

بررسی اثر بار عمودی، سرعت پیشروی و تعداد عبور چرخ بر شاخص مخروط و نشست خاک

سجاد درفش‌پور^{۱*} و عارف مردانی^۲

چکیده

امروزه یکی از محدودیت‌های جدی در پهنه مزارع کشاورزی، وضعیت خاک‌های زراعی و تراکم خاک در اثر تردد ماشین‌های کشاورزی است. مدیریت تردد ماشین بر روی خاک، وابسته به مؤلفه‌های هر سه بخش ماشین، خاک و عملیات زراعی است. این پژوهش با هدف بررسی اثر سرعت پیشروی و بار روی چرخ و همچنین اثرهای تعدد عبور چرخ بر تراکم خاک لومی رسی انجام شده است. آزمایش‌های تجربی، در محیط انباره خاک و با استفاده از یک آزمونگر تک‌چرخ انجام شد. بار روی چرخ در سه سطح ۲، ۳ و ۴ کیلو نیوتن و سرعت پیشروی در سه سطح ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. عمق نشست چرخ و میزان شاخص مخروط خاک به عنوان متغیرهای هدف در قالب ترکیب‌های مختلف تیماری و عبورهای مکرر چرخ در هر مسیر اندازه‌گیری شده است. نتایج حاکی از روند متغیر افزایش مؤلفه‌های مرتبط با تراکم خاک با تکرار عبور چرخ بوده است. اثر بار بر افزایش عمق نشست تنها تا تردد ششم معنی‌دار شده است. از طرفی میزان بار و تعداد تردد، اثر معنی‌داری بر افزایش شاخص مخروط خاک داشت و در مقابل، اثر سرعت پیشروی بر این مؤلفه با تکیه بر بررسی‌های آماری قابل چشم‌پوشی بود. همچنین، تأثیر تعداد عبور چرخ بر عمق رد چرخ و نیز شاخص مخروط خاک در قالب مدل‌های رگرسیونی استخراج شده است.

واژه‌های کلیدی: انباره خاک، تردد، تراکم خاک، چرخ، شاخص مخروط.

ارجاع: درفش‌پور س و مردانی ع. ۱۳۹۶. بررسی اثر بار عمودی، سرعت پیشروی و تعداد عبور چرخ بر شاخص مخروط و نشست خاک. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۶(۲): ۴۹-۵۸.

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه.

۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه.

* نویسنده مسئول: sajad_d65@yahoo.com, sderafshpour@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۵/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۲۰

مقدمه

خاک در حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد افزایش می‌یابد (Van et al., 2007).

از دیدگاه تغییرهای تنش در خاک طی عبور مکرر چرخ، در کنار روند افزایشی تنش‌ها، بیشترین تغییرهای تنش در رابطه با تنش اصلی بیشینه و حین دو تردد اول و دوم گزارش شده‌است؛ به گونه‌ای که افزایش تنش مزبور در ترددهای ۴، ۵ و ۶ تنها ۲۰ درصد دو تردد اول بوده‌است (Pytko, 2012).

این پژوهش‌گر در پژوهشی دیگر به بررسی اثر تکرار عبور چرخ‌های تراکتورهای کشاورزی بر تنش و وضعیت تغییر شکلی خاک‌های شنی و رسی پرداخت. آزمایش‌ها با چند بار تکرار و در سرعت پیشروی ۵ کیلومتر بر ساعت در مسیرهای یکسانی انجام گرفت. تنش خاک با استفاده از ترانسدیوسرهایی که در عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری نصب شده بودند، اندازه‌گیری شد. تغییر شکل سطحی خاک نیز با یک سیستم نوری بررسی شد که قادر بود تغییر شکل را در مساحتی معادل یک مربع ۳۰ در ۳۰ سانتی‌متر تعیین کند. به کمک این سیستم تأثیر افزایش تعداد عبور بر تنش و وضعیت تغییر شکلی خاک بررسی شد (Pytko, 2005).

بررسی رفتار فشردگی خاک زراعی مستلزم بررسی خواص مکانیکی خاک است. اندازه‌گیری و طبقه‌بندی خواص مکانیکی خاک می‌تواند به صورت مؤثر برای پیشگویی حرکت‌پذیری و مؤلفه‌های کششی ماشین به کار رود. دو روش عمده برای توصیف وضعیت مکانیکی خاک در مباحث ترامکانیک شامل شاخص مخروط (CI) و بوامتر است. روش بوامتر در مقایسه با شاخص مخروط برای خاک‌های غیرهمگن از دقت کمتری برخوردار است. مدل‌های WES^۱، مجموعه‌ای از روش‌های تجربی بر مبنای شاخص مخروط‌اند که برای توصیف خواص مکانیکی خاک و مدل‌کردن تعامل چرخ- خاک برای پیشگویی حرکت‌پذیری و تردد چرخ و همچنین ارزیابی نشست چرخ، شکل شیار و فشردگی خاک به کار می‌روند (Wijekoon et al., 2012).

شاخص مخروط مشخصه‌ای از وضعیت مکانیکی خاک است که در قالب نسبت نیرو بر واحد سطح گزارش می‌شود. زمین‌گیرایی خاک^۲، توانایی خاک را برای تحمل

تراکم خاک‌های کشاورزی امروزه به عنوان یک چالش جدی در مباحث حفاظت خاک و کشاورزی پایدار است. از طرفی، سهم قابل ملاحظه‌ای از تراکم خاک به عبور ماشین در مراحل مختلف عملیات زراعی بستگی دارد. تا پیش از دهه‌های پیشین، بیشتر این تراکم به ماشین‌ها و فرایند خاک‌ورزی نسبت داده می‌شد؛ اما امروزه از تأثیر عبور مکرر چرخ تراکتورها نیز به مثابه یک بار سیکی و مؤثر در تراکم خاک و کاهش ظرفیت‌های انتقال آب و هوا به وفور یاد می‌شود (Rusanov, 1991). تراکم خاک، رویداد ناگزیری است که با عبور ماشین به وجود می‌آید؛ اما از سویی این تراکم برای تولید کشش توسط کشنده‌ها و تراکتورها ضروری است. تراکم خاک باعث کاهش ظرفیت نگهداری آب، افزایش رویداد رواناب سطحی و فرسایش خاک و همچنین کاهش عملکرد محصول می‌گردد (Way et al., 2005). در بین عوامل تأثیرگذار منسوب به ماشین بر تراکم، بار روی چرخ برجسته‌ترین نقش را دارد (Carman, 2002). همین پژوهش‌گر تأثیر معکوس میزان سطح تماس چرخ و خاک را بر تراکم خاک گزارش کرده‌است. همچنین، بر اساس همین پژوهش با کمتر شدن سرعت پیشروی، تراکم خاک افزایش یافته است. مطالعه تراکم خاک بیشتر بر مبنای ملاحظات مکانیک خاک صورت می‌گیرد که البته در شرایط درگیری چرخ و خاک با توجه به اینکه یک بار گذرا و دینامیک بر خاک وارد شده‌است قدری دچار خطا خواهد بود (Hamza & Anderson, 2015). در طی سال‌های گذشته، تمایل‌های فراوانی برای بهبود بازده کششی تایرهای کشاورزی در تعامل چرخ- خاک انجام شده‌است. بر هم‌کنش چرخ- خاک مباحثی شامل اصطکاک بین تایر- خاک، کشش مالبندی، مقاومت غلتشی و فشردگی خاک زراعی را دربرمی‌گیرد. از جمله موضوعاتی که مطالعات گسترده‌ای را در زمینه بهبود دینامیک تایر- خاک در پی داشته است، رد اثر چرخ و به دنبال آن فشردگی خاک زراعی است که به عنوان ویژگی مهمی در تعیین عملکرد ماشین و مصرف انرژی محسوب می‌شود. فشردگی خاک در کنار شرایط خاک، به تنش اعمالی در سطح خاک توسط چرخ و همچنین شیوه‌ای که تنش به پروفیل خاک انتقال داده می‌شود، بستگی دارد. با کوچک شدن اندازه خلل و فرج و کاهش هدایت هیدرولیکی، مقاومت نفوذی

1- Cone index

2- Waterways Experiment Station

3- Traction یا Tractive effort

ماشین برداشت‌کننده را بر روی خاک مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند که با رسیدن بار روی چرخ به حد مرزی، تأثیر فشار باد تأیر بر افزایش چگالی حجمی بیشتر از تأثیر بار بود. Bekker (1960) رابطه میان نشست صفحه و فشار روی صفحه را به صورت معادله (۲) بیان نمود:

$$P = kz^n \quad (2)$$

در این رابطه، P فشار (kPa)، K سختی خاک و Z نشست صفحه (m) است. بیکرسختی خاک را در قالب معادله (۳) ارائه کرد (Wong, 2009):

$$K = \frac{k_c}{b_p} + k_\phi \quad (3)$$

در این رابطه n، k_c و k_ϕ مؤلفه‌های معادله فشار- نشست و b_p شعاع صفحه دایره‌ای یا عرض صفحه مستطیلی است. علاوه بر فشار تماسی، مؤلفه‌های مستقل دیگری که نشست چرخ را می‌تواند تحت تأثیر قرار دهد، شدت تردد به لحاظ تکرار است که مدل‌های مختلفی در این زمینه ارائه شده‌است. تجزیه و تحلیل عملکرد کششی وسایل نقلیه بایستی با در نظر گرفتن افزایش تنش در خاک، به واسطه تردد مکرر وسیله مورد بررسی قرار گیرد؛ زیرا بدون در نظر گرفتن این مؤلفه، پیش‌بینی دقیق کشش وسیله، مقاومت حرکتی، قابلیت تردد خاک، عمق نشست، فشردگی خاک و مانند آن مقدور نخواهد بود.

Anttila (1998) مدل نشست چرخ را بر اساس اولین تردد تأیر به صورت تابعی از ابعاد تأیر، بار، خوابیدگی تأیر و شاخص مخروط مطابق روابط (۴) و (۵) ارائه نمود:

$$Z_{rut} = \frac{0.328}{N_{CI}} \quad (4)$$

$$Z_{rut} = 0.005 \cdot \frac{1.212}{C_N} \quad (5)$$

در این روابط، N_{CI} و C_N عدد چرخ به ترتیب بر اساس مدل ترناژ و مدل ویسمر- لوث است که به شرح روابط زیر تعریف می‌شوند:

$$N_{CI} = \frac{Cl \cdot b \cdot d}{W} \sqrt{\frac{\delta}{h}} \cdot \frac{1}{(1 + \frac{bd}{2})} \quad (6)$$

$$C_N = \frac{Cl \cdot b \cdot d}{W} \quad (7)$$

در این روابط، معادله‌های (۴) و (۵) برای اولین چرخه تردد ارائه شد. ثابت‌های استفاده‌شده در این مدل‌ها مربوط به شرایط ماشین و نوع بارگذاری واقعی آن و همچنین شرایط خاک است.

فشاری که از جانب عامل کشش بر آن وارد می‌شود، نشان می‌دهد و به صورت مستقیم به مقاومت نفوذی خاک در روش WES مربوط می‌شود. مقاومت نفوذی خاک می‌تواند متأثر از بافت خاک، ویژگی‌های رطوبتی، شدت تردد، وزن ماشین، سرعت پیشروی و غیره باشد. بنابراین CI می‌تواند به عنوان شاخصی از ظرفیت زمین‌گیرایی خاک نیز محسوب شود (Taheri et al., 2015) در بررسی جامعی مزیت مدل‌های مبتنی بر شاخص مخروط را در پیش‌بینی مؤلفه‌های کششی ماشین‌های برون‌جاده‌ای برجسته‌تر از روش‌های دیگر قلمداد کرده‌است.

Feldman & Domier (1970) برای تعیین میزان فشردگی خاک از سه صفت شاخص مخروط، نرخ انتشار اکسیژن و همچنین میزان تغییر مقاومت برشی با استفاده از جعبه برشی بهره جستند. آن‌ها در نتایج خود گزارش کردند که از بین سه مؤلفه مورد اشاره، شاخص مخروط، گزینه شامل‌تری برای توصیف تغییرات فشردگی خاک است. مؤلفه دیگری که باید در بحث فشردگی خاک مورد بررسی قرار گیرد، نشست چرخ و ایجاد رد اثر آن در خاک است. بنابراین، پیش‌بینی نشست خاک در تعیین فشردگی خاک می‌تواند از اهمیت زیادی برخوردار باشد.

Brixius (1987) افزایش تنش در شیار خاک به واسطه تردد ماشین را به صورت رابطه تجربی (۱) پیشنهاد کرد. این رابطه برای خاک‌های خیلی مرطوب و فشرده قابل استفاده نیست:

$$\frac{ACI}{BCI} = 1 + 1.8 \cdot \exp(-0.11 \cdot B_n) \quad (1)$$

در این رابطه، ACI و BCI شاخص مخروط دو تردد پشت سر هم (به ترتیب بعدی و قبلی) و B_n عدد حرکت‌پذیری چرخ است که تابعی از ابعاد تأیر و خوابیدگی آن می‌باشد. در مباحث ترامکانیک، نشست چرخ به عنوان متغیر خروجی استفاده شده و مدل‌های مختلف ظرفیت تحمل خاک با استفاده از مؤلفه‌های مختلف خاک به عنوان متغیرهای ورودی توسعه یافته‌است (Saarilahati, 2002). مدل‌هایی به مانند این، تأثیر سرعت پیشروی ماشین را در خود جای نداده‌است و این امر، در حالی است که برخی مطالعات تجربی حاکی از افزایش تراکم خاک طی کاهش سرعت پیشروی است (Charman, 2002). چالش فشردگی خاک به موازات توسعه وزن و ابعاد ماشین‌های برون‌جاده‌ای چشمگیرتر ظاهر شده‌است. Rickman & Chanasyk (1988) اثر وزن ماشین، فشار باد تأیر و تردد

مواد و روش‌ها

این پژوهش در مجموعه آزمایشگاه دینامیک خاک، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه ارومیه با استفاده از آزمونگر تک‌چرخ و انباره خاک انجام گرفت. انباره خاک استفاده شده در این مطالعه با طول ۲۴ متر، عرض ۲ متر، عمق ۱ متر و عمق لایه خاک برابر ۷۰ سانتی‌متر بود. برای تغییر سرعت، از این ورتور متناسب با الکتروموتور مورد استفاده در بخش تأمین قدرت استفاده شد که قادر بود با تغییر ترکیب ولتاژ-فرکانس تغذیه الکتروموتور، میزان دور آن را به صورت پیوسته و در تعداد سطوح نامحدود، تغییر دهد و تعیین کند. کانال انباره خاک از خاکی با بافت لومی رسی (۳۴/۳٪ شن، ۴۳/۵٪ رس و ۲۲/۲٪ سیلت) پر شده بود که بافت غالب خاک منطقه است (شکل ۱).

قبل از انجام آزمایش، خاک داخل کانال با استفاده از دنباله‌بندهای ویژه انباره خاک در اتصال به کشنده آن (شامل چنگه، لولر و غلتک) مورد فراوری قرار گرفت و به صورت یکنواخت آماده‌سازی و تسطیح شد.



شکل ۱- آزمونگر تک‌چرخ، انباره خاک و تجهیزات وابسته

به منظور تفکیک کرت‌های آزمایشی و اعمال بار و سرعت در تردد‌های جداگانه، خطوط شاخصی در سرتاسر کانال در قالب تقسیم‌بندی طولی و عرضی کانال اجرا شد. با جابه‌جایی عرضی آزمونگر چرخ، تردد در روی خطوط شاخص صورت می‌گرفت. ۹ متر از طول کانال خاک در سه بخش سه متری جداسازی گردید که این کار با هدف اعمال سرعت مختلف با سه سطح جداگانه در هر یک از قسمت‌های مزبور صورت گرفت (شکل ۲).

(Abebe 1989) مدلی را برای عمق نشست چرخ با توجه به چند عبور^۱ وسیله نقلیه مطابق رابطه (۸) ارائه کردند:

$$Z_n = Z_1 \cdot n^{\frac{1}{a}} \quad (8)$$

$$a = \frac{\ln(z_j) - \ln(z_i)}{\ln(j) - \ln(i)} \quad (9)$$

در معادله (۸) Z_n عمق نشست تردد n ام و Z_1 عمق نشست مربوط به تردد اول (n_1) است. در معادله (۹)، i و j اعداد متوالی مربوط به شماره ترددند.

(Kharkhuta 1973) طی مدلی مقدار نشست تردد n ام را به صورت رابطه (۱۰) ارائه کرده‌است:

$$Z_n = Z_1 \cdot (\gamma \cdot \log + 1) \quad (10)$$

در این رابطه، γ موسوم به ضریب خارخاتو است که در بازه ۰/۳ تا ۱/۱ متغیر است و از آزمایش‌های تجربی در همان شرایط به دست می‌آید. همچنین، N و Z_1 به ترتیب عدد تردد و نشست اولین عبور چرخ است.

(Lyasko 2010) بیان کرد که عمق نشست، فشردگی خاک و به دنبال آن تنش خاک با افزایش تردد وسیله افزایش می‌یابد؛ اما بیشترین تفاوت مربوط به تفاضل عمق نشست تردد اول و دوم وسیله است که حدود ۱۰ تا ۳۱ درصد گزارش شد. (Carman 2002) اثر سرعت پیشروی و بار روی چرخ بر تغییرات فشردگی را مورد بررسی قرار داد. مؤلفه بار به عنوان مؤلفه‌ای برجسته، تأثیرمعنی‌داری در فشردگی خاک داشت. علاوه بر این نتایج، پژوهش چارمن حاکی از آن بود که با افزایش سرعت پیشروی، میزان فشردگی کاهش پیدا کرد. پیش از این، نیز (Barone, 1990) گزارش کرده بود که آماده‌سازی بستر بذر بایستی در سرعت‌های بالا انجام شود تا از فشردگی بیش از حد خاک کاسته شود.

بخش بزرگی از خاک ایران دارای بافت خاک لومی و لومی رسی است و دارای مواد آلی کمی است (Shahbazi & Besharati, 2013). به همین دلیل، ظرفیت فراوانی برای فشردشدن دارد. هدف این پژوهش، این است که تأثیر بار روی چرخ، سرعت و تعداد تردد به عنوان مؤلفه‌های مؤثر در فشردگی خاک زراعی و همچنین نشست خاک طی تغییرات این سه مؤلفه مورد بررسی قرار گیرد.

و بعد از تردد، عمق نشست در رد اثر چرخ اندازه‌گیری و داده‌ها به رایانه انتقال داده شدند (شکل ۴).

اساس این پژوهش، به صورت آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی^۲ (CRD) با هدف بررسی اثر تکرار تردد، سرعت پیشروی و بار روی چرخ در یک طرح $3 \times 3 \times N$ قرار گرفت که N، تعداد تردد در هر مسیر بود. در هر مسیر، ۲۰ تردد پی‌درپی همراه با داده‌برداری انجام شد. تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار spss 22 انجام شد.



شکل ۲- خطوط شاخص در طول کانال

آزمونگر تک‌چرخ تحت سه سطح مختلف بار و سه سطح مختلف سرعت در طول آزمایش‌ها راه‌اندازی شد. تایلر مورد استفاده در این پژوهش، یک تایلر استاندارد با مشخصات Barez 8.25-16 (8) P.R HLF است که در آن مطابق کاتالوگ ارائه شده، عرض مقطع تایلر ۲۲۰ میلی‌متر، نسبت رعنایی^۱ معادل ۰/۸ (نسبت بین ارتفاع مقطع و عرض مقطع)، ساختار تایلر بایاس و قطر رینگ ۱۶ اینچ است. تایلر تحت سه سطح بار ۲، ۳ و ۴ کیلونیوتن قرار گرفت. هر کدام از خطوط شاخص نمایانگر یک سطح از بار بودند. با استفاده از تغییرات مدول فرکانسی اینورتر، سرعت پیشروی در سه سطح ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه به کار گرفته شد. برای بررسی متغیر تعداد تردد، تایلر در روی هر کدام از خطوط شاخص، ۲۰ تردد داشت. در نهایت، اثر بار، سرعت و تردد بر روی متغیرهای وابسته مورد بررسی قرار گرفت.

جمع‌آوری داده‌ها

به منظور اندازه‌گیری شاخص مخروط خاک از دستگاه فروسنج مدل ریمیک (Rimik CP20)، استفاده شد (شکل ۳). این فروسنج دارای میله‌ای به طول ۹۰ سانتی‌متر است. فواصل عمقی برای اندازه‌گیری مقاومت نفوذ خاک برابر ۲/۵ سانتی‌متر و حداکثر عمق اندازه‌گیری مقاومت نیز ۲۵ سانتی‌متر تنظیم شد. دستگاه بعد از اندازه‌گیری، داده‌ها را در حافظه خود نگه داشت و سپس داده‌ها به رایانه انتقال داده شد و بعد از متوسط‌گیری و مرتب‌سازی، داده‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

نشست خاک بعد از تردد چرخ در سه نقطه اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری نشست خاک، از یک کولیس دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده شد. قبل از تردد



شکل ۳- اندازه‌گیری شاخص مخروط توسط نفوذسنج دستی Rimik cp20 الف- قبل از تردد ب- بعد از تردد



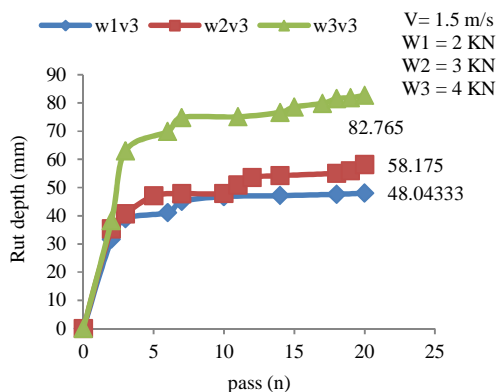
شکل ۴- رد شیار ایجاد شده در مسیر تردد چرخ برای سه سطح بار عمودی ۲، ۳ و ۴ کیلونیوتن

نتایج و بحث

شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نمودارهای مربوط به اثر دو متغیر بار و سرعت بر عمق نشست (R.D^۳) در تردهای پی‌درپی را نشان می‌دهد. بر اساس این نمودارها، در هر سه سرعت، با افزایش بار، عمق نشست افزایش معنی‌داری دارد و با افزایش تدریجی تعداد تردد به کندتر شدن روند تغییر شکل خاک، تغییرات عمق نشست خاک کاهش می‌یابد. در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ به ترتیب، سرعت در سطوح ۰/۵، ۱

2- Completely Randomized Design
3- Rut depth

1- Aspect ratio



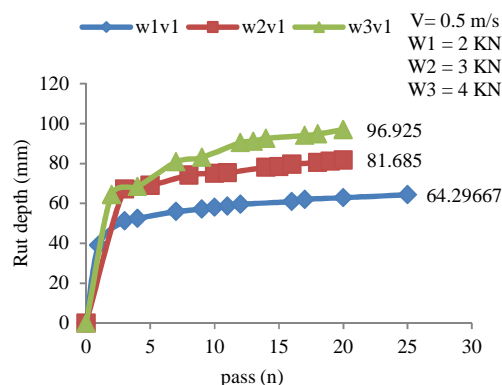
شکل ۷- تأثیر سه متغیر بار، سرعت و تردد بر مقدار عمق نشست خاک (سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه)

نمودارهای ۸، ۹ و ۱۰ اثر سرعت پیشروی و بار را بر میزان افزایش شاخص مخروط خاک با افزایش تردد نشان می‌دهند. براساس نتایج این بخش، بیشترین مقدار شاخص مخروط مربوط به سطح بار سوم ($W_3 = 4 \text{ kN}$) و سطح سرعت اول ($V_1 = 0.5 \text{ m/s}$) بوده‌است. علاوه بر این، تغییرات شاخص مخروط طی ترددهای اول تا پنجم بسیار مشهودتر بوده‌است و در ترددهای بالا از روند افزایشی آن کاسته شده‌است.

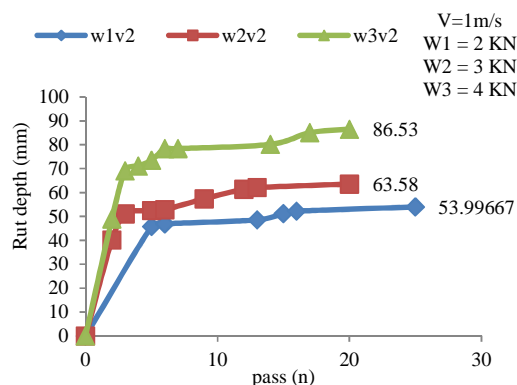
جدول‌های ۱ و ۲، تأثیر سه مؤلفه تعداد تردد، سرعت و بار روی چرخ و اثرهای متقابل آن‌ها را نسبت به متغیر وابسته شاخص مخروط نشان می‌دهند. با توجه به جدول ۱، تأثیر دو متغیر بار و تعداد تردد بر شاخص مخروط در سطح ۱٪ معنی‌دار بوده‌است؛ حال آنکه با توجه درصد توزیع احتمال، تأثیرهای هر یک از متغیرها یکسان نبوده‌است؛ بلکه تعداد تردد به میزان چشمگیری در افزایش شاخص مخروط نقش داشته‌است. در تجزیه واریانس دیگر، تأثیر سرعت بر شاخص مخروط مورد بررسی قرار گرفت که مؤلفه سرعت تأثیر معنی‌داری بر افزایش شاخص مخروط نداشت. جدول ۲ معنی‌دار نبودن اثر تردد بر شاخص مخروط را بعد از تردد پنجم نشان می‌دهد.

تجزیه و تحلیل جدول واریانس اثر تعداد تردد بر شاخص مخروط بعد از گذر پنجم در سه سطح از بار انجام شد که در هر سه سطح، عدم معنی‌داری اثر تردد چرخ بر شاخص مخروط مشاهده شد. می‌توان گفت که بعد از تردد پنجم، در سطوح بار و سرعت‌های مختلف، اثر تردد چرخ بر افزایش شاخص مخروط چشمگیر نبوده و بدین‌منظور بهتر است که ماشین از همان مسیر عبوری خود در گذرهای

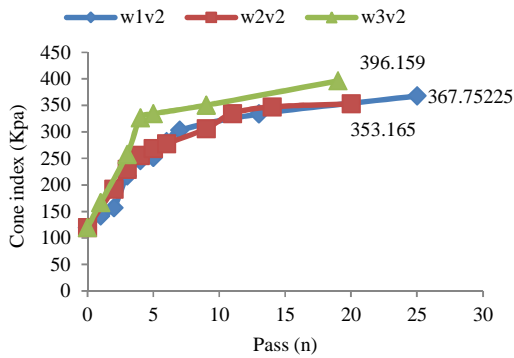
و ۱/۵ متر بر ثانیه به‌کار گرفته شده‌است. بیشترین نشست در سطح سرعت ۰/۵ m/s و بار ۴ KN بوده‌است. در رابطه با چگونگی تأثیر سرعت پیشروی، نتایج حاکی از آن است که در سرعت کمتر، عمق نشست بیشتری در خاک اتفاق افتاده است، که این روند را می‌توان در قالب افزایش مدت زمان بارگذاری خاک در سرعت پایین تفسیر کرد. در پژوهش‌های انجام شده (Stafford et al. (1981 در آزمون فشرده‌سازی آزمایشگاهی خاک، مدت زمان بارگذاری خاک اثر قابل توجهی بر روی تراکم خاک‌های خشک تحت شرایط بارگذاری ایزوتروپیک داشته‌است. عمق نشست تأیر با افزایش بار افزایش یافته‌است و در همه آزمایش‌ها پس از چند تردد اولیه تقریباً تثبیت شده‌است. بیشترین تغییرات نشست در نخستین عبور چرخ مشاهده شده‌است و با گزارش (2010) Lyasko همخوانی دارد.



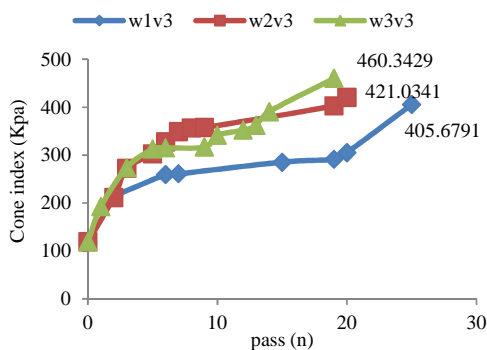
شکل ۵- تأثیر سه متغیر بار، سرعت و تردد بر مقدار عمق نشست خاک (سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه)



شکل ۶- تأثیر سه متغیر بار، سرعت و تردد بر مقدار عمق نشست خاک (سرعت ۱ متر بر ثانیه)



شکل ۹- تأثیر سه متغیر بار، سرعت و تردد بر مقدار شاخص مخروط (سرعت ۱ متر بر ثانیه)

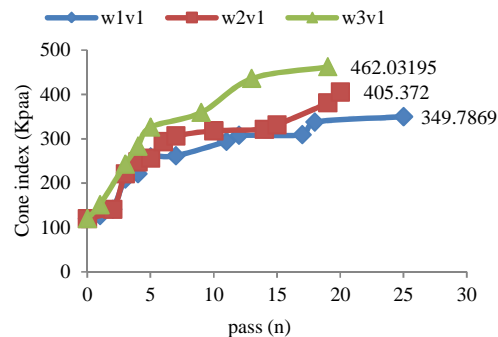


شکل ۱۰- تأثیر سه متغیر بار، سرعت و تردد بر مقدار شاخص مخروط (سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه)

اولیه، تردد کند. حتی در بسیاری از مدل‌های مختلف ارائه شده، رابطه بین شاخص مخروط و اولین تردد مطرح شده است. با تحلیل رگرسیونی رابطه بین تردد و شاخص مخروط، مدلی رگرسیونی با رابطه (۱۱) با ضریب تبیین ۰/۸۴ استخراج شد:

$$CI = 122.008 + 41.4 n - 2.4n^2 + 0.47n^3 \quad (11)$$

در این رابطه، n شماره تردد است. به عبارتی، یک چندجمله‌ای درجه ۳ تخمین نسبتاً خوبی را از شاخص مخروط خاک بر حسب تعداد عبور ارائه داده است. Brixius (1987) نسبت تغییرات شاخص مخروط در هر دو عبور متوالی را به صورت رابطه (۱) ارائه کرده است که البته برای سطوح مختلف تردد، تعمیم داده نشده است.



شکل ۸- تأثیر سه متغیر بار، سرعت و تردد بر مقدار شاخص (سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه)

جدول ۱- مقادیر تأثیر دو متغیر وزن و شدت تردد بر تغییرات شاخص مخروط

منابع تغییرات	مجموع مربعات	درجه‌های آزادی	F	Sig	درصد توزیع احتمال
وزن	۳۶۰۶۲/۰۳۶	۲	۲۸/۵۹۶	۰/۰۰۰	۵/۱۶
تعداد تردد	۵۶۲۷۲۲/۰۵۳	۲۰	۴۴/۶۲۳	۰/۰۰۰	۸۰/۴۵
وزن * تعداد تردد	۱۸۱۶۲/۸۵۴	۲۱	۱/۳۷۲	۰/۱۸۶	۲/۶
خطا	۲۷۷۴۳/۵۰۹	۴۴			۳/۹۷
کل	۶۹۹۴۴۷/۸۰۳	۸۷			

جدول ۲- اثر تردد بر شاخص مخروط بعد از تردد پنجم

منابع تغییرات	مجموع مربعات	درجه‌های آزادی	F	Sig
تعداد تردد	۲۱۷۲۲/۳۳۱	۱۰	۳/۵۶۱	۰/۰۸۷

نسبت به تأثیر وزن بر افزایش میزان عمق نشست در سطح بالاتری قرار داشته است. نتایج آزمون مقایسه میانگین دانکن نشان داد که سرعت سطح ۲ (۱ m/s) نسبت به سرعت سطح ۱ (۰/۵ m/s) اثر معنی‌داری بر افزایش عمق نشست نداشت؛ حال آنکه سرعت سطح ۳

جدول ۳، تأثیر دو متغیر وزن و تردد را بر عمق نشست نشان می‌دهد و بر اساس این جدول، هر دو مؤلفه مزبور تأثیر معنی‌داری بر افزایش عمق نشست در سطح ۱٪ داشته‌اند.

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، تأثیر تردد

خاک خیلی کم است. در سطح بار دوم ($W_1=3 \text{ KN}$) به دلیل افزایش بار، تغییر شکل ایجاد شده در خاک بیشتر از حالت قبل بوده که تأثیرهای آن تا گذر پانزدهم ادامه داشته است؛ ولی بعد از گذر پانزدهم اثر بار نیز بی معنی شده است. در سطح بار سوم ($W_1=4 \text{ KN}$) مشاهده می شود که از گذر سوم به بعد، تردد چرخ تأثیر معنی داری بر تغییر شکل خاک نداشته است. دلیل این امر را می توان چنین توجیه کرد که به دلیل رسیدن بار به مقدار بیشینه، بیشترین نشست خاک در ترددهای اول صورت گرفته و بعد از گذر سوم بر اثر فشردگی مکرر خاک، تردد چرخ تأثیر چندانی بر تغییرات عمق نشست نداشته است.

($1/5 \text{ m/s}$) اثر معنی داری بر میزان عمق نشست داشت. در آزمون مقایسه های میانگین برای سطوح بار، سطح بار دوم نسبت به سطح بار اول اثر معنی داری از خود نشان نداد؛ حال آنکه بار سطح ۳ (4 kN) اثر معنی داری بر میزان افزایش عمق نشست داشت. جدول ۴ تأثیر معنی دار نبودن سطوح بار را در ترددهای خاص برای تغییرات عمق نشست نشان می دهد. همان طور که در جدول ۴ مشاهده می شود، اثرهای تردد در سطح بار اول ($W_1=2 \text{ kN}$) از گذر ششم به بعد معنی دار نیست. به عبارت دیگر، در ترددهای اولیه بیشترین نشست اتفاق افتاده و با افزایش تردد، تغییر شکل ایجاد شده در

جدول ۳- تأثیر دو متغیر وزن و شدت تردد بر افزایش میزان عمق نشست

منابع تغییرات	مجموع مربعات	درجه های آزادی	F	Sig	درصد توزیع احتمال
وزن	۸۱۶۲/۳۴۶	۲	۴۱/۹۱۳	۰/۰۰۰	۱۴/۶۲
شدت تردد	۳۷۶۷۹/۳۶۶	۲۱	۱۸/۴۲۷	۰/۰۰۰	۶۷/۵
وزن * شدت تردد	۲۱۷۸/۵۹۱	۳۱	۰/۷۲۲	۰/۸۲۶	۳/۹
خطا	۴۰۸۹/۶۳۴	۴۲			۷/۳
کل	۵۵۸۲۶/۷۷۱	۹۶			

جدول ۴- تأثیر مؤلفه بار بر عدم معنی داری تغییرات عمق نشست در تردد خاص

منابع تغییرات	تردد	F	Sig
بار ($W_1 = 2 \text{ KN}$)	n = 6	۱۱/۵۴۵	۰/۰۸۲
بار ($W_1 = 3 \text{ KN}$)	n = 15	۲/۲۷۹	۰/۲۵
بار ($W_1 = 4 \text{ KN}$)	n = 3	۱/۹۱۲	۰/۲۴۷

مطالعه مشابهی نشست n م را بر حسب نشست عبور اول و ضریب ثابتی برگرفته از آزمایش های تجربی مدل کرده است. عموم مدل هایی از این دست، شامل نقطه ضعف محدود بودن به شرایط خاص و عدم تعمیم هستند.

نتیجه گیری

در این پژوهش، اثر مؤلفه های تردد، بار و سرعت پیشروی بر روی نشست و شاخص مخروط خاک مورد بررسی قرار گرفت. مبتنی بر مدل های مربوط به برهم کنش چرخ و خاک، مؤلفه تکرار عبور، غالباً در این مدل ها به صورت مستقل لحاظ نشده است؛ هر چند این مؤلفه را نمی توان به صورت مستقل در نظر گرفت. در این پژوهش روند تغییرات نشست خاک و شاخص مخروط در طی تکرار عبور چرخ در سطوح مختلف بار و سرعت پیشروی مورد مطالعه قرار گرفته است. با وجود پیچیدگی ارتباط نشست

رابطه (۱۲) معادله رگرسیونی نشست خاک بر حسب متغیرهای بار، سرعت پیشروی و تعداد تردد را نشان می دهد. این معادله با ضریب تبیین $0/88$ تخمین نسبتاً خوبی را از نشست خاک در هر تردد در پی داشته است.

$$Z = 24.169 + 14.738 W - 17.123 V + 1.12 n \quad (12)$$

در این رابطه W ، V و Z به ترتیب بار روی چرخ بر حسب کیلونیوتن، سرعت پیشروی بر حسب متر بر ثانیه و مقدار نشست بر حسب میلی متر بوده و n شماره تردد چرخ است. مزیت این رابطه نسبت به مدل های دیگر در این است که برای محاسبه عمق نشست خاک، نیازی به دانستن مؤلفه های خاک نیست.

(Kalugin & poletaev (1968) در پژوهش خود رابطه ای برای تخمین نشست n م بر حسب بار روی چرخ، هندسه تیر و نشست تجمعی در عبورهای قبلی ارائه کرده اند که البته فاقد اثر سرعت پیشروی است. همچنین، خارخوتا در

8. Hamzaa, M. A. and Andersonb, W. K. 2005. Soil compaction in cropping systems A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research*, 82: 121-145.
9. Kalugin, L. V. and Poletaev, A. F. 1968. Tractive performance of driven wheels in the same rut. In: *Proceeding of NATI*, vol. 192. Moscow; pp. 88-97 [in Russian].
10. Kharkhuta NYa. 1973. *Machines for soil compaction*. Leningrad: Mashinostroenie. [in Russian].
11. Lyasko, M. 2010. Multi-pass effect on off-road vehicle tractive performance. *Journal of Terramechanics*, 47(5): 275-294.
12. Pytko, J. 2005. Effects of repeated rolling of agricultural tractors on soil stress and deformation state in sand and loess. *Soil and Tillage Research*, 82: 77-88.
13. Pytko, J. A. 2012. *Dynamics of Wheel-Soil Systems: A Soil Stress and Deformation-Based Approach*, CRC Press.
14. Rickman, J. F. and Chanasyk, D. S. 1988. Traction effects on soil compaction. In *Conference on Agricultural Engineering 1988: An Australasian Conference to Celebrate the Australian Bicentennial; Preprints of Papers (p. 103)*. Institution of Engineers, Australia.
15. Rusanov, V. A. 1991. Effects of wheel and track traffic on the soil and on crop growth and yield. *Soil & Tillage Research*, 19: 131-143.
16. SaariLahti, M. 2002. Soil interaction model. Evaluation of the WES-method in assessing the trafficability of terrain and the mobility of forest tractors. University of Helsinki, Department of Forest Resource Management.
17. Shahbazi, K., and H. Besharati. 2013, Overview of agricultural soil fertility status of Iran. *Land Management Journal* 1: 1-15. (In Farsi).
18. Stafford, J. V. and de CarvalhoMattos, P. 1981. The effect of forward speed on wheel-induced soil compaction: laboratory simulation and field experiments. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 26(4): 333-347.
19. Taheri, Sh. Sandu, C. Taheri, S. and Gorsich, D. 2015. A technical survey on Terramechanics models for tire-terrain interaction used in modeling and simulation of wheeled vehicles. *Journal of Terramechanics*, 57: 1-22.
20. Van, N. N. Matsuo, T. Koumoto, T. and Inaba, S. 2007. Effects of tire inflation pressure on soil contact pressure and rolling resistance of farm tractors. *Bulletin of the Faculty of Agriculture-Saga University*, 93: 101-108.
- و شاخص مخروط خاک طی سطوح بار و سرعت پیشروی، مدل‌های رگرسیونی به‌دست آمده تعبیر نسبتاً ساده و قابل قبولی از این ارتباط پیچیده را بر حسب تعداد عبور چرخ ارائه کرده است. با توجه به تأثیر سرعت پیشروی، به نظر می‌رسد افزایش سرعت انجام عملیات زراعی تأثیر تخریبی و محدودکننده از نظر تراکم خاک نداشته و گزینه قابل پذیرشی است البته این افزایش، در صورتی است که مزیتی مانند تسریع عملیات زراعی را در پی داشته باشد و همچنین، محدودیتی از نظر کیفیت انجام عملیات و نیز کفایت توان کششی ماشین کشنده وجود نداشته باشد. از طرفی، محدود شدن سهم اثرهای تغییر شکل و تراکم خاک به عبورهای نخستین، حاکی از آن است که بیشترین تأثیرگذاری چرخ روی خاک در گذرهای اولیه اتفاق می‌افتد و بهتر است مدیریت ترافیک ماشین بر روی خاک، مسیرهای ثابت و حداقلی با تکرار عبور را بر تعداد مسیرهای عبور ماشین ترجیح دهد.

منابع

1. Abebe, A. T. Tanaka, T. and Yamazaki, M. 1989. Soil compaction by multiple passes of a rigid wheel relevant for optimization of traffic. *Journal of Terramechanics*, 26(2): 139-148.
2. Anttila, T. 1998. Metsämaanraiteistumisenennustaminen WESmenetelmääkäyttäen (Prediction of rutting of forest soils by use of the WES-method). University of Helsinki. Department of forest resource management. Publications 17.
3. Barone, L. Zeren, Y. Yildiz, Y. Özcan, M. T. Güzel, E. Işık, A. and Bilgin, E. 1990. Wheel traffic effect on soil compaction. In *International congress on mechanization and energy in agriculture. Proceedings of a conference held in Adana, Turkey, 1-4 October*: 159-165.
4. Bekker, M. G. 1960. *Off The Road Locomotion*. Ann. Arbor, MI: University of Michigan Press.
5. Brixius, W. W. 1987. Traction prediction equations for bias- ply tires. ASAE Paper: 87- 1622. ASAE. St Joseph, MI 49085.
6. Carman, K. 2002. Compaction characteristics of towed wheels on clay loam in a soil bin. *Soil and tillage research*, 65: 37-43.
7. Feldman, M. and Domier, K. W. 1970. Wheel traffic effects on soil compaction and growth of wheat. *Canadian Agricultural Engineering*, 12: 8-11.

21. Way, T. Erbach, D. Bailey, A. Burt, E. and Johnson, E. 2005. Soil displacement beneath an agricultural tractor drive tyre. *Journal of Terramechanics*, 42: 35-46.
22. Wijekoon, M. Sellgren, U. Pirnazarov, A. and Löfgren, B. 2012. Forest machine tire-soil interaction.
23. Wong, J. Y. 2009. *Terramechanics and off-road vehicle engineering: terrain behaviour, off-road vehicle performance and design*. Butterworth-heinemann.