



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



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۴ تا ۱۳ آذر ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



کاربرد فناوری‌های هوشمند در مدیریت و حفاظت خاک

سید حسین بنی‌طبا^{۱*}، علیرضا آل‌ابراهیم^۲

^۱بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران؛ *banitaba_h@areeo.ac.ir

چکیده

هوش مصنوعی با ارائه امکانات بی‌نظیر در تحلیل داده‌ها و مدل‌سازی پیچیده، انقلابی در علوم مختلف ایجاد کرده و علم خاک نیز از این قاعده مستثنی نیست. کاربرد روزافزون هوش مصنوعی در تحقیقات خاک، از پیش‌بینی دقیق ذخایر کربن تا توسعه سیستم‌های تصمیم‌یار هوشمند برای ارزیابی عملکرد خاک، گواهی بر این مدعاست. استخراج خودکار ابر داده از منابع علمی و تحلیل تصاویر دیجیتال مقاطع خاک با هدف شناسایی ترکیبات معدنی، تنها نمونه‌هایی از توانمندی‌های هوش مصنوعی در این حوزه هستند. در این رویکردها، سیستم‌های هوش مصنوعی به منظور انجام وظایف خاص با حداقل نیاز به دخالت انسانی طراحی و آموزش داده می‌شوند. این مقاله با بررسی عمیق کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت و حفاظت خاک، ضمن معرفی فرصت‌های پیش رو، چالش‌های موجود در مسیر توسعه و پیاده‌سازی این فناوری‌های نوین را نیز مورد واکاوی قرار می‌دهد.

واژگان کلیدی: هوش مصنوعی، مدیریت خاک، حفاظت خاک، کشاورزی دقیق

مقدمه

هوش مصنوعی^۱ پتانسیل قابل توجهی در پیشرفت دانش علمی، از جمله در حوزه علم خاک، نشان داده است. در دهه‌های اخیر، تحقیقات متعددی به کاربرد تکنیک‌های هوش مصنوعی در مطالعات خاک پرداخته‌اند. به عنوان مثال، الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی ذخایر کربنی خاک در فضا و زمان با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده و عوامل محیطی خاک به کار گرفته شده‌اند (Heuvelink et al., 2021). همچنین، سیستم‌های تصمیم‌گیری توسعه یافته‌اند تا عملکردهای خاک در اراضی کشاورزی را ارزیابی کنند (Debeljak et al., 2019). از طرف دیگر، پردازش زبان طبیعی به استخراج خودکار متادیتا از منابع علمی خاک کمک کرده است (Blanchy et al., 2023)، در حالی که الگوریتم‌های تحلیل تصویر در تشخیص اجزای معدنی و غیرمعدنی خاک از طریق مقاطع نازک خاک به کار گرفته شده‌اند (Aydemir et al., 2004). این مثال‌ها نشان می‌دهند که چگونه سیستم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی برای انجام وظایف مختلف به صورت طراحی یا آموزش داده می‌شوند. در هر یک از این کاربردها، یک سامانه به منظور دستیابی به یک هدف مشخص با استفاده از سطحی از خودمختاری، طراحی یا آموزش داده می‌شود. این اهداف می‌توانند شامل پیش‌بینی فضایی، ارزیابی کارکردهای خاک، تولید فراتحلیل‌ها، یا شناسایی خودکار ویژگی‌های خاک باشند.

¹ Artificial Intelligence



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



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۴۰۴ آذر ۱۳ تا ۱۱



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



توسعه فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی از دهه ۲۰۱۰ در تمامی حوزه‌های علم و صنعت به شدت افزایش یافته است. «شاخص هوش مصنوعی» که سالانه توسط هیئت متخصصان 100 هوش مصنوعی منتشر می‌شود (Nestor et al., 2024)، نشان‌دهنده افزایش چشمگیر در تحقیقات هوش مصنوعی است، به طوری که تنها انتشارات مرتبط با یادگیری ماشین از سال ۲۰۱۵ تقریباً هفت برابر شده است. این افزایش ناشی از سرمایه‌گذاری‌های بزرگ بخش خصوصی و در نتیجه، افزایش قابل توجه در تعداد اختراعات هوش مصنوعی است. علوم خاک نیز از این قاعده مستثنی نیست، و بررسی‌های متعددی (e.g., Padarian et al., 2020; Grunwald 2022; Chen et al., 2022; Minasny et al., 2024) همچنان پیرامون کاربردهای هوش مصنوعی در تحقیقات خاک را برجسته می‌کنند.

با توجه به اهمیت روزافزون هوش مصنوعی در علوم خاک و نقش حیاتی حفاظت خاک و مدیریت پایدار آن در تضمین امنیت غذایی و حفظ محیط زیست، این مقاله به بررسی جامع کاربردهای هوش مصنوعی در این زمینه می‌پردازد. هدف از این بررسی، ارائه چشم‌اندازی روشن از پتانسیل‌ها و چالش‌های پیش روی استفاده از هوش مصنوعی در حفاظت خاک و مدیریت آن، و در نهایت کمک به توسعه راهکارهای نوآورانه و مؤثر برای حل مشکلات مرتبط با این حوزه است.

بحث

فناوری هوش مصنوعی شامل زیرشاخه‌هایی مانند یادگیری ماشین^۲ (ML)، یادگیری عمیق^۳ (DL)، پردازش زبان طبیعی^۴ (NLP) می‌باشد که کاربردهای زیادی در زمینه حفاظت آب و خاک دارد.

یادگیری ماشین زیرشاخه‌ای از هوش مصنوعی است که روی توسعه الگوریتم‌ها و مدل‌هایی متمرکز می‌شود که به کامپیوترها اجازه می‌دهند از طریق داده‌ها یاد بگیرند و بدون برنامه‌نویسی صریح تصمیم بگیرند. به عبارت دیگر، یادگیری ماشین به ماشین‌ها یاد می‌دهد که با دیدن نمونه‌ها (داده‌ها)، الگوها را تشخیص دهند و پیش‌بینی‌های دقیقی انجام دهند. به عنوان مثال اگر به یک سیستم ۱۰۰۰ تصویر از خاک‌های مختلف را نشان دهیم و به هر کدام اسم "رسی"، "لومی"، "شنی" بدهیم (داده‌های برچسب‌دار)، الگوریتم یادگیری ماشین می‌تواند یاد بگیرد که در تصاویر جدید، نوع خاک را به درستی تشخیص دهد (Heuvelink et al., 2021). یادگیری عمیق نوعی از یادگیری ماشین است که بر پایه شبکه‌های عصبی مصنوعی ساخته شده است. این شبکه‌ها الهام گرفته از نحوه عملکرد مغز انسان هستند و می‌توانند الگوها و روابط پنهان در داده‌های پیچیده را تشخیص دهند. تفاوت اصلی یادگیری عمیق با یادگیری ماشین سنتی در این است که یادگیری عمیق قادر است ویژگی‌های مرتبط با خروجی را به صورت خودکار از روی داده‌ها یاد بگیرد، در حالی که در یادگیری ماشین معمولی، این انسان است که ویژگی‌ها را به صورت دستی استخراج می‌کند. این روش می‌تواند در پیش‌بینی خواص خاک، پیش‌بینی مصرف آب شهری، تشخیص و طبقه‌بندی خاک و مدیریت خاک در کشاورزی هوشمند مورد استفاده قرار گیرد (Alexandre and Wadoux, 2025).

در سال‌های اخیر، کاربرد یادگیری عمیق در مطالعات خاکشناسی با استقبال چشمگیری روبرو شده و نتایج مثبتی به همراه داشته است. به عنوان مثال، (Padarian et al. 2019) با استفاده از این تکنیک در نقشه‌برداری دیجیتال خاک، بهبود دقت و کارایی در این فرایند را نشان دادند. همچنین، (Shen and Viscarra Rossel, 2021) با به‌کارگیری مدل‌های یادگیری عمیق

² Machine learning

³ Deep Learning

⁴ Natural Language Processing



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



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۴۰۴ آذر ۱۳ تا ۱۱



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



برای پیش‌بینی خواص خاک از داده‌های طیف‌سنجی، توانستند نتایج دقیق‌تری نسبت به روش‌های سنتیبه دست آورند. (Lavrukhin et al. 2021) نیز با استفاده از یادگیری عمیق برای طبقه‌بندی منافذ خاک در تصاویر CT، سرعت و دقت تحلیل تصاویر را به طور قابل توجهی افزایش دادند علاوه بر این، (Wadoux et al. 2023) با استفاده از مفاهیم Explainable AI برای تفسیر مدل‌های یادگیری عمیق در پیش‌بینی ذخایر کربن خاک، اعتبار و قابلیت اعتماد این مدل‌ها را افزایش داده و امکان درک بهتر عوامل مؤثر بر ذخایر کربن خاک را فراهم کردند این مطالعات نشان می‌دهند که یادگیری عمیق، پتانسیل بالایی در ارتقای دانش و مدیریت خاک دارد.

پردازش زبان طبیعی (NLP)، یک حوزه میان‌رشته‌ای در هوش مصنوعی و زبان‌شناسی محاسباتی است که به توسعه سیستم‌هایی می‌پردازد که قادر به درک، تفسیر، تولید و دستکاری زبان انسانی به شیوه‌ای هوشمندانه هستند. این سیستم‌ها با استفاده از الگوریتم‌ها و مدل‌های آماری پیچیده، قادر به تحلیل ساختار زبانی، معناشناسی و روابط مفهومی در متون هستند. در حوزه علوم خاک، پردازش زبان طبیعی به عنوان یک ابزار تحلیلی قدرتمند ظهور کرده است. این تکنیک امکان استخراج خودکار اطلاعات ارزشمند از حجم وسیعی از منابع متنی ناهمگن مانند مقالات علمی، گزارش‌های میدانی، داده‌های زمین‌شناسی و نقشه‌های خاک را فراهم می‌کند. کاربردهای پردازش زبان طبیعی در این زمینه شامل شناسایی و استخراج کلیدواژه‌ها و مفاهیم مرتبط با ویژگی‌های خاک، طبقه‌بندی و تحلیل محتوای متون به منظور استخراج الگوهای مرتبط با سلامت خاک، و همچنین خلاصه‌سازی و ترکیب اطلاعات پراکنده در منابع مختلف به منظور پشتیبانی از تصمیم‌گیری در مدیریت پایدار منابع خاک است. این امکانات، پردازش زبان طبیعی را به ابزاری حیاتی در تحقیقات خاک‌شناسی و مدیریت منابع طبیعی تبدیل کرده است.

پردازش زبان طبیعی (NLP) به عنوان ابزاری قدرتمند در علوم خاک ظاهر شده و کاربردهای متنوعی را ارائه می‌دهد. برای مثال، پردازش زبان طبیعی می‌تواند در استخراج اطلاعات کلیدی از متون علمی استفاده شود (Hartemink and McBratney 2008). این امکان به محققان کمک می‌کند تا حجم زیادی از داده‌ها را به سرعت تجزیه و تحلیل کرده و دانش جدیدی کسب کنند. یکی دیگر از کاربردهای مهم پردازش زبان طبیعی، طبقه‌بندی خاک و ردیابی تغییرات آن در طول زمان است (Zhang and Berndtsson, 1991). این تکنیک می‌تواند با بررسی گزارش‌های خاک، به شناسایی انواع خاک و تغییرات در ویژگی‌های آن‌ها کمک کند. علاوه بر این، پردازش زبان طبیعی در خلاصه‌سازی و تولید متن نیز کاربرد دارد. به عنوان مثال، می‌توان از آن برای خلاصه کردن گزارش‌های طولانی خاک (Agnihotri et al., 2021) یا حتی تولید توصیه‌های مدیریتی سفارشی استفاده کرد. با پیشرفت تکنولوژی، سیستم‌های پاسخگویی به پرسش و چت بات مبتنی بر NLP نیز در دسترس قرار گرفته‌اند (به عنوان مثال، Soil chatbot، دانشگاه کالیفرنیا، دیویس). این سیستم‌ها به کاربران امکان می‌دهند تا سوالات خود را به زبان طبیعی مطرح کرده و پاسخ‌های مرتبط را دریافت کنند. در نهایت، پردازش زبان طبیعی می‌تواند به بهبود جستجوی اطلاعات مرتبط با علوم خاک کمک کند (Jones et al., 2021) با استفاده از تکنیک‌های پردازش زبان طبیعی، سیستم‌های جستجو می‌توانند نتایج دقیق‌تری را برای سوالات کاربران ارائه دهند.

کاربردهای هوش مصنوعی در حفاظت خاک:

شناسایی و پیش‌بینی فرسایش خاک

هوش مصنوعی به کمک الگوریتم‌های یادگیری ماشین قادر است با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، تصاویر هوایی و داده‌های زمینی، مناطق آسیب‌پذیر از لحاظ فرسایش خاک را شناسایی کند. به عنوان مثال، پال و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از هوش



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



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۴۰۴ آذر ۱۳ تا ۱۱



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



مصنوعی با موفقیت توانستند فرسایش خاک را در مناطق نیمه‌خشک و کوهستانی پیش‌بینی کنند (Chakraborty et al., 2023).

ارزیابی کیفیت خاک

هوش مصنوعی می‌تواند از طریق تحلیل داده‌های طیف‌سنجی (مانند NIR و MIR) و داده‌های آزمایشگاهی، متغیرهای کیفیت خاک مانند مقدار کربن آلی، pH و ظرفیت تبادل کاتیونی را به صورت دقیق و در مقیاس گسترده پیش‌بینی کند (Albinet et al., 2022).

مدیریت و حفاظت از ذخایر کربن خاک

با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین، محققان می‌توانند تغییرات کربن آلی خاک را در فضا و زمان پیش‌بینی کنند. این امر به برنامه‌ریزان کمک می‌کند تا استراتژی‌های کاهش انتشار کربن را بهینه‌تر طراحی کنند (Heuvelink et al., 2021).

تحلیل تصاویر دیجیتال و تشخیص ویژگی‌های خاک

با استفاده از پردازش تصویر دیجیتال، محققان می‌توانند از طریق تصاویر CT و X-Ray، ساختار خاک و عناصر معدنی را با دقت بالا تحلیل کنند. به عنوان مثال، Aydemir و همکاران (۲۰۰۴) با استفاده از هوش مصنوعی، اجزای معدنی و غیرمعدنی خاک را در مقاطع نازک شناسایی کردند (Aydemir et al., 2004).

مدیریت خاک در کشاورزی دقیق

هوش مصنوعی در کشاورزی دقیق، به بهینه‌سازی کاربرد کود، آبیاری و مدیریت خاک کمک می‌کند. ربات‌های خاک‌برداری و سیستم‌های تحلیل خودکار با استفاده از روباتیک و دید ماشینی قادر به تشخیص وضعیت خاک در محل کشاورزی هستند (Iqbal et al., 2020).

چالش‌ها و محدودیت‌های هوش مصنوعی در مدیریت خاک:

چالش‌ها و محدودیت‌های متعددی در استفاده از هوش مصنوعی در مدیریت خاک وجود دارد که باید مورد توجه قرار گیرند.

کیفیت و کمیت داده:

یکی از بزرگترین چالش‌ها، نیاز به داده‌های با کیفیت و کمیت مناسب است (Adamchuk, 2010 & Gebbers). مدل‌های هوش مصنوعی برای یادگیری و ارائه پیش‌بینی‌های دقیق، به حجم زیادی از داده‌های ورودی نیاز دارند. در بسیاری از مناطق، داده‌های خاک با دقت کافی و به صورت جامع جمع‌آوری نشده‌اند، که این امر می‌تواند عملکرد مدل‌های هوش مصنوعی را محدود کند.

تفسیرپذیری مدل‌ها: بسیاری از مدل‌های پیشرفته هوش مصنوعی، مانند شبکه‌های عصبی عمیق، به عنوان "جعبه سیاه" شناخته می‌شوند (Castelletti et al., 2021). این بدان معناست که درک چگونگی رسیدن مدل به یک نتیجه خاص دشوار است. این عدم شفافیت می‌تواند اعتماد به نتایج را کاهش دهد و مانع از پذیرش گسترده این فناوری شود، به ویژه در مواردی که تصمیم‌گیری‌های مهم بر اساس خروجی مدل‌ها انجام می‌شود.

تعمیم‌پذیری مدل‌ها: مدل‌های هوش مصنوعی که برای یک منطقه خاص آموزش داده شده‌اند، ممکن است به خوبی در مناطق دیگر با شرایط متفاوت عمل نکنند (Gholami et al., 2022). خاک یک محیط بسیار پیچیده و متغیر است، و ویژگی‌های آن می‌تواند به طور قابل توجهی در مکان‌های مختلف متفاوت باشد. برای اطمینان از عملکرد مناسب



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



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۴۰۴ آذر ۱۳ تا ۱۱



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



مدل‌ها، لازم است که آن‌ها با داده‌های متنوع و نماینده آموزش داده شوند یا به طور مداوم با داده‌های جدید به‌روزرسانی شوند.

هزینه و دسترسی: پیاده‌سازی و نگهداری سیستم‌های هوش مصنوعی می‌تواند پرهزینه باشد (McBratney et al., 2003). جمع‌آوری داده‌های با کیفیت، آموزش مدل‌ها و نگهداری سخت‌افزار و نرم‌افزار مورد نیاز، همگی هزینه‌های قابل توجهی را به همراه دارند. علاوه بر این، دسترسی به تخصص فنی لازم برای توسعه و پیاده‌سازی این سیستم‌ها ممکن است برای بسیاری از کشاورزان و سازمان‌های کوچک محدود باشد.

مسائل اخلاقی و اجتماعی: استفاده از هوش مصنوعی در مدیریت خاک می‌تواند مسائل اخلاقی و اجتماعی را نیز به همراه داشته باشد (Lobell et al., 2018). برای مثال، الگوریتم‌های هوش مصنوعی ممکن است ناخواسته سوگیری‌هایی را در خود جای دهند که منجر به تصمیم‌گیری‌های ناعادلانه یا تبعیض‌آمیز شوند. همچنین، استفاده از هوش مصنوعی می‌تواند منجر به از دست رفتن شغل در برخی از بخش‌های کشاورزی شود.

آینده هوش مصنوعی در حفاظت خاک:

آینده هوش مصنوعی در حفاظت خاک بسیار امیدوارکننده به نظر می‌رسد و انتظار می‌رود که نقش فزاینده‌ای در مدیریت پایدار منابع خاک ایفا کند (Zhang et al., 2020). با پیشرفت‌های مداوم در الگوریتم‌های یادگیری ماشین، حسگرها و قدرت محاسباتی، هوش مصنوعی قادر خواهد بود تا به طور مؤثرتری چالش‌های پیچیده مرتبط با حفاظت خاک را حل کند.

یکی از زمینه‌های کلیدی که هوش مصنوعی در آن نقش مهمی ایفا خواهد کرد، پایش و پیش‌بینی فرسایش خاک است (Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2020). با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، تصاویر هوایی، داده‌های هواشناسی و اطلاعات مربوط به کاربری اراضی، مدل‌های هوش مصنوعی می‌توانند مناطق آسیب‌پذیر در برابر فرسایش را با دقت بالایی شناسایی کرده و میزان فرسایش را در آینده پیش‌بینی کنند. این امر به برنامه‌ریزان و مدیران منابع طبیعی کمک می‌کند تا اقدامات پیشگیرانه و ترمیمی مناسب را در زمان و مکان مناسب انجام دهند.

هوش مصنوعی همچنین می‌تواند در بهبود مدیریت حاصلخیزی خاک و استفاده بهینه از کودها نقش داشته باشد (Khaki et al., 2022). با تحلیل داده‌های مربوط به خصوصیات خاک، نیازهای گیاهی و شرایط آب و هوایی، مدل‌های هوش مصنوعی می‌توانند توصیه‌های دقیق‌تری در مورد میزان و نوع کود مورد نیاز ارائه دهند. این امر به کاهش مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی، جلوگیری از آلودگی منابع آب و خاک و افزایش بهره‌وری کشاورزی کمک می‌کند.

علاوه بر این، هوش مصنوعی می‌تواند در توسعه سیستم‌های تصمیم‌گیری هوشمند برای مدیریت خاک مورد استفاده قرار گیرد (Das et al., 2021). این سیستم‌ها می‌توانند اطلاعات مختلف مربوط به خاک، آب و هوا، گیاهان و عوامل اقتصادی را به طور یکپارچه تحلیل کرده و توصیه‌هایی برای انتخاب بهترین روش‌های مدیریت خاک، تناوب زراعی و حفاظت از منابع طبیعی ارائه دهند. این سیستم‌ها می‌توانند به ویژه برای کشاورزان کوچک و متوسط که دسترسی محدودی به اطلاعات و تخصص فنی دارند، بسیار مفید باشند.

در نهایت، انتظار می‌رود که هوش مصنوعی نقش مهمی در افزایش آگاهی عمومی و آموزش در زمینه حفاظت خاک ایفا کند (Bhattacharyya et al., 2015). با توسعه برنامه‌های کاربردی موبایل و پلتفرم‌های آنلاین، هوش مصنوعی می‌تواند اطلاعات مربوط به خاک و روش‌های حفاظت از آن را به شیوه‌ای جذاب و قابل دسترس برای عموم مردم ارائه دهد. این امر می‌تواند به افزایش آگاهی و مشارکت مردم در حفاظت از منابع خاک کمک کند.



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



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۴ تا ۱۶ آذر ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



کاربرد هوش مصنوعی در مدل سازی رطوبت و خواص هیدرولیکی خاک

مدل سازی رطوبت خاک نقش اساسی در مدیریت منابع آب و برنامه ریزی کشاورزی دارد. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل های کلاسیک فیزیکی مانند معادلات ریچاردز و مدل های هیدرولوژیکی، علی رغم توانایی در شبیه سازی فرآیندهای فیزیکی خاک، به شدت به داده های ورودی دقیق وابسته هستند. خصوصیات هیدرولیکی خاک نظیر هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع، ظرفیت نگهداری آب، منحنی رطوبت-مکش و بافت خاک نقش تعیین کننده ای در عملکرد این مدل ها دارند. تغییرات جزئی در این پارامترها می تواند دقت پیش بینی رطوبت خاک را به طور چشمگیری تحت تأثیر قرار دهد. به عنوان مثال، خاک های رسی به دلیل ظرفیت بالای نگهداری آب، رفتار متفاوتی نسبت به خاک های شنی با نفوذپذیری بالا نشان می دهند و این موضوع در شبیه سازی ها باید لحاظ شود.

از سوی دیگر، کاربرد هوش مصنوعی و به ویژه روش های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق توانست نتایج دقیق تری در پیش بینی تغییرات زمانی و مکانی رطوبت خاک ارائه دهد. استفاده از شبکه های عصبی بازگشتی در مطالعات اخیر نشان داده است که این مدل ها قادر به شناسایی وابستگی های زمانی پیچیده بین متغیرهای اقلیمی (بارش، دما، تبخیر-تعرق) و خصوصیات هیدرولیکی خاک هستند و در نتیجه پیش بینی های دقیق تری فراهم می کنند (Azad et al., 2025). همچنین، ترکیب داده های سنجش از دور با ویژگی های هیدرولیکی خاک و استفاده از الگوریتم های یادگیری عمیق، امکان پایش رطوبت خاک در مقیاس های وسیع را فراهم می سازد (Liu et al., 2022).

با این وجود، مدل های هوش مصنوعی نیز محدودیت هایی دارند؛ از جمله نیاز به داده های آموزشی گسترده و خطر بیش برآزش، به ویژه در شرایطی که داده های هیدرولیکی خاک در مقیاس محلی کم یا ناموجود باشد. بنابراین، توسعه مدل های ترکیبی که هم فرآیندهای فیزیکی و هیدرولیکی را در نظر می گیرند و هم قابلیت پیش بینی داده محور هوش مصنوعی را دارند، می تواند راهکار مناسبی برای غلبه بر محدودیت های هر دو رویکرد باشد (Nearing et al., 2021). در مدل سازی رطوبت خاک، روش های سنتی فیزیکی به دلیل توضیح پذیری بالا و تکیه بر خصوصیات هیدرولیکی، ابزار ارزشمندی برای درک فرآیندهای انتقال آب هستند؛ اما محدودیت آن ها در شرایط داده های ناقص و محیط های پیچیده باعث کاهش دقت می شود. در مقابل، روش های هوش مصنوعی با بهره گیری از الگوریتم های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق قادرند روابط غیرخطی پیچیده را شناسایی کرده و پیش بینی های دقیق و سریعی ارائه دهند. با این حال، نیاز بالا به داده آموزشی و خطر بیش برآزش از چالش های اصلی آن هاست. بنابراین، استفاده از مدل های ترکیبی که هم از قدرت تبیینی مدل های فیزیکی و هم از دقت پیش بینی هوش مصنوعی بهره مند باشند، می تواند بهترین راهکار برای آینده باشد.



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



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۴ تا ۱۳ آذر ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



□ جدول مقایسه روش‌های سنتی و هوش مصنوعی در مدل‌سازی رطوبت خاک

ویژگی	روش‌های سنتی (مدل‌های فیزیکی/هیدرولوژیکی)	روش‌های هوش مصنوعی (ML/DL)
توضیح‌پذیری	بالا؛ بر پایه معادلات فیزیکی قابل تفسیر	پایین‌تر؛ اغلب جعبه‌سیاه و غیرقابل تفسیر
وابستگی به داده	نیازمند داده‌های دقیق خصوصیات هیدرولیکی (هدایت هیدرولیکی، منحنی رطوبت-مکش)	نیاز به داده‌های آموزشی بزرگ و متنوع
مدل‌سازی فرآیندی	توانمند در توضیح مکانیزم‌های فیزیکی انتقال آب در خاک	توانمند در شناسایی روابط غیرخطی پیچیده
انعطاف‌پذیری	محدود در شرایط پیچیده و داده‌های ناقص	بالا؛ قابل بومی‌سازی برای اقلیم‌ها و خاک‌های مختلف
سرعت پیش‌بینی	پایین؛ محاسبات همدی زمان‌بر	بالا؛ پس از آموزش مدل، پیش‌بینی سریع
کاربرد اصلی	فهم مکانیزم‌ها، تحلیل فرآیندی	پیش‌بینی دقیق و سریع، مدیریت عملیاتی

هوشمندسازی و مدیریت منابع خاک در ایران

در ایران نیز هوش مصنوعی در حوزه هوشمندسازی و مدیریت منابع خاک کاربردهای گسترده‌ای یافته است. در ادامه، به برخی از این کاربردها اشاره می‌شود:

۱. پیش‌بینی و مدل‌سازی رطوبت خاک

پژوهشگران ایرانی با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، مدل‌هایی برای پیش‌بینی رطوبت خاک توسعه داده‌اند. این مدل‌ها با تحلیل داده‌های محیطی و خاکی، به کشاورزان کمک می‌کنند تا زمان و میزان آبیاری را به صورت بهینه تعیین کنند.

۲. طراحی و ساخت سنجنده‌های رطوبت خاک با استفاده از هوش مصنوعی

محققان دانشگاه تهران با بهره‌گیری از فناوری‌های هوش مصنوعی، سنجنده‌هایی برای اندازه‌گیری رطوبت خاک طراحی کرده‌اند. این سنجنده‌ها به کشاورزان امکان می‌دهند تا وضعیت رطوبت خاک را در زمان واقعی پایش کرده و تصمیمات بهتری در زمینه آبیاری اتخاذ کنند.

۳. بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی



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



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۴۰۴ آذر ۱۳ تا ۱۱



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



استفاده از سیستم‌های هوش مصنوعی در کشاورزی به کاهش مصرف آب کمک کرده است. این سیستم‌ها با تحلیل داده‌های رطوبت خاک، شرایط آب و هوایی و نیازهای گیاهان، زمان و میزان آبیاری را به صورت دقیق تعیین می‌کنند، که منجر به صرفه‌جویی در منابع آبی می‌شود.

۴. مدل‌سازی منحنی مشخصه رطوبتی خاک

در مطالعاتی در شمال و شمال شرق ایران، از مدل‌های هوش مصنوعی برای مدل‌سازی منحنی مشخصه رطوبتی خاک استفاده شده است. این مدل‌ها به‌ویژه در شرایطی که داده‌های آزمایشگاهی محدود هستند، می‌توانند به‌عنوان ابزارهای مفیدی برای تخمین ویژگی‌های خاک به کار روند.

۵. مدیریت پایدار منابع آب و خاک با استفاده از داده‌های سنجش از دور

پروژه‌هایی در ایران با استفاده از داده‌های سنجش از دور و الگوریتم‌های هوش مصنوعی، به تحلیل الگوهای کشت و مدیریت پایدار منابع آب و خاک پرداخته‌اند. این رویکردها به بهبود بهره‌وری اراضی و استفاده بهینه از منابع طبیعی کمک می‌کنند. در مجموع، استفاده از هوش مصنوعی در مدیریت منابع خاک در ایران، به‌ویژه در زمینه پیش‌بینی رطوبت خاک، بهینه‌سازی مصرف آب و طراحی ابزارهای اندازه‌گیری هوشمند، گام‌های مؤثری در جهت کشاورزی پایدار و بهره‌وری بیشتر برداشته است.

نتیجه‌گیری:

هوش مصنوعی با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و پردازش داده‌های مکانی-زمانی، ابزار مؤثری برای مدیریت خاک فراهم می‌کند. این فناوری قادر است مناطق با ریسک فرسایش و شوری بالا را به صورت دقیق شناسایی کرده و پیش‌بینی‌های بهینه برای تخصیص منابع حفاظتی ارائه دهد. از نظر کاربردی، استفاده از سامانه‌های هوشمند پایش خاک، ترکیب داده‌های سنجش از دور و حسگرهای خاک، و تدوین سیاست‌های حفاظتی مبتنی بر داده‌های پیش‌بینی شده، می‌تواند بهره‌وری کشاورزی را افزایش دهد و هزینه‌های مدیریتی را کاهش دهد. اولویت‌های تحقیقاتی شامل توسعه الگوریتم‌های پیش‌بینی بلندمدت خاک، بررسی اثر تغییرات اقلیمی بر پارامترهای هیدرولیکی خاک و مطالعات میدانی در مناطق مختلف ایران برای اعتبارسنجی مدل‌هاست. به این ترتیب، هم‌افزایی هوش مصنوعی و علوم خاک، فرصت‌های عملی گسترده‌ای برای حفاظت پایدار و بهبود مدیریت منابع خاک فراهم می‌کند.

فهرست منابع

- Agnihotri, D., Kumar, T., & Jhariya, D. (2021). Intelligent Vulnerability Prediction of Soil Erosion Hazard in Semi- Arid and Humid Region. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 2524–2551.
- Azad, A., et al. (2025). Applying LSTM to model multi-depth soil moisture under different land covers. *European Journal of Soil Science*, 76 (4), e70142.
- Aydemir, S., Keskin, S., & Drees, L. R. (2004). Quantification of Soil Features Using Digital Image Processing (DIP) Techniques. *Geoderma*, 119, 1–8.



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



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۴۰۴ آذر ۱۳ تا ۱۱



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



Bhattacharyya, R., Das, T.K., Sudhishri, S., Dudwal, B., Sharma, A.R., Bhatia, A., & Singh, G. (2015). Conservation agriculture effects on soil organic carbon accumulation and crop productivity under a rice–wheat cropping system in the western Indo-Gangetic Plains. *European Journal of Agronomy*, 70, 11-21.

Blanchy, G., Albrecht, L., Koestel, J., & Garré, S. (2023). Potential of Natural Language Processing for Metadata Extraction From Environmental Scientific Publications. *Soil*, 9(1), 155–168.

Castelletti, A., Giuliani, M., & Vercellis, C. (2021). A “Living With Models” Framework to Operationalize Explainable Artificial Intelligence for Decision Support. *Environmental Modelling & Software*, 137, 104962.

Chakraborty, R., & Pal, S. C. (2023). Modeling Soil Erosion Susceptibility Using GIS- Based Different Machine Learning Algorithms in Monsoon Dominated Diversified Landscape in India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9, 2927–2942.

Chen, Q., Li, L., Chong, C., & Wang, X. (2022). Ai- Enhanced Soil Management and Smart Farming. *Soil Use and Management*, 38, 7–13.

Das, A. K., Islam, M. N., Billah, M. M., & Sarker, A. (2021). Covid-19 pandemic and healthcare solid waste management strategy-a mini-review. *The Science of the Total Environment*, 778, 146220.

Debeljak, M., Trajanov, A., Kuzmanovski, V., et al. (2019). A Field-Scale Decision Support System for Assessment and Management of Soil Functions. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 115.

Gholami, A., Khaki, S., & Dadshani, S. (2022). Soil moisture prediction using machine learning algorithms: A review. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 68(1), 1-17.

Grunwald, S. (2022). Artificial Intelligence and Soil Carbon Modeling Demystified: Power, Potentials, and Perils. *Carbon Footprints*, 1, 1–5.

Hartemink, A. E., & McBratney, A. B. (2008). A soil science renaissance. *Geoderma*, 148, 123–129.

Heuvelink, G. B. M., Angelini, M. E., Poggio, L., Bai, Z., Batjes, N. H., van den Bosch, R., Bossio, D., Estella, S., Lehmann, J., Olmedo, G. F., & Sanderman, J. (2020). Machine learning in space and time for modelling soil organic carbon change. *Eur J Soil Sci.*, 1–17.

Khaki, S., Pham, H., & Wang, L. (2021). Simultaneous corn and soybean yield prediction from remote sensing data using deep transfer learning, 11132.

Lavrukhin, E. V., Gerke, K. M., Romanenko, K. A., Abrosimov, K. N., & Karsanina, M. V. (2021). Assessing the Fidelity of Neural Network- Based Segmentation of Soil XCT Images Based on Pore-Scale Modelling of Saturated Flow Properties. *Soil and Tillage Research*, 209, 104942.

Lobell, D. B., Thilmany, J., Field, C. B., Brush, S. B., & Naylor, R. L. (2018). The role of artificial intelligence in agricultural transformation. *Annual Review of Resource Economics*, 10, 399-418.

Liu, J., Rahmani, F., Lawson, K., & Shen, C. (2022). A multiscale deep learning model for soil moisture prediction using remote sensing data. *Geophysical Research Letters*, 49 (5), e2021GL096847.

McBratney, A. B., Santos, M. L. M., & Minasny, B. (2003). On Digital Soil Mapping. *Geoderma*, 117, 3–52.



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



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۴ تا ۱۳ آذر ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



Minasny, B., Bandai, T., Ghezzehei, T. A., et al. (2024). Soil Science- Informed Machine Learning. *Geoderma*, 452, 117094.

Nestor, M., Loredana, F., & Raymond, P. (2024). The AI Index 2024 Annual Report. AI Index Steering Committee, Institute for Human-Centered AI, Stanford University.

Nearing, G. S., Salas, J. D., & Duan, Y. (2021). AI and physics-based hydrologic models: Opportunities and challenges. *Water Resources Research*, 57 (5), e2020WR028147.

Padarian, J., Minasny, B., & McBratney, A. B. (2019a). Using Deep Learning for Digital Soil Mapping. *Soil*, 5, 79–89.

Padarian, J., Minasny, B., & McBratney, A. B. (2020). Machine Learning and Soil Sciences: A Review Aided by Machine Learning Tools. *Soil*, 6, 35–52.

Shen, Z., & Viscarra Rossel, R. A. (2021). Automated Spectroscopic Modelling With Optimised Convolutional Neural Networks. *Scientific Reports*, 11, 208.

Shen, C. (2018). A transdisciplinary review of deep learning for hydrology and water resources. *Water Resources Research*, 54 (11), 8558–8593.

Taghizadeh-Mehrjardi, R., Zeraatpisheh, M., Amirian-Chakan, A., & Scholten, T. (2024). A brief review of digital soil mapping in Iran. 217-228.

Wadoux, A. M. J.- C. (2023). Interpretable Spectroscopic Modelling of Soil With Machine Learning. *European Journal of Soil Science*, 74, e13370.

Wadoux, Alexandre M. J.-C. (2025). Artificial intelligence in soil science. *European Journal of Soil Science*, 76, e70080.

Zhang, M., Shi, W., & Xu, Z. (2020). Systematic Comparison of Five Machine- Learning Models in Classification and Interpolation of Soil Particle Size Fractions Using Different Transformed Data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24, 2505–2526.

Application of Smart Technologies in Soil Management and Conservation

Seyed Hossein Banitaba^{1,*}, Ali Reza Alebrahim²

^{1,2}Departments of Soil and Water Research, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Training Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Isfahan, Iran

Abstract

Artificial Intelligence (AI) has revolutionized various scientific disciplines by offering unparalleled capabilities in data analysis and complex modeling, and soil science is no exception. The escalating application of AI in soil research, ranging from precise carbon stock prediction to the development of intelligent decision support systems for soil performance assessment, underscores this assertion. Automated metadata extraction from



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



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۴ تا ۱۳ آذر ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



scientific resources and digital image analysis of soil profiles for mineral composition identification exemplify AI's capabilities in this field. In these approaches, AI systems are designed and trained to perform specific tasks with minimal human intervention. This article delves into the applications of AI in soil management and conservation, highlighting both the opportunities and the challenges encountered in the development and implementation of these innovative technologies.

Keywords: Artificial Intelligence, Soil Management, Soil Conservation, Precision Agriculture