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

خاک هوشمند: کاربرد یادگیری ماشین، طیف‌سنجی و مدل‌های فیزیک‌محور در شناخت خاک

روح الله تقی زاده مهرجردی

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه اردکان

چکیده

گسترش داده‌های سنجش‌ازدور، حسگرهای نزدیک‌برد و کتابخانه‌های بزرگ طیفی، علوم خاک را به نقطه‌ای رسانده که روش‌های کلاسیک آماری دیگر پاسخ‌گو نیستند. هوش مصنوعی و به‌طور خاص یادگیری ماشین و یادگیری عمیق، امکان مدل‌سازی روابط بسیار غیرخطی میان متغیرهای توپوگرافی، اقلیمی، کاربری اراضی و سیگنال‌های طیفی خاک را فراهم کرده و دقت نقشه‌برداری رقومی خاک را به‌طور محسوس بالا برده است. هم‌زمان، طیف‌سنجی خاک از یک روش آزمایشگاهی به سوی کاربرد در مزرعه و میدانی حرکت می‌کند، اما با چالش‌هایی مانند تغییر رطوبت، هندسهٔ اندازه‌گیری و ناهمگنی سطح روبه‌رو است؛ چالش‌هایی که مدل‌های عمیق، انتقال یادگیری و «افزودن دادهٔ محلی» می‌توانند آنها را تعدیل کنند. علاوه بر این، ورود شبکه‌های عصبی آگاه از فیزیک باعث شده مدل‌های خاکی نه‌فقط با داده، بلکه با معادلات فیزیکی فرایندهای آب–حرارت–انتقال در خاک نیز سازگار شوند و از بیش‌برازش رها شوند.

واژگان کلیدی: نقشه برداری رقومی خاک، طیف‌سنجی، مدل‌های فیزیک‌محور

مقدمه

خاک به عنوان یکی از حیاتی‌ترین منابع طبیعی، نقش بنیادی در پایداری اکوسیستم‌ها، تولید غذا و تنظیم چرخه‌های زیستی دارد. در عین حال، شناخت دقیق ویژگی‌های مکانی و زمانی خاک، به دلیل پیچیدگی و تنوع بالای آن، همواره چالشی بزرگ برای پژوهشگران و مدیران منابع طبیعی بوده است.

در دههٔ اخیر، رشد سریع فناوری‌های داده‌محور، از جمله سنجش‌ازدور، اینترنت اشیا، و یادگیری ماشین، فرصت‌هایی بی‌سابقه برای مطالعه و مدیریت هوشمند خاک فراهم کرده است. هوش مصنوعی با تکیه بر توانایی یادگیری الگوهای پنهان در داده‌های پیچیده، می‌تواند روابط غیرخطی و چندبعدی میان ویژگی‌های خاک، اقلیم، توپوگرافی و کاربری اراضی را آشکار کند. در این میان، دو حوزهٔ «نقشه‌برداری رقومی خاک» و «طیف‌سنجی خاک» بیشترین بهره را از پیشرفت‌های هوش مصنوعی برده‌اند.

هوش مصنوعی در نقشه‌برداری رقومی خاک

نقشه‌برداری رقومی خاک یا DSM روشی است که با استفاده از داده‌های مکانی (نظیر تصاویر ماهواره‌ای، مدل ارتفاعی، داده‌های بارش و پوشش گیاهی) و نمونه‌های خاک برداشت‌شده از نقاط محدود، به برآورد پیوستهٔ ویژگی‌های خاک در سطح منطقه یا کشور می‌پردازد.

روش‌های سنتی در DSM عمدتاً بر پایهٔ مدل‌های آماری ساده و فرضیات خطی استوار بودند. اما با ورود الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان، درخت تصمیم‌گیری و شبکه‌های عصبی مصنوعی دقت

نقشه‌های تولیدی به شکل چشمگیری افزایش یافته است. به عنوان مثال، الگوریتم جنگل تصادفی قادر است بدون نیاز به فروض خطی، روابط پیچیده میان متغیرهای توپوگرافی، اقلیمی و پوشش گیاهی را با ویژگی‌هایی مانند ماده آلی، بافت خاک و pHاستخراج کند. از سوی دیگر، مدل‌های عمیق و شبکه‌های عصبی کانولوشنی در سال‌های اخیر برای تحلیل تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا به کار رفته‌اند و نقشه‌هایی با جزئیات بیشتر تولید کرده‌اند.

استفاده از هوش مصنوعی در نقشه‌برداری رقومی خاک نه تنها دقت نقشه‌ها را افزایش داده، بلکه امکان به‌روزرسانی پویا و زمان‌واقعی نقشه‌های خاک را فراهم کرده است؛ امری که برای مدیریت پایدار کشاورزی و مقابله با تغییر اقلیم اهمیت بسزایی دارد.

هوش مصنوعی در طیف‌سنجی خاک

طیف‌سنجی خاک یکی از روش‌های نوین و غیرمخرب برای اندازه‌گیری سریع خصوصیات خاک است. این روش بر پایه تحلیل بازتاب طیفی خاک در محدوده مرئی، فروسرخ نزدیک و فروسرخ میانی استوار است. هر ویژگی شیمیایی یا معدنی خاک، الگوی خاصی از بازتاب طیفی تولید می‌کند که می‌توان آن را با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی تحلیل کرد.

در گذشته، تحلیل داده‌های طیفی خاک بیشتر بر اساس روش‌های آماری کلاسیک مانند رگرسیون حداقل مربعات جزئی انجام می‌گرفت. اما امروزه، الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند شبکه‌های عصبی عمیق، الگوریتم بوستینگ گرادیان و ماشین بردار پشتیبان، توانسته‌اند روابط غیرخطی پیچیده میان طیف‌های بازتابی و ویژگی‌های خاک (مانند میزان کربن آلی، رطوبت، فسفر و سایر عناصر غذایی) را با دقت بسیار بالاتری مدل کنند.

به‌ویژه مدل‌های مبتنی بر یادگیری عمیق قادرند طیف‌های با ابعاد بالا را بدون نیاز به انتخاب دستی متغیرها تحلیل کرده و به‌طور خودکار ویژگی‌های مؤثر را استخراج کنند. در نتیجه، پیش‌بینی ویژگی‌های خاک با دقتی نزدیک به روش‌های آزمایشگاهی و با هزینه‌ای بسیار کمتر انجام می‌شود. افزون بر این، ترکیب طیف‌سنجی با داده‌های مکانی و تصاویر ماهواره‌ای، به پژوهشگران اجازه می‌دهد تا مدل‌های سه‌بعدی از تغییرات مکانی و زمانی خاک ارائه دهند.

شبکه‌های عصبی آگاه از فیزیک در خاک

یکی از انتقادهای جدی به یادگیری ماشین در علوم خاک این است که «مدل خوب پیش‌بینی می‌کند ولی نمی‌داند چرا». از ۲۰۲۳ به بعد، الگوی تازه‌ای باب شد : ترکیب داده با فیزیک خاک .در این مدلها، معادلاتی مثل ریچاردز برای جریان آب در خاک، معادلات انتقال حرارت به صورت قید به تابع زیان افزوده می‌شوند؛ بنابراین شبکه فقط راه‌حل‌های فیزیکی مجاز را یاد می‌گیرد. این رویکرد برای پیش‌بینی رطوبت و دمای خاک، شبیه‌سازی خاک‌های ریزدانه و حتی برآورد پارامترهای هیدرولیکی که اندازه‌گیری‌شان سخت است، استفاده شده و نشان داده که نسبت به شبکه‌های صرفاً داده‌محور پایدارتر و تعمیم‌پذیرتر است.

جذابیت شبکه‌های عصبی آگاه از فیزیک در خاک این است که می‌توانیم داده کم میدانی را با دانش فیزیکی قطعی جبران کنیم؛ دقیقاً مسئله‌ای که در سنجش میدانی طیفی و در پایش کربن خاک داریم. شرکت‌ها و استارت‌آپ‌های پایش کربن خاک که برای کشاورزی احیایی کار می‌کنند هم به همین سمت رفته‌اند تا بتوانند از نمونه‌برداری کم، نقشه‌های سراسری کربن بسازند.

چالش‌ها و فرصت‌ها

هرچند کاربرد هوش مصنوعی در علوم خاک پیشرفت چشمگیری داشته است، اما هنوز چالش‌هایی نیز وجود دارد. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، کیفیت و پراکندگی داده‌ها است. مدل‌های یادگیری ماشین برای آموزش نیازمند داده‌های گسترده و دقیق هستند، در حالی که در بسیاری از مناطق، داده‌های خاک با چگالی پایین و دقت نامناسب جمع‌آوری شده‌اند. چالش دیگر، تعمیم‌پذیری مدل‌ها است. الگوریتم‌هایی که در یک منطقه آموزش داده می‌شوند، ممکن است در مناطق با اقلیم یا

زمین‌شناسی متفاوت عملکرد مطلوبی نداشته باشند. همچنین، تفسیرپذیری مدل‌های عمیق نیز مسئله‌ای مهم است؛ زیرا بسیاری از تصمیم‌گیران نیاز دارند بدانند چرا یک مدل، پیش‌بینی خاصی انجام داده است. با این حال، پیشرفت در حوزه‌هایی مانند یادگیری انتقالی و مدل‌های ترکیبی، چشم‌انداز آینده را روشن‌تر می‌کند. ادغام داده‌های طیفی، مکانی و آزمایشگاهی با الگوریتم‌های توضیح‌پذیر، می‌تواند به مدل‌هایی منجر شود که هم دقیق و هم قابل اعتماد باشند.

نتیجه‌گیری

ورود هوش مصنوعی به علوم خاک، تحولی بنیادین در درک و مدیریت این منبع حیاتی ایجاد کرده است. از نقشه‌برداری رقومی دقیق‌تر گرفته تا شناسایی سریع ویژگی‌های شیمیایی از طریق طیف‌سنجی، هوش مصنوعی توانسته است زمان، هزینه و خطای انسانی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد. آیندهٔ پژوهش در این حوزه، به سمت توسعهٔ مدل‌های یکپارچه‌ای پیش می‌رود که داده‌های سنجش‌ازدور، آزمایشگاهی و میدانی را با هم ترکیب کرده و تصویری پویا و چندبعدی از خاک ارائه دهند. بدیهی است که با گسترش زیرساخت‌های داده‌ای، افزایش دسترسی به داده‌های آزاد، و توسعهٔ الگوریتم‌های یادگیری عمیق بومی‌سازی‌شده، هوش مصنوعی می‌تواند به ابزاری کلیدی برای مدیریت پایدار خاک، امنیت غذایی و حفاظت از محیط‌زیست در قرن بیست‌ویکم تبدیل شود.

فهرست منابع

- Emadi, M., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Cherati, A., Danesh, M., Mosavi, A., Scholten, T. (2020). Predicting and Mapping of Soil Organic Carbon Using Machine Learning Algorithms in Northern Iran. Remote Sensing, 12(14), 2234.
- Golkar Amoli, M., Hasanlou, M., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Samadzadegan, F. (2024). Exploring the Potential of PRISMA Satellite Hyperspectral Image for Estimating Soil Organic Carbon in Marvdasht Region, Southern Iran. Remote Sensing, 16(12), 2149.
- Ma, Y., Minasny, B., Demattê, J.A. and McBratney, A.B., 2023. Incorporating soil knowledge into machine-learning prediction of soil properties from soil spectra. European Journal of Soil Science, 74(6), p.e13438.
- Minasny, B. and McBratney, A.B., 2025. Machine Learning and Artificial Intelligence Applications in Soil Science. European Journal of Soil Science, 76(2), p.e70093.
- Padarian, J., Minasny, B. and McBratney, A.B., 2020. Machine learning and soil sciences: A review aided by machine learning tools. Soil, 6(1), pp.35-52.
- Ren, Z., Zhou, S., Liu, D. and Liu, Q., 2025. Physics-informed neural networks: A review of methodological evolution, theoretical foundations, and interdisciplinary frontiers toward next-generation scientific computing. Applied Sciences, 15(14), p.8092.
- Taghizadeh-Mehrjardi, R., Amirian-Chakan, A., Zeraatpisheh, M., Sarmadian, F., Valavi, R., Davatgar, N., Behrens, T., Scholten, T., Schmidt, K. (2020). Improving the Spatial Prediction of Soil Organic Carbon Content in Two Contrasting Climatic Regions by Stacking Machine Learning Models and Rescanning Covariate Space. Remote Sensing, 12(7), 1095.
- Taghizadeh-Mehrjardi, R., Mahdianpari, M., Mohammadimanesh, F., Behrens, T., Toomanian, N., Scholten, T., Schmidt, K. (2020). Multi-task convolutional neural networks outperformed random forest for mapping soil particle size fractions in central Iran. Geoderma, 376, 114552.
- Taghizadeh-Mehrjardi, R., Schmidt, K., Toomanian, N., Heung, B., Behrens, T., Mosavi, A., S. Band, S., Amirian-Chakan, A., Fathabadi, A., Scholten, T. (2021). Improving the spatial prediction of soil salinity in arid regions using wavelet transformation and support vector regression models. Geoderma, 383, 114793.
- Wadoux, A.M.C., 2025. Artificial intelligence in soil science. European Journal of Soil Science, 76(2), p.e70080.
- Xie, X., Yan, H., Lu, Y. and Zeng, L., 2024. Simulating field soil temperature variations with physics-informed neural networks. Soil and Tillage Research, 244, p.106236.