

## مقایسه رفتار چرخ معمولی و چرخ شنی از نظر تراکم و نشست عمودی در شرایط انباره خاک

هوشنگ محبوب ینگجه<sup>۱</sup>، عارف مردانی کرانی<sup>۲\*</sup> و مازیار فیض‌اله‌زاده<sup>۳</sup>

### چکیده

چرخ شنی‌ها در مقایسه با چرخ‌های معمولی دارای مزایایی هستند که بخشی، در ارتباط با عملکرد کششی ماشین و بخش دیگر مربوط به کاهش تراکم و تغییر شکل در خاک‌های زراعی است. در این پژوهش، به مقایسه تجربی چرخ معمولی و چرخ شنی از نظر تراکم و تغییر شکل عمودی خاک طی عبور مکرر هرکدام، در شرایط مشابه پرداخته شد. این بررسی با استفاده از دو آزمون گر چرخ معمولی و چرخ شنی در محیط یک انباره خاک با بافتی از نوع لوم-رسی صورت گرفت. مقدار نیرو و تنش عمودی در عمق‌های ۸، ۱۶ و ۲۴ سانتی‌متری خاک طی تکرار عبور چرخ‌ها در پنج سطح (۱، ۳، ۷، ۱۵ و ۲۰ عبور) با استفاده از یک سامانه تنش سنج، اندازه‌گیری و ثبت گردید. همچنین مقدار نشست عمودی خاک طی عبور و تکرار عبور چرخ معمولی و چرخ شنی اندازه‌گیری شد. طبق نتایج ثبت شده، بیشترین کاهش تراکم خاک در چرخ شنی نسبت به چرخ معمولی در عمق‌های کمتر از ۱۰ سانتی‌متر روی داد و به‌گونه‌ای که مقدار تنش در خاک، تنها در حدود ۴۰ درصد چرخ معمولی بود. در عمق‌های بیشتر، رفتار چرخ معمولی و چرخ شنی از نظر ایجاد تنش در خاک تقریباً مشابه یکدیگر بود، به‌طوری‌که در عمق بیشتر از ۲۴ سانتی‌متر، تنش زیر چرخ معمولی و چرخ شنی تشابه ۹۰ درصدی داشتند. از نظر تغییر شکل عمودی خاک، تفاوت چشم‌گیری بین رفتار چرخ معمولی و چرخ شنی دیده شد به‌گونه‌ای که مقدار نشست خاک در اثر عبور چرخ معمولی در تمامی سطوح تعداد عبور، بیش از دو برابر نشست خاک زیر چرخ شنی بوده است.

**واژه‌های کلیدی:** انباره خاک، تراکم خاک، ترامکانیک، چرخ شنی، چرخ معمولی.

**ارجاع:** محبوب ینگجه ه. مردانی کرانی ع. و فیض‌اله‌زاده م. ۱۴۰۱. مقایسه رفتار چرخ معمولی و چرخ شنی از نظر تراکم و نشست عمودی در شرایط انباره خاک. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۴: ۲۷-۳۶. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2022.10076.531>

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

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

۳- دانش‌آموخته دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه.

\*نویسنده مسئول: [a.mardani@urmia.ac.ir](mailto:a.mardani@urmia.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۰

## مقدمه

تخریب خاک به‌طور گسترده‌ای مورد مطالعه محققین قرار گرفته و آن‌ها در تلاش هستند تا تخریب خاک در زمین‌های کشاورزی را کاهش دهند. تراکم خاک که نوعی تخریب فیزیکی خاک به حساب می‌آید بر ظرفیت هوا در خاک، نفوذپذیری و ظرفیت نگهداری آب در خاک و همچنین کاهش رشد ریشه و فعالیت بیولوژیکی خاک تأثیرگذار است (Virto *et al.*, 2015). بنابراین تراکم خاک، معیاری برای محدودیت رشد گیاه و کاهش بازده تولید محصولات کشاورزی معرفی شده است (Van den Akkeret *et al.*, 2003). به‌طور کلی دو علت عمده شناخته شده برای تراکم خاک در زمین‌های کشاورزی عبارتند از ماشین و سیستم‌های خاک‌ورزی (Huber *et al.*, 2008). از بین عوامل مکانیکی، درصد بالایی از تراکم خاک ایجاد شده در مزرعه را تردد ماشین و ادوات کشاورزی به خود اختصاص می‌دهد (Taghavifar & Mardani, 2018). همچنین مطالعات انجام شده در خصوص رابطه ماشین و خاک نشان می‌دهد که حدود ۲۰ تا ۵۵ درصد از انرژی انتقال یافته به چرخ‌های محرک یک کشنده برون‌جاده‌ای (تراکتور) در تعامل با خاک هدر می‌رود. علاوه بر هدر رفت انرژی، بخشی از این انرژی صرف تراکم خاک می‌گردد که برای تولید محصولات کشاورزی مضر است (Burt *et al.*, 1983) با توجه به مشکلات پیچیده مربوط به تعامل انواع چرخ‌های وسایل نقلیه با شرایط مختلف سطح خاک، تلاش‌های گسترده تحقیقاتی برای رسیدن به درک هرچه بهتر از تقابل عامل کشش-خاک به انجام رسیده است. مطالعات اولیه در خصوص رابطه ماشین و خاک از دیدگاه تولید کشش توسط برخی محققین مانند بکر ارائه شده است (Bekker, 1960; Bekker, 1969). البته در حال حاضر نیز از روابط در برخی از استانداردهای لازم برای ارزیابی عملکرد کششی ماشین و مانند آن، استفاده می‌شود (ASAE, 2011).

به‌طور کلی دو دسته اصلی عوامل کشش در ماشین‌های برون‌جاده‌ای عبارت است از: چرخ معمولی و چرخ زنجیری. چرخ شنی یکی از سامانه‌های مهم زمین‌نوردی برای وسایل نقلیه برون‌جاده‌ای است، بنابراین مطالعه رفتار آن از اهمیت بالایی برخوردار است. آزمایش‌های تجربی متعددی برای مقایسه عملکرد بین سیستم‌های چرخ بادی و چرخ شنی اجرا شده است. در این تحقیقات، هرچند استفاده

بیشتر از چرخ‌های معمولی بادی گزارش شده است و مزایای صریح آن‌ها از نقطه نظر فنی و عملکردی بیان شده است، اما از طرفی محدودیت آن‌ها در حمل‌ونقل و عملکرد کششی در اراضی و زمین‌های نامساعد (برون‌جاده‌ای) نیز مطرح شده است (Burt, 1993). طی تحقیقی، به بررسی و بهبود عملکرد کشش تراکتورهای مجهز به چرخ شنی لاستیکی در چند نمونه خاک کشاورزی پرداخته شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که در تمام خاک‌های مورد آزمایش، کشش مالبندی و بازده کششی در تراکتور مجهز به چرخ شنی بیشتر از تراکتور چرخ بادی بوده است (Rasool & Raheman, 2018).

سیستم‌های چرخ شنی از لحاظ طراحی و فناوری پیچیده‌تر هستند. مطالعات زیادی بر مسائلی همچون راحتی رانندگی، مقایسه چرخ شنی لاستیکی با چرخ شنی فولادی در موقعیت حمل‌ونقل، هزینه ساخت، وزن چرخ‌ها، هزینه‌های سرویس و نگهداری انجام شده است. بر پایه پژوهش‌های به انجام رسیده، چرخ شنی لاستیکی در کاربردهای بخش کشاورزی دارای مقبولیت بیشتری است، در حالی که معمولاً از شنی‌های فولادی برای وسایل نقلیه سنگین، نظیر تانک‌ها و ماشین‌های راه‌سازی و یا صنعتی بزرگ استفاده می‌شود. همچنین پژوهش‌هایی در تأیید عملکرد کششی مطلوب‌تر و آسیب کمتر به خاک توسط چرخ شنی لاستیکی در مقایسه با چرخ شنی فولادی ارائه شده است (Arvisson *et al.*, 2011; Keller *et al.*, 2002; Servadio *et al.*, 2001). اگرچه چرخ شنی دارای محدودیت‌هایی در خصوص هدایت و فرمان‌گیری است (Crolla & Schwanghart, 1992; Tran *et al.*, 2002; Park *et al.*, 2008; Wong, 2009) اما مطالعات متعددی در این زمینه برای پیشنهاد طرحی بهتر و ایمن‌تر به انجام رسیده است (Franceschetti *et al.*, 2016). همچنین شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی از برهم‌کنش چرخ‌شنی-خاک با نرم‌افزارها انجام شده است. در پژوهشی بر پایه شبیه‌سازی با ارائه یک مدل دینامیکی ساده، سریع و قابل اعتماد، حرکت وسیله نقلیه شنی برون‌جاده‌ای در زمین دارای موانع مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق، بر اساس روش دینامیکی اجزای گسسته، معادلاتی برای وسیله نقلیه چرخ‌دار ارائه شد (Gat *et al.*, 2020). در پژوهش دیگری، تأثیر شاخص‌های مهم هندسه چرخ شنی در بهبود کشش تراکتور بررسی شد. نتایج آزمایش‌های کشش نشان داد که چرخ زنجیری نسبت به چرخ معمولی، توان

تنش در خاک تا عمق ۳۰ سانتی‌متر را تا ۸۱ درصد کاهش داد. علاوه بر این، عمق رد ناشی از عبور ماشین مجهز به چرخ شنی پس از ده بار تردد ماشین، ۵۰ درصد کمتر از چرخ معمولی گزارش شد (Zemánek & Neruda, 2021). بررسی عملکرد چرخ‌های شنی با وجود فراگیری کاربرد آن‌ها در زمین‌های کشاورزی، در ایران تاریخچه چندانی ندارد. این پژوهش در قالب مقایسه رفتار دو نوع چرخ شنی فولادی و چرخ معمولی بر تراکم و نشست خاک در یک انباره آزمایشگاهی خاک انجام شد.

### مواد و روش‌ها

آزمون‌های تجربی این مطالعه، با استفاده از دو آزمون‌گر چرخ معمولی و چرخ شنی فولادی در محیط انباره خاک گروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه ارومیه انجام گرفت. چرخ‌ها به صورت جداگانه به کشنده انباره خاک متصل شد و در شرایط یکسان خاک مورد آزمایش قرار گرفتند. این محیط آزمایشگاهی شامل: یک کانال خاک به طول ۲۴ متر، عرض ۲ متر و عمق لایه خاک ۱ متر است که شرایط مناسب برای آزمایش‌های با حذف اثرات مرزی را فراهم آورده است. تجهیزات دیگر شامل حامل یا کشنده ابزار، تجهیزات آماده‌سازی خاک (دنباله بندهای ویژه انباره خاک)، سامانه‌های کنترل و توان دهی برای حرکت حامل و ابزارهای اندازه‌گیری است (Gheshlaghi & Mardani, 2021). مشخصات خاک انباره خاک در جدول ۱ نشان داده شده است. (Mahboub Yangeje & Mardani, 2021). (Korani, 2021).

کششی کشنده را تا ۱۰/۴ درصد و بازده کششی را نیز در حدود ۷/۴ درصد افزایش داده است (Mударisov et al., 2020).

به‌عنوان یک فرضیه منطقی در مطالعات پیشین به نظر می‌رسد که بار روی چرخ، منبع اصلی تنش و تراکم در خاک است (Lamandé et al., 2018). به پیشنهاد این مطالعه، استفاده از چرخ شنی به‌جای چرخ بادی به‌عنوان یک راه حل فنی برای افزایش سطح تماس و کاهش میزان تنش‌های تماسی قابل ارائه است. همچنین مقایسه اثر تردد دو چرخ بر خصوصیات فیزیکی خاک و ارزیابی روشی برای کاهش تراکم خاک در زیر چرخ‌ها در عمق ۳۵ سانتی‌متری خاک هم در این پژوهش بررسی شد. نتایج ارائه‌شده از این پژوهش نشان داد که تنش عمودی حداکثر در چرخ شنی کمتر از زیر چرخ لاستیکی بادی بود. توزیع تنش در زیر شنی لاستیکی کاملاً یکنواخت نبوده و تنش‌های بیشینه، در زیر غلتک‌های شنی ایجاد شد. چگالی خاک بعد از تردد برای دو سیستم مورد آزمایش، مشابه هم گزارش شد، اما نفوذپذیری خاک پس از تردد با استفاده از چرخ شنی کمتر بود. همان‌طور که از تفاوت سطح تماس و تنش اندازه‌گیری شده انتظار می‌رود، چرخ شنی می‌تواند بارهای بیشتری نسبت به چرخ معمولی تحمل کند (Lamandé et al., 2018).

در پژوهش دیگری، اثر تردد چرخ بر روی خاک در مسیری که تردد شامل کنده‌های درختی است، بررسی گردید. طبق نتایج در ماشین چرخ‌دار، حداکثر مقادیر تنش در خاک تا ۲۰۳ درصد از فشارهای ناشی از چرخ شنی، فراتر رفت. همچنین چرخ شنی نسبت به نوع چرخ‌دار، میانگین

جدول ۱- خواص فیزیکی خاک بستر آزمایش انباره خاک

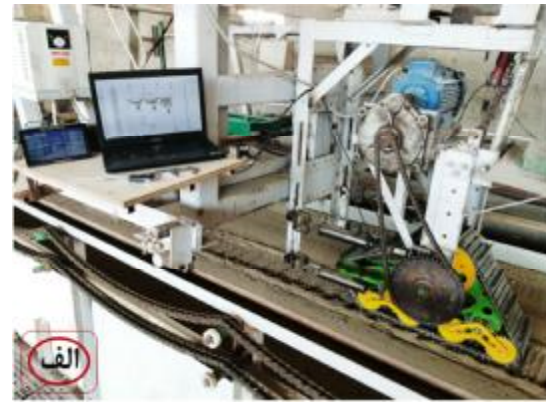
پارامتر خاک	چگالی ظاهری (g/cm <sup>3</sup> )	رطوبت خاک (%)	زاویه اصطکاک داخلی (°)	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)
مقدار	۲/۶۳	۴	۳۲	۴۳	۲۲	۳۵

یک چرخ بادی با مشخصات استاندارد (Barez 8.25-16 P.R HLF) (8) بود. مطابق برگه اطلاعات ارائه‌شده برای چرخ، عرض مقطع چرخ ۲۲ سانتی‌متر، نسبت مقاطع (نسبت ارتفاع مقطع به عرض مقطع برحسب درصد) معادل ۸۰، ساختار تایر بایاس و قطر رینگ ۴۰ سانتی‌متر بوده و برای تمامی آزمایش‌ها فشار باد چرخ در سطح ۱۳۰ کیلوپاسکال ثابت نگاه داشته شد.

آزمون‌گر تک‌چرخ مورد استفاده در این تحقیق از نوع چهار بازویی است. ساختمان این آزمون‌گر عبارت از چهار بازوی موازی است که به صورت مفصلی از یک‌سو به حامل انباره خاک متصل شده و از سوی دیگر به واسطه اتصالات مفصلی دیگر، به شاسی دربرگیرنده چرخ متصل شده‌اند. در حدفصل دو سر هر بازو، اتصالاتی برای نصب نیروسنج‌های S شکل پیش‌بینی‌شده است که از دو طرف، به هر نیروسنج پیچ شده‌اند. چرخ معمولی مورد استفاده

محوربندی به مکانیسم اسبکی مرتبط شده‌اند و در واقع وظیفه مهار و هدایت شنی، تثبیت شکل چرخ شنی و حمل وزن کل مجموعه را به عهده دارند. سیستم ضد گشتاور میزان پیچش چرخ شنی را محدود کرده و به چرخ شنی اجازه می‌دهد تا در حالت کشش شنی، یا برخورد با بالا و پایینی سطح زمین، حالت مفصلی پیدا نماید و بعد از عبور از مانع به‌طور خودکار چرخ به وضعیت عادی خود باز خواهد گشت. این سیستم از یک‌طرف به چرخ شنی متصل و از طرف دیگر توسط رابط اتصال به شاسی انباره خاک محدود است.

چرخ شنی به کاررفته در این پژوهش، شامل شاسی، چرخ‌دنده محرک، چرخ‌دنده‌های حامل (محرک)، مکانیسم اسبکی، مکانیسم چرخ کشش و کنترل کشش شنی، شنی درگیر با خاک، مکانیسم ضد گشتاور، سیستم انتقال توان و اتصالات است. ابعاد چرخ شنی به ترتیب در راستاهای طول، عرض و ارتفاع ۹۰، ۲۲ و ۵۵ سانتی‌متر است. برای حرکت چرخ شنی فولادی، چرخ‌دنده محرک، توان دریافتی را به شنی زنجیری انتقال می‌دهد. مکانیسم اسبکی و چرخ‌دنده‌های حامل و محرک، بخش‌های دیگر چرخ شنی است. چرخ‌دنده‌ها از طریق بلبرینگ و



شکل ۱- آزمون‌گرها و انباره خاک مورد استفاده در آزمون‌های تجربی: الف) آزمون‌گر تک‌چرخ شنی فولادی، ب) آزمون‌گر تک‌چرخ معمولی

راستاهای طول، عرض و ارتفاع ۱۲، ۱۰ و ۱۲ سانتی‌متر، سوپاپ دریافت‌کننده تنش، داده‌بردار به‌عنوان ذخیره کننده و کامپیوتر ذخیره و فراخوانی اطلاعات، استفاده شد. اندازه‌گیری پارامتر نیرو در این پژوهش با استفاده از نیروسنج (لودسل S شکل، مدل Bongshin ساخت کره) که قادر به اندازه‌گیری نیروهای فشاری و کششی با قابلیت اطمینان بالا و پایداری در اندازه‌گیری هستند، به انجام رسید. به‌منظور واسنجی نیروسنج‌ها سه مقدار مشخص از بارهای استاتیکی به‌صورت وزنه، در محدوده ظرفیت اسمی آن‌ها اعمال شد و ضرایب نمودارهای خطی بار برای هر لودسل متناسب با نمایش‌گر اختصاص داده شده به هر کدام استخراج گردید.

کنترل عملکرد سیستم شامل به حرکت درآوردن چرخ‌ها به‌طرف جلو و عقب و کنترل مقدار سرعت خطی چرخ‌ها بود که با ترکیبی از واحدهای جعبه‌دنده، یک اینورتر (مدل LS ساخت شرکت LG کره جنوبی) و الکتروموتور با توان اسمی ۷/۵ اسب بخار و دور ۱۴۳۰ دور بر دقیقه سپرده

هر دو آزمون‌گر چرخ معمولی و چرخ شنی با استفاده از یک شاسی نگاه‌دارنده و اتصالات شامل نیروسنج‌های رابط، به کشنده انباره خاک متصل شده‌اند و در دو راستای عمودی و افقی مهار شده‌اند. سرعت پیشروی چرخ و چرخ شنی، با استفاده از تنظیمات کشنده انباره خاک تنظیم می‌شود.

خاک‌های کشاورزی به سه لایه یعنی سطح بالایی خاک، لایه میانی و لایه زیرین خاک به ترتیب به عمق‌های صفر تا ۳۰، ۳۰ تا ۵۰ و عمق بیشتر از ۵۰ سانتی‌متر تقسیم می‌گردد (McKyes, 1985; Mudarisov et al., 2020). آزمایش‌های این پژوهش در لایه سطحی خاک یعنی تا عمق ۳۰ سانتی‌متر که محدوده رشد و فعالیت ریشه غالب محصولات کشاورزی بوده و فشار تماسی بین ابزار-خاک در این ناحیه از اهمیت بیشتری برخوردار است، به انجام رسید. بدین منظور از سامانه‌های اندازه‌گیری تنش عمودی که متشکل از ۱۸ نیروسنج (لودسل S شکل) با ظرفیت ۱۰۰ کیلوگرم، مکانیسم نگاه‌دارنده نیروسنج به ترتیب در

شد. با تغییر فرکانس ورودی الکتروموتور از طریق تنظیمات اینورتر، سرعت خطی چرخ‌های مورد آزمایش تغییر می‌کرد. در هر آزمایش، پس از آماده‌سازی خاک توسط دنباله‌بندهای مخصوص انباره خاک (شامل چنگه، ماله و غلتک)، نیروسنج‌ها در گودال‌های حفاری شده در عمق‌های ۸، ۱۶ و ۲۴ سانتی‌متری در هر کرت قرار داده شد. پس از تثبیت وزن روی آزمون‌گر (بار عمودی ۲۰۰ کیلوگرمی چرخ‌ها) و سرعت پیشروی (سرعت ثابت ۱ کیلومتر بر

ساعت)، آزمون‌ها با تعداد تردهای ۱، ۳، ۷، ۱۵ و ۲۰ عبور از روی تنش‌سنج‌ها که در زیرخط مرکزی چرخ مدفون شده بودند، به انجام رسید و تنش وارده به خاک در عمق‌های مختلف با سه تکرار اندازه‌گیری شد (شکل ۲).

داده‌های خروجی نیروسنج‌ها با استفاده از یک داده‌بردار ۱۰ کاناله با قابلیت اتصال به یک سیستم رایانه‌ای ذخیره گردید. همچنین مطابق شکل ۳ مقدار نشست خاک نیز طی عبور هر یک از آزمون‌گرها در هر آزمایش با استفاده از یک کولیس نسبت به سطح اولیه خاک اندازه‌گیری شد.



شکل ۲- سامانه اندازه‌گیری تنش عمودی در خاک: ۱- چرخ بادی، ۲- چرخ شنی، ۳- داده‌بردار و ذخیره‌کننده اطلاعات حسگرهای نیروسنج و ۴- نیروسنج‌های دفن شده در عمق‌های مختلف خاک

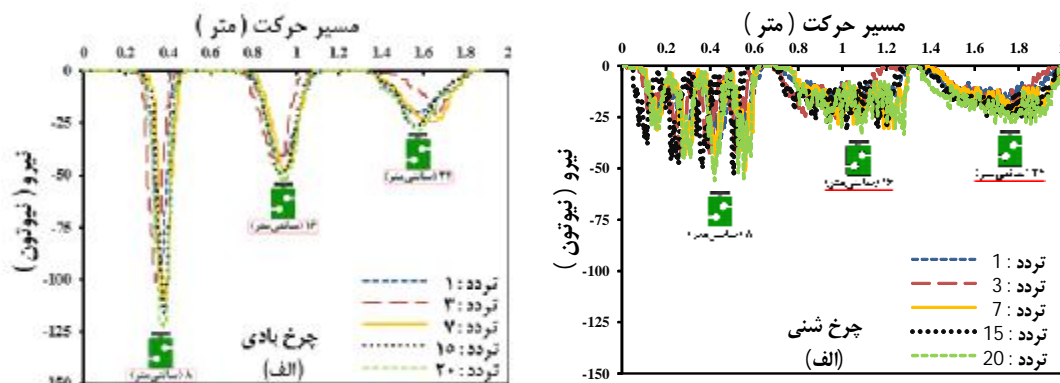


شکل ۳- اندازه‌گیری نشست خاک در زیر چرخ‌ها: الف) چرخ شنی فولادی، ب) چرخ معمولی

### نتایج و بحث

نتایج آزمایش‌ها به‌صورت نمودار تنش در طول مسیر حرکت چرخ‌ها بر روی حس‌گرها تهیه گردید. شکل ۴ مقدار نیروی وارده بر حس‌گر در عمق‌های سه‌گانه در سطوح مختلف تعداد عبور را نشان داده است که در نخستین نگاه، تفاوت چشم‌گیر چرخ و چرخ شنی از نظر انتشار نیرو در سطوح بالایی خاک را نشان می‌دهد. همچنین تغییرات نیرو نسبت به عمق در چرخ نسبت به چرخ شنی قابل ملاحظه است. بیشینه نیروی دریافتی حس‌گر در چرخ بر اساس مشاهدات این بخش در عمق ۸ سانتی‌متر در حدود ۲۱۶ درصد بیشتر از چرخ شنی بوده است. این در حالی است که در عمق‌های بیشتر، تفاوت بین میزان نیروی دریافتی توسط حس‌گرها به‌شدت کاهش یافته است به‌گونه‌ای که در عمق ۲۴ سانتی‌متر،

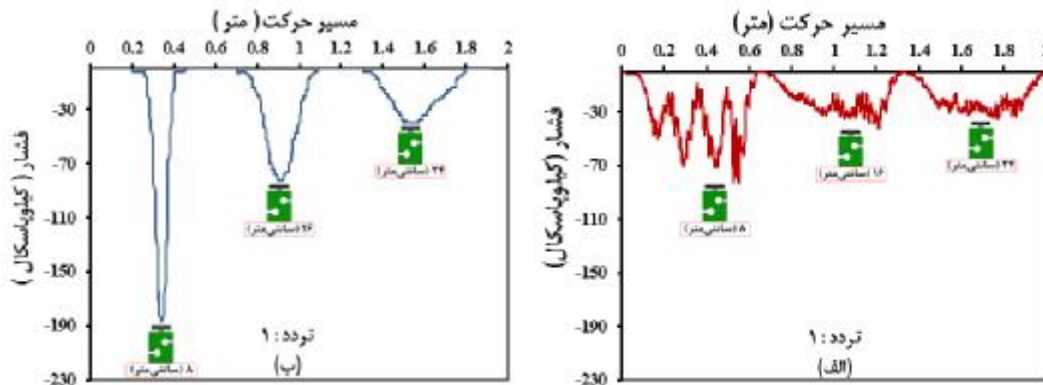
نیروی دریافتی در زیر چرخ، تنها ۲۰ درصد بیشتر از چرخ شنی بوده است. از طرف دیگر با در نظر گرفتن مدت‌زمان اعمال نیرو بر خاک در دو حالت چرخ-چرخ شنی آنچه محرز است تفاوت قابل‌توجه زمان حس شدن نیرو توسط حس‌گرها است به‌گونه‌ای که این زمان تا ۴ برابر برای چرخ شنی نسبت به چرخ معمولی مشاهده شده است و با توجه به کمتر بودن نیروی وارده بر خاک در چرخ شنی، با افزایش زمان تحمل بار توسط خاک، مقدار این نیرو و به تبع آن تنش وارد شده بسیار کمتر است. با توجه به تغییرات اندازه حرکت خطی در اثر اعمال نیرو به خاک، می‌توان دریافت که مقدار ضربه خطی وارد شده بر خاک در اثر عبور چرخ شنی به خاطر کاهش قابل ملاحظه مقدار نیروی وارد شده بر خاک، با وجود افزایش زمان اعمال بار دست‌خوش کاهش چشم‌گیری خواهد شد.



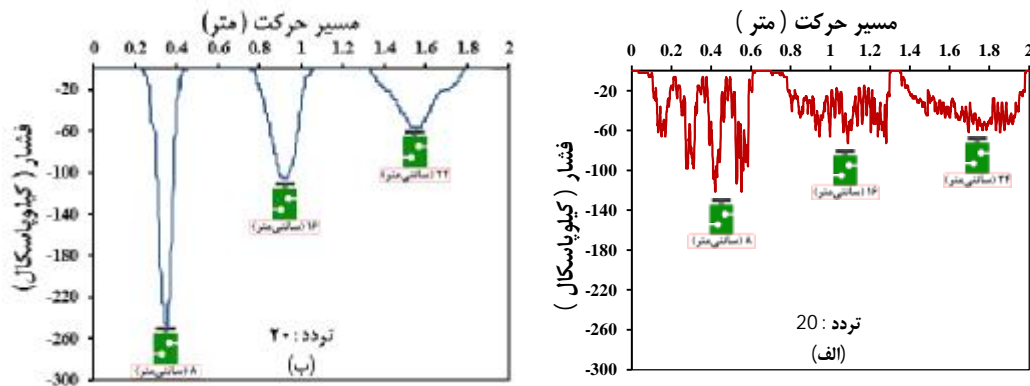
شکل ۴- مقدار نیروی دریافتی به ترتیب در عمق‌های ۲۴، ۱۶ و ۸ سانتی‌متر طی عبور آزمون‌گر در تدردهای مختلف؛ الف) چرخ شنی فولادی، ب) چرخ معمولی

تکرار عبور پارامتر مهمی است که در بیشتر مطالعات برای بررسی و مدل کردن تغییر شکل و تراکم خاک بر اساس اتفاقاتی که در نخستین عبور روی می‌دهد تعریف می‌گردد، به طوری که تا بیش از ۶۰ درصد تغییر شکل و تراکمی که طی چندین عبور پشت سر هم در خاک‌های نرم روی می‌دهد به عبور اول نسبت داده شده است (Lyasko, 2010). علاوه بر این ۱۰ تا ۳۱ درصد تغییرات هم به عبور دوم نسبت داده شده است (Vennik *et al.*, 2017). بر اساس مطالعه دیگری بیشتر از ۹۰ درصد تغییر شکل و تراکم، در کمتر از ۵ عبور در خاک روی می‌دهد (Vennik *et al.*, 2019).

بررسی تأثیر سطوح مختلف تعداد عبور بر تنش عمودی در خاک گواه آن بوده است که هم در چرخ معمولی و هم در چرخ شنی، عبورهای اولیه و به ویژه عبور نخست، بیشترین تراکم و تغییر شکل را در خاک به همراه داشته است (شکل ۴). شکل‌های ۵ و ۶ مقدار تنش عمودی در عمق‌های مختلف آزمایشی را برای چرخ و چرخ شنی در تردد نخست و تردد بیستم نشان داده است. بر این اساس میزان افزایش تنش طی عبورهای پس از عبور اول برای چرخ و چرخ شنی به ترتیب در حدود ۱۰ و ۸ درصد بوده است.



شکل ۵- تغییرات تنش عمودی به ترتیب در عمق‌های ۸، ۱۶ و ۲۴ سانتی‌متر خاک طی عبور نخست آزمون گر: الف) چرخ شنی فولادی، ب) چرخ معمولی

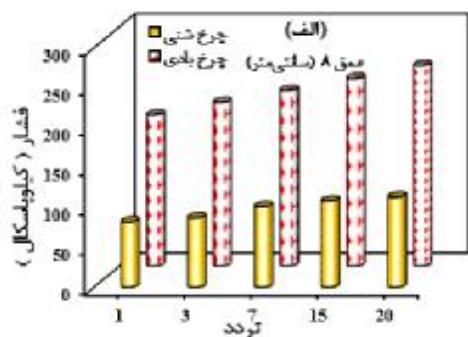


شکل ۶- تغییرات تنش عمودی به ترتیب در عمق‌های ۸، ۱۶ و ۲۴ سانتی‌متر خاک طی عبور بیستم آزمون گر: الف) چرخ شنی فولادی، ب) چرخ معمولی

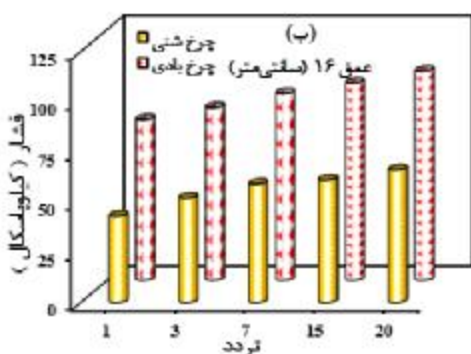
این روند مشهودتر است. بیشترین تفاوت بین چرخ معمولی و چرخ شنی در عمق ۸ سانتی‌متر دیده می‌شود، به طوری که تنش در زیر چرخ شنی در ترددهای ۱، ۳، ۷، ۱۵ و ۲۰ به ترتیب ۴۳، ۴۲، ۴۵، ۴۵ و ۴۵ درصد چرخ معمولی، اندازه‌گیری شده است. این در حالی است که در

شکل‌های ۷، ۸ و ۹ مقایسه چرخ معمولی و چرخ شنی حداکثر تنش به وجود آمده را در عمق‌های سه‌گانه و طی تکرار عبور آزمون‌گر نشان می‌دهد. در تمامی مشاهدات به دست آمده افزایش تردد، منجر به تنش‌های عمودی بیشتر در خاک شده است که البته در عمق ۸ سانتی‌متر

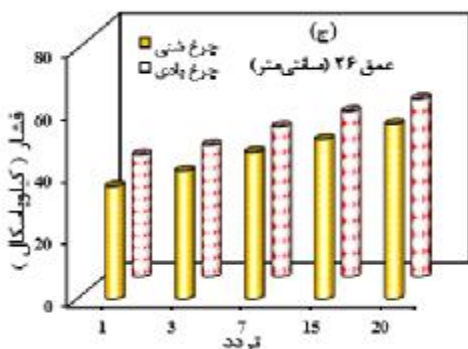
ایجاد می‌کند. مقایسه مقدار نشست خاک در ترددهای ۱، ۳، ۷، ۱۵ و ۲۰ بار عبور نشان داد که چرخ شنی به ترتیب ۵۲/۹۴، ۵۴/۵۵، ۵۲/۳۸، ۵۴ و ۴۵/۵۵ درصد نسبت به چرخ معمولی نشت کمتری در خاک ایجاد می‌کند.



شکل ۷- تنش در عمق ۸ سانتی‌متر در ترددهای مختلف چرخ معمولی و چرخ شنی



شکل ۸- تنش در عمق ۱۶ سانتی‌متر در ترددهای مختلف چرخ معمولی و چرخ شنی



شکل ۹- تنش در عمق ۲۴ سانتی‌متر در ترددهای مختلف چرخ معمولی و چرخ شنی

عمق ۱۶ سانتی‌متر برای ترددهای ۱، ۳، ۷، ۱۵ و ۲۰ مقدار تنش به وجود آمده توسط چرخ شنی به ترتیب ۶۳، ۶۳، ۶۲، ۶۲ و ۶۱ درصد چرخ بوده است که تفاوت کمتری را نسبت به عمق ۸ سانتی‌متر داشته است. نزدیک‌ترین تأثیر چرخ معمولی و چرخ شنی با یکدیگر از نظر تنش به وجود آمده در خاک در عمق ۲۴ سانتی‌متر دیده شد، به طوری که تنش زیر چرخ شنی در ترددهای ۱، ۳، ۷، ۱۵ و ۲۰ به ترتیب در حدود ۹۲، ۹۴، ۹۵، ۹۷ و ۹۸ درصد بوده و تقریباً مشابه یکدیگر هستند. مدلهای مشابهی برای انتشار تنش عمودی در زیر چرخ شنی‌ها توسط سایر محققین گزارش شده است (Mudarisov et al., 2020).

تنش به وجود آمده در عمق سطحی بر اساس نتایج به دست آمده در این پژوهش برای چرخ معمولی نسبت به چرخ شنی با عرض مشابه و بار عمودی یکسان، عموماً در حدود ۲ برابر بوده است. این در حالی است که آزمایش‌های این پژوهش در سطح رطوبت ثابت و نسبتاً پایین ۴ درصد به انجام رسیده است و بر اساس گزارش‌های دیگر، این افزایش تراکم در رطوبت‌های بالاتر ممکن است بسیار بالاتر باشد، به طوری که این ضرایب توسط سایر محققین ۲/۶ تا ۳/۵ برابر گزارش شده است (Gainullin, 2017; Gainullin, 2019).

شکل ۱۰ پروفایل تغییرات فشار زیر چرخ‌های معمولی و شنی را نشان می‌دهد که به صورت شکل زنگوله‌ای مرتفع در زیر چرخ معمولی و سطح کشیده و کم ارتفاع در زیر چرخ شنی بود. این هندسه به صورت عمومی برای انتشار تنش زیر چرخ معمولی و چرخ شنی در پژوهش‌های متعددی گزارش شده است (Gheshlaghi & Mardani, 2021; Keller & Arvidsson, 2016; Keller et al., 2002).

تفاوت چشم‌گیر تراکم خاک طی عبور چرخ معمولی و چرخ شنی را می‌توان متأثر از هندسه متفاوت سطح تماس در این دو عامل کشش دانست، که البته این موضوع، بیشتر پارامترهای عملکردی چرخ و چرخ شنی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد (Mudarisov et al., 2020).

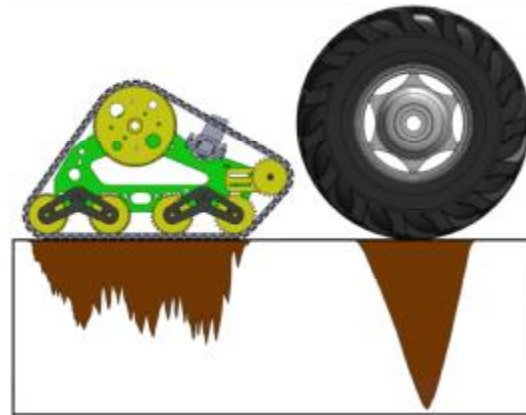
در شکل ۱۱ تغییرات عمق (مقدار نشست خاک) در تکرار عبور چرخ معمولی و چرخ شنی نشان داده شده است. مشاهدات حاکی از آن است که چرخ شنی همان‌طور که مقدار تراکم کمتری نسبت به چرخ ایجاد می‌نماید با روند مشابهی تغییر شکل عمودی بسیار کمتری را نیز در خاک



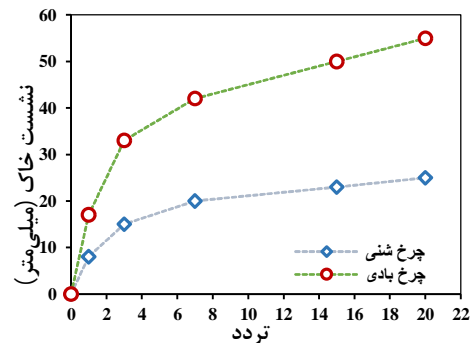
گامی در جهت انتخاب بهتر ماشین و کشنده‌های مزرعه‌ای قلمداد گردد. در این پژوهش، در شرایط آزمایشگاهی به مقایسه عملکرد چرخ-چرخ شنی از نظر برخی تغییرات مکانیکی تحمیل‌شده بر خاک پرداخته شد. تنش در سه عمق ۸، ۱۶ و ۲۴ سانتی‌متری و همچنین مقدار نشست خاک به‌عنوان پارامترهایی متأثر از بار عمودی ثابت و تکرار عبور چرخ (چرخ شنی) اندازه‌گیری و با یکدیگر مقایسه شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مزیت به‌کارگیری چرخ شنی نسبت به چرخ معمولی، خود را در قالب کاهش بیش از ۵۰ درصدی تنش در خاک (به‌ویژه در سطح بالایی خاک) و کاهش در حدود ۶۰ درصدی فشردگی و نشست خاک، نشان داد.

### منابع

- Ansorge, D., & Godwin, R. J. (2007). The effect of tyres and a rubber track at high axle loads on soil compaction, Part 1: Single axle-studies. *Biosystems Engineering*, 98(1): 115-126.
- Ansorge, D., & Godwin, R. J. (2008). The effect of tyres and a rubber track at high axle loads on soil compaction—Part 2: Multi-axle machine studies. *Biosystems Engineering*, 99(3): 338-347.
- 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.
- ASAE, S. (2011). ASAE D497. 7. Agricultural Machinery Management Data. ASAE, St. Joseph, MI, USA.
- Bekker, M. G. (1960). *Off-the-road locomotion; research and development in terramechanics*. University of Michigan Press.
- Bekker, M. G. (1960). *Off-the-road locomotion; research and development in terramechanics*. University of Michigan Press.
- Burt, E. C. (1993). Soil-tire/track interaction—current and future research needs. *Journal of terramechanics*, 30(5): 317-323.
- Burt, E. C., Lyne, P. W. L., Meiring, P., & Keen, J. F. (1983). Ballast and inflation effects on tire efficiency. *Transactions of the ASAE*, 26(5), 1352-1354.
- Crolla, D. A., & Schwanghart, H. (1992). Vehicle dynamics—steering I. *Journal of Terramechanics*, 29(1): 7-17.
- Franceschetti, B., Capacci, E., & Rondelli, V. (2016). Effects of rubber tracks on narrow-track tractors on the non-continuous rolling prediction model. *Journal of agricultural safety and health*, 22(4): 262-273.



شکل ۱۰- مدل کلی تنش عمودی در خاک در اثر عبور آزمون-گر چرخ و چرخ شنی بر پایه نتایج به دست آمده



شکل ۱۱- اثر چرخ معمولی و چرخ شنی بر روی خاک

در مقایسه تردد-نشست بین دو عامل کشش، نشست چرخ شنی در تردد‌های ۱، ۳، ۷، ۱۵ و ۲۰ به ترتیب ۰/۷/۴۷، ۴۵/۴۵، ۴۶/۴۷، ۴۶/۴۷ و ۴۵/۴۵ مشاهده شده است. در برخی مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی دیگری نیز کاهش فشردگی خاک و همچنین کاهش فرورفتن چرخ شنی در خاک با روندی مشابه نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق گزارش شده است (Ansorge & Godwin, 2007; Ansorge, & Godwin, 2008).

### نتیجه‌گیری

باوجود مزیت‌هایی که به‌کارگیری چرخ شنی‌ها نسبت به چرخ‌ها از نظر عملکرد کششی، کاهش تراکم خاک‌های زراعی و فشردگی کمتر خاک به همراه دارند، ماشین‌های چرخ شنی از توسعه و ترویج چندانی در مزارع ایران برخوردار نیستند. در همین راستا انجام مطالعاتی در رابطه با مقایسه عملکرد این دو عامل کشش از نظر تأیید مزایای هر کدام نسبت به دیگری در شرایط بومی ایران می‌تواند

- Journal of Terramechanics*, 89: 1-12.
- Park, W. Y., Chang, Y. C., Lee, S. S., Hong, J. H., Park, J. G., & Lee, K. S. (2008). Prediction of the tractive performance of a flexible tracked vehicle. *Journal of Terramechanics*, 45(1-2): 13-23.
- Rasool, S., & Raheman, H. (2018). Improving the tractive performance of walking tractors using rubber tracks. *Biosystems engineering*, 167: 51-62.
- Servadio, P., Marsili, A., Pagliani, M., Pellegrini, S., & Vignozzi, N. (2001). Effects on some clay soil qualities following the passage of rubber-tracked and wheeled tractors in central Italy. *Soil and Tillage Research*, 61(3-4): 143-155.
- Taghavifar, H., & Mardani, A. (2018). Off-road Vehicle Dynamics: Analysis, Modelling and Optimization. *Springer Publishing AG*, publishing. Gewerbestr. Switzerland.
- Tran, D. T., O'Brien, J., & Muro, T. (2002). An optimal method for the design of a robotic tracked vehicle to operate over fresh concrete under steering motion. *Journal of terramechanics*, 39(1): 1-22.
- Van den Akker, J. J., Arvidsson, J., & Horn, R. (2003). Introduction to the special issue on experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Union. *Soil and Tillage Research*, 73(1-2): 1-8.
- Vennik, K., Keller, T., Kuk, P., Krestein, K., & Reintam, E. (2017). Soil rut depth prediction based on soil strength measurements on typical Estonian soils. *Biosystems Engineering*, 163: 78-86.
- Vennik, K., Kuk, P., Krestein, K., Reintam, E., & Keller, T. (2019). Measurements and simulations of rut depth due to single and multiple passes of a military vehicle on different soil types. *Soil and Tillage Research*, 186: 120-127.
- Virto, I., Imaz, M. J., Fernández-Ugalde, O., Gartzia-Bengoetxea, N., Enrique, A., & Bescansa, P. (2015). Soil degradation and soil quality in Western Europe: current situation and future perspectives. *Sustainability*, 7(1): 313-365.
- Wong, J. Y. (2009). *Terramechanics and off-road vehicle engineering: terrain behaviour, off-road vehicle performance and design*. Butterworth-heinemann.
- Zemánek, T., & Neruda, J. (2021). Impact on the Operation of a Forwarder with the Wheeled, Tracked-Wheel or Tracked Chassis on the Soil Surface. *Forests*, 12(3): 336.
- Gainullin, I.A., 2017. Experimental study of track-type tractor speed influence on soil sealing. *Int. Res. J.*, 3-4(57): 29-31. (in Russian).
- Gainullin, I.A., 2019. Influence of the operating conditions on the wear intensity of the T-170M1.03-53 chain-track tractor. *Messenger of the Bashkir State Agrarian. University. Ufa*, 1(49):, 121–126. (in Russian).
- Gat, G., Franco, Y., & Shmulevich, I. (2020). Fast dynamic modeling for off-road track vehicles. *Journal of Terramechanics*, 92: 1-12.
- Gheshlaghi, F., & Mardani, A. (2021). Prediction of soil vertical stress under off-road tire using smoothed-particle hydrodynamics. *Journal of Terramechanics*, 95: 7-14.
- Huber, S., Prokop, G., Arrouays, D., Banko, G., Bispo, A., Jones, R. J. A., & Jones, A. R. (2008). *Environmental Assessment of Soil for Monitoring. Volume I: Indicators & Criteria* (No. JRC 47184). European Communities.
- Keller, T., & Arvidsson, J. (2016). A model for prediction of vertical stress distribution near the soil surface below rubber-tracked undercarriage systems fitted on agricultural vehicles. *Soil and Tillage Research*, 155: 116-123.
- Keller, T., Trautner, A., & Arvidsson, J. (2002). Stress distribution and soil displacement under a rubber-tracked and a wheeled tractor during ploughing, both on-land and within furrows. *Soil and Tillage Research*, 68(1): 39-47.
- Lamandé, M., Greve, M. H., & Schjøning, P. (2018). Risk assessment of soil compaction in Europe—Rubber tracks or wheels on machinery. *Catena*, 167: 353-362.
- Lyasko, M. (2010). Multi-pass effect on off-road vehicle tractive performance. *Journal of Terramechanics*, 47(5): 275-294.
- Mahboub Yangeje, H., & Mardani Korani, A. (2021). Design and Fabrication of a Bevameter for Measuring the Soil Deformation Details. *Iranian Journal of Biosystem Engineering* 52(3): 487-498. (In Persian)
- McKyes, E. (Ed.). (1985). *Soil cutting and tillage*. Elsevier.
- Mudarisov, S., Gainullin, I., Gabitov, I., & Khasanov, E. (2020). Improvement of Traction Indicators of a Track-Chain Tractor. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*, 22(3): 89-102.
- Mudarisov, S., Gainullin, I., Gabitov, I., Hasanov, E., & Farhutdinov, I. (2020). Soil compaction management: Reduce soil compaction using a chain-track tractor.