



19th Iranian Soil Science Congress
2-4 December, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۴ تا ۱۳ آذر ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



مقایسه اثر ترکیبی عبور ماشین‌های برداشت نیشکر بر مقاومت نفوذ در خاک: مطالعه موردی

علی معتمدی امین*، حسنعلی خاتین زاده، منصور نوری، داریوش نیکفر

تحقیقات کشاورزی، کشت و صنعت نیشکر کارون، شوشتر، ایران

*نویسنده مسئول: alimahohi@yahoo.com

چکیده

تراکم خاک به عنوان یک معضل جدی در کشاورزی مکانیزه، منجر به تخریب ساختار خاک و کاهش حاصلخیزی می‌شود. این پژوهش با هدف مقایسه تأثیر دو سیستم محرکه متفاوت، شامل دروگر نیشکر چرخ لاستیکی و چرخ زنجیری، بر پروفیل مقاومت به نفوذ در خاک لوم رسی سیلتی تحت شرایط رطوبت ۱۸ درصد وزنی صورت گرفت. مقاومت به نفوذ با استفاده از نفوذسنج (پنترومتر) عقربه‌ای در اعماق ۰ تا ۷۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری گردید. نتایج، تأثیر معنی‌دار نوع سیستم محرکه، تعداد نوبت‌های عبور و عمق خاک را بر مقاومت به نفوذ در خاک نشان داد. یافته‌ها حاکی از آن است که دروگر چرخ لاستیکی فشردگی شدید و متمرکزی را در لایه‌های سطحی (۰ تا ۵ سانتی‌متر) ایجاد می‌کند، در حالی که سیستم چرخ زنجیری با کاهش فشار در سطح، تراکم را به عمق‌های میانی (۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر) منتقل می‌سازد. همچنین، عبور ترکیبی دروگر چرخ زنجیری به همراه تراکتور و سبد حمل نی با چرخ‌های لاستیکی، اثری تجمعی داشته و مزیت نسبی دروگر چرخ زنجیری را در حفظ ساختار خاک تضعیف می‌کند. این مطالعه بر ضرورت انتخاب سیستم‌های محرکه مناسب و مدیریت عبور در شرایط رطوبتی بهینه برای حفظ کیفیت خاک تأکید می‌کند.

کلمات کلیدی: فشردگی خاک، مقاومت در برابر نفوذ، دروگر زنجیری یا چرخ لاستیکی، رطوبت خاک، عبور ماشین‌های برداشت

مقدمه

افزایش جمعیت و نیاز روزافزون به محصولات کشاورزی، مکانیزاسیون را به یک بخش اصلی در تولید محصولات زراعی تبدیل کرده است. با این حال، استفاده از ماشین‌های سنگین کشاورزی، به ویژه در مراحل حساس و پر فشار مانند برداشت محصول، چالش‌های زیست‌محیطی و زراعی متعددی را به همراه داشته که مهم‌ترین آنها تراکم خاک است (Hamza and Anderson, 2005). تراکم خاک، پدیده‌ای فیزیکی است که منجر به کاهش تخلخل، افزایش وزن مخصوص ظاهری و در نتیجه کاهش ظرفیت نگهداری آب و نفوذپذیری هوا در خاک می‌شود. این تغییرات ساختاری، به طور مستقیم بر رشد و گسترش ریشه گیاهان، جذب آب و عناصر غذایی و نهایتاً بر عملکرد محصول تأثیر منفی می‌گذارد (Otto et al., 2011). مشخصه خاک‌های تحت زراعت تک محصولی نیشکر، داشتن ساختمان ضعیف و متراکم می‌باشد. ترکیبی از عوامل شامل عملیات خاک‌ورزی شدید پیش از کاشت، استفاده از ماشین‌های سنگین و تراکتورهای حمل و نقل نی که ممکن است در شرایط رطوبتی نامناسب انجام شود و همچنین، عدم هماهنگی فاصله بین ردیف‌های کاشت و فاصله بین محور چرخ‌های ماشین‌ها موجب می‌شود عبور چرخ‌ها، علاوه بر فاصله بین ردیف‌ها، در حاشیه ردیف‌های کاشت نیز رخ دهد (Pankhurst et al., 2003).

زراعت محصولاتی مانند نیشکر، که نیازمند عملیات مکانیزه گسترده است، به شدت مستعد پدیده فشردگی، به ویژه در خاک‌های با بافت سنگین می‌باشد. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که در خاک‌های رسی، به دلیل دارا بودن خاصیت پلاستیک زیاد، عبور ماشین‌های برداشت در شرایط رطوبتی بالا آسیب‌پذیری خاک را در برابر فشردگی به حداکثر می‌رساند (Busscher et al., 2002). ناظری فر و همکاران، (۱۴۰۳) رطوبت ۱۴ درصد وزنی را به عنوان رطوبت بهینه جهت تردد ماشین‌های برداشت در مزارع گزارش کرده‌اند. یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها برای ارزیابی میزان فشردگی خاک، مقاومت به نفوذ است که با استفاده از دستگاهی به نام نفوذسنج (پنترومتر) اندازه‌گیری می‌شود. مقاومت به نفوذ بالای ۲ مگاپاسکال، به عنوان یک آستانه بحرانی، رشد اکثر ریشه‌های گیاهان زراعی را به شدت محدود می‌کند (Otto et al., 2011). به منظور کاهش اثرات مخرب فشردگی خاک، مقایسه تأثیر سیستم‌های چرخ لاستیکی و زنجیری بر خواص فیزیکی خاک، موضوعی مهم و پر بحث بوده است. تحقیقات نشان می‌دهند که سیستم‌های زنجیری، با توزیع وزن ماشین بر روی یک سطح تماس بزرگ‌تر، فشار تماسی کمتری را به خاک وارد می‌کنند و می‌توانند تراکم سطحی را کاهش دهند (Shaheb et al., 2021). با این وجود، تأثیر این سیستم‌ها در عمق‌های مختلف خاک و به ویژه در شرایط رطوبتی بالا و عبور ترکیبی ماشین‌های مختلف، نیازمند پژوهش‌های دقیق‌تری است. این پژوهش، با هدف مقایسه تأثیر دو نوع دروگر چرخ لاستیکی و زنجیری بر پروفیل مقاومت به نفوذ خاک، در یک خاک لوم رسی سیلتی، و همچنین بررسی اثر تجمعی عبور ترکیبی شامل عبورهای تراکتور و سبد حمل نی می‌پردازد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در زمان برداشت نیشکر سال زراعی ۱۴۰۳ در یکی از مزارع شرکت کشت و صنعت نیشکر کارون در شمال شرقی خوزستان واقع در طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۷ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۵ دقیقه شمالی انجام شد. به طور کلی، اقلیم منطقه جزء اقلیم‌های گرم و خشک و بافت خاک اغلب مزارع نیمه سنگین محسوب می‌شود. محتوای ۳۰ درصدی رس با کلاس بافتی خاک لوم رسی سیلتی، وزن مخصوص ظاهری ۱/۷۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب (در عمق ۳۰ سانتی‌متری خاک)، درصد آهک بیش از ۴۰ درصد و کربن آلی کمتر از ۰/۵ درصد، بخشی از مشخصات مزرعه مورد مطالعه است که تحت کشت بازرویی سوم (R3) نیشکر رقم CP69-1026 قرار داشت. کشت نیشکر در کشت و صنعت نیشکر کارون از نوع کشت تک ردیفه با فاصله کشت ۱۶۰ سانتی‌متری اجرا می‌گردد. عملیات برداشت در این مزرعه تحت شرایط رطوبتی ۱۸ درصد رطوبت وزنی صورت گرفت. شاخص مخروط خاک توسط دستگاه نفوذسنج دستی عقربه‌ای با سطح مقطع مخروط ۱ سانتی‌متر مربع تا عمق ۷۰ سانتی‌متری اندازه‌گیری و میزان فشار وارده بر حسب مگاپاسکال (MPa) گزارش شد. پیش از اندازه‌گیری، کالیبراسیون دستگاه توسط وزنه‌های ۵ تا ۶۰ کیلوگرمی صورت گرفت. میزان فشردگی خاک در ناحیه حاشیه پشته متأثر از عبور ماشین‌های برداشت شامل عبور اول: عبور دروگر و عبور چهارم: عبور تراکتور به همراه سبد حمل نی اندازه‌گیری و با قبل از عبور مقایسه شد. همچنین اثر عبور جداگانه دروگر چرخ لاستیکی و زنجیری (عبور اول) و اثر ترکیبی (همراه با تراکتور و سبد حمل نی (همگی چرخ لاستیکی) در عبور چهارم) مقایسه شدند. با توجه به تغییرات بالای فشردگی خاک، تعداد ۱۵ تکرار برای هر مرحله عبور در نظر گرفته شد. با توجه به حساسیت تغییرات تا عمق ۲۰ سانتی‌متری با فواصل ۵ سانتی‌متری و در عمق‌های بیشتر با فواصل ۱۰ سانتی‌متری فشردگی خاک ارزیابی شده است. همچنین، نرمال سازی داده‌های درصد تغییرات شاخص مقاومت به نفوذ در خاک نیز پیش از تجزیه آماری صورت گرفت. تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم افزار آماری SAS 9.4 و ترسیم شکل‌ها با استفاده از Excel انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج این پژوهش به وضوح تأثیر عبور ماشین‌های سنگین بر ساختار خاک را نشان می‌دهد. نتایج تجزیه واریانس تأیید کرد که هر سه عامل اصلی (نوع دروگر، تعداد نوبت‌های عبور و عمق خاک) و همچنین اثرات متقابل آن‌ها (به جز اثر متقابل نوع دروگر و تعداد عبور) بر مقاومت به نفوذ (شاخص مخروط خاک) در سطح معنی‌دار ۱ درصد تأثیرگذار بوده‌اند. مقاومت به نفوذ در خاک قبل از عبور در هر دو نقطه آزمایش، با افزایش عمق به صورت تدریجی افزایش یافت (شکل ۱). این پدیده نشان‌دهنده وجود

تراکم زیرسطحی است که می‌تواند حاصل فشارهای طبیعی یا عملیات کشاورزی در سال‌های گذشته باشد (Voorhees et al., 1986). پس از عبور، مقاومت به نفوذ در تمامی عمق‌ها و در هر دو حالت (دروگر چرخ لاستیکی و زنجیری) افزایش یافت. پس از عبور اول که شامل عبور دروگر بود، افزایش محسوسی در مقاومت خاک مشاهده شد. این افزایش در محل عبور دروگر چرخ لاستیکی نسبت به دروگر زنجیری بیشتر بود. این افزایش شدید در لایه‌های سطحی، با مکانیسم اعمال فشار در چرخ‌های لاستیکی همخوانی دارد. این چرخ‌ها با توزیع وزن در سطحی محدود، فشار تماسی بسیار بالایی را به خاک وارد کرده و منجر به فشردگی شدید و متمرکز در لایه‌های فوقانی و حاصلخیز خاک می‌گردند (Shaheb et al., 2021). این در حالی است که دروگر زنجیری به دلیل توزیع یکنواخت‌تر بار، فشردگی کمتری در سطح خاک ایجاد می‌کند (Botta et al., 2009; Keller and Lammande, 2010). با این وجود، به دلیل وزن کل بالای ماشین، تنش به عمق‌های بیشتری منتقل شده و باعث فشردگی در لایه‌های میانی (محدوده عمق ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متری) می‌گردد (Keller et al., 2007). در عبور چهارم، که شامل عبور تراکتور و سبد حمل نیشکر بود، الگوی تغییر مقاومت خاک بسته به محل متفاوت بود (شکل ۱). در محلی که دروگر چرخ لاستیکی عبور کرده بود، افزایش مقاومت خاک در محدود لایه سطحی تا میانی نمایان شد. در حالی که در عبورهای بعد از دروگری چرخ زنجیری، فشردگی تجمعی در لایه میانی قابل توجه بود (شکل ۱A). یکی از مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش، تأیید اثر تجمعی عبور و همچنین شناسایی نقص در سیستم عبور ترکیبی است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، بخش عمده‌ای از تراکم در نوبت‌های اول و دوم عبور (دروگر) رخ می‌دهد، اما نوبت‌های بعدی (سوم و چهارم) نیز به صورت تجمعی به فشردگی خاک می‌افزایند. در این مطالعه، عبور تراکتور کشنده سبد حمل نی با چرخ‌های لاستیکی در عبورهای نوبت سوم و چهارم (پس از عبور اول و دوم دروگر) انجام می‌شود. این عبور ترکیبی، مزیت اولیه سیستم زنجیری در محافظت از لایه‌های سطحی را تضعیف می‌کند. عبور تراکتور سنگین و به ویژه سبد حمل نی با چرخ‌های لاستیکی، به دلیل فشار تماسی بالا، باعث ایجاد فشردگی جدید و تشدید تراکم قبلی می‌شود و اثرات آن تا عمق‌های زیرین گسترش می‌یابد (Al-Hamed and Al-Hussaini, 2017).

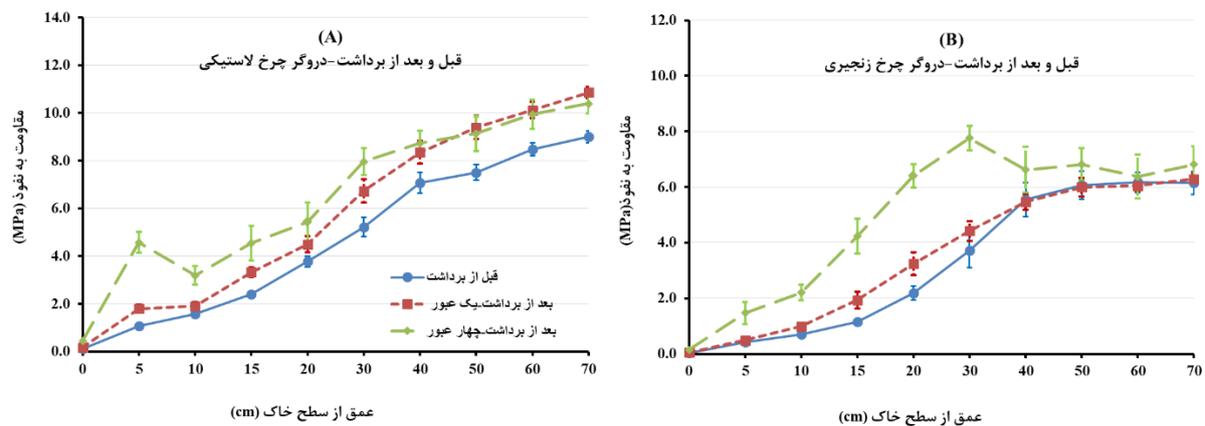
جدول ۲- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) شاخص مخروط خاک در چهار عبور

فاکتور	df	شاخص مخروط
نوع دروگر	۱	۵۰۶/۳***
عبور	۲	۱۸۱/۳***
عمق	۹	۷۰۲/۱***
نوع دروگر×عبور	۲	۱/۳۶ ^{ns}
نوع دروگر×عمق	۱۸	۷/۳۱***
نوع دروگر×عمق	۹	۲۳/۴۱***
نوع دروگر×عبور×عمق	۱۸	۳/۵۳**
خطا	۷۴۰	۱/۷۶
ضریب تغییرات (درصد)	-	۲۹/۲

ns: نامعنی‌دار در سطح پنج درصد ($P>0/05$); *: معنی‌دار در سطح پنج درصد ($P\leq 0/05$); **: معنی‌دار در سطح یک درصد ($P\leq 0/01$) و ***: معنی‌دار در سطح یک‌دهم درصد ($P\leq 0/001$).

بررسی تغییرات مقاومت به نفوذ در خاک در دو محل از مزرعه نیشکر نشان داد که مقادیر اولیه مقاومت قبل از عبور در این دو محل یکسان نبوده و تفاوت محسوسی بین آن‌ها وجود داشت. این موضوع می‌تواند ناشی از تفاوت در شرایط رطوبتی موضعی یا ناهمگنی در بافت خاک یا عملیات تهیه زمین مانند زیرشکن‌زنی باشد (Smith et al., 2021). با این حال، استفاده از درصد تغییرات مقاومت به نفوذ در خاک نسبت به مقادیر اولیه (قبل از عبور) امکان مقایسه بهتر اثر عبور ماشین‌های را فراهم کرد (شکل ۲). در عبور اول، اثر دروگر چرخ لاستیکی به‌ویژه در لایه سطحی شدید بود، به طوری که مقاومت نفوذ در عمق سطحی حدود ۷۰ درصد نسبت به قبل از عبور افزایش یافت. این افزایش بیانگر فشار متمرکز لاستیک‌ها بر لایه‌های بالایی خاک است. در مقابل، دروگر چرخ زنجیری افزایش بسیار کمتری در سطح خاک ایجاد کرد (حدود ۱۵ درصد)، اما در لایه‌های میانی درصد افزایش مقاومت به نفوذ در عبور دروگر زنجیری بیشتر از لاستیکی بود (شکل ۲C). این الگو نشان می‌دهد که فشار در زنجیر

به دلیل سطح تماس بیشتر، در لایه سطحی توزیع شده اما به اعماق منتقل شده است، در حالی که فشار لاستیک‌ها بیشتر در سطح متمرکز مانده است (Alakukku, 2020).



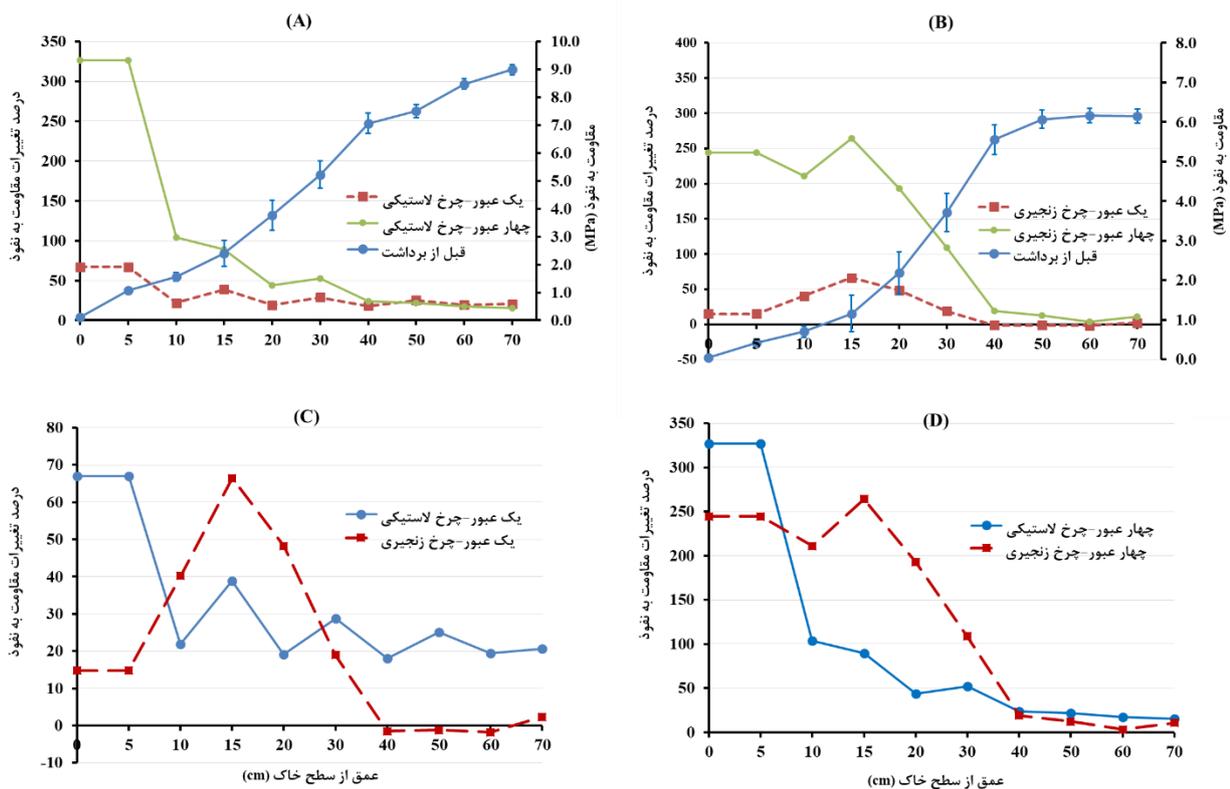
شکل ۱- تغییرات مقاومت به نفوذ در خاک قبل و بعد از یک و چهار عبور ماشین‌های برداشت با دروگر چرخ لاستیکی (A) و چرخ زنجیری (B) در مزارع تحت کشت نیشکر. دامنه تغییرات استاندارد خطا (n=15).

علاوه بر این، در عبور ترکیبی دروگر چرخ لاستیکی و تراکتور و سبد حمل نی، حداکثر درصد تغییرات پس از چهار نوبت عبور در لایه‌های سطحی (عمق ۵ سانتی‌متر) رخ داده و به بیش از ۳۵۰ درصد رسید (شکل ۲D). این افزایش شدید در لایه‌های سطحی، با مکانیسم اعمال فشار در چرخ‌های لاستیکی همخوانی دارد (Botta et al., 2022). این چرخ‌ها با توزیع وزن در سطحی محدود، فشار تماسی بسیار بالایی را به خاک وارد کرده و منجر به فشردگی شدید و متمرکز در لایه‌های فوقانی و حاصلخیز خاک می‌گردند (Shaheb et al., 2021). در مقابل، در حالت چرخ زنجیری، حداکثر درصد تغییرات مقاومت به نفوذ (حدود ۲۵۰ درصد) در عمق‌های میانی (صفر تا عمق ۲۰ سانتی‌متر) رخ داد، در حالی که درصد تغییرات در لایه‌های سطحی به مراتب کمتر از حالت چرخ لاستیکی بود (شکل ۲B, C). این الگو به دلیل مکانیسم عملکرد سیستم‌های زنجیری است. این سیستم‌ها با توزیع وزن در یک سطح تماس گسترده‌تر، فشار تماسی را کاهش داده و از فشردگی بیش از حد در لایه‌های سطحی جلوگیری می‌کنند. با این حال، به دلیل وزن کل بالای ماشین، تنش به عمق‌های بیشتری منتقل شده و باعث فشردگی در لایه‌های میانی می‌گردد (Keller et al., 2007) و عبورهای بعدی (تراکتور و سبد حمل) اثر تجمعی داشته و شدت فشردگی را در عمق‌های پایین‌تر افزایش دادند (شکل ۲B, C).

جدول ۲- تجزیه واریانس* (میانگین مربعات) درصد تغییرات شاخص مخروط خاک

شاخص مخروط	df	فاکتور
۰/۱۸۹***	۱	تیمار
۱/۶۸***	۱	عبور
۰/۱۶۲***	۹	عمق
۰/۰۶۳*	۱	تیمار×عبور
۰/۱۱۳***	۹	عبور×عمق
۰/۰۵۷***	۹	تیمار×عمق
۰/۰۱۳ ^{ns}	۹	تیمار×عبور×عمق
۰/۰۱۳	۴۶۰	خطا
۶۸/۲	-	ضریب تغییرات (درصد)

ns: نامعنی‌دار در سطح پنج درصد ($P > 0.05$), * معنی‌دار در سطح پنج درصد ($P \leq 0.05$), ** معنی‌دار در سطح یک درصد ($P \leq 0.01$) و *** معنی‌دار در سطح یک‌دهم درصد ($P \leq 0.001$). * داده‌ها نرمال سازی شده‌اند.



شکل ۲- تغییرات مقاومت به نفوذ در خاک قبل عبور و درصد تغییرات بعد از یک و چهار عبور ماشین‌های برداشت (دروگر چرخ لاستیکی، (A) و (دروگر چرخ زنجیری، (B) و مقایسه جداگانه درصد تغییرات مقاومت به نفوذ در یک (C) و چهار عبور (D) در مزارع تحت کشت نیشکر. دامنه تغییرات استاندارد خطا (n=15).

نتیجه‌گیری

این مطالعه با مقایسه تأثیر دو سیستم محرکه چرخ لاستیکی و زنجیری بر پروفیل مقاومت به نفوذ در خاک، نشان داد که تراکم خاک یک پدیده اجتناب ناپذیر در شرایط رطوبتی بالا است. سیستم چرخ زنجیری با کاهش فشار در لایه‌های سطحی، آسیب کمتری به این لایه‌ها وارد می‌کند، اما به دلیل وزن بالای ماشین‌های، قادر به جلوگیری از تراکم در عمق‌های میانی نیست. همچنین، اگرچه دروگر چرخ زنجیری مزیت‌هایی در مقایسه با چرخ لاستیکی دارد، اما عبور ترکیبی دروگر چرخ زنجیری و تراکتور با چرخ‌های لاستیکی، مزیت‌های سیستم زنجیری را تضعیف می‌کند. این یافته‌ها بر اهمیت انتخاب صحیح ماشین‌های، مدیریت جامع ترافیک و انجام عملیات کشاورزی در شرایط بهینه رطوبتی برای حفظ سلامت و حاصلخیزی خاک تأکید دارند.

منابع:

ناظری‌فر، م.، غفاری، ح.، خادم‌الرسول، ع. (۱۴۰۳). تأثیر تراکم خاک بر شاخص‌های دسترسی به آب خاک و برخی ویژگی‌های رشد گیاه نیشکر، مجله تحقیقات خاک و آب ایران، ۵۵(۱۰)، ۱۷۸۷-۱۸۰۲.

Alakukku, L. (2020). Soil compaction by agricultural machinery: Recent advances in knowledge. *Soil & Tillage Research*, 199, 104597.

Al-Hamed, S.A., A. A. Al-Hussaini. (2017). The effect of tractor traffic on soil compaction and root development in a clay soil. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 16(2), 159-165.

Botta, G. F., Tolón-Becerra, A., Bellora Tourn, F. (2009). Effect of the number of tractor passes on soil rut depth and compaction in two tillage regimes. *Soil and Tillage Research*, 103(2), 381-386. DOI: 10.1016/j.still.2008.12.002.

Botta, G.F., Tolón-Becerra, A., Lastra-Bravo, X., Rivero, D. (2022). Soil compaction due to harvester traffic in sugarcane production. *Soil and Tillage Research*, 217, 105276.

- Busscher, W.J., Bauer, P.J., Frederick, J.R., (2002). Recompaction of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall. *Soil and Tillage Research*, 68, 49-57.
- Hamza, M.A., Anderson, W.K. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and management. *Soil and Tillage Research*, 82(2), 121-140.
- Keller, T., Défossez, P., Weiskopf, P., Arvidsson, J., & Richard, G. (2007). SoilFlex: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. *Soil & Tillage Research*, 93(2), 391–411.
- Keller, T., Lamandé, M. (2010). Challenges in the development of analytical soil compaction models. *Soil & Tillage Research*, 111(1), 54–64.
- Otto, R., Silva, A.P., Franco, H.C.J., Oliveira, E.C.A., Trivelin, P.C.O. (2011). High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. *Soil and Tillage Research*, 117, 99–107.
- Shaheb, M.R., Venkatesh, R. Shearer, S.A. (2021). A Review on the Effect of Soil Compaction and its Management for Sustainable Crop Production. *Journal of Biosystems Engineering*, 46, 417–439.
- Smith, R., Johnson, C., Brown, P. (2021). Variability in soil resistance and the implications for field traffic. *Agricultural Systems*, 190, 103123
- Voorhees, W.B., Allmaras, R.R. Johnson, D.G. (1986). Alleviating soil compaction: Tillage and other options. *Journal of Soil and Water Conservation* 41(3), 140-145.

Comparative effects of sugarcane harvesting machinery traffic on soil penetration resistance: a case study

Ali Motamedi-Amin*, Hassanali Khatin-Zadeh, Mansour Nouri, Daryush Nikfar,
Agricultural Researches Department, Karun Agro Industrial, Inc, Shushtar, Iran

*Corresponding author: alimahohi@yahoo.com

Abstract

Soil compaction is a serious problem in mechanized agriculture, leading to soil structure degradation and reduced fertility. This study aimed to compare the effect of two different drive systems, including a tire harvester and a chain harvester, on the penetration resistance profile of a silty clay loam soil under moisture conditions higher than 18% by weight. Penetration resistance was measured using a dial penetrometer at depths of 0 to 70 cm. The results showed a significant effect of the type of drive system, the number of passes, and soil depth on soil penetration resistance. The findings indicate that the tire harvester creates intense and concentrated compaction in the surface layers (0 to 5 cm), while the chain system transfers the compaction to intermediate depths (15 to 30 cm) by reducing the pressure at the surface. Also, the combined movement of a tracked harvester with a tractor and a rubber-wheeled cane carrier has a cumulative effect and weakens the relative advantage of the tracked harvester in maintaining soil structure. This study emphasizes the need to select appropriate drive systems and manage movement in optimal moisture conditions to maintain soil quality.

Keywords: Soil compaction, penetration resistance, tracked or rubber-wheeled harvester, soil moisture, harvesting machines traffic