Impacts of soil compaction on crop yield and economic value of arable lands

J. Mirzavand, Kh. Shahbazy, A. Majidi, and Z. Kazemi*

Assistant Prof., Soil and Water Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Zarghan, Iran. **j.mirzavand@areeo.ac.ir**

Associate Prof., Forests and Rangelands Research Institute, Agricultural and Natural Resources Research and Education Organization, AREEO, Tehran, Iran. **khosrw_shahbazi@yahoo.com**

Associate Prof., Soil and Water Research Department, West Azerbaijan, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Uromia, Iran. **a.majidi@areeo.ac.ir**

PhD in Soil Physics and Conservation, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran. **zkazemi2016@gmail.com**

Received: June 2024 and Accepted: February 2025

Abstract

Declining crop yield and resource efficiency are the direct and indirect adverse effects of soil compaction, which affect the profitability of agricultural systems. Soil compaction impresses soil structure by reducing air-filled porosity, increasing soil bulk density and mechanical resistance, and reducing total porosity. The present review article explores the various studies focused on the effects of different tillage systems on soil compaction and their impacts on yield and economic value of land. The studies reviewed show that between 70-80% of soil compaction occurs during the first passage of agricultural machinery on land and that reduced crop yield due to soil compaction reportedly falls within the range of 5-75%. One study predicted the average financial losses due to soil compaction in Ukraine and Lithuania to be 49 and 13 euros per hectare per year, respectively. The financial cost of soil compaction caused by spreading liquid fertilizer weighing more than 18 Mg with a heavy tanker exerting a pressure of more than 200 kPa on wet soil in early spring in Canada was reportedly estimated at 30 to 300 dollars per hectare and the increase in wheel loads of agricultural machines from 1 MPa to 9 MPa in Sweden reduced the net income of agricultural land by 25%. This is while the use of a No-Tillage system has been reported to lead to economic savings, increased energy efficiency, and reduced greenhouse gas emissions, which in most cases, leads to an increase in crop yield per unit area.

Keywords: Air filled porosity, Bulk density, Soil structure, Greenhouse gases, and Soil mechanical resistance

* - Corresponding author's email: **zkazemi2016@gmail.com**

https://doi.org/10.22092/lmj.2025.364922.359

نشریه علمی مدیریت اراضی/ جلد ۱۳ / شماره ۱ / ۱۴۰۴
https://doi.org/10.22092/lmj.2025.364922.359

تأثیر فشردگی خاک بر عملکرد محصول و ارزش اقتصادی زمین

جهانبخش میرزاوند، خسرو شهبازی، عزیز مجیدی و زهرا کاظمی *

استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران. **j.mirzavand @areeo.ac.ir**

دانشیار پژوهشی، موسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. **khosrw_shahbazi@yahoo.com**

دانشیار پژوهشی، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکزتحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه ، ایران. **a.majidi@areeo.ac.ir**

دکتری فیزیک و حفاظت خاک، دانشگاه تبریز، دانشکده کشاورزی، گروه علوم و مهندسی خاک، ایران. **zkazemi2016@gmail.com**

دریافت: خرداد ۱۴۰۳ و پذیرش: اسفند ۱۴۰۳

چکیده

کاهش عملکرد محصول و کارایی مصرف منابع، اثرات نامطلوب مستقیم و غیرمستقیم فشردگی خاک بوده که بر سودآوری سامانه‌های کشاورزی تأثیر می‌گذارد. فشردگی خاک با کاهش تخلخل تهویه‌ای، افزایش جرم مخصوص ظاهری (D_b)، مقاومت مکانیکی خاک و کاهش میزان تخلخل کل، ساختمان خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهد. مقاله مروری حاضر به بررسی مطالعات به انجام رسیده در خصوص ارزیابی اثر سامانه‌های مختلف خاک‌ورزی بر میزان فشردگی خاک و تاثیر آن بر عملکرد و ارزش اقتصادی زمین پرداخته است. پژوهش‌ها نشان می‌دهد بین ۸۰-۷۰ درصد فشردگی خاک طی اولین عبور ماشین‌آلات کشاورزی بر روی زمین زراعی اتفاق می‌افتد و کاهش عملکرد محصول ناشی از فشردگی خاک در منابع مختلف در محدوده ۷۵-۵ درصد گزارش گردیده است. در یک پژوهش، میانگین ضررهای مالی ناشی از افزایش فشردگی خاک در هر هکتار زمین زراعی برای اوکراین و لیتوانی به ترتیب ۴۹ و ۱۳ یورو در هکتار در سال پیش‌بینی گردید. خسارت مالی ناشی از فشردگی خاک در اثر پخش کود مایع با تانکر سنگین با وزن بیش از ۱۸ تن و فشار بیش از ۲۰۰کیلوپاسکال روی خاک مرطوب در اوایل بهار در کانادا نیز ۳۰ تا ۳۰۰ دلار در هکتار برآورد شد و افزایش فشار چرخ‌های ادوات کشاورزی از یک مگاپاسکال به نه مگاپاسکال در سوئد مقدار درآمد خالص زمین زراعی را ۲۵ درصد کاهش داد. بررسی‌ها بیانگر این است که که بکارگیری کم‌خاک‌ورزی منجر به صرفه‌جویی اقتصادی، افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌گردد و در اغلب موارد افزایش عملکرد محصول در واحد سطح را به دنبال داشته است.

واژه‌های کلیدی: تخلخل تهویه‌ای، جرم مخصوص ظاهری، ساختار خاک، گازهای گلخانه‌ای، مقاومت مکانیکی خاک

* – آدرس ایمیل نویسنده مسئول: **zkazemi2016@gmail.com**

نوع مقاله: مروری

مقدمه

کاهش عملکرد محصول ناشی از فشردگی خاک یکی از نگرانی‌های عمده عصر حاضر بوده و برای کشاورزی پایدار[1] نامطلوب است (Tietjens et al., 2024). استفاده از ماشین‌آلات سنگین برای عملیات کاشت، داشت و برداشت محصولات می‌تواند باعث افزایش فشردگی خاک و کاهش عملکرد محصول شود. فشردگی خاک با افزایش جرم مخصوص ظاهری (D_b[2])، مقاومت مکانیکی خاک (SR[3]) کاهش تخلخل تهویه‌ای[4] و کاهش میزان تخلخل کل[5]، ساختار خاک را تغییر می‌دهد و با تغییر آرایش ریشه گیاه منجر به کاهش جذب عناصر غذایی و رشد گیاه و نهایتاً کاهش زیست‌توده[6] (بیوماس) و عملکرد محصول می‌گردد (Wolkowski & Lowery, 2008; Radojević et al., 2022; Frene et al., 2024).

بر مبنای پیش‌بینی سازمان ملل متحد انتظار می‌رود تا سال ۲۰۵۰ جمعیت جهان به ۹/۶ میلیارد نفر برسد (Bhatta et al., 2024) و بررسی‌ها نشان می‌دهد در حدود ۶۰٪ از خاک‌های اروپا با مشکل فشردگی مواجه هستند (Tietjens et al., 2024). بنابراین حفظ سلامت خاک برای تأمین امنیت غذایی جهان ضروری است (Bhatta et al., 2024). به‌منظور حفظ سلامت خاک استفاده از ماشین آلات مناسب برای عملیات زراعی، زدن زیرشکن و عملیات خاک‌ورزی عمیق مؤثر بوده و میزان فشردگی خاک را کاهش خواهد داد. محققین بر این باورند که لاستیک‌های با خمش بالا که با فشار باد کمتر کار می‌کنند، سطح تماس تایر با خاک را افزایش داده و هنگامی‌که با سامانه‌های خاک‌ورزی مناسب همراه شوند، می‌توانند منجر به تراکم کمتری گردند (Shaheb et al., 2021; Kik et al., 2024). از طرف دیگر تناوب زراعی با گیاهان ریشه‌دار و پوششی (مانند ایجاد حفاری زیستی با تجزیه ریشه‌ها) و روش‌های کشاورزی حفاظتی می‌تواند نقش مهمی در کاهش تراکم خاک داشته باشد که منجر به افزایش حجم منافذ برای حمایت از توسعه و دسترسی مناسب ریشه به مواد مغذی شود (Piccoli et al., 2022 ; Kik et al., 2024). مقاله حاضر به درک بهتر علل و اثرات فشردگی خاک ناشی از به‌کارگیری استفاده از ماشین‌آلات سنگین بر رشد و توسعه محصول، عملکرد و بازده اقتصادی زمین کمک می‌کند و اطلاعات مفیدی را در اختیار کشاورزان، محققان و سیاست‌گذاران قرار می‌دهد تا تصمیمات بهتری در راستای کاهش تأثیر فشردگی خاک در کشاورزی و تولید اتخاذ نمایند.

تأثیر افزایش مقاومت مکانیکی خاک در کاهش عملکرد محصولات مختلف

بین ۷۰ تا ۸۰ درصد فشردگی خاک در طی اولین عبور ماشین‌آلات از زمین رخ می‌دهد (Wolkowski & Lowery, 2008). گلینسکی و لیپیک (Gliñski &Lipiec, 1990) مقادیر مقاومت مکانیکی (SR، به‌عنوان شاخص فشردگی) بحرانی[7] (SR_c) که در مقادیر بیشتر از آن رشد ریشه بشدت کاهش می‌یابد و یا متوقف می‌شود را برای محصولات مختلف، بین ۰/۹ تا ۸ مگاپاسگال (MPa) تعیین کردند (جدول ۱). بیشترین مقدار SR_c (۸ مگاپاسکال) به گیاه چاودار چندساله و کمترین آن (۱/۶–۰/۹ مگاپاسکال) به گیاه ذرت تعلق داشت که به ترتیب در خاک لوم و لوم‌شنی کشت شده بودند. رشد ریشه گیاه چاودار در SR_c ۸۰ درصد و رشد گیاه ذرت ۵۰ درصد کاهش یافت (جدول ۱). اطلاعات قابل توجهی وجود دارد که روابط منفی بین جرم مخصوص ظاهری (D_b) (به‌عنوان شاخص فشردگی) و عملکرد محصول را نشان می‌دهند (Kayombo &Lal, 1994). به‌عنوان مثال استیرزاکر و همکاران (Stirzaker et al., 1996) در آزمایش‌های گلدانی نشان دادند که وزن خشک اندام هوایی جو (*Hordeum vulgare*) در D_b معادل ۱/۷۸ مگاگرم بر مترمکعب ۲۶ درصد کمتر از مقدار آن در D_b معادل ۱/۶۴

1 -Sustainable agriculture
2 -Bulk density
3 -Soil mechanical resistance
4 -Aeration porosity
5-Total porosity
6 -Biomass
7 -Critical mechanical resistance

مگاگرم بر مترمکعب است. عملکرد اندام هوایی و طول ریشه نخودفرنگی (*Pisum sativum*) نیز در جرم مخصوص ظاهری ۱/۷ مگاگرم بر مترمکعب در مقایسه با مقادیر آن‌ها در D_b مطلوب ۱/۴۷ مگاگرم بر مترمکعب به ترتیب ۷۵ و ۵۷ درصد به دست آمد (Stirzaker et al., 1996). کانل (Cannell, 1977) پیشنهاد کرد که افزایش D_b از ۱/۳ تا ۱/۷ مگاگرم بر مترمکعب ممکن است رشد ریشه و عملکرد گیاه چچم را محدود کند. این محققین چچم (*Lolium perenne*) را در گلدان‌های حاوی خاکسترهای آتشفشانی در لایه‌هایی با D_b متفاوت پرورش دادند. با افزایش D_b از ۰/۹ به ۱/۲ مگاگرم بر مترمکعب، در زیر عمق جوانه‌زنی، عملکرد علوفه طی ۱۷۱ روز به مقدار ۵۰ درصد کاهش یافت. هولبروک و همکاران (hoolbrook et al., 1977) گزارش کردند که اثرات نامطلوب بر رشد و عملکرد ریشه چچم در جرم مخصوص ظاهری کمتر یا مساوی ۱/۳ مگاگرم بر مترمکعب، نسبت به آنچه معمولاً در منابع گزارش شده است، رخ می‌دهد. با این‌حال، تخلخل تهویه‌ای[8] (AFP) در تیمارهای مختلف D_b در گلدان‌های حاوی خاکسترهای آتشفشانی، ۳۸-۱۷٪ بود، بنابراین AFP به خودی خود ممکن است محدودکننده رشد چچم نباشد (hoolbrook et al., 1977). دروری و همکاران (Drewry et al., 2004) در طی یک پژوهش هفت‌ساله در خصوص تأثیر چرای دام‌ها بر عملکرد علوفه مراتع مشاهده کردند در تمام سایت‌های مورد مطالعه، در عمق ۵۰-۰ میلی‌متر، یک درصد افزایش در تخلخل درشت[9] (ماکروپوروزیتی) با افزایش ۱/۶ درصدی و در عمق ۱۰۰-۵۰ میلی‌متر، افزایش یک واحد در ماکروپورها با افزایش ۲/۶ درصدی عملکرد نسبی علوفه بهاره همراه بود (Drewry et al., 2004). در یک بررسی انجام‌شده توسط هو و همکاران (Hu et al., 2021) نیز مقدار کاهش عملکرد مرتع به ازای هر یک درصد کاهش ماکروپورها ناشی از فشردگی توسط چارپایان، ۲/۵ درصد گزارش شد.

جدول ۱- تأثیر مقاومت مکانیکی خاک بر رشد ریشه

Table 1- Effect of soil mechanical resistance on root growth (Gliński &Lipiec, 1990)

گیاه	درصد کاهش رشد ریشه	مقاومت مکانیکی بحرانی(مگاپاسکال)	بافت خاک
ذرت	50٪	0.9-1.6	لوم شنی
جو	50٪	1.3-1.7	لوم رس شنی
پنبه	توقف	2.5	لوم
نخود	توقف	3	رسی
جو دوسر	توقف	4.6-5.1	سیلتی
ذرت	50٪	5	لوم
چاودار ایتالیایی	محدود	2-3.5	متنوع
چاودار چند ساله	80٪	8	لوم

وولکوکسی و لاوری (Wolkowski & Lowery, 2008) عملکرد پنبه را در شرایط مختلف فشردگی خاک سطحی و تحت‌الارض (سخت‌لایه[10]) و رطوبت در شرایط با و بدون تردد ماشین‌آلات در مزرعه مقایسه کردند. یافته‌های این محققین نشان داد در محصول پنبه در شرایط بدون فشردگی با وجود سخت لایه با D_b ۱/۶ مگاگرم بر مترمکعب و وضعیت رطوبتی مشابه، با کاهش D_b از ۱/۴ به ۱/۳ مگاگرم بر مترمکعب، مقدار محصول ۸/۵ درصد افزایش یافت. در حالتی که فشردگی به دلیل تردد ماشین‌آلات اتفاق افتاد. با یک دهم واحد افزایش در D_b از ۱/۴ به ۱/۵ مگاگرم بر مترمکعب، ۲۰ درصد و از ۱/۴ به ۱/۶ مگاگرم بر مترمکعب، ۱۷/۳ درصد

8 -Air filled porosity
9 -Macro porosity
10 -Hardpan

کاهش در عملکرد مشاهده شد (Wolkowski & Lowery, 2008). بوتا و همکاران (Botta et al., 2010) نیز نشان دادند فشردگی خاک به دلیل عبور ماشین‌آلات سنگین (۱۸۵kN (با شدت تردد (۰، ۶۰، ۱۲۰، و۱۸۰ مگاگرم کیلومتر بر هکتار)، باعث کاهش شدید عملکرد دانه سویا (۳۸–۹/۸ درصد) در مقایسه با تردد برای سه فصل رشد متوالی شد. کمترین و بیشترین مقدار D_b ایجاد شده ناشی از عبور و مرور ماشین‌آلات سنگین، ۱/۴۹ و ۱/۷۱ مگاگرم بر مترمکعب بود که به ترتیب در اعماق ۱۵–۰ و ۶۰–۴۵ سانتی‌متری خاک مشاهده شد. نتایج حاصل از مطالعات متعدد در سراسر ایالت ویسکانسین کاهش عملکرد در اثر فشردگی خاک را بین ۱۰ تا ۵۰ درصد برای انواع محصولات نشان داده است (جدول ۲). میزان کاهش عملکرد با افزایش میزان فشردگی نسبی خاک از حالت بدون فشردگی به فشردگی زیاد برای محصولات مختلف متفاوت بود. بیشترین میزان افت محصول برای ذرت (۴۳٪) و کمترین آن برای سیب‌زمینی (۴٪) مشاهده شد (جدول ۲) (Wolkowski & Lowery, 2008).

جدول ۲- تأثیر فشردگی خاک بر عملکرد چندین محصول (سیب‌زمینی، ذرت و یونجه) در ایالت ویسکانسین
Table 2- Effect of soil compaction on the yield of the several crops (potatoes, corn and alfalfa) in Wisconsin state (Wolkowski & Lowery, 2008)

محصول	شهر	واحد	تراکم نسبی میانگین ($Mg.m^{-3}$)		
			صفر	متوسط (1.49)	بالا (1.71)
یونجه	کلمبیا	تن/ ایکر[11] (ماده خشک)	3.73	–	3.26
ذرت	کلمبیا	بوشل[12]/ایکر	156	–	112
ذرت	گرنت	بوشل/ایکر	106	101	91
ذرت	مانیتواک	بوشل/ایکر	120	103	69
ذرت	وینباگو	بوشل/ایکر	156	152	142
سیب‌زمینی	واشارا	سنتوم ویت[13]/ ایکر	458	–	440

۱–یک ایکر واحد اندازه‌گیری سطح در انگلستان معادل ۰/۴۰۴۷ هکتار، بوشل واحد وزن برای اندازه‌گیری غلات در آمریکا و هاندرد ویت یا سنتوم‌ویت که با حروف اختصاری CWT نمایش داده می‌شود، واحد اندازه‌گیری وزن است که در آمریکا و انگلستان مقادیر متفاوتی دارد.

در یک پژوهش گریگوریچ و همکاران (Gregorich et al., 2011) به ارزیابی اثرات تراکم، کوددهی نیتروژن و بافت خاک بر رشد و عملکرد ذرت (*Zea mays L.*) و تأثیر کود اضافی نیتروژن بر جبران کاهش عملکرد ناشی از تراکم، پرداختند. خاک به مدت سه سال (۲۰۰۴–۲۰۰۲)۲۰۰۴به‌طور متفاوت فشرده شد تا دو تیمار فشردگی (C,[15] N[14]) با مقاومت به نفوذ (PR[16]) به ترتیب متوسط ۰/۹۵ و ۱/۵۸ مگاگرم بر مترمکعب در سال اول و چهار تیمار در سال دوم (CC, NC, CN, NN)[17] و سوم (NNN, NCN, CNN, CCC)[18] ایجاد شود. در سال ۲۰۰۴ (سال سوم) فشردگی تنها در پلاتهایی اعمال شد که در طی هر دو سال ۲۰۰۲ و ۲۰۰۳ فشرده شده بودند. کود N (ازت) در دو نرخ (۱۵۰ و ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار) در سال اول و چهار نرخ مختلف (۰، ۷۵، ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار) در سال دوم و سوم به هر تیمار اعمال شد. عملکرد در هر یک از سه سال اندازه‌گیری شد و ویژگی‌های خاک و وضعیت رشد محصول بعد از دو و سه سال اندازه‌گیری شد. به دلیل تنوع در بافت خاک در کرت‌های آزمایشی اثرات محتوای رس خاک نیز بر پاسخ محصول به تراکم ارزیابی شد. نتایج نشان داد تراکم به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای رشد و بهره‌وری گیاه را کاهش داد. در خاک‌های فشرده عملکرد تا ۲/۷ تن در هکتار (۳۳٪) و ماده خشک تا ۴/۱ تن در هکتار (۲۶٪) نسبت به خاک‌های فاقد تراکم کاهش یافت و اجتناب از تراکم به مدت یک سال،

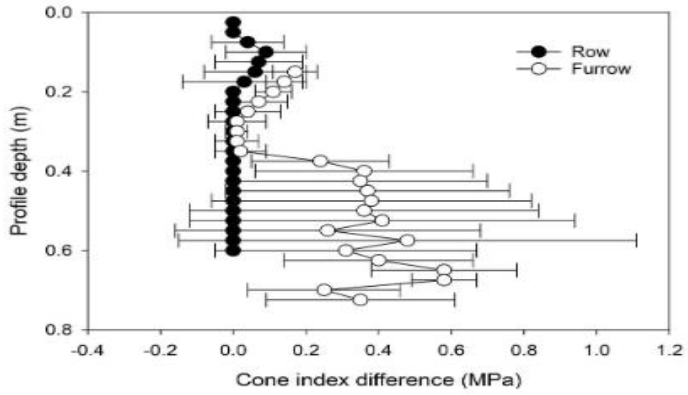
11-acre
12 -bushel
13 -Centum weight or hundred weight
14 -Non compacted
15--compacted
16 -Penetration resistance

۱۷–حروف اول و دو به ترتیب بیانگر تیمارهای فشردگی در سالهای ۲۰۰۲ و ۲۰۰۳ هستند.

۱۸–حروف اول و دوم و سوم به ترتیب بیانگر تیمارهای فشردگی در سالهای۲۰۰۲، ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴ هستند.

باعث بهبود رشد محصول و عملکرد شد. به‌عنوان مثال، عملکرد دانه پس از دو سال متوالی تراکم (۵/۲۱ تن در هکتار) به‌طور قابل توجهی کمتر از عملکرد پس از یک سال تراکم (۷/۵۹ تن در هکتار) بود که در سال بعدی هیچ فشردگی اعمال نشده بود. کاهش عملکرد ناشی از تراکم در خاک‌هایی با محتوای رس بالاتر بیشتر بود که به شرایط فیزیکی نامطلوب خاک ناشی از تراکم و مشکلات حاصلخیزی ناشی از کمبود N (ازت) نسبت داده شد (Gregorich et al., 2011). گادوین و همکاران (Godwin et al., 2019) گزارش کردند اثر فشردگی خاک، بسته به‌شدت و مقدار آن، می‌تواند عملکرد محصول را به میزان ۱۰ تا ۱۵ درصد کاهش دهد (Godwin et al., 2019). در یک پژوهش مشخص شد که عملیات خاک-ورزی با یک وسیله نقلیه به وزن ۱۱ مگاگرم (تن) موجب تراکم خاک و کاهش عملکرد دانه ذرت به میزان ۱۵ تا ۴۳ درصد شد (Voorhees, 2000). در یک پژوهش دیگر تراکم ناشی از خاک‌ورزی با ماشین‌آلات به وزن هشت مگاگرم عملکرد را ۱۷ درصد کاهش داد (Gregorich et al., 2011). پاسخ محصول به فشردگی خاک ممکن است در شرایط خاک خشک و مرطوب متفاوت باشد. نتایج یک مطالعه بلندمدت ۱۷ ساله نشان داد که کاهش عملکرد در اثر تراکم خاک در خاک رسی در فصول مرطوب بیشتر از فصول خشک بود (Alakukku, 2000). بااین‌حال، عبور ماشین‌آلات متعدد در یک خاک سیلتی لوم باعث کاهش تقریباً ۳۳ درصدی محصول در سال‌های خشک در مقایسه با یکبار عبور ماشین‌آلات در سال‌هایی شد (پنج درصد) که کمبود رطوبت خاک وجود نداشت (Galambošová et al., 2017) این تناقض بین یافته‌های دو مطالعه اخیر، احتمالاً به بافت خاک، فشردگی اولیه خاک و تعداد تردد ماشین‌آلات مربوط باشد. خاک رسی در مقایسه با سیلت لوم دارای منافذ ریز (میکروپور) بیشتر و در شرایط مرطوب مستعد فشردگی و در نتیجه کاهش عملکرد بیشتری است ولی با افزایش میزان تردد حتی در شرایط خشک نیز این احتمال وجود دارد. بوتا و همکاران (Botta et al., 2010) نیز دریافتند فشردگی خاک (ناشی از تردد تجهیزات سنگین) ، باعث کاهش شدید عملکرد دانه سویا (۳۸-۹/۸٪) برای سه فصل رشد متوالی شد و خاک‌هایی که در اثر فشار باد کم تایر ماشین‌آلات کمتر فشرده‌شده بودند، رشد و عملکرد محصول بالاتری داشتند (Shaheb 2021 et al.,). در نتیجه، در مقایسه با خاک‌هایی که در آن تراکم خاک ناشی از فشار زیاد باد تایر است، بازده اقتصادی بهتری داشتند (Smith et al., 2014; Shaheb et al., 2021 ; Stranks, 2006). در یک بررسی انجام گرفته توسط جمالی و همکاران (Jamali et al.,2021) میانگین عملکرد پنبه در تیمار شاهد به طرز قابل‌توجهی (۲۷٪) بالاتر از تیمارهای تحت فشردگی بود که در آن‌ها تردد توسط یک تراکتور با وزن ۱۹/۲ تن در دو طرف ردیف بوته انجام گرفته بود. تراکم در مقایسه با تیمار شاهد منجر به کاهش معنی‌دار ۱۹، ۵۶ و ۲۱ درصد به ترتیب در ماده خشک رویشی، ماده خشک زایشی و سطح برگ شد. مقاومت خاک اندازه‌گیری شده قبل از تردد، با عمق افزایش یافت و بین ۰/۵ تا ۳ مگاپاسکال بود. مقاومت خاک در ردیف‌ها تغییری نکرد، اما مقاومت ۲۰ سانتی‌متری فوقانی خاک در شیارها (یعنی زیر چرخ‌ها) به مقدار ۰/۱ تا ۰/۲ مگاپاسکال افزایش یافت که بالاترین افزایش مقاومت خاک تا مقدار متوسط ۰/۶ مگاپاسکال در عمق ۴۰ الی ۷۰ سانتی‌متری خاک مشاهده گردید.(شکل ۱).

جدول ۳ میزان کاهش عملکرد چغندرقند را در یک خاک با محتوای رس ۴۱ درصد (خاک چرنوزوم) بسته به عمق خاک متراکم شده نشان می‌دهد.



شکل ۱- تفاوت در مقاومت مکانیکی خاک پروفیل قبل و بعد از تردد ماشین‌آلات در ردیف‌ها و شیارها

Figure1- Difference in soil mechanical resistance of profile measured before and after traffic in rows and furrow (Jamali et al., 2021)

جدول ۳-عملکرد چغندرقند و نسبت ریشه‌های بدشکل در یک خاک چرنوزوم با محتوای رس ۴۱ درصد به فشردگی در اعماق مختلف

Table 3- Yield response and proportion of deformed roots of sugar beet in chernozem soil with 41% clay content to soil compaction in different depths (Lipiek et al., 2003)

موقعیت لایه فشرده (cm)	کاهش عملکرد (٪)	ریشه‌های بدشکل (٪)
غیر فشرده	$32.54 Mgha^{-1}$ = %100	2.1
<28	10-13	5.6
<22	21-25	13.4
6-10 و زیر 28	29-32	18.8
30-0(فشرده شده بعد از کاشت)	55-59	53.2
$LSD_{0.05}$	16.3	2.0

نتایج نشان می‌دهد بیشترین میزان فشردگی (۵۹-۵۵٪) موقعی اتفاق می‌افتد که فشردگی پس از کاشت در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر اتفاق می‌افتد (جدول ۳) (Lipiek et al., 2003).

در جدول ۴ نیز کاهش مقدار عملکرد (دانه و ریشه) در دو گیاه جو و ارزن در جرم مخصوص‌های ظاهری مختلف نشان داده شده است (Lipiek et al., 2003). نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد مقدار عملکرد دانه جو در بین سه D_b معادل ۰/۹۵، ۱/۱۵ و ۱/۳۵ مگاگرم بر مترمکعب، در D_b معادل ۱/۱۵ (۲/۰۵ تن بر هکتار) بیشترین بود که ۵/۴ درصد بیشتر از عملکرد در D_b معادل ۰/۹۵ و ۴۳/۵ درصد بیشتر از عملکرد در D_b معادل ۱/۳۵ مگاگرم بر مترمکعب بود، به این معنی که افزایش ۰/۲ واحد فشردگی، از۱/۱۵ به ۱/۳۵ مگاگرم بر مترمکعب، مقدار محصول را ۴۳/۵ درصد افزایش داده است. در گیاه ارزن نیز با افزایش D_b از ۱/۰۶ به۱/۳۴ مگاگرم بر مترمکعب عملکرد دانه افزایش یافت و بیشترین مقدار آن (حدود ۱۳ درصد) در D_b مساوی ۱/۲۴ مگاگرم بر مترمکعب اتفاق افتاد. افزایش بیشتر D_b تا ۱/۵۱ مگاگرم بر مترمکعب، مقدار محصول را ۱۱/۲ درصد کاهش داد (Lipiek et al., 2003).

جدول ۴- عملکرد (دانه و ریشه) جو و ارزن در خاک‌های فشرده

Table 4- Yield (grain and root size) of barley and millet in compacted soils (Lipiek et al., 2003)

D_b	دانه	ریشه	دانه:ریشه
Mg m^{-3}	Mg h^{-1}	Mg h^{-1}	
	جو- خاک چرنوزم تیپیک لوم سنگین[19]		
0.95	1.94	2.31	0.84
1.15	2.05	1.79	1.14
1.35	1.16	1.17	0.99
	ارزن- خاک لوم سبک پدزولی جنگلی خاکستری[20]		
1.06	3.54	2.31	1.53
1.24	4.06	1.98	2.05
1.34	3.88	1.73	2.24
1.51	3.20	1.29	2.42

تراکم خاک یک تهدید بزرگ برای کشاورزی در اروپا است، پیکولی و همکاران (Piccoli et al., 2022) در یک تحقیق، در چند سایت که در امتداد شیب‌های شمال جنوب و شرق–اروپا واقع شده‌اند، پنج مطالعه موردی کوتاه مدت (کمتر از پنج سال) انجام دادند. این پژوهش‌گران سامانه‌های کشت بهبوددهنده خاک (SICSs[21]) زیر را برای کاهش فشردگی خاک سطحی و زیرسطحی بکار بردند. در دو سایت سوئد و رومانی با استفاده از تیمارهای خاک‌ورزی با زیرشکن، تراکم زیرسطحی طبیعی مورد مطالعه قرار گرفت. عمق مورد مطالعه در سوئد و رومانی به ترتیب ۳۵ و ۶۰ سانتی‌متری خاک بود. ، پیکولی و همکاران (Piccoli et al., 2022) در سایر سایت‌ها (نروژ، بریتانیا و ایتالیا) با بکارگیری گیاهان با ریشه عمیق (با خاصیت حفاری زیستی نظیر یونجه) و انواع مختلف خاک‌ورزی یا ترکیبی از هر دو، به فشردگی خاک سطحی و زیرسطحی متمرکز شدند (بیشتر از ۲۵ سانتی‌متر در نروژ و بریتانیا و بیشتر ۳۰ سانتی-متر در ایتالیا). در هر سایت اثربخشی SICSs با اندازه‌گیری خواص فیزیکی خاک ارزیابی و شاخص‌های فشردگی خاک محاسبه شد. نتایج نشان داد برای مثال، یونجه در نروژ پتانسیل خوبی برای کاهش فشردگی دارد (تراکم زیر خاک از ۱/۶۹ به ۱/۴۵ مگاگرم بر مترمکعب کاهش یافت) و در سایت سوئد زیرشکن‌زنی نفوذ ریشه به زیر خاک را تا حدود ۱۰ سانتی‌متر بهبود بخشید، اما اثرات SICSs بر عملکرد محصول به‌طورکلی کم بود. به‌استثنای سایت رومانیایی، هیچ رابطه‌ای بین عملکرد محصول و شاخص-های فشردگی خاک وجود نداشت (داده‌ها نشان داده نشده است). در این سایت، به ازاء یک درصد افزایش فشردگی یا هر واحد کاهش AFP، دو درصد کاهش عملکرد مشاهده گردید. این یافته نشان داد افزایش درجه فشردگی[22] از ۸۳٪ (میانگین خاک‌های رومانی) به ۸۷٪ (محدودیت فشردگی برای رشد محصول)، به کاهش هفت درصدی در عملکرد محصول منجر خواهد شد (Piccoli et al., 2022). طبق تعریف هاکانسون (Håkansson, 1990) درجه فشردگی، نسبت جرم مخصوص ظاهری یک خاک در حالت خشک به وزن مخصوص ظاهری همان خاک در حالت متراکم است.

ویتسل و هابز (Wittsell& Hobbs, 1965) نشان دادند که افزایش چگالی ظاهری یک خاک لوم سیلت در کانزاس از ۱/۲۲ به ۱/۷ مگاگرم بر مترمکعب، مرحله رسیدن محصول را به مدت دو هفته را به تأخیر انداخت و عملکرد را تا ۵۸ درصد کاهش داد. فلاکر و نیسلن (Flocker &Nielsen, 1962) گزارش کردند که افزایش D_b به‌تنهایی بر عملکرد گوجه‌فرنگی تأثیری ندارد و سطح D_b تنها در مکش‌های زیاد خاک بر رشد و عملکرد گیاه تأثیر می‌گذارد. لپور و همکاران (Lepore et al., 2024) نیز نتیجه گرفتند عبور و مرور ماشین‌آلات کشاورزی در

[19] -Chernozem typical heavy loamy
[20] -Grey forest podzolized light loam
[21] -Soil improving crop systems
[22] -Degree of compaction

SMD[۲۳]مساوی ۱۰ میلی‌متر باعث افزایش D_b نگردید و در SMD کوچک‌تر و مساوی صفر (حدود FC) خاک مستعد تخریب فیزیکی بود. طبق بررسی هو و همکاران (Hu et al., 2021) بسته به اقلیم، بافت خاک و گونه، مقدار بهینه برای شرایط فیزیکی خاک متفاوت است و درحالی‌که تراکم تمایل به کاهش عملکرد بیشتر در سال های‌با بارندگی متوسط یا بالاتر از متوسط دارد، ممکن است در فصول خشک نیز عملکرد را افزایش دهد. برونوت و همکاران (Brunotte et al., 2021) نیز گزارش کردند بکارگیری ماشین‌آلات کشاورزی در علفزارها در تابستان-های خشک خطر تراکم خاک را به طرز قابل توجهی کاهش داد. هبلسویت و مک‌گوان (Hebblethwaite, & McGowan, 1980) نشان دادند هنگامی‌که فشردگی خاک در حالت خشک اتفاق افتاد D_b خاک لوم‌شنی‌سبک از ۱/۴ به ۱/۶۶ مگاگرم بر مترمکعب افزایش یافت، در حالیکه فشردگی در حالت مرطوب، D_b خاک را به ۱/۷ مگاگرم بر مترمکعب افزایش داد. تراکم خشک عملکرد محصول را ۱۷٪ تا ۳۹٪ و فشردگی در حالت مرطوب ۵۱٪ تا ۵۵٪ کاهش داد. اسمیتل و ویلیامسون (Smittle & Williamson, 1977) نشان دادند که فشردگی باعث کاهش ۲۵ تا ۳۵ درصدی عملکرد خیار شد. رشد ریشه خیار با SR خاک بیشتر از ۵۰۰ کیلو پاسکال کاهش یافت و در SR معادل ۸۵۰ کیلو پاسکال این کاهش به ۸۰ درصد رسید. کر و دودز (Carr, & Dodds, 1983) مشاهده کردند کاهش رشد ریشه کاهو تحت تأثیر افزایش جزئی در D_b است و افزایش جرم مخصوص ظاهری از ۱/۲۵ به ۱/۵ مگاگرم بر مترمکعب در یک خاک لوم‌شنی بدون ساختمان[۲۴]، وزن تر و خشک گیاه را تا ۲۵ درصد کاهش داد.

ایلر و استونسون (Iler & Stevenson, 1991) با بررسی منابع و تحقیقات انجام‌شده در خصوص میزان تأثیر فشردگی خاک بر عملکرد برخی محصولات زراعی و سبزی‌ها، نتایج را به شرح جدول ۵ ارائه دادند. طبق بررسی نامبردگان، ریدر (Reeder, 1990) پس از بررسی تأثیر فشردگی بر عملکرد گوجه‌فرنگی، ذرت شیرین و کلم با استفاده از ۱۰ و ۱۷ تن در هر محور، نشان داد که سال اول ایجاد تراکم، کلم در مراحل اولیه رشد ۸۵ درصد و گوجه-فرنگی برای وسایل نقلیه به وزن ۹ و ۱۵/۵ بار به ترتیب ۱۰ و ۵ درصد کاهش عملکرد نشان داد (جدول ۵). میزان کاهش و افزایش احتمالی محصول ذرت توسط محققین مختلف (جدول ۵) در سال‌ها و با وسایل نقلیه به وزن‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و بیشترین مقدار کاهش عملکرد (۵۰٪) در سال اول و تحت تراکم با وسیله نقلیه به وزن ۲۰ تن اتفاق افتاد که توسط راغاون و همکاران (Raghavan et al., 1978) گزارش شد. گندم در سال سوم پس از ایجاد تراکم با وسایل نقلیه به وزن ۹ و ۱۸ تن تا ۵۵ درصد کاهش عملکرد نشان داد(جدول ۵) (Voorhees, 1985).

طبق گزارش تروس (Trouse, 1979) در خاک لوم رسی در مقادیر D_b معادل ۱/۲۵، ۱/۳۵، و ۱/۴۱ مگاگرم بر مترمکعب نرخ رشد روزانه ریشه به ترتیب ۵۷، ۶۷ و ۷۲ درصد کاهش یافت. لیندمن و همکاران (Lindemann et al., 1982) اثر فشردگی بر عملکرد دانه سویا را با فشرده کردن یک خاک لوم‌رسی با حداکثر سه بار عبور تراکتور ۳۵۸۳ کیلوگرمی ارزیابی و مشاهده کردند در سال‌های خشک، عملکرد تا ۱۵ درصد بهبود یافت و در سال‌های مرطوب تا شش درصد کاهش یافت. بااین‌حال، اثر تراکم بر عملکرد دانه سویا از نظر آماری معنی‌دار نبود و به نظر می‌رسد وابسته به میزان بارندگی در فصل رشد باشد. کاتوچ و همکاران (Katoch et al., 1983) در مطالعه دیگری با استفاده از سویا نشان دادند که افزایش D_b یک خاک لوم رسی‌سیلتی از ۱/۱۴ به ۱/۵۳ مگاگرم بر مترمکعب، به‌طور قابل توجهی باعث کاهش عملکرد و محتوای پروتئین می-شود. عملکرد دانه و محتوای پروتئین به ترتیب ۷۷ و ۸۸ درصد عملکرد سویای کشت‌شده در خاک غیرمتراکم بود.

[23] -Soil moisture deficit

[24] -Structureless

جدول ۵- اثر تراکم خاک بر عملکرد برخی محصولات زراعی و سبزی‌ها

Table 5-Effect of soil compaction on yield of some agricultural crops and vegetables (Iler & Stevenson, 1991)

محصول	وزن وسیله نقلیه (تن)	فشار (کیلوپاسکال)	سال	درصد کاهش (-) یا افزایش محصول (+)	منبع
گوجه‌فرنگی	9 15.5		1 1	-10 -5	Reeder (1990)
ذرت شیرین	9 15.5		1 1	-35 -48	Reeder (1990)
سیب‌زمینی	2			-35	Voorhees (1977)
خیار	2.1 2.3		1 1	50 -25-35	Smittle & Williamson 1977,1978)
کلم (مراحل اولیه رشد)	9 15.5		1 1	-85 -45	Reeder (1990)
کلم (مراحل آخر رشد)	9 15.5		1 1	-49 -27	Reeder (1990)
کدو	2.3		1	-46-58	Smittle & Williamson (1978)
لوبیا چیتی	3.4 2.7	1216	1	-18 -40	Croissant et al (1988)
ذرت	8.1	150	3	-8 تا +8	Bicki &Siemens (1990)
		240	3	-15	Mielke & Jones (1990)
	18		1	-5	Reeder (1990)
	9		1	-10	Voorhees (1987)
	18		1	-27	Voorhees (1987)
	5.4		1	-7.5	Soane t al. (1986)
	20		1	-50	Raghavan et al. (1978)
سویا	8.1 18 9 و 18	150	3 2 11	-8-+8 -6 تا -28 -55 تا +5	Reeder (1990) Bicki &Siemens (1990) Voorhees (1985)
گندم	9 و 18 4.2		3 3	-55 تا +5 -30تا 5 +	Voorhees (1985) Soane et al. (1986)
جو دوسر				-38 تا +17	Butorac (1982)
چاودار				-10تا +22	Butorac (1982)

افزایش فشردگی، کاهش عملکرد و برآورد ارزش اقتصادی آن

اگرچه تعیین کمی هزینه اقتصادی فشردگی خاک دشوار است ولی توسط چندین منبع برآورد شده است (Ruis et al., 2023; Parvin et al., 2022; Zabrodskyi et al. 2021; Hakanson, 2005; Iler & Stevenson, 1991) .فشردگی خاک تحت‌الارض علاوه بر تأثیر مستقیم بر عملکرد، می‌تواند به‌طور غیرمستقیم نیز عملکرد را کاهش دهد. برای مثال کاهش مقدار زهکشی داخلی خاک در اثر تراکم خاک، باعث خواهد شد زمان ماندابی شدن خاک طولانی شود و عملیات مزرعه‌ای که باعث افزایش عملکرد می‌شوند، به تأخیر بیافتد و کاشت پس از تاریخ کاشت بهینه می‌تواند منجر به کاهش عملکرد شود. وورهیس (Voorhees, 1983) در یک مطالعه بر روی یک خاک لومی‌رسی مشاهده کردند افزایش فشردگی خاک ناشی از پنج بار عبور تراکتور هفت مگاگرمی، باعث شد میزان رطوبت مورد نیاز برای شخم زدن ۴۳ درصد افزایش یابد.. کیفیت محصول نیز با فشردگی خاک کاهش می‌یابد و هر گونه کاهش کیفیت، قیمت یک واحد کالا را کاهش می‌دهد. فشردگی می‌تواند با افزایش هزینه نهاده‌های تولید کننده، زیان اقتصادی را تحت تأثیر قرار دهد. هنگامی‌که فشردگی نفوذ آب را مختل می‌کند و ظرفیت نگهداری آب در خاک را کاهش می‌دهد، میزان رواناب سطحی و فرسایش را افزایش می‌دهد. علاوه بر نگرانی‌های زیست‌محیطی بالقوه در مورد تأثیر روی آبراهه‌ها، عناصر غذایی و بهره‌وری خاک[۲۵] از بین می‌رود. در شرایط اسکاندیناوی، نتایج آزمایش‌ها نشان داد که هزینه‌های آسیب خاک ناشی از ماشین‌های سنگین اغلب به‌اندازه هزینه ماشین‌آلات و نیروی کار است (Hakansson et al., 1988). ایلر و استونسون (Iler & Stevenson, 1991) خسارات مالی ناشی از پخش کود مایع با تانکر سنگین با وزن بیش از ۱۸ تن و فشار بیش از ۲۰۰ کیلوپاسکال روی خاک مرطوب در اوایل بهار را ۳۰ تا ۳۰۰ دلار در هکتار محاسبه کردند. این رقم بسته به خاک، محصول و ماشین-آلات متفاوت است، اما در بدترین شرایط، این هزینه بیشتر از ارزش مواد مغذی موجود در کود است (Iler & Stevenson, 1991). تراکم خاک همچنین ارتباط نزدیکی با تلفات محصول و انتشار گازهای گلخانه‌ای، به دلیل استفاده اضافی از سوخت دارد. بنابراین نه‌تنها نظارت صحیح بر وضعیت خاک و احیای خاک آسیب‌دیده بلکه درک هزینه‌های بهره‌برداری بیش از حد از خاک و خطرات فردی در کشورها و قاره‌های مختلف نیز مهم است. زابردسکی و همکاران (Zabrodskyi et al., 2021) بر اساس داده‌های موجود، هزینه‌های برآورد شده آسیب ناشی از تراکم در کشورهای اوکراین (UA) و لیتوانیایی (LT) را مقایسه کردند. زیرا این کشورها وضعیت مشابهی دارند اما سطوح متفاوتی از مدیریت منابع خاک دارند. ویژگی‌های خاک، مانند انواع خاک و استعداد فشردگی، بسته به نوع آن، در هر دو کشور ارزیابی شد. پارامترهای اصلی مورد استفاده برای برآورد خسارت ناشی از فشردگی عبارت‌اند از: کاهش عملکرد، مصرف سوخت اضافی، تلفات کودهای N، P، K، آلودگی آب، سیل، فرسایش و انتشار گازهای گلخانه‌ای. تلفات بالقوه محصول یکی از پرهزینه‌ترین پیامدهای فشردگی خاک است که معادل هزینه سالانه حدود یک میلیارد یورو برای اوکراین و حدود ۱۰/۷ میلیون یورو برای لیتوانی برآورد شده است (Zabrodskyi et al., 2021). علاوه بر این، استفاده اضافی از سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط احتمالاً می‌تواند معادل هزینه سالانه ۱۸۰ میلیون یورو برای اوکراین (UA) و حدود چهار میلیون یورو برای لیتوانی (LT) باشد (Zabrodskyi et al., 2021) (جدول ۶).

[25] -Soil fertility

جدول ۶- میزان هزینه‌های سالانه‌های بالقوه فشردگی در اوکراین و لیتوانی (میلیون یورو در سال[۲۶])

Table 6- Potential annual costs of soil compaction in Ukraine and Lithuania (M EUR Y^{-1}) (Zabrodskyi et al., 2021)

کشور	اوکراین	لیتوانی
هزینه‌های مستقیم		
هزینه‌های اضافی ناشی از مصرف سوخت	121.07	1.47
هزینه کاهش عملکرد	95.66-1086.37	10.7
هزینه تلفات کودهای نیتروژنه	157.22	1.51
هزینه تلفات کودهای فسفره	4.61	0.044
هزینه تلفات کودهای پتاسه	6.311	0.0677
هزینه‌های مستقیم کل	1315.23	13.79
هزینه‌های غیرمستقیم		
آلودگی آب‌ها	134.93	گزارش نشده
خدمات کنترل سیلاب‌ها (هزینه ذخیره دوباره)	گزارش نشده	0
هزینه ناشی از فرسایش	59.684	9.18
هزینه‌های ناشی از GHG[۲۷] در اثر مصرف سوخت دیزلی اضافی	41.94-45.3	2.69
هزینه‌های ناشی از انتشار GHG در اثر:		
تلفات نیتروژن	60.19	3.87
تلفات فسفر	0.32	0.02
تلفات پتاسیم	0.21	0.02
هزینه‌های غیرمستقیم کل	297.27-300.63	153.78
هزینه‌های بالقوه کل سالانه	1615.86	29.57
هزینه به ازای هر هکتار زمین زراعی	49.13	12.71
هزینه به ازای هر هکتار زمین متراکم شده	70.1	12.1

جدول ۷ عملکرد تخمینی سالانه (مگاگرم در هکتار) و کاهش عملکرد کل در محصولات کشت‌شده در سال بعدی (درصد عملکرد یک سال) ناشی از اثرات باقیمانده فشردگی لایه شخم را نشان می‌دهد (Hakanson, 2005). مقدار کاهش عملکرد بسته به مقدار رس و مرحله بکارگیری ماشین‌آلات و مقدار وزن حاصل از چرخ‌های آن‌ها از ۰/۹ الی ۲/۲ درصد برای خاک با محتوای رس ۱۰ درصد و از ۳/۷ تا ۸/۶ درصد برای خاک حاوی ۴۰ درصد رس برای غلات بهاره و از ۲/۵ الی ۵/۱ برای خاک حاوی ۱۰ درصد رس و از ۹/۹ تا ۲۰/۳ درصد برای خاک حاوی ۴۰ درصد رس برای چغندرقند متغیر بود. برای هردو محصول با افزایش درصد رس مقدار کاهش عملکرد افزایش یافت (جدول ۷) (Hakanson, 2005).

[26] -M EUR Y^{-1}
[27] -Greenhouse gases

جدول ۷- عملکرد تخمینی سالانه (مگاگرم در هکتار) و کاهش عملکرد کل در محصولات بعدی (درصد عملکرد یک سال) ناشی از اثرات باقی‌مانده فشردگی لایه شخم

Table 7– Estimated annual number of Mg.ha^{-1} and total yield loss in subsequent crops (% of one year's yield) caused by residual effects of compaction of the plough layer (Hakanson, 2005)

عملیات	غلات بهاره				چغندرقند			
	Mg ha^{-1}		کاهش عملکرد (%)		Mg ha^{-1}		کاهش عملکرد (٪)	
	A[a]	B[a]	10% رس	40% رس	A[a]	B[a]	10% رس	40%رس
۳-۲ بار خرد کردن کلوخ	27	11-25	0.3	0.1	35	14-32	0.4	1.5
کاشت	12	5-11	0.1	0.5	12	5-11	0.1	0.5
کوددهی	7	3-7	0.1	0.3	7	3-7	0.1	0.3
سمپاشی	4	1-4	0.1	0.2	25	7-23	0.2	0.9
مبارزه مکانیکی با علف‌های هرز	–	–	–	–	16	5-14	0.2	0.6
برداشت	35	9-42	0.4	1.5	175	105-210	2.5	9.9
کشت روی کلش	18	9-14	0.2	0.7	–	–	–	–
خیش زنی	37	18-44	0.5	1.9	37	18-44	0.5	1.9
کل	140	60-140	0.-2.2	3.7-6.6	307	160-330	2.5-5.1	9.9-20.3

a: مقادیر عملکرد در ستون A (Mgkm) برای ماشین‌های معمولی قبل از تنظیم و B) پس از تنظیم رطوبت خاک و فشار زمین ارائه شده است. کمترین مقادیر در B زمانی به دست می‌آید که لاستیک‌های کم‌فشار در خشک‌ترین شرایطی که معمولاً در حین کار اتفاق می‌افتد استفاده می‌شوند و بالاترین مقادیر زمانی که تایرهای استاندارد در مرطوب‌ترین شرایط استفاده می‌شوند، به دست می‌آیند. b: برای هر عملیات جداگانه، مقادیر کاهش عملکرد (Mgkm) برای مقدار تنظیم‌شده در وسط محدوده در ستون B آورده شده است

مقدار کاهش عملکرد بسته به فشار لاستیک، مقدار رطوبت خاک و درصد رس متفاوت است. با افزایش فشار لاستیک، درصد رس و مرطوب‌تر شدن بیشتر از حد FC، کاهش عملکرد تشدید شد. یافته‌های هاکانسون (Hakanson, 2005) نشان می‌دهد موقعی که فشار لاستیک ۱۵۰ کیلو پاسکال، رطوبت در حد FC و رس ۱۰ درصد بود، کاهش عملکرد ۱/۸ درصد بود. در شرایط مشابه، با مرطوب‌تر شدن خاک مقدار کاهش عملکرد به ۲/۵ درصد رسید. هنگامی‌که با همان فشار و حد رطوبتی FC، مقدار رس ۴۰ درصد بود این کاهش عملکرد به ۷/۱ درصد و با مرطوب‌تر شدن خاک در شرایط مشابه به ۹/۸ درصد افزایش یافت. در فشار لاستیک ۲۵۰ کیلوپاسکال در شرایط مشابه مقدار این کاهش عملکرد بیشتر نیز شد، طوریکه با درصد رس ۴۰ و خاک مرطوب مقدار این کاهش به ۱۲ درصد رسید. ارزش محصول کاهش‌یافته در بدترین حالت (۱۲درصد کاهش) و با ارزش محصول ۱۵۰۰ یورو در هکتار در سال، معادل ۱۸۱یورو در هکتار برآورد شد. موقعی که ارزش سالانه محصول ۵۰۰ یورو در هر هکتار و مقدار رس در خاک ۵۰٪ بود و پخش کود به‌صورت خیلی تهاجمی [۲۸]صورت گرفت، ارزش کل هزینه‌های اضافی ناشی از افزایش فشردگی خاک در لایه سطحی، تحت الارض و بیش از ۴۰ سانتی‌متر، ۱۷/۸٪ ارزش کل محصول برآورد شد. با مجموع هزینه‌های اضافی خاک‌ورزی در سال‌های بعدی این هزینه‌ها به ۲۰/۴٪ ارزش کل محصول افزایش یافت. منظور از لایه سطحی و تحت الارض به ترتیب اعماق ۲۵-۰ و ۴۰-۲۵ سانتی‌متری خاک بود. با افزایش ارزش محصول و کاهش درصد رس و پخش کود به روش غیرتهاجمی[۲۹] مقدار این خسارات کاهش یافت (جدول ۸). در روش غیرتهاجمی، فشار وارد بر زمین از طریق دستگاه پخش‌کننده کود ۸۰ کیلوپاسکال و عرض پخش ۱۲ متر بود. همچنین پخش کود زمانی انجام گرفت که خاک به‌خوبی خشک شده بود (پس از یک دوره دو هفته‌ای بدون بارندگی در مزرعه‌ای بدون پوشش گیاهی که قبلاً رطوبت آن تا حد ظرفیت مزرعه کاهش یافته بود). در مورد دوم (روش خیلی تهاجمی) فشار وارد بر زمین از طرف کودپاش ۲۰۰ کیلو پاسکال، عرض پخش شش متر بود و پخش در خاک مرطوب (یک یا دو روز پس از بارندگی شدید) انجام گرفت (Hakanson, 2005).

[28] -In a very aggressive way

[29] -In a non aggressive way

جدول ۸- هزینه پیش‌بینی شده کاهش عملکرد محصول و افزایش هزینه‌های خاک‌ورزی ناشی از فشردگی خاک با مقادیر مختلف رس هنگام پخش کود در مزارع به روش غیرتهاجمی و خیلی تهاجمی

Table 8- Predicted crop yield losses and increased tillage costs caused bysoil compaction with various clay contents when spreading manure in fields carried out either in a non-aggressive way or m a very aggressive way (Hakanson, 2005)

نوع تأثیرات	پخش غیرتهاجمی			پخش خیلی تهاجمی		
	10%	30%	50%	10%	30%	50%
۱- تأثیر در لایه شخم در همان سال (%)	2.8	2.8	2.8	8.9	8.9	8.9
۲- اثرات بعدی در لایه شخم (%)	0.2	0.6	0.1	1.5	4.6	7.7
۳- اثرات در عمق 40 - 25 سانتی‌متر (%)	0.1	0.1	0.1	0.9	0.9	0.9
۴- اثرات در عمق بیش از 40سانتی‌متر (%)				0.3	0.3	0.3
کاهش عملکرد کل (مجموع درصد 4 مورد فوق)	3.1	3.5	3.9	11.6	14.7	17.8
کاهش عملکرد کل (یورو بر هکتار)						
در ارزش محصول سالانه ۵۰۰ یورو بر هکتار	15	17	19	58	73	89
در ارزش محصول سالانه ۱۵۰۰ یورو بر هکتار	31	35	39	116	147	178
هزینه‌های شخم افزایش‌یافته (یورو بر هکتار)	2	4	6	5	9	13
کل هزینه‌ها (کاهش عملکرد+ هزینه‌های شخم افزایش‌یافته، یورو بر هکتار)						
در ارزش محصول سالانه ۵۰۰ یورو بر هکتار	17	21	25	63	82	102
در ارزش محصول سالانه ۱۵۰۰ یورو بر هکتار	33	39	45	121	156	191

یافته‌های پروین و همکاران (Parvin et al., 2022) نشان داد فشردگی ناشی از به‌کارگیری ماشین‌آلات برداشت سنگین با وزن نه مگاگرم (تن)، باعث کاهش عملکرد گندم به میزان ۴/۵ درصد در سوئد گردید و با میانگین قیمت تولید گندم ۱۴۶۰ کرون به ازای هر تن دانه گندم، درآمد کشاورز از حدود ۱۰۱۲۰ کرون در هکتار در خاک متراکم نشده به ۹۶۷۰ کرون در هکتار برای خاک متراکم شده کاهش یافت. همچنین هزینه‌های اجتماعی مرتبط با انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فشردگی خاک بین ۳۳۱۰ و ۳۹۵۰ کرون در هکتار متغیر بود و با افزایش تراکم تا ۱۷درصد افزایش یافت که حداکثر آن در بار چرخ متوسط مشاهده شد. هزینه‌های آبشویی نیتروژن ۳۴/۵ درصد افزایش یافت. هزینه‌های مرتبط سیل، کمتر و در محدوده ۳۰ تا ۸۰ کرون در هکتار بود. هزینه‌های زیست‌محیطی تراکم تحت تأثیر انتشار گازهای گلخانه‌ای بود (جدول ۹) (Parvin et al., 2022).

جدول ۹ - درآمد، هزینه‌های برداشت و هزینه‌های آسیب‌های زیست‌محیطی برای اندازه‌های مختلف دروگر (وزن چرخ‌ها) (کرون بر هکتار)

Table 9- Income, harvesting costs and costs for environmental disservices for different harvest sizes (wheels load) SEKha^{-1} (Parvin et al., 2022)

وزن چرخ‌ها (مگاگرم)									
9	8	7	6	5	4	3	2	1	
9670	9753	9828	9895	9955	10007	10052	10089	10118	درآمد دانه
1055	1121	1188	1255	1322	1389	1455	1522	1589	هزینه‌های برداشت
8615	8631	8639	8640	8633	8619	8596	8566	8529	درآمد خالص کشاورز
									هزینه‌های زیست‌محیطی ناشی از:
70	72	72	70	66	59	50	39	25	رواناب (سیل)
2014	2014	1924	1834	1744	1654	1564	1473	1383	آبشویی نیتروژن
3539	3739	3873	3943	3947	3886	3759	3568	3311	انتشار گازهای گلخانه¬ای معادل CO_2
5713	5825	5870	5847	5756	5598	5373	5080	1719	هزینه های زیست‌محیطی کل
2902	2806	2770	2794	2877	3020	۳۲۲٤	3487	3809	درآمد خالص برای جامعه

مقایسه تأثیر انواع سامانه‌های خاک‌ورزی بر فشردگی خاک و عملکرد محصول

از دهه ۱۹۵۰ اشکال مختلف خاک‌ورزی حفاظتی و بی‌خاک‌ورزی (NT[30]) با حداقل بهم خوردگی خاک در سراسر جهان معرفی شده است. روش‌های کشاورزی حفاظتی و کاهش خاک‌ورزی روش‌های مؤثری برای کنترل فرسایش خاک و حفظ آب هستند، همچنین به ترسیب کربن و کاهش هزینه‌های پولی و انرژی کمک می‌کنند، اما مشکلات مربوط به کنترل علف‌های هرز، افزایش کربن آلی خاک و طبقه‌بندی مواد مغذی،خطرات تراکم، رواناب و اسیدی شدن را نیز نباید نادیده گرفت (Voltr et al., 2021). از سوی دیگر سامانه‌خاک‌ورزی متداول حاصلخیزی خاک و بهره‌وری زراعی را بهبود می‌بخشد، اما در بلندمدت،کاهش کیفیت ساختار خاک و افزایش حساسیت به سله بستن، تراکم و فرسایش مشاهده می‌شود (Voltr et al., 2021). در یک آزمایش که در صربستان غربی، از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ توسط بیبردزیک و همکاران (Biberdzic et al.,. 2019) انجام شد، به تأثیر سامانه‌های مختلف خاک‌ورزی بر فشردگی خاک و عملکرد دانه‌های گندم زمستانه (*Triticum aestivum L.*) در یک خاک ورتی‌سول پرداخته شد. چهار سامانه خاک‌ورزی شامل (خاک‌ورزی متداول (CT[31])،کم‌خاک‌ورزی (RT[32])، خاک‌ورزی با دیسک (RT_1[33])و بی‌خاک‌ورزی(NT) در این آزمایش استفاده شد. بیشترین میانگین عملکرد گندم در سامانه خاک‌ورزی متداول (۴۰۳۳ کیلوگرم در هکتار) و به‌طور معنی‌داری بیشتر از عملکرد به دست آمده در سایر سامانه-های خاک‌ورزی بود و کمترین عملکرد (۲۶۸۰ کیلوگرم در هکتار) در سامانه NT به دست آمد. تفاوت معنی‌داری در عملکرد گندم بین سامانه‌های RT و RT_1 وجود نداشت. همبستگی منفی قوی بین میانگین عملکرد گندم و فشردگی خاک وجود داشت (r=085). .میانگین عملکرد در سامانه CT، ۱۲/۴۳٪ تا ۲۹/۵۱٪ بالاتر از سامانه‌های NT و RT بود (Voltr et al., 2021). این نتایج با یافته‌های گزارش‌شده توسط شهزاد و همکاران (Shahzad et al., 2016) مطابقت دارد که در سامانه CT عملکرد دانه گندم را ۹/۸٪ تا ۱۹/۲٪ بالاتر از سامانه-های RT و NT به دست آوردند. دای و همکاران (Dai et al., 2019) عملکرد گندم در سامانه NT را در مقایسه با سامانه

[30] -No tillage
[31] -Conventional tillage
[32] -Reduced tillage
[33] -Disc harrowing

CT، ۶ درصد کمتر گزارش کردند. راتونیی و همکاران (Rátonyi et al., 2005) کاهش عملکرد دانه (۳۳–۸ درصد) پس از کاشت مستقیم را ناشی از فشردگی بیشتر خاک در لایه عمقی (۲۵–۱۵ سانتی‌متر) گزارش کردند در حقیقت مدیریت پایدار خاک ممکن است سرمایه‌گذاری باشد که در کوتاه‌مدت به قیمت بازده کمتر تمام شود اما کیفیت خاک را در آینده افزایش می‌دهد. از این‌رو، دستیابی به ارزش اقتصادی بالای زمین در بلندمدت، با ایجاد مدیریت پایدار خاک، با حداقل از دست دادن درآمد امکان-پذیر خواهد بود. حداکثر ارزش اقتصادی بلندمدت در صورتی به دست می‌آید که حداکثر استفاده از پتانسیل یک خاک به روشی پایدار صورت گیرد (Kik et al., 2021) .نتایج مشابه توسط روئیس و همکاران (Ruis et al., 2023) پس از جایگزینی آیش با نخود بهاره در آمریکا ارائه شد که نتیجه گرفتند اگرچه این جایگزینی عملکرد محصول بعدی را به میزان ۲۵–۱۵ درصد در مقایسه با آیش کاهش داد. بااین‌حال، تجزیه‌وتحلیل اقتصادی نشان داد که درآمد خالص را ۳۰۳–۱۴۴ دلار در هکتار بهبود بخشید و مقدار D_b را ۰/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب کاهش داد (Ruis et al., 2023). میرزاوند و مرادی طالب بیگی (Mirzavand & Talebbeigi, 1991) نشان دادند سامانه RT عملکرد بالاتری از گندم و ذرت را در شیراز تولید کرد که به ترتیب ۹۱۹۰ و ۱۴۹۹۶ کیلوگرم در هکتار بود. یافته-های این پژوهش نشان داد جایگزینی RT با CT و یا NT می‌تواند تا حد زیادی عملکرد محصول را بهینه کند، فشردگی خاک را کاهش دهد و نفوذ آب را تحت تناوب گندم– ذرت بهبود بخشد. کوپک و همکاران (Copec et al., 2015) نیز با بررسی تأثیر سامانه‌های خاک‌ورزی بر محتوای آب خاک و عملکرد گندم و ذرت به این نتیجه رسیدند که بیشترین عملکرد در سامانه NT حاصل شد که بالاترین محتوای رطوبت را نیز داشت. شهب و همکاران (Shaheb et al., 2023) در یک مطالعه سه‌ساله با بررسی اثرات فشار باد کم تایر (LTP[34]) را در مقایسه با لاستیک‌های استاندارد، بر عملکرد محصول و اقتصاد مزرعه برای یک تناوب معمولی ذرت–سویا با سه سامانه خاک‌ورزی شامل خاک‌ورزی عمیق (DT، ۴۵ سانتی‌متر)، خاک‌ورزی کم‌عمق (ST، ۱۰۰ سانتی‌متر) و سامانه NT در دو مزرعه ۲۰۰ و ۸۰۰ هکتاری، دریافتند سامانه LTP عملکرد ذرت را در دو سال ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ به ترتیب ۴/۵ و ۲/۷ درصد و عملکرد سویا را ۳/۷ درصد در سال ۲۰۱۸ افزایش داد. درآمد سالانه برای هر دو مزرعه افزایش یافت. سود سالانه هر هکتار استفاده از سامانه‌های LTP برای DT، ST، و NT به ترتیب ۶۴، ۲۹ و ۳۳ دلار برای یک مزرعه ۲۰۰ هکتاری و به ترتیب ۶۶، ۳۱ و ۳۶ دلار برای یک مزرعه ۸۰۰ هکتاری بود. تیمار DT بیشترین میزان عبور و مرور میدانی را دارد و بنابراین از کاهش تراکم با LTP بیشترین سود را می‌برد (Shaheb et al., 2023).

تأثیر سامانه‌های خاک‌ورزی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای و بازده اقتصادی محصول

ولتر و همکاران (Voltr et al., 2021) نشان دادند که همه محصولات مورد مطالعه به‌جز چغندرقند، در صورت بکارگیری سامانهRT نسبت به CT، بر اساس ارزیابی تولید گازهای گلخانه‌ای (GHG[35]) به پارامترهای اقتصادی بهتری در تولید دست یافتند. همچنین با به‌کارگیری سامانه RT انتشار GHG کاهش یافت. مقدار این کاهش به‌طور متوسط در هر تن در تمام محصولات مورد مطالعه شش درصد بود. بیشترین کاهش CO_2 ، برای چاودار و جو (۱۳ درصد) و جو بهاره (هشت درصد) به دست آمد. کاهش عملکرد محصول در سامانه RT نسبت به CT از حدود ۱٪ (جو بهاره) تا ۴٪ (ذرت دانه) متغیر است. کاهش هزینه هر تن در محدوده ۱۴ درصد (چاودار) تا دو درصد (ذرت علوفه‌ای) بود. میزان ذخیره انرژی در سامانه RT در خشخاش هشت، کلزا چهار، جو دوسر سه، چاودار سه و جو بهاره و زمستانه دو درصد بود. ارزیابی کلی سامانه‌های خاک‌ورزی نشان داد که اگرچه استفاده از

[34] -Low tire inflation pressure
[35] -Greenhouse gases

سامانه RT منجر به صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای گردید، بااین‌حال، باعث افزایش فشردگی خاک در لایه سطحی و زیرسطحی و متعاقباً مصرف کود نیتروژنی در ذرت دانه‌ای و علوفه‌ای، کلزا و جو زمستانه شد. افزایش مصرف کودهای نیتروژنی اثرات منفی زیست‌محیطی بر کیفیت آب‌های زیرزمینی و سطحی دارد (Voltr et al., 2021). همچنین هو و همکاران Hu (et al., 2021) در یک پژوهش انجام‌شده در نیوزیلند گزارش کردند تراکم خاک ناشی از عبور و مرور ماشین-آلات باعث افزایش انتشار N_2O به میزان ۱۹ الی ۱۳۰۰٪ می‌شود.طبق گزارش گائو و همکاران (Gao et al., 2024) که اثر متقابل فشردگی و فرسایش خاک بر انتشار گاز CO_2 را مورد مطالعه قراردادند، در محل فرسایش، فشردگی بالا (HP) در مقایسه با حالت بدون فشردگی (LP)، انتشار CO_2 را به ترتیب ۲۹/۴ و ۳۶/۷ درصد در دمای ۱۵ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد افزایش داد. برعکس، در محل رسوب، HP انتشار CO_2 را به ترتیب ۲۷/۸ و ۳۱/۳ درصد در مقایسه با NP در دماهای مشابه کاهش داد. LP اثر قابل‌توجهی بر انتشار CO_2 در سایت‌های فرسایشی و رسوبی نداشت (Gao et al., 2024). این مشاهدات با یافته‌های وانگ و همکاران (Wang et al., 2014) مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش‌های به انجام رسیده نشان داد که سامانه‌های مختلف خاک‌ورزی، بر میزان فشردگی خاک، عملکرد محصولات مختلف زراعی و همچنین ارزش اقتصادی زمین اثرات مستقیمی دارند. افزایش هزینه‌های تولید ناشی از فشردگی خاک متأثر از ویژگی‌های فیزیکی و کیفی خاک و اقلیم متغیر بوده و اثرات منفی آن بر کاهش عملکرد به‌طور میانگین به میزان ۲۲ درصد برآورد شده است. نتایج تحقیقات بیانگر این واقعیت است که فشردگی خاک ناشی از خاکورزی نامناسب، هزینه‌های تولید را در محدوده ۲۲۱–۱۷ یورو بر هکتار در سال افزایش می‌دهد. این، تحت شرایطی است که هزینه تولید به ازای هر تن محصول در سامانه کم‌خاکورزی حدود ۱۴–۱ درصد برای محصولات مختلف کاهش می‌یابد. مدیریت پایدار خاک شامل به حداقل رساندن تراکم خاک با استفاده از ماشین‌های با وزن کم و لاستیک‌هایی با سطح تماس بالا، افزایش مواد آلی خاک و به حداقل رساندن عملیات خاک‌ورزی در مکش ماتریک مناسب خاک، به بهبود کیفیت خاک منجر می‌گردد. در ایران پژوهشی در خصوص تأثیر افزایش فشردگی خاک بر ارزش اقتصادی زمین صورت نگرفته است. بنابراین، پیشنهاد می‌شود روابط کمی بین فشردگی خاک ناشی از بکارگیری ادوات مختلف کشاورزی در شرایط اقلیمی و بافت‌های مختلف خاک صورت گرفنه و مناسب‌ترین سامانه خاک‌ورزی برای مناطق مختلف معرفی شود.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافعی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

References

1. Alakukku, L., 2000. Response of annual crops to subsoil compaction in a field experiment on clay soil lasting 17 years. *Advances in Geoecology. 32*, pp.205–208.
2. Bhatta, P., Girib, P.R. and Naparic, B., 2024. Soil compaction and its impact on soil properties, microbiome, greenhouse gas emission and root growth. *Big Data in Agriculture (BDA) 6(1).* pp. 66-69. **http://doi.org/10.26480/bda.01.2024.66.69.**
3. Biberdzic, M., Barac, S., Lalevic, D., Djikic, A., Prodanovic, D., and Rajicic, V., 2019. Influence of soil tillage system on soil compaction and winter wheat yield. *Chilean Journal of Agriculture Research, 80*. pp. 80–89.
4. Bicki, T.J., and Siemens, J.C., 1990. Crop response to wheel compaction. In Proc. ASAE Summer Meeting, Columbus. OH, pp. 24-27.

5. Botta, G.F., Tolon-Becerra, A., Lastra-Bravo, X., and Tourn, M., 2010. Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max L.*) yields in Argentinean pampas. *Soil and Tillage Research, 110 (1),* pp. 167–174.
6. Butorac, A., 1982. Response of summer oats (*Avena sativa L.*) and winter rye (*Secale cereale L.*) in model experiments to soil compaction and fertility. *Poljopr. Znan. Smotra. 59*, pp. 225-232.
7. Cannell, R.Q. 1977. Soil aeration and compaction in relation to root growth and soil management. *Applied Biology, 2*, pp. 1–86.
8. Carr, M. K. V., and Dodds, S. M., 1983. Some effects of soil compaction on root growth and water use of lettuce. *Experimental. Agricukture, 19*, pp. 117-130.
9. Copec, K., Filipovic, D., Husnjak, S., Kovacev, I., and Kosutic, S., 2015. Effects of tillage systems on soil water content and yield in maize and winter wheat production. *Plant, Soil and Environment, 61(5),* pp.213-219.
10. Croissant, R.L., Schwartz, H.F. and Ayers. P.D., 1988. Soil compaction losses in pinto beans. *Annual Report of the Bean Improvement Cooperative. 31*, pp.58-61. Colorado State University, Fort Collins, CO.
11. Dai, X., Li, Y., Ouyang, Z., Wang, H., and Wilson, G.V., 2013. Organic manure as an alternative to crop residues for no-tillage wheat-maize systems in North China Plain. *Field Crops Research. 149(1),* pp. 141-148. **https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.04.027.**
12. Drewry, J.J., Littlejohn, R.P., Paton, R.J., Singleton, P.L., Monaghan, R.M., and Smith, L.C., 2004. Dairy pasture responses to soil physical properties. *Australian Journal of Soil Research, 42*, pp. 99–105. **https://doi.org/10.1071/SR03055**
13. Flocker, W.J., and Nielsen, D.R., 1962. The absorption of nutrient elements by tomatoes associated with levels of bulk density. *Soil Science Society of America Journal 26*, pp.183-186. **https://doi.org/10.2136/sssaj1962.03615995002600020025x.**
14. Frene, J.P., Pandey, B.K. and Castrillo, G., 2024. Under pressure: elucidating soil compaction and its effect on soil functions. *Plant and Soil*, pp.1-12.
15. Gliñski, J. and Lipiec, J., 1990. Soil Physical Conditions and Plant Roots. *CRC Press, Boca Raton, FL, U.S.A.*
16. Galambošová, J., Macák, M., Rataj, V., Antille, D.L., Godwin, R.J., Chamen, W.C.T., and Chlpík, J., 2017. Field evaluation of controlled traffic farming in Central Europe using commercially available machinery. *Transactions of the ASABE. 60(3),* pp.657–669. **https://doi: 10.13031/trans.11833**
17. Gao, H., Song, X., Wu, X., Zhang, N., Liang, T., Wang, Z., Yu, X., Duan, C., Han, Z. and Li, S., 2024. Interactive effects of soil erosion and mechanical compaction on soil DOC dynamics and CO2 emissions in sloping arable land. *Catena*, *238*, p.107906.
18. Gregorich, E.G., Lapen, D.R., Ma, B.L., McLaughlin, N.B., and Vanden Bygaart, A.J., 2011. Soil and crop response to varying levels of compaction, nitrogen fertilization, and clay content. *Soil Science Society of America Journal. 75(4),* pp. 1483–1492. **https://doi.org/10.2136/sssaj2010.0395**
19. Godwin, R.J., Misiewicz, P.A., Smith, E.K., Millington, W.A.J., White, D.R., Dickin, E.T., and Chaney, K., 2017. Summary of the effects of three tillage and three traffic systems on cereal yields over a four-year rotation. *Aspects of Applied Biology. 134*, pp. 233–241. **https://doi:10.13031/aim.201701652.**
20. Hakanson, I., 2005. Machinery-induced compaction of arable soils: Incidence–consequences–counter measures. In *Reports from the Division of Soil Management*; Swedish University of Agricultural Sciences: Uppsala, Sweden; no 109.
21. Hakansson, I., Voorhees, W.B. and Riley, H., 1988. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. . *Soil and Tillage Research. 11*, pp. 239-282. **https://doi.org/10.1016/0167-1987(88)90003-7.**
22. Hebblethwaite, P.D., and McGowan, M., 1980. The effects of soil compaction on the emergence, growth and yield of sugar beet and peas. *Journal of the science of food and agriculture. 31*, pp.1131-1141. **https://doi.org/10.1002/jsfa.2740311103.**

23. Hu, W., Drewry, J., Beare, M., Eger, A. and Müller, K., 2021. Compaction induced soil structural degradation affects productivity and environmental outcomes: A review and New Zealand case study. *Geoderma*, *395*, p.115035.
24. Iler, G.S. and Stevenson, C.K., 1991. The effect of soil compaction on the production of processing vegetables and field crops- A review. Ridge Town College of Agricultural Technology, soils section, Ridge town, Ontario, Canada**.** **http://hdl.handle.net/10214/14039**
25. Jamali, H.; Nachimuthu, G., Palmer, B.; Hodgson, D., Hundt, A. Nunn, C., and Braunack, M., 2021. Soil compaction in a new light: Know the cost of doing nothing—a cotton case study. *Soil and Tillage Research*, *213*, pp. 105-158. **https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105158**.
26. Katoch, K.K., Aggarwal, G.C., and Garg, F.C., 1983. Effect of nitrogen, soil compaction and moisture stress on nodulation and yield of soybean. Journal of. *Indian Society Soil Science*, *31*, pp. 215-225.
27. Kayombo, B., and Lal, R., 1994. Responses of tropical crops to soil compaction. , pp.287–316. In BD Soane and C van Ouwerkerk (eds). Soil compaction in crop production. Elsevier Science Publishers B.V.: Amsterdam, Netherlands. **https://doi.org/10.1016/B978-0-444-88286-8.50021-0.**
28. Kik, M.C., Claassen, G.D.H., Ros, G.H., Meuwissen, M.P.M., Smit, A.B. and Saatkamp, H.W., 2024. FARManalytics–A bio-economic model to optimize the economic value of sustainable soil management on arable farms. *European Journal of Agronomy*, *157*, p.127192.
29. Lepore, E., Schmidt, O., Fenton, O., Tracy, S., Bondi, G. and Wall, D.P., 2024. Traffic induced compaction and physical quality of grassland soil under different soil moisture deficits. *Soil and Tillage Research*, *244*, p.106205.
30. Lindemann, W.C., Ham, G.E. and Randall G.W., 1982. Soil compaction effects on soybean nodulation, N_2 (C_2H_4) fixation and seed yield. *Agronomy. Journal, 74*, pp.307- 311. **https://doi.org/10.2134/agronj1982.00021962007400020012x.**
31. Lipiek, J., Medvedev, V.V., Birkas, M., Dumitru, E. Lyndina, T.E., Rousseva, S. and Fulajtár, E., 2003. Effect of soil compaction on root growth and crop yield in Central and Eastern Europe. *International Agrophysics, 17*, pp. 61–69.
32. Mielke, L.N., and Jones, A.J., 1990. Effect of soil compaction and subsoiling on corn and soybean yield. *Agron. Abstr.* 321.
33. Mileusnić, Z.I., Saljnikov, E., Radojević, R.L. and Petrović, D.V., 2022. Soil compaction due to agricultural machinery impact. *Journal of Terramechanics*, *100*, pp.51-60.
34. Mirzavand, J. and Moradi-Talebbeigi, R., 2020. Relationships between field management, soil compaction, and crop productivity. *Archieves of Agronomy and Soil Science. 67(5)*, pp.675–686. **https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1749267**
35. Parvin, N., Coucheney, E., Gren, M., Andersson, H., Elofsson, K., Jarvis, N. and Keller, T., 2022. On the relationships between the sizes of agricultural machinery, soil quality and net revenues for farmers and society. *Soil Security*, *6*, p.100044.
36. Piccoli, I., Seehusen, T., Bussell, J., Vizitu, O., Calciu, I., Berti, A., Börjesson, G., Kirchmann, H., Kätterer, T., Sartori, F. and Stoate, C., 2022. Opportunities for mitigating soil compaction in Europe—Case studies from the soil care project using soil-improving cropping systems. *Land*, *11*(2), p.223. **https://doi.org/10.3390/land110202**.**23**
37. Raghavan, G.S.V., McKyes, E., and Beaulieu, B., 1978. Clay soil compaction due to wheel slip. Transactions of the American. Society of Agricultural Engineers. 21: 646-649. **https:/doi: 10.13031/2013.35359.**
38. Rátonyi, T., Huzsvai, L., Nagy, J., and Megyes, A., 2005. Evaluation of soil tillage systems in maize production. *Acta Agronomica Hungarica, 53*, pp.53-57. **https://doi.org/10.1556/AAgr.53.2005.1.7**
39. Reeder, R., 1990. Soil compaction update: Preparing for the 1990's. The Ohio State University, Cooperative Extension Service, Columbus, OH.

40. Ruis, S.J., Stepanovic, S. and Blanco-Canqui, H., 2023. Intensifying a crop–fallow system: impacts on soil properties, crop yields, and economics. *Renewable Agriculture and Food Systems*, *38*, p.e42.
41. Shaheb, M.R., 2020. A study on the effect of tire inflation pressure on soil properties, growth and yield of maize and soybean in Central Illinois. *Ph.D. thesis. Harper Adams University, Newport, Shropshire, United Kingdom***.** **https://hau.repository.guildhe.ac.uk/id/eprint/17769**
42. Shaheb, M.R., Misiewicz, P.A., Godwin, R.J., Dickin, E., White, D.R., Lowenberg-DeBoer, J., Shearer, S.A. and Grift, T.E., 2023. An economic appraisal of the effect of tire inflation pressure for alternative tillage systems on a silty clay loam soil. *Agronomy Journal*, *115*(6), pp.3144-3161.
43. Shaheb, M.R.; Venkatesh, R., and Shearer, S.A.A., 2021. Review on the Effect of Soil Compaction and its Management for Sustainable Crop Production. *Journal of. Biosystems Engineering, 46*, pp. 417–439. **https://doi.org/10.1007/s42853-021-00117-7.**
44. Shahzad, M., Farooq, M., Jabran, K., Yasir, T.A., and Hussain, M., 2016. Influence of various tillage practices on soil physical properties and wheat performance in different wheat-based cropping systems. *International Journal of Agriculture and Biology. 18*, pp. 821-829. **https://doi: 10.17957/IJAB/15.0178**.
45. Smith, E.K., Misiewicz, P.A., Girardello, V., Arslan, S., Chaney, K., White, D.R., and Godwin, R.J., 2014. Effects of traffic and tillage on crop yield (winter wheat *Triticum aestivum*) and the physical properties of a sandy loam soil. In *ASABE and CSBE/SCGAB Annual International Meeting, Montreal, Canada, July* 13–16, 141912652, 1–14. St. Joseph, MI. **https://doi: 10.13031/aim.20141912652**.
46. Smittle, D.A., and Williamson, R.E., 1977. Effect of soil compaction on nitrogen and water use efficiency, root growth, yield and fruit shape of pickling cucumbers. *Journal of American Society Horticultural Science, 102*, pp. 822-825.
47. Soane, G.C., Godwin, R.J., and Spoor, G. 1986. Influence of deep loosening techniques and subsequent wheel traffic on soil structure. *Soil and Tillage Research, 8,* pp.231-237. **https://doi.org/10.1016/0167-1987(86)90336-3**
48. Stirzaker, R.J., Passioura, J.B., and Wilms, Y., 1996. Soil structure and plant growth: impact of bulk density and biopores. *Plant and Soil. 185*, 151–162. **https://doi.org/10.1007/BF02257571.**
49. Stranks, S.N., 2006. The effects of tyre systems on the depth and severity of compaction. MSc. *Thesis, Cranfield University, Cranfield, Bedford, United Kingdom*. **http://hdl.handle.net/1826/1215**
50. Tietjens, F., Schröer, D. and Latacz-Lohmann, U., 2024. Farmers' preferences for the design of a slurry hosing support scheme to combat soil compaction: Insights from a discrete choice experiment in Germany. *Agricultural Systems*, *219*, p.104030.
51. Trouse, A.C., Jr., 1979. Effect of soil bulk density on root elongation. *Zeszyty Problemowe Postepow Nauk Rolniczych, 220*, pp. 349-359.
52. Voltr, V., Wollnerová, J., Fuksa, P., and Hruška, M., 2021. Influence of Tillage on the Production Inputs, Outputs, Soil Compaction and GHG Emissions. *Agriculture, 11*, pp. 456. **https://doi.org/10.3390/agriculture11050456.**
53. Voorhees, W.B., 1983. Relative effectiveness of tillvage and natural forces in alleviating wheel-induced soil compaction. *Soil Science Society of America. Journal, 47*, pp. 129-133. **https://doi.org/10.2136/sssaj1983.03615995004700010026x.**
54. Wang, X., Cammeraat, E.L., Cerli, C. and Kalbitz, K., 2014. Soil aggregation and the stabilization of organic carbon as affected by erosion and deposition. *Soil Biology and Biochemistry*, *72*, pp.55-65.
55. Wittsell, L.E., and Hobbs, J.A. 1965. Soil compaction effects on field plant growth. *Agronomy. Journal, 57*, pp.534-54. **https://doi.org/10.2134/agronj1965.00021962005700060005x.**
56. Wolkowski, R., and Lowery, B., 2008. Soil compaction: Causes, concerns, and cures (A3367).Madison, WI: University of Wisconsin Cooperative Extension.

57. Zabrodskyi, A., Šarauskis, E., Kukharets, S., Juostas, A., Vasiliauskas, G., Andriušis, A., 2021. Analysis of the Impact of Soil Compaction on the Environment and Agricultural Economic Losses in Lithuania and Ukraine. *Sustainability. 13*, pp. 7762.