19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025

نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۲۵ تا ۲۷ شهریور 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

روش توموگرافی (CT-Scan): روشی نوین جهت بصری‌سازی سه بعدی و کمی‌سازی ساختمان خاک

مجتبی شیرازی[۱]، عطاالله خادم الرسول[۲*]، Lars Juhl Munkholm[۳]

۱- دانشجوی دکترای گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران
۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران
*نویسنده مسئول (ataalahsoil@gmail.com)
۳- استاد گروه اگرواکولوژی، دانشگاه آرهوس، دانمارک

چکیده

تراکم خاک ناشی از تردد ماشین‌آلات سنگین برداشت یکی از چالش‌های مهم در مدیریت پایدار خاک‌های کشاورزی است. هدف این پژوهش، ارزیابی بصری و کمی‌سازی ساختمان خاک تحت تأثیر تراکم با استفاده از توموگرافی اشعه ایکس (X-Ray CT) و نرم‌افزار ImageJ/Fiji بود. مطالعه در یک مزرعه ۲۵ هکتاری از شرکت کشت و صنعت نیشکر دعبل خزاعی انجام شد. نمونه‌برداری خاک در سه تیمار قبل از برداشت (BH)، بعد از برداشت با ۷۵٪ ظرفیت سبد حمل (AH-75%) و ۱۰۰٪ ظرفیت سبد حمل (AH-100%) از عمق ۰-۲۵ سانتی‌متر صورت گرفت. نتایج نشان داد که تراکم ناشی از عبور ماشین‌آلات باعث افزایش تعداد منافذ و کاهش میانگین اندازه و محیط شده است که در نهایت منجر به کاهش تخلخل کل و مؤثر خاک گردید. با وجود وزن بالاتر ماشین‌آلات در تیمار AH-100%، بیشترین شدت تخریب ساختاری در AH-75% مشاهده شد، که ناشی از رطوبت بالاتر خاک در زمان برداشت بود. کاربرد روش‌های نوین مانند توموگرافی اشعه ایکس امکان ارزیابی بصری و عددی دقیق تغییرات ساختار خاک را فراهم می‌کند و به‌عنوان ابزاری کارآمد برای پایش و مدیریت پایدار خاک در سامانه‌های کشاورزی، به‌ویژه کشت نیشکر، قابل استفاده است.

واژگان کلیدی: ساختمان خاک، تراکم خاک، توموگرافی خاک، ارزیابی عددی.

مقدمه

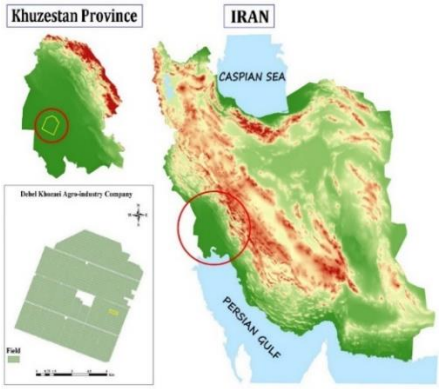
ساختمان خاک به آرایش فضایی ذرات خاک و فضاهای منافذ مرتبط با آن اشاره دارد و یک ویژگی فیزیکی کلیدی است که عملکردهای اساسی خاک، از جمله حفظ و حرکت آب، هوادهی، نفوذ ریشه و فراهم کردن زیستگاه برای موجودات زنده خاک را کنترل می‌کند (Wiermann et al., 2025; Umarov et al., 2024). ساختمان خاک ممکن است در اثر برخی فعالیت‌های کشاورزی دستخوش تغییر یا تخریب قرار بگیرد. یکی از این آن‌ها، تراکم خاک است. یکی از علل اصلی تراکم خاک در سیستم‌های کشاورزی تردد ماشین‌آلات سنگین در رطوبت‌های نامناسب (غیربهینه) می‌باشد (Zanutel et al., 2024) که بیشترین نقطه اثر گذاری آن، در لایه های سطحی خاک است که علاوه بر فشردگی خاک سطحی، منجر به فشردگی لایه‌های خاک زیرین نیز می‌شود (Liebhars et al., 2025). اصلاح تراکم یا فشردگی لایه‌های خاک زیرین به طور قابل توجهی دشوارتر و پرهزینه‌تر از لایه‌های سطحی است (Majdoubi et al., 2024; Nawaz et al., 2023). از آنجایی که بازیابی خواص فیزیکی خاک پس از فشردگی، به ویژه در لایه‌های عمیق‌تر، بسیار چالش برانگیز است و اغلب به طور کامل امکان‌پذیر نیست، بنابراین پیشگیری بسیار مهم‌تر از اصلاح است. در ابتدا، برای اینکه بتوان یک برنامه ریزی مناسب در جهت کنترل و کاهش خسارت‌های ناشی از تراکم خاک انجام داد، ضروری است یک ارزیابی از وضعیت خاک صورت بپذیرد. با توجه به اینکه روش‌های رایج آزمایشگاهی به اصطلاح مخرب و هجومی در نظر گرفته می‌شوند و از طرفی، ساختمان خاک را هنگام نمونه برداری دستخوش تغییر قرار می‌دهد. به همین منظور می‌توان از روش توموگرافی استفاده نمود (Seifu et al., 2023). روش توموگرافی پرتوی ایکس (X-ray CT[1]) به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین فناوری‌های نوین در علوم خاک، روشی غیرمخرب و غیرهجومی[2] است که امکان بررسی سه‌بعدی و دقیق ساختار داخلی خاک را بدون ایجاد تغییر در نمونه و به‌صورت دست‌نخورده فراهم می‌کند. این تکنیک علاوه بر فراهم کردن ارزیابی بصری سه بعدی[3] از ساختار خاک، قادر است اطلاعات عددی دقیقی از ویژگی‌های ریزساختاری مانند اندازه، شکل، توزیع و پیوستگی منافذ استخراج نماید و برخلاف روش‌های سنتی که داده‌هایی محدود و نقطه‌ای ارائه می‌دهند، امکان کمی‌سازی[4] مستقیم شبکه حفرات و تغییرات ساختاری را در مقیاس سه‌بعدی فراهم می‌کند (Ghosh et al., 2023; Pessoa et al., 2023). بدین ترتیب پژوهشگر می‌تواند ارتباط میان ساختمان خاک و عملکردهای کلیدی آن مانند نفوذ و نگهداری آب و املاح،خصوصیات هیدرولیکی خاک، تهویه، انتقال گازها، رشد ریشه و فعالیت‌های میکروبی را با دقت بیشتری مورد بررسی قرار دهد. روش توموگرافی همچنین امکان تحلیل اثر مدیریت‌های مختلف کشاورزی و کاربرد بهبود دهنده‌ها را فراهم می‌آورد؛ مطالعات نشان داده‌اند که پوشش‌های گیاهی، کودهای دامی و معدنی و سایر روش‌های مدیریت خاک می‌توانند تخلخل و تعداد منافذ خاک را افزایش دهند، داده‌هایی که از

[1] X-Ray Computed Tomography
[2] Non-Distractive
[3] 3D Visualization
[4] Quantification

تصاویر با وضوح بالا و تحلیل میکرو سی تی اسکن مستند شده‌اند (Kaur et al., 2024; Valverde and Wijewickreme., 2024). از دیگر مزایای کلیدی این روش، غیرمخرب بودن و قابلیت پایش تغییرات ساختاری خاک در طول زمان (4D) است، که امکان مطالعات طولی و بررسی فرآیندهای فیزیکی و زیستی خاک را فراهم می‌کند. به‌طور کلی، استفاده از روش توموگرافی پرتو ایکس ابزاری قدرتمند برای پر کردن شکاف‌های دانشی در شناخت رفتار و کارکرد خاک محسوب می‌شود و با ارائه داده‌های دقیق و حجمی، زمینه‌ساز توسعه رویکردهای نوین مدیریتی و پژوهشی در حوزه علوم خاک و مهندسی محیط زیست می‌گردد (Fang et al., 2024).

مواد و روش‌ها

مطالعه حاضر در مزارع کشاورزی شرکت کشت و صنعت دعبل خزاعی (31°04'38.1"N 48°30'27.3"E) صورت پذیرفت که برای این مطالعه یک مزرعه ۲۵ هکتاری انتخاب و عملیات نمونه برداری بصورت حفر پروفیل انجام شد. این منطقه دارای آب و هوای خشک با رژیم رطوبتی خشک، رژیم دمایی فوق‌گرم و غالباً خاک‌های آریدی‌سول و اینسپتی‌سول است (عبدلی و جعفری، ۱۳۹۷) (شکل ۱). نمونه‌برداری خاک در دو بازه زمانی مختلف قبل و بعد از عملیات برداشت محصول نیشکر در محل فارو[5] (یعنی محل تردد ماشین آلات: هاروستر، تراکتورو سبد حمل نیشکر) در فصل برداشت در ۳ تیمار: تیمار اول: قبل از برداشت (BH)، تیمار دوم: بعد از برداشت با ۷۵ درصد ظرفیت حمل سبد نیشکر (AH-75%) و تیمار سوم: بعد از برداشت با ۱۰۰ درصد ظرفیت حمل سبد نیشکر (AH-100%) در شرایط طبیعی مزرعه انجام شد. در ادامه، نمونه‌ها توسط دستگاه TESCAN CoreTOM CT با رزولوشن ۶۰ میکرون اسکن و با استفاده از نرم افزار Image J/Fiji v1.54p مورد پردازش قرار گرفتند، همچنین آنالیز آماری با استفاده از نرم افزار R (نسخه x.۴) انجام شد.

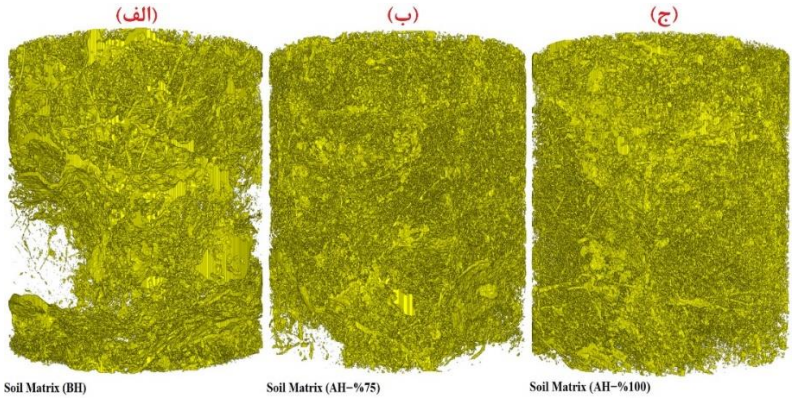


شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطعه مطالعاتی

نتایج و بحث

[5] Farrow

در پردازش تصاویر حاصل از اسکن نمونه‌ها، اطلاعات عددی متعددی استخراج گردید که یک بخش از آن مربوط به خصوصیات مورفولوژیکی منافذ همچون: تعداد منافذ (خلل و فرج)، میانگین اندازه منافذ، محیط منافذ و در نهایت تخلخل خاک در سه تیمار مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. شکل ۲ تاثیر تراکم ناشی از تردد ماشین آلات سنگین کشاورزی را برروی ماتریکس خاک بخوبی نشان می‌دهد که سبب بسته شدن منافذ و کوچک شدن منافذ در خاک و در نهایت کاهش تخلخل خاک شده است.



شکل ۲- بصری سازی ۳ بعدی ماتریکی خاک (الف: قبل از برداشت، ب: بعد از برداشت با ۷۵ درصد از ظرفیت سبد حمل، ج: بعد از برداشت با ۱۰۰ درصد ظرفیت سبد حمل)

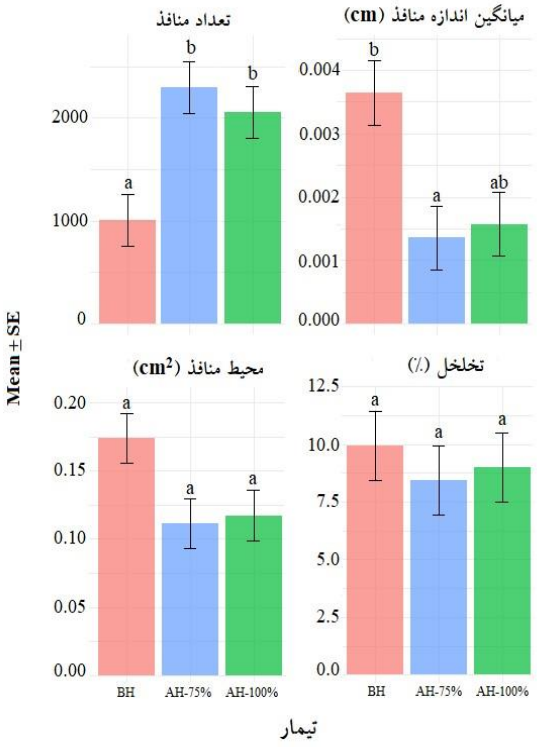
جدول ۱ مقادیر رطوبت خاک و وزن مخصوص ظاهری را در هنگام نمونه برداری خاک نشان می‌دهد. برای تیمار BH مقدار رطوبت خاک و وزن مخصوص ظاهری قبل از شروع عملیات برداشت به ترتیب برابر با % ۱۵/۵ و g/cm^3 ۱/۴، بعد از شروع برداشت برای تیمارهای AH-75% به ترتیب برابر با % ۱۴/۴ و g/cm^3 ۱/۶ و تیمار AH-100% به ترتیب برابر با % ۹/۱ و g/cm^3 ۱/۳ بوده است. این اندازه‌گیری‌های اولیه مبنایی برای درک واکنش خصوصیات فیزیکی خاک نسبت به شدت‌های مختلف تردد ماشین‌آلات در شرایط رطوبتی مختلف را فراهم می‌سازند و زمینه را برای تحلیل‌های بیشتر در خصوص ویژگی‌های تخلخل و تغییرات ساختاری آماده می‌کنند.

جدول ۱- مقادیر رطوبت خاک و وزن مخصوص ظاهری برای تیمارهای مختلف

تیمار	رطوبت خاک (٪)	وزن مخصوص ظاهری خاک (g/cm^3)
BH	۱۵/۵	۱/۴
AH-75%	۱۴/۴	۱/۶
AH-100%	۹/۱	۱/۳

بررسی نتایج مربوط به تغییرات شاخص‌های ساختاری خاک تحت اثر ترافیک ماشین‌آلات برداشت در جدول ۲ نشان داد که تعداد منافذ خاک، به‌عنوان یک شاخص کلیدی در تبیین وضعیت فیزیکی و کیفیت ساختاری خاک، به‌طور معناداری تحت تأثیر تراکم قرار گرفت. در تیمار قبل از برداشت (BH) میانگین تعداد منافذ برابر با ۱۰۳۳ منفذ در هر تصویر مقطعی بود. این مقدار در تیمارهای بعد از برداشت به‌طور چشمگیری افزایش یافته و به ۲۲۹۹ منفذ در AH-75% و ۲۰۵۷ منفذ در AH-100% رسید (جدول ۲).

نتایج نشان داد تراکم ناشی از تردد ماشین‌آلات کشاورزی تأثیر معنی‌داری بر ساختار خاک دارد. تخلخل خاک به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر عمق و شدت تراکم بود ($p<0.05$). در لایه سطحی (۰ تا ۱/۲ سانتی‌متر) تیمار BH بیشترین تخلخل را داشت، در حالی‌که در تیمارهای AH-75% و AH-100% تخلخل به‌طور معنی‌داری کاهش یافت و با افزایش عمق، اختلاف بین تیمارها کاهش یافته است. از میان ویژگی‌های ساختاری، تعداد و اندازه ذرات بیشترین حساسیت را به تراکم نشان دادند. در تیمار BH، تعداد ذرات کمتر و درشت‌تر بودند، اما در AH-75% و AH-100% تعداد ذرات افزایش و اندازه آن‌ها کاهش یافت که بیانگر فشردگی خاک در اثر تراکم است (۳).



شکل ۳: آنالیز آماری تأثیر تیمارها بر فشردگی پارامترها

افزایش تعداد منافذ در تیمارهای متراکم، برخلاف انتظار اولیه مبنی بر کاهش منافذ، ناشی از خردشدگی خاک‌دانه‌ها و فروپاشی ساختار ماکروپورها به ریزمنافذ متعدد است. این پدیده در واقع بیانگر تغییر کیفی در شبکه تخلخل خاک می‌باشد، به‌گونه‌ای که افزایش کمی منافذ با کاهش چشمگیر کیفیت و کارکرد هیدرولیکی و هوادهی همراه است (شکل ۴ الف). نکته قابل توجه آن است که اگرچه در تیمار AH-100% وزن ماشین‌آلات و فشار وارده بیشتر بوده است، اما میزان تغییرات ساختاری خاک کمتر از تیمار AH-75% مشاهده شد. علت اصلی این موضوع به رطوبت بیشتر خاک در تیمار AH-75% بازمی‌گردد (جدول ۱). در شرایط رطوبت بالاتر، مقاومت مکانیکی خاک کاهش یافته و حساسیت آن به تراکم افزایش می‌یابد،

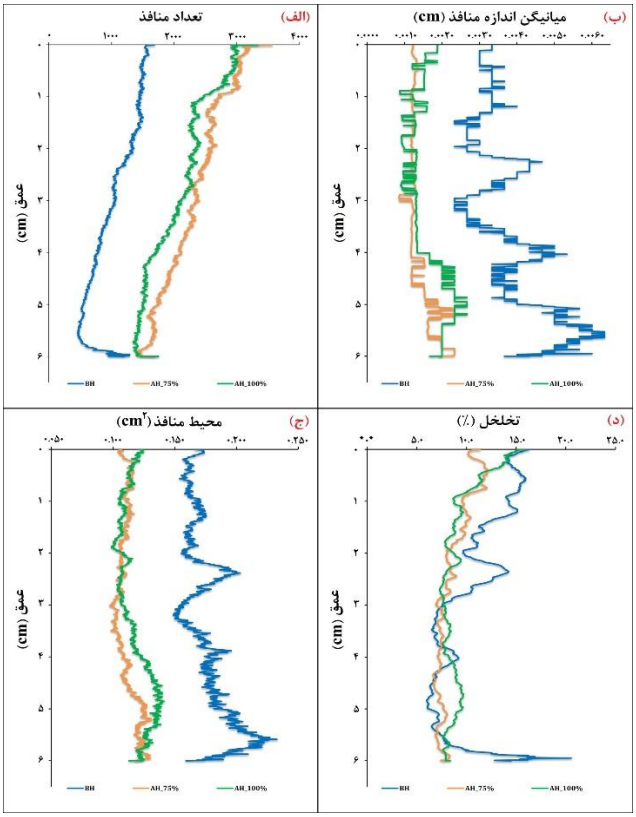
در نتیجه با وجود فشار کمتر، تخریب ساختاری بیشتری رخ داده است. این یافته اهمیت نقش همزمان رطوبت و فشار مکانیکی در فرآیند تراکم خاک را به‌خوبی نشان می‌دهد.

جدول ۲: پارامترهای مورفولوژیکی کمی سازی شده از ساختمان خاک

پارامتر	تیمار	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	میانه	Q1	Q3	IQR
تعداد منافذ	BH	۴۵۷	۱۶۸۲	۱۰۳۳	۳۵۸/۹۲	۱۰۳۸	۷۱۱/۶۷	۱۴۲۵/۸	۷۱۴/۰۸
	AH-75%	۱۴۱۹	۳۵۵۹	۲۲۹۹	۴۶۴/۵۴	۲۳۲۰	۱۹۰۵/۹	۲۵۹۹/۷	۶۹۳/۷۵
	AH-100%	۱۳۴۴	۳۳۳۷	۲۰۵۷	۴۹۴/۰۱	۲۱۱۰	۱۵۴۳/۷	۲۳۳۴/۹	۷۹۱/۲۵
میانگین اندازه منافذ (cm)	BH	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۶۳	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۱۳
	AH-75%	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۰۳
	AH-100%	۰/۰۰۹	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۰۷
محیط منافذ (cm^2)	BH	۰/۱۴۹	۰/۲۳۳	۰/۱۷۵	۰/۰۱۶۴	۰/۱۷۱۸	۰/۱۶۲۰	۰/۱۸۳۳	۰/۰۲۱۳
	AH-75%	۰/۰۹۷	۰/۱۳۱	۰/۱۱۱	۰/۰۰۷۳	۰/۱۱۰۳	۰/۱۰۶۰	۰/۱۱۵۳	۰/۰۰۹۳
	AH-100%	۰/۰۹۹	۰/۱۱۷	۰/۱۱۷	۰/۰۱۱۰	۰/۱۱۵۰	۰/۱۰۷۳	۰/۱۲۶۹	۰/۰۱۹۶
تخلخل (٪)	BH	۶/۰	۲۰/۵	۱۰/۲	۳/۳۲۲۰	۹/۶۶۹۴	۷/۰۴۷۵	۱۳/۸۳۰۳	۶/۷۸۲۸
	AH-75%	۶/۶	۱۲/۱	۸/۴	۱/۵۲۳۲	۷/۹۰۷۳	۷/۲۸۴۶	۹/۶۳۰۷	۲/۳۴۶۱
	AH-100%	۷/۳	۱۵/۹	۹/۰	۱/۶۲۸۸	۸/۶۸۶۶	۷/۹۰۱۵	۹/۳۹۷۱	۱/۴۹۵۶

میانگین اندازه منافذ در اثر تراکم نیز تغییرات محسوسی داشته است. میانگین اندازه منافذ از ۰/۰۰۳۷ سانتی‌متر در تیمار BH به ۰/۰۰۱۴ سانتی‌متر برای تیمار AH-75% و ۰/۰۰۱۶ سانتی‌متر برای تیمار AH-100% کاهش یافت (جدول ۲). این کاهش بیانگر آن است که منافذ بزرگ‌تر و مؤثر در اثر فشار مکانیکی تخریب شده و به منافذ کوچک‌تر تقسیم شده‌اند. نتیجه چنین فرآیندی، کاهش تخلخل مؤثر و در نتیجه کاهش ظرفیت نفوذ آب و انتقال هوا در خاک است (شکل ۴ ب). تغییرات در محیط منافذ نیز گویای همین روند می‌باشد. مقدار متوسط محیط منافذ از ۰/۱۷۵ سانتی‌مترمربع در BH به حدود ۰/۱۱۷ – ۰/۱۱۱ سانتی‌مترمربع در تیمارهای AH-75% و AH-100% کاهش یافت (جدول ۲). این موضوع نشان می‌دهد که ابعاد کلی منافذ کوچک‌تر شده و سطح تماس مؤثر آن‌ها نیز محدود گردیده است. به‌عبارت دیگر، فشار مکانیکی علاوه بر کاهش اندازه منافذ، هندسه و شکل آن‌ها را نیز تحت تأثیر قرار داده است (شکل ۴ ج). درنهایت تراکم ناشی از تردد ادوات سبب کاهش معنادار تراکم خاک شده است. توزیع عمقی تخلخل از مقدار ۱۰/۲ درصد درتیمار BH به حدود ۸/۴ درصد برای تیمار AH-75% و ۹/۰ درصد برای تیمار AH-100% کاهش یافت (جدول ۲) که روند کاهشی بودن تخلخل بصورت محسوس در شکل ۴ د، نشان داده شده است. بر اساس نتایج این پژوهش، تراکم ناشی از تردد ماشین‌آلات برداشت موجب فروپاشی ساختمان خاک، افزایش تعداد منافذ کوچک‌تر، کاهش میانگین اندازه و محیط منافذ، و در نهایت افت تخلخل کل و مؤثر خاک گردید. این تغییرات نشان داد که حساسیت خاک در شرایط رطوبتی بالاتر، همانند تیمار AH-75%، بیشتر بوده و شدت تخریب ساختاری در چنین شرایطی حتی بیش از تیمار AH-100% با وزن بالاتر ماشین‌آلات است. به بیان دیگر، اثرات تراکم خاک تنها به فشار مکانیکی وابسته نبوده و شرایط رطوبتی نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان تغییرات ساختاری ایفا می‌کند. در مجموع، این نتایج

اهمیت مدیریت زمان عملیات برداشت و توجه به وضعیت رطوبتی خاک را آشکار ساخته و نشان می‌دهد که رعایت این ملاحظات می‌تواند از تخریب شدید شبکه تخلخل خاک جلوگیری کرده و پایداری بلندمدت خاک در اراضی کشاورزی را تضمین نماید.



شکل ۴: مقایسه تغییرات پارامترها در عمق (الف: تعداد منافذ / ب: میانگین اندازه منافذ / ج: محیط منافذ / د: تخلخل)

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که استفاده از روش‌های نوین و غیرمخرب مانند توموگرافی اشعه ایکس ابزاری کارآمد برای کمی‌سازی دقیق ویژگی‌های ساختاری خاک، به‌ویژه در ارزیابی اثر تراکم ناشی از ترافیک ماشین‌آلات کشاورزی، محسوب می‌شود. این روش امکان بررسی سه‌بعدی و با وضوح بالا از شبکه منافذ خاک، شامل تعداد، اندازه، توزیع و پیوستگی آن‌ها را فراهم کرده و درک عمیق‌تری از فرآیندهای فیزیکی حاکم بر انتقال آب، هوا و رشد ریشه ارائه می‌دهد. بر خلاف روش‌های سنتی که عمدتاً مبتنی بر اندازه‌گیری‌های غیرمستقیم و تخریبی هستند، توموگرافی قابلیت پایش تغییرات ساختاری خاک در شرایط مختلف رطوبتی و مدیریتی را با دقت و اطمینان بیشتر فراهم می‌سازد. در نتیجه، به‌کارگیری این فناوری نه‌تنها موجب ارتقای کیفیت داده‌های مرتبط با ساختمان خاک می‌شود، بلکه ابزاری کلیدی برای توسعه راهکارهای مدیریتی پایدار، کاهش اثرات منفی تراکم و حفاظت از پایداری بلندمدت خاک در نظام‌های کشاورزی است.

فهرست منابع

عبدلی، ی.، و جعفری، س. (۱۳۹۷). اثرات پستی و بلندی و آبیاری بر تکامل خاک‌ها و تنوع کانی‌های رسی در برخی از خاک‌های گچی استان خوزستان. علوم آب و خاک - علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۲۲ (۱): ۴۰۳-۳۸۷.

Ghosh, T., Maity, P. P., Rabbi, S. M., Das, T. K., Bhattacharyya, R. (2023). Application of X-ray computed tomography in soil and plant-a review. Frontiers in Environmental Science, 11, 1216630.

Kaur, P., Lamba, J., Way, T. R., Sandhu, V., Balkcom, K. S., Sanz-Saez, A., Watts, D. B. (2024). Cover crop effects on X-ray computed tomography–derived soil pore characteristics. Journal of Soils and Sediments, 24(1), 111-125.

Liebhard, G., Toth, M., Stumpp, C., Bodner, G., Klik, A., Zhang, X., Strauss, P. (2025). Developing topsoil structure through conservation management to protect subsoil from compaction. Soil and Tillage Research, 253, 106669.

Majdoubi, R., Masmoudi, L., & Elharif, A. (2024). Analysis of soil compaction under different wheel applications using a dynamical cone penetrometer. Journal of Terramechanics, 111, 21-30.

Nawaz, M. M., Noor, M. A., Latifmanesh, H., Wang, X., Ma, W., & Zhang, W. (2023). Field traffic-induced soil compaction under moderate machine-field conditions affects soil properties & maize yield on s&y loam soil. Frontiers in Plant Science, 14, 1002943.

Pessoa, T. N., Ferreira, T. R., Pires, L. F., Cooper, M., Uteau, D., Peth, S., Libardi, P. L. (2022). X-ray microtomography for investigating pore space and its relation to water retention and conduction in highly weathered soils. Agriculture, 13(1), 28.

Seifu, Y., Hiremath, S. S., Tola, S., Wako, A. (2023). Depth and soil physiochemical properties effects on soil compaction in agricultural field. African Journal of Agricultural Research, 19(2), 170-177.

Umarov, O., Bafayeva, Z., Qodirov, E. (2024). Impact of salinity levels on the physical properties of irrigated meadow alluvial soils in Bukhara region. In E3S Web of Conferences (Vol. 549, p. 03023). EDP Sciences.

Valverde, A., & Wijewickreme, D. (2024). Using X-ray micro-CT imaging data to obtain particle morphology and soil fabric parameters. In E3S Web of Conferences (Vol. 544, p. 04008). EDP Sciences.

Wiermann, C., Bockwoldt, M. H., Uteau, D., Peth, S., Mordhorst, A., Fleige, H. (2025). Present state of soil structure: A comparison of cropland and grassland soils in North Germany. Soil and Tillage Research, 253, 106681 .

Zanutel, M., Garré, S., Sanglier, P., Bielders, C. (2024). Biochar modifies soil physical properties mostly through changes in soil structure rather than through its internal porosity. Vadose Zone Journal, 23(1), e20301.

Fang, H., Zhang, N., Yu, Z., Li, D., Peng, X., Zhou, H. (2024). Micro-CT Analysis of Pore Structure in Upland Red Soil Under Different Long-Term Fertilization Regimes. Agronomy, 14(11), 2668.

Computed Tomography (CT-Scan): A novel method for 3D visualization and quantitative assessment of soil structure

Mojtaba Shirazi[1], Ataallah Khademalrasoul[2*], Lars Juhl Munkholm[3]
[1] PhD Candidate, Department of Soil Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran
[2*] Associate Professor, Department of Soil Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran
Corresponding author: ataalahsoil@gmail.com
[3] Aarhus University, Department of Agroecology, DK-8830 Tjele, Denmark

Abstract

Soil compaction caused by the traffic of heavy harvesting machinery is one of the major challenges in sustainable management of agricultural soils. This study aimed to visually assess and quantitatively evaluate soil structure under compaction using X-ray computed tomography (X-Ray CT) and ImageJ/Fiji software. The study was conducted in a 25-hectare sugarcane farm of the Debel Khozaei Agro-Industry Company. Soil sampling was performed in three treatments: before harvest (BH), after harvest with 75% wagon load capacity (AH-75%), and after harvest with 100% wagon load capacity (AH-100%) from a depth of 0–25 cm. Results showed that machinery traffic increased the number of pores while reducing their average size and perimeter, ultimately leading to a decrease in total and effective soil porosity. Despite the higher weight of machinery in the AH-100% treatment, the greatest structural degradation was observed in AH-75%, which was attributed to the higher soil moisture during harvesting. The application of modern methods such as X-ray CT enables precise visual and quantitative evaluation of soil structural changes and provides an efficient tool for monitoring and sustainable soil management in agricultural systems, particularly in sugarcane cultivation.

Keywords: Soil structure, soil compaction, Soil tomography, Quantitative assessment.