19th Iranian Soil Science Congress
02-04 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

انقلاب هوشمند: چشم‌انداز کاربرد هوش مصنوعی در علوم خاک

عیسی اسفندیارپور بروجنی[1*]

۱- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی‌عصر رفسنجان

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مقاله: esfandiarpoor@vru.ac.ir

چکیده

در دهه‌های اخیر، هوش مصنوعی به‌عنوان یکی از مؤثرترین فناوری‌های تحول‌آفرین، جایگاه ویژه‌ای در علوم خاک یافته است. پیچیدگی‌های ذاتی سامانه‌های خاک، محدودیت روش‌های سنتی و نیاز روزافزون به مدیریت پایدار منابع طبیعی، زمینه را برای استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق فراهم ساخته است. این مقاله با رویکردی مروری و تحلیلی، به بررسی جامع کاربردهای کلیدی هوش مصنوعی در علوم خاک پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد که هوش مصنوعی و زیرشاخه‌های آن، از جمله یادگیری ماشین و یادگیری عمیق توانسته‌اند در پیش‌بینی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، پایش سلامت و کیفیت خاک، نقشه‌برداری رقومی خاک، مدیریت آب و عناصر غذایی، و تخمین عملکرد محصول، کارایی بالایی ارائه دهند. در عین حال، چالش‌هایی چون کمبود داده‌های دقیق، پیچیدگی مدل‌ها و ماهیت جعبه سیاه الگوریتم‌ها، مانع از پذیرش کامل این فناوری در کاربردهای میدانی شده است. در افق آینده، توسعه مدل‌های قابل تفسیر (XAI)، ادغام داده‌های چندمنبعی، و بهره‌گیری از هوش مصنوعی مولد و دوقلوهای دیجیتال خاک، مسیرهای نوینی را برای درک عمیق‌تر و مدیریت هوشمندانه‌تر خاک فراهم خواهد کرد. به‌طور کلی، انقلاب هوشمند در علوم خاک، به معنای جایگزینی دانش تخصصی ما با الگوریتم‌ها نیست؛ بلکه ابزاری برای توانمندسازی آن در راستای کشاورزی پایدار و تصمیم‌گیری مبتنی بر داده است.

واژگان کلیدی: دوقلوی دیجیتال خاک، کشاورزی دقیق، مدیریت پایدار خاک، یادگیری عمیق، یادگیری ماشین.

مقدمه

علوم خاک، به‌عنوان یکی از شاخه‌های بنیادین کشاورزی و علوم محیطی، نقشی حیاتی در تضمین امنیت غذایی و حفاظت از منابع طبیعی ایفا می‌کند (Sarkar et al., 2021). با افزایش جمعیت جهان و فشار روزافزون بر منابع طبیعی، مدیریت دقیق و پایدار خاک به یک چالش پیچیده تبدیل شده است. روش‌های سنتی ارزیابی خاک، هرچند دقیق، اغلب زمان‌بر، پرهزینه و محدود به مقیاس‌های کوچک هستند (Jana et al., 2024). این محدودیت‌ها، نیاز به رویکردهای نوین برای پایش و مدیریت خاک در مقیاس‌های بزرگ را بیش از پیش آشکار می‌سازند.

در دهه‌های اخیر، هوش مصنوعی (Artificial Intelligence; AI) و زیرشاخه‌های آن، از جمله یادگیری ماشین (Machine Learning; ML) و یادگیری عمیق (Deep Learning; DL)، به‌عنوان فناوری‌های تحول‌آفرین در تمامی حوزه‌های علمی ظهور کرده‌اند (Savita et al., 2024; Wadoux, 2025). علوم خاک نیز از این قاعده مستثنی نبوده و کاربرد هوش مصنوعی در این حوزه از یک علاقه پژوهشی صرف به یک ضرورت برای دستیابی به کشاورزی پایدار و مدیریت هوشمند منابع تبدیل شده است. به‌عبارت بهتر، هوش مصنوعی دیگر یک مفهوم علمی-تخیلی نیست؛ بلکه یک واقعیت قدرتمند است که با توانایی

تحلیل حجم عظیمی از داده‌های حاصل از سنجش از دور، حسگرهای میدانی و داده‌های آزمایشگاهی، فرصت‌های بی‌سابقه‌ای برای درک الگوهای پیچیده و پیش‌بینی رفتار سیستم‌های خاک فراهم آورده است (Jain and Sethia, 2023). بنابراین امروز، ما در آستانه یک انقلاب هوشمند در علوم خاک ایستاده‌ایم؛ انقلابی که نویدبخش کشاورزی پایدارتر، مدیریت منابع کارآمدتر و در نهایت، سیاره‌ای سالم‌تر است.

با این حال، شکاف قابل توجهی میان پتانسیل تئوریک هوش مصنوعی و پیاده‌سازی عملی آن در علوم خاک وجود دارد. بسیاری از مدل‌های موجود به‌عنوان "جعبه سیاه" (Black Box) عمل می‌کنند و فاقد قابلیت تفسیرپذیری هستند (Wadoux, 2025). همچنین، خطر نادیده گرفتن اصول بنیادین پدولوژی و فرآیندهای خاک در مدل‌سازی‌های صرفاً داده‌محور وجود دارد (Minasny et al., 2024). از این رو، مقاله حاضر با هدف ارائه یک تصویر جامع و منسجم از وضعیت فعلی، چالش‌ها و چشم‌انداز آینده کاربرد هوش مصنوعی در علوم خاک تدوین شده است.

کاربردهای کلیدی هوش مصنوعی در علوم خاک

امروزه، ادغام هوش مصنوعی با علوم خاک از یک ایده نوآورانه به یک واقعیت عملیاتی تبدیل شده است که پتانسیل تحول در مدیریت پایدار منابع طبیعی را دارد. این فناوری‌ها با فراهم آوردن امکان تحلیل داده‌های عظیم و بهینه‌سازی فرآیندها، به کشاورزان و پژوهشگران کمک می‌کنند تا با چالش‌هایی نظیر تغییرات اقلیمی، کمبود منابع و افزایش جمعیت مقابله کنند (Aziz et al., 2025).

هوش مصنوعی، به‌ویژه با تکنیک‌هایی مانند یادگیری ماشین (ML) و یادگیری عمیق (DL)، به ابزاری قدرتمند برای مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده خاک، پیش‌بینی ویژگی‌های آن و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های آگاهانه تبدیل شده است (Elakiya and Keerthana, 2024; Wadoux, 2025). این کاربردها طیف وسیعی از فعالیت‌ها از مدیریت محصولات کشاورزی، مدیریت آب و خاک، و کوددهی گرفته تا طبقه‌بندی خاک و پیش‌بینی عملکرد محصول را شامل می‌شوند. همچنین، فناوری هوش مصنوعی در شناسایی آفات و بیماری‌ها، پیش‌بینی الگوهای آب‌وهوایی و خودکارسازی کارهای طاقت‌فرسا (مانند برداشت محصول) نقش اساسی ایفا می‌کند (Henrietta, 2024).

پیش‌بینی خصوصیات فیزیکی-شیمیایی خاک

یکی از بنیادی‌ترین کاربردهای هوش مصنوعی در علوم خاک، پیش‌بینی دقیق و کارآمد خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن است. مدل‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق، توانایی بالایی در مدل‌سازی روابط پیچیده و غیرخطی میان متغیرهای محیطی و ویژگی‌های خاک نشان داده‌اند. شبکه‌های عصبی مصنوعی (Artificial Neural Networks; ANN) به‌طور گسترده برای پیش‌بینی پارامترهایی مانند pH، کربن آلی، بافت خاک (درصد شن، سیلت و رس)، ظرفیت تبادل کاتیونی و هدایت هیدرولیکی به‌کار رفته‌اند. مطالعات نشان داده‌اند که مدل‌های ANN در مقایسه با روش‌های رگرسیون سنتی، به‌دلیل توانایی در مدیریت روابط غیرخطی و پیچیده، دقت بالاتری ارائه می‌دهند. این مدل‌ها با استفاده از داده‌های ورودی متنوعی از جمله اطلاعات اقلیمی، داده‌های سنجش از دور (مانند تصاویر ماهواره‌ای و طیف‌سنجی) و پارامترهای قابل اندازه‌گیری خاک، پیش‌بینی‌های دقیقی را ممکن می‌سازند. علاوه بر ANN، الگوریتم‌های دیگری مانند جنگل تصادفی (Random Forest; RF) و ماشین بردار پشتیبان (Support Vector Machine; SVM) نیز در طبقه‌بندی کیفیت خاک و پیش‌بینی ویژگی‌های آن موفق عمل کرده‌اند. برای مثال، مدل جنگل تصادفی در طبقه‌بندی کیفیت خاک، کارایی بیشتری نسبت به سایر رویکردهای یادگیری ماشین نشان داده است. این قابلیت‌ها به برنامه‌ریزی کاربری اراضی، مدیریت پایدار خاک و کشاورزی دقیق کمک شایانی می‌کنند (Elakiya and Keerthana, 2024; Sarkar et al., 2021).

پایش سلامت و کیفیت خاک

پایش مستمر سلامت خاک برای کشاورزی پایدار و حفاظت از محیط زیست حیاتی است. هوش مصنوعی، به‌ویژه با استفاده از داده‌های سنجش از دور، این فرآیند را متحول کرده است. الگوریتم‌های یادگیری عمیق، به‌خصوص شبکه‌های عصبی پیچشی (Convolutional Neural Networks; CNN)، در تحلیل داده‌های تصویری ماهواره‌ای و پهپادها برای شناسایی الگوهای مکانی سلامت خاک بسیار مؤثر هستند. این مدل‌ها می‌توانند ویژگی‌هایی مانند توزیع ماده آلی، بافت خاک، فرسایش

و شوری را با دقت بالا نقشه‌برداری کنند. برای مثال، CNNها با تحلیل تصاویر ماهواره‌ای، قادر به تشخیص مناطق تخریب‌یافته یا در معرض خطر هستند. همچنین، شبکه‌های عصبی بازگشتی (Recurrent Neural Network; RNN) و مدل‌های حافظه طولانی کوتاه‌مدت (Long Short-Term Memory; LSTM) برای ردیابی روندهای زمانی و پیش‌بینی تغییرات بلندمدت در سلامت خاک، مانند کاهش ماده آلی یا افزایش فرسایش، به‌کار می‌روند. سیستم‌های مبتنی بر منطق فازی (Fuzzy logic) نیز برای ارزیابی ریسک آلودگی خاک و طبقه‌بندی آن بر اساس شاخص‌های کیفی استفاده می‌شوند. این رویکردهای پیشگیرانه به کشاورزان اجازه می‌دهند تا قبل از تشدید مشکلات، اقدامات اصلاحی لازم را انجام دهند و از این طریق، بهره‌وری کشاورزی و پایداری زیست‌محیطی را افزایش دهند (Jana et al., 2024; Sarkar et al., 2021).

مدیریت دقیق منابع آب و مواد مغذی

مدیریت بهینه آب و کود، یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در کشاورزی مدرن است و هوش مصنوعی راه‌حل‌های قدرتمندی در این زمینه ارائه می‌دهد. سیستم‌های هوشمند با ترکیب حسگرهای اینترنت اشیاء (Internet of Things; IoT) و مدل‌های پیش‌بین، نیاز واقعی گیاه به آبیاری و تغذیه را با دقت بالا تخمین می‌زنند. حسگرهای مستقر در مزرعه داده‌های لحظه‌ای در مورد رطوبت، دما و pH خاک را جمع‌آوری کرده و این داده‌ها به مدل‌های هوش مصنوعی (مانند ANN و SVM) ارسال می‌شوند. این مدل‌ها با تحلیل داده‌های دریافتی و ترکیب آن‌ها با اطلاعات پیش‌بینی وضع هوا، زمان و مقدار دقیق آبیاری و کوددهی را تعیین می‌کنند. مطالعات نشان داده‌اند که این رویکرد می‌تواند منجر به صرفه‌جویی قابل توجه در مصرف آب (تا ۳۰ درصد) و کود (تا ۲۵ درصد) شود، ضمن اینکه کیفیت و کمیت محصول را حفظ یا حتی بهبود می‌بخشد. برای مثال، مدل ARX توانسته است میزان رطوبت خاک را با دقت ۹۱/۳ درصد پیش‌بینی کند که به بهینه‌سازی برنامه‌های آبیاری کمک می‌کند. این فناوری، نه تنها هزینه‌ها را کاهش می‌دهد؛ بلکه با جلوگیری از مصرف بی‌رویه منابع، اثرات زیست‌محیطی کشاورزی مانند آلودگی آب‌های زیرزمینی را نیز به حداقل می‌رساند (Savita et al., 2024; Nawaz and Babar, 2025).

نقشه‌برداری رقومی خاک

نقشه‌برداری رقومی خاک (Digital Soil Mapping; DSM) با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و تلفیق داده‌های سنجش از دور با نمونه‌برداری‌های زمینی، انقلابی در تولید نقشه‌های دقیق و با وضوح بالا از خصوصیات خاک ایجاد کرده است. این تکنیک‌ها به‌جای روش‌های سنتی پرهزینه و زمان‌بر، از مدل‌های پیش‌بینی‌کننده برای تخمین ویژگی‌های خاک در مناطق نمونه‌برداری‌نشده استفاده می‌کنند. الگوریتم‌هایی مانند جنگل تصادفی، شبکه‌های عصبی مصنوعی و مدل‌های تقویتی گرادیان (Gradient Boosting Models) با استفاده از متغیرهای کمکی مانند داده‌های ارتفاعی (DEM)، تصاویر ماهواره‌ای چندطیفی و اطلاعات اقلیمی، نقشه‌هایی از توزیع مکانی پارامترهایی نظیر کربن آلی، pH، بافت و عمق خاک تولید می‌کنند. پروژه‌های جهانی مانند SoilGrids نمونه‌ای برجسته از این کاربرد هستند که با استفاده از یادگیری ماشین، نقشه‌های جهانی ویژگی‌های کلیدی خاک را با وضوح بالا ارائه می‌دهند. این نقشه‌ها برای برنامه‌ریزی کاربری اراضی، کشاورزی دقیق، مدل‌سازی فرسایش و ارزیابی پتانسیل ذخیره کربن در خاک بسیار حیاتی هستند (Espinel et al., 2024; Minasny et al., 2024).

طبقه‌بندی و شناسایی انواع خاک

طبقه‌بندی خاک‌ها بر اساس ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آن‌ها برای مدیریت پایدار اراضی ضروری است. هوش مصنوعی، به‌ویژه مدل‌های یادگیری ماشین، ابزارهای قدرتمندی برای خودکارسازی و افزایش دقت این فرآیند فراهم کرده‌اند. الگوریتم‌هایی مانند شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه (Multilayer perceptron; MLP)، درخت تصمیم (Decision Tree; DT) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) می‌توانند بر اساس داده‌های حاصل از آنالیزهای آزمایشگاهی، سنجش از دور یا حسگرهای میدانی، انواع خاک را با دقت بالا طبقه‌بندی کنند. برای مثال، یک مدل MLP با استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده توسط حسگرهای IoT (مانند رطوبت، شوری و pH) و بررسی‌های میدانی، توانسته است طبقه‌بندی چندکلاسه مؤثری برای تعیین تناسب اراضی برای کشت ارائه دهد. این مدل‌ها به‌ویژه در مناطقی که دانش تخصصی محدود است یا دسترسی به آزمایشگاه‌های پیشرفته وجود ندارد، می‌توانند به درک بهتر توزیع انواع خاک و پتانسیل‌های کشاورزی آن‌ها کمک کنند (Elakiya and Keerthana, 2024; Eli-Chukwu, 2019; Nawaz and Babar, 2025).

پیش‌بینی عملکرد محصول

پیش‌بینی دقیق عملکرد محصول، یکی از کاربردهای کلیدی هوش مصنوعی است که به کشاورزان در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی، بازاریابی و برنامه‌ریزی لجستیک کمک می‌کند. مدل‌های هوش مصنوعی با تحلیل همزمان مجموعه داده‌های بزرگ و متنوعی شامل خصوصیات خاک، اطلاعات اقلیمی (دما، بارش، تابش خورشیدی)، تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های تاریخی عملکرد، قادر به پیش‌بینی میزان تولید محصول هستند. الگوریتم‌هایی مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی در پیش‌بینی عملکرد محصولات، عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های رگرسیون سنتی از خود نشان داده‌اند. برای مثال، در یک مطالعه، ترکیبی از داده‌های ماهواره‌ای و اقلیمی با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی عملکرد گندم در استرالیا به‌کار گرفته شد. این مدل‌ها می‌توانند تأثیر تغییرات اقلیمی، مانند خشکسالی یا افزایش دما، بر عملکرد محصول را نیز شبیه‌سازی کرده و به توسعه راهبردهای سازگارانه کمک کنند (Elakiya and Keerthana, 2024; Nawaz and Babar, 2025; Son et al., 2024).

نقاط قوت و ضعف کاربرد هوش مصنوعی در علوم خاک

با وجود پیشرفت‌های هیجان‌انگیز، مسیر ادغام هوش مصنوعی در علوم خاک با فرصت‌ها و چالش‌هایی همراه است که باید با نگاهی انتقادی به آن‌ها نگریست. به دیگر سخن، نقاط قوت و ضعف به‌کارگیری هوش مصنوعی در علوم خاک را می‌توان در موارد زیر، خلاصه نمود:

نقاط قوت و فرصت‌ها

کاربرد هوش مصنوعی در علوم خاک، فرصت‌های بی‌بدیلی را برای تحول در این حوزه فراهم آورده است. یکی از برجسته‌ترین مزایا، "افزایش دقت و کارایی" در تحلیل‌هاست. مدل‌های هوش مصنوعی، به‌ویژه شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) و الگوریتم‌های یادگیری عمیق، توانایی فوق‌العاده‌ای در مدل‌سازی روابط غیرخطی و پیچیده میان خصوصیات خاک و متغیرهای محیطی دارند. این مدل‌ها در پیش‌بینی پارامترهایی مانند pH، رطوبت و کربن آلی، عملکردی بهتر از روش‌های رگرسیون سنتی از خود نشان داده‌اند (Elakiya and Keerthana, 2024). علاوه بر این، "مقیاس‌پذیری" این فناوری‌ها امکان تحلیل حجم عظیمی از داده‌های حاصل از منابع گوناگون مانند تصاویر ماهواره‌ای، حسگرهای اینترنت اشیاء (IoT) و داده‌های تاریخی را فراهم می‌آورد. این قابلیت، پایش جامع سلامت خاک را در مقیاس‌های بزرگ جغرافیایی، از سطح مزرعه تا مناطق وسیع، ممکن می‌سازد (Jana et al., 2024). از منظر اقتصادی، کاربرد هوش مصنوعی در راستای بهینه‌سازی مصرف منابعی چون آب و کود از طریق کشاورزی دقیق، منجر به "کاهش هزینه‌ها" و "افزایش پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی" می‌شود (Jana et al., 2024; Nawaz and Babar, 2025; Son et al., 2024). در نهایت، هوش مصنوعی با توانایی "کشف الگوها و همبستگی‌های پنهان در داده‌ها" که ممکن است از دید انسان دور بمانند، به تولید فرضیه‌های علمی جدید و تعمیق دانش ما از سیستم‌های خاک کمک شایانی می‌کند (Savita et al., 2024).

نقاط ضعف و محدودیت‌ها

علی‌رغم فرصت‌های بی‌بدیل ایجادشده در مطالعات خاک، هنوز بهره‌برداری کامل از پتانسیل هوش مصنوعی با چالش‌ها و محدودیت‌های جدی روبه‌روست. یکی از مهم‌ترین موانع، "نیاز به داده‌های باکیفیت و انبوه" است. عملکرد مدل‌های هوش مصنوعی به‌شدت به حجم و کیفیت داده‌های آموزشی وابسته است و در بسیاری از مناطق جهان، داده‌های دقیق و جامع خاک، کمیاب و گران هستند. علاوه بر این، "خطاهای ناشی از نقص فنی حسگرها یا نویزهای محیطی" می‌تواند دقت پیش‌بینی‌ها را کاهش دهد (Jana et al., 2024). این کمبود داده، تعمیم‌پذیری مدل‌ها را به مناطق جدید با چالش مواجه می‌کند (Jain and Sethia, 2023). مشکل دیگر، ماهیت "جعبه سیاه" بسیاری از مدل‌های پیچیده (مانند شبکه‌های عصبی عمیق) است. این ویژگی، تفسیر فرآیندهای خاک‌شناسی که منجر به یک پیش‌بینی خاص شده‌اند را دشوار ساخته و اعتماد به مدل را در میان متخصصان و کاربران نهایی کاهش می‌دهد (Wadoux, 2025).

از سوی دیگر، "چالش‌های فنی و مالی"، موانع بزرگی برای پذیرش گسترده این فناوری‌ها، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه و برای کشاورزان خرده‌پا، محسوب می‌شوند. هزینه‌های اولیه سخت‌افزاری و نرم‌افزاری، همراه با نیاز به نیروی کار ماهر در این راستا، برای بسیاری از کشاورزان بازدارنده است (Oliveira and Silva, 2023; Nawaz and Babar, 2025). همچنین، یک شکاف دانشی مهم، "عدم یکپارچگی مدل‌های هوش مصنوعی با دانش بنیادین خاک‌شناسی" است. برخی کاربردها، خاک را صرفاً به‌عنوان مجموعه‌ای از داده‌ها در نظر می‌گیرند و اصول و تئوری‌های فیزیکی-شیمیایی و بیولوژیکی حاکم بر آن را نادیده می‌گیرند. این رویکرد می‌تواند به نتایجی منجر شود که از نظر علمی بی‌معنا یا غیرواقعی هستند (Minasny et al., 2024). در نهایت، مدل‌های توسعه‌یافته در یک منطقه خاص، به‌دلیل تفاوت در ویژگی‌های خاک و شرایط اقلیمی، اغلب بدون "سفارشی‌سازی و انطباق با شرایط محلی"، در مناطق دیگر عملکرد مطلوبی ندارند (Jana et al., 2024; Nawaz and Babar, 2025). این محدودیت‌ها نشان می‌دهد که مسیر پیش رو، نیازمند پژوهش‌های هدفمند برای پر کردن شکاف‌های دانشی موجود است.

روندهای نوظهور هوش مصنوعی و نقش پژوهشگران

با الهام از چشم‌انداز آینده علوم خاک و هم‌افزایی آن با فناوری‌های هوشمند، روندهای نوظهور زیر مسیر این تحول را ترسیم می‌کنند. این روندها نه تنها کارایی و دقت را در مدیریت خاک افزایش می‌دهند؛ بلکه درک ما از سیستم‌های پیچیده خاک را نیز عمیق‌تر می‌سازند.

هوش مصنوعی مولد (Generative AI) و دوقلوهای دیجیتال خاک (Soil digital twins)

فراتر از مدل‌های پیش‌بین سنتی که صرفاً الگوهای موجود در داده‌ها را تحلیل می‌کنند، هوش مصنوعی مولد، به‌ویژه شبکه‌های مولد تخاصمی (Generative Adversarial Networks; GANs)، قادر به تولید داده‌های مصنوعی واقع‌گرایانه از خاکرخ‌ها و خصوصیات خاک است. این قابلیت برای تکمیل مجموعه داده‌های ناقص یا کمیاب که جمع‌آوری آن‌ها پرهزینه و زمان‌بر است، ارزشی حیاتی دارد. داده‌های مصنوعی تولیدشده می‌توانند استحکام و قابلیت تعمیم‌پذیری سایر مدل‌های یادگیری ماشین را که برای تحلیل خاک به‌کار می‌روند، بهبود بخشند و منجر به پیش‌بینی‌ها و نقشه‌برداری‌های دقیق‌تر از ویژگی‌های خاک در سناریوهای پیچیده دنیای واقعی شوند. علاوه بر این، هوش مصنوعی مولد می‌تواند تصاویر باکیفیتی از ساختارها یا توده‌های خاک تولید کند که به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی سلامت خاک به‌کار می‌روند (Khanifar, 2025).

چشم‌انداز نهایی این فناوری، خلق «دوقلوهای دیجیتال خاک» است؛ نسخه‌های مجازی و پویایی از سیستم‌های خاک که با داده‌های لحظه‌ای از حسگرها و سنجش از دور به‌روز می‌شوند. این دوقلوها که نمایانگر یکپارچگی کامل سیستم‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک هستند، با داده‌های لحظه‌ای از حسگرهای اینترنت اشیاء (IoT) و پلتفرم‌های سنجش از دور تغذیه می‌شوند تا شرایط آینده را پیش‌بینی و شبیه‌سازی کنند (Khanifar, 2025). این مدل‌های مجازی، امکان شبیه‌سازی دقیق سناریوهای مختلف، مانند تأثیر تغییرات اقلیمی، روش‌های مدیریتی متفاوت یا احتمال فرسایش و تنش آبی تحت شرایط بحرانی را فراهم می‌آورند و به مدیریت پیشگیرانه و پایدار خاک کمک شایانی می‌کنند (Wadoux, 2025). این رویکرد، فراتر از پیش‌بینی صرف، با تولید و تحلیل فرضیه‌های جدید و شناسایی ارتباطات کشف‌نشده در داده‌های موجود، به تسریع اکتشافات علمی در علوم خاک نیز کمک می‌کند (Khanifar, 2025).

هوش مصنوعی قابل تفسیر (Explainable AI - XAI)

یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها در پذیرش مدل‌های پیچیده هوش مصنوعی، به‌ویژه در حوزه کشاورزی، ماهیت "جعبه سیاه" آن‌هاست (Jana et al., 2024). این ویژگی باعث می‌شود که درک منطق و فرآیند تصمیم‌گیری این مدل‌ها برای کاربران، از جمله کشاورزان و ذی‌نفعان، دشوار باشد و در نتیجه، اعتماد به توصیه‌های تولیدشده توسط هوش مصنوعی کاهش یابد. برای غلبه بر این مانع، تمرکز پژوهش‌ها به سمت توسعه مدل‌های هوش مصنوعی قابل تفسیر (XAI) معطوف شده است. این مدل‌ها نه‌تنها پیش‌بینی‌های دقیقی ارائه می‌دهند؛ بلکه قادرند عوامل و متغیرهای مؤثر بر تصمیمات خود را نیز به‌وضوح توضیح دهند. به‌عنوان مثال، روش‌هایی مانند مقادیر شاپلی (Shapley values) به‌کار گرفته می‌شوند تا مشخص شود چگونه

یک مدل پیچیده یادگیری عمیق به طبقه‌بندی خاک‌های اسیدسولفاته (Cat-clay soils) دست یافته است یا چه عواملی بیشترین تأثیر را بر پیش‌بینی ذخایر کربن آلی خاک داشته‌اند (Wadoux, 2025). این شفافیت برای جلب اعتماد کشاورزان، مدیران و سیاست‌گذاران و همچنین برای استخراج دانش علمی جدید از دل الگوهای کشف‌شده توسط مدل‌ها، امری ضروری است. درک اینکه چرا یک مدل، منطقه‌ای را مستعد فرسایش یا کمبود مواد مغذی تشخیص می‌دهد، به اندازه خود پیش‌بینی اهمیت دارد.

هدف نهایی در این حوزه، تبدیل خروجی‌های پیچیده مدل‌ها به بینش‌های عملی و قابل فهم برای کشاورزان است تا آن‌ها بتوانند تصمیمات آگاهانه‌تری بر اساس توصیه‌های هوش مصنوعی اتخاذ کنند (Jana et al., 2024). در واقع، ایجاد تعادل بین مدل‌سازی یادگیری ماشین و دانش انسانی برای تفسیر و اعتبارسنجی نتایج تولیدشده توسط هوش مصنوعی، یک ضرورت انکارناپذیر است (Minasny et al., 2024). در آینده، انتظار می‌رود که پیشرفت‌ها به سمت هوش مصنوعی "خود-توضیح‌دهنده" (Self-explaining AI) حرکت کند که می‌تواند توضیحات قابل فهمی از پیش‌بینی‌های خود به همراه سطح اطمینان آن‌ها ارائه دهد؛ قابلیتی که در پژوهش‌های خاک‌شناسی برای درک قابلیت اطمینان پیش‌بینی‌ها بسیار حیاتی است (Wadoux, 2025).

یکپارچه‌سازی چندوجهی داده‌ها (Multimodal AI)

سیستم‌های هوش مصنوعی آینده، از تحلیل تک‌بعدی داده‌های خاک فراتر رفته و به سمت یکپارچه‌سازی چندوجهی داده‌ها حرکت خواهند کرد. این رویکرد، داده‌های فیزیکی و شیمیایی خاک را با اطلاعات گسترده‌تری تلفیق می‌کند تا یک چارچوب جامع برای ارزیابی سلامت و امنیت خاک ایجاد نماید (Jana et al., 2024).

این سیستم‌ها قادرند مجموعه داده‌های عظیمی از منابع گوناگون را تحلیل کنند. این منابع شامل موارد زیر است:

- **داده‌های خاک:** ویژگی‌هایی مانند pH، رطوبت، شوری، دما، بافت و مواد آلی که از طریق حسگرهای اینترنت اشیاء مستقر در مزرعه به‌صورت آنی جمع‌آوری می‌شوند (Savita et al., 2024; Jana et al., 2024).
- **داده‌های سنجش از دور:** تصاویر ماهواره‌ای و پهپادی (چندوجهی و فراطیفی) که اطلاعاتی در مورد ویژگی‌های خاک، سلامت محصول و توزیع مکانی پارامترها در مناطق وسیع ارائه می‌دهند (Savita et al., 2024; Elakiya and Keerthana, 2024).
- **داده‌های اقلیمی:** اطلاعاتی مانند دما، بارش، رطوبت و حتی غلظت دی‌اکسید کربن که برای پیش‌بینی شرایط آینده و تأثیر آن بر محصولات ضروری است (Jana et al., 2024; Son et al., 2024).
- **داده‌های اقتصادی و اجتماعی:** اطلاعاتی مانند قیمت نهاده‌ها و محصولات و حتی الگوهای کشت که به تصمیم‌گیری‌های مدیریتی کلان کمک می‌کنند (Nagraj, 2025).

تلفیق این داده‌های چندوجهی، دقت و قابلیت اطمینان مدل‌های هوش مصنوعی را به شکل چشمگیری افزایش می‌دهد. برای مثال، الگوریتم‌های یادگیری عمیق مانند شبکه‌های عصبی پیچشی (CNN) و حافظه طولانی کوتاه‌مدت (LSTM) می‌توانند به‌ترتیب تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های سری زمانی حسگرها را تحلیل کرده و روندهای فصلی یا تخریب خاک را شناسایی کنند (Jana et al., 2024).

چنین سیستم‌های جامعی، یک ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری قدرتمند برای مدیریت پایدار سرزمین فراهم می‌آورند (Wadoux, 2025). این ابزارها نه‌تنها به بهینه‌سازی تولید از طریق مدیریت دقیق منابعی چون آب و کود کمک می‌کنند؛ بلکه با پیش‌بینی سناریوهای آینده مانند خشکسالی یا فرسایش، انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری سیستم‌های کشاورزی را در برابر بحران‌های اقلیمی و اقتصادی افزایش می‌دهند (Khanifar, 2025; Son et al., 2024). در نهایت، این رویکرد، کشاورزی سنتی واکنشی را به یک رویه پیشگیرانه و هوشمند تبدیل می‌کند که برای تأمین امنیت غذایی جهانی ضروری است (Nagraj, 2025; Nawaz and Babar, 2025).

پردازش زبان طبیعی (Natural Language Processing; NLP) برای استخراج دانش نهفته از متون علمی

حجم عظیمی از دانش ارزشمند در قالب مقالات علمی، گزارش‌های تاریخی پیمایش خاک و داده‌های توصیفی کیفی در منابع متنی پراکنده انباشته شده است. این منابع اغلب به‌دلیل فرمت غیرساختاریافته، در مدل‌های کمّی و تحلیلی نادیده گرفته می‌شوند. الگوریتم‌های پردازش زبان طبیعی (NLP)، که شاخه‌ای از هوش مصنوعی به‌شمار می‌روند، ابزارهای قدرتمندی برای تحلیل این حجم عظیم از متون و استخراج دانش نهفته و انباشته‌شده در آن‌ها فراهم می‌آورند (Nawaz and Babar, 2025; Wadoux, 2025).

پردازش زبان طبیعی قادر است اطلاعات کیفی و غیرساختاریافته موجود در اسناد قدیمی و مقالات علمی را به فرمتی ساختاریافته، قابل جستجو و قابل استفاده برای مدل‌های یادگیری ماشین تبدیل کند. برای مثال، NLP می‌تواند برای استخراج روابط میان مدیریت خاک و ویژگی‌های هدف خاک از تعداد زیادی متاآنالیز استفاده کند و نوع این روابط (مثبت، منفی یا عدم وجود رابطه) را مشخص نماید. این فرآیند که با نظارت انسانی همراه است، به ترکیب و خلاصه‌سازی بدنه وسیع ادبیات علمی کمک شایانی می‌کند (Wadoux, 2025).

یکی از کاربردهای کلیدی NLP، ساخت مدل‌های زبانی بزرگ (Large Language Models; LLMs) است که به‌طور خاص برای درک، تولید و دستکاری زبان انسانی طراحی شده‌اند. این مدل‌ها می‌توانند با تحلیل حجم وسیعی از متون علمی در زمینه خاکشناسی، به پرسش‌های کاربران پاسخ دهند، شکاف‌های دانشی را پر کنند و با کشف ارتباطات پنهان در ادبیات علمی، به تولید فرضیه‌های جدید و نوآورانه علوم خاک کمک کنند. با این حال، برای کاربردهای دقیق در علوم خاک، این مدل‌ها نیازمند آموزش تکمیلی با استفاده از دانش تخصصی و مجموعه داده‌های ویژه این حوزه هستند تا دقت و ارتباط آن‌ها افزایش یابد. در نهایت، این رویکرد به بهره‌برداری مؤثر از دهه‌ها پژوهش برای ساخت مدل‌های هوشمندتر و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های آگاهانه در مدیریت پایدار خاک کمک می‌کند (Khanifar, 2025; Wadoux, 2025).

نقش آینده پژوهشگران خاک

در چشم‌انداز نوین کشاورزی و علوم محیطی، نقش پژوهشگران خاک از مرزهای سنتی آزمایشگاه و مزرعه فراتر رفته و در حال تحولی بنیادین است. دیگر نمی‌توان تنها با تکیه بر روش‌های کلاسیک که اغلب زمان‌بر، پرهزینه و محدود به نمونه‌برداری‌های نقطه‌ای هستند، به پیچیدگی‌های سیستم‌های خاک پاسخ داد. در این پارادایم جدید، متخصصان این حوزه باید به «دانشمندان داده-خاک‌شناس» تبدیل شوند. افرادی که از یک سو بر اصول بنیادین خاک‌شناسی، اکولوژی خاک و فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آن تسلط کامل دارند و از سوی دیگر، از توانایی کار با ابزارهای پیشرفته هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای تحلیل کلان‌داده‌ها (Big Data) برخوردارند (Savita et al., 2024; Anokhina et al., 2025; Jana et al., 2024).

این گذار به معنای جایگزینی دانش انسانی با الگوریتم‌ها نیست، بلکه تلفیقی هوشمندانه از هر دو است که در آن، هوش مصنوعی به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای تسریع پژوهش و کشف الگوهای پنهان عمل می‌کند (Wadoux, 2025).

تسلط بر ابزارهای نوین

پژوهشگر آینده خاک باید با طیف وسیعی از فناوری‌های هوش مصنوعی آشنا باشد تا بتواند از پتانسیل کامل آن‌ها بهره‌برداری کند. این ابزارها شامل یادگیری ماشین و یادگیری عمیق برای پیش‌بینی دقیق ویژگی‌های خاک مانند pH، رطوبت، کربن آلی و بافت با استفاده از مدل‌هایی چون شبکه‌های عصبی مصنوعی، جنگل تصادفی و یا ماشین‌های بردار پشتیبان است (Elakiya and Keerthana, 2024; Nagraj, 2025). همچنین، سنجش از دور و تحلیل تصویر با پردازش تصاویر ماهواره‌ای و پهپادی، امکان نقشه‌برداری از خصوصیات خاک در مقیاس‌های بزرگ و پایش سلامت محصول را فراهم می‌آورد (Aziz et al., 2025). فناوری اینترنت اشیاء (IoT) با تحلیل داده‌های لحظه‌ای از حسگرهای مستقر در مزرعه، به مدیریت دقیق منابعی چون آب و کود کمک می‌کند (Sarkar et al., 2021). در نهایت، هوش مصنوعی مولد (GenAI) با تولید داده‌های

مصنوعی برای تکمیل مجموعه داده‌های ناقص، شبیه‌سازی سناریوهای آینده (مانند اثرات تغییر اقلیم) و ساخت دوقلوهای دیجیتال خاک، افق‌های جدیدی را در پژوهش‌های خاک‌شناسی می‌گشاید.

هدایت هوشمندانه فناوری

نقش اصلی یک پژوهشگر خاک، صرفاً اجرای مدل‌ها نیست؛ بلکه هدایت هوشمندانه این فناوری‌ها برای طرح پرسش‌های علمی درست و معنادار است. این فرآیند شامل طراحی آزمایش‌های هدفمند برای تعیین نوع، کیفیت و مقیاس داده‌های مورد نیاز برای آموزش مدل‌ها و همچنین تفسیر نقادانه نتایج خاک است. پژوهشگر خاک باید خروجی مدل‌ها را ارزیابی کرده و اطمینان حاصل کند که پیش‌بینی‌های الگوریتمیک با واقعیت‌های پیچیده اکولوژیکی و اصول علمی خاک‌شناسی همسو هستند؛ چرا که یک همبستگی آماری قوی لزوماً به معنای یک رابطه علمی معنادار نیست (Minasny et al., 2024). علاوه بر این، شناسایی محدودیت‌ها مانند خطاهای ناشی از کیفیت پایین داده‌ها، تعمیم‌پذیری ضعیف مدل‌ها به مناطق جدید و سوگیری‌های الگوریتمی، برای جلوگیری از تصمیم‌گیری‌های نادرست و اطمینان از قابلیت اعتماد نتایج، امری ضروری است (Nagraj, 2025; Wadoux, 2025).

یکپارچه‌سازی دانش تخصصی

یکی از بزرگترین چالش‌ها و فرصت‌ها، ادغام دانش تخصصی خاک‌شناسی در مدل‌های هوش مصنوعی است. این رویکرد به‌جای آنکه خاک را صرفاً مجموعه‌ای از داده‌ها ببیند، به مدل‌ها کمک می‌کند تا فرآیندهای واقعی را بهتر درک کنند و از دانش موجود برای بهبود دقت و قابلیت اطمینان خود بهره ببرند (Minasny et al., 2024). برای مثال، می‌توان از دانش پدولوژی برای گروه‌بندی خاک‌ها بر اساس رده یا افق (ژنتیکی و مشخصه) قبل از مدل‌سازی استفاده کرد تا دقت پیش‌بینی‌ها افزایش یابد. همچنین، اعمال محدودیت‌های فیزیکی در مدل‌ها تضمین می‌کند که خروجی‌ها با قوانین بنیادی طبیعت (مانند قوانین بقا) سازگار باشند. از سوی دیگر، می‌توان با استفاده از پردازش زبان طبیعی (NLP)، اطلاعات ارزشمند نهفته در گزارش‌ها و مقالات قدیمی را استخراج و آن‌ها را به داده‌های قابل استفاده برای مدل‌های مدرن تبدیل کرد.

تسهیل تصمیم‌گیری پایدار

هدف نهایی این تحول، بهبود مدیریت پایدار خاک و افزایش امنیت غذایی است. پژوهشگر داده-خاک‌شناس در این میان، نقش یک پل ارتباطی را ایفا می‌کند. او با ترجمه داده به توصیه، خروجی‌های پیچیده مدل‌ها را به راهکارهای عملی و قابل فهم برای کشاورزان، مدیران و سیاست‌گذاران تبدیل می‌کند. این فرآیند به توسعه سیستم‌های پشتیبان تصمیم (Decision Support System; DSS) منجر می‌شود که به بهینه‌سازی مصرف آب و کود، کاهش فرسایش خاک و افزایش ذخیره کربن کمک می‌کنند (Sarkar et al., 2021). به‌علاوه، از این مدل‌ها می‌توان برای ارزیابی ریسک‌های محیطی مانند خشکسالی، آلودگی خاک و رانش زمین استفاده کرد و راهکارهای پیشگیرانه را تدوین نمود. این رویکرد یکپارچه، کشاورزی را به سمت شیوه‌هایی هوشمندتر و پایدارتر هدایت می‌کند (Son et al., 2024).

در پارادایم جدید مذکور، این انسان است که با خلاقیت، تفکر انتقادی و دیدگاه جامع خود، مسیر پژوهش را تعیین می‌کند. هوش مصنوعی ابزاری بی‌نهایت قدرتمند برای تسریع این مسیر، کشف الگوهای پنهان و مدیریت پیچیدگی‌ها خواهد بود؛ اما هرگز جایگزین شهود و دانش عمیق یک متخصص خاک‌شناس نخواهد شد. آینده از آنِ کسانی است که بتوانند این دو دنیا را به بهترین شکل با یکدیگر پیوند دهند.

نقشه راه تحول دیجیتال در علوم خاک

برای تحقق کامل پتانسیل هوش مصنوعی در علوم خاک و حرکت به‌سوی کشاورزی پایدار، نیازمند یک نقشه راه استراتژیک و هماهنگ هستیم که بر محورهای کلیدی زیر استوار است. این نقشه راه، با الهام از پیشرفت‌های اخیر، مسیر تحول دیجیتال در خاک‌شناسی را ترسیم می‌کند.

توسعه زیرساخت داده: بنیان خاک‌شناسی دیجیتال

محور اصلی تحول دیجیتال، ایجاد و توسعه زیرساخت‌های داده‌ای قوی و یکپارچه است. این امر، مستلزم ایجاد پلتفرم‌های ملی و بین‌المللی برای اشتراک‌گذاری داده‌های استانداردشده خاک است تا پژوهشگران و متخصصان بتوانند به اطلاعات جامع

و قابل اعتماد دسترسی داشته باشند (Wadoux, 2025). در این راستا، دیجیتالی‌سازی آرشیوها و داده‌های تاریخی خاک، که گنجینه‌ای از اطلاعات کیفی و توصیفی هستند، اهمیت ویژه‌ای دارد. هوش مصنوعی مولد و تکنیک‌های پردازش متن می‌توانند این داده‌های ساختارنیافته را به فرمت‌های قابل جستجو و تحلیل تبدیل کنند (Khanifar, 2025). علاوه بر این، ترویج استفاده از حسگرهای کم‌هزینه اینترنت اشیاء (IoT) و سنجش از دور برای تولید داده‌های مکانی و زمانی با وضوح بالا ضروری است. این فناوری‌ها، از جمله تصاویر ماهواره‌ای چندطیفی و فراطیفی و پهپادها، امکان پایش مستمر پارامترهایی نظیر رطوبت، pH، دما و مواد آلی خاک را فراهم کرده و داده‌های لازم برای مدل‌های هوش مصنوعی را تأمین می‌کنند (Elakiya and Keerthana, 2024; Jana et al., 2024). ترکیب و یکپارچه‌سازی این داده‌های متنوع، دقت و قابلیت اطمینان مدل‌های پیش‌بینی‌کننده سلامت و امنیت خاک را به شکل چشمگیری افزایش می‌دهد (Jana et al., 2024).

ظرفیت‌سازی و آموزش: توانمندسازی نسل جدید متخصصان

برای بهره‌برداری مؤثر از فناوری‌های نوین، ظرفیت‌سازی و آموزش نیروی انسانی، یک ضرورت انکارناپذیر است. بازنگری در برنامه‌های درسی رشته‌های کشاورزی و علوم خاک برای گنجاندن مبانی علوم داده، یادگیری ماشین و هوش مصنوعی باید در اولویت قرار گیرد. برگزاری کارگاه‌های آموزشی برای توانمندسازی کشاورزان، به‌ویژه کشاورزان خرده‌پا در مناطق کم‌برخوردار، کارشناسان و پژوهشگران به‌منظور کاهش شکاف دیجیتال و افزایش پذیرش فناوری‌های هوشمند، امری حیاتی است (Nagraj, 2025; Nawaz and Babar, 2025). همچنین، حمایت از پروژه‌های تحقیقاتی بین‌رشته‌ای میان متخصصان خاک، دانشمندان کامپیوتر و مهندسان داده، به ایجاد نوآوری و توسعه مدل‌های کارآمدتر کمک می‌کند. این همکاری‌ها می‌تواند به توسعه مدل‌های یادگیری ماشین آگاه از علم خاک (SoilML) منجر شود که دانش تخصصی خاک‌شناسی را در ساختار خود ادغام می‌کنند (Minasny et al., 2024).

سیاست‌گذاری و اخلاق: تضمین استفاده مسئولانه از فناوری

همگام با پیشرفت فناوری، تدوین چارچوب‌های اخلاقی و قانونی برای استفاده مسئولانه از هوش مصنوعی ضروری است. این چارچوب‌ها باید بر موضوعاتی مانند حریم خصوصی و امنیت داده‌های حساس کشاورزی، مالکیت داده‌ها و عدالت در دسترسی به فناوری تمرکز کنند (Henrietta, 2024; Nagraj, 2025). دولت‌ها می‌توانند با ارائه مشوق‌های مالی، مانند اعتبارات و یارانه‌ها، شرکت‌های فناور و کشاورزان را به استفاده از راهکارهای هوشمند ترغیب کنند (Nawaz and Babar, 2025). علاوه بر این، حمایت از توسعه مدل‌های هوش مصنوعی متن‌باز و ایجاد پلتفرم‌های داده اشتراکی، از انحصار فناوری جلوگیری کرده و نوآوری را در سطح گسترده‌تری ترویج می‌دهد. استانداردسازی فرآیندهای جمع‌آوری و پردازش داده‌ها نیز برای اطمینان از کیفیت، قابلیت اطمینان و پایداری زیست‌محیطی فناوری‌های به‌کار رفته، نقشی کلیدی ایفا می‌کند (Anokhina et al., 2025).

تمرکز بر پژوهش‌های کاربردی

برای آنکه هوش مصنوعی تأثیری واقعی بر کشاورزی، به‌ویژه علوم خاک، داشته باشد؛ باید شکاف میان پژوهش‌های نظری و نیازهای عملیاتی کشاورزان پر شود. سرمایه‌گذاری در پروژه‌هایی که به توسعه مدل‌های هوش مصنوعی متناسب با شرایط محلی و بومی، به‌ویژه برای کشاورزان خرده‌پا در محیط‌های با منابع محدود می‌پردازند، از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از روندهای امیدوارکننده، توسعه مدل‌های قابل تفسیر است که با شفاف‌سازی نحوه تصمیم‌گیری مدل‌ها، به افزایش پذیرش و اعتماد کاربران کمک می‌کند (Wadoux, 2025). همچنین، پژوهش‌ها باید به سمت توسعه دوقلوهای دیجیتال خاک حرکت کنند. این مدل‌های مجازی با استفاده از داده‌های لحظه‌ای، می‌توانند سناریوهای آینده مانند تنش آبی یا فرسایش را شبیه‌سازی کرده و به مدیریت پیشگیرانه کمک کنند. در نهایت، ترکیب هوش مصنوعی مولد با سایر فناوری‌های نوظهور مانند سنجش از دور و اینترنت اشیاء، راه را برای نسل جدیدی از راه‌حل‌های یکپارچه برای مدیریت پایدار خاک هموار خواهد کرد.

نتیجه‌گیری

انقلاب هوشمند در علوم خاک، یک انتخاب نیست؛ بلکه یک ضرورت برای بقا و پیشرفت در قرن بیست و یکم است. هوش مصنوعی این قدرت را دارد که درک ما از خاک را از یک نگاه ایستا به یک دیدگاه پویا، چندبعدی و پیش‌بینانه ارتقا دهد. با

بهره‌گیری از این فناوری، می‌توانیم به سمت کشاورزی دقیق‌تر، مدیریت منابع کارآمدتر و حفاظت مؤثرتر از این بستر حیاتی حرکت کنیم. با این حال، این انقلاب هوشمند، بدون چالش نیست. موفقیت آینده این حوزه در گرو حرکت از مدل‌های "جعبه سیاه" صرفاً داده‌محور به سمت مدل‌های "جعبه شیشه‌ای" و آگاه از علم خاک است. جامعه علمی باید بر توسعه مدل‌های بومی، استانداردسازی داده‌ها و ایجاد همکاری‌های تنگاتنگ میان متخصصان خاک و دانشمندان داده تمرکز کند.

پیام اصلی این مقاله روشن است: "ما به‌عنوان جامعه علمی خاک‌شناسی، باید فعالانه این تحول را در آغوش بگیریم". این به معنای جایگزینی دانش تخصصی ما با الگوریتم‌ها نیست؛ بلکه به معنای توانمندسازی دانش ما با ابزارهای هوشمند است. بزرگترین خطر، غرق شدن در پیچیدگی الگوریتم‌ها و فراموش کردن این نکته است که هدف نهایی، درک عمیق‌تر و مدیریت بهتر سیستم زنده و پویای خاک است. هرچند چالش‌های پیش رو جدی هستند، اما فرصت‌ها برای نوآوری و ایجاد تأثیر مثبت، بی‌کران می‌باشند. با همکاری، سرمایه‌گذاری هوشمندانه و نگاهی مسئولانه، می‌توانیم اطمینان حاصل کنیم که انقلاب هوشمند، آینده‌ای پایدار و امن برای خاک و بشریت رقم خواهد زد. بنابراین، پژوهش‌های آتی باید بر توسعه مدل‌های ترکیبی که قدرت پیش‌بینی یادگیری ماشین را با درک فرآیندی مدل‌های فیزیکی خاک تلفیق می‌کنند، متمرکز شوند.

منابع

Anokhina, O., Musaeva, M., Grace, A. (2025). Engineering and technological aspects of the application of artificial intelligence models in modern agriculture. In ITM Web of Conferences (Vol. 72, p. 03004). EDP Sciences.

Aziz, D., Rafiq, S., Saini, P., Ahad, I., Gonal, B., Rehman, S. A., ... , Nabila Iliya, M. (2025). Remote sensing and artificial intelligence: revolutionizing pest management in agriculture. Frontiers in Sustainable Food Systems, 9, 1551460.

Elakiya, N., Keerthana, G. (2024). Application of artificial neural networks in soil science research. Archives of Current Research International, 24(5), 1-15.

Eli-Chukwu, N. C. (2019). Applications of artificial intelligence in agriculture: A review. Engineering, Technology & Applied Science Research, 9(4), 4377-4383.

Espinel, R., Herrera-Franco, G., Rivadeneira García, J. L., Escandón-Panchana, P. (2024). Artificial intelligence in agricultural mapping: A review. Agriculture, 14(7), 1071.

Henrietta, H. M. (2024). Artificial intelligence in agriculture: a review of current applications and future trends. Intelligent Futuristic Trends in Agriculture Engineering & Food Sciences; Selfypage Developers Pvt. Ltd.: Chikmagalur, India, 3, 1-6.

Jain, S., Sethia, D. (2023, May). A review on applications of artificial intelligence for identifying soil nutrients. In International conference on agriculture-centric computation (pp. 71-86). Cham: Springer Nature Switzerland.

Jana, S., Chatterjee, D., Pal, N., Pal, K., Roy, K., Bashak, S. (2024). AI in soil health monitoring: A data-driven approach. International Journal for Science Technology and Engineering, 12(10), 1327-1335.

Khanifar, J. (2025). Generative artificial intelligence in soil science. Soil Advances, 100069.

Minasny, B., Bandai, T., Ghezzehei, T. A., Huang, Y. C., Ma, Y., McBratney, A. B., ..., Widyastuti, M. (2024). Soil science-informed machine learning. Geoderma, 452, 117094.

Nagraj, C. (2025). AI-based soil health monitoring using remote sensing and deep learning. IJARIIE, 11(2), 3212-3217.

Nawaz, M., Babar, M. I. K. (2025). IoT and AI for smart agriculture in resource-constrained environments: challenges, opportunities and solutions. Discover internet of things, 5(1), 24.

Oliveira, R. C. D., Silva, R. D. D. S. E. (2023). Artificial intelligence in agriculture: benefits, challenges, and trends. Applied Sciences, 13(13), 7405.

Sarkar, A., Maity, P. P., Mukherjee, A. (2021). Application of AI in soil science. Technology, 62, 131-136.

Savita, R., Satpal, B., Akshay, M. (2024). AI-driven insights into soil physico-chemical properties. International Journal of Environment and Climate Change, 14(12), 834-845.

Son, N., Chen, C. R., Syu, C. H. (2024). Towards artificial intelligence applications in precision and sustainable agriculture. Agronomy, 14(2), 239.

Wadoux, A. M. C. (2025). Artificial intelligence in soil science. European Journal of Soil Science, 76(2), e70080.

The Intelligent Revolution: A Vision for the Application of Artificial Intelligence in Soil Science

Isa Esfandiarpour-Boroujeni[1]*

1. Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan
*Corresponding Author's Email: esfandiarpoor@vru.ac.ir

Abstract

In recent decades, artificial intelligence (AI) has emerged as one of the most influential transformative technologies, gaining a prominent position in soil science. The intrinsic complexity of soil systems, the limitations of conventional analytical methods, and the growing need for sustainable natural resource management have fostered the integration of machine learning (ML) and deep learning (DL) algorithms in this field. This paper, through a review and analytical approach, provides a comprehensive examination of the key applications of AI in soil science. The findings indicate that AI and its subfields- particularly ML and DL- have shown high efficiency in predicting soil physicochemical properties, monitoring soil health and quality, digital soil mapping, managing water and nutrient resources, and estimating crop yield. However, challenges such as insufficient high-quality data, model complexity, and the "black-box" nature of algorithms continue to hinder the full adoption of this technology in field applications. Looking toward the future, the development of explainable AI (XAI), the integration of multi-source data, and the utilization of generative AI and soil digital twins are expected to open new pathways for deeper understanding and smarter management of soils. Overall, the intelligent revolution in soil science does not signify a replacement of human expertise with algorithms; rather, it represents an empowerment tool that strengthens scientific knowledge toward sustainable agriculture and data-driven decision-making.

Keywords: Soil Digital Twin, Precision Agriculture, Sustainable Soil Management, Deep Learning, Machine Learning.