

بررسی آثار بهره‌برداری جنگل بر خصوصیات فیزیکی و مقاومت خاک در حوزه‌های آبخیز جنگلی (مطالعه موردی: جنگل خیرود)

❖ **مقداد جورغلامی؛** استادیار گروه جنگل‌داری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران
❖ **وحید ریزوندی؛** دانشجوی دکتری جنگل‌داری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران
❖ **باریس مجنونیان؛** استاد گروه جنگل‌داری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران

چکیده

ارزیابی و مدیریت آثار محیط‌زیستی فعالیت‌های بهره‌برداری جنگل یکی از عوامل اساسی است که اهمیت آن نیز روز به روز در حال افزایش است. این مطالعه، به منظور ارزیابی سیستم زمینی چوب‌کشی با اسکیدرهای چرخ لاستیکی در منطقه‌ای هشت‌هکتاری در پارسل ۳۰۹ بخش گرازبن، جنگل آموزشی و پژوهشی خیرود، انجام شد. اهداف این تحقیق عبارت‌اند از اندازه‌گیری به‌هم‌خوردگی خاک، بررسی معنی‌داری اثر شدت ترافیک ماشین و محل نمونه بر وزن مخصوص ظاهری خاک و مقاومت به نفوذ در عمق‌های مختلف خاک، و اثر متقابل به‌هم‌خوردگی ظاهری خاک و مقاومت به نفوذ در شدت ترافیک مختلف. یک شبکه منظم تصادفی مربعی پیاده شد و در مراکز این شبکه به‌هم‌خوردگی ظاهری خاک قبل و بعد از عملیات به صورت چشمی برآورد شد. نمونه‌های وزن مخصوص ظاهری و مقاومت به نفوذ خاک با استفاده از دو روش نمونه‌گیری - سیلندرهای فولادی نمونه‌گیری و پنترومتر دستی - اندازه‌گیری شد. وزن مخصوص ظاهری خاک و مقدار مقاومت به نفوذ در سه عمق ۱۰-۰، ۲۰-۱۰، و ۳۰-۲۰ سانتی‌متری از سطح خاک اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری وزن مخصوص ظاهری، درصد افزایش وزن مخصوص از حد مضر در نظر گرفته‌شده بیشتر است. اندازه‌گیری سطح به‌هم‌خوردگی خاک توده، بعد از عملیات بهره‌برداری، نشان داد مقدار به‌هم‌خوردگی از حد مجاز سطح مضر (زیان‌آور) بیشتر نشده است. نتایج حاکی از آن است که عملیات چوب‌کشی با اسکیدر تغییرات درخور توجهی بر آستانه مضر بیولوژیکی مقاومت به نفوذ خاک در مرکز مسیر چوب‌کشی و محل رد چرخ به وجود نمی‌آورد.

واژگان کلیدی: عملیات چوب‌کشی، کوبیدگی خاک، مقاومت به نفوذ، وزن مخصوص ظاهری.

مقدمه

رویش درخت به مقدار درخور توجهی کاهش می‌یابد (USFS, Ampoorter et al; 1998, 2010).

کوبیدگی خاک، که اغلب با ایجاد رد چرخ و شیاری شدن خاک همراه است، مرحله‌ای معمول است که ممکن است در اثر ترافیک ماشین‌های بهره‌برداری ایجاد شود. این حالت فشرده شدن فضاها، خالی و خلل و فرج خاک به کاهش تخلخل خاک، کاهش پیوستگی منافذ (Teepe et al, 2004)، افزایش وزن مخصوص خشک خاک (Miller et al, 1996)، کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع (Ampoorter et al, 2010)، اختلال تبادلات گازی (Miller and Anderson, 2002)، و تغییر فرایندهای شیمیایی (Ballard, 2000) منجر می‌شود. با کوچک‌تر شدن خلل و فرج خاک، استحکام خاک (Shetron et al, 1988) و مقاومت به نفوذ افزایش می‌یابد (Aust et al, 1993; Nugent et al, 2003)، در نتیجه، ممکن است رشد ریشه مختل شود (Greacen & Sands, 1980) و ترکیب گونه‌ها در کف توده تغییر یابد (Buckley et al, 2003). درجه کوبیدگی خاک جنگل در اثر عملیات چوب‌کشی به متغیرهای مختلفی بستگی دارد، از جمله شرایط توده جنگل (بافت خاک، مقدار مواد آلی، عمق خاک، و شیب)؛ فصل (رطوبت خاک و حرارت خاک)؛ نوع سیستم بهره‌برداری (نوع ماشین، وزن ماشین، شدت برداشت، شدت ترافیک). شدت ترافیک عبارت است از تعداد نوبت عبور ماشین یا سیکل چوب‌کشی که به نزدیک‌تر شدن ذرات خاک به یکدیگر و کاهش خلل و فرج خاک و، در نتیجه، افزایش وزن مخصوص ظاهری منجر می‌شود. منافذ کوچک‌تر در مقابل کوبیدگی کمتر مستعدند، بنابراین، مقاومت خاک و فشردگی قبلی افزایش می‌یابد که به محدود نمودن کوبیدگی در عبورهای بعدی منجر می‌شود (Williamson & Neilsen, 2000; Brais & Camire, 1998) دریافتند که ارتباط بین شدت ترافیک و افزایش وزن مخصوص به صورت لگاریتمی است. در این مورد دو تئوری مطرح است: ۱. وزن

ارزیابی و مدیریت آثار محیط‌زیستی فعالیت‌های بهره‌برداری جنگل یکی از عوامل اساسی است که اهمیت آن نیز روز به روز در حال افزایش است (Sessions et al, 2007). اهداف بهره‌برداری جنگل، در واقع، اجرای طرح‌ها و عملیاتی است که به طور عملی و فنی انجام‌دانی است و از لحاظ اقتصادی پذیرفتنی و از لحاظ زیست‌محیطی سالم و بی‌خطر. برای دستیابی به این اهداف، لازم است که برنامه‌ریزی‌های بهینه‌ای انجام گیرد و پیوسته بهبود یابد (Heinemann, 2004). در دهه‌های اخیر، بهره‌برداری و قطع درختان به شیوه دستی و بهره‌گیری از حیوانات و تراکتورهای کوچک مقیاس به سوی بهره‌برداری مکانیزه با استفاده از تراکتورهای سنگین و ماشین‌آلات مخصوص کار در جنگل با وزن سنگین تکامل و گسترش یافت. این توسعه ممکن است، در اثر کوبیدگی خاک، باعث تخریب خاک در اکوسیستم جنگل شود و به تغییرات وسیع در خصوصیات خاک جنگل منجر گردد که برای ارائه مستمر خدمات اکوسیستم جنگل بسیار مهم و اساسی است (Ampoorter et al, 2010). در نتیجه آن، شرایط خاک ممکن است برای جانوران، پوشش علفی، و درختان نامناسب شود و در بلندمدت به ازدست‌دادن تنوع زیستی، حاصل‌خیزی خاک، و تولید توده جنگل بینجامد (Miller & Anderson, 2002). در جنگل‌های ملی ایالات متحده، به منظور برقراری مقدار قابل قبول به هم‌خوردگی خاک در اثر ورود ماشین‌های بهره‌برداری محدودیت‌هایی وضع شده است (USFS, 1998). این محدودیت افزایش ۲۰ درصدی وزن مخصوص ظاهری در بیش از ۲۰ درصد سطح مورد عمل را، به عنوان سطح خسارت‌آور به هم‌خوردگی، در نظر می‌گیرد. سایر محققان افزایش مقاومت خاک را شاخص به هم‌خوردگی خسارت‌آور در نظر می‌گیرند. مقدار مقاومت حدود ۳۰۰۰ کیلوپاسکال (kPa) یا ۳ مگاپاسکال (MPa)، به عنوان آستانه زیستی بالقوه، ذکر شده است که در این حد

به نفوذ بعد از تردد دوم ماشین فورواردر به طور معنی داری افزایش نمی‌یابد. McMohan (1995) در تحقیق خود، به منظور ارائه روش نمونه برداری مناسب برای به هم خوردگی ظاهری، روش ترانسکت نقطه‌ای با فاصله ۳۰ متر را مناسب دانسته است.

در این تحقیق، وزن مخصوص مضر (زیان‌آور) خاک بر اساس افزایش ۱۵ درصدی متوسط وزن مخصوص ظاهری بعد از عملیات نسبت به قبل شروع عملیات بهره‌برداری تعریف می‌شود (Meurisse, 1987). همچنین، مقاومت به نفوذ بیش از ۳۰۰۰ کیلوپاسکال (Greacen & Sands, 1980) یا افزایش ۵۰۰ کیلوپاسکالی مقاومت به نفوذ در عمق ۱۰ یا ۲۰ سانتی‌متری خاک، به عنوان مقاومت به نفوذ زیان‌آور خاک، در نظر گرفته شد (Tiarks et al, 1999). به هم خوردگی مضر خاک به گونه‌ای در نظر گرفته شد که سطح به هم خوردگی مضر خاک در توده جنگل نباید بیش از ۲۰ درصد باشد (USFS, 1998). اهداف این تحقیق عبارت است از ارزیابی درجه کوبیدگی و به هم خوردگی خاک بعد از عملیات چوب‌کشی و اندازه‌گیری و ارزیابی وسعت به هم خوردگی خاک در منطقه مورد بهره‌برداری.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این تحقیق در پارسل ۳۰۹ بخش گرازبن، جنگل آموزشی و پژوهشی خیرود، انجام شد. مساحت این پارسل برابر ۴/۷ هکتار است. ارتفاع از سطح دریا ۱۰۹۰ تا ۱۲۰۰ متر است و میزان بارندگی منطقه ۱۱۵۰ میلی‌متر. شیوه بهره‌برداری و جنگل‌شناسی در پارسل مورد مطالعه به صورت تک‌گزینی است. جهت عمومی در منطقه جنوب غربی و دارای شیب کلی ۳۵ درصد است. بر اساس آماربرداری صد در صد طرح جنگل‌داری گرازبن در پارسل ۳۰۹، گونه غالب منطقه ممرز (۶۳ درصد) است که با گونه‌های راش (۲۶ درصد)، افرا، و توسکا همراه است.

مخصوص اولیه خاک بر مقدار و درجه افزایش کوبیدگی بعدی تأثیر می‌گذارد؛ ۲. ارتباط بین تعداد نوبت‌های عبور ماشین (شدت ترافیک) و پاسخ به افزایش وزن مخصوص به صورت تابع لگاریتمی است که بیشترین افزایش در شدت تردد کم اتفاق می‌افتد و با افزایش تعداد دفعات عبور به سمت صفر میل می‌کند.

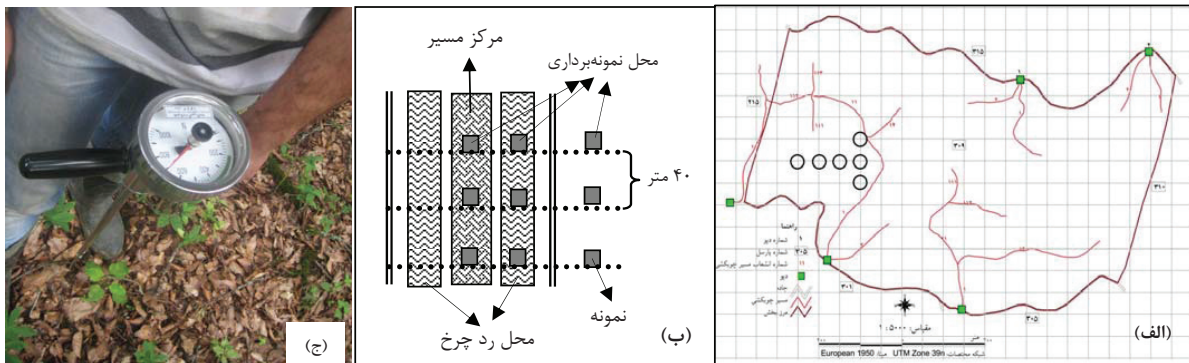
عملیات چوب‌کشی به جابه‌جایی خاک، مخلوط‌شدن، کوبیدگی، و از بین رفتن خاک منتج می‌شود (Froehlich & McNabb, 1984). به عبارت دیگر، به هم خوردگی خاک عبارت است از هر گونه حرکت، جابه‌جایی، و فشردگی خاک یا سطح لایه لاشبرگی در طول عملیات بهره‌برداری مکانیزه (Ampoorter et al, 2010). درجه و وسعت به هم خوردگی خاک مرتبط است با شدت عملیات، نوع تجهیزات مورد استفاده، فصل و زمان عملیات، تعداد دفعات ورود، مقدار لاشبرگ و مازاد مقطوعات در سطح خاک، رطوبت و نوع خاک (Aust et al, 1993; Gomez et al; Seixas & McDonald, 1997; Miller et al, 1996; Parker et al, 2007) و پایداری اقتصادی مدیریت جنگل (Murphy et al, 2004) مرتبط است. Han et al (2009) سیستم تمام‌تنه و گرده‌بینه کوتاه را مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که هر دو سیستم به طور معنی‌داری مقاومت به نفوذ را در سطوح بالای رطوبت خاک افزایش می‌دهند. (Dodson et al, 2006). نتیجه گرفتند که تفاوت معنی‌داری بین کوبیدگی خاک در دو توده بهره‌برداری شده و نشده وجود دارد. تحقیقات پیشین نشان داد که کوبیدگی خاک به مقدار زیادی در اولین ترددها افزایش می‌یابد (Froehlich, 1979). Gent et al (1984) تعیین کردند که کوبیدگی کامل خاک بعد از ۱۰ بار عبور رخ می‌دهد. Han et al (2005) در بررسی سیستم گرده‌بینه کوتاه دریافتند که مقاومت

چوب‌کشی نمونه‌برداری از خاک قبل و بعد از تردد انجام شد. اسکیدر چرخ لاستیکی کابلی تیمبرجک C450 ۱۰/۳ تن وزن دارد و قدرت موتور آن ۱۷۷ اسب بخار است. این نمونه‌ها از خاک معدنی و سطحی و از محل رد چرخ ماشین، با استفاده از سیلندرهای فولادی نمونه‌گیری (طول ۱۰ سانتی‌متر و قطر داخلی ۵ سانتی‌متر)، جمع‌آوری شد. در مرحله بعد، این نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت در داخل آون خشک شد و دوباره عمل توزین نمونه‌ها انجام شد تا وزن مخصوص ظاهری و درصد رطوبت آن‌ها به دست آید. برای بررسی حداکثر عمق وزن مخصوص تحت تأثیر عملیات چوب‌کشی، وزن مخصوص در ناحیه شاهد و کوبیده‌شده در سه عمق ۰-۱۰، ۰-۲۰، ۱۰-۲۰، و ۲۰-۳۰ سانتی‌متری اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری میزان تغییرات وزن مخصوص ظاهری، نمونه‌ها در سه نقطه اندازه‌گیری شد: مرکز مسیر چوب‌کشی؛ محل رد چرخ؛ نقطه‌ای دست‌نخورده در حاشیه مسیر چوب‌کشی. مقاومت به نفوذ^۱ و تغییرات آن با استفاده از پنترومتر دستی در عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر (هر ۱۰ سانتی‌متر یک نمونه) از سطح خاک در سه شدت ترافیک و سه نقطه در طول ترانسکت اندازه‌گیری شد.

عملیات جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز در خرداد و تیرماه ۱۳۹۰ انجام گرفت. تحقیق حاضر در دو مسیر طراحی شده انجام گرفت؛ در مسیرهایی که تا کنون ماشین‌های چوب‌کشی در آن‌ها تردد نداشته‌اند. سنگ‌مادری آهکی و خاک قهوه‌ای جنگلی شسته‌شده با زهکشی مناسب و با بافت لومی رسی تا لومی است. خاک منطقه مورد مطالعه به‌خوبی زهکشی شده و دارای بافت لومی تا لومی رسی با عمق زیاد است.

روش تحقیق

در منطقه‌ای به وسعت ۸ هکتار، یک شبکه منظم تصادفی مربعی به اندازه ۲۰*۲۰ متر پیاده شد و در مراکز این شبکه به‌هم‌خوردگی ظاهری خاک قبل و بعد از عملیات، با استفاده از ۱۲ طبقه به‌هم‌خوردگی، برآورد شد (جدول ۱ و شکل ۱ الف)). به منظور بررسی اثر شدت ترافیک بر وزن مخصوص ظاهری خاک، در مسیرهای چوب‌کشی سه طبقه در نظر گرفته شد: شدت ترافیک کم (کمتر از ۳ بار تردد)؛ شدت متوسط (۳ تا ۵ بار تردد)؛ شدت زیاد (بیش از ۵ بار تردد). طول دو مسیر چوب‌کشی برابر ۱۲۵۰ متر بود و ۱۰ خط ترانسکت با فاصله ۴۰ متر از هم عمود بر مسیر چوب‌کشی در سه شدت ترافیک پیاده و اندازه‌گیری شد (شکل ۱ ب). در مسیرهای



شکل ۱. طرح نمونه‌برداری برای اندازه‌گیری به‌هم‌خوردگی خاک (الف)؛ وزن مخصوص ظاهری و مقاومت به نفوذ (ب) در مسیرهای چوب‌کشی و پنترومتر دستی برای اندازه‌گیری مقاومت به نفوذ خاک (ج) (Froese, ۲۰۰۴)

1. Penetration Resistance

جدول ۱. کدهای به هم خوردگی ظاهری خاک استفاده شده در طول جمع آوری داده‌ها. برگرفته از McMahon (۱۹۹۵)

کد	نوع به هم خوردگی
بدون به هم خوردگی	
۱	نبودن شواهدی از عبور گرده‌بینه و ماشین، تماس نداشتن با لاشبرگ و کف جنگل
به هم خوردگی سطحی و کم عمق	
۲	بدون جابه‌جایی لاشبرگ، شواهد به هم خوردگی حداقل
۳	حذف لایه لاشبرگی، نمایان شدن لایه بالایی خاک
۴	آمیختگی لایه لاشبرگی و لایه بالایی خاک
۵	شواهد عبور چرخ ماشین یا گرده‌بینه (رد با عمق کمتر از ۱۰/۲ سانتی‌متر)
به هم خوردگی عمیق	
۶	حذف لایه سطحی، ظاهر شدن لایه معدنی
۷	ایجاد ساختار فرسایشی (شیار، گالی، و...)
۸	شیاری شدن، شواهد عبور چرخ و گرده‌بینه (رد با عمق ۱۰/۲ تا ۲۰/۴ سانتی‌متر)
۹	رد چرخ با عمق ۱۰/۲ تا ۲۰/۴ سانتی‌متر
موارد مشخص و بدیهی	
۱۰	مسیرهای چوب‌کشی
۱۱	جاده‌های حمل و نقل
۱۲	نبودن خاک (کنده‌های درخت، سنگ‌ها)

تجزیه و تحلیل داده‌ها

در آن وجود نداشته است. به منظور تسهیل تجزیه و تحلیل‌ها، کدهای به هم خوردگی ظاهری خاک به چهار طبقه تقسیم شد: بدون به هم خوردگی (کد ۱)؛ به هم خوردگی سطحی (کد ۲ تا ۵)؛ به هم خوردگی عمیق (کد ۶ تا ۹)؛ مسیر چوب‌کشی و مسیر حمل سنتی (کد ۱۰). پس از عملیات چوب‌کشی با اسکیدر، از ۲۰۰ مرکز قطعه نمونه ۱۸۵ مرکز قطعه نمونه در منطقه بررسی شد. از ۱۸۵ نمونه ۱۲۸ نمونه (۶۹ درصد) بدون به هم خوردگی بود، ۳۱ نمونه (۱۷ درصد) دارای به هم خوردگی سطحی، ۱۵ نمونه (۸ درصد) مربوط به مسیرهای چوب‌کشی و دیوها، و ۱۱ نمونه (۶ درصد) دارای به هم خوردگی عمیق.

تغییرات وزن مخصوص ظاهری خاک

جدول ۲ تجزیه واریانس اثر شدت تردد، محل نمونه، عمق، و آثار متقابل آن‌ها بر وزن مخصوص ظاهری خاک را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد شدت تردد، محل نمونه، عمق، و آثار متقابل آن‌ها، به لحاظ آماری، دارای اثر معنی‌داری بر مقدار وزن مخصوص ظاهری خاک هستند ($P < 0/05$).

این آزمایش‌ها در قالب طرح فاکتوریل کاملاً تصادفی اجرا شد تا با آن اثر شدت، نوع، و عمق خاک بر روی تغییرات وزن مخصوص ظاهری و مقاومت به نفوذ ارزیابی و کمی شود. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها، نخست با آزمون کولموگراف-اسمیرنوف نرمال بودن داده‌ها بررسی شد. در صورتی که اثر هر یک از عوامل در آنالیز واریانس یک‌طرفه و دوطرفه معنی‌دار باشد، از آزمون مقایسه‌ای چندگانه توکی برای گروه‌بندی استفاده می‌شود. منبع تغییرات در داده‌های جمع‌آوری شده عبارت است از شدت ترافیک (کم، متوسط، و زیاد)؛ محل نمونه (شاهد، مرکز مسیر، و محل رد چرخ)؛ تغییر عمق به عمق (۳ کلاس عمق).

نتایج

به هم خوردگی خاک

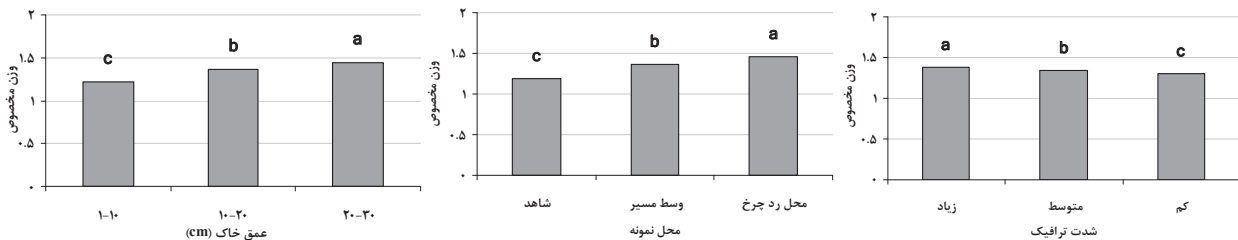
این پژوهش در جنگل بکر - که تاکنون هیچ سابقه بهره‌برداری صنعتی نداشته - انجام شده است و هیچ نوع از طبقه‌های به هم خوردگی قبل از عملیات چوب‌کشی

جدول ۲. تجزیه واریانس اثر شدت تردد، محل نمونه، عمق، و آثار متقابل آن‌ها بر وزن مخصوص ظاهری خاک

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	P value
شدت ترافیک	۰٫۳۲	۲	۰٫۱۶	۱۶۳۲٫۳۹	۰٫۰۰
محل نمونه	۳٫۳۶	۲	۱٫۶۸	۱۷۲۶۱٫۳۹	۰٫۰۰
عمق	۲٫۱۴	۲	۱٫۰۷	۱۰۹۸۶٫۶۶	۰٫۰۰
شدت ترافیک*محل نمونه	۰٫۱۵	۴	۰٫۰۴	۳۸۶٫۵۹	۰٫۰۰
شدت ترافیک*عمق	۰	۴	۰	۶٫۵	۰٫۰۰
محل نمونه*عمق	۰٫۱۲	۴	۰٫۰۳	۳۰۴٫۵۸	۰٫۰۰
شدت ترافیک*محل نمونه*عمق	۰٫۰۱	۸	۰	۱۰٫۵۸	۰٫۰۰

رد چرخ در مسیر چوب‌کشی بیشترین مقدار وزن مخصوص ظاهری ($1/46 \text{ g/cm}^3$) را دارد و مرکز مسیر چوب‌کشی، که محل عبور گرده‌بینه است، از نظر مقدار وزن مخصوص ($1/37 \text{ g/cm}^3$) در مرتبه بعدی قرار دارد. همچنین، نتایج نشان داد با افزایش عمق خاک از سطح زمین وزن مخصوص ظاهری افزایش می‌یابد (شکل ۲).

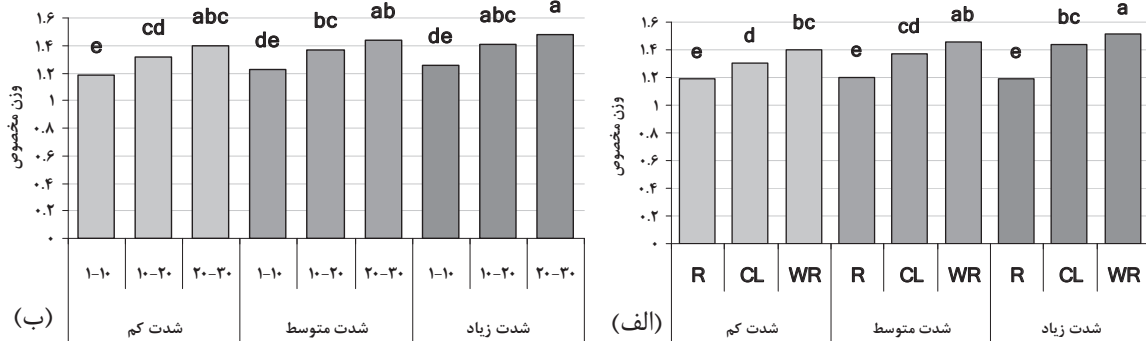
نتایج آزمون توکی نشان داد که شدت ترافیک زیاد بیشترین میزان وزن مخصوص ($1/38 \text{ g/cm}^3$) را دارد و کم، به ترتیب، با متوسط $1/34$ و $1/3$ پس از آن قرار دارند. آزمون توکی نشان داد عملیات چوب‌کشی اثر معنی‌داری بر افزایش وزن مخصوص ظاهری خاک دارد و محل



شکل ۲. مقایسه وزن مخصوص ظاهری با آزمون توکی با توجه به شدت ترافیک، محل نمونه، و عمق خاک. حروف لاتین نامتشابه نشان‌دهنده معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است.

است و پس از آن، به ترتیب، محل رد چرخ در مسیر با تردد متوسط ($1/46 \text{ g/cm}^3$) و محل عبور گرده‌بینه در تردد زیاد ($1/44 \text{ g/cm}^3$) قرار دارد. از سوی دیگر، نتایج نشان داد در هر سه شدت تردد وزن مخصوص ظاهری از نقطه شاهد تا محل رد چرخ افزایش معنی‌داری دارد. همچنین، بین نقاط شاهد در سه شدت تردد کم، متوسط، و زیاد، از نظر آماری، تفاوت معنی‌داری وجود ندارد.

آزمون مقایسه‌ای اثر متقابل شدت ترافیک و محل نمونه نشان داد شدت ترافیک، از نظر آماری، اثر معنی‌داری بر افزایش وزن مخصوص ظاهری در سه محل نمونه - شاهد، مرکز مسیر، و محل عبور چرخ اسکیدر - دارد (شکل ۳ الف)). آزمون مقایسه میانگین توکی نشان داد بیشترین مقدار وزن مخصوص ظاهری را محل رد چرخ در شدت تردد زیاد دارد که برابر با $1/52 \text{ g/cm}^3$

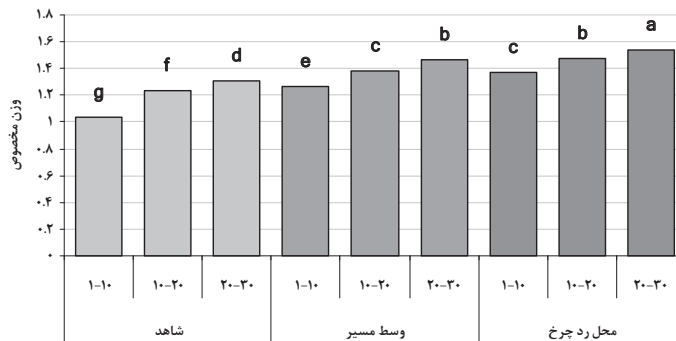


شکل ۳. مقایسه وزن مخصوص ظاهری با آزمون توکی با توجه به اثر متقابل بین شدت ترافیک و محل نمونه (الف)، شدت ترافیک، و عمق خاک (ب). در نمودار (الف) حروف R، CL، WR، به ترتیب، نشان‌دهنده نمونه شاهد، نمونه مرکز مسیر، و محل رد چرخ است. در نمودار (ب)، سه طبقه عمق از سطح خاک، به ترتیب، با ۱-۱۰، ۱۰-۲۰، و ۲۰-۳۰ نشان داده شد. حروف لاتین نامتشابه نشان‌دهنده معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است.

محل عبور چرخ اسکیدر وزن مخصوص ظاهری در عمق‌های مختلف افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار وزن مخصوص مربوط به محل رد چرخ در عمق ۲۰-۳۰ سانتی‌متر با مقدار $1/48 \text{ g/cm}^3$ بود و پس از آن محل رد چرخ در عمق ۱۰-۲۰ سانتی‌متر و محل عبور گرده‌بین در عمق ۲۰-۳۰ سانتی‌متر در مرکز مسیر چوب‌کشی، به ترتیب، با مقدار $1/47$ و $1/46 \text{ g/cm}^3$ مشاهده شد. در هر سه محل نمونه نیز با افزایش عمق خاک وزن مخصوص ظاهری افزایش می‌یابد که این افزایش، از نظر آماری، معنی‌دار است (شکل ۴).

مقایسه میانگین اثر متقابل شدت ترافیک و عمق خاک نشان داد با افزایش شدت ترافیک وزن مخصوص ظاهری در عمق‌های مختلف افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار وزن مخصوص در عمق ۲۰-۳۰ سانتی‌متر در شدت تردهای زیاد و متوسط با مقدار $1/48$ و $1/43 \text{ g/cm}^3$ مشاهده شد. در هر شدت تردد نیز، با افزایش عمق خاک، وزن مخصوص ظاهری افزایش می‌یابد که این افزایش، از نظر آماری، معنی‌دار است (شکل ۳ (ب)).

مقایسه میانگین اثر متقابل محل نمونه و عمق خاک نشان داد با تغییر محل نمونه برداری از نقطه شاهد تا



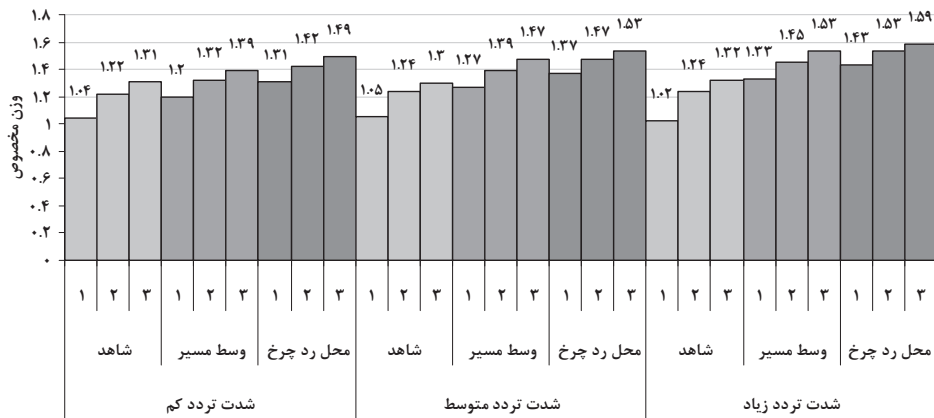
شکل ۴. مقایسه وزن مخصوص ظاهری با آزمون توکی با توجه به اثر متقابل بین محل نمونه و عمق خاک. حروف لاتین نامتشابه نشان‌دهنده معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است.

زیاد و محل عبور گرده‌بینه در عمق ۳۰-۲۰ سانتی‌متر در مرکز مسیر چوب‌کشی، به ترتیب، با مقدار ۱/۵۳ و ۱/۵۳ g/cm^۳ مشاهده شد (شکل ۵).

تغییرات مقاومت به نفوذ خاک

جدول ۳ آنالیز واریانس اثر شدت تردد، محل نمونه، عمق، و آثار متقابل آن‌ها بر مقاومت به نفوذ خاک را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد شدت تردد، محل نمونه، عمق، و آثار متقابل آن‌ها، به لحاظ آماری، اثر معنی‌داری بر مقدار مقاومت به نفوذ خاک دارند ($P < 0/05$).

مقایسه میانگین اثر متقابل شدت ترافیک، محل نمونه، و عمق خاک نشان داد با افزایش شدت ترافیک ماشین در مسیرهای چوب‌کشی وزن مخصوص ظاهری به طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. همچنین، با تغییر محل نمونه‌برداری از نقطه شاهد تا محل عبور چرخ اسکیدر وزن مخصوص ظاهری در عمق‌های مختلف افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار وزن مخصوص مربوط بود به شدت ترافیک زیاد و محل رد چرخ در عمق ۲۰-۳۰ سانتی‌متر با مقدار ۱/۵۹ g/cm^۳ و پس از آن محل رد چرخ در عمق ۱۰-۲۰ سانتی‌متر در شدت تردد



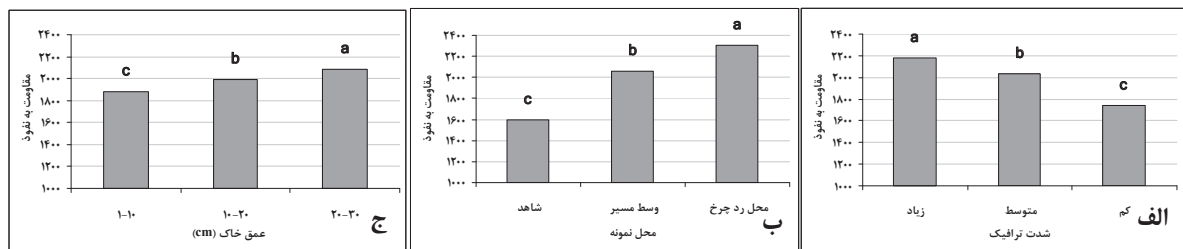
شکل ۵. مقایسه وزن مخصوص ظاهری با توجه به اثر متقابل بین شدت ترافیک، محل نمونه، و عمق خاک (ب). حروف لاتین نامتشابه نشان‌دهنده معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است.

جدول ۳. آنالیز واریانس اثر شدت تردد، محل نمونه، عمق، و آثار متقابل آن‌ها بر مقاومت به نفوذ

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	P value
شدت ترافیک	۹۰۷۱۸۶۱،۴۵	۲	۴۵۳۵۹۳۱	۳۵۵۸،۳۲	۰،۰۰
محل نمونه	۲۳۳۹۱۵۳،۸	۲	۱۱۶۹۵۷۶۶	۹۱۷۵،۰۱	۰،۰۰
عمق	۱۸۷۹۶۵۶،۳۶	۲	۹۳۹۸۲۸،۲	۷۳۷،۲۷	۰،۰۰
شدت ترافیک*محل نمونه	۵۵۴۶۵۰۵،۰۸	۴	۱۳۸۶۶۲۶	۱۰۸۷،۷۷	۰،۰۰
شدت ترافیک*عمق	۱۴۸۰۱۳،۴۸	۴	۳۷۰۰۳،۳۷	۲۹،۰۳	۰،۰۰
محل نمونه*عمق	۳۶۰۰۶۷،۳	۴	۹۰۰۱۶،۸۳	۷۰،۶۲	۰،۰۰
شدت ترافیک*محل نمونه*عمق	۲۱۸۰۷۲،۳۹	۸	۲۷۲۵۹،۰۵	۲۱،۳۸	۰،۰۰

قرار دارند. شکل ۶ (ج) اثر مستقل عمق خاک را بر افزایش مقاومت به نفوذ نشان می‌دهد. بر اساس آزمون توکی، عمق ۲۰-۳۰ سانتی‌متری از سطح خاک، با مقدار ۲۰۸۹ کیلوپاسکال، بیشترین میزان میانگین مقاومت به نفوذ را نشان داد و پس از آن کلاسه‌های عمق ۱۰-۲۰ و ۰-۱۰ سانتی‌متری از سطح خاک، به ترتیب، با ۱۹۹۲ و ۱۸۸۵ کیلوپاسکال قرار دارند. جدول ۴ میانگین و انحراف معیار اثر متقابل شدت ترافیک، محل نمونه، و عمق خاک بر مقاومت به نفوذ خاک جنگل را در اثر عملیات چوب‌کشی نشان می‌دهد. نتایج نشان داد، با افزایش شدت ترافیک ماشین در مسیرهای چوب‌کشی، مقاومت به نفوذ خاک به طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. همچنین، با تغییر محل نمونه برداری از نقطه شاهد تا محل عبور چرخ اسکیدر، مقاومت به نفوذ خاک در عمق‌های مختلف افزایش می‌یابد.

شکل ۶ اثر مستقل شدت ترافیک، محل نمونه، و عمق خاک را بر مقادیر مقاومت به نفوذ نشان می‌دهد. گروه‌بندی بر اساس آزمون توکی نشان داد که بین ۳ کلاسه شدت ترافیک از نظر میزان مقاومت به نفوذ، از نظر آماری، تفاوت معنی‌داری وجود دارد. میانگین مقدار مقاومت به نفوذ در شدت ترافیک زیاد پس از عملیات چوب‌کشی با ۲۱۸۵ کیلوپاسکال دارای بالاترین مقدار است و پس از آن کلاسه‌های شدت ترافیک متوسط و کم، به ترتیب، با ۲۰۳۸ و ۱۷۴۴ کیلوپاسکال قرار دارند (شکل ۶ الف)). شکل ۶ (ب) اثر مستقل محل نمونه را بر افزایش مقاومت به نفوذ نشان می‌دهد. بر اساس آزمون توکی، محل رد چرخ ماشین در مسیر چوب‌کشی با مقدار ۲۳۰۶ کیلوپاسکال بیشترین میزان میانگین مقاومت به نفوذ را نشان داد و پس از آن محل نمونه در مرکز مسیر و نمونه شاهد، به ترتیب، با ۲۰۶۴ و ۱۵۹۷ کیلوپاسکال



شکل ۶. مقایسه میانگین افزایش مقاومت به نفوذ با اثر مستقل بین شدت ترافیک (الف)، محل نمونه (ب)، و عمق خاک (ج). حروف لاتین نامتشابه نشان‌دهنده معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است.

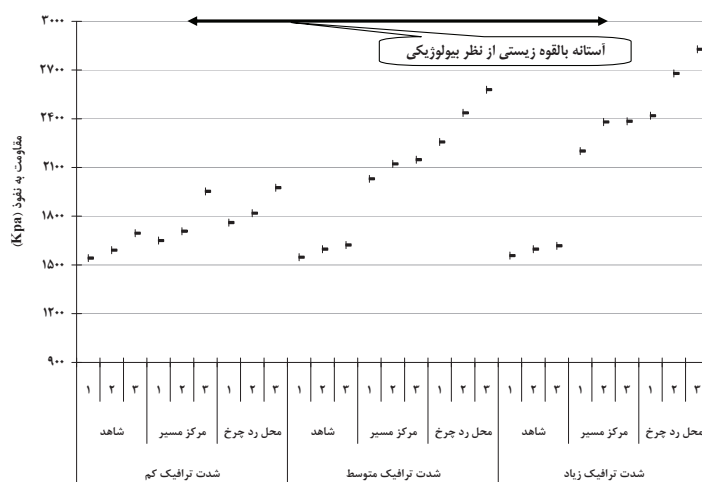
جدول ۴. پارامترهای میانگین و انحراف معیار اثر شدت تردد، محل نمونه، عمق، و آثار متقابل آن‌ها بر مقاومت به نفوذ

شدت ترافیک		متوسط		کم		محل نمونه
عمق خاک	میانگین	انحراف از معیار	میانگین	انحراف از معیار	میانگین	
۰-۱۰	۱۵۴۳	۳۰٫۱	۱۵۴۸	۴٫۷	۱۵۵۸	شاهد
۱۰-۲۰	۱۵۹۱	۲۷٫۵	۱۵۹۷	۸٫۹	۱۵۹۷	
۲۰-۳۰	۱۶۹۶	۴۲٫۴	۱۶۲۳	۱۳٫۸	۱۶۱۸	
۰-۱۰	۱۶۵۰	۳۵٫۱	۲۰۳۰	۳۶٫۹	۲۲۰۱	وسط مسیر
۱۰-۲۰	۱۷۰۸	۳۳٫۷	۲۱۲۲	۳۵٫۳	۲۳۸۰	
۲۰-۳۰	۱۹۵۳	۴۵٫۴	۲۱۴۸	۳۶	۲۳۸۵	
۰-۱۰	۱۷۶۱	۳۲٫۸	۲۲۵۷	۳۹٫۳	۲۴۱۹	محل رد چرخ
۱۰-۲۰	۱۸۱۹	۳۴٫۴	۲۴۳۶	۲۴٫۶	۲۶۷۹	
۲۰-۳۰	۱۹۷۶	۴۹٫۷	۲۵۷۹	۷۵	۲۸۲۸	

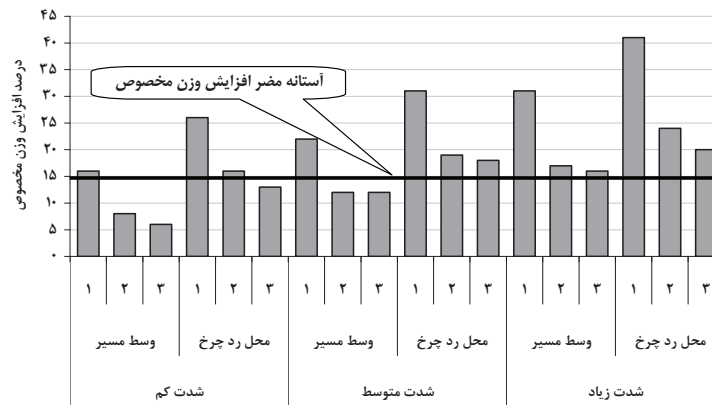
با توجه به سه محل نمونه‌برداری، یعنی نمونه شاهد، مرکز مسیر، و محل رد چرخ، نتایج نشان می‌دهد که در سه شدت ترافیک بیشترین مقدار مقاومت به نفوذ خاک مربوط به محل رد چرخ است و مرکز مسیر چوب‌کشی پس از آن قرار دارد. شکل ۸ درصد افزایش وزن مخصوص ظاهری خاک را، با توجه به نمونه شاهد، در سه شدت تردد و مقایسه آن با آستانه مضر افزایش وزن مخصوص نشان می‌دهد. با افزایش شدت تردد از کم به زیاد، درصد افزایش وزن مخصوص در دو محل نمونه‌برداری (رد چرخ و مرکز مسیر) و همچنین با افزایش عمق خاک بیشتر شده است. بالاترین درصد افزایش وزن مخصوص ظاهری مربوط به عمق ۱۰-۱ سانتی‌متری خاک و در شدت تردد زیاد است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد لایه ۱۰-۱ سانتی‌متری خاک در همه شدت‌های تردد دارای افزایش قابل توجه وزن مخصوص ظاهری نسبت به دو لایه ۲۰-۱۰ و ۳۰-۲۰ سانتی‌متری خاک است و از مقدار ۱۵ درصد آستانه مضر افزایش وزن مخصوص ظاهری بیشتر است. نتایج نشان می‌دهد، با افزایش شدت تردد، وزن مخصوص ظاهری خاک در ۷۲ درصد منطقه مورد مطالعه از آستانه مضر افزایش وزن مخصوص عبور کرد.

حدود اعتماد در بین کلاسه‌های شدت ترافیک، محل نمونه، و عمق خاک دلالت بر این دارد که، از نظر آماری، بین آن‌ها اختلاف معنی‌داری وجود دارد (شکل ۷). مقدار مقاومت به نفوذ در هر کلاسه، شدت تردد و محل نمونه با افزایش عمق افزایش می‌یابد. در این مطالعه، بر اساس مرور منابع، حد تعیین‌شده ۳۰۰۰ کیلوپاسکال برای مقاومت به نفوذ، از نظر بیولوژیکی، اثر بسیار زیادی بر حاصل‌خیزی توده در آینده دارد. هرچند این حد مقدار مطلق برای کاهش حاصل‌خیزی خاک نیست و ممکن است در مقادیر کمتر از این نیز حاصل‌خیزی خاک کاهش یابد. بر اساس شکل ۷، هیچ یک از تیمارهای شدت ترافیک و محل نمونه، قبل و بعد از عملیات چوب‌کشی، دارای مقادیر بیش از ۳۰۰۰ کیلوپاسکال، حد آستانه کاهش فعالیت‌های بیولوژیکی، نیستند. این نتایج بر این نکته دلالت دارد که نوع عملیات چوب‌کشی با اسکیدر تغییرات درخور توجهی بر آستانه بیولوژیکی مقاومت به نفوذ خاک در کلاسه‌های عمق ندارد.

با افزایش شدت ترافیک (شکل ۷) از کم به زیاد، مقاومت به نفوذ افزایش می‌یابد که بیشترین میزان افزایش در شدت ترافیک زیاد داد. از سوی دیگر،



شکل ۷. میانگین مقاومت به نفوذ (PR) به کیلوپاسکال با حدود اعتماد ۹۵ درصد برای سه شدت ترافیک و سه محل نمونه در هر کلاسه عمق. سه عمق ۱۰-۱، ۲۰-۱۰، و ۳۰-۲۰ سانتی‌متری از سطح خاک، به ترتیب، با ۱، ۲، و ۳ نشان داده شد.



شکل ۸. میانگین درصد افزایش وزن مخصوص ظاهری خاک در سه شدت تردد و محل نمونه با توجه به آستانه مضر افزایش وزن مخصوص. سه عمق ۱۰-۱، ۲۰-۱، و ۳۰-۲ سانتی متری از سطح خاک، به ترتیب، با ۱، ۲، و ۳ نشان داده شد.

برخی از محققان آثار تعداد تردد ماشین‌های بهره‌برداری را بر کوبیدگی خاک و افزایش وزن مخصوص ظاهری بررسی کردند (Aust et al, 1993; Gomez et al, 1997; Seixas & McDonald, 2002). نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد بیشتر کوبیدگی در طول تردهای اولیه اتفاق می‌افتد و تردهای اضافی بعدی اثر کمتری در افزایش وزن مخصوص دارد. هرچند تردهای اضافی ممکن است وزن مخصوص را افزایش دهد و فضاهای خالی را به سطوحی - که برای رشد درخت بحرانی است - کاهش دهد. نتایج نشان داد تغییر وزن مخصوص ظاهری خاک از حد ۱۵ درصد افزایش، که به عنوان حد مضر در نظر گرفته شده، بیشتر است. این افزایش وزن مخصوص از حد مضر به‌ویژه در شدت تردد متوسط و شدید بیشتر مشاهده شد. در واقع، این تئوری اثبات شده است که، به دلیل بکربودن منطقه مورد بهره‌برداری، خصوصیات خاک قبل از بهره‌برداری در حد قابل قبولی بوده و مقدار وزن مخصوص ظاهری آن کم بوده است. از سوی دیگر، با افزایش شدت ترافیک از کم به زیاد وزن مخصوص ظاهری افزایش درخت توجهی دارد و در همه شدت‌های تردد بیشترین درصد افزایش وزن مخصوص مربوط به عمق ۱۰-۱ سانتی متری خاک در مرکز مسیر چوب‌کشی و محل رد چرخ ماشین است. نتایج نشان داد بیشترین

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد ۱۴ درصد از کل منطقه مورد بهره‌برداری به صورت شدید دچار به‌هم‌خوردگی شد که، با توجه به حد به‌هم‌خوردگی مضر خاک (USFS, 1998)، در این پژوهش، به‌هم‌خوردگی به سطح مضر (زیان‌آور) نرسید. هرچند باید توجه داشت که این پژوهش در جنگل بکر - که تاکنون هیچ سابقه بهره‌برداری صنعتی نداشته - انجام شده و هیچ نوع از طبقه‌های به‌هم‌خوردگی قبل از عملیات چوب‌کشی در آن وجود نداشته است. نتایج نشان داد عملیات چوب‌کشی با اسکیدر چرخ لاستیکی اثر درخت توجهی و معنی‌داری بر به‌هم‌خوردگی ظاهری خاک و افزایش مقاومت به نفوذ دارد که با نتایج سایر محققان (Greacen & Sands, 1980; Froehlich & Murphy; 2002, Gomez et al; 1984, McNabb et al, 2004) منطبق است. هرچند، از نظر بیولوژیکی، با فرض در نظر گرفتن حد ۳۰۰۰ کیلوپاسکال، به عنوان آستانه فعالیت بیولوژیکی خاک، آثار معنی‌داری یافت نشد (Bolding et al, 2009). با این حال، مطالعات دیگری، بسته به نوع خاک و گونه‌های درختی، بیان کردند که رشد درخت در مقادیر قبل از ۳۰۰۰ کیلوپاسکال شروع به کاهش می‌کند (Sands et al, 1979; Parker et al; 2007).

وسعت به‌هم‌خوردگی ظاهری خاک و تغییرات مقاومت به نفوذ تأثیر می‌گذارد و قبل از عملیات چوب‌کشی باید این موارد ارزیابی شود. یک راهکار مهم آن است که از عبور ماشین در مواقعی که خاک جنگل مرطوب و رطوبت خاک به حد روانی نزدیک است اجتناب شود. طراحی مسیرهای چوب‌کشی و همچنین محدود کردن ماشین به تردد در این مسیرها راهکار دیگری در کاهش به‌هم‌خوردگی و کوبیدگی خاک است، زیرا بازیابی خاک‌های جنگلی کوبیده‌شده تحت تأثیر آب و هوا و فعالیت فون و ریشه‌ها بسیار کند است. برنامه‌ریزی و زمان‌بندی راه حلی مناسب برای کاهش درجه و وسعت آثار به‌هم‌خوردگی خاک است، چون روشی آسان‌تر و ارزان‌تر برای کاهش آثار مرتبط با به‌هم‌خوردگی خاک قبل از عملیات بهره‌برداری است.

تشکر و قدردانی

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی شماره ۲۸۵۱۴/۱/۲ با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه تهران انجام شده است؛ نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از معاونت پژوهشی دانشگاه تهران اعلان می‌دارند.

میزان کوبیدگی در لایه سطحی خاک (۰-۱۰ سانتی‌متر) اتفاق می‌افتد. لایه‌های کوبیده‌شده اغلب در عمق‌های مختلف خاک وجود دارند. کوبیدگی ممکن است ناچیز، متوسط، و عمیق باشد. پیشترها، کوبیدگی خاک بیشتر در لایه‌های سطحی مورد توجه بود، اما وقتی که وسایل بهره‌برداری سنگین با ظرفیت بار زیاد تولید شد، کوبیدگی لایه‌های زیرین خاک نیز حائز اهمیت شد (Ampoorter et al, 2010). تحت ترافیک سنگین بار بعضی از خاک‌ها تا عمق ۱ متر و بیشتر کوبیده می‌شوند. هرچند، بالاترین درجه کوبیدگی معمولاً در ۳۰ سانتی‌متر اول پروفیل خاک اتفاق می‌افتد که به طور عادی بیشترین میزان حضور ریشه‌ها را نیز دارد (Ares et al, 1993; Han et al, 2005).

با توجه به اینکه از نظر به‌هم‌خوردگی و درصد افزایش وزن مخصوص ظاهری خاک منطقه مورد پژوهش دچار آثار مضر شد، محدود نمودن سطح ترافیک ماشین در توده را باید با استفاده از مسیرهای چوب‌کشی به طور دقیق انجام داد. شرایط خاک، به‌ویژه میزان رطوبت خاک، به مقدار زیادی بر خصوصیات و

References

- [1]. Ampoorter, E., Van Nevel, L., De Vos, B., Hermy, M. and Verheyen, K. (2010). Assessing the effects of initial soil characteristics, machine mass and traffic intensity on forest soil compaction. *Forest Ecology and Management*, 260, 1664-1676.
- [2]. Aust, W. M., Reisinger, T. W., Burger, J. A. and Stokes, B. J. (1993). Soil physical and hydrological changes associated with logging a wet pine flat with wide-tired skidders. *Southern Journal of Applied Forestry*, 17(1), 22-25.
- [3]. Ballard, T. M. (2000). Impacts of forest management on northern forest soils. *Forest Ecology and Management*, 133, 37-42.
- [4]. Bolding, M. C., Kellogg, L. D. and Davis, C. T. (2009). Soil Compaction and Visual Disturbance Following an Integrated Mechanical Forest Fuel Reduction Operation in Southwest Oregon. *International Journal of Forest Engineering*, 20(2), 47-56.
- [5]. Brais, S. and Camire, C. (1998). Soil compaction induced by careful logging in the claybelt region of northwestern Quebec (Canada). *Canadian Journal of Soil Science*, 78, 197-206.
- [6]. Buckley, D. S., Crow, T. R., Nauertz, E. A. and Schulz, K. E. (2003). Influence of skid trails and haul roads on understorey plant richness and composition in managed forest landscapes in Upper Michigan, USA. *Forest Ecology and Management*, 175, 509-520.
- [7]. Dodson, E. M., Deboodt, T. and Hudspeth, G. (2006). Production, cost, and soil compaction estimates for two western juniper extraction systems. *Western Journal of Applied Forestry*, 21(4), 185-194.
- [8]. Froehlich, H. A. (1979). Soil compaction from logging equipment: effects on growth of young ponderosa pine. *Journal of Soil and Water Conservation*, 34, 276-278.
- [9]. Froehlich, H. A. and McNabb, D. H. (1984). Minimizing soil compaction in Pacific Northwest forests. In: *Forest Soils and Treatment Impacts*. Proc. of the 6th North American Forest Soils Conf., E.L. Stone, Ed. Univ. of Tennessee, Knoxville, TN. pp. 159-192.
- [10]. Gent, J. A., Ballard, R., Hassan, A. E. and Cassel, D. K. (1984). Impact of harvesting and site preparation on physical properties of Piedmont forest soils. *Soil Science Society of America Journal*, 48, 173-177.
- [11]. Gomez, A., Powers, R. F., Singer, M. J. and Horwath, W. R. (2002). Soil compaction effects on growth of young ponderosa pine following litter removal in California's Sierra Nevada. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 1334-1343.
- [12]. Greacen, E. L. and Sands, R. (1980). Compaction of forest soils, A Review. *Australian Journal of Soil Research*, 18, 163-189.
- [13]. Han, H-S., Page-Dumroese, D. S., Han, S-K. and Tirocke, J. (2005). Effect of slash, machine passes, and soil wetness on soil strength in a cut-to-length harvesting. In: *Proc. of the 28th Annual Council on Forest Engineering Meeting*, Fortuna, CA. pp. 144-155.
- [14]. Han, S-K., Han, H-S., Page-Dumroese, D. S. and Johnson, L. R. (2009). Soil compaction associated with cut-to-length and whole-tree harvesting of a coniferous forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 39, 976-989.

- [15]. Heinemann, H. R. (2004). Forest operation under mountainous conditions. In Encyclopedia of Forest Sciences, J. Burley, J. Evans, and J. Youngquist, Editors. Elsevier Academic Press: Amsterdam, etc. P: 279-285.
- [16]. McMahon, S. (1995). Accuracy of two ground survey methods for assessing site disturbance. *Journal of Forest Engineering*, 6(2), 27-33.
- [1]. Meurisse, R. T. (1987). Soil productivity protection and improvement: Objectives, policy and standards in the Pacific Northwest Region of the Forest Service. Alaska Forest Soil Productivity Workshop, Gen. Tech. Rep.: 63-68.
- [17]. Miller, D. and Anderson, H. (2002). Soil compaction: concerns, claims, and evidence. In: Proc. Small Diameter Timber: Resource Management, Manufacturing, and Markets. February 25-27, 2002; Spokane, Washington. Washington State University Cooperative Extension. p. 97-106.
- [18]. Miller, R. E., Scott, W. and Hazard, J. W. (1996). Soil compaction and conifer growth after tractor yarding at three coastal Washington locations. *Canadian Journal of Forest Research*, 26: 225-236.
- [19]. Murphy, G., Firth, J. G. and Skinner, M. F. (2004). Long-term impacts of forest harvesting related soil disturbance on log product yields and economic potential in a New Zealand forest. *Silva Fennica*, 38(3), 279-289.
- [20]. Nugent, C., Kanali, C., Owende, P. M. O., 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, 85-98.
- [21]. Parker, R. T., Maguire, D. A., Marshall, D. D. and Cochran, P. (2007). Ponderosa pine growth response to soil strength in the volcanic ash soils of central Oregon. *Western Journal of Applied Forestry*, 22(2), 134-141.
- [22]. Seixas, F. and McDonald, T. (1997). Soil compaction effects of forwarding and its relationship with 6- and 8-wheel drive machines. *Forest Product Journal*, 47(11/12), 46-52.
- [23]. Sessions, J., Boston, K., Murphy, G., Wing, M. G., Kellogg, L., Pilkerton, S., Zweede, J. C. and Heinrich, R. (2007). *Harvesting operation in the Tropics*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. 170 P.
- [24]. Shetron, S. G., Sturos, J. A. Padley, E. and Trettin, C. (1988). Forest soil compaction: effect of multiple passes and landings on wheel track surface soil bulk density. *Northern Journal of Applied Forestry*, 5, 120-123.
- [25]. Teepe, R., Brumme, R., Beese, F. and Ludig, B. (2004). Nitrous oxide emission and methane consumption following compaction of forest soils. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 605-611.
- [26]. Tiarks, A. E., Buford, M. A., Powers, R. F., Ragus, J. F., Page-Dumroese, D. S., Ponder, F. J. and Stone, D. M. (1997). North-American long-term soil productivity research program. In: *Proceedings of the National Silviculture Workshop*, Warren, Pennsylvania, pp 140-147.
- [27]. USFS. (1998). USDA Forest Service Manual, FSM 2520 (Watershed Protection and Management) R-6 Supplement No. 2500-98-1, Effective August 24, 1998. 25 P.
- [28]. Williamson, J. R. and Neilsen, W. A. (2000). The influence of forest site on rate and extent of soil compaction and profile disturbance of skid trails during ground-based harvesting. *Canadian Journal of Forest Research*, 30, 1196-1205.