

## کوبیدگی و به هم خوردگی خاک جنگل در اثر خروج چوب با اسکیدر چرخ لاستیکی (مطالعه موردی: جنگل خیرود)

مقداد جورغلامی\*<sup>۱</sup> و باریس مجنونیان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه جنگلداری دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> استاد گروه جنگلداری دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۹/۱۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۵/۱۸)

### چکیده

استفاده از اسکیدرهای چرخ لاستیکی، عملیاتی معمول برای خروج چوب از عرصه قطع است، هرچند مشکلات زیست محیطی زیادی را سبب می شود. هدف از این تحقیق بررسی تأثیر درصد شیب، تعداد عبور اسکیدر، عمق و رطوبت خاک در مسیرهای چوبکشی بر کوبیدگی خاک های ریزدانه و در مرحله بعد، کمی کردن این آثار است. این پژوهش در قالب طرح فاکتوریل کاملاً تصادفی در جنگل آموزشی و پژوهشی خیرود اجرا شد. آثار شیب در چهار گروه ۰، ۱۰، ۱۰- و ۲۰- درصد و عمق خاک در ۵، ۱۵ و ۲۵ سانتی متری از سطح خاک اندازه گیری شد. همچنین آثار رطوبت خاک در سه دسته ۲۰-۳۰، ۴۰-۳۰ و ۵۰-۴۰ درصد اندازه گیری شد. سطوح متفاوت کوبیدگی نیز بر اساس تعداد عبور اسکیدر عبارتند از ۱، ۵، ۸، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ بار تردد. افزایش دفعات عبور اسکیدر، وزن مخصوص ظاهری را افزایش می دهد، ولی بیشترین درصد افزایش وزن مخصوص ظاهری در اثر عبور اولیه اسکیدر رخ داده است. کوبیدگی خاک در شیب رو به بالا (در جهت چوبکشی) بیشتر از شیب رو به پایین است. همچنین افزایش وزن مخصوص خاک در اثر چوبکشی تا عمق ۳۰ سانتی متری نیز درخور توجه است. وزن مخصوص ظاهری خاک در عمق های ۵، ۱۵ و ۲۵ سانتی متر به ترتیب به طور میانگین ۳۵، ۲۲ و ۱۷ درصد بیشتر از وزن مخصوص در خاک های دست نخورده (شاهد) است.

واژه های کلیدی: اسکیدر چرخ لاستیکی، کوبیدگی خاک، به هم خوردگی، شیب و وزن مخصوص.

## مقدمه و هدف

خاک کارکردهای متفاوتی در اکوسیستم جنگل دارد: واسطه‌ای برای رشد درختان، منبعی برای جذب مواد غذایی و آب توسط ریشه‌ها و لایه‌ای برای انتقال آب در سطح زمین (Burger, 2004). خاک‌های جنگلی به دلیل داشتن مواد آلی زیاد، دارای وزن مخصوص کم، خلل و فرج زیاد، نفوذپذیری زیاد و مقاومت کم هستند. در نتیجه نسبت به کوبیدگی و تنش‌های برشی حساس‌اند (Froehlich et al., 1985; Froehlich & McNabb, 1984). آثار عملیات چوبکشی بر خاک‌های جنگلی را می‌توان به سه گروه اصلی تقسیم کرد: به هم خوردگی خاک، کوبیدگی خاک و گل شدن و ایجاد رد چرخ ماشین (Cullen, 1991; Rab et al., 2005).

وقتی که نیروی مکانیکی به خاک وارد می‌شود، ذرات و کلوخه‌ها به هم نزدیک‌تر شده و فضاهای خالی کاهش یافته و تراکم خاک (وزن واحد حجم خاک) افزایش می‌یابد (Dickerson, 1976). کوبیدگی خاک و افزایش وزن مخصوص منجر به تغییراتی در ساختمان و هیدرولوژی خاک می‌شود؛ کاهش کل خلل و فرج به ویژه منافذ بزرگ (Horn et al., 2005)، افزایش استحکام خاک (Horn et al., 1994)، کاهش نفوذ (Froehlich & McNabb, 1984)، کاهش مبادلات گازی و هوادیدگی خاک (Horn et al., 1994)، افزایش مقاومت به نفوذ (Ampoorter et al., 2007)، کاهش هدایت الکتریکی اشباع (Greacen & Sands, 1980; Gayoso & Iroume, 1991; Grace et al., 2006)، افزایش خلل و فرج ریز (Kolkaa & Smidt, 2004). مقدار و شدت بهم خوردگی خاک بسیار متفاوت است و بستگی به روش چوبکشی، نوع ماشین (Froehlich, 2006; Susnjar et al., 1984)، شیب و نوع خاک و اثرات فصلی (Froehlich, 1978) دارد. اثر بسیار مهم ناشی از کاهش نفوذپذیری خاک‌های به شدت کوبیده شده، روان‌آب است که باعث کاهش موازنه آب خاک شده و اغلب منجر به فرسایش خاک (Kozlowski, 1999)، کاهش مواد غذایی قابل دسترس، کاهش حاصلخیزی خاک (Adams & Froehlich, 1984) و کارکرد نامناسب فیزیولوژیکی در گیاهان می‌شود. این شرایط سبب تغییر آب در دسترس،

عناصر معدنی، هورمون‌های رشد و کربوهیدرات‌ها در توده‌های مریستمی شده و در نهایت منجر به کاهش رشد گیاهان می‌شود (Lewis, 1991; Kozlowski, 1999). در طول عملیات چوبکشی، مقدار کوبیدگی خاک بستگی به فاکتورهای مختلف دارد که شامل: خصوصیات توده و خاک (Adams & Froehlich, 1984)، بافت خاک (Froese, 2004; Rohand et al., 2004)، رطوبت خاک (Johnson & Han, 2007)، تعداد عبور ماشین (Susnjar et al., 2006; Ampoorter et al., 2007; Wang et al., 2007)، سیستم بهره‌برداری (Miller & Sirois, 1986)، نوع ماشین (Susnjar et al., 2006; Wang et al., 2007) شامل میزان وزن و بار ماشین (Rab, 1996; Susnjar et al., 2007; Horn et al., 2006)، نوع، تعداد چرخ و فشار باد لاستیک (Saarilahti, 2002; Eliasson, 2005)، مقدار مازاد مقطوعات (Ziesak, 2006) و مقدار مواد آلی (Murphy, 1994; McDonald & Seixas, 1997; Rohand et al., 2004; Jahnson & Han, 2007) است. تحقیق‌های مختلف گزارش شده به وسیله تعدادی از محققان نشان می‌دهد که یکی از عامل‌های بحرانی مؤثر بر مقدار کوبیدگی خاک، تعداد دفعات عبور ماشین از یک نقطه است. این بررسی‌ها نشان داد که بیشتر کوبیدگی خاک در طول ۱۰ بار عبور اولیه ماشین رخ می‌دهد و بیشترین مقدار آن در طول ۳ بار اول عبور است (Froehlich, 1978). عبورهای بعدی عموماً اثرات کمتری دارند (Ampoorter et al., 2007). وزن مخصوص خاک نیز بعد از ۳ بار عبور به طور معنی‌داری افزایش می‌یابد (Gayoso & Iroume, 1991). افزایش شدید وزن مخصوص برای اسکیدر چرخ لاستیکی همیشه بعد از یک بار عبور ماشین رخ می‌دهد (Eliasson & Wasterlund, 2007). به طور کلی، جابجایی لایه سطحی خاک آلی و خاک معدنی در اثر چرخش، کندن خاک به وسیله گرده‌بینه و تشکیل رد چرخ و گلی شدن خاک است. تشکیل رد چرخ و گلی شدن خاک وقتی اتفاق می‌افتد که خاک بسیار مرطوب است و فشار ماشین باعث شکستن و از بین رفتن ساختمان خاک می‌شود (McNabb et al., 2002; Nugent et al., 2003). در مورد اثرات شیب مسیره‌های (Susnjar et al., 2006).

لایه‌های سطحی خاک یافت می‌شود، جایی که به‌طور معمول بیشترین کوبیدگی در آن اتفاق می‌افتد (Adams & Froehlich, 1984). افزایش قابل توجه وزن مخصوص، بیشتر در ۲۰ سانتی‌متری لایه سطحی خاک مشاهده می‌شود، به این علت که فشار وارده به سطح خاک بیشترین مقدار بوده و با افزایش عمق، کاهش می‌یابد چون مجموع فشار بر سطح وسیع‌تری پراکنده می‌شود (Gent & Morris, 1986; Ampoorter et al., 2007). بنابراین افزایش وزن مخصوص معمولاً در لایه‌های بالایی خاک رخ می‌دهد. (Ares et al., 2005) و (Johnson & Han, 2007) بیان کردند که بیشتر کوبیدگی خاک محدود به مسیرهای چوبکشی و لایه بالایی خاک ( $< 30\text{ cm}$ ) است.

لطفعلیان (۱۳۷۵) با بررسی اثر چوبکشی اسکیدر چرخ‌لاستیکی تاف در فشردگی خاک، نتیجه گرفت که کوبیدگی خاک با تعداد تردد افزایش می‌یابد. در طول این بررسی، ۲۱ تردد انجام گرفت و حداکثر کوبیدگی خاک و رد چرخ در تردد بیست و یکم اتفاق افتاد. همچنین کوبیدگی خاک در شیب‌های مثبت (در جهت حمل بار) بیشتر از شیب‌های منفی، مشاهده شد. بهرام کلهری و همکاران (۱۳۸۶) با بررسی تأثیر مکانیزاسیون روی برخی خصوصیات فیزیکی خاک‌های جنگلی منطقه ناو اسالم نتیجه گرفتند که در مناطق تحت تردد اسکیدر، وزن مخصوص ظاهری خاک افزایش یافته است که مقدار این افزایش در قسمت وسط (محل کشیدن تنه‌ها) بیشتر از چرخ چپ و راست بوده و در چرخ چپ بیش از چرخ راست است. (Jamshidi et al., 2008) تغییرات وزن مخصوص را در لایه ۱۰ سانتی‌متری خاک در اثر چوبکشی با اسکیدر اندازه‌گیری کردند. آنها گزارش کردند که میانگین وزن مخصوص در مسیرهای چوبکشی به‌طور معنی‌داری بیشتر از وزن مخصوص در مناطق دست‌نخورده مجاور بود.

هدف کلی در این بررسی کسب اطلاعات در مورد وسعت و درجه اثرات چوبکشی با اسکیدر کابلی بر روی خاک جنگل است. اهداف ویژه عبارتند از: کمی کردن مقدار و سطح مسیرهای چوبکشی و نوارهای وینچ در منطقه مورد بهره‌برداری، اندازه‌گیری سطوح آستانه کوبیدگی خاک در

چوبکشی (شیب عرضی و شیب طولی) بر مقدار و گستردگی کوبیدگی و بهم خوردگی خاک، بررسی‌های زیادی انجام نشده است. (Krag et al., 1986) نشان دادند که در طول عملیات بهره‌برداری، شیب عرصه نسبت به فصل کار به مراتب تأثیر بیشتری بر مقدار بهم خوردگی دارد. در عرصه شیب‌دار، ماشین پی در پی بر روی خاک لغزش کرده و در یک جا ساکن می‌ماند که منجر به گلی شدن و کنده شدن لایه سطحی خاک می‌شود (Gayoso & Iroume, 1991). هرچند توپوگرافی عرصه بسیاری از خصوصیات خاک (مانند رطوبت خاک) را کنترل می‌کند، انتظار می‌رود که توپوگرافی بر مقدار حساسیت خاک به کوبیدگی تأثیرگذار باشد (Rab et al., 2005). (Sidle & Darlica, 1981) بیان کردند که لایه ۱۵ سانتی‌متری خاک در چوبکشی رو به بالا بیشتر از چوبکشی رو به پایین کوبیده شده است. این محققان یافتند که شیب اثر معنی‌داری بر وزن مخصوص ندارد، ولی شیب را عامل مهمی در تعیین پتانسیل کوبیدگی خاک دانستند. (Jamshidi et al., 2008) یافتند که تفاوت آشکاری در کوبیدگی خاک بین مسیرهای مسطح و مسیرهایی با شیب طولی و عرضی وجود ندارد. در مقابل (Gayoso & Iroume, 1991) یافتند که در مسیرهای با شیب ۲۰ درصد، افزایش وزن مخصوص در عبورهای مختلف ماشین و عمق خاک، به طور معنی‌داری از آنچه که در شیب ۱۰ درصد مشاهده شده است، بیشتر است.

لایه کوبیده‌شده اغلب در عمق‌های مختلف یافت می‌شود. هرچند، لایه‌های عمیق‌تر بعضی از خاک‌ها، بعد از تعداد بیشتر تردد ماشین کوبیده می‌شوند. مقادیر وزن مخصوص بیشتر بستگی به مواد آلی دارد. در افق‌های سطحی خاک، وزن مخصوص کم است و با افزایش عمق خاک مواد آلی به‌سرعت کاهش می‌یابد و وزن مخصوص در سطح خاک افزایش می‌یابد (Froehlich & McNabb, 1984). افزایش مواد آلی قابلیت کوبیدگی خاک را کاهش می‌دهد (Kozlowski, 1999). کوبیدگی معمولاً با افزایش عمق کاهش می‌یابد و عموماً در پایین‌تر از عمق ۴۵ سانتی‌متری ناچیز است. اما نکته قابل توجه این است که بیشتر ریشه‌های نازک جذب‌کننده آب و مواد غذایی درخت در

چوبکشی با توجه به تعداد عبور اسکیدر، شیب و جهت چوبکشی و عمق خاک است.

## مواد و روش‌ها

- منطقه مورد بررسی

این تحقیق در پارسل‌های ۲۲۰ و ۲۲۵ بخش نمخانه جنگل آموزشی و پژوهشی خیرود انجام شد. مساحت این دو پارسل برابر ۸۳ هکتار است (گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، ۱۳۷۴). ارتفاع از سطح دریا ۱۰۰۰ تا ۱۱۹۰ متر و مقدار بارندگی، ۱۵۳۲ میلی‌متر است (اعتماد، ۱۳۸۱). شیوه بهره‌برداری و جنگلشناسی در پارسل‌های مورد بررسی به‌صورت تک‌گزینی است. شیب کلی پارسل ۲۲۰ و ۲۲۵ به ترتیب ۴۵ و ۳۵ درصد است. عملیات جمع‌آوری اطلاعات این تحقیق در شهریور ۱۳۸۸ انجام گرفت. نکته قابل توجه در این بررسی این است که این تحقیق در پارسل‌هایی انجام شده است که در بالادست، سه شاخه جاده جدید در تکمیل شبکه جاده در بخش نمخانه در ۵ سال اخیر ساخته شده است. ساخت این جاده‌ها به‌منظور پوشش مناسب جاده‌ها برای بهره‌برداری در مناطق جدید بوده که نیاز به طراحی مسیرهای چوبکشی و دپوهای جدید را در پارسل‌های بالادست بخش نمخانه به‌ویژه پارسل‌های ۲۱۹، ۲۲۰، ۲۲۵، ۲۲۴ و ۲۲۶ به‌منظور تکمیل شبکه مسیرهای چوبکشی ارتباطی با جاده‌های قدیمی و جدید، الزامی می‌نماید. این تحقیق در چند مسیر جدید طراحی شده در پارسل‌های یادشده انجام شد که تاکنون هیچ‌گونه تردد ماشین‌های چوبکشی در این مسیرها صورت نگرفته است. سنگ مادری آهکی بوده و تشکیلات کارستی از جمله دولین به‌طور فراوانی در عرصه پارسل‌ها مشاهده می‌شود که این دولین‌ها علاوه بر شیب منطقه به‌عنوان یکی از عوامل محدودکننده عملیات چوبکشی هستند. خاک قهوه‌ای جنگلی با زهکشی مناسب و با بافت لومی رسی تا لومی است. بعضی از خصوصیات خاک منطقه مورد بررسی عبارتند از: ۶۵-۲۰ درصد رطوبت، ۱۱ درصد ماده آلی، pH ۵/۱ (آب)، نسبت C/N ۱۴/۷، WL ۷۳-۳۶ درصد، WP ۲۵-۱۵ درصد، Ip ۴۸-۲۲ و میانگین عمق خاک حدود ۱/۱ متر است.

- روش بررسی

نمونه‌برداری از خاک قبل و بعد از تردد و اندازه‌گیری‌های مربوط به کوبیدگی خاک در مسیرهای چوبکشی انجام شد. در چوبکشی به روش گرده‌بینه کوتاه، میانگین بار جابجا شده به ترتیب ۲/۸۳ مترمکعب در هر بار است. اسکیدر چرخ لاستیکی کابلی با وزن ۱۰/۳ تن و قدرت موتور ۱۷۷ اسب بخار است. اندازه چرخ ۳۲-۲۴/۵ بوده و عرض ماشین ۳/۱ متر است. در مجموع ۱۲ خط‌نمونه در شیب‌های مختلف عمود بر مسیرهای چوبکشی طراحی شده به‌منظور اندازه‌گیری وزن مخصوص، پیاده شدند (شکل ۱). لایه لاشبری قبل از اندازه‌گیری وزن مخصوص از لایه سطحی کنار زده شد، بنابراین اندازه‌گیری عمق از سطح خاک معدنی انجام شد. قبل از چوبکشی، ۴ طبقه شیب مسیر چوبکشی در ۳ تکرار انتخاب شد و سطوح متفاوت کوبیدگی با توجه به تعداد رفت و آمد اسکیدر در محل نمونه‌ها اعمال شد که عبارتند از ۰ (شاهد)، ۱، ۴، ۵، ۸، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ بار عبور. هر بار عبور عبارت است از یک چرخه کار اسکیدر یعنی حرکت خالی از دپو به محل بارگیری و حرکت با بار تا دپو. چهار طبقه شیب در نظر گرفته شده عبارتند از: مسیر مسطح، مسیر با شیب ۱۰ درصد (چوبکشی رو به بالا)، مسیر با شیب ۱۰- و ۲۰- درصد (چوبکشی رو به پایین). اندازه‌گیری وزن مخصوص در این حالت فقط برای لایه سطحی خاک یعنی ۱۰-۰ سانتی‌متر انجام شد. برای بررسی حداکثر عمقی که وزن مخصوص تحت تأثیر عملیات چوبکشی قرار می‌گیرد، بعد از اتمام عملیات چوبکشی (۳۰ بار تردد) وزن مخصوص در ناحیه شاهد و کوبیده شده در سه عمق ۱۰-۰، ۲۰-۱۰ و ۳۰-۲۰ سانتی‌متری اندازه‌گیری شد.

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 شدند. در مرحله بعد این نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شدند و در دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد به مدت ۲۵ ساعت در داخل اون خشک شدند و دوباره عمل توزین نمونه‌ها انجام شد تا وزن مخصوص ظاهری و درصد رطوبت آنها به‌دست آید. به‌منظور تعیین وسعت به‌هم‌خوردگی خاک پس از اتمام

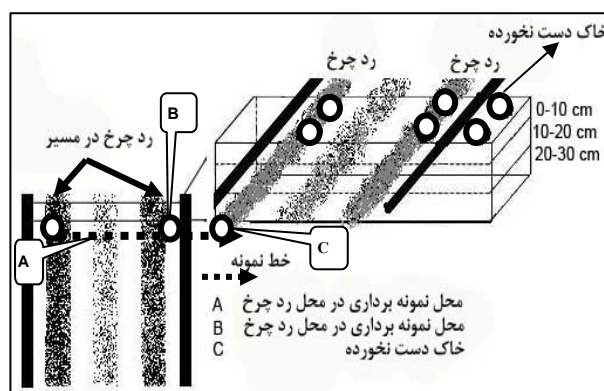
مسیرهای چوبکشی، ۰/۸ به‌وسیله دیو و ۰/۹ درصد به‌وسیله نوارهای وینچ پوشیده شده است. در مجموع ۷/۵ درصد از کل منطقه (۱۷ هکتار) در اثر عملیات چوبکشی دچار بهم‌خوردگی و درجاتی از کوبیدگی شدند. جدول ۱ تجزیه و تحلیل واریانس اثر دفعات عبور و شیب را بر روی وزن مخصوص نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که دفعات عبور ماشین و شیب و اثر متقابل آنها دارای اثر معنی‌داری بر وزن مخصوص خاک هستند ( $P < 0.05$ ).

جدول ۱- تجزیه و تحلیل واریانس اثر تعداد تردد و شیب بر

وزن مخصوص ظاهری					
P	F	میانگین	درجه	مجموع	منع
		مربعات	آزادی	مربعات	تغییرات
۰/۰۰	۸۲۹/۳۴	۰/۲۲۱	۸	۱/۷۷	تعداد تردد
۰/۰۰	۲۱۶/۳۶	۰/۰۵۸	۳	۰/۱۷	شیب
۰/۰۰	۹/۶۷	۰/۰۰۳	۲۴	۰/۰۶	شیب × تعداد تردد

آزمون t جفتی نشان داد که چوبکشی از نظر آماری اثر معنی‌داری روی وزن مخصوص خاک در مسیرها قبل و بعد از تردد اسکیدر دارد (شکل ۲ ب). همچنین نتایج نشان داد که در چهار طبقه شیب مسیر، وزن مخصوص ظاهری خاک با افزایش تردد افزایش یافته است. آزمون دانکن نشان داد که در مسیر مسطح، ۱۰، ۱۰- و ۲۰- درصد شیب، حداکثر وزن مخصوص ظاهری در تردهای ۱۵، ۵، ۸ و ۱۰ به‌دست آمد (شکل ۳) و بعد از آن وزن مخصوص افزایش معنی‌داری نداشته است (شکل ۳). چوبکشی در جهت رو به بالا (شیب ۱۰ درصد) بیشترین میزان کوبیدگی را نشان داد و بعد از آن مسیرهای با شیب ۱۰-، ۲۰- درصد و مسیر مسطح قرار دارند (شکل ۲ الف).

عملیات چوبکشی، عرض بهم‌خوردگی در فواصل ۲۵ متری مسیر چوبکشی اندازه‌گیری شد.

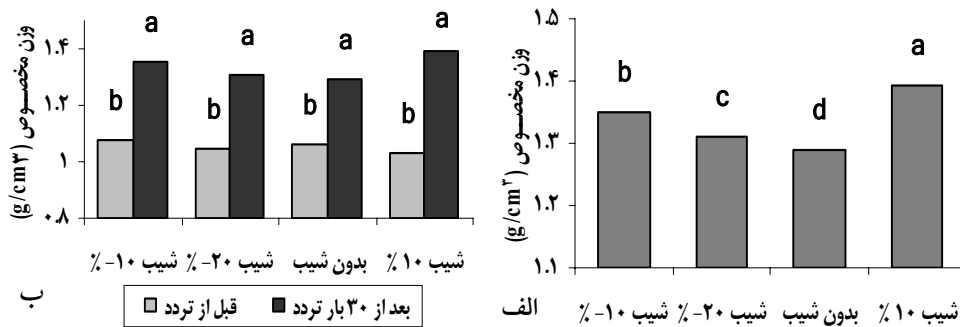


شکل ۱- طرح نمونه‌برداری برای اندازه‌گیری وزن مخصوص ظاهری در مسیرهای چوبکشی

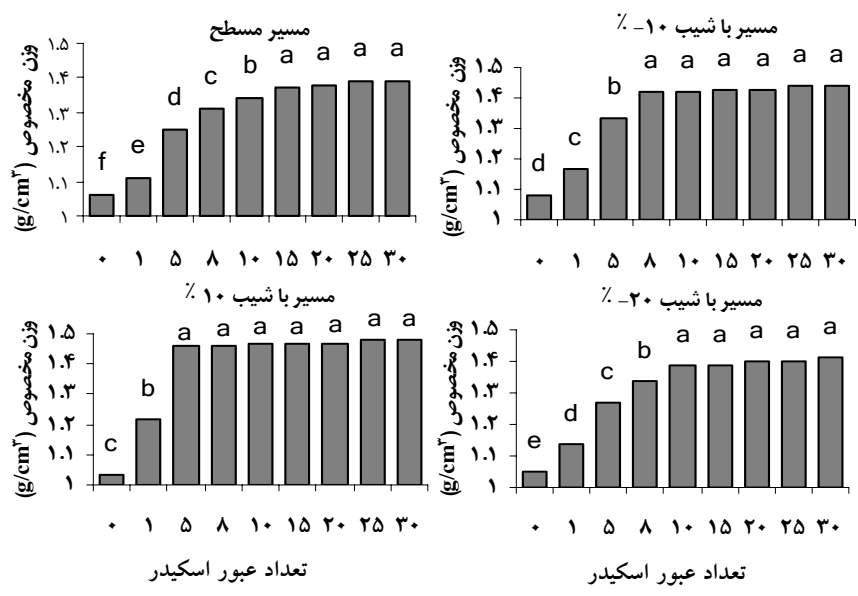
بهم‌خوردگی خاک مسیر چوبکشی به این صورت تعیین شد که لایه A خاک با لایه لاشبرگی مخلوط شده یا اینکه لایه لاشبرگی از بین رفته و با لایه B مخلوط شده است. مساحت دپوها نیز در هر پارسل اندازه‌گیری شد. با توجه به اندازه‌گیری مسیرهای وینچ گرده‌بینه از محل کشیدن تا کنار اسکیدر، بهم‌خوردگی‌های ایجادشده در نوارهای وینچ نیز محاسبه شد. این آزمایش‌ها در قالب طرح فاکتوریل کاملاً تصادفی اجرا شد تا به‌وسیله آن اثر دفعات مختلف تردد ماشین و شیب مسیر چوبکشی بر روی تغییرات وزن مخصوص ارزیابی و کمی شود. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها، ابتدا با آزمون کولموگراف-اسمیرنوف نرمال بودن داده‌ها بررسی شد. به‌منظور بررسی اثر تعداد دفعات تردد اسکیدر و شیب مسیرهای چوبکشی بر مقدار وزن مخصوص ظاهری خاک از تجزیه واریانس دو طرفه و برای تعیین حداکثر کوبیدگی خاک در هر یک از شیب‌ها از تجزیه واریانس یک‌طرفه استفاده شد. در صورتی که اثر هر یک از عوامل در تجزیه و تحلیل واریانس یک‌طرفه و دو طرفه معنی‌دار باشد از آزمون مقایسه‌ای چندگانه دانکن برای گروه‌بندی استفاده می‌شود.

## نتایج

اندازه‌گیری دقیق بهم‌خوردگی خاک منطقه بهره‌برداری شده نشان داد که ۵/۸ درصد از کل سطح منطقه به‌وسیله

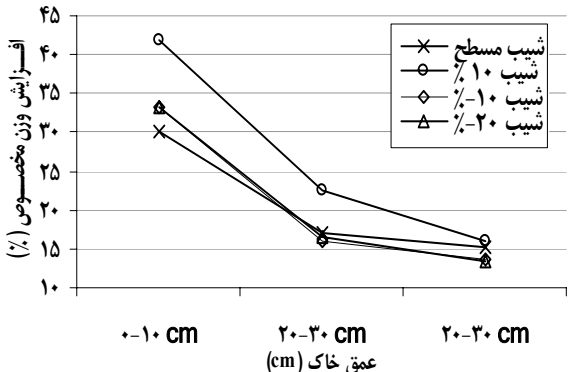


شکل ۲- مقایسه وزن مخصوص ظاهری با آزمون دانکن بعد از تردد (الف) و آزمون مقایسه میانگین وزن مخصوص قبل و بعد از تردد در چهار شیب (ب). حروف انگلیسی نامتشابه نشانگر معنی دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است.



شکل ۳- مقایسه میانگین افزایش وزن مخصوص در اثر تعداد ترددهای مختلف اسکیدر در چهار شیب حروف انگلیسی نامتشابه نشانگر معنی دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است.

سطحی تفاوت معنی داری ندارند (۳۳/۳ درصد). شکل ۴ نشان می‌دهد که بیشترین کوبیدگی در لایه سطحی خاک اتفاق می‌افتد و با افزایش عمق خاک از میزان وزن مخصوص خاک در اثر تردد اسکیدر کاسته می‌شود.



شکل ۴- تغییرات وزن مخصوص ظاهری در عمق‌های مختلف با توجه به شیب مسیر

تجزیه و تحلیل واریانس نشان می‌دهد که محل نمونه (شاهد یا کوبیده شده)، عمق، شیب مسیر و اثر متقابل شیب و محل نمونه و همچنین محل نمونه و عمق اثر معنی داری بر روی وزن مخصوص ظاهری خاک دارند (جدول ۲). در مسیر مسطح، وزن مخصوص در عمق ۰-۱۰ سانتی‌متر از ۱/۰۶ به ۱/۳۸ g/cm<sup>3</sup> رسیده است. به عبارت دیگر مقدار افزایش وزن مخصوص ۳۰/۲ درصد است که این افزایش در عمق ۰-۲۰، ۱۷، ۲۰-۳۰، ۱۵/۳ درصد است. در چوبکشی رو به بالا (شیب ۱۰ درصد) وزن مخصوص در لایه سطحی (۰-۱۰ سانتی‌متر) بیشترین مقدار افزایش را داشته (۴۱/۸ درصد) و از ۱/۰۳ به ۱/۴۶ g/cm<sup>3</sup> افزایش یافته است. در چوبکشی رو به پایین با شیب‌های ۱۰ و ۲۰ درصد، افزایش وزن مخصوص در لایه

Jamshidi et al., 2008). نتایج نشان می‌دهد که وزن مخصوص ظاهری خاک بعد از عملیات چوبکشی با اسکیدر به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است. از آنجا که نیروی وارده به خاک سبب تغییر مکان ذرات خاک شده و اثرات کوبیدگی و تنش‌های برشی به دنبال آن ایجاد می‌شود، سبب نزدیک شدن و بهم پیوستن ذرات خاک و به دنبال آن، افزایش وزن مخصوص می‌شود. این یافته با نتایج تحقیقات سایر محققان همخوانی دارد (Sidle & Darlica, 1981; Horn et al., 2007; Jamshidi et al., 2008). همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد با افزایش تعداد تردد اسکیدر، وزن مخصوص در چهار طبقه شیب در ۱۵ تردد اولیه به‌طور معنی‌داری افزایش داشته و در تردهای اضافی، افزایش وزن مخصوص معنی‌دار نیست. نکته مهم این است که در چوبکشی رو به بالا، آستانه کوبیدگی در تردهای کمتر و در اندازه بیشتری رخ می‌دهد. روند یادشده، با نتایج محققان دیگر مطابقت دارد (Gayoso & Ampoorter et al., 2007; Iroume, 1991; Wang et al., 2007). درباره علت این رخداد بیان می‌دارند که وقتی که کوبیدگی اولیه ایجاد شد، افزایش بیشتر کوبیدگی به‌وسیله لایه مقاوم ایجادشده، کنترل و به‌طور قابل ملاحظه‌ای کمتر می‌شود. در واقع ظرفیت تحمل بار (حداکثر بار بدون از بین رفتن ساختمان خاک) همزمان با افزایش وزن مخصوص بیشتر می‌شود و به این ترتیب لایه‌های سطحی خاک، از لایه‌های زیرین در مقابل افزایش وزن مخصوص محافظت می‌کند. (Horn et al., 2007). به از بین رفتن ساختار طبیعی خاک و تغییر آن به سمت ساختار پهن صفحه‌ای اشاره دارند. (Jamshidi et al., 2008). بیان داشتند که ثابت ماندن مقدار کوبیدگی خاک پس از تردهای اولیه به این نسبت داده می‌شود که هوا در خاک به دام افتاده و در طول عملیات چوبکشی قادر به خارج شدن از آن نیست. نتایج نشان داد که مسیر مسطح کمترین میزان کوبیدگی را داشته و مسیر با شیب ۱۰ درصد (چوبکشی رو به بالا) بیشترین مقدار وزن مخصوص را دارد. این نتایج به این صورت می‌تواند قابل شرح باشد که توزیع نامتوازن وزن اسکیدر بر روی محور عقب و جلو و همچنین غلتیدن

جدول ۲- آنالیز واریانس اثر محل نمونه، عمق خاک و شیب بر

وزن مخصوص ظاهری					
منبع تغییرات	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	F	P
شیب	۰/۰۱۲	۳	۰/۰۰۴	۳/۷۸	۰/۰۲
محل نمونه	۱/۶۱۱	۱	۱/۶۱۱	۱۵۲۸	۰/۰۰
عمق	۱/۰۳۵	۲	۰/۵۱۸	۴۹۱	۰/۰۰
شیب × محل نمونه	۰/۰۲۱	۳	۰/۰۰۷	۶/۵۹	۰/۰۰
شیب × عمق	۰/۰۰۳	۶	۰/۰۰۱	۰/۴۸	۰/۸۲
محل نمونه × عمق	۰/۰۴۶	۲	۰/۰۲۳	۲۱/۷	۰/۰۰
شیب × محل نمونه × عمق	۰/۰۰۱	۶	۰/۰۰	۰/۲۱	۰/۹۷

## بحث

روش نمونه‌برداری مورد استفاده برای اندازه‌گیری وسعت بهم‌خوردگی خاک در عرصه بهره‌برداری نشان داد که این روش به آسانی قابل انجام است و در عرصه‌هایی که پراکنش مسیرهای چوبکشی، دیوها و مالروها دارای الگوی یکنواختی نیست، بکارگیری این روش به آسانی و با هزینه کم امکان‌پذیر است. روش گرده‌بینی کوتاه بیشترین میزان بهم‌خوردگی عرصه را دارد، زیرا مسیرهای چوبکشی و فواصل وینچ در این روش بیشتر شده و همچنین تعداد تردد ماشین به مراتب بیشتر از روش گرده‌بینی بلند است. همچنین بستن چند بینه با هم باعث می‌شود که سر قطورتر بینه‌ها به خوبی در مالبندها قرار نگرفته و عرصه زیادی دچار بهم‌خوردگی شود. در مقایسه با پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه (Frohlich, 1978; Rab et al., 2005; Susnjar et al., 2006) بررسی به مقدار قابل توجهی کمتر است (کمتر از ۸ درصد). (Frohlich et al., 1985) گزارش کردند که در چوبکشی با اسکیدر، ۵۰ درصد از عرصه درجاتی از بهم‌خوردگی را نشان دادند. دلیل مهم برای کاهش قابل توجه بهم‌خوردگی عرصه، طراحی مسیرهای چوبکشی قبل از عملیات چوبکشی است که محققان زیادی به آن اشاره داشتند (Frohlich et al., 1985; Horn et al., 2007; )

چوبکشی، با افزایش عمق خاک افزایش می‌یابد که منطبق با یافته‌های قبلی است (Greacen & Sands, 1980; Adams & Froehlich, 1984; Froese, 2004). بعد از ۳۰ بار تردد ماشین در مسیرهای با شیب ۱۰ درصد، وزن مخصوص در تمام عمق‌ها در مقایسه با سایر طبقه‌های شیب به‌طور معنی‌داری بیشتر است. عموماً، بیشترین کوبیدگی در لایه سطحی خاک (۱۰-۰ سانتی‌متر) اتفاق می‌افتد (Horn *et al.*, 2007) که نتایج تحقیق حاضر این مطلب را تأیید می‌کند. (Vossbrink & Horn (2004) گزارش کردند که اندازه‌گیری‌های فشار وارده به خاک نشان داد که بیشترین مقدار آن در اثر استفاده از ماشین‌آلات سنگین در عمق ۴۰ سانتی‌متری سطح خاک رخ می‌دهد. در این تحقیق، نه تنها کوبیدگی خاک در تمام عمق‌ها مشاهده شد، بلکه افزایش وزن مخصوص نیز رخ داد که منطبق بر نتایج تحقیقات گذشته است (Gomez *et al.*, 2002; Ares *et al.*, 2005; Johnson & Han, 2007). Ampoorter *et al.* (2007) بیان کردند که افزایش قابل توجه وزن مخصوص به‌طور خاص در ۲۰ سانتی‌متری بالایی خاک اتفاق می‌افتد زیرا فشار وارده به لایه سطحی در بیشترین حد خود بوده و با افزایش عمق کاهش می‌یابد، به‌دلیل اینکه مجموع فشار وارده در سطح وسیع‌تری پراکنده می‌شود. بنابراین عموماً افزایش وزن مخصوص به‌طور ویژه در لایه‌های سطحی خاک رخ می‌دهد. (Greacen & Sands, 1980; Rohand *et al.*, 2004). تحلیل نتایج همچنین نشان می‌دهد که با افزایش عمق خاک، تفاوت وزن مخصوص خاک دست‌نخورده (شاهد) و تیمارهای کوبیده‌شده در ۴ شیب مسیر چوبکشی کمتر می‌شود. بیشترین مقدار آن مربوط به چوبکشی رو به بالاست، در شیب‌های رو به پایین تفاوت بین وزن مخصوص در دو عمق ۲۰-۱۰ و ۳۰-۲۰ سانتی‌متری معنی‌دار نیست که این حالت مربوط به توزیع همگن وزن اسکیدر و گرده‌بینه در مسیرهای مسطح است. از آنجایی که بیشتر ریشه‌های نازک جذب‌کننده آب و مواد غذایی در لایه‌های سطحی خاک قرار دارند و این کوبیدگی در این لایه‌ها رخ می‌دهد (Adams & Froehlich, 1984)، لذا جذب عناصر غذایی مهم به‌ویژه نیتروژن، فسفر و پتاسیم را

اسکیدر در مسیرهای با شیب عرضی و طولی سبب می‌شود که حداکثر بار دینامیکی به سطح زمین وارد شود (Jamshidi *et al.*, 2008). دلیل دیگر در رابطه با کمتر بودن وزن مخصوص در مسیرهای چوبکشی رو به پایین، ممکن است کشیدن گرده‌بینه در نزدیکی سطح زمین باشد، گرده‌بینه‌ها در این حالت ممکن است لایه سطحی را شخم زده و سست نمایند. همچنین در شیب‌های مسطح این خطا وجود دارد که راننده مسیرهای مختلفی را در روی مسیر چوبکشی انتخاب کند و در نتیجه نتوان تعداد عبور ثابتی را بر روی یک نقطه مشخص رصد نمود. (Gayoso & Iroume (1991) بیان داشتند که این حالت ممکن است به دلیل مشکلات کار اسکیدر در مسیرهای شیب‌دار باشد. در چنین شرایطی، اسکیدر مکرراً در یک نقطه ثابت سر خورده و باعث گلی شدن و بهم‌خوردن خاک می‌شود. نیروی وارده ناشی از ویراسیون و تنش‌های برشی لاستیک به لایه سطحی خاک، سبب ظاهر شدن خاک معدنی زیرین می‌شود که وزن مخصوص بیشتری از لایه سطحی خاک دارد و به همین دلیل چوبکشی رو به بالا در مسیرها، سبب بهم‌خوردگی و کوبیدگی خاک در ترده‌های اولیه می‌شود. هرچند وزن مخصوص در چنین شرایطی بالاترین مقدار را نسبت به مسیرهای مسطح و با شیب منفی دارد. (Gayoso & Iroume (1991) و Jamshidi *et al.* (2008) به نتایج مشابه دست یافتند.

نتایج مربوط به تغییرات وزن مخصوص با توجه به عمق پروفیل خاک نشان داد که وزن مخصوص ظاهری خاک به‌طور معنی‌داری با افزایش عمق خاک در تمام طبقه‌های شیب افزایش یافته است. به‌عبارت دیگر، مقادیر طبیعی وزن مخصوص ظاهری به مقدار زیادی وابسته به کمیت مواد آلی است و با افزایش عمق خاک، مواد آلی به‌سرعت کاهش می‌یابد و در نتیجه وزن مخصوص در لایه زیرین خاک افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، در لایه‌های سطحی خاک، فعالیت‌های بیولوژیکی (ریشه‌ها و حیوانات) می‌تواند سبب کاهش مقاومت و وزن مخصوص ظاهری خاک شود، در حالیکه در عمق‌های پایین‌تر، بافت و ساختمان خاک ممکن است سبب افزایش مقاومت و وزن مخصوص ظاهری شود. وزن مخصوص ظاهری خاک قبل از عملیات



خیرود نوشهر، دانشکده منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران، ص ۳۲۰.

لطفعلیان، مجید، ۱۳۷۵. اثر چوبکشی تاف در فشردگی خاک، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی نور، دانشگاه تربیت مدرس، ص ۱۱۴.

Adams P.W. & H.A. Froehlich, 1984. Compaction of forest soils, USDA Pacific Northwest Extension Publication. PNW 217.13 p.

Ampoorter, E., R. Goris, W.M. Cornelis & K. Verheyen, 2007. Impact of mechanized logging on compaction status of sandy forest soils, *Forest Ecology and Management*, 241: 162-174.

Ares, A., T.A. Terry, R.E. Miller, H.W. Anderson & B.L. Flaming, 2005. Ground-Based Forest Harvesting Effects on Soil Physical Properties and Douglas-Fir Growth, *Soil Science Society of America Journal*, 69: 1822-1832.

Burger, J.A., 2004. Soil and its Relationship to Forest Productivity and Health, In: *Encyclopedia of forest sciences*, eds. Burley, J., Evans, J., Youngquist, J.A., Oxford, UK: Elsevier, p: 1189-1195.

Cullen, S.J., 1991. Timber Harvest Trafficking and Soil Compaction in Western Montana, *Soil Science Society of America Journal*, 55: 1416-1421.

Dickerson, BP., 1976. Soil compaction after tree-length skidding in Northern Mississippi, *Soil Science Society of America Journal*, 40: 965-6.

Eliasson L. & L. Wasterlund, 2007. Effects of slash reinforcement of strip roads on rutting and soil compaction on a moist fine-grained soil, *Forest Ecology and Management*, 252: 118-123.

Eliasson, L., 2005. Effects of forwarder tyre pressure on rut formation and soil compaction, *Silva Fennica*, 39(4): 549-557.

Froehlich, H.A., 1978. Soil compaction from low ground-pressure, torsion-suspension logging vehicles on three forest soils, Res. Paper 36, Oregon State University, Forest Research Lab. 12 pp.

Froehlich, H.A. & D.H. McNabb, 1984. Minimizing soil compaction in Pacific Northwest forests, In: Proc. of the *Forest Soils and Treatment Impacts Conference*, 1983. E.L. Stone, Ed. Univ. of Tennessee, Knoxville, TN. P: 159-192.

Froehlich, H.A., D.W.R. Miles & R.W. Robbins, 1985. Soil bulk density recovery on compacted skid trails in central Idaho, *Soil Science Society of America Journal*, 49: 1015-1017.

Froese, K., 2004. Bulk density, soil strength, and soil disturbance impacts from a cut-to-length

به‌وسیله ریشه‌ها کاهش می‌دهد (Kozlowski, 1999). Greacen & Sands (1980) نیز بیان کردند که بیشتر کوبیدگی خاک در عمق ۲۰ سانتی‌متر بالای خاک رخ می‌دهد. (Ampoorter et al. (2007) در بیان علت این رخداد شرح دادند که کوبیدگی لایه‌های سطحی، مقاومت خاک را افزایش می‌دهد، بنابراین این لایه مقاوم به‌عنوان عاملی در برابر افزایش وزن مخصوص عمل می‌کند. با توجه به حساسیت خاک‌های جنگلی به کوبیدگی خاک، در نهایت براساس یافته‌های این تحقیق نتیجه‌گیری می‌شود که بیشترین مقدار کوبیدگی خاک در تردهای ابتدایی ماشین رخ می‌دهد و کاهش تردها بر روی یک مسیر چوبکشی، تأثیر چندانی بر کاهش وزن مخصوص خاک ندارد و حتی یک بار عبور ماشین برای افزایش وزن مخصوص خاک کافی است. از سوی دیگر شیب مسیرهای چوبکشی و رطوبت خاک مسیر نیز به‌طور معنی‌داری بر کوبیدگی خاک تأثیرگذارند. بنابراین شیب مسیرهای چوبکشی باید تا حد امکان کمتر در نظر گرفته شود. به‌علاوه یک راهکار مهم این است که عبور ماشین در مواقعی که خاک جنگل مرطوب است و رطوبت خاک به حد روانی نزدیک است، صورت نگیرد. طراحی مسیرهای چوبکشی و همچنین محدود کردن ماشین به تردد در این مسیرها، راهکار دیگری در کاهش بهم‌خوردگی و کوبیدگی خاک است.

## منابع

اعتماد، وحید، ۱۳۸۱. بررسی کمی و کیفی بذر درخت راش در جنگل‌های استان مازندران، رساله دکتری جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ص ۲۵۸.

بهرام کلهری، سمیرا، مهدی عاکف، فرهاد خرمالی و ایرج باقری، ۱۳۸۶. بررسی تأثیر مکانیزاسیون (ماشین‌های جنگل) روی برخی خصوصیات فیزیکی و میکرومورفولوژیکی خاک‌های جنگلی، مجموعه مقالات دهمین کنگره علوم خاک ایران، کرج، ۱۹۴-۱۹۵.

گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، ۱۳۷۴. طرح جنگلداری اولین تجدیدنظر بخش نم‌خانه جنگل آموزشی و پژوهشی

- harvest operation in north central Idaho, Unpublished: Moscow, ID: University of Idaho, M.S. Thesis. 72 p.
- Gayoso, J. & A. Iroume, 1991. Compaction and soil disturbances from logging in Southern Chile, *Annual Science Forest*, 48: 63-71.
- Gent, J.A. & L.A. Morris, 1986. Soil Compaction from Harvesting and Site Preparation in the Upper Gulf Coastal Plain, *Soil Science Society of America Journal*, 50: 443-446.
- Gomez, A., R.F. Powers, M.J. Singer & W.R. Horwath, 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.
- Grace, J.M., R.W. Skaggs & D.K. Cassel, 2006. Soil Physical Changes Associated with Forest Harvesting Operations on an Organic Soil. *Soil Science Society of America Journal*, 70:503-509.
- Greacen, E.L. & R. Sands, 1980. Compaction of Forest Soil; A Review, *Australian Journal of Soil Research*, 18: 163-189.
- Han, Sang-Kyun, 2006. Impacts on soils from cut-to-length and whole tree harvesting, Moscow, ID: University of Idaho, M.Sc. Thesis. 43 pp.
- Horn, R., H. Taubner, M. Wuttke & T. Baumgartl, 1994. Soil physical properties related to soil structure, *Soil and Tillage Research*, 30: 187-216.
- Horn, R., J. Vossbrink, S. Peth & S. Becker, 2007. Impact of modern forest vehicles on soil physical properties, *Forest Ecology and Management*, 248: 56-63.
- Jamshidi, R., D. Jaeger, N. Raafatnia & M. Tabari, 2008. Influence of Two Ground-Based Skidding Systems on Soil Compaction under Different Slope and Gradient Conditions, *Journal of forest engineering*, 19(1): 9-16.
- Johnson L.R., D. Page-Dumroese & H.S. Han, 2007. Effects of Machine Traffic on the Physical Properties of Ash-Cap Soils. Eds; Page-Dumroese, D.; Miller, R.; Mital, J.; McDaniel, P.; Miller, D, 2007. *Volcanic-Ash-Derived Forest Soils of the Inland Northwest: Properties and Implications for Management and Restoration*, 2005; Coeur d'Alene, ID. Proceedings RMRS-P-44; Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Kolkaa, R.K. & M.F. Smidt, 2004. Effects of forest road amelioration techniques on soil bulk density, surface runoff, sediment transport, soil moisture and seedling growth, *Forest Ecology and Management*, 202: 313-323.
- Kozlowski, T.T., 1999, Soil Compaction and Growth of Woody Plants, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 14 (6): 596-619.
- Krag, R., K. Higgingsbotham & R. Rothwell, 1986. Logging and soil disturbance in southeast British Columbia, *Canadian Journal of Forest Research*, 16: 1345-1354.
- Lewis, T., 1991. Developing Timber Harvesting Prescriptions to Minimize Site Degradation, British Columbia. Ministry of Forests. *Crown Publications Inc.*, ISBN 0-7718-9073-7. 64 p.
- McDonald, T. & F. Seixas, 1997. Soil compaction effects of forwarding and its relationship with 6- and 8-wheel drive machines, *Forest Products Journal*, 47: 46-52.
- McNabb, D.H., A.D. Startsev & H. Nguyen, 2001. Soil Wetness and Traffic Level Effects on Bulk Density and Air-Filled Porosity of Compacted Boreal Forest Soils, *Soil Science Society of America Journal*, 65: 1238-1247.
- Miller, J.H. & D.L. Sirois, 1986. Soil Disturbance by Skyline Yarding vs. Skidding in a Loamy Hill Forest, *Soil Science Society of America Journal*, 50: 1579-1583.
- Nugent, C., C. Kanali, P.M.O. Owende, M. Nieuwenhuis & S. Ward, 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.
- Rab, M.A., F.J. Bradshaw, R.G. Campbell & S. Murphy, 2005. Review of factors affecting disturbance, compaction and trafficability of soils with particular reference to timber harvesting in the forests of south-west Western Australia, Consultants Report to Department of Conservation and Land Management, Western Australia, Sustainable Forest Management Series, SFM Technical Report No. 2, 146 p.
- Rab, M.A., 1996. Soil physical and hydrological properties following logging and slash burning in the Eucalyptus regnans forest of southeastern Australia, *Forest Ecology and Management*, 84: 159-176.
- Rohand, K., A.A. Kalb, J. Herbauts & J.C. Verbrugge, 2004. Changes in some mechanical properties of a loamy soil under the influence of mechanized forest exploitation in a beech forest of central Belgium, *Journal of Terramechanics*, 40: 235-253.
- Saarilahti, M., 2002. Modeling of the wheel and tire. 1. Tire and soil contact. Development of a protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites (ECOWOOD), Project report, Helsinki, 38 p.

Sidle R.C. & D.M. Drlica, 1981. Soil Compaction from Logging with a Low-Ground Pressure Skidder in the Oregon Coast Ranges, *Soil Science Society of America Journal*, 45: 1219-1224.

Susnjar, M., D. Horvat & J. Seselj, 2006. Soil compaction in timber skidding in winter conditions, *Croatian Journal of Forest Engineering*, 27 (1): 3-15.

Vossbrink, J., & R. Horn, 2004. Modern forestry vehicles and their impact on soil physical properties. *European Journal of Forest Research*, 123: 259-267.

Wang, J., C.B. LeDoux & P. Edwards, 2007. Changes in Soil Bulk Density Resulting from Construction and Conventional Cable Skidding Using Preplanned Skid Trails, *Northern Journal of Applied Forestry*, 24 (1): 5-8.

Wronski, E.B., & G. Murphy, 1994. Responses of forest crops to soil compaction. In: Soane, B.D., van Ouwerkerk, C. (Eds.), *Soil Compaction in Crop Production*. Elsevier, Amsterdam, p: 317-342.

Ziesak, M., 2006. Avoiding soil damages, caused by forest machines, paper presented in: IUFRO Precision Forestry Conference, *Precision Forestry in plantations, semi-natural and natural forests*. 5 - 10 March 2006 - Stellenbosch University. 9 p.

## Soil compaction and disturbance from logging with a wheeled skidder (Case study: in Kheyroud Forest)

M. Jourgholami<sup>\*1</sup> and B. Majnounian<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Assistant Prof., Faculty of Natural Resources, University of Tehran, I.R.Iran

<sup>2</sup>Prof., Faculty of Natural Resources, University of Tehran, I.R.Iran

(Received: 9 December 2009, Accepted: 9 August 2010)

### Abstract

The use of wheeled skidders is well accepted practice for the extraction of timber from the forest, but this has tended to cause the greatest environmental problems. The aim of the study was to evaluate if slope gradient, number of machine passes, soil depth, and soil moisture of skid trails influence soil compaction on a fine-grained soil, and to quantify these effects. The study was designed as a factorial experiment and the effects of 0, 10, -10 and -20% slope, 5, 15 and 25 cm depth, 20-30, 30-40 and 40-50 % soil moisture and different levels of compaction were applied by varying the number of skidding cycles: 1, 5, 8, 10, 15, 20, 25, 30 passes. A Timberjack cable skidder was used and the study location was the Kheyroud Forest. An increased number of machine passages increased soil bulk density, but most of the compaction occurred after the initial few passes. Uphill skidding increases compaction more than downhill skidding. Increases in bulk density were still important at the maximum sampling depth of 30 cm. Soil bulk densities at 5, 15, and 25 cm depths on average 35, 22, and 17% are higher than densities in undisturbed soils.

**Key words:** Wheeled skidder, Soil compaction, Disturbance, Slope, Bulk density.