



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



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۲۵ تا ۲۷ شهریور 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



مروری بر روش‌های مختلف ارزیابی کیفیت خاک با تأکید بر کاربرد هوش مصنوعی

بهناز السادات مرتضوی راوری^{۱*}، مرتضی اکبری^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

* (behnazsadat139@gmail.com)

۲- دانشیار گروه مدیریت منابع خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد

m-akbari@um.ac.ir

چکیده

کیفیت خاک یکی از اساسی‌ترین عوامل در پایداری تولید زیستی، حفظ محیط زیست و تضمین سلامت اکوسیستم‌ها است. هدف از ارائه این مقاله، مروری جامع بر روش‌های مختلف ارزیابی کیفیت خاک کشاورزی با تأکید ویژه بر نقش و اهمیت فناوری‌های هوش مصنوعی در ارتقاء دقت و سرعت این ارزیابی‌ها است. در این پژوهش، مهم‌ترین شاخص‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی کیفیت خاک معرفی و سپس کارکردهای فناوری‌های نوین مانند؛ سنجش از دور، سنسورها و الگوریتم‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق در پیش‌بینی، طبقه‌بندی و نقشه‌برداری دیجیتال کیفیت خاک بررسی گردید. نتایج نشان داد که هوش مصنوعی با توانایی تحلیل داده‌های پیچیده و بزرگ، موجب افزایش دقت، بهبود سرعت ارزیابی، شناسایی مناطق مستعد کاهش کیفیت و پیشنهاد راهکارهای مدیریت هوشمند خاک می‌شود. هرچند هنوز چالش‌هایی از نظر توسعه زیرساخت‌ها و داده در استفاده از این الگوریتم‌ها در ارزیابی مناسب کیفیت خاک وجود دارد. در مجموع، ترکیب رویکردهای رایج با فناوری‌های هوش مصنوعی، افق‌های جدیدی برای ارزیابی دقیق، سریع و پایدار کیفیت خاک کشاورزی فراهم ساخته و زمینه‌ساز توسعه کشاورزی هوشمند و حفاظت مؤثر از منابع خاک خواهد بود.

واژگان کلیدی: فرسایش خاک، الگوریتم‌های هوش مصنوعی، سنجش از دور، شاخص‌های کیفی خاک



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



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۴۰۴ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

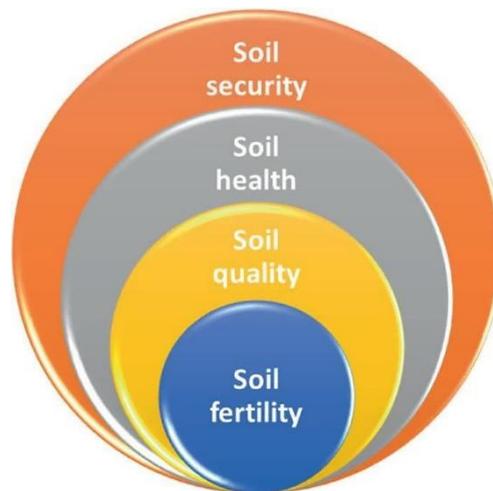
دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



مقدمه

کیفیت خاک، ظرفیت خاک برای عملکرد مناسب در اکوسیستم، تضمین پایداری تولید زیستی، حفظ کیفیت محیط زیست و ارتقای سلامت گیاه، حیوان و انسان تعریف می‌شود (Doran Parkin, 1994). طبق تعریف جامع ارائه‌شده توسط کارلن و همکاران و کمیته انجمن علوم خاک آمریکا "کیفیت خاک، ظرفیت خاک برای عمل کردن در چارچوب یک اکوسیستم برای پشتیبانی از بازده گیاهی و جانوری، حفظ یا ارتقای کیفیت آب و هوا، و حمایت از سلامت و سکونت انسان" است (Karlen et al., 1997; Karlen et al., 1998). در حقیقت، کیفیت خاک، توانایی خاک برای انجام وظایفش در اکوسیستم طبیعی تعریف می‌شود (Soil Science Society of America, 1987). شیوه‌های مدیریت کشاورزی مانند؛ شخم‌زنی، تناوب زراعی، مصرف کودها و آفت‌کش‌ها اثر مستقیم بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک دارند. استفاده نامناسب از کود شیمیایی می‌تواند موجب کاهش کیفیت خاک شود (Karlen et al., 1997). ویژگی‌هایی همچون بافت خاک، ساختار آن، ظرفیت نگهداری آب و میزان نفوذپذیری از عوامل مؤثر بر کیفیت خاک هستند و روی رشد گیاه و عملکرد کشاورزی تاثیر می‌گذارند (Doran & Parkin, 1994). عوامل مختلفی بر روی کیفیت خاک تاثیر می‌گذارد. فرسایش آبی یا بادی باعث از دست رفتن مواد مغذی و آلی خاک، کاهش عمق خاک و افت کیفیت خاک می‌شود (Lal, 2001). ورود عناصر سنگین، آلاینده‌ها و مواد شیمیایی ناشی از صنعت یا کشاورزی می‌تواند کیفیت خاک و سلامت محصولات کشاورزی را کاهش دهد (Alloway, 2013; Khashtabeh et al., 2023; Mahmoudabadi et al., 2025). جمعیت و تنوع میکروارگانیسم‌ها، کرم‌های خاکی و سایر جانوران خاکزی نقش مهمی در حفظ و بهبود کیفیت خاک دارند. فعالیت زیستی خاک تحت تاثیر تغییر مدیریت، مصرف کود آلی و تناوب محصولات قرار می‌گیرد (Bastida et al., 2008). دما، میزان بارندگی یا خشکسالی و شرایط آب‌وهوایی، تاثیر قابل توجهی بر کیفیت فیزیکی و شیمیایی خاک دارند (Lombardi et al., 2015). شکل ۱ جایگاه کیفیت خاک را در علوم شناختی خاک نشان می‌دهد.



شکل ۱- جایگاه کیفیت خاک در علوم شناختی خاک (Koch et al 2013)

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، کیفیت خاک بر حاصلخیزی خاک تاثیر گذاشته و خود نیز در سلامت و امنیت خاک نقش مهمی را ایفا می‌کند. به نحوی که، کیفیت خاک توسط عوامل مختلف طبیعی و انسانی (فعالیت‌های انسانی)، کاهش خواهد یافت و ارزیابی تغییرات کیفیت خاک در زمان و مکان مختلف و با روش‌های علمی و کارآمد می‌تواند به مدیریت بهینه آن



مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



کمک شایانی نماید. امنیت خاک به معنای نگهداری و بهبود منابع خاک جهان است تا این منابع بتوانند همچنان به تأمین غذا، الیاف و آب شیرین، مشارکت در پایداری انرژی و اقلیم، و حفظ تنوع زیستی و سلامت کلی اکوسیستم ادامه دهند. بنابراین، حفظ کیفیت خاک نقش حیاتی در مقابله با چالش‌های جهانی همچون امنیت غذایی، حفاظت محیط زیست و رفاه انسان ایفا می‌کند (Koch et al., 2013). بنابراین، اندازه‌گیری، نظارت و پیش‌بینی کیفیت خاک برای ترویج شیوه‌های مدیریت پایدار کشاورزی و اراضی طبیعی و جلوگیری از تخریب خاک اساسی است. این پژوهش، که به صورت مروری-اکتشافی و براساس پژوهش‌های انجام شده با موضوع کیفیت خاک و بر مبنای مطالعات منابع مختلف علمی معتبر همچون Google Scholar، Science Direct، SID و نیز اطلاعات حاصل از تجربه، گردآوری شد و در مورد پیشرفت‌های اخیر در روش‌ها و فن‌آوری‌های ارزیابی کیفیت خاک، از جمله سنجش از دور، هوش مصنوعی^۱ برای مدل‌سازی و ارزیابی کیفیت خاک، به ویژه استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین^۲ و یادگیری عمیق^۳ بحث و تحلیل شده است.

روش‌های مهم ارزیابی کیفیت خاک

در منابع علم جهان، روش‌های مختلف برای ارزیابی کیفیت خاک اشاره شده است که عمدتاً یا مبتنی بر کارهای میدانی است و یا آزمایشگاهی. به طوریکه، در کار میدانی، نمونه‌برداری از اعماق مختلف خاک انجام شده و شاخص‌های فیزیکی مثل بافت خاک، رطوبت، نفوذپذیری و رنگ ثبت می‌شود. سپس این نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شده و شاخص‌های شیمیایی مانند؛ ماده آلی، نیتروژن، فسفر، پتاسیم، ویژگی‌های زیستی مانند؛ جمعیت موجودات ریز خاک و برخی از شاخص‌های آنزیمی با دقت تعیین می‌شود. ترکیب داده‌های میدانی و آزمایشگاهی در کنار یکدیگر، امکان تحلیل جامع‌تری از وضعیت و سلامت خاک فراهم می‌کند تا تصمیمات مدیریتی صحیح گرفته شود (Abdu et al., 2023). در زیر به برخی از روش‌های مهم ارزیابی کیفیت خاک اشاره شده است:

- ارزیابی کیفیت خاک با شاخص‌های فیزیکی مانند؛ بافت خاک، تراکم، نسبت تخلخل، ظرفیت نگهداری آب و نفوذپذیری بررسی می‌شوند. این شاخص‌ها به طور مستقیم بر رشد گیاه، زهکشی و حفظ رطوبت اثرگذارند (Doran & Parkin, 1994).
- ارزیابی کیفیت خاک با استفاده از شاخص‌های شیمیایی، همچون اندازه‌گیری میزان مواد آلی خاک، غلظت عناصر غذایی اصلی مانند؛ نیتروژن، فسفر و پتاسیم، ظرفیت تبادل کاتیونی و شوری خاک است. این شاخص‌ها بر حاصلخیزی و سلامت خاک و گیاه تأثیرگذارند (Karlen et al., 1997; Ding et al., 2025).
- ارزیابی کیفیت خاک با شاخص‌های زیستی، فعالیت میکروبی، زی‌توده میکروبی، فعالیت آنزیمی و تنوع میکروارگانیسم‌ها مانند؛ جمعیت کرم‌های خاکی که مورد سنجش قرار خواهند گرفت و نمایانگر سلامت زیستی و فعالیت خاک است (Bastida et al., 2008).
- استفاده از شاخص‌های ترکیبی کیفیت خاک^۴، که چندین زیرشاخص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی در یک چارچوب عددی یا گرافیکی ادغام شده و دید جامع‌تری به پژوهشگر و کشاورز برای ارزیابی کیفیت خاک می‌دهد (Andrews et al., 2004).

۱ -Artificial Intelligence

۲ -Machine Learning

۳ -Deep Learning

۴ - Soil Quality Index (SQI)



مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

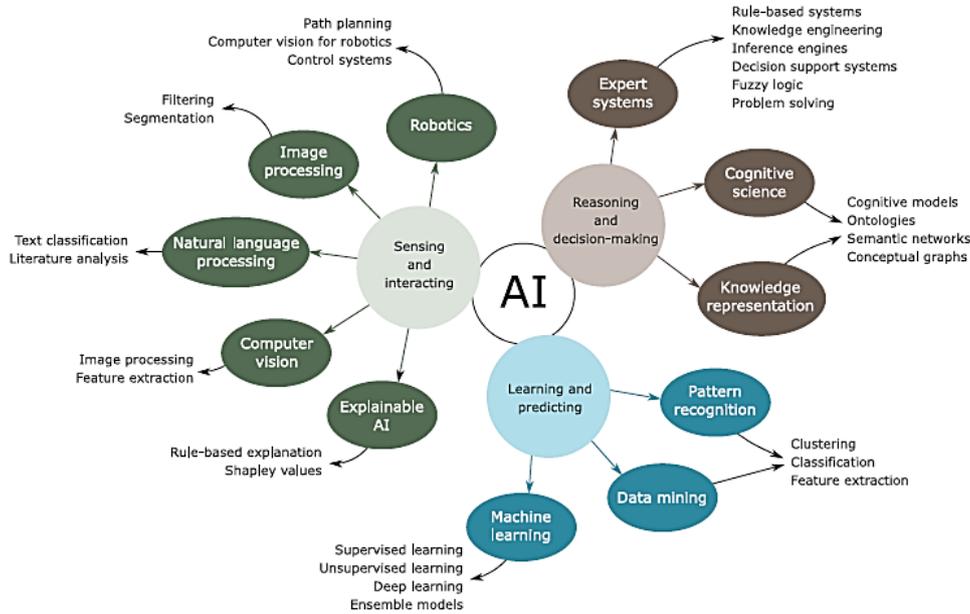


➤ از نیمه دوم قرن گذشته تاکنون، استفاده از فناوری سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای در پایش و ارزیابی کیفیت خاک کشاورزی گسترش قابل توجهی داشته است. با سنجش از دور، داده‌هایی مانند میزان پوشش گیاهی، رطوبت سطحی خاک، تغییرات شوری و حتی برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک از فاصله دور و در مقیاس وسیع به دست می‌آید. استفاده از سنجنده‌های ماهواره‌ای و به‌کارگیری پردازش تصویر و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، دقت برآورد شاخص‌های کیفیت خاک را افزایش داده است. این روش‌ها به کشاورزان و مدیران زمین‌های کشاورزی امکان می‌دهد تا به صورت غیرمخرب و کم‌هزینه، مناطقی با کیفیت خاک پایین را شناسایی و راهکارهای بهبود مدیریت کنند (Ahmed et al., 2023).

➤ روش‌های نوین و فناورانه، استفاده از سنسورها، طیف‌سنجی قرمز نزدیک، طیف‌سنجی مادون قرمز ابزارهای سنجش از دور (مانند تصاویر ماهواره‌ای و پهپادی) راهکارهای سریع و غیرمخرب برای بررسی کیفیت خاک ارائه می‌دهند (Stenberg et al., 2010). استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی به‌ویژه تکنیک‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق در دهه اخیر به سرعت در علوم خاک و کشاورزی گسترش یافته است (Liakos et al., 2018). این الگوریتم‌ها قادر هستند داده‌های پیچیده خاک، مانند خواص فیزیکی، شیمیایی و زیستی را مدل‌سازی کرده و کیفیت خاک را با دقت بالایی پیش‌بینی کنند (Zhang et al. 2021; Brungard & John, 2015). به عنوان مثال، الگوریتم‌هایی مانند؛ ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی، برای پیش‌بینی شاخص‌های کیفیت خاک همچون ماده آلی، رطوبت و اسیدیته کاربرد زیادی دارند (Brungard et al., 2017; Li et al., 2015; John & Li, 2015). همچنین، شبکه‌های عصبی مصنوعی و یادگیری عمیق در تحلیل تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های سنجش از دور برای ارزیابی سلامت و طبقه‌بندی خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند (Zhang et al., 2021; Ding et al., 2025). این فناوری‌ها به کشاورزان امکان می‌دهند مدیریت بهینه‌تری برای مصرف کود و نهاده‌ها ارائه دهند و منجر به کشاورزی پایدارتر شوند (Liakos et al., 2018).

اهمیت کاربرد هوش مصنوعی در ارزیابی خاک

کیفیت خاک به عنوان عامل کلیدی در بهره‌وری کشاورزی، حفظ محیط زیست و سلامت اکوسیستم‌ها شناخته می‌شود. با توجه به پیچیدگی و تنوع مکانی-زمانی ویژگی‌های خاک، ارزیابی دقیق و پایدار کیفیت خاک از چالش‌های اساسی علم خاک محسوب می‌شود. در سال‌های اخیر، به‌کارگیری الگوریتم‌ها و تکنیک‌های هوش مصنوعی، به‌ویژه یادگیری ماشین و یادگیری عمیق، زمینه را برای تحلیل حجم عظیمی از داده‌های خاک، کشف الگوهای پنهان و پیش‌بینی دقیق شاخص‌های کیفی خاک فراهم کرده است (Ding et al., 2025). این فناوری‌ها نه تنها سرعت و دقت ارزیابی خاک را افزایش داده‌اند، بلکه امکان مدل‌سازی غیرخطی و چندمتغیره روابط میان ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را نیز ممکن ساخته‌اند. انتظار می‌رود توسعه هوش مصنوعی در آینده، راهکارهای نوآورانه‌ای برای مدیریت پایدار منابع خاک و ارتقاء کیفیت آن ارائه دهد (Zhang et al., 2021; Wadoux et al., 2023). شکل ۲، طبقه‌بندی پیشنهادی از الگوریتم‌های هوش مصنوعی در ارزیابی شاخص‌های کیفی علوم خاک را نشان می‌دهد.



شکل ۲. طبقه‌بندی پیشنهادی در استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی در علوم خاک (Russell & Norvig, 2021)

در شکل ۲، طبقه‌بندی انجام شده، سه لایه دارد که شامل؛ حوزه‌ها (سه دایره)، کاربردها (بیضی‌ها) و تکنیک‌های نمونه (لایه بیرونی) است. تکنیک‌ها صرفاً جهت نمایش آورده شده‌اند، اما معمولاً با یکدیگر همپوشانی داشته و یکدیگر را تکمیل می‌کنند. به عنوان مثال، هوش مصنوعی قابل تبیین معمولاً مستلزم یادگیری قبلی است و اغلب از یک الگوریتم یادگیری ماشین استفاده می‌کند (Russell & Norvig, 2021). در حال حاضر، بخش عمده‌ای از کاربردهای هوش مصنوعی در علوم خاک به یادگیری ماشین (ML) اختصاص یافته است، اما دامنه هوش مصنوعی فراتر از یادگیری ماشین بوده و حوزه‌هایی مانند تحلیل تصویر دیجیتال، پردازش زبان طبیعی (NLP)، سیستم‌های خبره و نمایش دانش را نیز شامل می‌شود (Russell and Norvig 2016). اغلب کاربردهای هوش مصنوعی در علوم خاک تاکنون در حوزه پیش‌بینی بوده است و موارد معدودی در زمینه‌های دیگر مانند پردازش زبان طبیعی توسعه مدل‌های شناختی خاک و یادگیری ماشین قابل تبیین نیز به چشم می‌خورد. بر اساس این یافته‌ها، نکاتی از جمله استفاده تقریباً انحصاری از هوش مصنوعی برای پیش‌بینی، و عدم تلفیق دانش خاک در راهکارهای الگوریتمی هوش مصنوعی به‌عنوان چالش مطرح می‌شود. در آینده، توسعه فناوری‌هایی چون بازشناسی متون پروفایل‌های خاک قدیمی برای استخراج داده و پردازش زبان تخصصی خاک می‌تواند مسیرهای جدیدی را پیش روی پژوهش در علوم خاک قرار دهد (European Commission, 2019).

الگوریتم‌ها و تکنیک‌های هوش مصنوعی مورد استفاده در علوم خاک

شبکه‌های عصبی مصنوعی نوعی الگوریتم یادگیری ماشین هستند که با الهام از ساختار مغز انسان، قادرند روابط پیچیده میان داده‌های خاک را مدل‌سازی کنند و برای پیش‌بینی خصوصیات و عملکردهای خاک به کار می‌روند (Minasny et al., 2021). الگوریتم جنگل تصادفی از مجموعه‌ای از درختان تصمیم‌گیری استفاده می‌کند تا دقت پیش‌بینی درباره متغیرهای خاک را افزایش دهد و در طبقه‌بندی یا برآورد ویژگی‌های خاک بسیار رایج است (Brungard et al., 2021). یادگیری عمیق با استفاده از شبکه‌های عصبی چندلایه، قابلیت تحلیل سطوح مختلف انتزاع را در داده‌های اصلی خاک فراهم می‌کند و به‌ویژه در تحلیل



مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

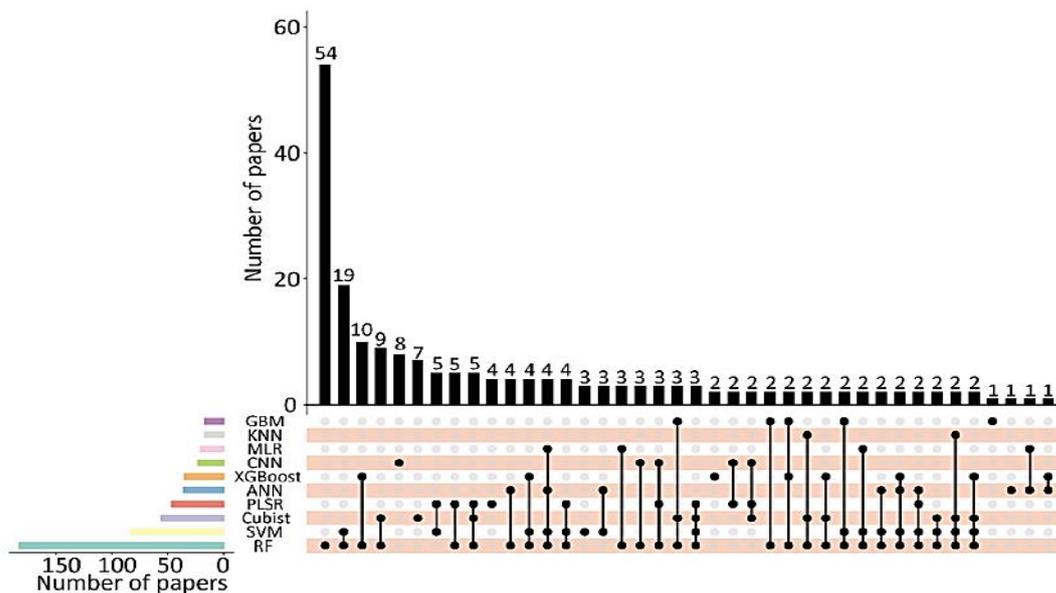
دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های سنجش از دور کاربردی است (Padarian et al., 2020). سیستم‌های خبره برنامه‌هایی هستند که با مدل‌سازی دانش و استدلال خاک‌شناسان خبره، در حل مسائلی مانند طبقه‌بندی خاک یا پشتیبانی تصمیم‌گیری کاربرد دارند (Debeljak et al., 2019).

استفاده از قواعد نمادین و نمایش دانش برای استخراج دانش تخصصی در قالب قواعد منطقی و کاربرد آن‌ها برای تصمیم‌گیری در سامانه‌های خاک (Galbraith et al., 1998). یادگیری ماشین در علوم خاک هم به صورت یادگیری با ناظر (با داده‌های برچسب‌دار) و هم بدون ناظر (بدون برچسب زدن داده‌ها) جهت طبقه‌بندی و پیش‌بینی ویژگی‌های خاک استفاده می‌شود (Oliveira et al., 2021). مدل‌های تجمیعی با ترکیب چندین مدل یادگیری ماشین مانند: boosting, bagging, model stacking عملکرد پیش‌بینی را بهبود می‌بخشند (Brungard et al., 2021). بینایی ماشین و تحلیل تصویر به‌ویژه برای تحلیل تصاویر خاک (مانند عکس پروفایل‌های خاک) به منظور شناسایی ساختار، رده‌بندی یا ارزیابی سلامت خاک (Wadoux and McBratney, 2021). پردازش زبان طبیعی (Natural Language Processing; NLP) جهت استخراج خودکار اطلاعات متنی از مقالات، متادیتا و پروفایل‌های توصیفی خاک (Russell and Norvig, 2016). الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای یافتن بهترین راه‌حل مدیریتی یا تنظیم مدل‌ها بر اساس معیارهای مختلف خاک‌شناسی (European Commission, 2019). شکل ۳، مطالعات انجام شده با الگوریتم‌های AI را درباره کربن آلی خاک نشان می‌دهد.





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



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



مطالعات انجام شده در ارزیابی کیفیت خاک

جعفری و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از طیف‌سنجی مادون قرمز نزدیک دستی (NIRS) موفق شدند مقدار کربن آلی و برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک اراضی کشاورزی استان اصفهان را با دقت قابل قبول برآورد کنند (Jafari, A et al., 2020). جاسیوند و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از داده‌های تصویری پهپاد و تلفیق آن با سنسورهای طیفی، توانستند خاک‌های منطقه دزفول را از لحاظ کیفی طبقه‌بندی و پهنه‌بندی کنند و دقت مدل‌سازی را بالا ببرند (Hajivand, S et al., 2022). استنبرگ و همکاران با مرور گسترده، نشان دادند طیف‌سنجی مادون قرمز (NIR و MIR) ابزار مؤثری برای برآورد سریع کیفیت خاک از جمله ماده آلی و ویژگی‌های فیزیکی حتی در مزرعه و در شرایط عملیاتی است (Stenberg, B et al., 2010). گرونوالد و آدامچوک نشان دادند توسعه سنسورهای تصویرگر زمینی و پهپادی برای نقشه‌برداری ویژگی‌های خاک، قابلیت پایش دقیق و سریع کیفیت خاک را در مقیاس مزرعه‌ای در دنیا فراهم کرده است (Grunwald, S and Adamchuk, V. I., 2019). آزادبخت و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 و مدل‌سازی آماری، موفق شدند تغییرات کربن آلی خاک دشت مشهد را با دقت مناسب شناسایی و نقشه‌برداری کنند (Azadbakht, M et al., 2019). خسروی و همکاران (۲۰۲۱) از تصاویر Landsat-8 برای طبقه‌بندی کیفیت خاک در اراضی کشاورزی استان گلستان بهره گرفتند و نتایج نشان داد صحت طبقه‌بندی قابل قبول است (Khosravi, H et al., 2021).

آدیکاری با تلفیق داده‌های سنجش از دور و داده‌های میدانی، شاخص کیفیت خاک اروپا را مدل‌سازی کردند و توانستند نقشه‌های دقیق‌تری نسبت به روش‌های سنتی ارائه دهند (Adhikari, K et al., 2014). پنگ و همکاران با تحلیل تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های میدانی، تغییرات کیفیت خاک زمین‌های کشاورزی چین را بررسی کردند و دریافتند که سنجش از دور با قدرت تفکیک بالا قابلیت ارزیابی دقیق کیفیت خاک را دارد (Peng, J et al., 2021). خاکزاد و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از شاخص‌های فیزیکی مانند چگالی ظاهری و پایداری خاکدانه‌ها، کیفیت خاک اراضی کشاورزی دشت میاندوآب را ارزیابی کردند و دریافتند شخم زیاد باعث کاهش کیفیت خاک شده است (Khakzad et al., 2017). اندروز و همکاران با طراحی یک چارچوب ارزیابی بر اساس شاخص‌های فیزیکی مانند درصد مواد آلی و پایداری خاکدانه، نشان دادند که تناوب زراعی کیفیت فیزیکی خاک را نسبت به کشت مداوم بهبود می‌بخشد (Andrews, S. S et al., 2002).

داروشا جونیور و همکاران (۲۰۲۰)، در برزیل شاخص‌های کیفیت خاک (مانند کربن آلی، پایداری خاکدانه، ظرفیت نگهداشت آب و ویژگی‌های شیمیایی و زیستی) را در اراضی با پوشش‌های گیاهی متفاوت در جنگل اطلس برزیل بررسی کردند. نتایج نشان داد که اراضی با پوشش طبیعی نسبت به زمین‌های کشاورزی به طور معنی‌داری کیفیت خاک بالاتری دارند و حفظ پوشش گیاهی طبیعی می‌تواند نقش کلیدی در احیاء اکولوژیکی و بهبود ویژگی‌های خاک ایفا کند (Daros Junior et al., 2020). ساوراب و همکاران در سال ۲۰۲۱ در زمینه کیفیت خاک، به بررسی شاخص‌های کیفیت خاک در سامانه‌های کشاورزی حفاظتی در دشت‌های ایندو-گانگتیک شمال غربی هند می‌پردازند. در این مطالعه، تاثیر اجرای کشاورزی حفاظتی بر شاخص‌های کیفیت خاک شامل ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک ارزیابی شد. نتایج نشان داد که اجرای روش‌های کشاورزی حفاظتی (شامل خاک‌ورزی حداقل و مدیریت بقایا) موجب ارتقاء شاخص کیفیت خاک، افزایش ماده آلی خاک، بهبود جمعیت میکروبی و در نهایت پایداری عملکرد محصولات می‌گردد (Saurabh et al., 2021).

تسنگ و همکاران در سال ۲۰۲۳ کیفیت خاک کشاورزی در منطقه‌ای از تایوان با استفاده از داده‌های میدانی (شامل جمع‌آوری نمونه‌های خاک از عمق مشخص در مزارع) و آزمون‌های دقیق آزمایشگاهی ارزیابی شد. شاخص‌هایی چون ماده آلی، پتاسیم، نیتروژن کل، فسفر، کاتیون‌های قابل تبادل و هدایت الکتریکی به عنوان پارامترهای کلیدی انتخاب و اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که برخی مناطق دچار کاهش ماده آلی و اختلال در عناصر غذایی بوده‌اند و ارتقاء وضعیت مدیریتی، به ویژه افزودن



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



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



مواد آلی و اصلاح کوددهی، توصیه شده است (Tseng et al., 2023). فوتا و همکاران در سال ۲۰۲۴ داده‌ها و نتیجه‌های پژوهش‌های متعددی را از مناطق مختلف دنیا - به ویژه آسیا (هند و بنگلادش)، آفریقا، اروپا و آمریکا - جمع‌بندی کرده‌اند به تحلیل راهبردهای مدیریت پایدار خاک با هدف ارتقاء کیفیت خاک و افزایش عملکرد کشاورزی پرداخته است. این پژوهش تأکید می‌کند که اعمال روش‌هایی مانند کاهش شخم، استفاده از کودهای آلی، تناوب زراعی و کشاورزی حفاظتی، منجر به بهبود خاکدانه‌بندی، افزایش ماده آلی، تعادل عناصر غذایی، و کاهش فرسایش خاک می‌شود. نتیجه تحقیق نشان می‌دهد که رویکردهای تلفیقی و بخش‌محور در مدیریت خاک 'کلید دستیابی به کشاورزی پایدار و حفاظت از منابع خاک است (Futa et al., 2024). رضایی و همکاران در سال ۲۰۲۴ کیفیت خاک دشت مشهد در شمال شرق ایران با استفاده از رویکرد داده‌های حداقلی و تحلیل مکانی ارزیابی شد با جمع‌آوری نمونه‌های خاک از مناطق مختلف و اندازه‌گیری شاخص‌های فیزیکی و شیمیایی مانند هدایت الکتریکی، ماده آلی، کربن آلی، کاتیون‌های قابل تبادل و سایر شاخص‌ها، نقشه پراکنش مکانی شاخص کیفیت خاک را تهیه کردند. نتایج پژوهش نشان داد که کیفیت خاک منطقه به شدت تحت تأثیر مدیریت زمین و شرایط اقلیمی است و برای بهبود وضعیت مدیریتی آموزش‌های ترویجی به کشاورزان در زمینه مدیریت بهینه خاک و استفاده اصولی از نهاده‌ها پیشنهاد کردند (Rezaei, et al., 2024).

چالش‌ها و موانع مهم در ارزیابی کیفیت خاک

ارزیابی کیفیت خاک نیز با چالش‌هایی نیز روبرو است. این چالش‌ها شامل موارد مختلفی می‌شود که از مهمترین آنها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ۱- تفاوت‌های مکانی و زمانی ویژگی‌های خاک در یک مزرعه به شدت متغیر است و نمونه‌برداری محدود نمی‌تواند همه تغییرات را پوشش دهد (Vogel, H. J et al., 2001).
- ۲- شاخص‌های یکسان و استاندارد هنوز بر سر انتخاب و وزن‌دهی مناسب شاخص‌های کیفیت خاک در شرایط مختلف، اجماع و استاندارد جهانی وجود ندارد (Bünemann, E. K et al., 2018).
- ۳- هزینه و زمان‌بر بودن ارزیابی‌های آزمایشگاهی روش‌های کلاسیک اندازه‌گیری کیفیت خاک، که نیازمند آزمایش‌های متعدد و پرهزینه و زمان‌بر هستند که برای پایش گسترده مناسب نیستند (Karlen, D. L et al., 2006).
- ۴- محدودیت در داده‌های مکانی و زمین‌آمار و همچنین کمبود داده‌های مکانی دقیق و به‌روز که باعث کاهش دقت مدل‌های نقشه‌برداری و ارزیابی کیفیت خاک می‌شود (McBratney, A. B et al., 2003).
- ۵- اثر مدیریت کشاورزی گوناگون که تأثیر متفاوت انواع مدیریت‌های کشاورزی (کوددهی، شخم، آبیاری، تناوب) شناسایی و استانداردسازی شاخص‌های کیفیت خاک گذاشته و ارزیابی را دشوار می‌سازد (Doran, J. W et al., 2000).
- ۶- عدم توجه به نقش زیست‌سازگان خاک که بر ارزیابی بسیاری از شاخص‌های کیفی خاک بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی تأکید دارد و به نقش زیستی و اکولوژیکی خاک کمتر توجه شده است (Kibblewhite, M. G et al., 2008).
- ۷- فناوری‌های پیشرفته مانند؛ سنجش از دور، داده‌برداری دقیق و هوش مصنوعی که به دلیل عدم زیرساخت‌های فیزیکی در همه جا در دسترس نیستند (Adhikari, et al., 2024).

نتیجه‌گیری

در علوم خاک، کاربرد هوش مصنوعی عمدتاً متنوع است؛ از سامانه‌های پشتیبان تصمیم‌گیری تا طبقه‌بندی تصاویر، پیش‌بینی با یادگیری ماشین و سیستم‌های خبره، نقش‌آفرینی داشته است. در حال حاضر، بیشتر کاربردهای هوش مصنوعی در علوم خاک



مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



بر حوزه نقشه‌برداری دیجیتال خاک و توسعه توابع انتقال خاک متمرکز است و اغلب با هدف پیش‌بینی انجام می‌شود. با این وجود، ابزارها و ابتکارات کلیدی سیاست برای توسعه پایدار، نقش خاک را در مقابله با چالش‌های بزرگی مانند؛ امنیت غذایی و آبی، از دست رفتن تنوع زیستی، تغییرات اقلیمی و پایداری انرژی کمتر از حد لازم شناسایی کرده‌اند. علم خاک به میزان کافی به سیاست‌گذاری توسعه پایدار منتقل نشده است. لذا، برای بهبود روش‌های ارزیابی کیفیت خاک، برخی از پیشنهاد علمی در ادامه اشاره می‌شود:

- ترکیب داده‌های سنتی و فناوری‌های نوین. در این راستا توصیه می‌شود نمونه‌برداری‌های کلاسیک خاک را با داده‌های سنسج از دور و طیف‌سنجی درجا مانند؛ NIR و MIR ادغام شوند تا ارزیابی سریع و دقیق‌تری در مقیاس مزرعه حاصل شود (Stenberg, B et al., 2010).
- توسعه شاخص‌های جامع چندمعیاره استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره که همزمان ابعاد فیزیکی، شیمیایی و زیستی کیفیت خاک را شامل شوند موجب بهبود دقت و جامعیت ارزیابی‌ها می‌شود (Bünemann, E. K et al., 2018).
- استفاده از مدل‌ها و یادگیری ماشین برای نقشه‌برداری دیجیتال خاک به‌کارگیری الگوریتم‌های یادگیری ماشین با داده‌های مکانی و محیطی جهت نقشه‌برداری دیجیتال کیفیت خاک که سبب افزایش سرعت و صحت ارزیابی می‌شود (Wadoux, A. M. J. C. et al., 2023).

منابع

- احمد، ل.، رضا، م. ا. س.، مال، ر. و فاروق، م. (۲۰۲۳). ارزیابی کیفیت خاک با استفاده از سنسج از دور و رویکردهای یادگیری ماشین: روندهای فعلی و چشم‌اندازهای آینده
- آزربخت، م.، نوروزی، ا. ا. و دستورانی، م. ت. (۲۰۱۹). برآورد کربن آلی خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ و مدل‌های آماری (مطالعه موردی: دشت مشهد). پژوهش آب و خاک، ۴۹(۳)، ۶۱۳-۶۲۸
- جعفری، ا.، فتحی، ح. و ناصری، ا. ا. (۲۰۲۰). برآورد خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک با استفاده از طیف‌سنجی فرسوخ نزدیک قابل حمل در اراضی کشاورزی استان اصفهان. پژوهش خاک ایران، ۳۴(۳)، ۵۴۹-۵۵۹
- حاجیوند، س.، سرم‌دیان، ف. و تقی‌زاده‌مهرجردی، ر. (۲۰۲۲). ارزیابی شاخص‌های کیفیت خاک در اراضی کشاورزی با استفاده از طیف‌سنجی مبتنی بر پهپاد و مدل‌سازی فضایی (مطالعه موردی: دزفول، ایران). مجله علوم آب و خاک، ۳۲(۲)، ۴۸۱-۴۹۴
- خاکزاد، س.، رشیدی، م. و عباسی، ف. (۲۰۱۷). ارزیابی کیفیت خاک در اراضی کشاورزی با استفاده از شاخص‌های فیزیکی (مطالعه موردی: دشت میان‌دوآب). پژوهش‌های خاک و آب ایران، ۴۸(۴)، ۷۳۷-۷۴۶
- خسروی، ه.، لطفی، ا. و غلامی، ه. (۲۰۲۱). ارزیابی کیفیت خاک در اراضی کشاورزی با استفاده از شاخص‌های سنسج از دور (مطالعه موردی: استان گلستان). پژوهش‌های خاک و آب ایران، ۵۱(۸)، ۲۰۹۷-۲۱۱۰
- رضایی، م.، امرنژاد، ا. و عفیونی، م. (۲۰۲۴). ارزیابی کیفیت خاک در دشت مشهد، شمال شرقی ایران: مجموعه داده حداقل و رویکرد تحلیل فضایی
- خشتابه، ر.، اکبری، م.، حیدری، ا. و نجف‌پور، ا. (۲۰۲۳). تأثیر معدن سنگ آهن بر غلظت برخی فلزات سنگین و منطقه‌بندی آلودگی خاک (مطالعه موردی: معدن سنگ آهن سنگان، خواف-ایران). نشریه آب و خاک، ۳۷(۱)، ۷۷-۹۴
- محمودآبادی، ا.، اکبری، م. و سرم‌دیان، ف. (۲۰۲۵). تأثیر انواع کاربری اراضی بر فرم زیست‌فراهم فلزات سنگین و آلودگی زیست‌محیطی خاک. مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۴(۱)، ۶۱-۷۸
- Abdu, A., Laekemariam, F., Gidago, G., & Getaneh, L. (2023). Explaining the soil quality using different assessment techniques. Applied and Environmental Soil Science, 2023(1), 6699154



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



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



- Adhikari, K., Hartemink, A. E., Minasny, B., Bou Kheir, R., Greve, M. B., & Greve, M. H. (2014). Digital mapping of soil organic carbon contents and stocks in Denmark. *PLOS ONE*, 9(8), e105519
- Alloway, B. J. (Ed.). (2012). *Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability* (Vol. 22). Springer Science & Business Media
- Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Cambardella, C. A. (2002). The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method. *Soil Science Society of America Journal*, 66(4), 1177–1185
- Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Cambardella, C. A. (2004). The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. *Soil Science Society of America Journal*, 68(6), 1945–1962
- Barathkumar, S., Sellamuthu, K. M., Sathyabama, K., Malathi, P., Kumaraperumal, R., & Devagi, P. (2025). Advancements in soil quality assessment: A comprehensive review of machine learning and AI-Driven approaches for nutrient deficiency Analysis. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 56(2), 251–276
- Bastida, F., Zsolnay, A., Hernández, T., & García, C. (2008). Past, present and future of soil quality indices: a biological perspective. *Geoderma*, 147(3–4), 159–171
- Brungard, C. W., & John, L. W. (2015). Machine learning for soil survey predictions: A review and case study in the United States. *Geoderma*, 223–225, 161–171
- Brungard, C., Nauman, T., Duniway, M., ... (2021). Regional ensemble modeling reduces uncertainty for digital soil mapping. *Geoderma*, 397, 114998
- Brungard, C. W., Boettinger, J. L., Duniway, M. C., Wills, S. A., Edwards, T. C., & Bestelmeyer, B. T. (2021). Regional modeling of diagnostic surface and subsurface soil horizons using machine learning and legacy soil data. *Soil Science Society of America Journal*, 85(2), 502–520
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., Verzaandvoort, S., Brussaard, L., ..., Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105–125
- Daros Junior, A. F., de Souza, Z. M., de Andrade, A. P., de Lima, C. L. R., Fernandes, C., & Catanho, L. F. (2020). Soil quality indicators in areas with different vegetation cover in the Atlantic Forest biome, Southeastern Brazil. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 42, e45077
- Debeljak, M., Trajanov, A., Kuzmanovski, V., ... (2019). A field-scale decision support system for assessment and management of soil functions. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 115
- Ding et al. (2025). Advancing Soil Organic Carbon Prediction: A Comprehensive Review of Technologies, AI, Process-Based and Hybrid Modelling Approaches. *Advanced science*, e04152 (1-28)
- Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. In J. W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, & B. A. Stewart (Eds.), *Defining soil quality for a sustainable environment* (pp. 3–21). SSSA Special Publication 35. Soil Science Society of America
- Doran, J. W., & Zeiss, M. R. (2000). Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, 15(1), 3–11
- De Oliveira, V. A., Rodrigues, A. F., Morais, M. A. V., Terra, M. d. C. N. S., Guo, L., & de Mello, C. R. (2021). Spatiotemporal modelling of soil moisture in an Atlantic forest through machine learning algorithms. *European Journal of Soil Science*, 72, 1969–1987
- European Commission. (2019). *Ethics guidelines for trustworthy AI* (High-Level Expert Group on Artificial Intelligence, p. 6). European Commission
- Futa, B., Adhikari, S., Panda, S. S., & Chakraborty, S. (2024). Innovative soil management strategies for sustainable agriculture: Current perspectives and future prospects. *Sustainability*, 16(21), 9481
- Galbraith, J. M., & Bryant, R. B. (1998). Use of an expert system for soil classification and land evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, 62(3), 661–669
- Grunwald, S., & Adamchuk, V. I. (2019). Emerging methods for soil and agricultural land management using proximal and remote sensors. *Geoderma*, 355, 113877
- Karlen, D. L., Ditzler, C. A., & Andrews, S. S. (2003). Soil quality: Why and how? *Geoderma*, 114(3–4), 145–156
- Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F., & Schuman, G. E. (1997). Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), 4–10



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



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



- Karlen, D. L., Hurley, E. G., Andrews, S. S., Cambardella, C. A., Meek, D. W., Duffy, M. D., & Mallarino, A. P. (2006). Crop rotation effects on soil quality at three northern corn/soybean belt locations. *Agronomy Journal*, 98(3), 484–495
- Kibblewhite, M. G., Ritz, K., & Swift, M. J. (2008). Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), 685–701
- Koch, A., McBratney, A., Adams, B., Field, D. J., Hill, R., Crawford, J., ... Lal, R. (2013). Soil security: Solving the global soil crisis. *Global Policy*, 4(4), 434–441
- Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development*, 12(6), 519–539
- Larson, W. E., & Pierce, F. J. (1991). Conservation and enhancement of soil quality. In *Evaluation for sustainable land management in the developing world (Vol. 2: Technical papers, pp. 175–203)*. International Board for Soil Research and Management
- Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), 2674
- Li, W., Du, Q., & Samat, A. (2017). Remote sensing image classification: A survey of support vector machine (SVM) and orthogonal SVM algorithms. *Remote Sensing*, 6(2), 121–137
- Lombardi, L., Maucieri, C., Noacco, V., & Salvato, M. (2015). Soil management and climate change impacts on soil quality: A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 213, 240–251
- McBratney, A. B., Santos, M. L. M., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1–2), 3–52
- Minasny, B., Chaney, N. W., Maggi, F., ... (2021). Pedotransfer functions for estimating soil hydraulic properties from saturation to dryness. *Geoderma*, 403, 115194
- Padarian, J., Minasny, B., & McBratney, A. B. (2020). Machine learning and soil sciences: A review aided by machine learning tools. *Soil*, 6, 35–52
- Peng, J., Biswas, A., Jiang, Q., Zha, X., & Shi, Z. (2021). Remote sensing-based soil quality assessment: Recent advances and future perspectives. *Geoderma*, 403, 115195
- Russell, S. J., & Norvig, P. (2016). *Artificial intelligence: A modern approach (3rd ed.)*. Pearson
- Russell, S., & Norvig, P. (2021). *Artificial intelligence: A modern approach (4th ed.)*. Pearson
- Saurabh, K., Sharma, P. C., Saikia, S., Kumar, S., Das, T. K., & Sharma, S. (2021). Soil quality indices in a conservation agriculture based rice-mustard cropping system in North-western Indo-Gangetic Plains. *Soil and Tillage Research*, 209, 104914
- Soil Science Society of America. (1987). *Glossary of soil science terms*. Soil Science Society of America
- Stenberg, B., Viscarra Rossel, R. A., Mouazen, A. M., & Wetterlind, J. (2010). Visible and near infrared spectroscopy in soil science. *Advances in Agronomy*, 107, 163–215
- Tseng, W.-C., Chen, J.-S., Hsieh, C.-F., & Hsieh, C.-H. (2023). Evaluating the soil quality index using three methods to assess soil fertility in agricultural land. *PLoS ONE*, 18(12), e0289828
- Vogel, H. J., & Roth, K. (2001). Quantitative morphology and network representation of soil pore structure. *Advances in Water Resources*, 24(3–4), 233–242
- Wadoux, A. M. J.-C., & McBratney, A. B. (2021). A review of digital soil image analysis. *Geoderma*, 404, 115247
- Wadoux, A. M. J.-C., Poggio, L., & Mulder, V. L. (2023). Machine learning for digital soil mapping: Approaches, challenges and perspectives. *European Journal of Soil Science*, 74(2), e13296
- Wadoux, A. M. J. C., McBratney, A., & Padarian, J. (2023). Machine learning for digital soil mapping: Applications, challenges, and suggested solutions. *Geoderma*, 432, 116300
- Zhang, X., Chen, S., Sun, H., & Chen, S. (2021). Applications of artificial intelligence in soil science: Advances and prospects. *Geoderma*, 401, 115285



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



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۴۰۴ شهریور ۲۷ تا ۲۵



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



A review of different methods for assessing soil quality with emphasis on the use of artificial intelligence (AI)

Behnaz Sadat Mortazavi Ravari^{1*}, Morteza Akbari²

1- Master's student, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

* (behnazsadat139@gmail.com)

2- Associate Professor, Department of Desert and Arid Zones Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad
m-akbari@um.ac.ir

Abstract

Soil quality is one of the fundamental factors in sustaining biological productivity, preserving the environment, and ensuring ecosystem health. The aim of this research is to provide a comprehensive review of various methods for assessing agricultural soil quality, with a special emphasis on the role and importance of artificial intelligence technologies in enhancing the accuracy and speed of such evaluations. In this article, the most important physical, chemical, and biological indicators of soil quality are introduced and critically discussed. The roles of advanced technologies such as remote sensing, sensors, and machine learning and deep learning algorithms in predicting, classifying, and digitally mapping soil quality are also examined. The findings indicate that artificial intelligence, with its ability to analyze complex and large datasets, leads to increased accuracy, improved assessment speed, identification of areas susceptible to soil quality decline, and the provision of intelligent soil management solutions. Overall, the integration of conventional approaches with artificial intelligence technologies opens new horizons for precise, rapid, and sustainable assessment of agricultural soil quality, paving the way for the development of smart agriculture and effective protection of soil resources.

Keywords: Soil erosion, Artificial intelligence algorithms, Remote sensing, Soil quality indicators

