19th Iranian Soil Science Congress
2-4 December, 2025
نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذر ۱۴۰۴
مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management
دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran
۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

ارزیابی اثر عبور ماشین‌های برداشت نیشکر بر تراکم خاک تحت شرایط رطوبتی نامناسب

علی معتمدی امین[1*]، حسنعلی خاتین زاده[1]، محمود شمیلی[2]، منصور نوری[1]، داریوش نیکفر[1]

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

۲-مدیرعامل کشت و صنعت نیشکر کارون، شوشتر، ایران

*نویسنده مسئول: alimahohi@yahoo.com

چکیده

فشردگی خاک، به عنوان یکی از عوامل کلیدی محدودکننده، رشد ریشه، نفوذ آب بوده و در نهایت عملکرد نیشکر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این مطالعه با هدف ارزیابی تأثیر عبور ماشین‌های برداشت بر شاخص‌های فشردگی خاک در شش مزرعه با بافت خاک و سنین نیشکر متفاوت انجام شد. عملیات برداشت نیشکر در تمامی مزارع مورد مطالعه تحت شرایط رطوبتی بالاتر از ۱۶ درصد جرمی صورت گرفت. مقاومت به فروروی در خاک با استفاده از دستگاه پنترومتر مخروطی در دو حالت قبل و بعد از عبور ماشین‌های برداشت نیشکر اندازه‌گیری و مقایسه شد. نتایج نشان داد که عبور ماشین‌های برداشت، به ویژه پس از چهار بار عبور، مقاومت به فروروی در خاک را به طور معنی‌داری افزایش می‌دهد. در لایه‌های سطحی (۰ تا ۱۵ سانتی‌متر)، این افزایش مقاومت در برخی موارد به بیش از ۳۰۰ درصد رسید. میزان و عمق فشردگی با توجه به بافت خاک متفاوت بود. در خاک‌های سنگین بافت با درصد رس بالا، افزایش مقاومت تا عمق ۷۰ سانتی‌متری مشاهده شد، در حالی که در خاک‌های با بافت سبک‌تر، تأثیر فشردگی عمدتاً محدود به لایه‌های سطحی بود. همچنین، مزارع سن بازرویی (R) به دلیل اثرات تجمعی فشردگی در برداشت‌های قبل، مقاومت بیشتری نسبت به مزارع پلنت (P) نشان دادند. حداکثر مقاومت اندازه‌گیری شده تا ۱۰ مگاپاسکال (MPa) بود که فراتر از آستانه بحرانی برای رشد ریشه و نفوذ آب است. این نتایج بر لزوم مدیریت عبور ماشین‌های برداشت و توجه به شرایط رطوبتی، بافت خاک و سن مزارع (پلنت یا بازرویی) جهت کاهش فشردگی خاک و بهبود پایداری عملکرد نیشکر تأکید دارد.

واژگان کلیدی: فشردگی خاک، نیشکر، مقاومت به فروروی، عبور ماشین‌های برداشت، بافت خاک

مقدمه

پدیده تراکم یا فشردگی خاک به عنوان یکی از مهم‌ترین اشکال تخریب فیزیکی خاک محسوب می‌شود که به طور ویژه در کشت‌های مکانیزه مورد توجه است. تراکم خاک بر وضعیت آب در خاک، فرسایش، چرخه عناصر و رشد گیاهان مؤثر است. تراکم خاک را می‌توان کاهش تخلخل خاک در اثر بارهای وارده خارجی و یا داخلی توصیف نمود. در اثر تراکم، مقاومت مکانیکی خاک افزایش و تهویه خاک تحت تأثیر قرار می‌گیرد. ریشه گیاه برای فروروی در خاک باید نیرویی اعمال کند تا ذرات خاک را جابجا نماید. چنانچه این نیرو از نیروی مقاومت مکانیکی خاک کمتر باشد، ریشه قادر به جابجا کردن ذرات خاک نخواهد بود و در نتیجه در فروروی به داخل خاک دچار مشکل خواهد شد. تراکم همچنین باعث افزایش مقاومت فروروی در خاک شده و رشد ریشه در خاک را دشوار می‌کند و در صورت بیشتر بودن مقاومت خاک نسبت به فشار رشد ریشه، رشد آن متوقف می‌شود (Hossain et al., 2018).

نیشکر (*Saccharum officinarum* L.) گیاهی C4 از تیره پوآسه است که عموماً در مناطق گرم‌سیر و نیمه گرم‌سیر کشت می‌شود (Wang et al., 2020). 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 بسیار سنگین و تراکتورهای قوی برای برداشت و حمل و نقل نی که اغلب در شرایط رطوبتی نامناسب انجام می‌شود و همچنین، عدم هماهنگی فاصله بین ردیف‌های کاشت و فاصله بین چرخ‌های ماشین‌ها، به ویژه در سبدهای حمل نی می‌باشد که موجب می‌شود عبور چرخ‌ها علاوه بر فاصله بین ردیف‌ها، در ردیف‌های کاشت نیز رخ دهد (Pankhurst et al., 2003). کشت نیشکر در کشت و صنعت نیشکر کارون از نوع کشت تک ردیفه با فاصله کاشت ۱۶۰ سانتی‌متری اجرا می‌گردد. با توجه به عدم تناسب عرض لاستیک‌های ماشین‌های برداشت، علاوه بر کف جوی، بخشی از حاشیه پشته نیز تحت تأثیر عبور قرار گرفته و متراکم می‌شود. در مزارع تحت کشت نیشکر، به واسطه استفاده از ماشین‌های سنگین و نیمه‌سنگین متعدد در مراحل مختلف کاشت، داشت و برداشت نیشکر، خطر وقوع تراکم خاک در آنها بالاست (مرادی و همکاران، ۱۳۹۲).

از سوی دیگر، به دلیل قرار گرفتن زمان برداشت در محدوده پاییز و زمستان، شرایط رطوبتی خاک به نحوی است که برخی از مزارع نیشکر، تحت شرایط نامناسب رطوبتی برداشت می‌شوند (Monjezi and Marzban, 2022; Hosseini et al., 2021; Khosravi and Ebrahimzadeh, 2019). مهردادیان و همکاران (۱۳۹۰) تأثیر عبور ماشین‌های برداشت و سبدهای حمل نیشکر در مقادیر مختلف رطوبت خاک بر چگالی ظاهری و شاخص مخروط خاک در مزارع کشت و صنعت دعبل خزائی اهواز را بررسی نمودند. مقادیر شاخص مخروط خاک اندازه‌گیری شده پیش و پس از عبور ماشین‌ها نشان داد که در اغلب مزارع، فشردگی خاک تا عمق‌های ۶۳ تا ۷۰ سانتی‌متری خاک قابل مشاهده بود. رطوبت بهینه خاک برای عبور ماشین‌های برداشت نیشکر باید در محدوده‌ای باشد که هم از نظر فنی امکان حرکت و عملیات ماشین‌های برداشت فراهم باشد و هم از نظر حفظ ساختمان خاک و کاهش آسیب‌های زیستی مؤثر باشد. مطالعات مختلف نشان می‌دهند که در رطوبت‌های پایین‌تر از ۱۲ درصد جرمی، خاک به حدی سخت و مقاوم است که باعث کاهش کارایی ماشین‌ها و افزایش خطر شکستگی تجهیزات می‌شود. در مقابل، رطوبت‌های بالاتر از ۱۸ درصد جرمی، باعث افزایش چسبندگی و کاهش نفوذپذیری خاک، و در نتیجه، احتمال تغییر شکل و فشردگی بیش از حد را افزایش می‌دهد که می‌تواند باعث کاهش رشد ریشه و مشکلات زهکشی گردد (Khosravi and Ebrahimzadeh, 2019). ناظری‌فر و همکاران (۱۴۰۳) حد رطوبتی ۱۴ درصد جرمی را به عنوان رطوبت بهینه با حداقل تراکم خاک، جهت عبور ماشین‌های برداشت گزارش نموده‌اند و رطوبت‌های بالای ۱۶ درصد جرمی به عنوان رطوبت نامناسب در نظر گرفته شده است. Barzegar و همکاران (2000) بیشترین تراکم را در حد خمیری گزارش نموده است. این پژوهش در شرایط برداشت در مزارع با رطوبت‌های بیش از ۱۶ درصد جرمی (دامنه ۱۷-۱۹درصد) صورت گرفته است. بنابراین این پژوهش به بررسی اثر عبور ماشین‌های برداشت نیشکر در شرایط رطوبتی نامناسب بر فشردگی خاک در حاشیه پشته می‌پردازد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال زراعی ۰۴-۱۴۰۳ در مزارع شرکت کشت و صنعت نیشکر کارون واقع در شمال شرقی خوزستان در طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۵-۴۱ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۳-۱۲ دقیقه شمالی انجام شد. در جدول ۱، برخی از مشخصات خاک در مزارع مورد بررسی اشاره شده است. همچنین، درصد آهک بیش از ۴۰ درصد و کربن آلی کمتر از ۰/۵ درصد از شاخصه‌های خاک این مزارع می‌باشند. به طورکلی، اقلیم منطقه جزء اقلیم‌های گرم و خشک و بافت خاک اغلب مزارع نیمه سنگین محسوب می‌شود. همه مزارع تحت برداشت از مزارع با رطوبت بیشتر از بهینه جهت عبور (۱۷-۱۹ درصد رطوبت جرمی) (ناظری‌فر و همکاران، ۱۴۰۳) انتخاب شدند. 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 تا چهار عبور (شامل عبور اول: عبور هاروستر (چرخ‌های راست)، عبور دوم: عبور هاروستر (چرخ‌های چپ)، عبور سوم: عبور تراکتور به همراه سبد حمل نی (چرخ‌های سمت راست) و عبور چهارم: عبور تراکتور به همراه سبد حمل نی (چرخ‌های سمت چپ)) اندازه‌گیری و با قبل از عبور مقایسه شد. با توجه به تغییرات بالای فشردگی

خاک، تعداد ۱۰ تکرار برای هر مرحله عبور در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج اولیه از مقایسه چهار عبور، ادامه ارزیابی‌ها به مقایسه عبورهای اول و چهارم با قبل از عبور محدود شدند. با توجه به حساسیت تغییرات فشردگی خاک در لایه سطحی خاک تا عمق ۲۰ سامتی‌متری، اندازه‌گیری‌ها با فواصل ۵ سانتی‌متری و در عمق‌های بیشتر (تا عمق ۷۰ سانتی‌متری) با فواصل ۱۰ سانتی‌متری انجام شده است. پیش از آنالیز آماری داده‌ها با استفاده از cox-box نرمال سازی صورت گرفت. تجزیه واریانس داده‌ها برای هر مزرعه به طور جداگانه در قالب طرح فاکتوریل کاملاً تصادفی شامل دو فاکتور عبور (۵ سطح در قبل و بعد از یک تا چهار عبور (جدول ۲)؛ سه سطح در قبل و بعد از یک و چهار عبور (جدول ۳)؛ ۲ سطح در مقایسه درصد تغییرات مقاومت در عبورهای اول و چهارم نسبت به قبل از آن (جدول ۴)) و عمق (ده سطح) با استفاده از نرم افزار آماری SAS 9.4 و تهیه شکل‌ها با استفاده از Excel انجام شد.

جدول ۱- ویژگی‌های مزارع مورد مطالعه

شماره مزرعه	واریته نیشکر	سن	شن (درصد)	سیلت (درصد)	رس (درصد)	بافت خاک	جرم مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی متر مکعب)
۳۱۳	CP69-1062	P	۱۶	۴۴	۴۰	رسی سیلتی	۱/۶۱
۴۰۵	CP69-1062	R2	۱۹	۴۹	۳۲	لوم رسی سیلتی	۱/۷۹
۴۱۲	CP69-1062	R3	۱۹	۵۱	۳۰	لوم رسی سیلتی	۱/۷۷
۵۰۸	CP48-103	P	۲۳	۴۹	۲۹	لوم رسی	۱/۵۹
۵۱۰	CP48-103	P	۲۶	۴۷	۲۷	لوم سیلتی	۱/۶۲
۶۵۶	CP69-1062	R1	۶	۴۲	۵۲	رسی سیلتی	۱/۷۶

P: پلنت یا تازه کشت؛ R: راتون یا سن بازرویی

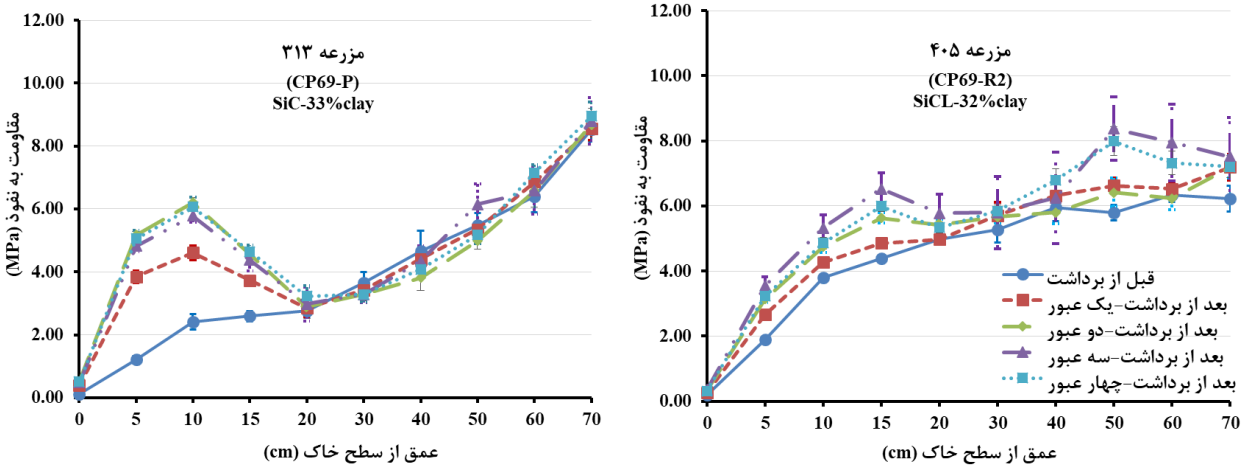
نتایج و بحث

در ابتدای ارزیابی‌ها، شاخص مخروطی خاک در دو مزرعه ۴۰۵ و ۳۱۳ از مزارع تحت کشت نیشکر با سنین مختلف تازه کشت (پلنت) و بازرویی (راتون) (جدول ۲) ارزیابی گردید. نتایج نشان داد فشردگی خاک به طور معنی‌داری ($P\leq 0.001$) تحت تأثیر تعداد عبور، عمق و اثر متقابل آنها قرار گرفت. به‌طورکلی، نتایج نشان داد که متناسب با افزایش عمق خاک، میزان فشردگی خاک نیز افزایش یافت، اما بیشترین تغییرات تراکم خاک در مقایسه با قبل از عبور در عمق کم و نزدیک به سطح خاک مشاهده شد، که با نتایج مطالعات دیگر (Zhao et al., 2020) هم‌خوانی داشت. اگرچه عمرانی و همکاران (۱۳۹۲) شدت اثر عبور ماشین-های برداشت را در عمق پایین‌تر از ۶۰ سانتی‌متری گزارش کرده‌اند. در مزرعه تحت کشت نیشکر سال اول (پلنت) (مزرعه ۳۱۳)، تراکم خاک در عمق ۵ سانتی‌متری و با افزایش سن نیشکر (مزرعه ۴۰۵) تراکم خاک در عمق بیشتری مشاهده شد (شکل ۱). اردستانی و همکاران (۲۰۱۷) شاخص مخروط خاک در قبل و بعد از عبور ماشین‌های برداشت بررسی و بیشترین تراکم خاک ناشی از عبور را در عمق ۵ سانتی‌متری گزارش کرده‌اند. در حالی که رحیمی و همکاران (۲۰۱۹) عمق تراکم خاک را در لایه ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متری گزارش کردند. با این وجود، تغییرات تراکم خاک در عبورهای دوم تا چهارم (شکل ۱) تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. به همین دلیل، در ادامه مطالعه، ارزیابی‌ها به قبل از عبور و عبورهای اول و چهارم محدود شدند.

جدول۲- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) شاخص مخروطی خاک در قبل و بعد از یک تا چهار عبور

فاکتور	df	مزرعه	
		۳۱۳	۴۰۵
عبور	۴	۲۶/۷***	۲۵/۴***
عمق	۹	۲۴۲/۷***	۲۳۵/۷***
عبور×عمق	۳۶	۴/۲۱***	۲/۳۲*
خطا	۴۵۰	۰/۷۷	۱/۳۹
ضریب تغییرات (درصد)	-	۲۲/۳	۲۲/۵

ns: غیرمعنی‌دار در سطح پنج درصد ($P>0/05$)، *: معنی‌دار در سطح پنج درصد ($P\leq0/05$)، **: معنی‌دار در سطح یک درصد ($P\leq0/01$) و ***: معنی‌دار در سطح یک‌دهم درصد ($P\leq0/001$).



شکل ۱- تغییرات شاخص مخروط خاک قبل و بعد از یک تا چهار عبور در مزارع ۳۱۳ و ۴۰۵ تحت کشت نیشکر با سنین پلنت و بازرویی دوم و بافت خاک متفاوت. دامنه تغییرات استاندارد خطا (n=10).

نتایج تجزیه واریانس در دو عبور اول و چهارم با قبل از عبور بر مقاومت به فروروی (شاخص مخروط) خاک در جدول ۳ آمده است. شش مزرعه شامل سه مزرعه با سن پلنت و سه مزرعه با سنین سال دوم تا چهارم یا به عبارت دیگر، بازرویی اول (R1)، دوم (R2) و سوم (R3) مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد مقاومت به فروروی در خاک به طور معنی‌داری ($P\leq 0.001$) تحت تأثیر تعداد عبور، عمق و اثر متقابل آنها قرار گرفت. اگرچه اثر متقابل عبور، عمق خاک در مزرعه ۴۱۲ معنی‌دار نبود (جدول ۳). به‌طورکلی، صرف نظر از نوع تغییرات تراکم ناشی از عبور ماشین‌های برداشت در خاک، مقادیر اندازه‌گیری شده از مقاومت به فروروی در خاک در مقایسه با مطالعات قبلی بیشتر است (Silva et al., 2003; Hamza and Anderson, 2005; Smith et al. 2022). Silva و همکاران (2003) مقاومت به فروروی در خاک را با استفاده از دستگاه پنترومتر دیجیتال در مزارع تحت کشت نیشکر اندازه‌گیری و آن را در محدوده ۱-۴ مگاپاسکال گزارش نموده است و به ندرت از ۵ مگاپاسکال تجاوز نموده است (مهردادیان و همکاران، ۱۳۹۰؛ عمرانی و همکاران، ۱۳۹۲). درحالی‌که در این مطالعه مقادیر شاخص مخروط بدست آمده از دستگاه مقاومت سنج مکانیکی عقربه‌ای (با کالیبراسیون دستی) در محدوده وسیع‌تری (تا ۱۰ MPa) از سطح به عمق خاک متغیر بود، به‌طوری‌که با افزایش عمق خاک، بر میزان مقاومت خاک به ویژه در مزارع با سنین بالاتر نیشکر افزوده شد (شکل ۲).

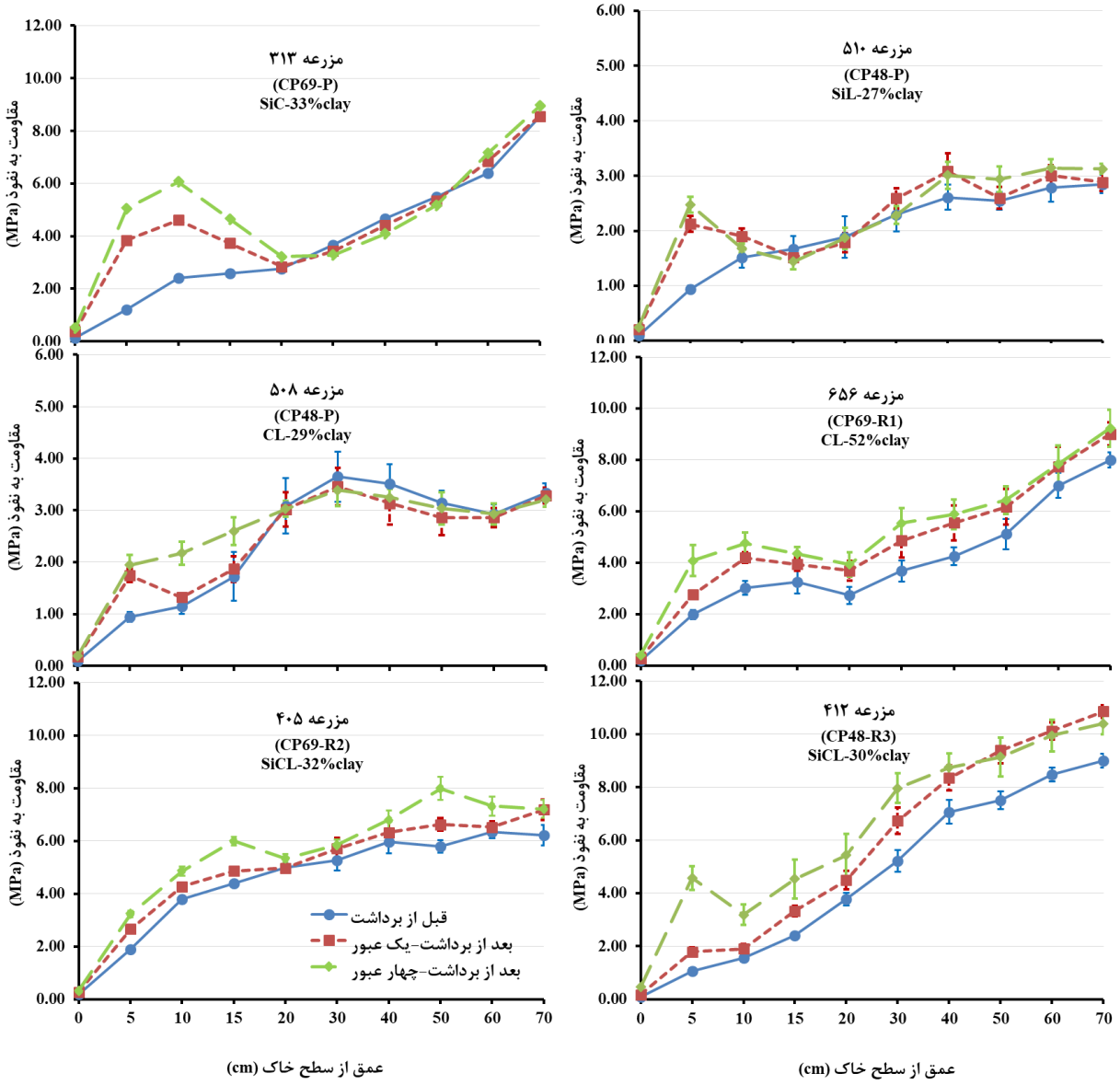
جدول۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) شاخص مخروطی خاک در قبل و بعد از یک و چهار عبور

فاکتور	df	مزرعه					
		۳۱۳	۴۰۵	۴۱۲	۵۰۸	۵۱۰	۶۵۶
عبور	۲	۲۷/۲***	۲۸/۴***	۱۰۳/۷***	۲/۴۳*	۲/۶۳***	۴۴/۶***
عمق	۹	۱۵۴/۶***	۱۳۶/۵***	۳۲۹/۶***	۳۶/۱***	۲۲/۸***	۱۶۹/۹***
عبور×عمق	۱۸	۶/۶۴***	۲/۱۵**	۲/۹۹ns	۱/۳۵*	۰/۷۱**	۲/۷۳*
خطا	۲۷۰	۱/۰۰	۱/۲۸	۲/۰۶	۰/۶۸۳	۰/۳۲۴	۱/۱۲
ضریب تغییرات (درصد)	-	۲۳/۰	۱۸/۹	۲۷/۳	۳۴/۰	۲۷/۱	۳۳/۷

ns: غیرمعنی‌دار در سطح پنج درصد (P>۰/۰۵)، *: معنی‌دار در سطح پنج درصد (P≤۰/۰۵)، **: معنی‌دار در سطح یک درصد (P≤۰/۰۱) و ***: معنی‌دار در سطح یک‌دهم درصد (P≤۰/۰۰۱).

مطالعات مختلف مقادیر متفاوتی از حد بحرانی شاخص مقاومت به فروروی در خاک‌های کشاورزی را گزارش کرده‌اند. به عنوان مثال، Singh و همکاران (2015) حد بحرانی را در حدود ۲ تا ۳ مگاپاسکال برای خاک‌های سبک و نرم بیان کرده‌اند، که در این

حالت افزایش بیش از این مقدار منجر به کاهش قابل توجه نفوذ آب و قدرت ریشه‌زایی گیاه می‌شود. از جمله عوامل موثر در تفاوت بین مقادیر مقاومت به فروروی اندازه‌گیری شده در این پژوهش با مطالعات دیگر (مهردادیان و همکاران، ۱۳۹۰؛ عمرانی و همکاران، ۱۳۹۲) می‌توان علاوه بر رطوبت و بافت خاک، به عوامل دیگری همچون مدت زمان کشت و کار، تناوب کشت، روش آبیاری، عملیات آماده‌سازی زمین و زیرشکن‌زنی اشاره کرد (حاج عباسی، ۱۳۷۸).



شکل ۲- تغییرات شاخص مخروط خاک قبل و بعد از یک و چهار عبور در مزارع مورد مطالعه تحت کشت نیشکر با واریته‌ها، سنین و بافت خاک متفاوت. دامنه تغییرات استاندارد خطا (n=10).

در مطالعه‌ای، Al-Ansari و همکاران (2019) حد بحرانی مقاومت به فروروی را در خاک‌های سنگی‌تر و ریز بافت‌تر در حدود ۵ مگاپاسکال گزارش کرده‌اند، که نشان‌دهنده اثر نوع خاک بر این شاخص است. در نهایت، براساس نتایج و تطابق بیشتر با شرایط نیشکر، مطالعه Hossain و همکاران (2018) حد تقریبی ۴ مگاپاسکال را به عنوان حد بحرانی مقاومت به فروروی پیشنهاد می‌دهد که در کاهش آسیب‌پذیری ساختار خاک و جلوگیری از تغییرات منفی بر رشد ریشه و نفوذ آب موثر است. همچنین، گزارش شده است که رطوبت بهینه جهت سنجش تراکم خاک ۱۵ درصد می‌باشد (Hosseini et al., 2021). این در حالی است که با توجه به بررسی اثر عبور در شرایط رطوبتی نامناسب (۱۷-۱۹ درصد رطوبت جرمی) در این مطالعه، همه اندازه‌گیری‌ها در رطوبتی بیش از مقدار توصیه شده صورت گرفته است. روند تغییرات تراکم خاک در عمق‌های مختلف خاک نشان داد که تراکم

خاک به دنبال یک بار عبور ماشین‌آلات برداشت در مزارع با بافت سبک‌تر (مزارع ۵۰۸ و ۵۱۰) به جز لایه سطحی (به ویژه عمق ۵ سانتی‌متر) تفاوت معنی‌داری با قبل از عبور نداشت. این در حالی است که در چهار بار عبور، علاوه بر افزایش تراکم در لایه سطحی، اثرات فشردگی خاک تا حدودی در لایه‌های عمقی‌تر (اغلب تا عمق ۳۰ سانتی‌متری) نیز مشاهده شد (شکل ۲). با این وجود، روند تغییرات تراکم خاک در عمق‌های پایین‌تر تا ۷۰ سانتی‌متری از روند مشخصی تبعیت نکرد. اگرچه، برخی از مزارع سن پلنت (مزرعه ۳۱۳) نیز با افزایش عمق خاک به تراکم آن افزوده شد (شکل ۲) که ممکن است ناشی از کیفیت پایین عملیات تهیه زمین (زیرشکن‌زنی) باشد (Khosravi and Ebrahimzadeh, 2019). در سطح خاک عملیات مختلف خاک‌ورزی باعث تغییر در جرم مخصوص ظاهری خاک شده و فشردگی خاک را به طور موقت کاهش می‌دهد، اما در عمق خاک، فشردگی ناشی از آبیاری‌های سنگین و عبور ماشین‌ها را به تدریج افزایش داده و طی سال‌های متوالی به صورت تجمی افزایش می‌یابد (حاج عباسی، ۱۳۷۸).

علاوه بر این، نتایج نشاد داد که صرف نظر از مقادیر مطلق مقاومت به فروروی در مزارع مختلف، درصد تغییرات مقاومت به فروروی نیز به طور قابل توجهی تحت تأثیر عبور، عمق و اثر متقابل بین آنها قرار گرفت (جدول ۴). اگرچه درصد تغییرات مقاومت به فروروی در مزرعه ۵۱۰ تنها تحت تأثیر فاکتور عمق خاک قرار گرفت.

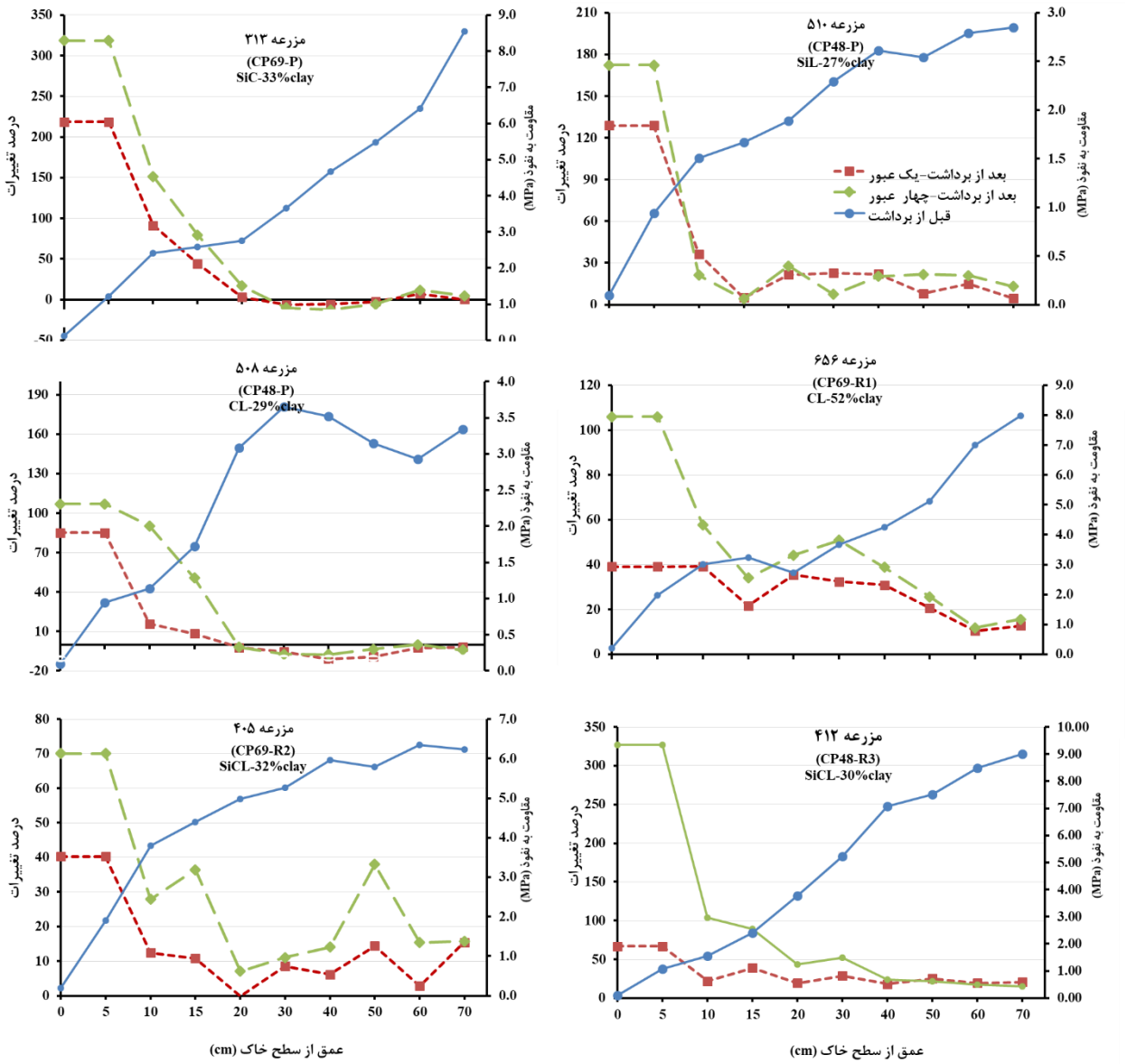
جدول۴- تجزیه واریانس# (میانگین مربعات) درصد تغییرات شاخص مخروطی خاک در یک و چهار عبور نسبت به قبل از عبور

فاکتور	df	مزرعه					
		۳۱۳	۴۰۵	۴۱۲	۵۰۸	۵۱۰	۶۵۶
عبور	۱	۰/۰۶۵*	۰/۲۶۹***	۰/۱۴۸***	۰/۱۳۱*	۰/۰۳^{ns}	۰/۱۲۸*
عمق	۹	۰/۵۳۹***	۰/۱۲۱***	۰/۱۳۰***	۰/۲۰۳***	۰/۴۷۱***	۰/۰۸*
عبور*عمق	۹	۰/۰۱۲^{ns}	۰/۰۱۲^{ns}	۰/۱۰۷*	۰/۰۱۹^{ns}	۰/۰۱۵^{ns}	۰/۰۳۷^{ns}
خطا	۱۸۰	۰/۰۱۶	۰/۰۲۱	۰/۰۱۷	۰/۰۲۰	۰/۰۱۹	۰/۰۳۹
ضریب تغییرات (درصد)	-	۶۸/۴	۵۳/۸	۶۳/۶	۶۶/۱	۴۴/۰	۶۹/۱

ns: غیرمعنی‌دار در سطح پنج درصد (P>۰/۰۵)، *: معنی‌دار در سطح پنج درصد (P≤۰/۰۵)، **: معنی‌دار در سطح یک درصد (P≤۰/۰۱) و ***: معنی‌دار در سطح یک‌دهم درصد (P≤۰/۰۰۱). #: داده‌های نرمال شده با نرم افزار Cox-Box.

نتایج بیانگر اثر قابل توجه تعداد عبور ماشین‌های برداشت بر افزایش تراکم خاک در عمق‌های مختلف، به ویژه در لایه سطحی می‌باشد (شکل ۳). این مقاومت به عنوان شاخصی غیرمستقیم از فشردگی خاک، در قالب دو بخش مجزا شامل مقدار مطلق مقاومت خاک، پیش از برداشت و درصد تغییرات مقاومت پس از یک و چهار عبور نسبت به پیش از برداشت در شکل ۳ ترسیم گردید. در تمامی شکل‌ها، مقاومت خاک پس از برداشت در لایه‌های سطحی (عمق ۰ تا ۱۵ سانتی‌متر)، به‌ویژه پس از چهار عبور ماشین‌های، به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. علاوه بر این، بررسی بافت خاک و درصد رس نشان داد که مزارع دارای بافت سنگین‌تر و درصد رس بالاتر (نظیر مزرعه ۶۵۶ با ۵۲ درصد رس و مزرعه ۴۰۵ با ۳۲ درصد رس) نسبت به عبور ماشین‌های حساسیت بیشتری نشان دادند. این مزارع بیشترین مقاومت مطلق و درصد تغییرات را پس از چهار عبور ثبت کردند. در مقابل، در خاک‌های سبک‌تر با بافت لوم سیلتی (مانند مزرعه ۵۱۰ با ۲۷ درصد رس)، اگرچه تغییر مقاومت خاک در لایه سطحی مشهود بود، اما میزان آن کمتر و فروروی آن به عمق‌های کمتر بود. مطابق با یافته‌های Dexter (2004) و Pagliai و همکاران (2004) خاک‌های رسی به‌دلیل ریزدانه بودن، چسبندگی بالا و ساختار پایدار در برابر فشار خارجی، در عین مقاومت اولیه بیشتر، در صورت تخریب ساختار، دچار کاهش شدید در تخلخل مؤثر و نفوذپذیری می‌شوند (Arvidsson و همکاران، 2000). در مزارعی مانند ۳۱۳ و ۴۱۲، درصد تغییرات نسبت به پیش از برداشت در این لایه‌ها از ۲۰۰ تا بیش از ۳۰۰ درصد (به ویژه در چهار عبور) متغیر بود که نشان‌دهنده حساسیت بالای لایه‌های سطحی به عبور مکرر است. در لایه‌های عمقی‌تر (۲۰ تا ۷۰ سانتی‌متر)، روند افزایش مقاومت آهسته‌تر اما پیوسته بود. در مزرعه ۴۰۵، شیب تغییرات در این لایه‌ها قابل توجه‌تر بود و مقاومت خاک در عمق‌های ۴۰ تا ۶۰ سانتی‌متر نیز به بیش از ۶ تا ۸ مگاپاسکال رسید، که حاکی از انتقال فشار به لایه‌های زیرین و فشردگی تدریجی خاک در عمق است. تأثیر عبور اول نسبت به شرایط پیش از برداشت در بسیاری از مزارع محسوس بود، اما در برخی

موارد، این اثر محدوتر به نظر می‌رسید. به‌عنوان نمونه، در مزارع ۵۰۸، ۵۱۰ و ۳۱۳، میانگین درصد تغییرات مقاومت خاک پس از یک عبور در لایه‌های مختلف خاک کمتر از ۱۰۰ درصد باقی ماند. این امر می‌تواند بافت سبک‌تر خاک نسبت داده شود، که احتمالاً عبورهای بیشتر اثر کمتری در انتقال فشار به لایه‌های زیرین و درنتیجه، افزایش تراکم خاک داشته باشد. در مقایسه، درصد تغییرات قابل مقاومت به نفوذ در خاک ریزبافت‌تر (مزرعه ۶۵۶) در تمامی لایه‌های عمقی خاک نشان از انتقال فشار از لایه سطحی به کل عمق خاک است.



شکل ۳- درصد تغییرات شاخص مخروط خاک بعد از یک و چهار عبور نسبت به قبل از آن در مزارع مورد مطالعه تحت کشت نیشکر با واریته‌ها، سنین و بافت خاک متفاوت. (n=10).

در بررسی نقش سن گیاه، مشخص شد که مزارع سن بازرویی (مانند مزارع ۴۰۵ و ۶۵۶) در مقایسه با مزارع سن پلنت (مانند ۵۰۸ و ۵۱۰)، افزایش شدیدتر و عمیق‌تری در مقاومت خاک نشان دادند (شکل ۳). به عبارت دیگر، در مزارع نیشکر با سن کمتر، تراکم (به ویژه عمقی) خاک نسبت به سنین بالاتر کمتر است، زیرا با افزایش سن نیشکر، تراکم ناشی از عبورهای قبل و به ویژه آبیاری سنگین، افزایش یافته و درنتیجه این‌گونه خاک‌ها ظرفیت کمتری برای فشرده شدن دارند (Smith et al., 2022). در این مزارع، نه‌تنها لایه سطحی، بلکه لایه‌های میانی و حتی زیرین نیز افزایش چشمگیری در مقاومت خاک داشتند. مطالعات

متعدد از جمله Horn و همکاران (2003) نشان داده‌اند که خاک‌های تحت کشت مداوم، خصوصاً در سیستم‌های با برداشت مکانیزه سنگین، دچار تراکم تجمعی می‌شوند که ترمیم ساختار خاک را دشوارتر می‌سازد. گزارش شده است که عبور ماشین‌ها، فشار مستقیم بر خاک وارد می‌کند که می‌تواند منجر به کاهش نفوذپذیری و افزایش خطر فرسایش گردد (Zhao et al., 2021). چنین پدیده‌ای در مطالعاتی مانند Batey (2009) نیز مورد اشاره قرار گرفته که تراکم پیش‌زمینه می‌تواند حساسیت خاک به عبورهای جدید را کاهش دهد. بر اساس گزارش Hamza و Anderson (2005)، اثر فشردگی در خاک‌های تحت فشارهای مکرر نه‌تنها شدیدتر، بلکه در بازه عمقی بیشتری بروز می‌کند و با کاهش نفوذپذیری و تخلخل مؤثر، موجب اختلال در توسعه ریشه و جذب آب می‌گردد. این یافته‌ها، از جمله از دیدگاه Al-Masri و Al-Omari (2019)، تأیید می‌کند که فشار ماشین‌ها، در لایه‌های سطحی بیشتر اثر می‌گذارد، ولی در خاک‌هایی با ساختمان مقاوم، اثر در عمق‌های پایین‌تر نیز ظاهر می‌شود و می‌تواند بر توسعه ریشه، نفوذ آب و نرخ نفوذپذیری تأثیرگذار باشد.

نتیجه‌گیری

این مطالعه نشان می‌دهد که رطوبت عامل تعیین‌کننده‌ای در مقاومت خاک است و عبور ماشین‌ها در شرایط رطوبتی بالا، افزایش شاخص مقاومت به فروروی قابل چشم‌پوشی نیست و منجر به تغییر شدید ساختمان و در نتیجه تراکم خاک می‌شود. عبور ماشین‌های برداشت نیشکر باعث افزایش فشردگی خاک، به‌ویژه در لایه‌های سطحی (۰ تا ۱۵ سانتی‌متر) شده و با افزایش عبور، شاخص مقاومت به فروروی در خاک به بیش از ۳۰۰ درصد افزایش می‌یابد. این اثر در خاک‌های با بافت سنگین‌تر و درصد رس بالاتر شدیدتر و تا عمق‌های بیشتر (تا ۷۰ سانتی‌متر) ادامه می‌یابد، در حالی که در خاک‌های سبک‌تر تراکم بیشتر محدود به لایه‌های سطحی است. خاک‌های با درصد تراکم اولیه بالا، تغییرات مقاومت به فروروی آنها در اثر عبور، آهسته‌تر و در عمق‌های بیشتر رخ می‌دهد. همچنین، مزارع با سن بالاتر نیشکر (بازرویی) به دلیل تراکم تجمعی ناشی از برداشت‌های قبلی، مقاومت به فروروی بیشتری نسبت به مزارع جوان‌تر نیشکر (پلنت) داشته و به لایه‌های پایین‌تر منتقل می‌کنند. مقادیر مقاومت خاک تا ۱۰ مگاپاسکال گزارش شده که فراتر از حد بحرانی رشد ریشه و نفوذ آب است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که مدیریت دقیق عبور ماشین‌آلات و توجه به شرایط بافت خاک و سن مزرعه برای حفظ کیفیت خاک و بهبود رشد نیشکر ضروری است. انجام عملیات برداشت در رطوبت‌های بهینه با حداقل تراکم خاک، استفاده از ماشین‌های برداشت چرخ زنجیری، افزایش مواد آلی خاک و همچنین توجه به عملیات راتونینگ متناسب با عمق فشردگی خاک، از جمله راه‌های حفظ کیفیت خاک به شمار می‌روند.

منابع

حاج عباسی، م. (۱۳۷۸). فیزیک خاک و ریشه گیاه. اصفهان: انتشارات غزال. صص ۳۶۲.

عمرانی، ع.، شیخ داودی، م.ح.، شمیلی، م. (۱۳۹۲). لزوم توجه به توزیع فشردگی خاک در مزارع راتون نیشکر در خوزستان. هفتمین همایش فن آوران نیشکر ایران (مکانیزاسیون و ماشین‌های کشاورزی).

لرزاده، ش.، نادیان، ح. ا.، بخشنده، ع.م.، نورمحمدی، ق.، درویش، ف. (۱۳۸۱). اثرات سطوح مختلف تراکم خاک بر روی عملکرد , اجزا عملکرد و میزان قند نیشکر واریته CP۴۸-۱۰۳ در استان خوزستان. مجله علوم زراعی ایران. (۱)۴، ۳۶-۴۷.

مرادی، ف.، خلیلی مقدم، ب.، جعفری، س.، قربانی دشتکی، ش. (۱۳۹۲). تأثیر کشت و کار مکانیزه طولانی مدت بر برخی از ویژگی‌های فیزیکی خاک در تعدادی از کشت و صنعت‌های نیشکر استان خوزستان .مجله آب و خاک. (۶)۲۷، ۱۱۵۳-۱۱۶۵.

منجزی، ن.، مرزبان، ا. (۱۴۰۱). بررسی اثر بهینه نمودن عملیات بازرویی در سرعت‌های مختلف حرکت ماشین بر برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک مزارع نیشکر .مجله مدیریت خاک و تولید پایدار ۱۲(۱)، ۱۲۱-۱۳۹.

مهردادیان، ع.، آسودار، م.ا.، عباسی، ف. (۱۳۹۰). اثر عبور ماشین‌های برداشت بر فشردگی خاک‌های مزارع نیشکر جنوب غربی خوزستان. مهندسی زراعی (مجله علمی کشاورزی)، (۲)۳۴، ۱-۱۴.

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.

Al-Ansari, M. M., Ahmed, D. H., El-Sayed, M. M. (2019). Soil strength and its relation to tillage practices in heavy clay soils. Egyptian Journal of Soil Science, 59(4), 347-356.
Al-Masri, M., Al-Omari, I. (2019). Effects of tractor traffic on soil compaction and physical properties under sugarcane cultivation. Soil and Tillage Research, 165, 78-85.
Ardestani, M., Zaghari, M., Ghanbari, A. (2017). Effects of tractor traffic on soil compaction profile in sugarcane fields. Soil and Tillage Research, 165, 78-85.
Arvidsson, J., Trautner, A., van den Akker, J. J. H. (2000). Subsoil compaction caused by heavy sugar beet harvesters in Europe. Soil and Tillage Research, 60(1-2), 67-76.
Barzegar, A. R., Asoodar, M. A., Ansari, M. (2000). Effectiveness of sugarcane residue incorporation at different water contents and the Proctor compaction loads in reducing soil compatibility. Soil and Tillage Research, 57(3): 167-172.
Barzegar, A. R., Sh. Mahmoodi, F. Hamedi and F. Abdolvahabi. (2005). Long term sugarcane cultivation effects on physical properties of fine textured soils. Journal of Agricultural Science and Technology, 7, 59-68.
Batey, T. (2009). Soil compaction and soil management – a review. Soil Use and Management, 25(4), 335-345.
Dexter, A. R. (2004). Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. Geoderma, 120(3-4), 201-214.
Hamza, M. A., Anderson, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. Soil and Tillage Research, 82(2), 121-145.
Horn, R., Domżżał, H., Słowińska-Jurkiewicz, A., Van Ouwerkerk, C. (2003). Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. Soil and Tillage Research, 73(1-2), 131-143.
Hossain, M. M., Rahman, M. M., Miah, M. A. (2018). Soil compaction effects on root growth, water availability and yield of sugarcane. Journal of the Bangladesh Agricultural University, 16(2), 223-231.
Hosseini, S., Mohammadi, R., Zare, M. (2021). Optimal soil moisture for soil bulk density measurement in agricultural soils. International Journal of Agronomy, 2021, 1-8.
Jafari, M., Ahmadi, S. (2020). Factors affecting soil compaction in sugarcane fields. Soil Research, 58(5), 547-556.
Khosravi, A., Ebrahimzadeh, M. (2019). Effect of soil preparation quality on soil compaction under sugarcane cultivation. Journal of Soil and Water Conservation, 74(3), 210-219.
Kumar, A., Singh, R. (2023). Soil structural stability and farm machinery impact: Recent advances. Renewable Agriculture and Food Systems, 38(1), 33-45.
Pagliai, M., Marsili, A., Servadio, P. (2004). Changes in some physical properties of a clay soil following passage of rubber-tracked and wheeled tractors in central Italy. Soil and Tillage Research, 73(1-2), 119-129.
Pankhurst. C. E., Magarey, R. C., Sirling, G. R., Blair, B. L., Bell, M. J., Garside, A. L. (2003). Management practices to improve soil health and reduce the effects of detrimental soil biota associated with yield decline of sugarcane in Queensland, Australia. Soil and Tillage Research, 72, 125-137.
Rahimi, A., Ehsani, R., Khosravi, A. (2019). Soil compaction and moisture disturbance after machinery traffic in sugarcane fields. International Journal of Agricultural Science and Technology, 7(3), 321-330.
Silva, A. P., Kay, B. D., Perfect, E. (2003). Characterization of the least limiting water range of soils. Soil Science Society of America Journal, 67(5), 1444-1451.
Singh, R., Kumar, S., Singh, K. (2015). Soil compaction and crop productivity: A review. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 15(2), 255-273.
Smith, J., Lee, T., Zhang, Y. (2022). Impact of machinery traffic on soil compaction and structure in sugarcane fields. Soil Science Journal, 188(4), 245-256.
Taylor, P., Smithson, T., Kumar, A. (2020). Soil compaction effects under mechanized cultivation: A review. Journal of Soil and Water Conservation, 75(6), 125-138.
Zhao, H., Wang, L., Chen, R. (2020). Impact of farm machinery on soil physical properties in tropical agriculture. International Journal of Agricultural Technology, 16(2), 145-159.
Zhao, H., Wang, L., Chen, R. (2021). The effect of vehicle traffic on soil physical properties and crop productivity in intensive agriculture. Agricultural Engineering, 78(2), 112-126.

Assessment of sugarcane harvesting machinery traffic effects on soil compaction under suboptimal moisture conditions

[1]Ali Motamedi-Amin*, [1]Hassanali Khatin-Zadeh, [2]Mahmoud Shomeili, [1]Mansour Nouri, [1]Daryush Nikfar,
1-Agricultural Researches Department, Karun Agro Industrial, Inc, Shushtar, Iran
2- CEO of Karun Agro-industrial Inc
*Corresponding author: alimahohi@yahoo.com

Abstract

Soil compaction, as one of the key limiting factors, affects root growth, water infiltration, and ultimately sugarcane yield. This study aimed to evaluate the effect of harvesting machines on soil compaction indices in six sugarcane fields with different soil textures and crop ages. Sugarcane harvesting operations in all studied fields were carried out in all the studied fields under moisture conditions higher than 16% by weight. Cone penetrometer resistance was measured before and after harvesting machines traffic in sugarcane fields and compared. The results showed that the passage of harvesting machines, especially after four passes, significantly increased soil penetration resistance. In the surface layer (0 to 15 cm), this increase in resistance reached more than 300% in some cases. The extent and depth of compaction varied depending on soil texture; in heavy clay soils with high clay content, an increased resistance was observed down to a depth of 70 cm, whereas in lighter textured soils, compaction effects were mainly limited to surface layers. Moreover, the regrowth-age fields (R) showed greater resistance than the plant (P) fields due to the cumulative effects of compaction in previous harvests. The maximum measured resistance reached up to 10 MPa, which exceeds the critical threshold for root growth and water infiltration. These findings emphasize the necessity of managing harvesting machines traffic and considering soil moisture conditions, soil texture, and the age of the fields (plant or regrowth) to reduce compaction and improve the sustainability of sugarcane yield.

Keywords: Soil compaction, sugarcane, penetration resistance, harvesting machines traffic, soil texture