



19th Iranian Soil Science Congress
2-4 December, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذرماه 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



مقایسه روش‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی انتقال کادمیم در گیاه گندم

نرگس عابدین زاده^{۱*}، امیر فتوت^۲، بصیر عطاردی^۳، ریحانه کشیک نویس رضوی^۴، محمد عبداللهی^۵

۱- دانشگاه فردوسی مشهد، گروه علوم خاک؛* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مقاله:

abedinzadeh.narges@mail.um.ac.ir

۲ و ۴- دانشگاه فردوسی مشهد، گروه علوم خاک،

۳- موسسه تحقیقات آب و خاک، منابع طبیعی خراسان رضوی، ایران

۵- جهاد دانشگاهی مشهد، واحد کامپیوتر

چکیده

انباشت کادمیم در محصولات زراعی، یکی از چالش‌های مهم در امنیت غذایی و سلامت انسان است، به‌ویژه در مناطقی که در معرض آلودگی‌های صنعتی قرار دارند. در این پژوهش، به‌منظور پیش‌بینی انتقال و تجمع کادمیم در گیاه گندم، عملکرد سه روش یادگیری ماشین شامل رگرسیون خطی، رگرسیون ریب و جنگل تصادفی مورد مقایسه قرار گرفت. آزمایش به‌صورت گلخانه‌ای با ده رقم گندم و سه سطح آلودگی کادمیم (۰، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا شد. غلظت کادمیم در بخش‌های مختلف گیاه شامل ریشه، ساقه، برگ و دانه اندازه‌گیری و مقادیر ضریب انتقال (TF) و ضریب تجمع زیستی (BAF) محاسبه گردید. نتایج نشان داد مدل جنگل تصادفی با ضریب تعیین بالاتر نسبت به دو مدل دیگر، دقت بیشتری در برآورد پارامترهای TF و BAF دارد. تحلیل اهمیت متغیرها نیز بیانگر نقش کلیدی غلظت کادمیم در ریشه و ساقه در پیش‌بینی مقادیر TF و BAF بود. یافته‌ها نشان می‌دهد استفاده از مدل‌های پیشرفته یادگیری ماشین، ابزاری کارآمد برای ارزیابی و مدیریت انتقال فلزات سنگین در سیستم خاک-گیاه است.

واژگان کلیدی: کادمیم، گندم، یادگیری ماشین، فاکتور انتقال

مقدمه

انباشت فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی به‌دلیل فعالیت‌های صنعتی، استفاده مداوم از کودها و پساب‌های آلوده، یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی عصر حاضر محسوب می‌شود. در میان این فلزات، کادمیم به‌دلیل تحرک بالا و قابلیت جذب و انتقال در گیاه، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ورود کادمیم به زنجیره غذایی از طریق محصولات کشاورزی می‌تواند پیامدهای جبران‌ناپذیری برای سلامت انسان و پایداری تولیدات غذایی به همراه داشته باشد. بررسی‌ها نشان داده است که کشت مداوم در خاک‌های آلوده به کادمیم موجب افزایش تجمع فلزات سنگین در غلات شده و در نتیجه، کیفیت محصولات



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



غذایی کاهش می‌یابد (Huang et al., 2023) از این‌رو، ارزیابی تحرک و جابه‌جایی کادمیم در خاک و گیاه برای درک بهتر پویایی این عنصر و ارائه راهکارهای مدیریتی ضروری است (Mubeen et al., 2023).

روش‌های سنتی سنجش و مدل‌سازی انتقال فلزات سنگین معمولاً زمان‌بر و پرهزینه‌اند و در بسیاری از موارد، توانایی محدودی در شناسایی روابط غیرخطی و پیچیده بین عوامل مؤثر دارند. در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های یادگیری ماشین (Machine Learning) به‌عنوان رویکردی نوین و داده‌محور در علوم خاک گسترش یافته است. این روش‌ها می‌توانند با استفاده از داده‌های تجربی، روابط پنهان بین ویژگی‌های خاک، غلظت فلزات، و پاسخ گیاه را با دقت بالاتری مدل‌سازی کنند (Xie et al., 2024).

پژوهش حاضر با هدف مقایسه عملکرد چند روش یادگیری ماشین شامل رگرسیون خطی، رگرسیون ریب و جنگل تصادفی در برآورد ضریب انتقال (TF) و ضریب تجمع زیستی (BAF) کادمیم در ارقام مختلف گندم انجام شد. این مطالعه تلاشی است در جهت ارائه مدلی دقیق و کارآمد برای پیش‌بینی انتقال کادمیم در سیستم خاک-گیاه، که می‌تواند به بهبود تصمیم‌گیری در مدیریت آلودگی فلزات سنگین و ارتقای ایمنی غذایی کمک کند.

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش، نمونه‌های خاک از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر برداشت و در یک آزمایش گلخانه‌ای کنترل شده مورد استفاده قرار گرفتند. آزمایش بر روی ده رقم گندم در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. هر رقم گندم در معرض سه سطح آلودگی کادمیم شامل صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک قرار گرفت. پس از پایان دوره رشد، گیاهان برداشت و به بخش‌های ریشه، ساقه، برگ و دانه تفکیک شدند. غلظت کادمیم در هر یک از اندام‌های گیاهی با استفاده از دستگاه جذب اتمی (AAS) اندازه‌گیری گردید.

به‌منظور مدل‌سازی انتقال و تجمع کادمیم در گیاه، از داده‌های به‌دست‌آمده برای آموزش سه الگوریتم یادگیری ماشین شامل رگرسیون خطی (Linear Regression)، رگرسیون ریب (Ridge Regression) و جنگل تصادفی (Random Forest) استفاده شد. عملکرد مدل‌ها با استفاده از شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2) و میانگین مربعات خطا (MSE) ارزیابی گردید تا دقت و کارایی پیش‌بینی هر مدل تعیین شود.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان داد که الگوریتم جنگل تصادفی (Random Forest) بالاترین دقت را در پیش‌بینی شاخص‌های انتقال و تجمع کادمیم داشت، به‌طوری‌که ضریب تعیین (R^2) برای فاکتور انتقال (TF) برابر با ۰/۹۲ و برای ضریب تجمع زیستی (BAF) برابر ۰/۸۸ به‌دست آمد. تحلیل اهمیت متغیرها نشان داد که غلظت کادمیم در ساقه و برگ بیشترین تأثیر را بر فاکتور انتقال (TF) دارد، در حالی که غلظت کادمیم در خاک و ریشه مؤثرترین پارامترها در تعیین ضریب تجمع زیستی (BAF) بودند. نوع رقم گندم نیز اثر متوسطی بر مقادیر پیش‌بینی شده داشت.



19th Iranian Soil Science Congress
2-4 December, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذرماه 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



الگوی توزیع کادمیم در گیاهان مورد بررسی نشان داد که بیشترین میزان تجمع این عنصر در ریشه رخ داده و کمترین مقدار آن در دانه‌ها مشاهده شد. این موضوع بیانگر آن است که ریشه در گیاه گندم به‌عنوان محل اصلی نگهداشت کادمیم عمل می‌کند و ورود آن به بخش‌های خوراکی گیاه محدودتر است. نتایج این پژوهش بیانگر کارایی بالای روش‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی فرآیند انتقال و تجمع فلزات سنگین در سیستم خاک-گیاه است و نشان می‌دهد که با انتخاب رقم‌های مناسب گندم و اعمال مدیریت صحیح خاک، می‌توان میزان جذب کادمیم در بخش‌های خوراکی گیاه را به‌طور مؤثری کاهش داد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش بر نقش مؤثر روش‌های یادگیری ماشین در ارزیابی خطرات زیست‌محیطی و مدیریت کشاورزی تأکید دارد. به‌کارگیری این روش‌ها امکان تحلیل دقیق و داده‌محور از پویایی کادمیم در سیستم خاک-گیاه را فراهم می‌سازد. با ادغام رویکردهای محاسباتی پیشرفته و اصول مدیریتی در تولیدات زراعی، می‌توان راهکارهای عملی برای بهبود ایمنی غذایی، کاهش تجمع فلزات سنگین در محصولات کشاورزی و ارتقای پایداری تولید فراهم کرد.

فهرست منابع

- Huang, J., et al. 2023. Predicting soil available cadmium by machine learning based on soil properties. *Hazardous Material*, 15:460:132327.
- Mubeen, S., et al. 2023. Agricultural Strategies to Reduce Cadmium Accumulation in Crops for Food Safety. *Agricultural Journal*, 13(2), 471.
- Xie, Y., et al. 2024. Predicting the Bioaccessibility of Soil Cd, Pb, and As with Advanced Machine Learning for Continental-Scale Soil Environmental Criteria Determination in China. *Environ Health (Wash)*, 6;2(9):631–641.

