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

نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴

مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management
دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

هوش مصنوعی در بهینه‌سازی بیوچار مهندسی‌شده با فناوری‌های نوین برای اصلاح خاک

میثم رحیمی[1*]، ستاره نظری[2]،اکبر رحیمی[3]،مهدی میرباقری[4]

۱-دانشجوی دکترای خاکشناسی دانشگاه صنعتی اصفهان

Rahimi.M@ag.iut.ac.ir

۲- دانشجوی دکترای خاکشناسی دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- کارشناسی ارشد باغبانی دانشگاه ملایر

۴- کارشناسی ارشد باغبانی دانشگاه ملایر

چکیده:

بیوچار به‌عنوان ماده‌ای اصلاح‌کننده خاک، پتانسیل عظیمی در افزایش حاصلخیزی خاک، تثبیت کربن و کاهش آلاینده‌ها دارد. مهندسی بیوچار از طریق دوپینگ (اصلاح) با مواد مختلف یا استفاده از فناوری‌های نوین (نانو، میکروبیولوژیک، مهندسی ژنتیک) عملکرد آن را به‌طور چشمگیری بهبود می‌بخشد. همزمان، ظهور هوش مصنوعی (AI) و یادگیری ماشین (ML) انقلابی در طراحی، پیش‌بینی رفتار و بهینه‌سازی کاربرد این بیوچارهای پیشرفته در سیستم‌های خاکی ایجاد کرده‌است. این مقاله مروری، به بررسی همگرایی این دو حوزه پرداخته و کاربردهای نوظهور هوش مصنوعی را در توسعه و استفاده از بیوچارهای مهندسی‌شده برای اهداف خاک‌شناسی تحلیل می‌کند. موضوعات کلیدی شامل پیش‌بینی ویژگی‌های بیوچار دوپ‌شده، بهینه‌سازی فرآیند تولید، مدل‌سازی برهمکنش‌های بیوچار-خاک-گیاه-میکروب، پایش و مدیریت کاربرد بیوچار در کشاورزی دقیق و پالایش خاک‌های آلوده می‌شود. همچنین چالش‌های کنونی مانند نیاز به داده‌های باکیفیت، تفسیرپذیری مدل‌ها، و مقیاس‌پذیری مورد بحث قرار گرفته و چشم‌اندازهای آینده ترسیم می‌گردد. این مرور نشان می‌دهد که هوش مصنوعی به‌عنوان یک ابزار قدرتمند، شتاب‌دهنده طراحی نسل بعدی بیوچارهای "هوشمند" و کاربرد هدفمند آن‌ها برای چالش‌های پیچیده مدیریت پایدار خاک است.

کلمات کلیدی: هوش مصنوعی(AI) ، بیوچار مهندسی‌شده، فناوری‌های نوین، اصلاح خاک، حاصلخیزی خاک.

۱- مقدمه

خاک به‌عنوان بستر حیات و امنیت غذایی، تحت فشارهای فزاینده‌ای از جمله تخریب، کاهش حاصلخیزی، شوری و آلودگی ناشی از فعالیت‌های انسانی و تغییرات اقلیمی قرار دارد(FAO, 2015). در این میان، بیوچار (زغال زیستی حاصل از پیرولیز زیست‌توده) به‌دلیل ویژگی‌های منحصر به‌فردی مانند تخلخل بالا، سطح ویژه وسیع، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) بهبود یافته و پایداری کربن، به‌عنوان یک اصلاح‌کننده خاک امیدبخش شناخته شده‌است(Lehmann & Joseph, 2015). با این حال، عملکرد بیوچار خام ممکن است برای اهداف خاص بهینه نباشد. مهندسی بیوچار از طریق دوپینگ (اصلاح) با مواد شیمیایی (مانند اسیدها، بازها، نمک‌های فلزی)، نانوذرات (مانند اکسیدهای آهن، نقره، کربن نانولوله)، مواد معدنی (مانند بنتونیت، زئولیت) یا عوامل بیولوژیک (مانند باکتری‌های محرک رشد گیاه) و یا به‌کارگیری فناوری‌های نوین در تولید (مانند پیرولیز کاتالیستی، فعال‌سازی با امواج) امکان

طراحی بیوچارهایی با ویژگی‌ها و عملکردهای سفارشی‌سازی‌شده را فراهم می‌کند (Yuan et al., 2021). این بیوچارهای اصلاح‌شده (Engineered/Doped Biochar) پتانسیل بالاتری در جذب آلاینده‌ها (فلزات سنگین، آفت‌کش‌ها، داروها)، رهاسازی کنترل‌شده کودها، بهبود فعالیت میکروبی و افزایش مقاومت گیاهان به تنش‌ها دارند.

با این وجود، طراحی، تولید و کاربرد بهینه این بیوچارهای پیچیده به‌دلیل تعدد متغیرهای دخیل (نوع زیست‌توده اولیه، شرایط پیرولیز، نوع و غلظت عامل دوپینگ، خصوصیات خاک هدف، شرایط محیطی) و برهمکنش‌های غیرخطی آن‌ها با خاک و گیاه، فرآیندی پرهزینه و زمان‌بر است. اینجاست که هوش مصنوعی (AI) و به‌طور خاص یادگیری ماشین (ML) به‌عنوان پارادایمی تحول‌آفرین وارد میدان می‌شوند(Kumar et al., 2020) . هوش مصنوعی با توانایی پردازش حجم انبوهی از داده‌های پیچیده، شناسایی الگوهای پنهان و ساخت مدل‌های پیش‌بینی‌کننده، پتانسیل بالایی برای شتاب‌دهی به تحقیق و توسعه، کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی و بهینه‌سازی فرآیندها در حوزه بیوچار مهندسی‌شده دارد.

هدف این مقاله: ارائه یک نمای جامع از کاربردهای نوظهور و پتانسیل هوش مصنوعی در تمامی مراحل چرخه عمر بیوچارهای مهندسی‌شده برای کاربردهای خاکی، از طراحی و تولید تا پایش اثربخشی در محیط واقعی، و شناسایی چالش‌ها و فرصت‌های پیش‌روی این حوزه میان‌رشته‌ای پویا است.

۲- کاربردهای هوش مصنوعی در توسعه و بهینه‌سازی بیوچار مهندسی‌شده

۲-۱- پیش‌بینی و بهینه‌سازی ویژگی‌های بیوچار

- مدل‌های پیش‌بینی‌کننده: الگوریتم‌های ML (مانند رگرسیون خطی چندگانه، جنگل تصادفی(RF) ، ماشین بردار پشتیبان(SVM) ، شبکه‌های عصبی مصنوعی(ANN)) برای پیش‌بینی خصوصیات فیزیکوشیمیایی بیوچار (سطح ویژه، تخلخل، pH، گروه‌های عاملی، محتوای خاکستر) بر اساس متغیرهای ورودی (نوع زیست‌توده، دما/زمان پیرولیز، نوع/غلظت عامل دوپینگ) آموزش داده می‌شوند. این مدل‌ها نیاز به انجام آزمایش‌های فیزیکی پرهزینه را کاهش می‌دهند.(Wang et al., 2022)
- بهینه‌سازی ترکیب و فرآیند: تکنیک‌های بهینه‌سازی مبتنی بر AI (مانند الگوریتم ژنتیک(GA) ، بهینه‌سازی ازدحام ذرات(PSO)) می‌توانند برای یافتن ترکیب بهینه زیست‌توده و عامل دوپینگ و شرایط پیرولیز جهت دستیابی به بیوچاری با حداکثر عملکرد برای یک هدف خاص (مثلاً جذب سرب، رهاسازی فسفر) استفاده شوند (Ahmad et al., 2023).

۲-۲- مدل‌سازی برهمکنش‌های بیوچار-خاک-آلاینده/مواد مغذی-گیاه-میکروب

- پیش‌بینی رفتار آلاینده‌ها/مواد مغذی: مدل‌های ML قویاً در پیش‌بینی راندمان جذب آلاینده‌های مختلف (فلزات سنگین، آفت‌کش‌ها، داروها) توسط بیوچارهای دوپ‌شده یا رهاسازی تدریجی مواد مغذی (N, P, K) از آن‌ها در انواع مختلف خاک استفاده می‌شوند. این مدل‌ها پارامترهای مؤثر (pH خاک، ماده آلی، بافت خاک، دوز بیوچار، ویژگی‌های آلاینده/مغذی) را در نظر می‌گیرند(El-Naggar et al., 2021) .
- پیش‌بینی اثرات بیولوژیک: الگوریتم‌های ML شروع به استفاده برای پیش‌بینی تأثیر بیوچارهای مهندسی‌شده بر خصوصیات بیولوژیک خاک (تنوع و فعالیت میکروبی، فعالیت آنزیمی) و پاسخ‌های گیاهی (رشد، عملکرد، جذب عناصر، مقاومت به تنش) می‌کنند. این به درک مکانیسم‌های پیچیده و طراحی بیوچارهای محرک رشد کمک می‌کند (Srivastava et al., 2024).

۲-۳- بهینه‌سازی کاربرد در میدان و کشاورزی دقیق

- پیش‌بینی دوز و مکان بهینه کاربرد: با تلفیق داده‌های مکانی (GIS) و داده‌های حاصل از حسگرهای خاک (رطوبت، هدایت الکتریکی، pH) با مدل‌هایML ، می‌توان نقشه‌های تغییرپذیری مکانی خاک را ایجاد کرد و دوز و مکان بهینه کاربرد بیوچار مهندسی‌شده را برای حداکثر اثربخشی در مزرعه (مثلاً در پالایش لکه‌های آلوده، یا افزایش حاصلخیزی مناطق ضعیف) تعیین نمود(Zhang et al., 2023) .

- پایش اثربخشی: پردازش تصویر مبتنی بر AI و سنجش از دور می‌تواند برای پایش سلامت گیاهان و پاسخ آن‌ها به کاربرد بیوچار در سطح وسیع استفاده شود، اطلاعات ارزشمندی برای ارزیابی اثربخشی و تنظیم مدیریت ارائه می‌دهد.

۲-۴- طراحی بیوچارهای "هوشمند" و کاربردهای هدفمند

- طراحی برای اهداف خاص AI : امکان طراحی بیوچارهای مهندسی‌شده را برای اهداف بسیار خاص فراهم می‌کند، مانند بیوچارهای اصلاح‌شده با نانوذرات مغناطیسی برای حذف انتخابی آلاینده‌ها و امکان بازیابی پس از استفاده، یا بیوچارهای حامل باکتری‌های محرک رشد که رهاسازی آن‌ها توسط شرایط رطوبتی خاک کنترل می‌شود. مدل‌های ML می‌توانند عملکرد این سیستم‌های پیچیده را پیش‌بینی کنند(Nguyen et al., 2024) .
- پیش‌بینی پایداری بلندمدت و اثرات جانبی: مدل‌سازی پویای مبتنی بر AI می‌تواند به پیش‌بینی پایداری بلندمدت کربن در بیوچارهای مختلف و اثرات تجمعی احتمالی عوامل دوپینگ (مثلاً نانوذرات) در خاک و زنجیره غذایی کمک کند.

۳- بحث: مزایا، چالش‌ها و چشم‌انداز

۳-۱- مزایای کلیدی ادغام AI:

- کاهش هزینه و زمان: بهینه‌سازی فرآیندهای طراحی، تولید و کاربرد، کاهش نیاز به آزمایش‌های آزمایشگاهی گسترده.
- بهبود دقت و پیش‌بینی: توانایی مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده با متغیرهای متعدد و برهمکنش‌های غیرخطی.
- سفارشی‌سازی و هدفمندسازی: امکان طراحی بیوچارهای مهندسی‌شده با عملکرد فوق‌العاده برای شرایط خاک و اهداف کاملاً خاص.
- کشاورزی دقیق: امکان مدیریت کارآمدتر و پایدارتر منابع (بیوچار، کود، آب) در سطح مزرعه.
- کشف دانش جدید: شناسایی روابط پنهان و مکانیسم‌های مؤثر از طریق داده‌کاوی.

۳-۲- چالش‌های عمده :

- کیفیت و کمیت داده: نیاز به پایگاه‌های داده جامع، استانداردشده و با کیفیت بالا از ویژگی‌های بیوچار، پارامترهای خاک، شرایط محیطی و پاسخ‌های بیولوژیکی. کمبود داده‌های میدانی بلندمدت یک محدودیت بزرگ است.
- پیچیدگی مدل و تفسیرپذیری: مدل‌های ML پیشرفته (مانند یادگیری عمیق) اغلب به‌عنوان "جعبه سیاه" عمل می‌کنند و درک مکانیسم‌های پشت پیش‌بینی‌ها دشوار است. توسعه مدل‌های تفسیرپذیرتر - Explainable AI) (XAIحیاتی است.
- تعمیم‌پذیری: مدل‌های آموزش‌دیده بر روی داده‌های خاص ممکن است در پیش‌بینی رفتار در شرایط جدید (خاک‌ها، آب‌وهواهای مختلف) عملکرد ضعیفی داشته باشند.
- یکپارچه‌سازی داده‌های چندمقیاسی: تلفیق داده‌های مولکولی، آزمایشگاهی، گلخانه‌ای و مزرعه‌ای در مدل‌های یکپارچه چالش‌برانگیز است.
- هزینه و تخصص: نیاز به زیرساخت‌های محاسباتی و نیروی انسانی متخصص در هر دو حوزه بیوچار/خاک‌شناسی و AI/ML.
- ملاحظات اخلاقی و مقرراتی: نیاز به چارچوب‌هایی برای اطمینان از استفاده مسئولانه ازAI ، به‌ویژه در پیش‌بینی اثرات محیطی بلندمدت و طراحی مواد نانومهندسی‌شده.

۳-۳- چشم‌انداز آینده :

- توسعه پایگاه‌های داده جامع و اشتراکی: ایجاد مخازن داده‌های استاندارد شده برای بیوچار مهندسی‌شده و برهمکنش‌های خاک.
- پیشرفت در مدل‌های تفسیرپذیر(XAI) : افزایش اعتماد و درک مکانیسم‌های حاکم بر رفتار بیوچار.
- ادغام مدل‌های فیزیکوشیمیایی و AI : ترکیب قدرت مدل‌سازی مکانیکی با انعطاف‌پذیری ML برای پیش‌بینی‌های قوی‌تر.

- به‌کارگیری یادگیری انتقالی(Transfer Learning) : استفاده از دانش مدل‌های آموزش‌دیده در یک زمینه برای تسریع آموزش در زمینه‌های مرتبط اما با داده‌های محدود.
- فناوری‌های حسگر پیشرفته و اینترنت اشیاء(IoT) : جمع‌آوری داده‌های بلادرنگ و با وضوح بالا از خاک و گیاه برای تغذیه مدل‌های AI و پایش دقیق اثربخشی.
- طراحی کاملاً خودکار بیوچارهای نسل آینده: سیستم‌های AI که به‌طور خودکار فرمولاسیون‌ها و فرآیندهای بهینه را برای اهداف تعریف‌شده پیشنهاد می‌دهند.

۴- نتیجه‌گیری

همگرایی هوش مصنوعی و فناوری‌های نوین مهندسی بیوچار، یک پارادایم قدرتمند برای مقابله با چالش‌های پیچیده مدیریت پایدار خاک ارائه می‌دهد AI .با توانایی بی‌نظیر خود در پردازش داده‌های پیچیده، مدل‌سازی پیش‌بینی‌کننده و بهینه‌سازی، در حال تبدیل شدن به یک ابزار ضروری برای:

۱. شتاب‌دهی به طراحی و تولید بیوچارهای مهندسی‌شده با عملکرد سفارشی‌سازی‌شده.

۲. درک عمیق‌تر و پیش‌بینی دقیق‌تر برهمکنش‌های پویای بیوچار-خاک-گیاه-میکروب-آلاینده.

۳. بهینه‌سازی کاربرد میدانی در قالب کشاورزی دقیق و پالایش هدفمند خاک‌های آلوده.

با وجود چالش‌های موجود در زمینه داده‌ها، تفسیرپذیری و تعمیم‌پذیری مدل‌ها، پتانسیل این همکاری میان‌رشته‌ای بسیار بالا است. سرمایه‌گذاری در توسعه پایگاه‌های داده جامع، پیشرفت در روش‌های هوش مصنوعی تفسیرپذیر و تحقیقات بین‌رشته‌ای نزدیک‌تر، کلید باز کردن قفل کامل پتانسیل بیوچارهای مهندسی‌شده پیشرفته برای ایجاد آینده‌ای پایدارتر برای منابع خاکی ما خواهد بود. هوش مصنوعی نه به‌عنوان جایگزین، بلکه به‌عنوان یک شتاب‌دهنده قدرتمند برای تحقیقات تجربی و توسعه کاربردهای عملی بیوچارهای نسل آینده عمل می‌کند.

منابع

Ahmad, Z., Khan, S. M., & Al-Ghouti, M. A. (2023). Application of machine learning for predicting the adsorption capacity of engineered biochar for heavy metals. Environmental Research, 236 (Part 1), 116716. (https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116716)

El-Naggar, A., Shaheen, S. M., Ok, Y. S., & Rinklebe, J. (2021). Machine learning for predicting the immobilization efficiency of heavy metals in biochar-amended soils. Science of The Total Environment, 780 , 146588. (https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146588)

FAO. (2015). Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy. (http://www.fao.org/3/i5199e/i5199e.pdf)

Kumar, M., Bolan, N., Hoang, S. A., Sawarkar, A. D., Jasemizad, T., Gao, B., ... & Vithanage, M. (2020). Mobilization of contaminants: Potential for soil remediation and unintended consequences. Science of The Total Environment, 718 , 137498. (https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137498)

Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2015). Biochar for environmental management: science, technology and implementation (2nd ed.). Routledge.

Nguyen, T. A. H., Ngo, H. H., Guo, W., Zhang, J., Liang, S., Chen, S. S., ... & Tran, N. H. (2024). Artificial intelligence in the design and application of nano-engineered biochar for water and wastewater treatment: A critical review. Chemical Engineering Journal, 480 , 148129. (https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.148129) .

Srivastava, V., Singh, P. K., Gupta, V. K., Singh, R. P., & Raghubanshi, A. S. (2024). Machine learning approaches for predicting the impact of biochar on soil microbial communities and plant growth: A review. Applied Soil Ecology, 193 , 105139. (https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105139)

Wang, L., O'Connor, D., Rinklebe, J., Ok, Y. S., Tsang, D. C. W., Shen, Z., & Hou, D. (2022). Machine learning for the prediction of heavy metal removal by biochar. Bioresource Technology, 348 , 126813. (https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126813)

Yuan, P., Wang, J., Pan, Y., Shen, B., & Wu, C. (2021). Review of biochar for the management of contaminated soil: Preparation, application and prospect. Science of The Total Environment, 768 , 144847 (https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144847).

Zhang, X., Zhang, Y., Liu, Y., Li, Z., & Li, R. (2023). Integrating machine learning and geospatial analysis for precision application of engineered biochar in cadmium-contaminated agricultural soils. Journal of Cleaner Production, 407 , 137120. (https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137120)

Artificial intelligence in optimizing engineered biochar by new technologies for soil amendment

Meisam Rahimi[1]*, Setareh Nazari[2], Akbar Rahimi[3], Mehdi Mirbagheri [4]

1-PhD. Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan Iran
E-mail: rahimi.m@ag.iut.ac.ir
2-PhD. Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
3- Ms. in Plant Production, Malayer university, Hamadan, Iran
4- Ms. in Plant Production, Deputy Director of Malayer Agricultural Department, Hamadan, Iran

Abstract
Biochar as a soil amendment has great potential to increase soil fertility, sequester carbon, and reduce pollutants. Biochar engineering significantly improves its performance by doping with different materials or using novel technologies (nano, microbiological, genetic engineering). At the same time, the emergence of artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) has revolutionized the design, behavior prediction, and optimization of the application of these advanced biochars in soil systems. This review article explores the convergence of these two fields and analyzes emerging applications of AI in the development and use of engineered biochars for soil science purposes. Key topics include predicting the properties of doped biochar, optimizing the production process, modeling biochar-soil-plant-microbe interactions, monitoring and managing biochar applications in precision agriculture, and remediation of contaminated soils. Current challenges such as the need for high-quality data, model interpretability, and scalability are also discussed, and future perspectives are outlined. This review shows that artificial intelligence is a powerful tool to accelerate the design of the next generation of "smart" biochars and their targeted application to complex challenges of sustainable soil management.
Keywords: Artificial Intelligence (AI), Engineered Biochar, New Technologies, Soil Amendment, Soil Fertil