Journal of Research in Environmental Health
Volume 11, Issue 4

Evaluation and prediction of health and hygiene indices of heavy metals in agricultural fields in Hamidieh city: a Machine Learning Approach

Khoshnaz Payandeh
*Research Group of Artificial Intelligence Application Development in Agriculture, Environment and Medicine, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran. **(Corresponding Author)** Khpayandeh@iau.ac.ir
Mehdi Forouzanfar
Research Group of Artificial Intelligence Application Development in Strategic Industries, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.
Mohammad Velayatzadeh
Young Researchers and Elites Club, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

Received: 2025/05/31
Accepted: 2025/10/03
Doi:10.22038/jreh.2026.27468

Abstract

Background and Objective: Heavy metals are one of the dangerous pollutants present in soil that can cause problems for agricultural products. This study aimed to evaluate heavy metals in the soils of agricultural fields in Hamidieh city in the northwest of Ahvaz metropolis in 2024.

Materials and Methods: Sampling was carried out in the fall from 4 agricultural fields with 20 replicates. In this study, the elements in the soil were measured using an atomic absorption-plasma ICP-AES model Varian 710-ES manufactured by Agilent Company, USA. Health risk assessment and two random forest models and support vector regression of soil heavy metals were performed.

Results: The average concentrations of Cd, Pb, As, Cu, Zn and Cr were 0.58, 76, 1.46, 34.25, 174.42 and 68.95 mg kg-1, respectively. The average pollution factor, pollution degree, modified pollution degree, pollution load index, Nemro pollution index and biological hazard index of heavy metals were 1.12, 16.05, 2.67, 1.49, 3.34 and 130.99. The highest carcinogenic risk index and non-carcinogenic risk index for Cr for children were 2.72×10-5 and 2.39×10-1. Pb also had the highest non-carcinogenic risk index (2.77×10-1) for the gastrointestinal tract of children.

Conclusion: The results of heavy metals in the soil of agricultural fields in Hamidiyeh city showed that these pollutants had a high impact on the soil and caused moderate to high pollution, because the pollution load index of the studied elements was higher than 1. The evaluation of the non-carcinogenic risk index and carcinogenic risk index showed that the elements cadmium, lead, arsenic, copper, zinc and chromium do not pose a problem for human health.

Keywords: Heavy Metals, Agricultural Products, Soil Element Contamination, Element Toxicity

Open Access Policy: This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. To view a copy ofthis licence, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Citation: Payandeh KH, Forouzanfar M, Velayatzadeh M. Evaluation and prediction of health and hygiene indices of heavy metals in agricultural fields in Hamidieh city: a Machine Learning Approach. *Journal of Research in Environmental Health.* 11(4):57-74.

ارزیابی و پیش‌بینی شاخص‌های سلامتی و بهداشتی فلزات سنگین خاک مزارع کشاورزی شهر حمیدیه با رویکرد یادگیری ماشین

خوشناز پاینده
* گروه پژوهشی توسعه کاربرد هوش مصنوعی در کشاورزی، محیط زیست و پزشکی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران. **(نویسنده مسئول)**
Khpayandeh@iau.ac.ir
مهدی فروزانفر
گروه پژوهشی توسعه کاربرد هوش مصنوعی در صنایع استراتژیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.
محمد ولایت‌زاده
باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۱
نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

زمینه و هدف: یکی از آلاینده‌های خطرناک موجود در خاک فلزات سنگین می‌باشند که می‌توانند برای محصولات کشاورزی مشکلاتی را ایجاد کنند. این تحقیق با هدف ارزیابی فلزات سنگین در خاک‌های مزارع کشاورزی شهر حمیدیه در شمال غرب کلانشهر اهواز در سال ۱۴۰۳ انجام شد.

مواد و روش‌ها: نمونه برداری در فصل پاییز از ۴ مزرعه کشاورزی با تکرار ۲۰ نمونه انجام شد. در این تحقیق فلزات سنگین در خاک با استفاده از دستگاه جذب اتمی ـ پلاسما ICP-AES مدل Varian 710-ES ساخت شرکت اجیلنت آمریکا اندازه‌گیری شدند. ارزیابی خطر سلامت و دو مدل جنگل تصادفی و رگرسیون بردار پشتیبان فلزات سنگین خاک انجام شد.

یافته‌ها: میانگین غلظت کادمیوم، سرب، آرسنیک، مس، روی و کروم به‌ترتیب ۰/۵۸، ۷۶، ۱/۴۶، ۳۴/۲۵، ۱۷۴/۴۲ و ۶۸/۹۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌دست آمد. میانگین فاکتور آلودگی، درجه آلودگی، درجه آلودگی اصلاح شده، شاخص بار آلودگی، شاخص آلودگی نمرو و شاخص خطر زیستی فلزات سنگین۱/۱۲، ۱۶/۰۵، ۲/۶۷، ۱/۴۹، ۳/۳۴ و ۱۳۰/۹۹ بود. بالاترین شاخص خطر سرطان‌زایی و شاخص خطر غیرسرطان‌زایی مربوط کروم برای کودکان $۲/۷۲\times۱۰^{-۵}$ و $۲/۳۹\times۱۰^{-۱}$ به‌دست آمد. سرب نیز بالاترین شاخص خطر غیرسرطان‌زایی ($۲/۷۷\times۱۰^{-۱}$) را برای دستگاه گوارش کودکان داشت.

نتیجه‌گیری: نتایج فلزات سنگین در خاک مزارع کشاورزی شهر حمیدیه نشان داد که این آلاینده‌ها تأثیر بالایی بر خاک داشته و باعث آلودگی متوسط تا زیاد شدند، زیرا مقدار شاخص بار آلودگی عناصر مورد مطالعه بالاتر از ۱ به‌دست آمده است. ارزیابی شاخص خطر غیرسرطان‌زایی و شاخص خطر سرطان‌زایی نشان داد که کادمیوم، سرب، آرسنیک، مس، روی و کروم برای سلامتی انسان مشکلی ایجاد نمی‌کنند.

کلید واژه‌ها: فلزات سنگین، محصولات کشاورزی، آلودگی عناصر خاک، سمیت عناصر

استناد: پاینده خ، فروزانفر م، ولایت‌زاده م. ارزیابی و پیش‌بینی شاخص‌های سلامتی و بهداشتی فلزات سنگین خاک مزارع کشاورزی شهر حمیدیه با رویکرد یادگیری ماشین. *فصلنامه‌ی پژوهش در بهداشت محیط*. زمستان ۱۴۰۴;۱۱(۴): ۵۷-۷۴.

مقدمه

مزارع کشاورزی پایه و اساس تولید مواد غذایی هستند و تأمین قابل اعتماد مواد مغذی ضروری برای بقای انسان را تضمین می‌کنند. آن‌ها طیف متنوعی از محصولات کشاورزی و دامی را فراهم می‌کنند و به یک رژیم غذایی متعادل و رفاه عمومی کمک می‌کنند. بخش کشاورزی، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، یک کارفرمای اصلی است و معیشت بخش قابل توجهی از جمعیت را تأمین می‌کند. صادرات کشاورزی می‌تواند منبع حیاتی درآمد برای کشورها، به‌ویژه کشورهایی با آب و هوای مطلوب و زمین‌های حاصلخیز باشد. شیوه‌های کشاورزی پایدار می‌توانند با ترسیب کربن در خاک و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به کاهش تغییرات اقلیمی کمک کنند. کشاورزی در مدیریت آب، حفاظت از خاک و حفاظت از تنوع زیستی نقش دارد. مزارع کشاورزی منبع اصلی مواد اولیه برای صنایع مختلف ازجمله نساجی، فرآوری مواد غذایی و داروسازی هستند (۱،۲).

خاک مزارع کشاورزی به‌عنوان محیطی که از حیات پشتیبانی می‌کند، یک بافر طبیعی آلاینده‌ها، بستری برای تولید مواد غذایی و منبع تنوع زیستی، نقش اساسی در توسعه انسانی دارد. با این‌حال، خاک‌ها نیز به‌دلیل صنعتی شدن و توسعه و پیشرفت فناوری تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی قرار می‌گیرند (۳). به‌طور خاص، خاک‌های کشاورزی به‌دلیل نقش آن‌ها در تولید مواد غذایی برای انسان ضروری هستند، اما گاهی اوقات توسط فلزات سنگین در سطوح فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی به‌شدت تخریب می‌شوند (۴). فلزات سنگین به‌دلیل فعالیت‌های کشاورزی نظیر کوددهی و سم‌پاشی یا نزدیکی منطقه کشاورزی به منابع آلودگی خاک، مانند مناطق صنعتی یا شهری، زیرساخت‌های تولید انرژی یا محل‌های دفن زباله، به خاک می‌رسند. علاوه بر این، آلودگی خاک کشاورزی نه‌تنها یک مسئله زیست‌محیطی است، زیرا انتقال بالقوه آلاینده‌ها از خاک به محصولات کشاورزی می‌تواند بر اساس خطر آن‌ها برای انسان، نگرانی ایمنی نیز ایجاد کند (۵،۶).

فلزات سنگین به‌عنوان تهدید خطرناک برای سلامت انسان و محیط‌زیست در نظر گرفته شده است. ایمنی مواد غذایی به‌دلیل انباشت فلزات سنگین در محصولات کشت شده در خاک‌های کشاورزی آلوده، به یک نگرانی جدی جهانی تبدیل شده است (۷). فلزات سنگین مانند جیوه، آرسنیک، کادمیوم، کروم و سرب به‌دلیل توانایی آن‌ها در ایجاد اثرات مضر بر سلامتی، توجه ویژه و خاصی را به‌خود جلب کرده‌اند (۸)، اما برخی عناصر نظیر روی، مس، آهن و منگنز در بدن انسان نقش زیستی را ایفا می‌کنند و در واکنش‌های شیمیایی، سوخت‌وسازها و فعالیت‌های زیستی عملکرد مشخص دارند، در حالی‌که با افزایش غلظت آن‌ها سبب سمیت و بیماری می‌شوند (۹). تغییرپذیری مکانی فلزات سنگین در خاک‌ها ممکن است به ترکیبی از عوامل متعدد نسبت داده شود. سطوح طبیعی این عناصر عمدتاً توسط مواد مادری و فرآیندهای خاکسازی کنترل می‌شوند (۳). منابع مهم انسانی عناصر فلزی در خاک‌های کشاورزی شامل کاربرد کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها و لجن فاضلاب، به‌ویژه برای کادمیوم، سرب و آرسنیک است. انتشار گازهای صنعتی، اگزوز وسایل نقلیه و احتراق سوخت‌های فسیلی نیز می‌توانند منجر به غنی‌سازی قابل توجه فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی، مانند سرب، روی و مس شوند (۵،۱۰).

جذب فلزات سنگین از خاک‌های آلوده توسط گیاهان، مسیر اصلی ورود این عناصر به زنجیره‌ی غذایی انسان و حیوان است (۴). فلزات سنگین که در زنجیره‌ی غذایی تجمع زیستی می‌یابند و برای انسان مضر هستند، از طریق استنشاق و بلع وارد بدن انسان می‌شوند و بلع، مسیر اصلی تجمع در انسان است (۱۱). علاوه بر این، فلزات سنگین مدت‌هاست که توسط انسان برای ساخت آلیاژهای فلزی و رنگدانه‌ها برای رنگ، سیمان، کاغذ، لاستیک و سایر مواد استفاده می‌شوند. این فلزات سنگین هنگامی که این گیاهان به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم مصرف می‌شوند، هم‌چنین از طریق هوا و آب، وارد سیستم بدن می‌شوند و ممکن است در طول زمان تجمع زیستی پیدا کنند (۷،۸). فلزات سنگین که از هر مسیری وارد بدن انسان می‌شوند، بر سیستم ایمنی، فرآیندهای فیزیولوژیکی اساسی بیان سلول و ژن تأثیر می‌گذارند و ممکن است باعث تهوع، بی‌اشتهایی، استفراغ، ناهنجاری‌های دستگاه گوارش و درماتیت شوند (۱۲).

شاخص‌های خطرات سلامتی و بوم‌شناسی برخی خاک-های سطحی منطقه غرب کشور در سنندج و اسلام آباد

غرب نشان داده عنصر کادمیوم در خاک‌های نمونه‌برداری‌شده منطقه اسلام‌آباد به‌طور معنی‌داری پایین‌ترین مقدار را در میان فلزات سنگین مورد مطالعه داشت. بالاترین شاخص خطر فلزات سنگین خاک در منطقه اسلام‌آباد و سنندج به‌ترتیب مربوط به عنصر آلومینیم و کادمیوم برای کودکان از راه جذب پوستی ۲/۵۳ و $۳/۳ \times ۱۰^{-۱۰}$ به‌دست آمد (۷). هم‌چنین گزارش شده است که فاکتور غنی‌شدگی سرب، کروم، مس و کبالت در خاک‌های کشاورزی رامهرمز بالاتر از حمیدیه و دزفول بود و نیکل و روی در خاک‌های حمیدیه بالاتر از دزفول و رامهرمز بالاتر به‌دست آمد. شاخص زمین انباشتگی کروم، روی و مس در خاک مزارع کشاورزی دزفول بالاتر بود، سرب و کبالت در خاک‌های حمیدیه بالاتر از دزفول و رامهرمز بالاتر به‌دست آمد و نیکل در مزارع کشاورزی رامهرمز بالاتر بود (۱۳). میانگین میزان کادمیوم، نیکل و سرب در خاک مزارع کشاورزی شهرستان‌های باغملک، شاور و شوشتر به‌ترتیب ۵/۰۴، ۸۳/۴۴ و ۳۱۲/۶۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است. میانگین مقادیر کادمیوم و نیکل در خاک مزارع مورد مطالعه بالاتر از میانگین جهانی بود، اما سرب در خاک مناطق مورد مطالعه کمتر از میانگین جهانی بود. خطر اکولوژیکی فلزات سنگین در خاک نشان داد که مزارع شهرستان‌های باغملک و شاوور دارای خطر اکولوژیکی بسیار بالا و شهرستان شوشتر دارای خطر اکولوژیکی شدید است (۱۴). غلظت عناصر سمی، ارزیابی خطر سلامت انسان و سرطان‌زایی آن در خاک‌های شمال اهواز نشان داده بیشترین میزان آهن در نمونه‌های خاک مناطق ویس و عرب اسد به‌میزان ۹۰۱۳/۷۰ و ۹۲۰۸/۹۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد، در حالی‌که کادمیوم کمترین غلظت را در خاک‌های مزارع ویس و عرب اسد به‌ترتیب ۱/۵۸ و ۱/۵۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم نشان داد. ضریب خطر فلزات سنگین، خطر غیر سرطان زایی و شاخص خطر سرطان زایی در خاک مزارع کشاورزی در مناطق عرب اسد و ویس نشان داد که کادمیوم، سرب، نیکل، مس، کروم، روی آهن، منگنز و کبالت خطر قابل توجهی برای سلامت انسان به همراه داشتند. بنابراین رعایت موارد بهداشتی با توجه به شاخص خطر غیر سرطان‌زا بودن فلزات توصیه می‌شود. به طور کلی استفاده‌ی بیش از حد از کودهای کشاورزی (فسفات و نیترات)، فعالیت‌های صنعتی و انسانی می‌تواند آلودگی منابع و محصولات را افزایش دهد که اثرات جبران ناپذیری بر سلامت انسان به‌ویژه در خطر سرطان‌زایی دارد (۶،۱۰). در تحقیق دیگری گزارش شده است که نمونه‌های خاک کارخانه فولاد خوزستان در شهر اهواز دارای غلظت‌های متفاوتی از فلزات سنگین بودند که کبالت بالاترین و کادمیوم کمترین مقادیر را در خاک داشتند. بر اساس نتایج شاخص‌های آلودگی چنین می‌توان استنباط کرد که فرآیندهای زمین‌شناسی و اقلیمی تاثیر بالاتری در آلودگی خاک دارند (۸).

کلانشهر اهواز یکی از قطب‌های صنعتی جنوب ایران دارای ۸ منطقه شهری می‌باشد که دارای کارخانه‌های صنایع فولادی، نفت و گاز، شهرک‌های صنعتی بزرگ و کوچک و کارخانجات مختلف تولید صنایع عنصری می‌باشد. هم‌چنین جمعیت بالای این کلانشهر سبب تردد خودروهای متعددی در سطح شهر و جاده‌های بین شهری شده است که مزارع کشاورزی حمیدیه نیز در مجاورت مسیرها و جاده‌های مواصلاتی هستند. علی‌رغم پیشرفت‌های قابل توجه، تمایز غنی‌سازی طبیعی از انسانی این فلزات سنگین در مقیاس‌های مکانی که هر دو منبع بالقوه را در بر می‌گیرد، هم‌چنان یک چالش و یک اولویت تحقیقاتی است. با توجه به این‌که کلانشهر اهواز یکی از قطب‌های صنعتی کشور و اراضی اطراف آن در شمال‌غرب این کلانشهر مزارع کشاورزی فراوانی دارد، بنابراین این مطالعه با هدف ارزیابی بوم‌شناسی، بهداشتی و سلامت وضعیت آلودگی فلزات سنگین سرب، کادمیوم، آرسنیک، مس، روی و کروم در برخی خاک‌های سطحی مزارع کشاورزی شهر حمیدیه انجام شد.

روش‌کار

محدوده‌ی تحقیق

این مطالعه در مزارع کشاورزی شمال غرب کلانشهر اهواز در شهر حمیدیه انجام شد. کلانشهر اهواز مرکز استان خوزستان در جنوب غرب ایران با مختصات جغرافیایی ۳۱ درجه و ۱۳ دقیقه شمالی تا ۳۱ درجه و ۲۳ دقیقه شمالی و ۴۸ درجه و ۳۲ دقیقه شرقی تا ۴۸ درجه و ۴۷ دقیقه غربی قرار دارد. در حال حاضر کلانشهر اهواز هشت منطقه شهری با جمعیت ۱۱۸۴۷۸۸ نفر دارد. شهر حمیدیه در ۲۵ کیلومتری شمال غرب کلانشهر اهواز با جمعیت

۵۳۷۶۲ نفر قرار دارد که شرایط آب‌وهوایی گرم و مرطوب دارد و دارای مزارع کشاورزی فراوان و متعدد می‌باشد.

نمونه‌برداری

نمونه برداری به‌صورت سیستماتیک در فصل پاییز سال ۱۴۰۳ از خاک‌های سطحی به عمق ۱۰ سانتیمتر در راستای تعیین منبع دقیق آلودگی‌های محیطی خاک صورت گرفت. نمونه‌های خاک به‌صورت پلات ۱۰۰۰۰ متر مربع درنظر گرفته شد که در هر ۲۵۰ متر یک نمونه خاک تهیه شد. نمونه‌های خاک از ۴ مزرعه با ۲۰ تکرار تهیه شدند. در مجموع در هر ایستگاه ۸۰ نمونه خاک نمونه‌برداری گردید. نمونه‌های خاک با استفاده از بیل از تمام نقاط نمونه‌برداری انتخاب‌شده جمع‌آوری شد. سپس نمونه‌های فرعی جمع‌آوری‌شده با هم مخلوط شدند تا یک کیلوگرم نمونه نماینده به‌دست آید. در نهایت، نمونه‌های خاک در کیسه‌های پلی‌اتیلن زیپ‌دار برای جلوگیری از آلودگی بیشتر گرفته شدند و بلافاصله برای تجزیه‌وتحلیل بیشتر به آزمایشگاه منتقل شدند (۱۵).

اندازه‌گیری فلزات سنگین

در این تحقیق فلزات سنگین در خاک با استفاده از دستگاه جذب اتمی ـ پلاسما ICP-AES مدل Varian 710-ES ساخت شرکت اجیلنت آمریکا که از قبل کالیبره شده بود تزریق گردید و میزان عناصر مورد نظر در هر یک از نمونه‌ها مشخص شد. پلاسمای جفت شده القایی در یک گاز بی‌اثر (معمولاً آرگون) در یک مشعل با سه لوله متحدالمرکز ساخته شده از کوارتز یا سرامیک، با کمک یک ژنراتور فرکانس رادیویی و یک سیم‌پیچ القایی تولید می‌شود. فرکانس‌های مجاز برای ژنراتورهای پلاسما ۲۷/۱۲ مگاهرتز و ۴۰/۶۸ مگاهرتز هستند، اما فرکانس ۴۰/۶۸ مگاهرتز به طور فزاینده‌ای در تجهیزات مدرن استفاده می‌شود، زیرا پایداری پلاسما بالاتر را تضمین می‌کند و کانال مرکزی بالاتری را در پلاسمای جفت شده القایی ایجاد می‌کند و به معرفی در دسترس‌تر به افزایش عملکرد نمونه کمک می‌کند (۱۶،۱۷). خطی بودن روش پیشنهادی با ساخت منحنی‌های کالیبراسیون برای هر عنصر ارزیابی شد. بنابراین، سطح پیک هر خط انتشار انتخاب شده در برابر غلظت یک سری محلول استاندارد در محدوده بین ۰/۱ میلی‌گرم در لیتر در و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر، که در رقیق‌کننده همسان با ماتریس حاوی ۲۰ درصد اسیدنیتریک غلیظ و ۲ درصد آب اکسیژنه به‌منظور تقلید از شرایط اکسیداتیو پس از فرآیند هضم اسیدی تهیه شد، ترسیم شد. سپس از تحلیل رگرسیون خطی حداقل مربعات استفاده شد و شیب، فاصله و ضریب تعیین منحنی‌های کالیبراسیون برای هر عنصر سمی محاسبه شد. برای محاسبه حدود تشخیص (LODs)[1] و حدود کمی (LOQs)[2] برای تجزیه‌های مورد بررسی، ۱۰ محلول خالی حاوی ۲۰ درصد اسیدنیتریک غلیظ و ۲ درصد آب اکسیژنه تهیه و مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت. مقدار حد تشخیص هر آنالیت غلظتی در نظر گرفته شد که برابر با سه برابر انحراف استاندارد پاسخ محلول‌های خالی در مقابل شیب منحنی کالیبراسیون بود. به‌طور مشابه، مقدار حد کمیت هر آنالیت، غلظتی در نظر گرفته شد که برابر با ده برابر انحراف استاندارد پاسخ محلول‌های خالی در مقابل شیب منحنی کالیبراسیون بود. حد تشخیص فلزات کادمیوم، سرب، آرسنیک، مس، روی و کروم به‌ترتیب ۱/۵۷، ۵/۹۵، ۰/۱۸، ۰/۱۵، ۱/۵۵ و ۰/۴۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم و حد کمیت فلزات کادمیوم، سرب، آرسنیک، مس، روی و کروم به‌ترتیب ۵/۲۴، ۱۹/۸۳، ۰/۶۱، ۰/۵۲، ۵/۱۸ و ۱/۴۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. هم‌چنین خط انتشار[3] فلزات کادمیوم، سرب، آرسنیک، مس، روی و کروم به‌ترتیب ۲۲۶/۵۰۲، ۲۱۷، ۳۲۸/۰۶۸، ۳۲۴/۷۵۲، ۲۱۳/۸۵۷ و ۳۵۷/۸۶۹ نانومتر و حد بالای منحنی کالیبراسیون[4] برای همه فلزات ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود.

شاخص‌های آلودگی خاک

در این تحقیق برای تعیین شدت و سطوح مختلف آلودگی در خاک از برخی شاخص‌های آلودگی محیط زیست استفاده شد. برای ارزیابی آلودگی عناصر در خاک‌های سطحی مورد مطالعه از فاکتور آلودگی (CF)[5] استفاده شد (رابطه ۱) که در این رابطه C_n غلظت هر عنصر در خاک و C_o متوسط غلظت هر عنصر در زمینه می‌باشد. غلظت زمینه فلزات کادمیوم، سرب، آرسنیک، مس، روی و کروم به‌ترتیب ۰/۳، ۲۰، ۱۳، ۴۵، ۹۵ و ۹۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم درنظرگرفته شد (۱۸). بر اساس طبقه‌بندی ارائه

[1] Limit of Detection
[2] Limit of Quantification
[3] Emission Line
[4] Upper Limit of Calibration Curve
[5] Contamination Factor

شده توسط هاکانسون، CF<۱ آلودگی کم، ۱≤CF<۳ آلودگی متوسط، ۳≤CF<۶ آلودگی زیاد و ۶≤ CFآلودگی شدید را نشان می‌دهند (۱۹):

رابطه ۱: $$C_f = C_o \div C_n$$

مجموع فاکتورهای آلودگی برای عناصر مورد بررسی نشان‌دهنده‌ی درجه آلودگی (Cdeg)[1] است که از رابطه ۲ به‌دست آمد. بر اساس طبقه‌بندی سطوح درجه آلودگی، Cdeg<۸ آلودگی کم، ۸≤Cdeg<۱۶ آلودگی متوسط، ۱۶≤Cdeg<۳۲ آلودگی زیاد و Cdeg≥۳۲ آلودگی شدید را نشان می‌دهند (۱۹):

رابطه ۲: $$Cdeg = \Sigma\ CF$$

در شاخص درجه آلودگی ارائه‌شده توسط Hakanson محدودیت‌هایی وجود داشت (۱۹)، به همین دلیل Abrahim درجه آلودگی اصلاح شده (mCd)[2] را ارائه کرد که بر اساس آن CF فاکتور آلودگی و n تعداد فلزات سنگین مورد مطالعه می‌باشد که طبق رابطه ۳ محاسبه شد. بر اساس طبقه‌بندی سطوح درجه آلودگی اصلاح شده، mCd<۱/۵ عدم آلودگی تا آلودگی بسیار کم، ۱/۵≤mCd<۲ آلودگی کم، ۲≤mCd<۴ آلودگی متوسط، ۴≤mCd<۸ آلودگی زیاد، ۸≤mCd<۱۶ آلودگی بسیار زیاد، ۱۶≤mCd<۳۲ آلودگی فوق العاده زیاد و Cdeg≥۳۲ آلودگی بی نهایت زیاد را نشان می‌دهند (۲۰):

رابطه ۳: $$mCd = \Sigma\ CF \div n$$

فاکتور غنی‌شدگی (EF)[3] برای هر عنصر از نسبت بین عنصر نرمالیزه‌کننده به مقدار زمینه عناصر، طبق رابطه ۴ محاسبه شد. عنصر مرجع در تعیین فاکتور غنی‌شدگی عنصری است که منشا کاملاً زمین‌شناسی داشته باشد. در این تحقیق از عنصر آهن به‌عنوان عنصر مرجع (۴۷۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) استفاده گردید (۱۸). برای غلظت زمینه فلزات سنگین در خاک‌های مورد مطالعه، نمونه‌هایی از مناطق بکر و دست نخورده مزارع کشاورزی مورد مطالعه تهیه و فلزات سنگین در آن ها تعیین خواهد شد (سیستانی و همکاران، ۱۳۹۶). بر اساس طبقه‌بندی ارائه‌شده، EF<۲ آلودگی کم، ۲≤EF<۵ آلودگی متوسط، ۵≤EF<۲۰ آلودگی زیاد، ۲۰≤EF<۴۰ آلودگی بسیار زیاد و EF≥۴۰ آلودگی به‌شدت زیاد را نشان می‌دهند (۱۹):

رابطه ۴: $$EF = (Metal / Fe)_{Sample} \div (Metal/ Fe)_{Background}$$

ارزیابی خطر اکولوژیک (Er)[4] و شاخص پتانسیل خطر زیستی (RI)[5] خاک‌های مورد مطالعه از رابطه‌های ۵ و ۶ محاسبه شد. در این رابطه CF فاکتور آلودگی، Er ریسک اکولوژیکی هر عنصر مورد مطالعه، RI ریسک اکولوژیکی مجموع عناصر را نشان می‌دهد. Hakanson (۱۹۸۰) مقدار TR را که شاخص سمی بودن فلزات سنگین می‌باشد برای تحلیل مقادیر به‌دست آمده تعریف کرده است. نرخ سمیت فلزات کادمیوم، سرب، آرسنیک، مس، روی و کروم به‌ترتیب ۳۰، ۵، ۱۰، ۵، ۲ و ۲ درنظر گرفته شد (۱۹). ریسک اکولوژیک برای هر عنصر در پنج سطح خطر کم Er<۴۰، خطر متوسط ۴۰≤Er<۸۰، خطر قابل توجه ۸۰≤Er<۱۶۰، خطر زیاد ۱۶۰≤Er<۳۲۰ و خطر خیلی زیاد Er≥۳۲۰ رده بندی شده است. برای تحلیل پتانسیل ریسک اکولوژیک (RI) چهار رده ریسک اکولوژیکی کم RI<۱۵۰، ریسک اکولوژیکی متوسط ۱۵۰≤RI<۳۰۰، ریسک اکولوژیکی قابل توجه ۳۰۰≤RI<۶۰۰ و ریسک اکولوژیکی خیلی زیاد RI≥۶۰۰ طبقه‌بندی شده است (۱۹):

رابطه ۵: $$Er = TR \times CF$$

رابطه ۶: $$RI = \sum Er$$

شاخص زمین انباشت (Igeo)[6] برای اولین بار توسط مولر ارائه شد و درجه آلایندگی خاک را تعیین می‌کند. در تحلیل‌های زیست محیطی به‌منظور مشخص‌کردن سطوح آلوده کاربرد دارد و از رابطه ۷ محاسبه خواهد شد. در این رابطه Igeo شاخص زمین انباشت، Cn غلظت فلز سنگین موجود در خاک، Bn غلظت زمینه (متوسط شیل) می‌باشد. غلظت زمینه فلزات کادمیوم، سرب، آرسنیک، مس، روی و کروم به‌ترتیب ۰/۳، ۲۰، ۱۳، ۴۵،

[1] Degree of Contamination
[2] Modified Degree of Contamination
[3] Enrichment Factor
[4] Ecological Risk
[5] Risk Index
[6] Geoaccumulation Index

۹۵ و ۹۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم درنظرگرفته شد (۱۸). برای این که اثرات مواد مادری خاک و نوسانات طبیعی محتوای ماده داده شده در محیط‌زیست و تغیرات بسیار کم ایجاد شده در اثر فعالیت‌های انسانی تصیح شود از ضریب ۱/۵ استفاده می‌گردد. اساس طبقه‌بندی مولر هفت کلاس آلودگی، Igeo<۰ غیرآلوده، ۱-۰ غیر آلوده تا کمی آلوده، ۲-۱ کمی آلوده، ۳-۲ کمی آلوده تا خیلی آلوده، ۴-۳ خیلی آلوده، ۵-۴ خیلی آلوده تا شدیداً آلوده و ۵ < شدیدا آلوده طبقه‌بندی شده است (۲۱):

رابطه ۷: $$Igeo = Log_2 (Cn/1.5*Bn)$$

شاخص بار آلودگی (PLI)[1] برای ارزیابی کل درجه آلودگی خاک کاربرد دارد. این شاخص میزان تخریب خاک در اثر انباشت فلزات سنگین را فراهم می‌کند. شاخص بار آلودگی با استفاده از رابطه ۸ به‌دست آمد که از رادیکال فرجه ۲ مجموع فاکتور آلودگی فلزات سنگین مورد مطالعه محاسبه شد. شاخص بار آلودگی بر اساس ۳ سطح آلودگی شامل PLI<۱ غیرآلوده، ۱ سطوح آلودگی پایه و ۱ < PLI آلودگی و بد بودن کیفیت خاک طبقه-بندی شده است (۲۲):

رابطه ۸: $$PLI = \sqrt[n]{CF_{Cd} \times CF_{Pb} \times CF_{As} \times CF_{Cu} \times CF_{Zn} \times CF_{Cr}}$$

شاخص آلودگی نمرو (NIPI)[2] برای بررسی پتانسیل کمیت خطر آلودگی فلزات سنگین خاک مورد مطالعه در منطقه مورد نظر به کار می‌رود. این شاخص بر اساس رابطه ۹ محاسبه شد که در آن PI شاخص آلودگی، PI_{max} بیشینه شاخص آلودگی فلزات و n تعداد فلزات سنگین مورد مطالعه در خاک هستند. بر اساس شاخص آلودگی نمرو، کیفیت خاک در ۵ سطح رده‌بندی می‌شوند که NIPI<۰/۷ غیرآلوده، ۱-۰/۷ محدوده هشدار، ۲-۱ آلودگی کم، ۳-۲ آلودگی متوسط و ۳ < آلودگی شدید طبقه‌بندی شده است (۲۲):

رابطه ۹: $$NIPI = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{n}\sum_{i-1}^{n} PI\right)^2 + PI_{max}^2}{n}}$$

ارزیابی ریسک سلامت انسان

فلزات سنگین بر اساس روش ارزیابی خطر بهداشتی ارائه شده توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا (USEPA)[3] انجام می‌شود. این ارزیابی در دو بخش خطرات سرطان‌زایی و غیرسرطان‌زایی و قرارگیری انسان در معرض فلزات از هر سه مسیر بلع، تنفس و جذب پوستی مدنظر قرار می‌گیرد. مقادیر جذب روزانه فلزات سنگین (ADD)[4] در هریک از مسیرها با استفاده از رابطه‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ محاسبه خواهد شد (۲۳):

رابطه ۱۰: $$ADD_{ing} = \frac{C \times IngR \times CF \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

رابطه ۱۱: $$ADD_{inh} = \frac{C \times InhR \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT}$$

رابطه ۱۲: $$ADD_{dermal} = \frac{C \times SA \times CF \times AF \times ABF \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

که در این رابطه‌ها، ADD_{ing}، ADD_{inh} و ADD_{dermal} به‌ترتیب مقدار میانگین جذب روزانه فلزات (میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز) از طریق بلع، تنفس و جذب پوستی است. C غلظت فلزات در خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم)، IngR و InhR به‌ترتیب نرخ بلع و نرخ تنفس خاک (میلی‌گرم در روز و متر مکعب در روز)، EF فراوانی قرارگیری در معرض فلزات (روز/سال)، ED مدت قرارگیری در معرض فلزات (سال)، BW وزن بدن شخص قرار گرفته در معرض فلزات (کیلوگرم)، AT مدت زمان قرارگیری در معرض هر مقدار از فلزات به طور میانگین (روز)، EF فاکتور انتشار فلزات از خاک به هوا (متر مکعب بر کیلوگرم)، SA ناحیه‌ای از سطح پوست قرار گرفته در معرض فلزات (سانتیمتر مربع)، AF فاکتور چسبندگی خاک به پوست (میلی‌گرم بر سانتیمتر مربع در روز) و ABF فاکتور جذب سطحی پوست (بدون واحد) است. خطر غیرسرطان‌زایی (HQ)[5] کل مسیرهای بلع، تنفس و

[1] Pollution Load Index
[2] Nemerow Pollution Index
[3] United States Environmental Protection Agency
[4] Average Daily Dose
[5] Hazard Quotient

جذب پوستی برای کودکان و بزرگسالان از مجموع میزان جذب روزانه فلزات سنگین (ADD) در هر مسیر به مقدار مرجع سمیت آن عنصر به کمک رابطه ۱۳ تعیین شد (۲۳):

رابطه ۱۳:
$$HQ_i = \sum \frac{ADD_i}{R_f D_i}$$

در این رابطه، HQ خطر غیرسرطان‌زایی فلزات در هر مسیر، ADD_i مقادیر جذب روزانه فلزات در هر یک از مسیرهای قرارگیری در معرض فلزات (میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز) است. اگر HQ کمتر از ۱ باشد، با سلامت انسان سازگار است و اگر HQ بالاتر از ۱ باشد، اثرات نامطلوب و نگران کننده‌ای بر سلامت انسان دارد. مقدار شاخص خطر تجمعی غیرسرطان‌زایی (HI)[1] کل فلزات برای هر دو گروه بزرگسالان و کودکان بر اساس رابطه ۱۴ به‌دست آمد (۲۳):

رابطه ۱۴:
$$HI = \sum HQ_i$$

ارزیابی خطر سرطان‌زایی هر یک از مسیرهای سه‌گانه برای این فلزات با استفاده از رابطه ۱۵ انجام شد (۲۳):

رابطه ۱۵:
$$RI = \sum ADD_i \times SF_i$$

در رابطه‌ی بالا (CR)[2] ریسک خطر سرطان‌زایی، ADD_i مقادیر جذب روزانه فلزات در هریک از مسیرهای قرارگیری در معرض فلزات (میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز) و SF_i فاکتور احتمال ابتلا به سرطان در هر واحد قرارگیری در معرض فلزات (میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز) است.

مدل هوش مصنوعی

برای مدل‌های ماشین بردار پشتیبان (SVR)[3] (قدرتمند در فضاهای با بعد بالا و نمونه‌های کم) و جنگل تصادفی (RF)[4] (انعطاف‌پذیر و مقاوم به نویز) ابتدا استخراج ویژگی‌ها (طول و عرض جغرافیایی) و متغیر هدف (غلظت فلز) و سپس نرمال‌سازی داده‌ها با استانداردکردن ویژگی‌ها و مقادیر هدف انجام شد. برای فرایند بهینه‌سازی تعریف دامنه گسترده‌ای از پارامترها برای هر مدل، اجرای جستجوی شبکه‌ای با اعتبارسنجی متقابل پنج‌تایی و انتخاب بهترین ترکیب پارامترها برای هر مدل و هر عنصر انجام شد. سپس ارزیابی و مقایسه اعمال مدل بهینه شده روی داده‌های آزمون جهت پیش‌بینی و برگرداندن مقادیر پیش‌بینی شده به مقیاس اصلی در راستای تبدیل معکوس صورت گرفت. در این روش معیارهای ارزیابی شامل میزان واریانس (R^2) توضیح داده شده (بین $-\infty$ تا ۱، مقادیر نزدیک به ۱ بهتر)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)[5] (نشان‌دهنده‌ی میزان انحراف در واحد اصلی) و میانگین خطای مطلق (MAE)[6] هستند.

تجزیه‌وتحلیل آماری

داده‌های این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS24 تجزیه‌وتحلیل شدند. آزمون کولموگراف ـ اسمیرنوف برای نرمال‌بودن داده استفاده شد. هم‌چنین برای رسم جداول و محاسبات شاخص‌های آلودگی از نرم‌افزار Excel 2007 استفاده گردید.

یافته‌ها

پارامترهای آماری داده‌های فلزات سنگین شامل کمینه، بیشینه، میانگین، انحراف معیار، خطای استاندارد، واریانس، چولگی و کشیدگی در خاک‌های سطحی مزارع کشاورزی شهر حمیدیه در شمال غرب کلانشهر اهواز در جدول ۱ ارائه شده است. مقادیر کشیدگی و چولگی نشان داد که داده‌های مربوط به فلزات سنگین کادمیوم، سرب، آرسنیک، روی، مس و کروم در نمونه‌های خاک این منطقه نرمال است، زیرا مقادیر به‌دست آمده از نرم افزار SPSS بین ۲- و ۲ به‌دست آمد. الگوی انباشته شدن فلزات سنگین در خاک‌های سطحی مزارع کشاورزی شهر حمیدیه شمال غرب کلانشهر اهواز به صورت روی> سرب> کروم> مس> آرسنیک> کادمیوم به‌دست آمد (**جدول ۱**). تجزیه‌وتحلیل آزمون‌های کولموگراف ـ اسمیرنوف و شاپیرو ـ ویلک داده‌های فلزات سنگین در مزارع کشاورزی شهر حمیدیه شمال غرب کلانشهر اهواز نشان داد که مقادیر به‌دست آمده نرمال بودند و مقادیر آماری در بازه ۲- و ۲ به‌دست آمدند (**جدول ۲**).

[1] Hazard Index
[2] Cacer Risk
[3] Support Vector Regression
[4] Random Forest
[5] Root Mean Square Error
[6] Mean Absolute Error

جدول ۱. داده‌های توصیفی غلظت فلزات سنگین (میلی‌گرم بر کیلوگرم) خاک‌های سطحی مزارع کشاورزی شهر حمیدیه

فلزات سنگین	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	خطای استاندارد	واریانس	چولگی	کشیدگی
کادمیوم	۰/۱۵	۰/۹۹	۰/۵۸	۰/۲۴	۰/۰۲	۰/۰۵۹	-۰/۰۷۲	-۱/۱۸۱
سرب	۶۳/۲۵	۸۶/۳۴	۷۶	۵/۹۶	۰/۶۶	۳۵/۶۲۰	-۰/۳۵۵	-۰/۷۱۴
آرسنیک	۱/۰۱	۱/۸۷	۱/۴۶	۰/۲۴	۰/۰۲	۰/۰۶۲	-۰/۱۳۷	-۱/۰۸۹
مس	۲۷/۰۵	۳۹/۰۵	۳۴/۲۵	۳/۴۸	۰/۳۸	۱۲/۱۶۷	-۰/۳۵۸	-۱/۰۹۱
روی	۱۶۸/۰۷	۱۷۹/۹۵	۱۷۴/۴۲	۳/۴۶	۰/۳۸	۱۲/۰۳۵	-۰/۳۶۴	-۱/۰۷۳
کروم	۵۵/۲۷	۷۸/۳۱	۶۸/۹۵	۵/۳۴	۰/۵۹	۲۸/۵۴۶	-۰/۴۵۲	-۰/۶۲۹

جدول ۲. تجزیه‌وتحلیل آزمون نرمالیتی فلزات سنگین خاک‌های سطحی مزارع کشاورزی شهر حمیدیه

فلزات سنگین	آزمون کولموگروف-اسمیرنوف			آزمون شاپیرو-ویلک		
	آماره	درجه آزادی	سطح معنی‌داری	آماره	درجه آزادی	سطح معنی‌داری
کادمیوم	۰/۰۶۷	۸۰	۰/۲۰۰	۰/۹۵۶	۸۰	۰/۰۰۸
سرب	۰/۱۲۹	۸۰	۰/۰۰۲	۰/۹۶۴	۸۰	۰/۰۲۲
آرسنیک	۰/۰۶۱	۸۰	۰/۲۰۰	۰/۹۶۰	۸۰	۰/۰۱۳
مس	۰/۱۴۹	۸۰	۰/۰۰	۰/۹۲۵	۸۰	۰/۰۰
روی	۰/۱۷۷	۸۰	۰/۰۰	۰/۹۳۱	۸۰	۰/۰۰
کروم	۰/۱۰۷	۸۰	۰/۰۲۴	۰/۹۶۰	۸۰	۰/۰۱۴

الگوی فاکتور آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های سطحی مزارع کشاورزی شهر حمیدیه شمال غرب کلانشهر اهواز به‌صورت روی> سرب> کادمیوم> مس> آرسنیک> کروم به‌دست آمد. بالاترین فاکتور آلودگی برای عنصر روی ۶/۱۹ و پایین‌ترین این شاخص عنصر کروم ۰/۶۲ بود. میانگین فاکتور آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های سطحی مزارع کشاورزی شهر حمیدیه شمال غرب کلانشهر اهواز ۱/۱۲ به‌دست آمد. الگوی مقادیر فاکتور غنی‌شدگی فلزات سنگین به صورت روی> سرب> کادمیوم> مس> کروم> آرسنیک بود. بالاترین و پایین‌ترین مقادیر فاکتور غنی‌شدگی برای روی و آرسنیک به‌ترتیب ۲۷۹/۵۶ و ۳/۱۶ به‌دست آمد. در این تحقیق عنصر مرجع برای نرمال‌سازی آلومینیوم استفاده شد که میانگین غلظت این عنصر در خاک‌های سطحی مزارع کشاورزی شهر حمیدیه شمال غرب کلانشهر اهواز ۱۸۷۲/۳۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. الگوی مقادیر شاخص زمین انباشتگی فلزات سنگین به صورت روی> سرب> کادمیوم> مس> آرسنیک> کروم بود. شاخص خطر بوم‌شناسی عنصر کادمیوم در خاک‌های سطحی مزارع کشاورزی شهر حمیدیه شمال غرب کلانشهر اهواز از سایر فلزات سنگین مورد مطالعه بیشتر بود. مقادیر شاخص خطر بوم‌شناسی فلزات سنگین خاک‌های سطحی مزارع کشاورزی شهر حمیدیه شمال غرب کلانشهر اهواز به‌صورت کادمیوم> سرب> آرسنیک> روی> مس> کروم بود. درجه آلودگی، درجه آلودگی اصلاح شده و شاخص بار آلودگی فلزات سنگین خاک‌های سطحی مزارع کشاورزی شهر حمیدیه شمال غرب کلانشهر اهواز به‌ترتیب ۱۶/۰۵، ۲/۶۷ و ۱/۴۹ به‌دست آمد. هم‌چنین شاخص آلودگی نمرو و شاخص خطر زیستی فلزات سنگین خاک‌های سطحی مزارع کشاورزی شهر حمیدیه شمال غرب کلانشهر اهواز به‌ترتیب ۳/۳۴ و ۱۳۰/۹۹ محاسبه شدند (**جدول ۳**).

ارزیابی خطر سلامت فلزات سنگین نشان داد که در خاک‌های سطحی مزارع کشاورزی شهر حمیدیه شمال غرب کلانشهر اهواز میزان جذب روزانه توسط بلع (دستگاه گوارش) برای رده‌ی سنی بزرگسالان و کودکان برای فلزات کادمیوم، سرب، آرسنیک، روی و مس بیشتر از تنفس (دستگاه تنفسی) و پوست بود، اما در مورد عنصر کروم جذب پوستی بالاتر از جذب از راه دستگاه گوارش و تنفس مشاهده شد. بیشترین میزان جذب روزانه فلزات

سنگین مربوط به کروم در کودکان ($۲/۳۵\times۱۰^{-۲}$ میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز) و بزرگسالان ($۶/۲۵\times۱۰^{-۲}$ میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز) بود. پایین‌ترین جذب روزانه فلزات سنگین مربوط به عنصر کادمیوم در کودکان ($۲/۰۸\times۱۰^{-۱۰}$ میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز) و بزرگسالان ($۹/۳۶\times۱۰^{-۱۱}$ میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز) مشاهده شد (**جدول ۴**).

جدول ۳. مقادیر شاخص‌های آلودگی محیط‌زیست فلزات سنگین خاک‌های سطحی مزارع کشاورزی شهر حمیدیه

فلزات سنگین	فاکتور آلودگی	فاکتور غنی‌سازی	شاخص زمین‌انباشتگی	شاخص خطر بوم‌شناسی	شاخص خطر زیستی	درجه آلودگی	درجه آلودگی اصلاح شده	شاخص بار آلودگی	شاخص آلودگی نمرو
کادمیوم	۲/۹۶	۱۳۳/۸۰	۰/۸۳	۸۸/۶۷	۱۳۰/۹۹	۱۶/۰۵	۲/۶۷	۱/۴۹	۳/۳۴
سرب	۴/۵۲	۲۰۳/۹۵	۱/۵۹	۲۲/۵۹					
آرسنیک	۰/۷۱	۳/۱۶	-۱/۱۰	۷/۰۶					
مس	۱/۰۵	۴۷/۳۰	-۰/۵۲	۵/۲۴					
روی	۶/۱۹	۲۷۹/۵۶	۲/۰۴	۶/۱۹					
کروم	۰/۶۲	۲۸/۱۰	-۱/۲۷	۱/۲۴					

جدول ۴. میانگین میزان جذب روزانه (میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز) فلزات سنگین خاک‌های سطحی مزارع کشاورزی شهر حمیدیه

فلزات سنگین	دستگاه گوارش		دستگاه تنفس		پوست	
	بزرگسالان	کودکان	بزرگسالان	کودکان	بزرگسالان	کودکان
کادمیوم	$۹/۹۴\times۱۰^{-۷}$	$۷/۴۱\times۱۰^{-۶}$	$۹/۳۶\times۱۰^{-۱۱}$	$۲/۰۸\times۱۰^{-۱۰}$	$۳/۰۲\times۱۰^{-۸}$	$۱/۱۸\times۱۰^{-۸}$
سرب	$۱/۳۰\times۱۰^{-۴}$	$۹/۷۱\times۱۰^{-۴}$	$۱/۲۲\times۱۰^{-۸}$	$۲/۷۲\times۱۰^{-۸}$	$۳/۹۶\times۱۰^{-۶}$	$۱/۵۵\times۱۰^{-۶}$
آرسنیک	$۲/۵۰\times۱۰^{-۶}$	$۱/۸۶\times۱۰^{-۵}$	$۲/۳۵\times۱۰^{-۱۰}$	$۵/۲۳\times۱۰^{-۱۰}$	$۷/۶۲\times۱۰^{-۸}$	$۲/۹۸\times۱۰^{-۸}$
مس	$۵/۸۷\times۱۰^{-۵}$	$۴/۳۰\times۱۰^{-۴}$	$۵/۵۲\times۱۰^{-۹}$	$۱/۲۲\times۱۰^{-۸}$	$۱/۷۸\times۱۰^{-۶}$	۷×۱۰^{-۷}
روی	$۲/۹۹\times۱۰^{-۴}$	$۲/۲۳\times۱۰^{-۳}$	$۲/۸۰\times۱۰^{-۸}$	$۶/۲۵\times۱۰^{-۸}$	$۹/۱۱\times۱۰^{-۶}$	$۳/۵۶\times۱۰^{-۶}$
کروم	$۱/۱۸\times۱۰^{-۴}$	$۸/۸۱\times۱۰^{-۴}$	$۳/۸۹\times۱۰^{-۴}$	$۸/۶۴\times۱۰^{-۴}$	$۶/۲۵\times۱۰^{-۲}$	$۲/۳۵\times۱۰^{-۲}$

بالاترین شاخص خطر غیرسرطان‌زایی فلزات سنگین خاک‌های سطحی مزارع کشاورزی شهر حمیدیه شمال غرب کلانشهر اهواز مربوط به کروم ($۲/۳۹\times۱۰^{-۱}$) و سرب ($۲/۷۷\times۱۰^{-۱}$) برای دستگاه گوارش کودکان بود. پایین‌ترین شاخص خطر غیرسرطان‌زایی فلزات سنگین مربوط به عنصر کادمیوم از راه پوست کودکان ($۱/۱۸\times۱۰^{-۸}$) و بزرگسالان ($۳/۰۲\times۱۰^{-۸}$) بود. شاخص خطر غیر سرطان‌زایی سرب، کادمیوم، آرسنیک، مس و کروم در دستگاه گوارش کودکان و بزرگسالان بالاتر از شاخص خطر غیر سرطان‌زایی فلزات در دستگاه تنفس و پوست به‌دست آمد (**جدول ۵**). برای فلزات سنگین مس و روی شاخص خطر سرطان‌زایی محاسبه و برآورد نشده است. بالاترین شاخص خطر سرطان‌زایی فلزات سنگین خاک‌های سطحی مزارع کشاورزی شهر حمیدیه شمال غرب کلانشهر اهواز مربوط به عنصر کروم برای کودکان ($۲/۷۲\times۱۰^{-۵}$) و بزرگسالان ($۳/۶۵\times۱۰^{-۶}$) به‌دست آمد. پایین‌ترین شاخص خطرسرطان زایی برای بزرگسالان مربوط به عنصر کادمیوم ($۱/۰۹\times۱۰^{-۹}$) و برای کودکان مربوط به عنصر سرب ($۸/۱۷\times۱۰^{-۹}$) بود. هم‌چنین بالاترین مجموع شاخص خطر غیرسرطان‌زایی برای بزرگسالان و کودکان به‌ترتیب مربوط به سرب و کروم $۲/۸۰\times۱۰^{-۱}$ و $۳/۱۸\times۱۰^{-۱}$ مشاهده شد. پایین‌ترین مقادیر شاخص غیرسرطان‌زایی فلزات سنگین خاک‌های سطحی مزارع کشاورزی شهر حمیدیه شمال غرب کلانشهر اهواز برای بزرگسالان و کودکان به‌ترتیب مربوط به عنصر روی $۱/۱۴\times۱۰^{-۳}$ و $۷/۴۹\times۱۰^{-۳}$ به‌دست آمد (**جدول ۶**).

جدول ۵. ارزیابی شاخص خطر غیرسرطان‌زایی (HQ) فلزات سنگین خاک‌های سطحی مزارع کشاورزی شهر حمیدیه

فلزات	دستگاه گوارش		دستگاه تنفس		پوست	
سنگین	بزرگسالان	کودکان	بزرگسالان	کودکان	بزرگسالان	کودکان
کادمیوم	$۳/۳۱\times۱۰^{-۳}$	$۲/۴۷\times۱۰^{-۲}$	$۳/۰۲\times۱۰^{-۷}$	$۶/۷۱\times۱۰^{-۷}$	$۳/۰۲\times۱۰^{-۸}$	$۱/۱۸\times۱۰^{-۸}$
سرب	$۳/۷۲\times۱۰^{-۲}$	$۲/۷۷\times۱۰^{-۱}$	$۳/۴۸\times۱۰^{-۶}$	$۷/۷۴\times۱۰^{-۶}$	$۷/۵۰\times۱۰^{-۳}$	$۲/۹۰\times۱۰^{-۳}$
آرسنیک	$۲/۵۰\times۱۰^{-۳}$	$۱/۸۶\times۱۰^{-۲}$	$۲/۳۵\times۱۰^{-۷}$	$۵/۲۳\times۱۰^{-۷}$	$۷/۶۰\times۱۰^{-۳}$	$۲/۹۰\times۱۰^{-۳}$
مس	$۱/۴۶\times۱۰^{-۳}$	$۱/۰۹\times۱۰^{-۲}$	$۱/۳۷\times۱۰^{-۷}$	$۳/۰۵\times۱۰^{-۷}$	$۱/۴۰\times۱۰^{-۴}$	$۵/۸۳\times۱۰^{-۵}$
روی	$۹/۹۰\times۱۰^{-۴}$	$۷/۴۰\times۱۰^{-۳}$	$۹/۳۸\times۱۰^{-۸}$	$۲/۰۸\times۱۰^{-۷}$	$۱/۵۰\times۱۰^{-۴}$	$۵/۹۴\times۱۰^{-۵}$
کروم	$۳/۹۴\times۱۰^{-۲}$	$۲/۳۹\times۱۰^{-۱}$	$۳/۸۹\times۱۰^{-۴}$	$۸/۶۰\times۱۰^{-۴}$	$۶/۰۲\times۱۰^{-۲}$	$۲/۳۵\times۱۰^{-۲}$

جدول ۶. ارزیابی شاخص خطر سرطان زایی (RI) و مجموع شاخص خطر غیرسرطان‌زایی (HI) فلزات سنگین خاک‌های سطحی مزارع کشاورزی شهر حمیدیه

فلزات	مجموع شاخص غیرسرطان‌زایی		شاخص سرطان‌زایی	
سنگین	بزرگسالان	کودکان	بزرگسالان	کودکان
کادمیوم	$۳/۵۶\times۱۰^{-۳}$	$۲/۴۸\times۱۰^{-۲}$	$۱/۰۹\times۱۰^{-۹}$	$۸/۱۷\times۱۰^{-۹}$
سرب	$۲/۸۰\times۱۰^{-۱}$	$۴/۴۸\times۱۰^{-۲}$	$۴/۰۲\times۱۰^{-۹}$	۳×۱۰^{-۸}
آرسنیک	$۱/۰۱\times۱۰^{-۲}$	$۲/۱۶\times۱۰^{-۲}$	$۱/۱۶\times۱۰^{-۸}$	$۸/۶۴\times۱۰^{-۸}$
مس	$۱/۶۱\times۱۰^{-۳}$	$۱/۱۰\times۱۰^{-۲}$	–	–
روی	$۱/۱۴\times۱۰^{-۳}$	$۷/۴۹\times۱۰^{-۳}$	–	–
کروم	$۹/۹۸\times۱۰^{-۲}$	$۳/۱۸\times۱۰^{-۱}$	$۳/۶۵\times۱۰^{-۶}$	$۲/۷۲\times۱۰^{-۵}$

بهترین مدل جنگل تصادفی سرب عملکرد بسیار خوب با R^2 بین ۰/۵۷۰ تا ۰/۶۹۰ به‌دست آمد. سرب یکی از عناصری است که بهترین قابلیت پیش‌بینی را با دو مدل داشت. مدل‌های جنگل تصادفی و رگرسیون بردار پشتیبان قابلیت خوبی در پیش‌بینی غلظت روی دارند. این نتایج نشان می‌دهد که عملکرد مدل‌ها می‌تواند بسته به مکان نمونه‌برداری (ایستگاه) متفاوت باشد و انتخاب مدل مناسب باید بر اساس عنصر هدف و ویژگی‌های محل نمونه‌برداری انجام شود. به طور کلی، مدل‌های جنگل تصادفی و رگرسیون بردار پشتیبان درمورد داده‌های فلزات سنگین برای خاک‌های مزارع کشاورزی شهر حمیدیه خصوصاً برای فلزات روی و آرسنیک قابل پیش‌بینی هستند (**جدول ۷**).

جدول ۷. مقادیر جنگل تصادفی و رگرسیون بردار پشتیبان فلزات سنگین خاک‌های سطحی مزارع کشاورزی شهر حمیدیه

فلزات سنگین	نوع مدل	R^2	RMSE	MAE
کادمیوم	رگرسیون بردار پشتیبان	۰/۳۲۰	۰/۲۴۲	۰/۲۲۳
	جنگل تصادفی	۰/۳۰۰	۰/۲۵۳	۰/۲۳۸
سرب	رگرسیون بردار پشتیبان	۰/۶۸۰	۲/۹۱۱	۲/۴۴۶
	جنگل تصادفی	۰/۶۹۰	۲/۸۶۱	۲/۱۹۱
آرسنیک	رگرسیون بردار پشتیبان	۰/۳۰۰	۰/۲۳۶	۰/۲۰۶
	جنگل تصادفی	۰/۲۵۰	۰/۲۵۲	۰/۲۲۲
مس	رگرسیون بردار پشتیبان	۰/۳۳۰	۲/۹۲۸	۲/۲۴۷
	جنگل تصادفی	۰/۳۰۰	۲/۹۷۷	۲/۶۴۴
روی	رگرسیون بردار پشتیبان	۰/۴۲۰	۲/۶۰۷	۱/۹۶۰
	جنگل تصادفی	۰/۵۸۰	۲/۱۸۴	۱/۶۷۹
کروم	رگرسیون بردار پشتیبان	۰/۵۰۰	۴/۴۰۳	۳/۹۰۵
	جنگل تصادفی	۰/۴۸۰	۴/۵۱۶	۳/۷۵۱

بحث

در این تحقیق میانگین غلظت فلزات کادمیوم، سرب، آرسنیک، مس، روی و کروم در خاک مزارع کشاورزی شهر حمیدیه (به‌ترتیب ۰/۵۸، ۷۶، ۱/۴۶، ۳۴/۲۵، ۱۷۴/۴۲ و ۶۸/۹۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در مقایسه با استاندارد سازمان محیط‌زیست ایران (کادمیوم، سرب، آرسنیک، مس، روی و کروم به‌ترتیب ۵، ۷۵، ۴۰، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) (۲۴) پایین‌تر بود، فقط سرب در مقایسه با این استاندارد بالاتر نشان داد و در مقایسه با میانگین پوسته زمین (کادمیوم، سرب، آرسنیک، مس، روی و کروم به‌ترتیب ۰/۲، ۱۴، ۱/۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) (۲۴) کادمیوم، سرب و روی بالاتر بودند، اما مس، آرسنیک و کروم پایین‌تر هستند. سازمان بهداشت جهانی حد مجاز غلظت فلزات کادمیوم، سرب، آرسنیک، مس، روی و کروم در خاک را ۳، ۱۰۰، ۲۰، ۱۰۰، ۳۰۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم اعلام کرده است (۲۴) که در مقایسه با نتایج مقادیر فلزات خاک مزارع کشاورزی شهر حمیدیه بالاتر گزارش شده‌اند. هم‌چنین آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا آستانه مجاز فلزات کادمیوم، سرب، آرسنیک، مس، روی و کروم در خاک را ۵، ۱۵۰، ۳۰، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۲۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم تعیین کرده است (۲۵) که مقادیر این فلزات در خاک مزارع کشاورزی شهر حمیدیه پایین‌تر به‌دست آمد. تحقیقات و مطالعات متعددی آلودگی بوم‌شناسی و بهداشتی فلزات سنگین را در محصولات کشاورزی و خا-ک‌های سطحی مزارع کشاورزی شهر حمیدیه در شمال غرب کلانشهر اهواز را گزارش کردند (۱۳،۱۴،۲۶،۲۷) که نتایج این تحقیق را تایید می‌کند.

در خاک مزارع کشاورزی شهر حمیدیه فاکتور آلودگی آرسنیک و کروم کم، کادمیوم و مس متوسط، سرب آلودگی زیاد و روی آلودگی بسیار زیاد را نشان دادند. شاخص زمین انباشتگی مس، کروم، کادمیوم و آرسنیک عدم آلایندگی خاک به این عناصر را نشان داد و سرب کمی آلوده و روی آلوده را داشتند. شاخص خطر بوم شناسی سرب، آرسنیک، کروم، مس و روی سطح متوسط و کادمیوم سطح خطر قابل توجه را نشان دادند. درجه آلودگی فلزات سنگین آلودگی زیاد و درجه آلودگی اصلاح‌شده آلودگی متوسط را نشان دادند. شاخص بار آلودگی نیز نشان داد که خاک مزارع کشاورزی شهر حمیدیه آلوده به فلزات سنگین می‌باشد و شاخص آلودگی نمرو آلودگی شدید فلزات سنگین در خاک را نشان داد. نتایج فلزات سنگین در خاک مزارع کشاورزی شهر حمیدیه نشان داد که این آلاینده‌ها تأثیر بالایی بر خاک داشته و باعث آلودگی متوسط تا زیاد شدند، زیرا مقدار شاخص بار آلودگی عناصر مورد مطالعه بالاتر از ۱ به‌دست آمده است که هر چه از عدد ۱ بالاتر باشد دفعات آلوده بودن نسبت به محل غیرآلوده را نشان می دهد (۲۸)، به عبارت دیگر شاخص بار آلودگی تعداد دفعاتی که فلزات سنگین در خاک نسبت به غلظت زمینه افزایش یافته است را نشان می دهد و خلاصه‌ای از وضعیت سمیت عناصر مورد بررسی را نشان می دهد (۲۹). فلزات سنگین به‌طور طبیعی در پوسته زمین وجود دارند و علی‌رغم غلظت کم و حلالیت پایین، عموماً در اثر هوازدگی و فرسایش از پوسته زمین جدا شده و وارد اکوسیستم می‌شوند. آلودگی‌های ساخته شده توسط بشر وارد خاک و اکوسیستم‌های آبی می‌شوند و میزان فلزات سنگین را در این محیط‌ها افزایش می‌دهد (۳۰،۳۱). مقادیر فاکتور غنی شدگی عناصر خاک نشان داد که آرسنیک غنی‌شدگی متوسط، کروم غنی‌شدگی بسیار زیاد و کادمیوم، سرب، مس و روی غنی‌شدگی به‌شدت زیاد داشتند. فاکتور غنی‌سازی فلزات سنگین نیز نشان داد که غلظت این عناصر در خاک مزارع کشاورزی شهر حمیدیه نتیجه فعالیت‌های انسانی بوده که نقش موثری در انباشت فلزات سنگین در خاک دارد. با این‌حال در مورد عناصر کادمیوم، سرب، مس، کروم و روی نشان داده شده است که فاکتور غنی‌سازی بسیار بالا می‌تواند از طریق منابع صنعتی، کشاورزی و شهری وارد مناطق مورد مطالعه شود که تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی نظیر حمل‌ونقل درون شهری و بین شهری برای عناصر سرب و مس است. از مهم‌ترین منابع مصنوعی آلودگی خاک و در نتیجه کادمیوم، کروم و روی در محصولات کشاورزی می‌توان به تخلیه فاضلاب‌های صنعتی، معادن و پالایشگاه‌ها، استفاده از کودهای فسفاته، دفن پسماندهای در زمین و محل قرارگیری زمین‌های کشاورزی محدود به سرب و روی اشاره کرد (۳۲،۳۳).

در یک مطالعه بیشترین شاخص بوم شناسی خاک در شهر حمیدیه ۳۲/۴ گزارش شده است که نشان‌دهنده‌ی خطر سطح پایین آرسنیک و کادمیوم را در خاک مزارع کشاورزی تعیین کرده است (۲۷). در تحقیق دیگری گزارش شده است که فلز کبالت نقش مهمی در آلودگی خاک شهر حمیدیه داشته و فلزات سرب، نیکل، کروم، مس و روی آلودگی کمی در خاک مناطق مورد مطالعه داشتند. ارزیابی ریسک سلامت فلزات سنگین خاک نشان داد که شاخص خطر سرب، نیکل، کروم، مس، روی و کبالت پایین‌تر از ۱ به‌دست آمد. شاخص سرطان‌زایی فلزات سنگین برای بزرگسالان و کودکان کمتر از $۱۰^{-۴}$ بود. با توجه با ارزیابی ریسک سلامت فلزات سنگین و شاخص مخاطره‌ی آن‌ها مصرف کاهو و کلم در این مناطق می‌تواند باعث مشکلات سلامتی در افراد شود (۱۳). میزان شن در نمونه‌های خاک دزفول بیشتر از خاک حمیدیه و میزان لای در نمونه خاک حمیدیه بیشتر گزارش شده است. میزان pH، مواد خنثی‌شونده، ماده آلی، کربن آلی، فسفر و پتاسیم قابل جذب در خاک منطقه دزفول بالاتر از خاک حمیدیه و میزان مواد آلی در خاک دزفول و حمیدیه بسیار کم است. با توجه به نتایج به‌دست آمده میزان کادمیوم، سرب، آرسنیک و نیکل در سبزیجات نعناع و خرفه پایین‌تر از حد مجاز استانداردها به‌دست آمد (۲۶). آلودگی خاک از طریق کود شیمیایی در ایران بیشتر مربوط به مصرف بی‌رویه بوده، به این معنی که آن کودی که به‌عنوان مثال در منطقه شمال که مرطوب و خاک‌های آن اسیدی است مصرف می‌شود، دقیقا همانند آن هم در منطقه جنوب و جنوب شرقی که خشک و خاک‌های آن اغلب شور و حتی قلیایی است، به زمین داده می‌شود. مصرف زیاد کود شیمیایی در بعضی از نقاط هم در منطقه مرطوب و هم در منطقه خشک کشور به خاک و موجودات زنده آن لطمه وارد آورده است (۳۴،۳۵). ژیائو و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند میانگین محتوای کادمیوم ۰/۱۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم، جیوه ۰/۰۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم، آرسنیک ۱۲/۸۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم، سرب ۲۹/۲۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم و کروم ۷۸/۵۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم در خاک‌های کشاورزی در گانژو چین بوده است و مهم‌ترین مسیر قرار گرفتن در معرض، بلع خاک است که حدود ۹۹ درصد را به خطرات بهداشتی فلزات سنگین اختصاص داده است (۳۶) که نتایج این تحقیق را تایید می‌کند. هم‌چنین گزارش کردند که خطر غیر سرطان‌زایی ناشی از قرار گرفتن در معرض آرسنیک، سرب و کروم در خاک بالاتر از حد مجاز (شاخص خطر بالقوه کلی، HI>1) برای کودکان و بزرگسالان بود. علاوه بر این، خطر سرطان‌زایی توسط آرسنیک، کادمیوم و کروم از طریق قرار گرفتن در معرض خاک برای کودکان و بزرگسالان بالاتر از حد مجاز ($۱۰^{-۴}$) بود که نشان می‌دهد آرسنیک، سرب، کادمیوم و کروم در خاک از طریق قرار گرفتن در معرض آن تأثیر قابل توجهی بر سلامت افراد دارند (۳۶). فلزات سنگین افزایش یافته در خاک زمین‌های زراعی عمدتاً از منابع بالقوه آب، منابع آلودگی هوا و خاک، مزارع پرورش و مناطق معدنی سرچشمه می‌گیرند (۶،۹،۱۵). در تحقیق دیگری میانگین غلظت کروم، مس، نیکل و روی در منطقه شهری جنوب هند ۶/۰۳-۱/۴۵ برابر بیشتر از مقادیر پس زمینه ژئوشیمیایی گزارش شده است. نتایج نشان داد که کروم و مس فراوان‌ترین فلزات سنگین اندازه‌گیری شده در خاک بودند. شاخص‌های آلودگی حاکی از آن است که خاک منطقه مورد مطالعه عمدتاً دارای آلودگی متوسط تا شدید است. ارزیابی خطر سلامت غیرسرطان‌زا پیشنهاد شده توسط آژانس حفاظت از محیط‌زیست ایالات متحده نشان داده که میانگین شاخص‌های خطر کمتر از ۱ است که نشان‌دهنده‌ی عدم وجود خطرات غیر سرطان‌زا برای کودکان و بزرگسالان است. علاوه بر این، نتایج ارزیابی خطر سرطان‌زا نشان داد که ۸۰ درصد از خطر سرطان ناشی از محتوای کروم است، در حالی‌که سایر فلزات سنگین نشان می‌دهند که نه کودکان و نه بزرگسالان در منطقه‌ی مورد مطالعه خطر سرطان‌زایی ندارند (۳۷). پژوهشگران بیان می‌کنند که غالبا منشا آرسنیک و سرب به‌ترتیب ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و ترافیک خودرو و منبع انتشار کروم، مس، نیکل، روی و جیوه دارای منشا طبیعی هستند (۲۲،۳۸). غلظت‌های فلزات سنگین خاک بسیار متفاوت و پیچیده و مبهم هستند. فاکتورهای زیاد و برجسته‌ای از قبیل غلظت فلزات در سنگ‌ها و مواد مادری، فرآیندهای مختلف تشکیل خاک و فاکتورهای انسانی تعیین‌کننده‌ی فراوانی نسبی غلظت آن‌ها در خاک‌ها هستند (۳۹،۴۰). مدیریت متفاوت اراضی در منطقه از قبیل استفاده از فاضلاب شهری، لجن فاضلاب

و انواع کودها و کشت محصولات کشاورزی متفاوت، می‌تواند از عوامل تأثیرگذار بر تغییرات شدید در مقدار هدایت الکتریکی باشد (۴۱،۴۲).

تحلیل و مقایسه دو مدل یادگیری ماشین نشان داد که مدل جنگل تصادفی تنوع عملکرد بالا، از بسیار خوب تا ضعیف بسته به فلزات سنگین و ایستگاه را نشان داد. عوامل تاثیرگذار بر کارایی مدل‌ها نشان می‌دهد که عوامل محیطی محلی تفاوت‌های چشمگیر بین ایستگاه‌ها برای یک عنصر مشخص را داشت و خصوصیات ژئوشیمیایی رفتار متفاوت عناصر در محیط‌های مختلف را نشان داد. هم‌چنین منابع آلودگی متفاوت اثرات مختلف بر توزیع و تجمع عناصر در هر ایستگاه را دارد و فرایندهای انتقال و جذب تأثیر بر میزان پیش‌بینی‌پذیری هر عنصر را نشان داد. عملکرد مدل‌ها نشان می‌دهد که پیش‌بینی غلظت فلزات سنگین در خاک فرآیندی پیچیده است که به‌شدت به شرایط محلی و ویژگی‌های عناصر وابسته است. موفقیت مدل‌سازی مستلزم رویکردی انعطاف‌پذیر و متناسب با شرایط خاص هر منطقه است. مدل جنگل تصادفی نسبت به سایر مدل‌ها ثبات کمتری با تغییرات قابل توجه در عملکرد بین عناصر مختلف را نشان می‌دهد. این نشان می‌دهد که انتخاب مدل باید متناسب با عنصر هدف باشد. تفاوت عملکرد بین ایستگاه‌ها می‌تواند ناشی از تفاوت در عوامل و شرایط محیطی، منابع آلودگی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی محل نمونه‌برداری باشد. الگوهای RMSE و MAE نشان می‌دهد که در اکثر موارد، مدلی که R^2 بالاتری دارد، معمولاً خطای کمتری نیز نشان می‌دهد، اما استثناهایی نیز وجود دارد. این یافته‌ها بر اهمیت طراحی مدل‌های اختصاصی برای هر ایستگاه و هر عنصر تأکید می‌کند، زیرا عملکرد مدل‌ها به‌شدت تحت تأثیر ویژگی‌های محلی و رفتار ژئوشیمیایی عناصر قرار می‌گیرد. روش‌های یادگیری ماشین غیرپارامتری هستند که امکان تشخیص روابط غیرخطی را فراهم می‌کنند و هم در مدل‌سازی خواص خاک زمانی که پایگاه‌های داده بزرگ با تعداد زیادی متغیر در دسترس هستند (۴۳). رویکردهای یادگیری ماشینی برای نقشه‌برداری آلودگی فلزات سنگین در خاک استفاده شده‌اند و عملکرد نسبتاً خوبی داشتند (۴۴). با این‌حال، پژوهشگران همیشه به‌دنبال الگوریتم‌های یادگیری ماشین، متغیرهای اضافی و حسگرهایی هستند که بتوانند دقت پیش‌بینی بالاتری را ارائه دهند (۴۷-۴۵).

نتیجه‌گیری

میزان سرب در خاک‌های سطحی مزارع کشاورزی بالاتر از سایر فلزات سنگین کادمیوم، کروم، آرسنیک، روی و مس بود. غلظت سرب در خاک مزارع کشاورزی در منطقه حمیدیه عنصر روی در خاک بالاتر از سرب مشاهده شد. شاخص خطر غیرسرطان‌زایی میزان سرب و کادمیوم در خاک مزارع کشاورزی بالاتر از ۱ می‌باشد. ارزیابی شاخص خطر غیرسرطان‌زایی فلزات سنگین خاک‌های سطحی مزارع کشاورزی شهر حمیدیه شمال غرب نشان داد که این شاخص در همه موارد کمتر از ۱ به‌دست آمد. ارزیابی ریسک سلامت فلزات سنگین در خاک نشان داد که عناصر کادمیوم، سرب، آرسنیک، مس، روی و کروم برای سلامتی انسان مشکلی ایجاد نمی‌کنند. مقادیر شاخص‌های فاکتور آلودگی، زمین انباشتگی و خطر بوم-شناسی نشان داد که خاک مناطق مورد مطالعه به فلزات سنگین آلودگی دارند. پیشنهاد می‌گردد میزان فلزات سنگین به‌طور مستمر و متناوب در خاک‌های سطحی شهرهای صنعتی و بزرگ استان خوزستان پایش شوند. هم‌چنین میزان فلزات سنگین سرب، آرسنیک و کادمیوم در سایر محصولات زراعی و باغی شهر حمیدیه سنجش شوند. ارزیابی ریسک سلامت فلزات سنگین در آب آبیاری، کود، بذر، محصولات زراعی و بوته و ریشه و برگ آن‌ها مطالعه شود. سایر فلزات سنگین و خطرناک نظیر جیوه، نیکل، وانادیوم نیز در خاک و محصولات کشاورزی شهر حمیدیه مطالعه گردد. در یادگیری ماشین استفاده از مدل‌های ترکیبی می‌تواند برای عناصر با پیش‌بینی ضعیف مفید باشد. هم‌چنین در روش یادگیری ماشین متغیرهای محیطی و فیزیکی و شیمیایی برای بهبود پیش‌بینی آرسنیک و روی اضافه گردد. در روش یادگیری ماشین برای عناصری که R^2 منفی دارند داده‌های بیشتری جمع‌آوری شود.

تشکر و قدردانی: این مقاله از طرح پژوهشی درون دانشگاهی تحت عنوان "بررسی تأثیر فعالیت‌های صنعتی بر آلودگی خاک و محصولات کشاورزی در کلانشهر اهواز: رویکرد یادگیری ماشین" استخراج شده است.

تعارض منافع: نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافع با یکدیگر ندارند.

حمایت مالی: نویسندگان مقاله اعلام می‌نمایند که هزینه‌های این تحقیق توسط دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز تأمین شده است که بدین‌وسیله قدردانی می‌شود.

ملاحظات اخلاقی: نویسندگان کلیه نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. هم‌چنین هر گونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر نتایج یا تفسیر مقاله تاثیر بگذارد را رد می‌کنند.

سهم نویسندگان: نویسندگان مقاله خانم خوشناز پاینده، آقای مهدی فروزانفر و آقای محمد ولایت‌زاده در مراحل مختلف انجام پژوهش شامل طراحی و ایده، نمونه‌برداری، عملیات آزمایشگاهی و نگارش مقاله همکاری متقابل داشتند.

References

1. Viana, C.M., Freire, D., Abrantes, P., Rocha, J. and Pereira, P., 2022. Agricultural land systems importance for supporting food security and sustainable development goals: A systematic review. Science of the Total Environment, 806: 150718. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150718 PMid:34606855

2. Pawlak, K. and Kołodziejczak, M., 2020. The role of agriculture in ensuring food security in developing countries: Considerations in the context of the problem of sustainable food production. Sustainability, 12(13): 5488. https://doi.org/10.3390/su12135488

3. Mihajlovic, D., Srdic, S., Benka, P., Cerekovic, N., Ilic, P., Radanovic, D. and Antic-Mladenovic, S., 2025. Potentially toxic elements in the agricultural soils of northwestern Bosnia and Herzegovina: spatial and vertical distribution, origin and ecological risk. Environmental Monitoring and Assessment, 197(3): 1-15. https://doi.org/10.1007/s10661-025-13758-4 PMid:39953330

4. Gholami, Z., Rouzbahani, M.M., Payandeh, K. and Sabzalipour, S., 2025. Health risk assessment Pb, as and cr in corn (Zea mays) of Behbahan and Dezful from Khuzestan Province, Iran. Scientific Reports, 15(1): 15580. https://doi.org/10.1038/s41598-025-89281-w PMid:40320422 PMCid:PMC12050269

5. Bineshpour, M., Payandeh, K., Nazarpour, A. and Sabzalipour, S., 2021. Status, source, human health risk assessment of potential toxic elements (PTEs), and Pb isotope characteristics in urban surface soil, case study: Arak city, Iran. Environmental Geochemistry and Health, 43: 4939-4958. https://doi.org/10.1007/s10653-020-00778-x PMid:33210156

6. Mansouri Moghadam, S., Payandeh, K., Koushafar, A., Goosheh, M. and Mohammadi Rouzbahani, M., 2024. Level of heavy metals and environmental pollution index in Ahvaz, Southwest Iran. Scientific Reports, 14(1): 14754. https://doi.org/10.1038/s41598-024-64192-4 PMid:38926447 PMCid:PMC11208444

7. Pour Abbasi, H., Payanadeh, K. and Tadayouni, M., 2024. Evaluation of some heavy metals and possible health and ecological risk indicators of surface soils of the west of the country: A case study. Journal of Research in Environmental Health, 10(1): 31-47. [In persian].

8. Jafarian, F., Payanadeh, K., Nazarpour, A., Gholami, A. and Mohsenifar, K., 2025. Evaluation of Environmental Pollution Indices of Heavy Metals in Soil around Khuzestan Steel Co. Journal of Research in Environmental Health, 11(1): 111-129. [In persian].

9. Velayatzadeh, M. and Payandeh, K., 2020. Effect of household water treatment on the concentration of heavy metals of drinking water in Ahvaz city. Iranian South Medical Journal, 22(6): 402-414. [In persian]. https://doi.org/10.29252/ismj.22.6.402

10. Moghadam, S.M., Payandeh, K., Koushafar, A., Goosheh, M. and Rouzbahani, M.M., 2024. Human health risk assessment and carcinogenicity due to exposure to potentially toxic elements on soil pollution in Southwest Iran. Clinical Epidemiology and Global Health, 25: 101492. https://doi.org/10.1016/j.cegh.2023.101492

11. Orosun, M.M., Nwabachili, S., Alshehri, R.F., Omeje, M., Alshdoukhi, I.F., Okoro, H.K., Ogunkunle, C.O., Louis, H., Abdulhamid, F.A., Osahon, S.E. and

Mohammed, A.U., 2023. Potentially toxic metals in irrigation water, soil, and vegetables and their health risks using Monte Carlo models. Scientific reports, 13(1): 21220 https://doi.org/10.1038/s41598-023-48489-4 PMid:38040785 PMCid:PMC10692326

12. Kong, F., Chen, Y., Huang, L., Yang, Z. and Zhu, K., 2021. Human health risk visualization of potentially toxic elements in farmland soil: A combined method of source and probability. Ecotoxicology and Environmental Safety, 211: 111922. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111922 PMid:33472110

13. Moavi, Z., Payandeh, K. and Tadayoni, M., 2024. Risk assessment of health and ecological some of heavy metals in lettuce, cabbage, and soil of Dezful, Ramhormoz, and Hamidiyeh farms. Iranian Journal of Health and Environment, 17(1): 23-42. [In persian].

14. Mousavi Mourd Ghafari, S.M., Payandeh, K. and Goosheh, M., 2023. Evaluation of cancer risk index of cadmium, lead and nickel heavy metals in agricultural lands of some cities of Khuzestan province. Archives of Hygiene Sciences, 12(4): 161-168. https://doi.org/10.34172/AHS.12.4.3.314

15. Gupta, N., Yadav, K.K., Kumar, V., Prasad, S., Cabral-Pinto, M.M., Jeon, B.H., Kumar, S., Abdellattif, M.H. and Alsukaibia, A.K.D., 2022. Investigation of heavy metal accumulation in vegetables and health risk to humans from their consumption. Frontiers in Environmental Science, 10: 791052. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.791052

16. Gabriella Lo F. 2010. Investigating the origin of tomatoes and triple concentrated tomato paste through multielement determination by inductivity coupled plasma mass spectrometry and statistical analysis. Journal of Agriculture and Food Chemistry 58(6): 3801-3807. https://doi.org/10.1021/jf903868j PMid:20170108

17. Senila, M., 2024. Recent advances in the determination of major and trace elements in plants using inductively coupled plasma optical emission spectrometry. Molecules, 29(13): 3169. https://doi.org/10.3390/molecules29133169 PMid:38999125 PMCid:PMC11243047

18. Turekian K.K. & Wedepohl K.H., 1961. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. Geological Society of America Bulletin, 72(2): 175-192. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1961)72[175:DOTEIS]2.0.CO;2

19. Hakanson, L., 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control a sediment logical approaches. Water Research, 14: 975-1001. https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8

20. Abrahim, G.M.S. 2005. Holocene sediments of Tamaki Estuary: Characterization and impact of recent human activity on an urban estuary in Auckland, New Zealand, Ph.D. thesis, University of Auckland, Auckland, New Zealand,361 p.

21. Muller, G., 1979. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. Geo Journal, 2: 108-118.

22. Kowalska J.B., Mazurek R., Gąsiorek M. & Zaleski T., 2018. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination-A review. Environmental geochemistry and health, 40: 2395-2420. https://doi.org/10.1007/s10653-018-0106-z PMid:29623514 PMCid:PMC6280880

23. USEPA. 2010. User's Guide (EB/OL). http://www.epa.gov/Van den Berg, R. 1995. Human exposure to soil contamination: a qualitative and quantitative analysis towards proposals for human toxicological intervention values. RIVM Report no. 725201011. Bilthoven, The Netherlands: National Institute of Public Health and Environmental Protection (RIVM).

24. Abbasi, N. & Mohammadi Galangash, M., 2024. Investigation of heavy metal concentrations in agricultural topsoil of Miandoab landfill area. Iranian Journal of Health and Environment, 17(2): 343-358. [In Persian].

25. Fisher, D.J. and Burton, D.T., 2003. Comparison of two US environmental protection agency species sensitivity distribution methods for calculating ecological risk criteria. Human and Ecological Risk Assessment, 9(3): 675-690. https://doi.org/10.1080/713609961

26. Vatanian, F., Payandeh, K. and Roomiani, L., 2017. Measurement of cadmium, arsenic, nickel and lead elements in Mentha piperita and Portulace oleracea in soils of Dezful and Hamidiyeh from Khuzestan province.

Developmental Biology, 9(4): 67-82. [In Persian].
27. Moavi, Z., Payandeh, K. and Tadayoni, M., 2020. Evaluation of Health Hazards of Cadmium and Arsenic in Lettuce and Cabbage Cultivated in Khuzestan Province. Food Technology & Nutrition, 17(4): 109-122. [In persian].
28. Angulo, E., 1996. The Tomlinson Pollution Load Index applied to heavy metal,'Mussel-Watch'data: a useful index to assess coastal pollution. Science of the Total Environment, 187(1): 19-56. https://doi.org/10.1016/0048-9697(96)05128-5
29. Chan, L.S., Ng, S.L., Davis, A.M., Yim, W.W.S. and Yeung, C.H., 2001. Magnetic properties and heavy-metal contents of contaminated seabed sediments of Penny's Bay, Hong Kong. Marine Pollution Bulletin, 42(7): 569-583. https://doi.org/10.1016/S0025-326X(00)00203-4 PMid:11488237
30. Chonokhuu, S., Batbold, C. & Chuluunpurev, B., 2018. Assessment of heavy metal pollution of topsoil in settlement area, Darkhan city. Proceedings of the Mongolian Academy of Sciences, 55-65. https://doi.org/10.5564/pmas.v58i1.972
31. Sun, H., Wan, S., Li, L. & Liu D., 2015. Distribution of heavy metals in soil and plant of reed wetland in the Dongting Lake of China during different seasons. Journal of Soil and Water Conservation, 29 (5): 289-293.
32. Abosede, O.A., 2017. Review on heavy metals contamination in the Environment. European Journal of Earth and Environment, 4 (1): 1-6.
33. Ericson, B., Otieno, V.O., Nganga, C., Fort, J.S. & Taylor, M.P., 2019. Assessment of the Presence of Soil Lead Contamination Near a Former Lead Smelter in Mombasa, Kenya. Journal of Health & Pollution, 9 (21): 190307. https://doi.org/10.5696/2156-9614-9.21.190307 PMid:30931167 PMCid:PMC6421950
34. Ravankhah, N., Mirzaei, R. & Masoum, S., 2016. Human health risk assessment of heavy metals in surface soil. Journal of Mazandaran University of medical sciences, 26(136): 109-120. [In persian].
35. Ghanevati, M., Roozbahani, M.M. & Payandeh, K., 2021. Investigation of Concentration of Heavy Metals in Lead, Nickel, Arsenic and Cadmium in Soil, Parsley Vegetables and Downstream of Karun River. Journal of Innovation in Food Science & Technology, 13(3): 147-157. [In persian].
36. Xiao, L., Zhou, Y., Huang, H., Liu, Y.J., Li, K., Li, M.Y., Tian, Y. and Wu, F., 2020. Application of geostatistical analysis and random forest for source analysis and human health risk assessment of potentially toxic elements (PTEs) in Arable Land soil. International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(24): 9296. https://doi.org/10.3390/ijerph17249296 PMid:33322666 PMCid:PMC7763655
37. Adimalla, N., Qian, H., Nandan, M.J. and Hursthouse, A.S., 2020. Potentially toxic elements (PTEs) pollution in surface soils in a typical urban region of south India: An application of health risk assessment and distribution pattern. Ecotoxicology and Environmental Safety, 203: 111055. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111055 PMid:32888617
38. Shi, T., Zhang, J., Shen, W., Wang, J. and Li, X., 2022. Machine learning can identify the sources of heavy metals in agricultural soil: A case study in northern Guangdong Province, China. Ecotoxicology and Environmental Safety, 245: 114107. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114107 PMid:36152430
39. Zhang, Y., Lei, M., Li, K. and Ju, T., 2023. Spatial prediction of soil contamination based on machine learning: a review. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 17(8): 93. https://doi.org/10.1007/s11783-023-1693-1
40. Ghorbani, M.R., Ghanavati, N., Babaenejad, T., Nazarpour, A. and Payandeh, K., 2020. Assessment of the potential ecological and human health risks of heavy metals in Ahvaz oil field, Iran. Plos one, 15(11), p.e0242703. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242703 PMid:33232363 PMCid:PMC7685440
41. Hu, B., Xue, J., Zhou, Y., Shao, S., Fu, Z., Li, Y., Chen, S., Qi, L. and Shi, Z., 2020. Modelling bioaccumulation of heavy metals in soil-crop ecosystems and identifying its controlling factors using machine learning. Environmental Pollution, 262, p.114308. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114308 PMid:32155557
42. Zhuang, Z., Mu, H.Y., Fu, P.N., Wan, Y.N., Yu, Y., Wang, Q. and Li, H.F., 2020. Accumulation of potentially toxic elements in agricultural soil and scenario analysis of

cadmium inputs by fertilization: A case study in Quzhou county. Journal of environmental management, 269: 110797. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110797 PMid:32561006

43. Alonso-Sarria, F., Blanco-Bernardeau, A., Gomariz-Castillo, F., Jiménez-Bastida, H. and Romero-Diaz, A., 2025. Estimation of soil properties using machine learning techniques to improve hydrological modeling in a semiarid environment: Campo de Cartagena (Spain). Earth Science Informatics, 18(3), pp.1-24. https://doi.org/10.1007/s12145-025-01833-w

44. Azizi, K., Ayoubi, S., Nabiollahi, K., Garosi, Y. and Gislum, R., 2022. Predicting heavy metal contents by applying machine learning approaches and environmental covariates in west of Iran. Journal of Geochemical Exploration, 233: 106921. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106921

45. Peng, Z., Zhang, B., Wang, D., Niu, X., Sun, J., Xu, H., Cao, J. and Shen, Z., 2024. Application of machine learning in atmospheric pollution research: A state-of-art review. Science of The Total Environment, 910: 168588. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168588 PMid:37981149

46. Lv, J. and Wang, Y., 2018. Multi-scale analysis of heavy metals sources in soils of Jiangsu Coast, Eastern China. Chemosphere, 212: 964-973. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.08.155 PMid:30286553

47. Liu, X., Lu, D., Zhang, A., Liu, Q. and Jiang, G., 2022. Data-driven machine learning in environmental pollution: gains and problems. Environmental Science & Technology, 56(4): 2124-2133. https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06157 PMid:35084840