

ارزیابی اثرات عملیات خروج چوب با تراکتور کشاورزی بر خصوصیات فیزیکی خاک جنگل (مطالعه موردی: بخش گرازبن جنگل خیرود)

مقداد جورغلامی^۱، شکوه سلطانیپور^۲، مریم اتحادی ابری^۳ و باریس مجنونیان^۴

*- نویسنده مسئول، استادیار، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج. پست الکترونیک: mjgholami@ut.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

۳- دانشجوی دکتری، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

۴- استاد، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

تاریخ پذیرش: ۹۲/۳/۲۲

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۲/۲۶

چکیده

سیستم‌های بهره‌برداری با تراکتور، معمولی‌ترین انواع تجهیزات کوچک مقیاس هستند. در جنگل‌های شمال ایران، تراکتورهای کشاورزی مجهز شده به تریلی دو چرخ، به طور فراوانی برای عملیات پیش حمل چوب‌آلات کاتینی و هیزمی استفاده می‌شود. این مطالعه در بخش گرازبن جنگل خیرود انجام شد. اهداف این تحقیق شامل ارزیابی اثرات شیب، شدت تردد تراکتور و عمق خاک بر روی وزن مخصوص ظاهری خاک، تخلخل خاک و مقاومت به نفوذ در خاک قهوه‌ای جنگلی دارای بافت لومی تا لوم رسی در مسیرهای حمل چوب با تراکتور بود. این پژوهش در قالب طرح فاکتوریل کامل تصادفی در سه تکرار در سه کلاسه شیب (شیب ۱۰-۰ درصد (رو به پایین)، شیب ۱۰-۲۰ درصد (رو به پایین) و شیب ۰-۱۰ درصد (رو به بالا))، سه شدت ترافیک (کمتر از ۵ تردد، ۵-۱۰ تردد و بیش از ۱۰ تردد) و چهار عمق خاک از سطح زمین (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متری) در مسیرهای حمل و نقاط دست‌نخورده اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که شیب، شدت تردد تراکتور و عمق خاک دارای اثر معنی‌داری بر وزن مخصوص ظاهری خاک هستند. مسیرهای حمل رو به بالا دارای بیشترین مقدار وزن مخصوص در بین کلاسه‌های شیب هستند. تخلخل خاک با افزایش تعداد تردد به طور معنی‌داری کاهش یافت. بیشترین کاهش تخلخل خاک بعد از ۱۰ تردد رخ داده است که مقدار آن ۳۸/۶ درصد است. همچنین مسیرهای حمل رو به بالا دارای بیشترین مقدار مقاومت به نفوذ در بین کلاسه‌های شیب بودند. با افزایش عمق خاک، مقدار مقاومت به نفوذ در مسیرهای حمل افزایش یافت. مسیرهای با شیب ۰-۱۰ درصد (رو به پایین) کمترین مقدار وزن مخصوص و مقاومت به نفوذ را نشان دادند، درحالی‌که مسیرهای با شیب ۱۰-۲۰ درصد (رو به پایین) دارای مقادیر متوسط و مسیرهای ۰-۱۰ درصد (رو به بالا) دارای بیشترین مقدار کوبیدگی خاک بودند. بنابراین، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که عملیات پیش حمل با تراکتور باید در مسیرهای با شیب ملایم برنامه‌ریزی شده و تا حد امکان مسیرهای پیش حمل با شیب رو به بالا از عملیات چوبکشی مستثنی شوند.

واژه‌های کلیدی: عملیات پیش حمل، کوبیدگی خاک، تخلخل خاک، مقاومت به نفوذ، شیب، عمق خاک.

مقدمه

برای خروج چوب از کنار کنده تا دپو مورد استفاده قرار می‌گیرند (Russell & Mortimer, 2005). راه‌های متفاوتی برای انجام عملیات خروج چوب با تراکتور کشاورزی وجود دارد. یک روش معمول، استفاده از تریلی یا لودر (تریلی پیش حمل (Forwarding trailer)) است.

در بسیاری از کشورهای دنیا، تراکتورهای کشاورزی ماشین‌های چند کاره‌ای هستند که عموماً در کارهای کشاورزی و جنگلداری از آنها استفاده می‌شود. در بخش جنگلداری، تراکتورهای کشاورزی تغییر شکل یافته و

با پنج تردد، در مطالعه (Raafatnia *et al.*, 2008) و (Jamshidi *et al.*, 2008) در حوزه آبخیز تجن مازندران برابر با شش تردد، در مطالعه (Najafi *et al.*, 2009) در جنگل‌های چوب و کاغذ مازندران سه تا هفت تردد، در مطالعه (Naghdi *et al.*, 2007) در جنگل‌های سفارود گیلان برابر با شش تردد ذکر شده است.

البته لایه‌های کوبیده شده اغلب در عمق‌های متفاوت خاک وجود دارند. کوبیدگی ممکن است ناچیز، متوسط و عمیق باشد (Wronski & Adams & Froehlich, 1984; Rab, 1996; Murphy, 1994; Rohand *et al.*, 2004; Eliasson, 2005; Susnjar *et al.*, 2006; Wasterlund, 2007). برای مدت‌ها کوبیدگی خاک بیشتر در لایه‌های سطحی مورد توجه بود. اما وقتی وسایل بهره‌برداری سنگین و با ظرفیت بار زیاد تولید شد، کوبیدگی لایه‌های زیرین خاک حائز اهمیت شد (Akay *et al.*, 2007 و Bustos & Egan 2011). در ترافیک سنگین بار، بعضی از خاک‌ها تا عمق یک 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 شامل می‌شود (Gent & Morris, 1986; Eliasson & Wasterlund, 2007; Kozlowski, 1999). همچنین (Gayoso & Iroume, 1991) دریافتند که افزایش وزن مخصوص ظاهری خاک برای تمام شدت‌های تردد ماشین و عمق‌های مختلف خاک در مسیرهای با شیب ۲۰ درصد، به طور معنی‌داری بیشتر از مقادیر مشاهده شده برای مسیرهایی با شیب ۱۰ درصد است. به علاوه، (Jamshidi *et al.*, 2008) دریافتند که تفاوت آشکاری در کوبیدگی خاک بین مسیرهای مسطح و مسیرهایی با شیب طولی و عرضی وجود ندارد. در جنگل‌های ملی ایالات متحده، محدودیت‌هایی به منظور برقراری مقدار قابل قبول بهم‌خوردگی خاک در اثر ورود ماشین‌های بهره‌برداری وضع شده است (Anonymous, 1998). این محدودیت، افزایش ۲۰ درصدی وزن مخصوص ظاهری را به‌عنوان سطح خسارت‌آور خاک در نظر می‌گیرد. سایر محققان، افزایش مقاومت به نفوذ خاک را به‌عنوان شاخصی برای بهم-

فشردگی خاک، اغلب همراه با ایجاد رد چرخ، یک فرایند معمول است که ممکن است از نیروهای استاتیک و دینامیک اعمال شده توسط ترافیک ماشین، به خصوص با استفاده نامناسب از ماشین‌آلات سنگین ایجاد شود (Ampoorter *et al.*, 2010). فشردگی یا کوبیدگی خاک به روندی که در آن خلل و فرج خاک فشرده شده و یا از بین رفته و دانه‌های متراکم سطح شکسته شده است، اشاره می‌کند (Murphy *et al.*, 2004; Landsberg *et al.*, 2003). فشرده‌سازی منافذ خاک منتج به افزایش وزن مخصوص ظاهری (Bulk Density) شده که همان نسبت جرم خشک خاک به حجم آن است (Han *et al.*, 2006; Grace *et al.*, 2006; Eliasson, 2005). مقاومت به نفوذ (Penetration Resistance) که به‌عنوان یک شاخص برای استحکام خاک عمل می‌کند، مقاومتی را نشان می‌دهد که خاک در برابر رشد ریشه اعمال می‌کند و منافذ کوچکتر را افزایش داده و تخلخل خاک (Soil Porosity) را کاهش می‌دهد همچنین (Gayoso & Iroume, 1991; Gomez *et al.*, 2002; Nugent *et al.*, 2004; Horn *et al.*, 2005; Ares *et al.*, 2005). به علاوه، (Nugent *et al.*, 2003) دریافتند که در اثر ترافیک ماشین، مقاومت به نفوذ ۳۰ تا ۵۰ درصد افزایش می‌یابد.

اولین عبور ماشین چوبکشی فشاری بر سطح خاک وارد می‌کند که ساختمان و تخلخل خاک را تحت تأثیر قرار داده و تنش اعمال شده در مجاورت تنش پیش فشردگی خاک (Precompression stress) قرار می‌گیرد (Horn *et al.*, 2007). همچنین (Gayoso & Iroume, 1991) تأیید کردند که رابطه بین شدت ترافیک و وزن مخصوص ظاهری به صورت تابع لگاریتمی است. به علاوه، (Wang *et al.*, 2007) نتیجه گرفتند که ۵۵ درصد افزایش وزن مخصوص ظاهری خاک مرتبط با چوبکشی در عبور اول اتفاق افتاد و ۸۰ درصد افزایش وزن مخصوص ظاهری بعد از دو مرتبه عبور بدست آمد. با افزایش عبور بین پنج تا ۱۰ بار، وزن مخصوص ظاهری تنها پنج درصد افزایش یافت. این تعداد تردد ابتدایی در مطالعه (Lotfalian, 1996) در جنگل خیرود نوشهر برابر

انیورسال ۶۵۰ ساخت رومانی، تجهیز شده با تریلر دو چرخ و کمپرس، انجام شده است. قدرت موتور این تراکتور ۶۲ اسب بخار، وزن آن ۳۹۹۹ کیلوگرم بوده و طول، عرض و ارتفاع آن به ترتیب ۴۱۴، ۱۹۹ و ۲۶۰ سانتی متر است. شکل ۱-الف طرح نمونه برداری برای اندازه گیری وزن مخصوص ظاهری و مقاومت به نفوذ را نشان می دهد. قبل از عملیات، سه طبقه شیب مسیر چوبکشی در سه تکرار انتخاب شد و سطوح متفاوت کوبیدگی با توجه به تعداد رفت و آمد تراکتور در محل نمونه ها اعمال شد که عبارتند از: کمتر از ۵ تردد، ۵-۱۰ تردد و بیش از ۱۰ تردد. هر بار عبور عبارت است از یک چرخه کار تراکتور یعنی حرکت خالی از دپو به محل بارگیری و حرکت با بار تا دپو. سه طبقه شیب در نظر گرفته شده عبارتند از: مسیر با شیب ۰-۱۰ درصد (رو به پایین)، مسیر با شیب ۱۰-۲۰ درصد (رو به پایین) و مسیر با شیب ۰-۱۰ درصد (رو به بالا). همچنین وزن مخصوص و مقاومت به نفوذ در ناحیه شاهد و کوبیده شده در چهار عمق ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی متری اندازه گیری شد.

این نمونه ها از خاک معدنی و سطحی و از محل رد چرخ تراکتور با استفاده از سیلندرهای فولادی نمونه گیری (طول ۱۰ سانتی متر و قطر داخلی ۵ سانتی متر) جمع آوری شدند. در مرحله بعد این نمونه ها به آزمایشگاه منتقل شدند و در دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد به مدت ۲۵ ساعت در داخل آون خشک شدند و دوباره عمل توزین نمونه ها انجام شد تا وزن مخصوص ظاهری به دست آید. در آزمایشگاه وزن مخصوص حقیقی به روش پیکنومتری اندازه گیری شد و با استفاده از داده های حاصل از وزن مخصوص ظاهری و حقیقی، درصد تخلخل محاسبه شد. مقاومت به نفوذ و تغییرات آن با استفاده از پنترومتر دستی اندازه گیری شد (شکل ۱-ب). این آزمایش ها در قالب طرح فاکتوریل کاملاً تصادفی و در سه تکرار انجام شد. برای تجزیه و تحلیل داده ها، ابتدا با آزمون کولموگراف-اسمیرنوف نرمال بودن داده ها بررسی شد. به منظور بررسی اثر شدت تردد تراکتور و شیب مسیرهای حمل بر مقدار وزن مخصوص ظاهری خاک از تجزیه واریانس دو طرفه و برای تعیین حداکثر کوبیدگی خاک در هر یک از

خوردگی خسارت آور در نظر می گیرند (Kolkaa & Bolding et al., 2004, Smidt, 2004, Greacen & Sands, 1980). مقدار مقاومت حدود ۳۰۰۰ کیلو پاسکال (KPa) به عنوان آستانه زیستی بالقوه ذکر شده است که در این حد رویش درخت به مقدار قابل توجه کاهش می یابد (Anonymous, 1998, Zenner et al., 2007). در جنگل های شمال ایران، از تراکتورهای کشاورزی به منظور خروج چوب آلات کاتینی و هیزمی استفاده می شود اما تاکنون هیچگونه تحقیقی در ارتباط با اثرات این سیستم خروج چوب کوچک مقیاس بر روی خاک جنگل انجام نشده است. بنابراین اهداف این تحقیق عبارتند از: کمی کردن تغییرات مقدار وزن مخصوص ظاهری، تخلخل خاک و مقاومت به نفوذ در مسیرهای پیش حمل با تراکتور با توجه به شیب، شدت ترافیک و عمق خاک است.

مواد و روش ها

منطقه مورد تحقیق

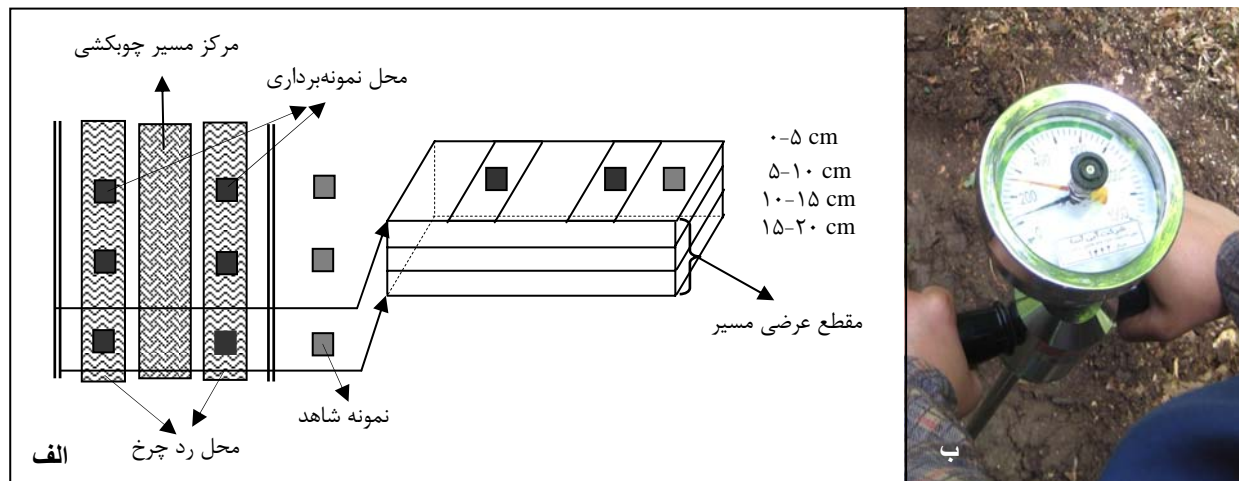
این تحقیق در پارسل های ۳۱۱ و ۳۱۹ سری گرازبن، که با وسعت ۱۰۰۱/۵ هکتار سومین سری جنگل آموزشی و پژوهشی دانشکده منابع طبیعی (دانشگاه تهران) واقع در خیرود نوشهر است، انجام شد. مساحت این دو پارسل برابر با ۷۰/۵ هکتار و ارتفاع از سطح دریا در پارسل ۳۱۱، ۱۱۹۰-۱۰۵۰ متر و در پارسل ۳۱۹، ۱۲۷۰-۱۱۹۰ متر است. شیب کلی پارسل ۳۱۱ و ۳۱۹، به ترتیب ۱۸ و ۲۰ درصد است. متوسط میزان بارندگی ۱۱۵۰ میلی متر است. شیوه بهره برداری و جنگل شناسی در هر دو پارسل مورد بررسی به صورت تک گزینی و فرم جنگل دانه زاد ناهمسال نامنظم است. جامعه گیاهی در پارسل ۳۱۱، بلوط-ممرزستان و در پارسل ۳۱۹، راش ممرزستان است (Anonymous, 2010). عملیات جمع آوری اطلاعات مورد نیاز در مهرماه ۱۳۹۱ انجام شده است. خاک قهوه ای جنگلی با زهکشی مناسب و دارای بافت لومی تا لوم رسی با عمق زیاد است.

روش تحقیق

عملیات پیش حمل چوب آلات کاتینی هیزمی با تراکتور

واریانس یک طرفه و دو طرفه معنی دار باشد از آزمون مقایسه‌ای چندگانه دانکن برای گروه‌بندی استفاده می‌شود.

شیب‌ها از تجزیه واریانس یک طرفه استفاده شد. در صورتی که اثر هر یک از عوامل در تجزیه و تحلیل



شکل ۱- طرح نمونه برداری برای اندازه‌گیری وزن مخصوص ظاهری و مقاومت به نفوذ (الف) در مسیرهای حمل و پترومتر دستی برای اندازه‌گیری مقاومت به نفوذ خاک (ب)

نتایج

نشان داد که شیب، شدت ترافیک و عمق خاک و اثرات متقابل آنها دارای اثر معنی داری بر وزن مخصوص ظاهری خاک هستند ($P < 0/05$).

وزن مخصوص ظاهری خاک

جدول ۱ تجزیه واریانس اثر شیب، شدت ترافیک و عمق را بر روی وزن مخصوص ظاهری نشان می‌دهد. نتایج

جدول ۱- آنالیز واریانس اثر شیب، شدت تردد، عمق و اثرات متقابل آنها بر وزن مخصوص ظاهری خاک

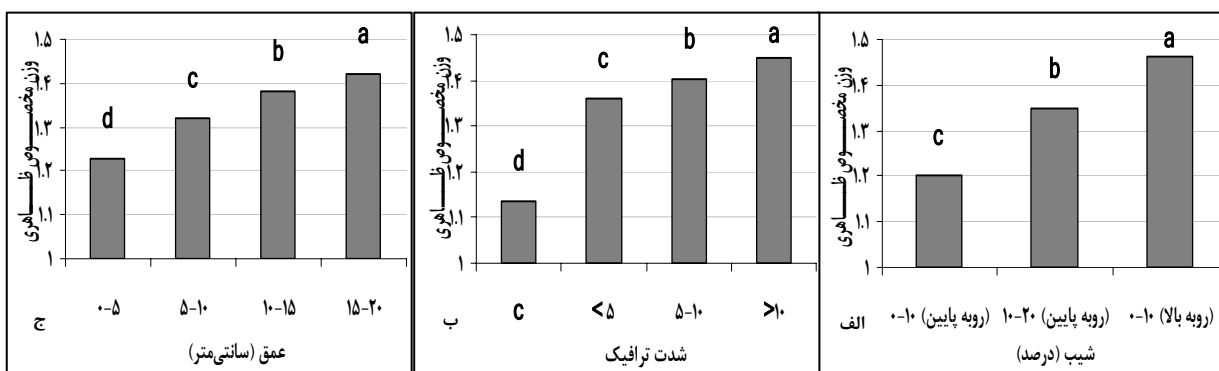
| <i>P value</i> | F | میانگین مربعات | درجه آزادی | مجموع مربعات | منبع تغییرات |
|----------------|---------|----------------|------------|--------------|------------------------|
| ۰/۰۰ | ۳۲۲۴/۳۴ | ۰/۸۱ | ۲ | ۱/۶۱ | شیب |
| ۰/۰۰ | ۲۸۱۱/۷ | ۰/۷ | ۳ | ۲/۱۱ | شدت ترافیک |
| ۰/۰۰ | ۱۰۴۹/۲۴ | ۰/۲۶ | ۳ | ۰/۷۹ | عمق |
| ۰/۰۰ | ۳۳۹/۷۸ | ۰/۰۸ | ۶ | ۰/۵۱ | شیب X شدت ترافیک |
| ۰/۰۰ | ۱۲/۳۱ | ۰ | ۶ | ۰/۰۲ | شیب X عمق |
| ۰/۰۰ | ۸/۲ | ۰ | ۹ | ۰/۰۲ | شدت ترافیک X عمق |
| ۰/۰۰ | ۳/۹۲ | ۰ | ۱۸ | ۰/۰۲ | شیب X شدت ترافیک X عمق |

مسیر با شیب ۰-۱۰ درصد (رو به پایین)، مسیر با شیب ۱۰-۲۰ درصد (رو به پایین) و مسیر با شیب ۰-۱۰ درصد (رو به بالا) به ترتیب ۱/۲، ۱/۳۵ و ۱/۴۶ گرم/سانتی‌متر^۳ است (شکل ۲-الف). نتایج نشان داد که وزن مخصوص ظاهری با افزایش تعداد تردد به طور معنی داری افزایش

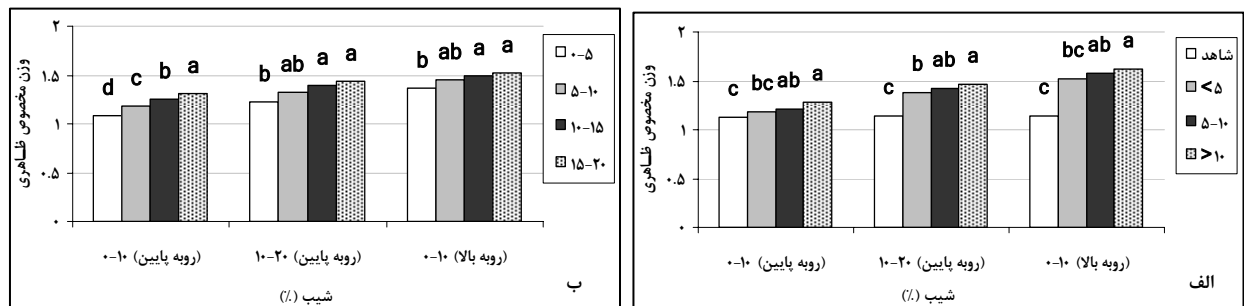
میانگین وزن مخصوص ظاهری به طور معنی داری تحت تأثیر شیب، شدت تردد تراکتور و عمق خاک هستند (شکل ۲). مسیرهای حمل با شیب رو به بالا دارای بیشترین مقدار وزن مخصوص در بین کلاسه‌های شیب هستند. میانگین وزن مخصوص ظاهری در سه طبقه شیب

مسیرهای حمل در مقایسه با نقاط شاهد (کوبیده نشده) بیشتر است. بیشترین مقدار وزن مخصوص در مسیرهای حمل رو به بالا با شیب ۰-۱۰ درصد و کلاسه بیش از ۱۰ تردد مشاهده شده است (شکل ۳-الف). وزن مخصوص به طور قابل توجهی با افزایش عمق خاک در هر کلاسه شیب افزایش یافته است (شکل ۳-ب). البته وزن مخصوص در کلاسه شیب ۰-۱۰ درصد رو به بالا و عمق ۲۰ سانتی متری خاک دارای بیشترین مقدار است.

می یابد (شکل ۲-ب). بیشترین مقدار وزن مخصوص بعد از ۱۰ تردد تراکتور و برابر با ۱/۴۵ گرم/سانتی متر^۳ است. با افزایش عمق خاک از سطح، وزن مخصوص افزایش یافته است. هرچند بیشترین افزایش در لایه ۰-۵ سانتی متری خاک رخ داده است (شکل ۲-ج). شکل ۳ اثرات متقابل شیب، شدت ترافیک و شیب x عمق خاک را بر روی وزن مخصوص ظاهری نشان می دهد. با افزایش تردد، وزن مخصوص در سه کلاسه شیب افزایش یافته است. صرف نظر از کلاسه شیب، وزن مخصوص در



شکل ۲- مقایسه میانگین وزن مخصوص ظاهری (گرم/سانتی متر^۳) با آزمون دانکن با توجه به شیب (الف)، شدت ترافیک (ب) و عمق خاک (ج). حروف لاتین نامتشابه نشانگر معنی دار بودن اختلاف میانگین ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است.



شکل ۳- مقایسه میانگین وزن مخصوص ظاهری (گرم/سانتی متر^۳) با آزمون دانکن با توجه به اثر متقابل بین شیب مسیر و شدت ترافیک (الف) و شیب مسیر و عمق خاک (ب). حروف لاتین نامتشابه نشانگر معنی دار بودن اختلاف میانگین ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است.

شیب، شدت ترافیک و عمق خاک و اثرات متقابل شیب x و شدت ترافیک دارای اثر معنی داری بر تخلخل خاک هستند ($P < 0.05$).

تخلخل خاک

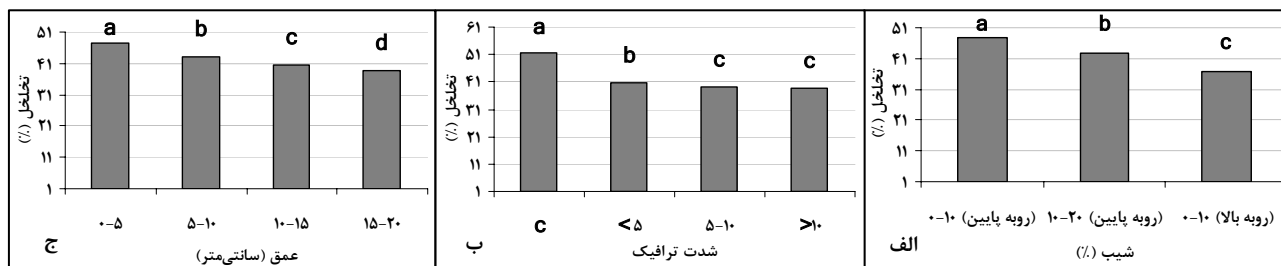
جدول ۲ تجزیه واریانس اثر شیب، شدت ترافیک و عمق را بر روی تخلخل خاک نشان می دهد. نتایج نشان داد که

جدول ۲- آنالیز واریانس اثر شیب، شدت تردد، عمق و اثرات متقابل آنها بر تخلخل خاک

| منبع تغییرات | مجموع مربعات | درجه آزادی | میانگین مربعات | F | P value |
|------------------------|--------------|------------|----------------|--------|---------|
| شیب | ۲۸۷۳/۶۳ | ۲ | ۱۴۳۶/۸۱ | ۱۲۶/۲۵ | ۰/۰۰ |
| شدت ترافیک | ۳۹۵۵/۴ | ۳ | ۱۳۱۸/۴۷ | ۱۱۵/۸۵ | ۰/۰۰ |
| عمق | ۱۴۴۳/۸۶ | ۳ | ۴۸۱/۲۹ | ۴۲/۲۹ | ۰/۰۰ |
| شیب X شدت ترافیک | ۱۰۱۳/۷۴ | ۶ | ۱۶۸/۹۶ | ۱۴/۸۵ | ۰/۰۰ |
| شیب X عمق | ۶۱/۶۳ | ۶ | ۱۰/۲۷ | ۰/۹ | ۰/۴۹۷ |
| شدت ترافیک X عمق | ۱۲۸/۸۳ | ۹ | ۱۴/۳۱ | ۱/۲۶ | ۰/۲۷ |
| شیب X شدت ترافیک X عمق | ۲۸۱/۲۶ | ۱۸ | ۱۵/۶۳ | ۱/۳۷ | ۰/۱۶۳ |

تعداد تردد به طور معنی داری کاهش می یابد (شکل ۴-ب). بیشترین مقدار کاهش تخلخل خاک بعد از ۱۰ تردد تراکتور و برابر با ۳۸/۶ درصد است. البته با افزایش عمق خاک از سطح زمین، تخلخل خاک کاهش یافته است (شکل ۴-ج).

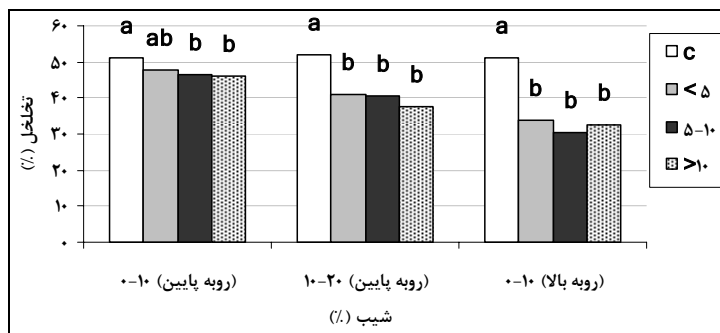
متوسط تخلخل خاک به طور معنی داری تحت تأثیر شیب، شدت تردد و عمق خاک هستند (شکل ۴). میانگین تخلخل خاک در مسیر با شیب ۰-۱۰ درصد (رو به بالا) دارای کمترین مقدار در بین کلاسه های شیب است (شکل ۴-الف). نتایج نشان داد که تخلخل خاک با افزایش



شکل ۴- مقایسه میانگین تخلخل خاک با آزمون دانکن با توجه به شیب (الف)، شدت ترافیک (ب) و عمق خاک (ج). حروف لاتین نامتشابه نشانگر معنی دار بودن اختلاف میانگین ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است.

شدت تردد، تخلخل خاک با توجه به سه کلاسه شیب کاهش می یابد. در مسیرهای با شیب ۰-۱۰ درصد (رو به بالا)، بیشترین مقدار کاهش تخلخل خاک، با توجه به افزایش وزن مخصوص در شدت ترافیک کمتر از ۵ تردد رخ داده و برابر ۱۷/۵ درصد است. بنابراین همانند سایر کلاسه های شیب، افزایش بیش از ۱۰ بار تردد، به طور معنی داری تخلخل خاک را افزایش نمی دهد.

شکل ۵ اثرات متقابل شیب و شدت ترافیک را بر تخلخل خاک نشان می دهد. مقدار تخلخل خاک در مسیرهای حمل با توجه به شیب و شدت تردد از مقدار تخلخل خاک در مناطق شاهد کمتر است. در مقایسه با مناطق کوبیده نشده، مقدار کاهش تخلخل خاک در لایه ۵-۰ سانتی متری خاک در مسیرهای حمل چوب با تراکتور بین ۱/۶ تا ۲۷/۶ درصد است. در تمام کلاسه های



شکل ۵- مقایسه میانگین تخلخل خاک با آزمون دانکن با توجه به اثر متقابل بین شیب مسیر و شدت ترافیک. در نمودار حرف C نشانگر نمونه شاهد است. حروف لاتین نامتشابه نشانگر معنی دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است.

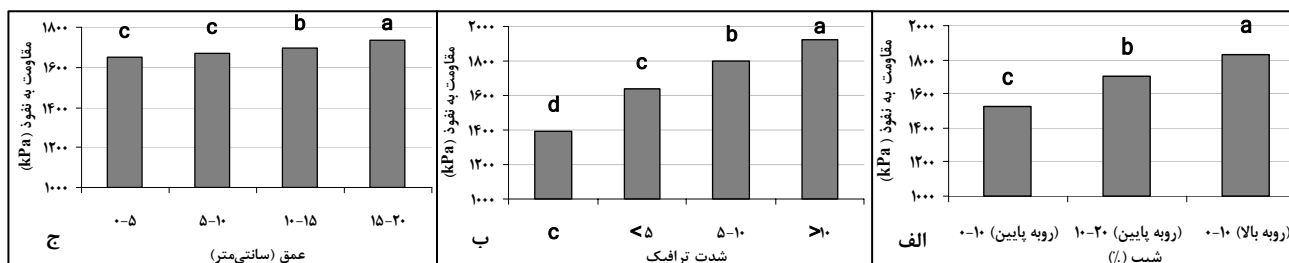
مقاومت به نفوذ

مقاومت به نفوذ در سه طبقه شیب مسیر با شیب ۰-۱۰ درصد (رو به پایین)، مسیر با شیب ۱۰-۲۰ درصد (رو به پایین) و مسیر با شیب ۰-۱۰ درصد (رو به بالا) به ترتیب ۱۵۲۵، ۱۷۰۵ و ۱۸۳۴ کیلوپاسکال است (شکل ۶-الف). نتایج نشان داد که مقاومت به نفوذ با افزایش تردد به طور معنی داری افزایش می‌یابد (شکل ۶-ب). البته بیشترین مقدار مقاومت به نفوذ بعد از ۱۰ تردد تراکتور و برابر با ۱۹۲۲ کیلوپاسکال است. به طوری که با افزایش عمق خاک از سطح، مقاومت به نفوذ افزایش یافته است (شکل ۶-ج).

جدول ۳ تجزیه واریانس اثر شیب، شدت ترافیک و عمق را بر روی مقاومت به نفوذ نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که شیب، شدت ترافیک و عمق خاک و اثرات متقابل آنها دارای اثر معنی داری بر مقاومت به نفوذ هستند ($P < 0/05$). میانگین مقاومت به نفوذ به طور معنی داری تحت تأثیر شیب، شدت تردد تراکتور و عمق خاک هستند (شکل ۶). مسیرهای حمل با شیب رو به بالا دارای بیشترین مقدار مقاومت به نفوذ در بین کلاسه‌های شیب هستند. میانگین

جدول ۳- آنالیز واریانس اثر شیب، شدت تردد، عمق و اثرات متقابل آنها بر مقاومت به نفوذ

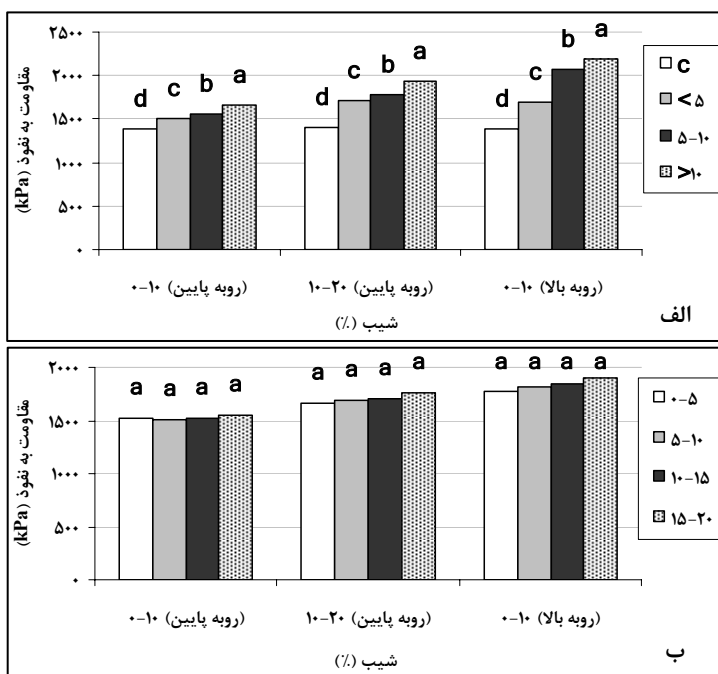
| P value | F | میانگین مربعات | درجه آزادی | مجموع مربعات | منبع تغییرات |
|---------|---------|----------------|------------|--------------|------------------------|
| ۰/۰۰ | ۸۶۰/۲۹ | ۱۱۶۰۹۲۶ | ۲ | ۲۳۲۱۸۵۲ | شیب |
| ۰/۰۰ | ۱۳۹۴/۰۸ | ۱۸۸۱۲۴۹ | ۳ | ۵۶۴۳۷۴۷ | شدت ترافیک |
| ۰/۰۰ | ۳۳/۱۱ | ۴۴۶۷۷/۷۱ | ۳ | ۱۳۴۰۳۳/۱ | عمق |
| ۰/۰۰ | ۱۵۸/۹۵ | ۲۱۴۴۸۸/۷ | ۶ | ۱۲۸۶۹۳۲ | شیب X شدت ترافیک |
| ۰/۰۰ | ۳/۶۳ | ۴۹۰۰/۵۹ | ۶ | ۲۹۴۰۳/۵۷ | شیب X عمق |
| ۰/۰۰ | ۳/۱۳ | ۴۲۲۹/۶۵ | ۹ | ۳۸۰۶۶/۸۱ | شدت ترافیک X عمق |
| ۰/۰۰ | ۴/۵۶ | ۶۱۵۰/۴۵ | ۱۸ | ۱۱۰۷۰۸/۲ | شیب X شدت ترافیک X عمق |



شکل ۶- مقایسه میانگین مقاومت به نفوذ (کیلوپاسکال) با آزمون دانکن با توجه به شیب (الف)، شدت ترافیک (ب) و عمق خاک (ج). حروف لاتین نامتشابه نشانگر معنی دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است.

برابر ۱۳۸۶ کیلوپاسکال، شیب ۱۰-۲۰ درصد (رو به پایین) برابر ۱۴۰۸ کیلوپاسکال و شیب ۰-۱۰ درصد (رو به بالا) برابر ۱۳۸۴ کیلوپاسکال است. بعد از بیش از ۱۰ بار تردد تراکتور، مقدار مقاومت به نفوذ در سه کلاسه شیب ۰-۱۰ درصد (رو به پایین)، شیب ۱۰-۲۰ درصد (رو به پایین) و شیب ۰-۱۰ درصد (رو به بالا) به ترتیب برابر ۱۶۵۶، ۱۹۲۷ و ۲۱۸۵ کیلوپاسکال است. استحکام خاک با افزایش تردد تراکتور در عمق‌های مختلف، در کلاسه شیب ۰-۱۰ درصد (رو به بالا) به ترتیب مقدار مقاومت به نفوذ با افزایش عمق خاک در سه کلاسه شیب به طور معنی‌داری افزایش نمی‌یابد (شکل ۷-ب).

شکل ۷ اثرات متقابل شیب X شدت ترافیک و شیب X عمق خاک را بر روی افزایش مقاومت به نفوذ نشان می‌دهد. صرف‌نظر از کلاسه شیب، مقاومت به نفوذ در مسیرهای حمل در مقایسه با نقاط شاهد (کوبیده نشده) بیشتر است. در تمامی کلاسه‌های شیب، میانگین مقدار مقاومت به نفوذ به طور معنی‌داری در بین سه کلاسه شیب تفاوت است. بالاترین مقدار مقاومت به نفوذ (۱۶۵۶ کیلوپاسکال) در شدت تردد بیش از ۱۰ بار و شیب ۰-۱۰ درصد در جهت حمل رو به بالا اندازه‌گیری شده است (شکل ۷-الف). مقدار مقاومت به نفوذ برای نمونه‌های شاهد در شیب ۰-۱۰ درصد (رو به پایین)



شکل ۷- مقایسه میانگین مقاومت به نفوذ (کیلوپاسکال) با آزمون دانکن با توجه به اثر متقابل بین شیب مسیر و شدت ترافیک (الف) و شیب مسیر و عمق خاک (ب). حروف لاتین نامتشابه نشانگر معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است.

Sidle & Drlica, Gayoso & Iroume, 1991, 2005 و 1981 (Susnjar et al., 2006). نتایج نشان داد که وزن مخصوص ظاهری به طور معنی‌داری با افزایش تردد ماشین افزایش می‌یابد. به‌طورکلی مسیرهای حمل خوب در سه کلاسه شیب دارای روند مشابه در افزایش وزن مخصوص با افزایش تعداد عبور ماشین هستند. برای تمامی تیمارها، بیشترین میزان افزایش وزن مخصوص

بحث

وزن مخصوص ظاهری

نتایج نشان داد که میانگین وزن مخصوص ظاهری خاک بعد از عملیات پیش حمل با تراکتور افزایش یافته است. هرچند، در کلاسه‌های شیب مختلف، مقدار آن از نظر آماری متفاوت است. اما نتایج بیشتر تحقیقات انجام شده در این زمینه با نتایج این تحقیق یکسان است (Eliasson,)

که با افزایش عمق خاک، تخلخل خاک به طور معنی‌داری کاهش می‌یابد. فضاهای خالی موجود در لایه سطحی خاک کوبیده شده و در این حالت نیروهای وارده از ماشین را جذب نموده و از لایه‌های زیرین محافظت می‌کنند. هرچند کوبیدگی ایجاد شده در لایه‌های سطحی باعث افزایش استحکام خاک شده و از کوبیدگی بیشتر لایه‌های خاک جلوگیری می‌کند. در عبورهای بعدی، نیروها به لایه‌های عمیق‌تر وارد می‌شود (Ampoorter et al., 2010 و Picchio et al., 2012).

مقاومت به نفوذ

در این تحقیق، برای ارزیابی بهم‌خوردگی خاک (فشرده‌گی و کوبیدگی خاک)، علاوه بر اندازه‌گیری وزن مخصوص ظاهری خاک، مقاومت به نفوذ نیز اندازه‌گیری شده است. زیرا، مقاومت به نفوذ، در واقع اندازه‌گیری غیرمستقیم ارتباط بین منافذ و رشد ریشه است و در مقاومت به نفوذ ۲۵۰۰ کیلوپاسکال، نفوذ ریشه در انواع خاک‌ها کاهش می‌یابد. مقاومت به نفوذ نسبت به وزن مخصوص ظاهری خاک شاخص حساس‌تری برای تعیین اثر ترافیک ماشین است (Han et al., 2009)، زیرا بازآرایی ذرات خاک پس از بهم‌خوردگی خاک، مقاومت به نفوذ را تغییر داده ولی ممکن است وزن مخصوص ظاهری تغییری نیابد (Zenner et al., 2007).

نتایج نشان داده که عملیات چوبکشی، دارای اثر قابل توجه و معنی‌داری بر روی افزایش مقاومت به نفوذ است که منطبق بر نتایج سایر محققان (Ampoorter et al., 2010, Bolding et al., 2009, Greacen & Sands, 1980 و Picchio et al., 2012) است. همانطور که در مقدمه آمده است اگر مقدار ۳۰۰۰ کیلوپاسکال به‌عنوان آستانه فعالیت بیولوژیکی خاک در نظر گرفته شود، هیچ یک از داده‌های مقاومت به نفوذ در مسیرهای حمل از این حد آستانه بیشتر نبوده است (Bolding et al., 2009). نتایج نشان داد که مقاومت به نفوذ خاک با افزایش عمق خاک و شدت ترافیک در سه کلاسه شیب افزایش یافته است که منطبق با نتایج تحقیقات (Ampoorter et al., 2010, Bolding et al., 2009) و Picchio et al. (2012) است.

خاک در کلاسه تردد کمتر از ۵ بار عبور مشاهده شده است. بیش از ۱۰ بار عبور، معمولا وزن مخصوص ظاهری به کندی افزایش می‌یابد (Ampoorter et al., 2010, Jamshidi et al., 2008, Horn et al., 2007 و Eliasson & Wasterlund, 2007) و تحقیقات متعددی ثابت نموده که بیشترین اثرات کوبیدگی ناشی از تردهای ابتدایی است (Han et al., 2009, Picchio et al., 2012). نتایج نشان داد که در مسیرهای با شیب ۰-۱۰ درصد رو به بالا، مقدار تغییر وزن مخصوص ظاهری خاک از حد ۲۰ درصد افزایشی که به‌عنوان حد مضر در نظر گرفته شده، بیشتر است (Anonymous, 1998 و Bolding et al., 2009).

نتایج نشان داد که مقدار وزن مخصوص ظاهری خاک بعد از عملیات حمل چوب به طور معنی‌داری با افزایش عمق خاک در سه کلاسه شیب افزایش یافته است. در لایه‌های بالاتر خاک، فعالیت‌های بیولوژیک (ریشه و حیوانات) می‌تواند مقاومت خاک و وزن مخصوص ظاهری را کاهش دهد، ولی بافت خاک، میزان شن و ساختمان خاک ممکن است مقاومت و وزن مخصوص خاک را در لایه‌های پایین‌تر افزایش دهد (Greacen & Ampoorter et al., 2012, Sands, 1980 و Picchio et al., 2010).

تخلخل خاک

مقدار تخلخل خاک به طور معنی‌داری با افزایش شدت ترافیک و شیب در مسیرهای پیش حمل کاهش یافته است. در طی فرایند کوبیدگی خاک، فضاهای خالی خاک فشرده شده یا از بین رفته و توده‌های سطحی شکسته و خرد می‌شوند. فضاهای بزرگ (قطر کمتر از ۵۰ میکرون) به فضاهای متوسط (قطر بین ۰/۲ تا ۵۰ میکرون) و فضاهای کوچک (قطر کمتر از ۰/۲ میکرون) تغییر می‌یابد. این شرایط تأیید می‌کند که مجموع تخلخل خاک در اثر کوبیدگی تا ۲۰ درصد و ۵۰-۶۰ درصد فضاهای بزرگ کاهش می‌یابد (Ampoorter et al., 2010). نتایج نشان داد که مجموع تخلخل خاک کاهش یافته است که ممکن است به دلیل از دست دادن یا کاهش فضاهای بزرگ خاک باشد (Picchio et al., 2012). نتایج نشان داده است

منابع مورد استفاده

References

- Adams, P.W. and Froehlich, H.A., 1984. Compaction of forest soils. USDA Pacific Northwest Extension Publication. PNW 217, 13 p.
- Akay, A.E., Yuksel, A., Reis, M. and Tutus, A., 2007. The Impacts of ground-based logging equipment on forest soil. Polish Journal of Environmental Study, 16(3): 371-376.
- Ampoorter, E., Schrijver, A., Van Nevel, L., Hermy, M. and Verheyen, K., 2012. Impact of mechanized harvesting on compaction of sandy and clayey forest soils: results of a meta-analysis. Annals of Forest Science, 69: 533-542.
- 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.
- Anonymous, 1998. USFS. USDA Forest Service Manual, FSM 2520 (Watershed Protection and Management), R-6 Supplement No. 2500-98-1, Effective August 24, 15 p.
- Anonymous, 2010. Forest management plan of Gorazbon District, Kheyroud Educational and Research Forest in Nowshahr, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, 460 p.
- Ares, A., Terry, T.A., Miller, R.E., Anderson, H.W. and Flaming, B.L., 2005. Ground-based forest harvesting effects on soil physical properties and Douglas-Fir growth. Soil Science Society of American Journal, 69: 1822-1832.
- 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.
- 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.
- Bustos, O. and Egan, A., 2011. A comparison of soil compaction associated with four ground-based harvesting systems. Northern Journal of Applied Forestry, 28(4): 194-198.
- Eliasson, L., 2005. Effects of forwarder tire pressure on rut formation and soil compaction. Silva Fennica, 39: 549-557.
- Eliasson, L. and Wasterlund, I., 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.
- Gayoso, J. and Iroume, A., 1991. Compaction and soil disturbances from logging in Southern Chile. Annals Science Forest, 48: 63-71.
- Gent, J.A. and Morris, L.A., 1986. Soil compaction from harvesting and site preparation in the upper gulf coastal plain. Soil Science Society of American Journal, 50: 443-446.
- 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

رشد ریشه در بسیاری از درختان با افزایش بیش از ۳۰۰۰ کیلوپاسکال مقاومت به نفوذ خاک، محدود می‌شود (Bolding *et al.*, 2009)، اگرچه کمی از ریشه‌ها تا مقدار ۷۰۰۰ کیلوپاسکال هنوز می‌توانند در خاک نفوذ کنند (Ampoorter *et al.*, 2010). همچنین مقدار زیاد مقاومت به نفوذ برای فون خاک هم نامناسب است و بیشتر ارگانسیم‌های خاک دارای قدرت و توانایی زیادی برای نفوذ در خاک و حفر کردن آن نیستند (Gomez *et al.*, 2002 و Ampoorter *et al.*, 2010). اما نیروهای برشی وارد از لاستیک‌های تراکتور به خاک سطح زمین، ممکن است لایه سطحی را شخم زده و سست نماید (Horn *et al.*, 2007)، به همین دلیل بین مقدار مقاومت به نفوذ در دو کلاسه عمق ۰-۵ و ۵-۱۰ سانتی‌متری اختلاف معنی‌داری وجود ندارد.

مقدار مقاومت به نفوذ اندازه‌گیری شده در این تحقیق می‌تواند مشکلاتی را برای استقرار زاداوری در توده‌های جنگلی ایجاد نماید. شرایط خاک به‌ویژه میزان رطوبت خاک به مقدار زیادی بر روی خصوصیات و وسعت بهم‌خوردگی ظاهری خاک و تغییرات مقاومت به نفوذ آن تأثیرگذار است و قبل از عملیات چوبکشی باید این موارد ارزیابی شود. به‌علاوه اینکه یک راهکار مهم این است که از تردد ماشین در مواقعی که خاک جنگل مرطوب است 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 بهم‌خوردگی و کوبیدگی خاک است. زیرا بازیابی خاک‌های جنگلی کوبیده شده بسیار کند و یک فرایند طولانی مدت است.

تشکر و قدردانی

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی شماره ۲۸۵۱۴/۱/۳ با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه انجام شده است، بدین وسیله نویسندگان این مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از معاونت پژوهشی دانشگاه تهران اعلان می‌نمایند.

- Iran). Reigning Ukrainsky Lisotehnichny University: 296-302
- Najafi, A., Solgi, A. and Sadeghi, S.H.R., 2009. Effect of ground skidding and skid trail slope on soil disturbance. *Soil and Tillage Research*, 103: 165-169.
 - 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.
 - Picchio, R., Neri, F., Petrini, E., Verani, S., Marchi, E. and Certini, G., 2012. Machinery-induced soil compaction in thinning two pine stands in central Italy. *Forest Ecology and Management*, 285: 38-43
 - Raafatnia, N., Jaeger, D. and Tabari, M., 2008. Effects of ground-based skidding system on soil compaction under different slope of skid trails. *Iranian Journal of Natural Resources*, 61(1): 73-84.
 - 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., Kalb, A.A., Herbauts, J. and Verbrugge, J.C., 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.
 - Russell, F. and Mortimer, D., 2005. A review of small-scale harvesting systems in use worldwide and their potential application in Irish forestry. COFORD, Dublin, 105 p.
 - Sidle, R.C. and Drlica, D.M., 1981. Soil compaction from logging with a low-ground pressure skidder in the Oregon Coast Ranges. *Soil Science Society of American Journal*, 45: 1219-1224.
 - Susnjar, M., Horvat, D. and Seselj, J., 2006. Soil compaction in timber skidding in winter conditions. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 27: 3-15.
 - Wang, J., LeDoux, C.B. and Edwards, P., 2007. Changes in soil bulk density resulting from construction and conventional cable skidding using replanned skid trails. *Northern Journal of Applied Forestry*, 24: 5-8.
 - Wronski, E.B. and Murphy, G., 1994. Responses of forest crops to soil compaction. In: Soane, B.D., van Ouwerkerk, C. (Eds.), *Soil Compaction in Crop Production*. Elsevier, Amsterdam: 317-342.
 - Zenner, E.K., Fauskee, J.T., Berger, A.L. and Puettmann, K.J., 2007. Impacts of skidding traffic intensity on soil disturbance, soil recovery, and aspen regeneration in north central Minnesota. *Northern Journal of Applied Forestry*, 24: 177-183.
 - California's Sierra Nevada. *Soil Science Society of American Journal*, 66: 1334-1343.
 - Grace, J.M., Skaggs, R.W. and Cassel, D.K., 2006. Soil physical changes associated with forest harvesting operations on an organic. *Soil Science Society of American Journal*, 70: 503-509.
 - Greacen, E.L. and Sands, R., 1980. A review of compaction of forest soils. *Australian Journal of Soil Research*, 18: 163-189.
 - 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.
 - Horn, R., Vossbrink, J. and Becker, S., 2004. Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties. *Soil and Tillage Research*, 79: 207-219.
 - Horn, R., Vossbrink, J., Peth, S. and Becker, S., 2007. Impact of modern forest vehicles on soil physical properties. *Forest Ecology and Management*, 248: 56-63.
 - Jamshidi, R., Jaeger, D., Raafatnia, N. and Tabari, M., 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.
 - Kolkaa, R.K. and Smidt, M.F., 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.
 - Kozłowski, T.T., 1999. Soil compaction and growth of woody plants. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 14: 596-619.
 - Landsberg, J.D., Miller, R.E., Anderson, H.W. and Tepp, J.S. 2003. Bulk density and soil resistance to penetration as affected by commercial thinning in northeastern Washington. *Research Paper PNW-RP-551*. USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, OR. 35 p.
 - Lotfalian, M., 1996. Effects of skidding operation using TAF skidder on soil compaction. MSc thesis, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, 114 p.
 - 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.
 - Naghdi, R., Raafatnia, R., Sobhany, H., Jalali, G. and Hosseini, M., 2007. Evaluation of tree length and assortment logging methods with respect to residual damage and productivity in Caspian forest (north of

Effects of wood extraction using farm tractor on soil physical properties (Case study: Gorazbon district in Khyrud forest)

M. Jourgholami^{1*}, SH. Soltanpour², M. Etehadi Abari³ and B. Majnounian⁴

1* - Corresponding Author, Assistant professor, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran. Email: mjgholami@ut.ac.ir

2- MSc Student, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran.

3- PhD Student, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran.

4- Professor, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran.

Received: 16.03.2013

Accepted: 12.06.2013

Abstract

Tractor-based logging systems are the most common type of small-scale equipments. Farm tractors equipped with a 2-wheel trailer are mostly used to perform forwarding operations of pulpwoods and fuelwoods in the Hyrcanian forests of Iran. This study was carried out in Gorazbon district of Khyrud forest. The aim of the study was to evaluate effects of slope gradient, tractor traffic intensity over skid trails and soil depth on brown soil bulk density (BD), total porosity (TP) and penetration resistance (PR) with clayey loam to loamy texture. The trial was conducted under the completely randomized factorial design at three replicates and three treatments, including: three slope gradients (0-10% (downhill), 10-20% (downhill) and 0-10% (uphill)), three traffic intensity classes (<5, 5-10 and >10 passes) and four soil depths (5, 10, 15 and 20 cm) on skid trails and undisturbed locations adjacent to the study area. Results indicated that mean BD was significantly influenced by slope gradient, traffic intensity and soil depth. Skid trail on the uphill tractor forwarding slopes, showed the greatest value among the other ones. Results showed that TP significantly decreased as number of machine passes increased and high level of decrease occurred after further than 10 machine passes performed (TP= 38.6%). Skid trail on the uphill tractor forwarding slopes showed the greatest PR value among the other ones. Penetration resistance increased significantly by increase in soil depth under the skid trails. Skid trails with 0-10% slope (downhill) had the lowest BD and PR values, whereas the trails with 10-20% slope (downhill) had the moderate values and the trails with 0-10% slope (uphill) had the highest compaction values. Overall, it might be concluded that forwarding operations with farm tractor should be planned in gentle slopes and uphill forwarding should be excluded from ground-based logging systems, if it's possible.

Key words: Forwarding operation, soil compaction, total porosity, penetration resistance, slope gradient, soil depth.