۵ ^a	۰/۰±۳۲/۱۹ ^b	۰/۰±۲۹/۱۹ ^b	۰/۰±۲۶/۱۹ ^c	هدایت الکتریکی (ds/m)
	۴/۰±۰۴/۰۹ ^a	۳/۰±۱۲/۰۵ ^b	۲/۰±۹/۰۵ ^c	۲/۰±۳۱/۰۵ ^d	کربن (%)
	۰/۰±۶۷/۰۱ ^a	۰/۰±۴۱/۰۵ ^b	۰/۰±۳۶/۰۵ ^b	۰/۰±۲۱/۰۵ ^d	نیترژن (%)
	۶/۰±۰۳/۱۳ ^a	۷/۰±۶۱/۰۷ ^b	۸/۰±۰۵/۰۷ ^b	۱۱/۰±۵۵/۰۷ ^d	نسبت کربن به نیترژن
	۱۹/۰±۲۸/۰۹ ^a	۱۷/۰±۱۱/۰۵ ^b	۱۴/۰±۴۹/۰۵ ^{bc}	۹/۰±۵۹/۰۵ ^d	فسفر قابل جذب (mg kg ⁻¹)
	۳۲۱/۲±۴۹/۰۳ ^a	۲۷۵/۱±۷/۰۸ ^b	۲۳۸/۱±۴/۰۸ ^c	۱۳۸/۱±۱/۰۸ ^d	پتاسیم قابل جذب (mg kg ⁻¹)
	۲۳۹/۰±۰۵/۷۵ ^a	۲۱۴/۰±۳/۳۹ ^b	۱۷۶/۰±۶/۳۹ ^c	۱۰۵/۰±۷/۳۹ ^d	کلسیم قابل جذب (mg kg ⁻¹)
	۶۱/۰±۱۸/۴۳ ^a	۵۱/۰±۹۴/۲۳ ^b	۴۴/۰±۲۷/۲۳ ^{bc}	۳۷/۰±۲۳/۲۳ ^c	منیزیم قابل جذب (mg kg ⁻¹)
	۰/۰±۶۷/۱۴ ^a	۰/۰±۴۸/۰۷ ^b	۰/۰±۴۱/۰۷ ^b	۰/۰±۳۳/۰۷ ^c	تعداد کرم خاکی (n m ⁻²)
	۲/۰±۹۵/۵۹ ^a	۲/۰±۰۵/۳۱ ^b	۱/۰±۷۱/۳۱ ^{bc}	۰/۰±۹۶/۳۱ ^d	زی‌توده کرم خاکی (mg m ⁻²)

شدت ترافیک و عمق نمونه‌گیری بیشتر از تیمارهای بوده و اثر عملیات چوبکشی بر مشخصه‌های شیمیایی و زیستی شدیدتر از مشخصه‌های فیزیکی است. شدت ترافیک زیاد

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که تغییرات مشخصه‌های خاک در تیمارهای سن مسیر چوبکشی،

معنی‌داری داشت که این تفاوت برای مشخصه‌های شیمیایی و زیستی بیشتر از مشخصه‌های فیزیکی است. بنابراین بازیابی مشخصه‌های شیمیایی طولانی‌تر از مشخصه‌های زیستی و فیزیکی است، به طوری که بازیابی کامل این مشخصه‌های به زمانی بیش از ۲۵ سال نیاز دارد. بررسی تغییرات و روند بازیابی مشخصه‌های خاک و همچنین روابط بین این مشخصه‌های پس از عملیات چوبکشی می‌تواند راهنمایی برای کاهش اثرهای منفی تردد ماشین‌آلات بر خاک در نظر گرفته شود.

(H3) و کلاس شیب ۳۰-۲۰ درصد (C3) در مسیر چوبکشی سه‌ساله بیشترین تأثیر را در مشخصه‌های خاک دارد که نشان‌دهنده تغییرات بیشتر و طولانی شدن بازیابی مشخصه‌های خاک در این تیمارهاست. عمق شیار نیز در ترافیک کم و متوسط مسیر چوبکشی ۲۵ ساله کاملاً بازیابی شده بود، ولی برای ترافیک شدید تا حد زیادی باقی مانده بود. پس از گذشت ۲۵ سال از عملیات چوبکشی، مشخصه‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در مسیر چوبکشی در مقایسه با منطقه دست‌نخورده در حال بازیابی بود، اما با منطقه دست‌نخورده تفاوت

References

- [1]. Picchio, R., Mercurio, R., Venanzi, R., Gratani, L., Giallonardo, T., Lo Monaco, A., and Frattaroli, AR. (2018). Strip clear-cutting application and logging typologies for renaturalization of pine afforestation a case study. *Forests*, 9(6): 366.
- [2]. Jourgholami, M., Soltanpour, S., Etehad Abari, M., and Zenner, E.K. (2014). Influence of slope on physical soil disturbance due to farm tractor forwarding in a Hyrcanian forest of northern Iran. *iForest*, 7(5): 342-348.
- [3]. Cambi, M., Hoshika, Y., Mariotti, B., Paoletti, E., Picchio, R., Venanzi, R., and Marchi, E. (2017). Compaction by a forest machine affects soil quality and *Quercus robur* L. seedling performance in an experimental field. *Forest Ecology and Management*, 384: 406-414.
- [4]. Picchio, R., Venanzi, R., Tavankar, F., Luchenti, I., Iranparast Bodaghi, A., Latterini, F., Nikooy, M., Di Marzio, N., and Naghdi, R. (2019). Changes in soil parameters of forests after windstorms and timber extraction. *European Journal of Forest Research*, 138: 875-888.
- [5]. Cambi, M., Certini, G., Neri, F., and Marchi, E. (2015). The impact of heavy traffic on forest soils: a review. *Forest Ecology and Management*, 338: 124-138.
- [6]. Ezzati, S., Najafi, A., Rab, M.A., and Zenner, E.K. (2012). Recovery of soil bulk density, porosity and rutting from ground skidding over a 20-year period after timber harvesting in Iran. *Silva Fennica*, 46(4): 521-538.
- [7]. Ebeling, C., Fründ, H., Lang, L., and Gaertig, T. (2017). Evidence for increased P availability on wheel tracks 10 to 40 years after forest machinery traffic. *Geoderma*, 297: 61-69.
- [8]. Hope, G.D. (2007). Changes in soil properties, tree growth, and nutrition over a period of 10 years after stump removal and scarification on moderately coarse soils in interior British Columbia. *Forest Ecology and Management*, 242: 625-635.
- [9]. von Wilpert, K., and Schäffer, J. (2006). Ecological effects of soil compaction and initial recovery dynamics: a preliminary study. *European Journal of Forest Research*, 125(2): 129-138.
- [10]. DeArmonda, D., Emmertb, F., José Nogueira Lima, A., and Higuchia, N. (2019). Impacts of soil compaction persist 30 years after logging operations in the Amazon Basin. *Soil and Tillage Research*, 189: 207-216.
- [11]. Makineci, E., Demir, M., Comez, A., and Yilmaz, E. (2007). Effects of timber skidding on chemical characteristics of herbaceous cover, forest floor and topsoil on skidroad in an oak (*Quercus petraea* L.) forest. *Journal of Terramechanics*, 44(6): 423-428.
- [12]. Naghdi, R., Solgi, A., and Ilstedt, U. (2016). Soil chemical and physical properties after skidding by rubber-tired skidder in Hyrcanian forest, Iran. *Geoderma*, 265: 12-18.

- [13]. Jaafari, A., Najafi, A., and Zenner, E.K. (2014). Ground-based skidder traffic changes chemical soil properties in a mountainous Oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) forest in Iran. *Journal of Terramechanics*, 55: 39-46.
- [14]. Ebeling, C., Fründ, H., Lang, L., and Gaertig, T. (2017). Evidence for increased P availability on wheel tracks 10 to 40 years after forest machinery traffic. *Geoderma*, 297: 61-69.
- [15]. Mohieddinne, H., Brasseur, B., Spicher, F., Gallet-Moron, E., Buridant, J., Kobaiissi, A., and Horen, H. (2019). Physical recovery of forest soil after compaction by heavy machines, revealed by penetration resistance over multiple decades. *Forest Ecology and Management*, 449: 117472.
- [16]. Sohrabi, H., Jourgholami, M., Tavankar, F., Venanzi, R., and Picchio, R. (2019). Post-Harvest Evaluation of Soil Physical Properties and Natural Regeneration Growth in Steep-Slope Terrains. *Forests*, 10(11): 1-17.
- [17]. Nugent, C., Kanali, C., Owende, P.M., Nieuwenhuis, M., and Ward, S. (2003). Characteristic site disturbance due to harvesting and extraction machinery traffic on sensitive forest sites with peat soils. *Forest Ecology and Management*, 180(1-3): 85-98.
- [18]. Jourgholami, M., Ghassemi, T., and Labelle, E.R. (2019). Soil physio-chemical and biological indicators to evaluate the restoration of compacted soil following reforestation. *Ecological indicators*, 101: 102-110.
- [19]. Najafi, A., Solgi, A., and Sadeghi, S.H. (2009). Soil disturbance following four wheel rubber skidder logging on the steep trail in the north mountainous forest of Iran. *Soil and Tillage Research*, 103(1): 165-169.
- [20]. Demir, M., Makineci, E., and Yilmaz, E. (2007). Harvesting impact on herbaceous understory, forest floor and top soil properties on skid road in a beech (*Fagus orientalis* Lipsky) stand. *Journal of Environmental Biology*, 28(2): 427-433.
- [21]. Mariani, L., Chang, S.X. and Kabzems, R. (2006). Effects of tree harvesting, forest floor removal, and compaction on soil microbial biomass, microbial respiration, and N availability in a boreal aspen forest in British Columbia. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(7): 1734-1744.
- [22]. Gayoso, J., and Iroume, A. (1991). Compaction and soil disturbances from logging in Southern Chile. *Annals of Forest Sciences*, 48(1): 63-71.
- [23]. Naghdi, R., Solgi, A., Zenner, E.K., Najafi, A., Salehi, A., and Nikooy, M. (2017). Compaction of forest soils with heavy logging machinery. *Silva Balcanica*, 18(1): 25-39.

Evaluation of changes in soil physical, chemical and biological properties 25 years after skidding operations in Kheyrud forest

H. Sohrabi; Ph.D. Student of forest engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

M. Jourgholami*; Prof., Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

M. Jafari; Prof., Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

(Received: 27 December 2019, Accepted: 01 February 2020)

ABSTRACT

Soil compaction is a widespread problem in forestry due to the use of heavy machinery for timber harvesting and the lack of attention to soil conditions in harvesting operations. Therefore, the present study was conducted to investigate the natural recovery process of compacted soil properties after skidding operations in Kheyrud forest. Four abandoned skid trails with different ages (3, 10, 20 and 25 years) were selected with three replications at the forest area. In each of them, three traffic intensity classes and three slope classes were specified and sampling were done at the wheel track at depths of 0-10 and 10-20 cm of soil. The results showed that 20 years after the skidding operations, bulk density, penetration resistance and microporosity were 8.4%, 27.4% and 50.44% greater and TP, MP and SM were 1.96%, 17.1% and 4.58% lower than the undisturbed area, respectively. 20 years after skidding operation, the values of pH, EC, C, N, Available P, K, Ca, and Mg, earthworm density and biomass were lower than the undisturbed area, respectively, and value of C/N ratio was higher than the undisturbed area. High traffic intensity (H3) and slope classes of 20 - 30% (C3) in the 3-year skid trail had the greatest impact on soil properties, that indicating greater changes and longer recovery of soil properties in these treatments. The consequence of this study indicated that recovery of soil chemical properties is longer than biological and physical properties, so that complete recovery of these properties takes more than 25 years.

Keywords: Bulk density, Ground-based skidding, Earthworm biomass, Traffic intensity, Trail gradient.

* Corresponding Author, Email: mjgholami@ut.ac.ir, Tel: +982632249312