

مقاله علمی - پژوهشی

بررسی تاثیر سیستم‌های حرکتی مختلف تراکتور بر تراکم خاک و لغزش چرخ‌های محرک

عبدالمجید معین فر^۱، غلامحسین شاهقلی^{۲*}، یوسف عباسپور گیلانده^۳ و ترحم مصری گندشمین^۴

۱، ۲، ۳ و ۴- به ترتیب: دانشجوی دکتری؛ دانشیار؛ استاد؛ و دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
تاریخ دریافت: ۹۷/۲/۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۸/۱۴

چکیده

استفاده از تراکتورهای چهارچرخ محرک و چرخ عقب محرک در عملیات کشاورزی رایج است. برای بررسی اثر نوع سیستم حرکتی بر تراکم خاک و لغزش چرخ‌های محرک، آزمایش‌هایی مزرعه‌ای در خاک لومی و در قالب طرح کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمارها شامل سطوح مختلف سرعت (۱/۲۶، ۳/۹۶ و ۶/۷۸ کیلومتر بر ساعت)، فشار باد تایر (۱۷۰، ۲۰۰ و ۲۳۰ کیلوپاسکال)، وزنه بالاست (۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلوگرم)، سیستم‌های حرکت تراکتور (دیفرانسیل جلو، دیفرانسیل عقب و جفت دیفرانسیل) و عمق (۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر) بودند. جرم مخصوص ظاهری خاک به عنوان شاخصی از تراکم خاک در عمق‌های مختلف و لغزش چرخ‌های محرک نیز در شرایط مختلف اندازه‌گیری شد. در این آزمایش‌ها از تراکتور چهارچرخ محرک گلدونی ۲۴۰ استفاده شد. آزمایش‌ها در شرایط کنترل شده در کانالی به طول ۳ متر، عرض و عمق ۱ و ۰/۶ متر اجرا شد و نتایج به دست آمده، پس از تجزیه و تحلیل با نرم‌افزار SPSS22، نشان داد که با تغییر سیستم حرکتی چهارچرخ محرک به دوچرخ محرک عقب و دوچرخ محرک جلو، تغییر قابل توجهی در تراکم خاک ایجاد می‌شود که کمترین تراکم در حالت چهارچرخ محرک و بیشترین آن در حالت دوچرخ محرک جلو بوده است. علت افزایش تراکم با تغییر سیستم حرکتی را می‌توان به سطوح لغزش متفاوت در هر یک از این حالت‌ها نسبت داد. با توجه به درصد لغزش کمتر در سیستم چهارچرخ محرک، نسبت به دو حالت دیگر، تراکم ایجاد شده در اثر استفاده از این سیستم نسبت به دو حالت دیگر کمتر بوده است. افزایش بار محوری باعث افزایش تراکم خاک شد. نکته قابل توجه این است که با افزایش بار محوری، تراکم از خاک سطحی به خاک زیرین نیز منتقل و معلوم شد هرچه بار محوری بیشتر شود، جرم مخصوص ظاهری خاک زیرین به خاک سطحی نزدیک‌تر می‌شود. افزایش بار محوری و کاهش فشار باد تایرها باعث کاهش لغزش چرخ محرک شدند. مدل رگرسیون گام به گام با ضریب تعیین ۰/۹۲ و با توجه به ضرایب استاندارد محاسبه شده نشان می‌دهد که بار محوری، عمق، نوع سیستم حرکتی، سرعت، و فشار باد تایرها به ترتیب دارای بیشترین تاثیر بر جرم مخصوص ظاهری خاک هستند.

واژه‌های کلیدی

تراکتور گلدونی، جرم مخصوص ظاهری خاک، جفت دیفرانسیل، مدل رگرسیون

مقدمه

ایجاد تغییراتی در ساختار خاک بینجامد که نتیجه نهایی آن متراکم شدن لایه‌های خاک است (Svoboda et al., 2016). تراکم خاک به طور سنتی این‌گونه تعریف شده است: کاهش حجم خاک غیر اشباع به علت تنش اعمال شده (Chamen et

از الزام‌های اصلی کشاورزی مدرن، دستیابی به حداکثر راندمان در عملیات مزرعه‌ای است. ماشین‌های مدرن کشاورزی بزرگ‌اند و وزن بالایی دارند. استفاده از این ماشین‌های سنگین می‌تواند به

تماسی است در حالی که تراکم خاک زیرین مربوط به بار محوری کل و مستقل از فشار روی زمین است (Botta *et al.*, 1999). تقریباً تمام مدل‌های تراکتور و ماشین‌های مزرعه‌ای فشاری تماسی بیش از حدی تولید می‌کنند که برای جلوگیری از تراکم خاک توصیه شده است (Hetz, 2001). پیشنهاد شده که موثرترین راه برای حفاظت ساختار خاک از تخریب، کاهش تردد با ترکیب عملیات کشاورزی است. این امر به کاهش قابل توجهی در تعداد عبور چرخ منجر خواهد شد (Aliev, 2001).

بار چرخ، نوع تایر و فشار باد تایر آن باعث افزایش جرم مخصوص خاک می‌شود و نقش مهمی در تراکم خاک دارد (Horn *et al.*, 2003). تقریباً تمام تایرها به طور قابل توجهی فشردگی خاک زیر چرخ را افزایش می‌دهند، در حالی که تنها برخی از آنها تراکم خاک اطراف چرخ را افزایش می‌دهند. در فاصله‌های دورتر از مسیر چرخ، کاهش کلی در تراکم خاک به ویژه در خاک زیرین رخ می‌دهد (Błaszkiwicz, 1998). بسیاری از محققان گزارش کرده‌اند که کار با تایرهای کم فشار می‌تواند به طور قابل توجهی باعث کاهش تراکم خاک و افزایش عملکرد محصول شود (Soane *et al.*, 1982; Boguzas & Hakansson, 2001; Ridge, 2002). پیشنهاد شده که لاستیک‌های شناور می‌توانند با توجه به چندین پارامتر کلیدی (مصرف سوخت، نیروی کششی، عمق نشست چرخ، جرم مخصوص) تحت شرایط خاص خاک و شرایط بارگیری متفاوت گزینه‌ای مناسب برای جلوگیری از تراکم خاک و رسیدن به عملکرد کششی بهینه باشند (McBride *et al.*, 2000).

سیستم‌های کاهش فشار تماسی با زمین که با چرخ‌های زنجیری یا تایرهای بزرگ‌تر از استاندارد با

(*al.*, 2014). جرم مخصوص ظاهری شاخصی است برای اندازه‌گیری تراکم خاک و ارزیابی اثر تردد ماشین‌های کشاورزی بر کیفیت فیزیکی خاک (Arvidsson, 1999; Duttman *et al.*, 2014).

در مورد تاثیر به کارگیری ماشین‌های کشاورزی بر پارامترهایی مانند جرم مخصوص ظاهری خاک، شاخص مخروط و نفوذپذیری هیدرولیکی خاک سال‌ها تحقیق شده است. در عملیات مزرعه‌ای، رد چرخ‌ها بر خاک نتیجه عبور تراکتور و ماشین‌های کشاورزی است. خاک در رد چرخ‌ها فشرده و فاصله بین ذرات خاک کمتر می‌شود و استحکام خاک افزایش می‌یابد. این پدیده ممکن است پیامدهای منفی برای گیاهان کشت شده داشته باشد؛ با تراکم بیشتر، مقاومت خاک در برابر توسعه ریشه گیاهان افزایش می‌یابد، حجم منافذ خاک کاهش پیدا می‌کند و ویژگی نگهداری آب و نفوذ آن در خاک کمتر می‌شود (Horn *et al.*, 2003; Chan *et al.*, 2006; Etana *et al.*, 2013). این تغییرات اثر منفی بر توابع تولید خاک و از جمله کاهش عملکرد باقی می‌گذارد. بنابراین، راه‌های کاهش تراکم خاک باید مورد توجه قرار گیرد و از طرف دیگر کاربرد بهینه ماشین‌های مزرعه‌ای باید محقق شود.

به هنگام مطالعه تراکم ناشی از عبور ماشین‌های مزرعه‌ای، تفاوت بین نیرو و فشار باید به روشنی مشخص شود. بار محوری وزن ماشین به کیلوگرم یا کیلونیوتن است که یک واحد نیرو است، در حالی که فشار تماسی زمین، بار محوری تقسیم بر سطح تماس بین ماشین و خاک است که واحد آن مطابق با واحد فشار کیلوپاسکال است. فشار تماسی زمین همان است که باعث تراکم خاک می‌شود. شواهدی وجود دارد که تراکم خاک سطحی مربوط به فشار

سوخت تراکتور می‌شود، بنابراین، برای دستیابی به لغزش بهینه تا جایی که چرخ محرک دچار آسیب نشود، بهتر است فشار باد تایر کاهش داده شود تا بار محوری افزایش یابد (Pravin *et al.*, 2013). در تحقیقی دیگر، محققان با ارزیابی تأثیر دو تراکتور با اندازه‌های تایرها و بارهای محوری مختلف بر مقاومت حرکتی و شاخص مخروط خاک در شرایط مختلف (شامل زمین شخم نخورده، زمین شخم خورده و زمین آماده برای کشت)، روابط موجود بین مقاومت حرکتی و پارامترهای فشار زمین و نشست تایر را تعیین کردند و نشان دادند که برای خاک سطحی تراکتور تک دیفرانسیل با بار محوری کمتر، نسبت به تراکتور جفت دیفرانسیل با بار محوری بیشتر، تراکم بیشتری تولید کرده است. اما در لایه زیرین خاک، تراکتور جفت دیفرانسیل نسبت به تراکتور تک دیفرانسیل تراکم بیشتری تولید کرده است (Botta *et al.*, 2012). در تحقیقی در سوئد، محققان تراکم لغزش ایجاد شده با تراکتور چرخ زنجیری، تراکتور با چرخ‌های تک و چرخ‌های دوبل را مقایسه کردند. تنش و تراکم اندازه‌گیری شده در تمامی عمق‌های خاک برای تراکتور چرخ زنجیری و چرخ دوبل تقریباً برابر اما برای تراکتور با چرخ تکی به طور قابل توجهی بیشتر بود. لغزش اندازه‌گیری شده برای تراکتور با چرخ‌های دوبل و تکی به طور قابل توجهی بیشتر بود تا برای تراکتور چرخ زنجیری (Arvidsson *et al.*, 2011).

در مطالعه‌ای دیگر نیز اثر سطوح مختلف رطوبت، عمق و سرعت حرکت تراکتور بر تراکم خاک در سه جهت اصلی بررسی و از مبدل جابه‌جایی و استوانه‌های تو خالی برای اندازه‌گیری جابه‌جایی و تراکم خاک استفاده شد. نتایج بررسی‌ها نشان داده است که با کاهش سرعت و افزایش

فشار باد کم (مانند لاستیک‌های رادیال) در تراکتورها و ماشین‌های مزرعه نصب شده‌اند، افزایش در بازده کششی و کاهش فشار تماسی تایر/خاک را به نمایش گذاشته‌اند و دارای پتانسیل خوبی برای کاهش تراکم هستند (Hetz, 2001). محققان گزارش کرده‌اند که چرخ‌های بزرگ‌تر با لاستیک‌های رادیال برای کاهش تراکم خاک به طور کلی مناسب‌ترند تا زنجیرهای فلزی و تایرهای لایه‌ای که معمولاً ساختار خاک‌های زراعی را بیش از تایرهای رادیال تخریب می‌کنند. همچنین مشخص شده که تراکتورهای چرخ لاستیکی موجب تراکم بیشتر خاک‌های سطحی می‌شوند، اما آسیب‌پذیری و تراکم در خاک‌های زیرین کمتر است (Febo & Planeta, 2000).

لغزش چرخ تأثیر معنی‌داری بر افزایش تراکم خاک سطحی دارد اما در لایه‌های زیرین خاک افزایش لغزش چرخ تأثیری بر تراکم خاک ندارد (Maziero *et al.*, 1997). هنگامی که لغزش چرخ تراکتور در محدوده ۷ تا ۱۵ درصد (که لغزش طبیعی در خاک است) تغییر می‌کند، کاهش فشار باد تایر باعث کاهش لغزش و مصرف سوخت می‌شود، در حالی که بهره‌وری کار را افزایش می‌دهد. افزایش وزن اضافی روی تراکتور (اضافه کردن وزن بالاست) باعث کاهش لغزش و افزایش بهره‌وری کار می‌شود، اما مصرف سوخت و تراکم خاک را نیز بالا می‌برد (Damanauskas *et al.*, 2015).

اثر اضافه کردن وزن بالاست و فشار باد تایر بر لغزش چرخ محرک بررسی و نشان داده شده است که با افزایش بار محوری چرخ محرک یا کاهش فشار باد تایر، لغزش چرخ محرک به صورت معنی‌داری کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، افزایش بار محوری باعث افزایش مقاومت غلتشی و بالا رفتن مصرف

رطوبت، تراکم به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد؛ خاک در جهت عمودی فشرده شده و در جهت جانبی انبساط یافته است. نتایج بررسی‌ها همچنین نشان می‌دهد که خاک در جهت طولی در ابتدای حرکت فشرده و هنگام عبور تایر باز شده و سرانجام بعد از عبور تایر دوباره مقدار کمی فشردگی در این جهت به وجود آمده است. فشردگی در جهت طولی نسبت به دو حالت دیگر برگشت‌پذیری بیشتری از خود نشان داده است (Shahgholi & Abuali, 2015).

هدف از این تحقیق بررسی تراکم ایجاد شده در خاک در حالت‌های عملکردی مختلف تراکتور شامل تغییر بار محوری چرخ محرک، فشار باد تایر، سیستم حرکتی تراکتور (چهارچرخ محرک 4WD دو چرخ محرک عقب BDW و دو چرخ محرک جلو FWD) و سرعت پیشروی تراکتور است. همچنین، لغزش چرخ محرک در وضعیت‌های مختلف بررسی شده تا رابطه بین پارامترها در لغزش تراکتور و تراکم خاک مشخص شود.

مواد و روش‌ها

آزمون‌های مزرعه‌ای در مزارع ایستگاه تحقیقات کشاورزی اردبیل (طول جغرافیایی ۴۷°۵۵'۴۸"، عرض جغرافیایی ۳۷°۳۳'۵۷" و ارتفاع ۱۳۵۲ متر از سطح دریا) و در قالب طرح کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمارهای مورد مطالعه عبات‌اند از: سطوح مختلف سرعت (۱/۲۶، ۳/۹۶ و ۶/۷۸ کیلومتر بر ساعت)، فشار باد تایر چرخ‌های جلو و عقب (۱۷۰، ۲۰۰ و ۲۳۰ کیلوپاسکال)، وزنه اضافی در جلو تراکتور برای افزایش وزن روی محور جلو (۰ و ۳۰۰ کیلوگرم)، سیستم‌های حرکت تراکتور (دو چرخ محرک جلو، دو چرخ محرک عقب و

چهارچرخ محرک) و عمق (۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر). آزمایش‌ها در بافت خاک لومی اجرا شد. رطوبت خاک در زمان آزمایش در محدوده ۱۰-۱۳ درصد اندازه‌گیری شد که میانگین رطوبت خاک تا عمق ۴۰ سانتی‌متر است. مشخصات خاک مورد آزمایش در جدول ۱ آورده شده است. ظرفیت مزرعه‌ای به صورت مزرعه‌ای در کرتی به ابعاد ۱×۱ متر تعیین شد. بعد از اشیاع کرت از آب روی آن با پلاستیک پوشانده و بعد از ۷۲ ساعت، نمونه‌برداری و تعیین درصد رطوبت شروع شد و در روزهای متوالی این کار ادامه یافت؛ در روزهای پنجم، ششم و هفتم اختلافی از نظر رطوبت مشاهده نشد که بدین ترتیب رطوبت مزرعه را مشخص کرد. برای آزمایش‌ها از تراکتور چهارچرخ محرک گلدونی ۲۴۰ ساخت ایتالیا استفاده شد؛ مشخصات فنی این تراکتور در جدول ۲ ارائه شده است. برای آزمایش‌های مربوط به سیستم حرکتی، دیفرانسیل‌های جلو و عقب تراکتور به ترتیب از کار انداخته شد تا تراکتور به صورت جفت دیفرانسیل، دیفرانسیل عقب و جلو حرکت کند. برای ایجاد نیروی کشش ۸ کیلونیوتن یک تانکر سوخت به صورت یدک به اتصال مالبندی تراکتور متصل شد تا نیروی مورد نظر بر تراکتور اعمال شود شرکت سازنده تراکتور، نیروی کشش توصیه شده را برای رسیدن به حداکثر بازده کششی ۸ کیلونیوتن اعلام کرده است. در این تحقیق به منظور بررسی تفاوت عملکرد کششی سیستم‌های حرکتی مختلف این نیرو به تراکتور اعمال شد تا لغزش ایجاد شده در هر یک از تیمارهای مختلف بررسی شود.

در صورت اعمال نیروی کششی پایین ممکن است هیچ تفاوت خاصی در میزان لغزش سیستم‌های حرکتی مختلف مشاهده نشود.

جدول ۱- بعضی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در مزرعه تحقیقاتی

Table 1- Physical Properties of the Field Soil of Research

مقدار Property	خصوصیت Property	
45.66	Sand (%)	شن (درصد)
29.34	Silt (%)	سیلت (درصد)
25	Clay (%)	رس (درصد)
0.2	Organic matter	ماده آلی (درصد)
10.13	Field capacity based on dry weight (%)	ظرفیت مزرعه ای بر پایه وزن خشک (درصد)
1102	Dry bulk density	جرم مخصوص ظاهری خاک (کیلو گرم بر مکعب)
15	Moisture content based on dry weight (%)	رطوبت (درصد)

جدول ۲- برخی مشخصات فنی تراکتور گلدونی ۲۴۰ (دیزل ۳ سیلندر)

Table 2- Tractor characteristics

مقدار value	واحد Unit	مشخصات Specifications	
30.8	kW	Engine power	توان موتور
705	kg	Static weight on front tire	وزن ایستایی محور جلو
360	kg	Static weight on rear tire	وزن ایستایی محور عقب
200	KPa	Inflation pressure of wheels (7.5R-16)	فشار باد تایر جلو و عقب (7.5R-16)

برای مقایسه تراکم ایجاد شده در تیمارهای مختلف، از تغییرات جرم مخصوص ظاهری خاک به عنوان معیار مقایسه‌ها استفاده شد. برای به دست آوردن جرم مخصوص ظاهری خاک، نمونه‌هایی از خاک عمق‌های مختلف (۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر) با استفاده از استوانه‌های نمونه برداری استاندارد (ارتفاع و قطر ۵ سانتی‌متر) برداشته و پس از خشک کردن در آون به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس، جرم مخصوص ظاهری آنها محاسبه شد. به منظور ارزیابی صحت مقادیر به دست آمده از طریق استوانه‌ها، سه سنسور جابه‌جایی در سه جهت افقی، جانبی و عمودی در امتداد مسیر نمونه برداری در عمق ۳۰ سانتی‌متری خاک کار گذاشته شد (شکل ۱). برای اندازه‌گیری جابه‌جایی خاک، یک مبدل جابه‌جایی با تغییرات خطی (model DHL-A-50)، حساسیت

۵۰ mv/mm و حداکثر جابه‌جایی ۷۰ میلی‌متر استفاده شد. دو صفحه به دقت در نقاط انتهایی مبدل برای انتقال جابه‌جایی خاک به مبدل نصب شد (شکل مخصوص ظاهری خاک در ابتدا ۱۱۰۲ کیلوگرم بر متر مکعب بود که با استفاده از استوانه‌های نمونه برداری اندازه‌گیری شد. برای تعیین تغییرات در جرم مخصوص ظاهری خاک با استفاده از مبدل جابه‌جایی، جرم خاک قرار گرفته در داخل یک مکعب فرضی با ابعاد مطابق با سه مبدل با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد.

$$m = \rho_1 V = \rho_1 l_{x1} l_{y1} l_{z1} \quad (1)$$

که در آن،

m = جرم خاک (کیلوگرم)؛ ρ_1 = جرم مخصوص ظاهری اولیه خاک (کیلوگرم بر متر مکعب)؛ l_{x1} =

آزمایش‌ها در کانالی به طول ۳ متر و عرض ۱ متر و عمق ۰/۶ متر به اجرا در آمد. بعد از هر آزمایش، خاک از محل آزمایش تخلیه و الک شد تا تراکم ایجاد شده در اثر آزمایش قبلی از بین برود. خاک بار دیگر با شرایط مشخص به داخل محل حفر شده ریخته شد. برای جلوگیری از مخلوط شدن خاک با خاک زیرین و حفظ رطوبت (در محدوده ۱۰ تا ۱۳ درصد)، از پلاستیک در کنار کانال حفر شده استفاده شد و آماده کردن خاک و اضافه کردن رطوبت برای آزمایش روی این پلاستیک دنبال شد. برای جلوگیری از تبخیر رطوبت در هنگام وقفه در عملیات، روی خاک در کانال با پلاستیک پوشانده شد.

طول اولیه مبدل طولی (متر)؛ l_{y1} = طول اولیه مبدل جانبی (متر)؛ و l_{z1} = طول اولیه مبدل عمودی (متر).

$$\rho_2 = \frac{m}{V} = \frac{m}{l_{2x} l_{2y} l_{2z}} \quad (2)$$

که در آن،

ρ_2 = جرم مخصوص ظاهری نهایی خاک (کیلوگرم بر متر مکعب)؛ l_{x2} = طول نهایی مبدل طولی (متر)؛ l_{y2} = طول نهایی مبدل جانبی (متر)؛ و l_{z2} = طول نهایی مبدل عمودی (متر).

برای یکنواختی در آزمایش‌ها و جلوگیری از خطاهای ناشی از تغییرات بافت خاک، تمام



شکل ۱- قرارگیری مبدل‌های جابه‌جایی به همراه صفحات انتهایی در داخل چاله آزمایشی در جهت‌های طولی، جانبی و عمودی

Fig. 1- Placement of strain transducers including endplates inside soil profile in longitudinal, lateral and vertical directions

محرك محاسبه شد. با داشتن شعاع غلتش چرخ محرك، مسافت طی شده در حالت تئوری محاسبه شد. با مشخص بودن مسافت واقعی، میزان لغزش با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد.

$$S(\%) = \left(1 - \frac{l}{l_0}\right) \times 100 \quad (3)$$

که در آن،

S = لغزش چرخ محرك (درصد)؛ l = مسافت طی شده واقعی (متر)، و l_0 = مسافت طی شده تئوری (متر).

برای محاسبه لغزش چرخ محرك نیاز بود تا مسافت طی شده در حالت تئوری و در حالت واقعی اندازه‌گیری شود. مسافت طی شده در حالت تئوری با یک حسگر مغناطیسی و چرخ دنده ۳۴ دندانه محاسبه شد که روی چرخ محرك نصب شده بود (شکل ۲). با عبور هر دندانه از مقابل حسگر مغناطیسی یک پالس از حسگر به پالس‌متر ارسال می‌شد و با تقسیم عدد ثبت شده در نمایشگر پالس‌متر دیجیتال بر عدد ۳۴، تعداد دورهای چرخ



شکل ۲- حسگر سرعت چرخ برای اندازه‌گیری چرخش چرخ محرک
Fig. 2- Wheel speed transducer for measuring the tire rotation

نتایج و بحث

بیشترین آن در دوچرخ محرک دیده شد. این روند نیز در تحقیق بوتتا و همکاران (Botta *et al.*, 2012) گزارش شده است.

علت افزایش تراکم با تغییر سیستم حرکتی را می‌توان به سطوح لغزش متفاوت در هر یک از این سیستم‌ها نسبت داد. با توجه به درصد لغزش کمتر سیستم جفت دیفرانسیل نسبت به دو حالت دیگر دارای کمترین میزان تراکم بود. از سوی دیگر، به دلیل حرکت کردن چرخ محرک روی خاک دست نخورده در حالت دوچرخ محرک جلو، لغزش چرخ محرک در این حالت بیشتر از لغزش چرخ محرک در حالت دوچرخ محرک عقب بوده و باعث ایجاد تراکم بیشتر در خاک شده است. در تحقیقات محققان دیگر (Raghavan *et al.*, 1977; Battiato *et al.*, 2015) گزارش شده است که با افزایش لغزش، تراکم خاک افزایش می‌یابد. با کاهش فشار باد تایر تراکم خاک کاهش پیدا کرده است؛ میزان کاهش تراکم خاک در اثر کاهش فشار باد تایر در عمق ۲۰ سانتی‌متری قابل توجه است ولی دیده شد که با افزایش عمق، اثر کاهش فشار باد تایر تا حدی از بین رفته و بین تراکم‌های ایجاد شده در فشارهای مختلف باد تایر تفاوت چندانی ایجاد نشده است.

نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس اثر اصلی و اثر متقابل سیستم حرکتی، سرعت پیشروی، عمق نمونه‌برداری، بار محوری و فشار باد تایر بر جرم مخصوص ظاهری خاک در جدول ۳ ارائه شده است. داده‌های جدول نشان می‌دهد که تغییرات عوامل ذکر شده در محدوده مورد مطالعه تاثیر معنی‌داری بر جرم مخصوص ظاهری خاک دارد و تمامی اثرهای اصلی فاکتورهای آزمایشی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار هستند.

اثر سه‌گانه سیستم حرکتی، فشار باد تایر و عمق بر تراکم خاک

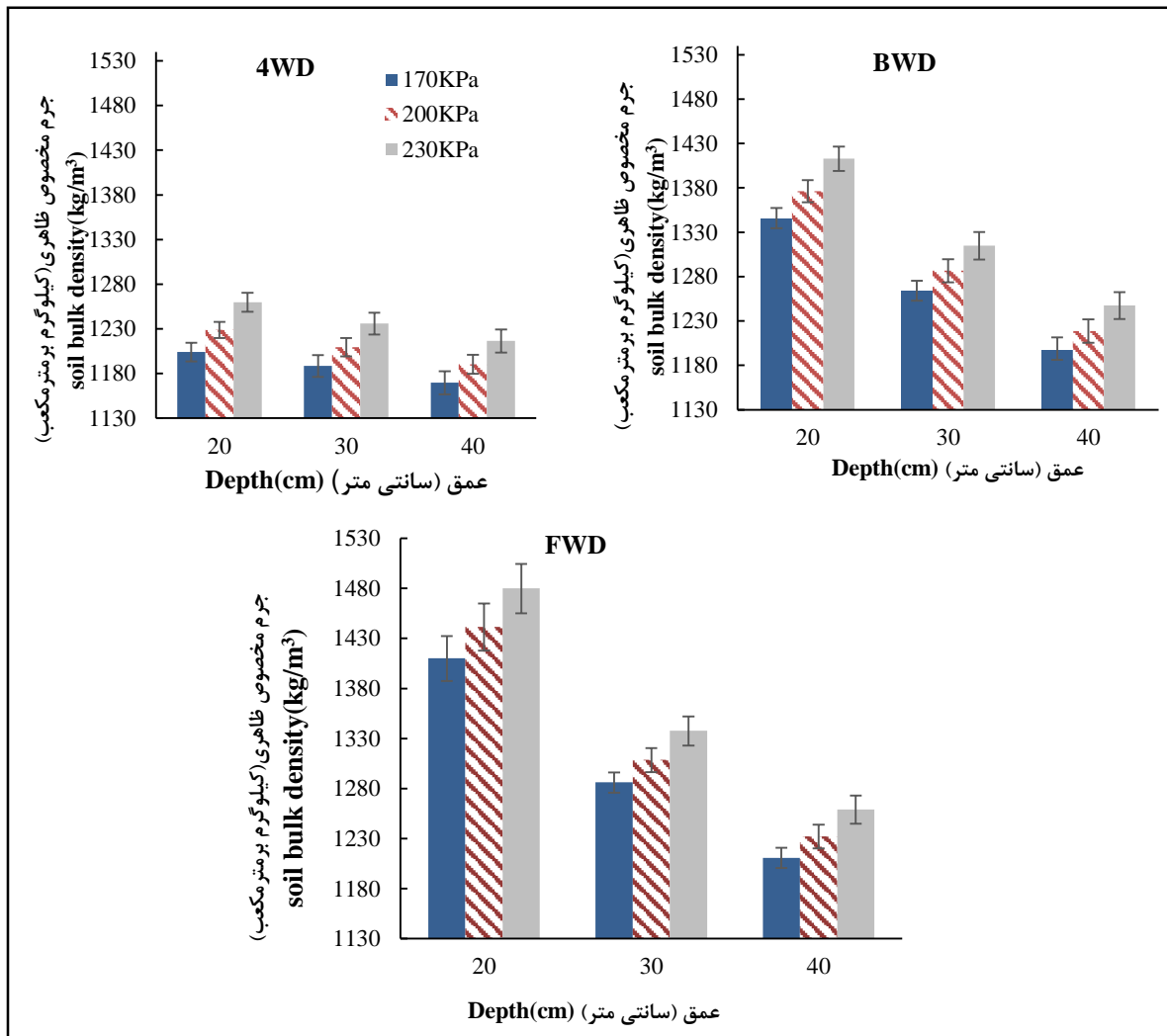
شکل ۳ نشان می‌دهد که با افزایش عمق خاک، تراکم خاک کاهش یافته که در مطالعات محققان دیگر هم گزارش شده است (Stafford & Mattos, 1981). این امر بر اساس قانون بوزینسک (1998) است که هرچه عمق بیشتر شود به همان نسبت تنش وارده کمتر می‌شود و در عمق‌های پایین‌تر این تنش از بین می‌رود. به همین دلیل تراکم نیز متناسب با آن کاهش می‌یابد. با تغییر سیستم حرکتی از چهارچرخ محرک به دوچرخ محرک عقب و دوچرخ محرک جلو، تغییر قابل توجهی در تراکم خاک ایجاد و کمترین آن در چهارچرخ محرک و

جدول ۳- جدول تجزیه واریانس اثر پارامترهای مختلف بر جرم مخصوص ظاهری خاک

Table 3- Anova statistics for the effect of different parameters on soil bulk density

F	میانگین مربعات Mean square	مجموع مربعات Sum of squares	درجات آزادی DOF	منابع Factor
60848.82**	1281414	2562829	2	بار محوری Load
42777.90**	900859	1801718	2	سیستم حرکتی driving system
8497.70**	178953	357906	2	فشار باد تایر inflation pressure
53487.28**	1126388	2252776	2	عمق نمونه‌برداری Depth
25770.22**	542695	1085389	2	سرعت Speed
1870.89**	39399	157596	4	بار محوری×سیستم حرکتی Load× driving system
284.18**	5985	23938	4	بار محوری×فشار باد تایر Load× inflation pressure
1231.13**	25926	103706	4	بار محوری×عمق Load× Depth
21.70**	457	1828	4	بار محوری×سرعت Load× Speed
12.42**	261	1046	4	سیستم حرکتی×فشار باد تایر driving system× inflation pressure
7642.37**	160940	643762	4	سیستم حرکتی×عمق driving system× Depth
20.72**	436	1745	4	سیستم حرکتی×سرعت driving system× Speed
73.40**	1546	6183	4	فشار باد تایر×عمق inflation pressure× Depth
353.48**	7444	29776	4	فشار باد تایر×سرعت inflation pressure× Speed
24.82**	523	2091	4	عمق×سرعت Depth×Speed
0.46ns	10	78	8	بار محوری×سیستم حرکتی×فشار باد تایر Load× driving system× inflation pressure
1453.86**	30617	244935	8	بار محوری×سیستم حرکتی×عمق Load× driving system× Depth
0.70ns	15	118	8	بار محوری×سیستم حرکتی×سرعت Load× driving system× Speed
34.71**	731	5847	8	بار محوری×فشار باد تایر×عمق Load× inflation pressure× Depth
1.73ns	36	291	8	بار محوری×فشار باد تایر×سرعت Load× inflation pressure× Speed
0.58ns	12	98	8	بار محوری×عمق×سرعت Load× Depth×Speed
3.66**	77	616	8	سیستم حرکتی×فشار باد تایر×عمق Depth× driving system× inflation pressure
0.29ns	6	49	8	سیستم حرکتی×فشار باد تایر×سرعت driving system× inflation pressure× Speed
3.96**	83	666	8	سیستم حرکتی×عمق×سرعت driving system× Depth× Speed
0.84ns	18	142	8	فشار باد تایر×عمق×سرعت inflation pressure× Depth×Speed
0.95ns	20	320	16	بار محوری×سیستم حرکتی×فشار باد تایر×عمق Load× driving system× inflation pressure×Depth
0.01ns	0	4	16	بار محوری×سیستم حرکتی×فشار باد تایر×سرعت Load× driving system× inflation pressure×Speed
0.62ns	13	208	16	بار محوری×سیستم حرکتی×عمق×سرعت Load× driving system× Depth× Speed
0.14ns	3	49	16	بار محوری×فشار باد تایر×عمق×سرعت Load× inflation pressure× Depth× Speed
0.06ns	1	20	16	سیستم حرکتی×فشار باد تایر×عمق×سرعت driving system× inflation pressure×Depth×Speed
0.01ns	0	6	32	بار محوری×سیستم حرکتی×فشار باد تایر×عمق×سرعت Load× driving system× inflation pressure×Depth×Speed
	21	10235	486	خطا Error
		9295970	728	کل Total

ns غیر معنی‌دار و ** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد.



شکل ۳- تغییرات جرم مخصوص نسبت به عمق، فشار باد تایر و سیستم حرکتی

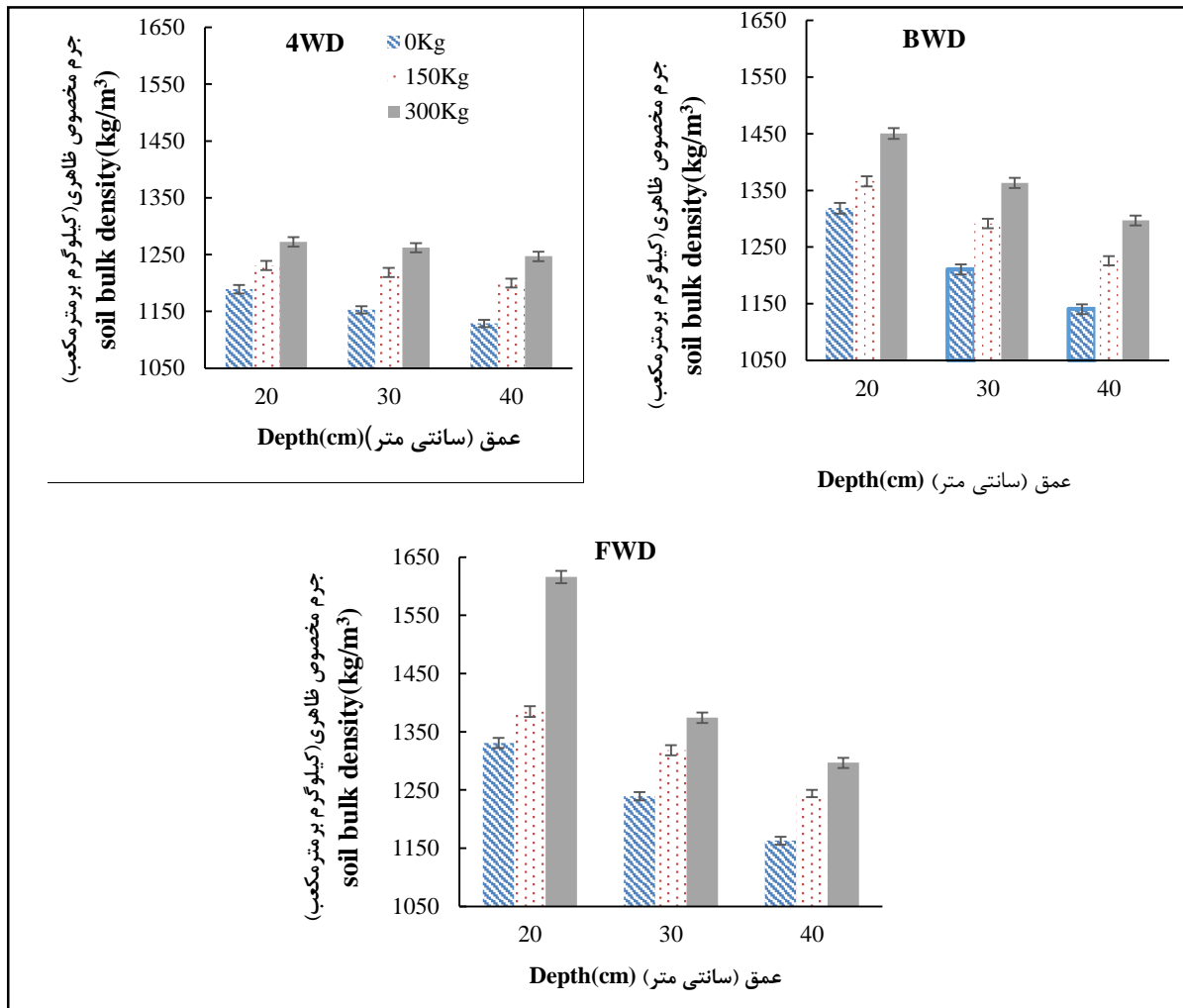
Fig. 3- Changes of bulk density relative to the depth, inflation pressure and driving system type

که با افزایش بار محوری، تنش در عمق‌های پایین‌تر نیز بیشتر می‌شود و به تراکم تحتانی خاک می‌انجامد. به هنگام حرکت با سیستم چهارچرخ محرک، تغییرات جرم مخصوص نسبت به عمق در تمامی بارهای محوری خطی است اما به هنگام حرکت با سیستم دوچرخ محرک عقب این روند از حالت خطی خارج و اختلاف بین تراکم خاک سطحی و زیرین کمتر می‌شود.

اثر سه‌گانه سیستم حرکتی، بار محوری و عمق در تراکم خاک

با توجه به شکل ۴ می‌توان دریافت که افزایش بار محوری باعث تراکم خاک می‌شود.

نکته قابل توجه این است که با افزایش بار محوری، تراکم از خاک سطحی به خاک زیرین نیز منتقل می‌شود و هرچه بار محوری بیشتر شود جرم مخصوص خاک زیرین به جرم مخصوص خاک سطحی نزدیک‌تر می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد



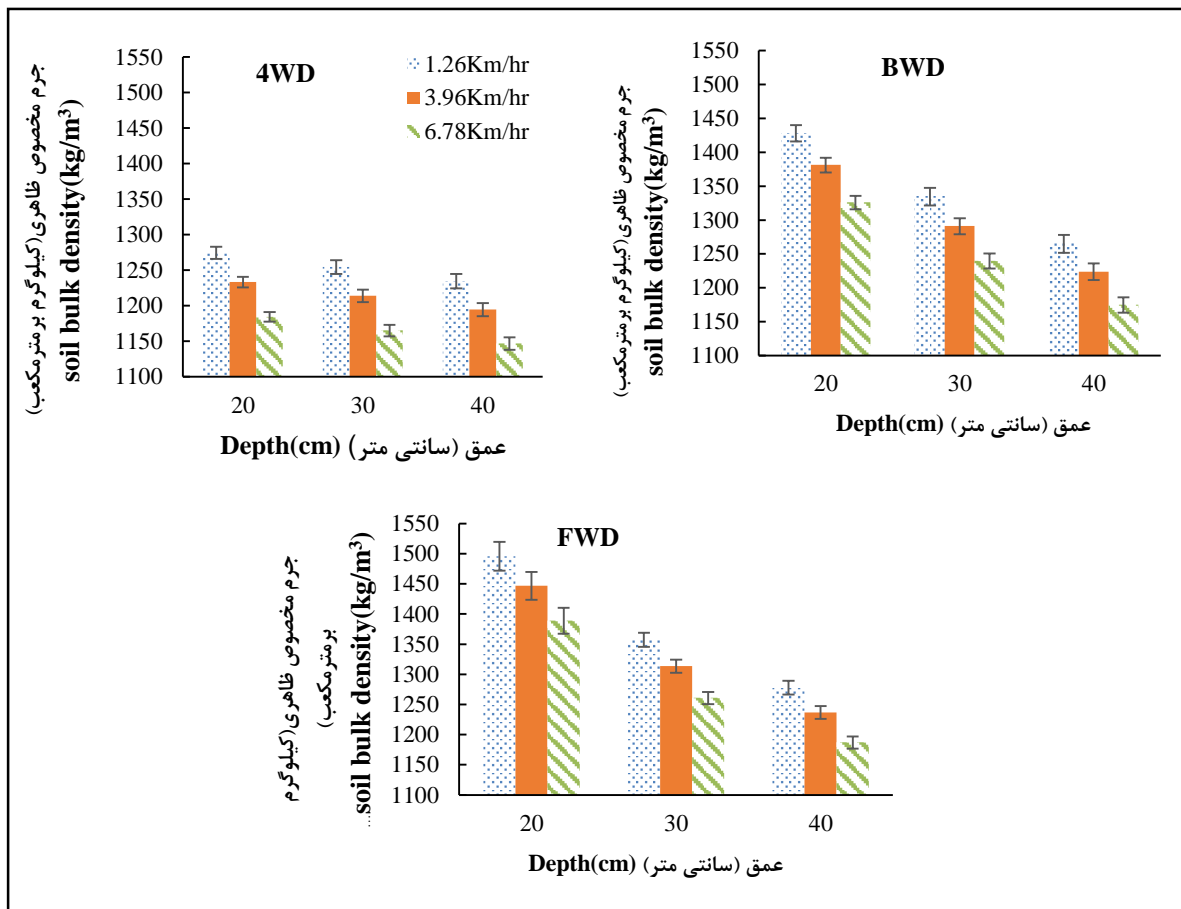
شکل ۴- تغییرات جرم مخصوص نسبت به عمق، بار محوری (وزنه بالاست) و سیستم حرکتی

Fig. 4- Changes of bulk density relative to the depth, Axial load (ballast) and driving system type

جرم مخصوص و عمق خطی است و شیب نمودار در سرعت ۱/۲۶ بیشتر است تا در سایر سرعت‌ها که نشان می‌دهد کاهش سرعت در خاک سطحی تاثیر بارزتری دارد و با افزایش عمق از اثر کاهش سرعت کاسته می‌شود. استفاده از سیستم حرکت چهارچرخ محرک، انتقال تراکم به خاک زیرین را کمتر می‌کند. کاهش تراکم خاک با افزایش سرعت می‌تواند به علت کاهش زمان بارگذاری نیرو بر سطح خاک باشد که به وضوح در تحقیقات محققان دیگر (Patel & Mani, 2011; Li & Schindler, 2013; Shahgholi & Abuali, 2015) مشاهده شده است.

اثر سه‌گانه نوع سیستم حرکتی، سرعت حرکت و عمق در تراکم خاک

رابطه بین سیستم حرکتی، سرعت حرکت و عمق در شکل ۵ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد در تمامی وضعیت‌ها افزایش عمق نمونه‌برداری و سرعت باعث ایجاد تراکم کمتر در خاک شده است، با افزایش عمق نمونه‌برداری، تنش وارد بر خاک کاهش و با افزایش سرعت زمان اعمال نیرو بر خاک کاهش می‌یابد که در نتیجه باعث کاهش جابه‌جایی خاک می‌شود. در حالت چهارچرخ محرک برای تمامی سرعت‌ها رابطه بین



شکل ۵- تغییرات جرم مخصوص نسبت به عمق، سرعت حرکت تراکتور و سیستم حرکتی
 Fig. 5- Changes of bulk density relative to the depth, speed and driving system type

ظاهری در عمق ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متری به یک میزان افزایش یافته است. در وزنۀ بالاست ۳۰۰ کیلوگرم، بیشترین تراکم خاک سطحی و خاک زیرین رخ داده است به طوری که جرم مخصوص ظاهری خاک در عمق ۴۰ سانتی ۱۳۱۲ و در عمق ۲۰ سانتی‌متری ۱۴۸۲ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمده است. با کاهش فشار باد تایر می‌توان از تراکم در خاک سطحی جلوگیری کرد اما کاهش فشار باد تایر تاثیر چندانی بر تراکم ایجاد شده در خاک زیرین ندارد در حالی که با کاهش بار وارد شده بر چرخ محرک به طور هم‌زمان می‌توان از تراکم ایجاد شده در خاک سطحی و خاک زیرین جلوگیری کرد. دلیل این موضوع می‌تواند تنش‌ی باشد که چرخ‌ها به خاک

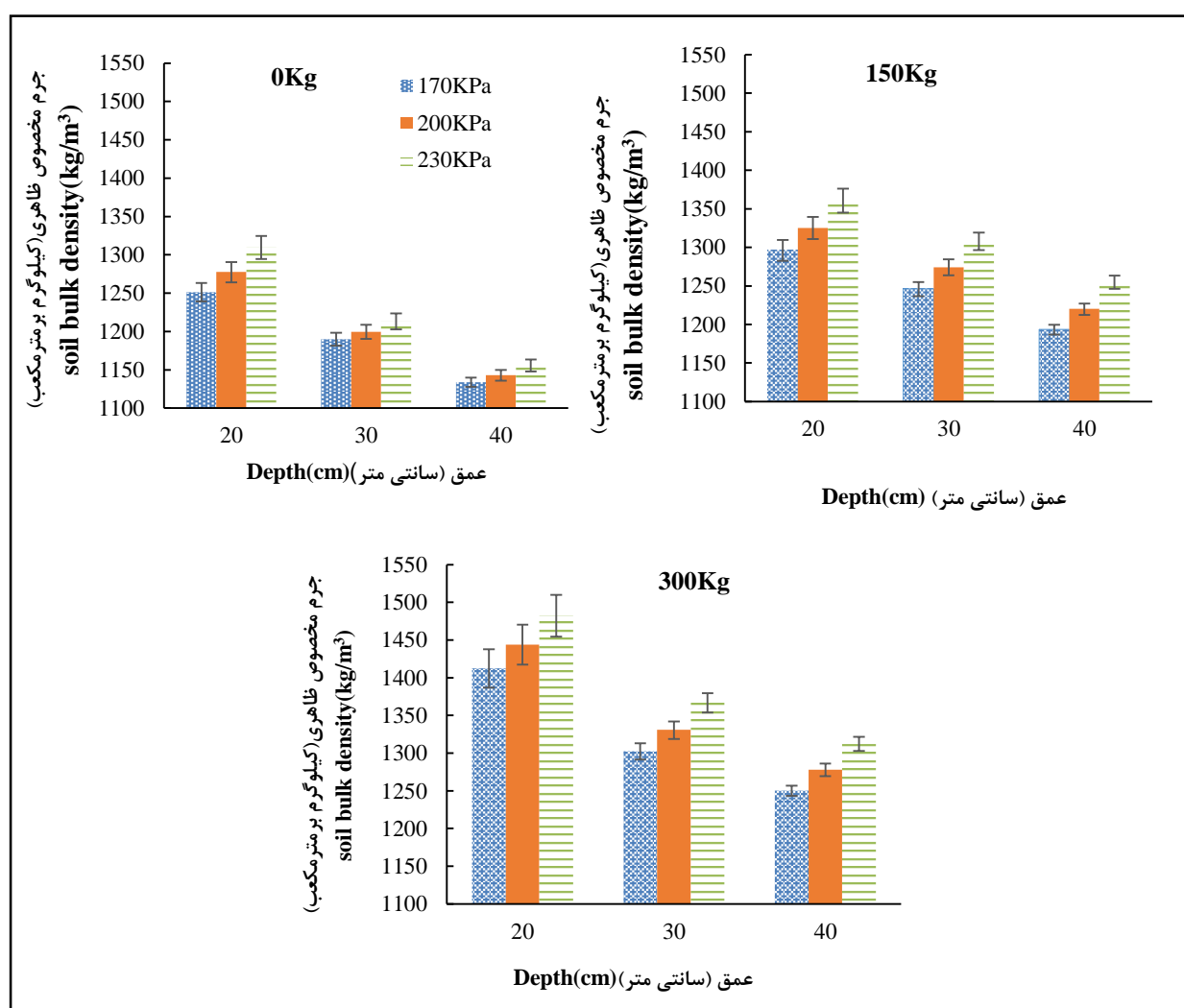
اثر سه‌گانه مقدار بار محوری، فشار باد تایر و عمق در تراکم خاک

اثر سه‌گانه بار محوری، فشار باد تایر و عمق در جرم مخصوص ظاهری در شکل ۶ ارائه شده است. در وزنۀ بالاست، افزایش فشار باد تایر تراکم خاک سطحی را افزایش داده است (کمترین ۱۲۵۰ و بیشترین ۱۳۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب) اما در خاک عمیق تاثیر چندانی نداشته جرم مخصوص ظاهری خاک در عمق ۴۰ سانتی‌متری در هر سه فشار باد تایر تقریباً یکسان است (کمترین ۱۱۳۳ و بیشترین ۱۱۵۵ کیلوگرم بر متر مکعب). در وزنۀ بالاست ۱۵۰ کیلوگرم، تاثیر افزایش فشار باد تایر بر تراکم خاک سطحی و زیرین یکسان است و جرم مخصوص

می‌یابد و نشان‌دهنده این امر است که افزایش بار چرخ محرک بیشترین تاثیر را بر تراکم لایه‌های عمیق خاک دارد.

در تحقیقی دیگر این نتیجه به دست آمد که تراکم خاک سطحی تا حدود زیادی به فشار تماسی چرخ-خاک بستگی دارد اما تراکم در خاک زیرین با بار وارد بر چرخ محرک در ارتباط است (Botta *et al.*, 1999)

سطحی وارد می‌کنند اما میزان انتقال این تنش به خاک عمیق‌تر ناچیز است. ارویدسون و همکاران (Arvidsson *et al.*, 2011) گزارش داده‌اند که در عمق ۴۰ سانتی‌متری خاک، تنش‌هایی که در اثر حرکت تراکتورهای تک چرخ، دوبل چرخ و سیستم چرخ زنجیری بر خاک وارد می‌شود، تقریباً یکسان است. اما با افزایش بار چرخ محرک، تنش وارد شده بر خاک در عمق ۴۰ سانتی‌متری افزایش



شکل ۶ - تغییرات جرم مخصوص نسبت به عمق، فشار بادتایر و بار محوری

Fig. 6- Changes of bulk density relative to the depth, inflation pressure and axial load (ballast)

آورده شده است. ضریب تعیین این مدل ۰/۹۲ است. مدل‌های رگرسیونی مزیت‌شان آن است که به طور

در جدول ۴ مشخصه‌های آماری مدل رگرسیون گام به گام پیش‌بینی درصد افزایش جرم مخصوص

مستقیم به تأثیر هر یک از عوامل می‌پردازند و مدلی ارائه می‌دهند که اهمیت و تأثیر هر یک از عوامل در آن به وضوح مشخص است. با توجه به جدول ۴ و ضریب‌های استاندارد ذکر شده در آن می‌توان

این‌گونه گفت که بار محوری، عمق، سیستم حرکتی، سرعت و سرانجام فشار باد تأیر به ترتیب دارای بیشترین تأثیر بر جرم مخصوص هستند.

جدول ۴- مشخصه‌های آماری مدل رگرسیون گام به گام برای پیش‌بینی جرم مخصوص ظاهری خاک بر اساس بار محوری، عمق، سیستم حرکتی، سرعت، فشار باد تأیر

Table 4- Statistical characteristics of stepwise regression model for predicting the soil bulk density based on the axial load, driving system, speed, inflation pressure and depth

sig	t	ضرایب استاندارد شده	ضرایب استاندارد نشده		مدل Model
		Standardized Coefficients Beta	Std. Error	B	
0.000	29.903		22.209	664.117	ثابت (Constant)
0.000	36.643	0.525	0.013	0.484	بار محوری Load
0.000	-34.169	-0.489	0.198	-6.765	عمق Depth
0.000	29.833	0.427	1.980	59.067	سیستم حرکت driving system
0.000	-23.852	-0.341	0.717	-17.109	سرعت Speed
0.000	13.676	0.196	0.066	0.903	فشار باد تأیر inflation pressure

جدول ۵ ارائه شده است. داده‌ها نشان می‌دهد که تغییرات عوامل ذکر شده در محدوده مورد مطالعه تأثیر معنی‌داری بر لغزش چرخ محرک دارد و تمامی اثرهای فاکتورهای آزمایشی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار هستند.

تجزیه و تحلیل آماری اثر پارامترهای بررسی شده در لغزش چرخ‌های محرک نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثرهای اصلی و متقابل نوع سیستم حرکتی، سرعت پیشروی، بار محوری و فشار باد تأیر بر لغزش چرخ محرک در

جدول ۵- تجزیه واریانس اثر پارامترهای مختلف بر لغزش چرخ محرک
Table 5- Anova statistics for the effect of different parameters on slip

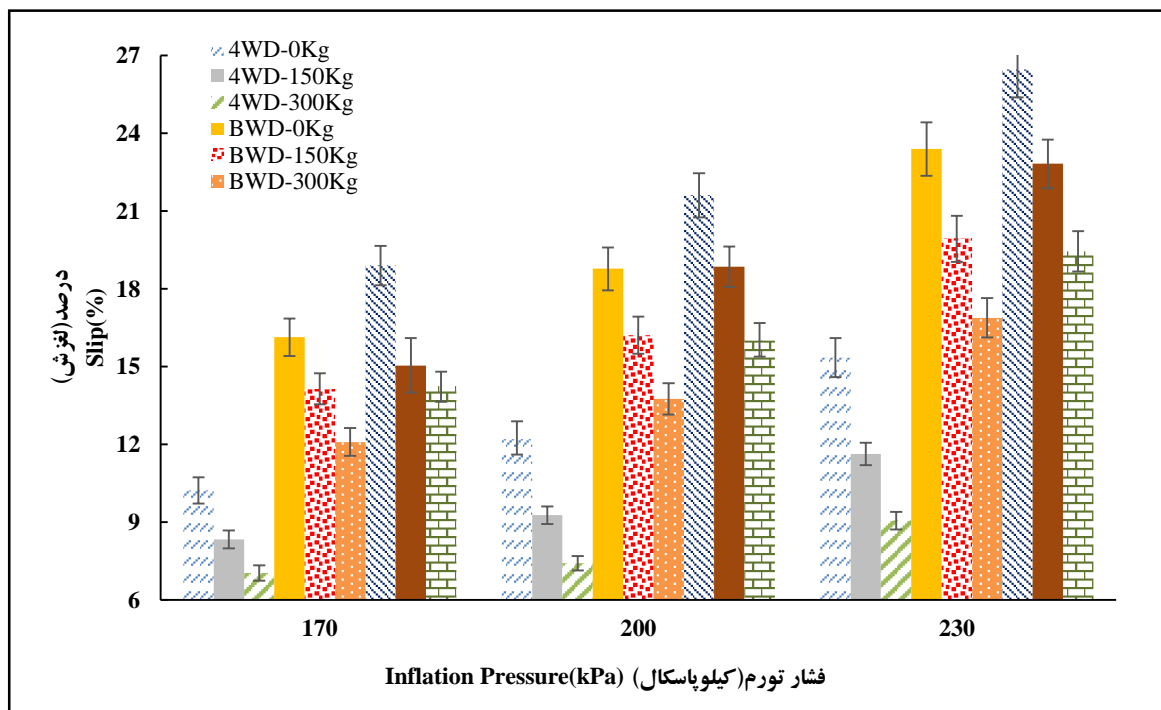
F	میانگین مربعات Mean square	مجموع مربعات Sum of squares	درجات آزادی DOF	منابع Factor
18952.75**	558.64	117	2	بار محوری Load
62555.09**	1843.83	3687	2	سیستم حرکتی driving system
20731.45**	611.07	1222	2	فشار باد تایر inflation pressure
13204.67**	389.21	778	2	سرعت Speed
76.54**	2.26	902	4	بار محوری×سیستم حرکتی Load× driving system
417.17**	12.30	49.18	4	بار محوری× فشار باد تایر Load× inflation pressure
205.98**	6.07	24.29	4	بار محوری× سرعت Load× Speed
698.59**	20.59	82.36	4	سیستم حرکتی ×فشار باد تایر driving system× inflation pressure
421.34**	12.42	49.68	4	سیستم حرکتی × سرعت driving system× Speed
159.85**	4.71	18.85	4	فشار باد تایر× سرعت inflation pressure× Speed
36.35**	1.07	8.57	8	بار محوری×سیستم حرکتی × فشار باد تایر Load× driving system× inflation pressure
33.98**	1.00	8.01	8	بار محوری×سیستم حرکتی × سرعت Load× driving system× Speed
36.09**	1.06	8.51	8	بار محوری× فشار باد تایر × سرعت Load× inflation pressure× Speed
33.22**	0.98	7.83	8	سیستم حرکتی ×فشار باد تایر×سرعت driving system× inflation pressure× Speed
30.58**	0.90	14.42	16	بار محوری×سیستم حرکتی × فشار باد تایر×سرعت Load× driving system× inflation pressure× Speed
	0.03	4.77	162	خطا Error
		7091	242	کل Total

**= معنادار در سطح احتمال ۱ درصد.

اثر سه‌گانه فشار باد تایر، سیستم حرکتی و بار محوری بر لغزش چرخ محرک
افزایش بار محوری و کاهش فشار باد تایرها باعث کاهش لغزش چرخ محرک می‌شود. سیستم حرکت چهارچرخ محرک، نسبت به دو سیستم حرکتی دیگر، به میزان قابل توجهی باعث کاهش لغزش می‌شود (شکل ۷). افزایش بار محوری و کاهش فشار باد تایر هر دو به صورت مستقیم باعث

سیستم حرکتی از دو چرخ محرک و عقب به حالت چهارچرخ محرک، در مقایسه با اضافه کردن وزن بالاست و کم کردن فشار باد تایر، تأثیر بیشتری بر کاهش لغزش چرخ محرک دارد به طوری که در سیستم چهارچرخ محرک، بدون وزن بالاست و فشار تورم ۲۳۰ کیلوپاسکال، مقدار لغزش ۱۵/۳ درصد است در حالی که در سیستم دوچرخ محرک عقب با وزن بالاست ۳۰۰ کیلوگرم و فشار باد تایر ۲۳۰ کیلوپاسکال، لغزش ۱۶/۸ درصد و در سیستم دوچرخ محرک عقب بدون وزن بالاست و فشار تورم ۱۷۰ کیلوپاسکال، لغزش ۱۶/۱۴ درصد است. سیستم چهارچرخ محرک ضمن اینکه لغزش کمتری به همراه دارد احتیاج به وزن بالاست (که موجب تراکم بیشتر خاک می‌شود) و کم کردن فشار باد تایر (که باعث خرابی لاستیک می‌شود) ندارد.

افزایش سطح تماس چرخ با خاک می‌شوند و هرچه سطح تماس چرخ با خاک بیشتر شود لغزش چرخ محرک کمتر خواهد شد، چنین روندی در کار محققان دیگر (Keller, 2005; Battiato & Diserens, 2013; Pravin *et al.*, 2013) شده است. برای ایجاد کشش بهتر، افزایش سطح تماس چرخ محرک با خاک اهمیت دارد نه سطح تماس چرخ‌های غیر محرک. هنگام استفاده از سیستم چهارچرخ محرک، تمام چرخ‌ها محرک‌اند و بنابراین سطح تماس آنها با خاک در نظر گرفته می‌شود. اما هنگام استفاده از سیستم‌های دوچرخ محرک تنها چرخ‌های یکی از محورها محرک‌اند و در ایجاد کشش نقش دارد و بنابراین سطح تماس آنها نصف حالت چهارچرخ محرک خواهد بود. با بررسی دقیق‌تر شکل ۷ می‌توان نتیجه گرفت که تغییر



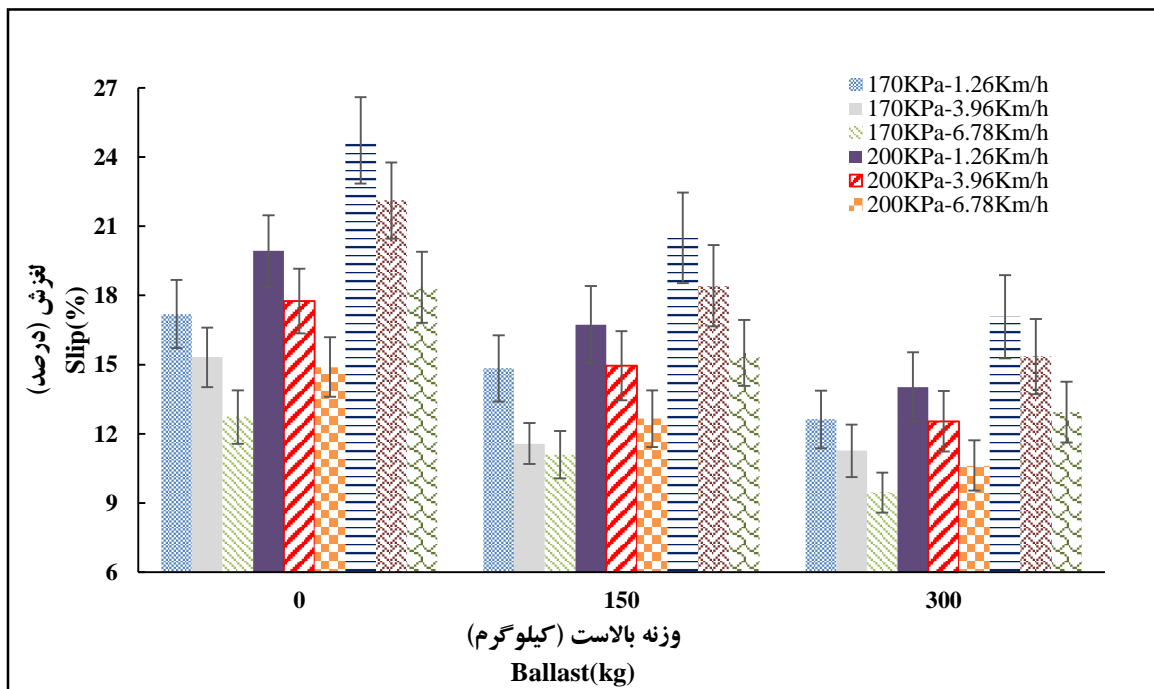
شکل ۷ - تغییرات لغزش نسبت به سیستم حرکتی، فشار باد تایر و بار محوری

Fig. 7- Changes of slip relative to the inflation pressure, Axial load (ballast) and driving system type

درصد کاهش می‌یابد. محققانی چند به بررسی اثر متقابل فشار باد تایر و بار محوری پرداخته‌اند و به نتایجی مشابه دست یافته‌اند. افزایش بار محوری باعث کاهش لغزش و افزایش بهره‌وری کار می‌شود، اما مصرف سوخت و تراکم خاک را افزایش می‌دهد، بنابراین برای دستیابی به لغزش بهینه تا جایی که چرخ محرک دچار آسیب نشود، به جای افزایش بار محوری، بهتر است فشار باد تایر کاهش داده شود (Pravin *et al.*, 2013; Damauskas *et al.*, 2015; Janulevičius *et al.*, 2018).

در جدول ۵، مشخصه‌های آماری مدل رگرسیون گام به گام پیش‌بینی لغزش چرخ محرک آورده شده است. ضریب تعیین این مدل ۰/۹۵ است. با توجه به جدول ۵ و ضریب‌های استاندارد ذکر شده در آن نوع سیستم حرکتی، فشار باد تایر، بار محوری و سرعت حرکت به ترتیب دارای بیشترین تاثیر بر درصد لغزش چرخ محرک هستند.

در شکل ۸ مشخص است که با افزایش سرعت، لغزش چرخ محرک کاهش یافته است، اما افزایش سرعت تنها در صورتی به کاهش لغزش می‌انجامد که نیروی کشش ایجاد شده توسط تراکتور نسبتاً کم باشد اما اگر این کشش بیش از حد توان تراکتور باشد افزایش سرعت باعث ایجاد لغزش بیشتری می‌شود (Kumar Lohan & Aggarwal, 2001). با توجه به شکل ۸ مشخص می‌شود که در محدوده مورد مطالعه، سرعت کمترین و فشار باد تایر بیشترین تاثیر را بر لغزش دارد. بیشترین میزان لغزش (۲۴/۷۵ درصد) در سرعت ۱/۲۶ کیلومتر بر ساعت و فشار تورم ۲۳۰ کیلوپاسکال بدون وزنه بالاست رخ داده است، با افزایش سرعت به ۶/۷۸ کیلومتر بر ساعت لغزش به ۱۸/۳۵ درصد کاهش یافته است. اگر به جای اضافه کردن سرعت، وزنه بالاست به ۳۰۰ کیلوگرم افزایش یا فشار باد تایر به ۱۷۰ کیلوپاسکال کاهش داده شود لغزش به ۱۷/۱



شکل ۸ - تغییرات لغزش نسبت به سرعت، فشار باد تایر و بار محوری

Fig. 8- Changes of slip relative to the inflation pressure, Axial load (ballast) and speed

جدول ۶- مشخصه‌های آماری مدل رگرسیون گام به گام برای پیش‌بینی لغزش چرخ محرک بر اساس بار محوری، سیستم حرکتی، سرعت، فشار باد تایر

Table 6- Statistical characteristics of stepwise regression model for predicting the slip of the drive wheel based on the axial load, driving system, speed, inflation pressure

sig	t	ضرایب استاندارد شده	ضرایب استاندارد نشده		مدل Model
		Standardized Coefficients Beta	Unstandardized Coefficients Std. Error	B	
0.000	9.458		1.316	12.448	ثابت (Constant)
0.000	37.827	0.696	0.122	4.606	سیستم حرکت driving system
0.000	22.297	0.410	0.004	0.091	فشار باد تایر inflation pressure
0.000	-21.499	-0.396	0.001	-0.017	بار محوری Load
0.000	-17.996	-0.331	0.044	-0.794	سرعت Speed

نتیجه‌گیری

- افزایش بار محوری موجب می‌شود عملکرد حرکتی چرخ محرک بهبود یابد اما تراکم خاک را افزایش می‌دهد و آن را به عمق خاک منتقل می‌کند.
- استفاده از سیستم حرکت چهارچرخ محرک (در مقایسه با افزایش بار محوری یا کاهش فشار باد تایر)، با توجه به آسیب کمتری که به خاک وارد می‌کند، گزینه بهتری برای بالا بردن عملکرد تراکتور، صرفه جویی در انرژی مصرفی و جلوگیری از آسیب رسیدن به ساختمان خاک است.

نتایج کلی حاصل از این تحقیق عبارت‌اند از:
- سیستم حرکتی چهارچرخ محرک باعث کاهش شدید تراکم خاک سطحی می‌شود؛ این سیستم در تراکم خاک زیرین نیز تاثیرگذار است، باعث بهبود عملکرد حرکتی تراکتور می‌شود و لغزش را بدون آسیب رساندن به خاک یا تایر کاهش می‌دهد.
- کاهش فشار باد تایر باعث کاهش تراکم خاک سطحی و کاهش لغزش چرخ محرک می‌شود. اما کاهش فشار باد تایر تاثیر چندانی بر کاهش تراکم در خاک زیرین ندارد.

مراجع

- Aliev, K. (2001). Current problems with regard to mechanization and greening of farming in Azerbaijan. *Mezhdunarodnyi Sel'skokhozyaistvennyi Zhurnal*, 5, 57-61.
- Arvidsson, J. (1999). Subsoil compaction research in Sweden-A review. In: van den Akker, J. J. H., Horn, R., & Arvidsson, J. (Eds.) *Experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Community*. Wageningen: Staring Center; 44-49. (Report 168. DLO).

- Arvidsson, J., Westlin, H., Keller, T., & Gilbertsson, M. (2011). Rubber track systems for conventional tractors—Effects on soil compaction and traction. *Soil and Tillage Research*, 117, 103-109.
- Battiato, A., & Diserens, E. (2013). Influence of tyre inflation pressure and wheel load on the traction performance of a 65 kW MFWD tractor on a cohesive soil. *Journal of Agricultural Science*, 5(8), 197-215.
- Battiato, A., Alaoui, A., & Diserens, E. (2015). Impact of normal and shear stresses due to wheel slip on hydrological properties of an agricultural clay loam: Experimental and new computerized approach. *Journal of Agricultural Science*, 7(4), 1-19.
- Blaszkiwicz, Z. (1998). Study on the distribution of penetration resistance of the light soil affected by agricultural tractor tyres. *Problemy Inzynierii Rolniczej*, 6, 5-14.
- Boguzas, V., & Hakansson, I. (2001). Barley yield losses simulation under Lithuanian conditions using the Swedish soil compaction model. Soil Management Department, Lithuanian University of Agriculture, Student 11, Akademija, Kaunas LT-4324, Lithuania.
- Botta, G. G., Jorajuria, C. D., & Draghi, T. L. (1999). Soil compaction during secondary tillage traffic. *Agro-Ciencia*, 15, 139-144.
- Botta, G., Tolon-Becerra, A., Lastra-Bravo, X., & Rivero, D. (2012). Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max* L.) yields in Argentinean pampas. *Soil and Tillage Research*, 120, 92-98.
- Chamen, W. C. T., Moxey, A. P., Towers, W., Balana, B., & Hallett, P. D. (2014). Mitigating arable soil compaction: A review and analysis of available cost and benefit data. *Soil and Tillage Research*, 146, 10-25.
- Chan, K. Y., Oates, A., Swan, A. D., Hayes, R. C., Dear, B. S., & Peoples, M. B. (2006). Agronomic consequences of a tractor wheel soil compaction on a clay soil. *Soil and Tillage Research*, 89, 13-21.
- Damanauskas, V., Janulevičius, A., & Pupinis, G. (2015). Influence of extra weight and tire pressure on fuel consumption at normal tractor slippage. *Journal of Agricultural Science*, 7(2), 55-67.
- Duttman, R., Schwanebeck, M., Nolde, M., & Horn, R. (2014). Predicting soil compaction risks related to field traffic during silage maize harvest. *Soil Science Society of America Journal*, 78, 408-821.
- Etana, A., Larsbo, M., Keller, T., Arvidsson, J., Schjøning, P., Forkman, J., & Jarvis, N. (2013). Persistent subsoil compaction and its effects on preferential flow patterns in a loamy till soil. *Geoderma*, 192, 430-436.
- Febo, P., & Planeta, A. (2000). Wheels or tracks for the tractors of the future. *Macchine e Motori Agricoli*, 58, 50-52.
- Hetz, E. J. (2001). Soil compaction potential of tractors and other heavy agricultural machines used in Chile. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*, 32, 38-42.
- Horn, R., Way, T. R., & Rostek, J. (2003). Effect of repeated tractor wheeling on stress/ strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. *Soil and Tillage Research*, 73, 101-106.

- Janulevičius, A., Damanauskas, V., & Pupinis, G. (2018). Effect of variations in front wheels driving lead on performance of a farm tractor with mechanical front-wheel-drive. *Journal of Terramechanics*, 77, 23-30.
- Keller, T. (2005). A model for the prediction of the contact area and the distribution of vertical stress below agricultural tyres from readily available tyre parameters. *Biosystems Engineering*, 92(1), 85-96.
- Kumar Lohan, S., & Aggarwal, S. (2001). Effect of inflation pressure and ballasting on the tractive performance of tractor. *AMA*, 32(3), 23-26.
- Li, H., & Schindler, C. (2013). Analysis of soil compaction and tire mobility with finite element method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, 227(3), 275-291.
- Maziero, J. V. G., Mialhe, L. G., Correa, I. M., Yanai, K., & Menezes, J. F. (1997). Effects of moving tractor wheel slip on soil compaction. *Bragantia*, 56, 191-197.
- McBride, R. A., McLaughlin, N. B., & Veenhof, D. W. (2000). Performance of wheel and track running gear on liquid manure spreaders. *Canadian Agricultural Engineering*, 42, 19-25.
- Patel, S. K., & Mani, I. (2011). Effect of multiple passes of tractor with varying normal load on subsoil compaction. *Journal of Terramechanics*, 48, 277-284.
- Pravin, J. P., Babasaheb, G., Sachin, W., & Adinath, K. (2013). Effect of ballast and tire inflation pressure on wheel slip. *International Journal of Agricultural Engineering*, 6(2), 375-379.
- Raghavan, G. S. V., Mckyes, E., & Chass, M. (1977). Effect of Wheel Slip on Soil Compaction. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 22, 79-83.
- Ridge, R. (2002). Trends in sugar cane mechanization. *International Sugar Journal*, 104, 164-166.
- Shahgholi, G., & Abuali, M. (2015). Measuring soil compaction and soil behavior under the tractor tire using strain transducer. *Journal of Terramechanics*, 59, 19-25.
- Soane, B. D., Dickson, J. W., & Campbell, D. J. (1982). Compaction by agricultural vehicles: a review. III. Incidence and control of compaction in crop production. *Soil and Tillage Research*, 2, 3-36.
- Stafford, J. V., & Mattos, P. (1981). The effect of forward speed on wheel-induced soil compaction: laboratory simulation and field experiments. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 26, 333-347.
- Svoboda, M., Brennenstul, M., & Pospíšil, J. (2016). Evaluation of changes in soil compaction due to the passage of combine harvester. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brun*, 64, 877-882.



Research Paper

Effect of the Tractor Driving Systems Type on Soil Compaction and Drive Wheel Slip

A. M. Moinfar, Gh. Shahgholi*, Y. Abbaspour-Gilandeh and T. Mesri-Gundoshmian

*Corresponding Author: Associate Professor, Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agricultural and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. Email: gshahgoli@yahoo.com

Received: 21 April 2018, Accepted: 5 November 2018

[http://doi: 10.22092/erams.2018.121717.1256](http://doi.org/10.22092/erams.2018.121717.1256)

Abstract

The four-wheel drive and rear-wheel drive tractors are commonly used in agricultural operations. In order to investigate the effect of a type of driving system a series of tests were performed using the three driving systems of four wheel drive, rear wheel drive and front wheel drive in different axle loads of 0, 150 and 300 kg, tire inflation pressures of 170, 200 and 230 kPa and travel speeds of 1.26, 3.96 and 6.78 km/h. Bulk density was measured as an indicator of soil compaction at different depths of 10, 20, 30 and 40 cm. Also, under the different conditions, the drive wheel slip was measured. To carry out the tests, the four-wheel tractor of Goldoni 240 was used which has the ability to work with mentioned driving systems. The experiments were carried out under controlled conditions in a soil channel with the length of 3 m and a width and depth of 1 and 0.6 m, respectively. Tests were conducted in completely randomised block design with three repetitions and results were analysed using SPSS 22 software. The results showed that by changing the driving system from 4WD to RWD and FWD, there was a significant increase in soil density, with the lowest density associated with 4WD system and the highest density related to FWD. The reason for increasing the density by changing the driving system can be attributed to different slip levels in each of these systems due to the lower slip percentage of the 4WD system than the other two systems. Increasing axial load increased soil bulk density. Of note that with increasing the axial load, the stress was transferred from the surface soil to the subsoil layers. As the axial load on tire increases, the subsoil density was closer to the surface layer. Increased axial load on tire and decreasing tire pressure reduced wheel slip. Stepwise regression model with determination coefficient of 0.92 and according to calculated standard coefficients showed that axial load, soil depth, type of driving system, tractor speed, and finally tire pressure, have the greatest effect on soil bulk density, respectively.

Keywords: Bulk Density, Goldoni Tractor, Four Wheel Drive, Regression Model



© 2021 Agricultural Mechanization and Systems Research, Karaj, Iran. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)