پایش، پهنه‌بندی و مدل‌سازی مفهومی آلودگی خاک به عنصر کادمیم در استان خوزستان

علیرضا جعفرنژادی[1*]، زینب ظاهری عبده‌وند[2]، حامد رضایی[3]

۱- دانشیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران* (arjafarnejady@gmail.com)

۲- دکتری سنجش از دور و GIS، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران.

۳-دانشیار موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، ایران.

چکیده:

آلودگی خاک به فلزات سنگین به‌ویژه کادمیم، یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی در مناطق صنعتی و کشاورزی است که می‌تواند سلامت انسان و محیط زیست را تهدید کند. استان خوزستان به‌دلیل فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی گسترده و ویژگی‌های زمین‌شناسی خاص، از مناطق مستعد آلودگی به کادمیم به شمار می‌رود. در این پژوهش، با استفاده از داده‌های ۲۵۴ نمونه خاک و بهره‌گیری از فناوری GIS و روش درون‌یابی کریجینگ، نقشه پهنه‌بندی غلظت کادمیم تهیه شد. نتایج نشان داد که ۱۳ ناحیه دارای غلظت بالای کادمیم بوده و مساحتی حدود ۷۴۲۴ هکتار را تحت تأثیر قرار داده‌اند. منابع آلاینده شامل زه‌آب‌های کشاورزی، فاضلاب صنعتی، فعالیت‌های نفتی و عوامل زمین‌ساختی می‌باشند. همچنین، یک مدل پنداشتی برای شبیه‌سازی مسیرهای انتقال و تجمع کادمیم طراحی و اجرا شد که به شناسایی مناطق پر ریسک و تحلیل منابع بالقوه کمک کرد. این مطالعه تأکید می‌کند که پایش مستمر کیفیت خاک، مدیریت منابع آلاینده و اصلاح الگوهای کاربری اراضی از مهم‌ترین راهکارهای کاهش مخاطرات زیست‌محیطی مرتبط با آلودگی کادمیم است.

واژگان کلیدی: آلودگی خاک، استان خوزستان، کادمیم، GIS.

مقدمه:

آلودگی خاک به فلزات سنگین از جمله چالش‌های مهم زیست‌محیطی در مناطق صنعتی و کشاورزی به‌شمار می‌رود. عنصر کادمیم به‌دلیل قابلیت تجمع در خاک و ورود به زنجیره غذایی، می‌تواند اثرات زیانباری بر سلامت انسان و محیط زیست داشته باشد (جعفرنژادی و همکاران، ۱۳۸۹). گزارش‌های جهانی حاکی از آن است که حدود ۱۴ تا ۱۷ درصد از اراضی کشاورزی جهان، معادل ۲۴۲ میلیون هکتار، به فلزات سنگینی نظیر کادمیم، سرب و آرسنیک آلوده‌اند. این آلودگی تهدیدی جدی برای سلامت انسان، تولید محصولات کشاورزی و امنیت غذایی محسوب می‌شود. کادمیم به‌ویژه در مناطقی از آسیا، خاورمیانه و آفریقا به‌عنوان یکی از آلاینده‌های اصلی شناسایی شده است (Saghir و همکاران، ۲۰۲۵). همچنین، مطالعات اخیر بر گسترش جهانی آلودگی خاک به کادمیم و پیامدهای آن بر سلامت انسان و محیط زیست تأکید دارند (Yang و همکاران، ۲۰۲۳).

در سطح ملی نیز، پژوهش‌های متعددی به بررسی نقش عوامل زمین‌شناسی و فعالیت‌های انسانی در افزایش غلظت فلزات سنگین پرداخته‌اند. رضایی و همکاران (۱۴۰۱) در مطالعه‌ای نشان دادند که استفاده نادرست از نهاده‌های کشاورزی و فاضلاب‌های آلوده، از مهم‌ترین عوامل آلودگی خاک و محصولات کشاورزی به فلزات سنگین در ایران به‌شمار می‌رود. همچنین، بوستانی کوشکی (۱۴۰۴) در بررسی غلظت فلزات سنگین در خاک شالیزارهای اطراف اصفهان و تأثیر آن بر امنیت غذایی، گزارش کرد که در حدود ۲۱ درصد از نمونه‌ها، غلظت کادمیم بالاتر از حد مجاز تعیین‌شده توسط سازمان حفاظت محیط زیست بوده است.

استان خوزستان با توجه به وجود صنایع نفت، پتروشیمی، فعالیت‌های گسترده کشاورزی و شرایط زمین‌شناسی خاص، یکی از مناطق مستعد آلودگی به فلزات سنگین به‌ویژه کادمیم محسوب می‌شود. منشأ این آلودگی‌ها می‌تواند طبیعی (زمین‌زاد) یا حاصل از فعالیت‌های انسانی (انسان‌زاد) باشد (رضایی و همکاران، ۱۴۰۱).

با بهره‌گیری از فناوری GIS و روش‌های آماری مکانی، امکان شناسایی پهنه‌های آلوده و ارائه راهکارهای مدیریتی برای کاهش مخاطرات زیست‌محیطی فراهم می‌شود. هدف این تحقیق، تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی کادمیم در خاک، شناسایی مناطق با ریسک

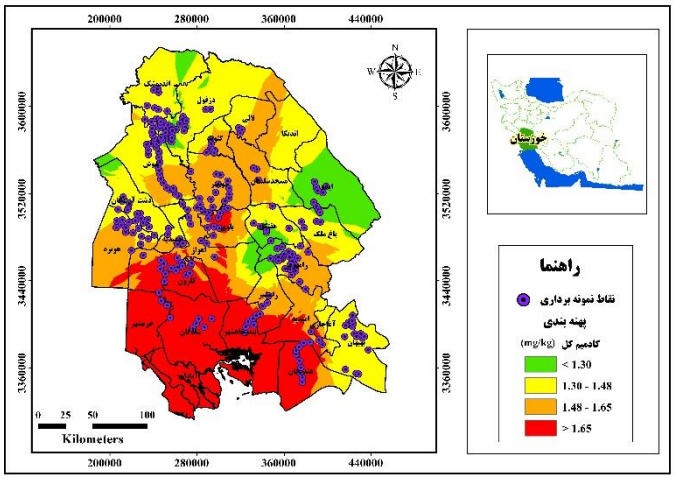
بالا، تحلیل منابع بالقوه آلودگی و طراحی یک مدل پنداشتی به‌منظور تبیین مسیرهای انتقال آلودگی در استان خوزستان است. مدل‌های پنداشتی به‌عنوان ابزاری کارآمد، می‌توانند در درک بهتر فرآیندهای انتقال و تجمع فلزات سنگین در محیط زیست و ارزیابی ریسک‌های مرتبط نقش مؤثری ایفا کنند.

در مطالعه حاضر، از یک مدل پنداشتی برای شبیه‌سازی مسیرهای انتقال و تجمع کادمیم در اراضی کشاورزی استان خوزستان استفاده شده است. این مدل با در نظر گرفتن منابع بالقوه آلودگی، مسیرهای انتقال نظیر رواناب سطحی و باد، و نیز گیرنده‌های آلاینده مانند اراضی کشاورزی طراحی شده و با هدف شناسایی مناطق پرریسک و پیش‌بینی پراکنش آلودگی اجرا شده است. بهره‌گیری از این مدل می‌تواند مبنایی برای طراحی مراحل بعدی تحقیق، از جمله انتخاب نقاط نمونه‌برداری، تحلیل‌های مکانی و اجرای مدل‌های پیش‌بینی آلودگی فراهم آورد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان خوزستان با مساحت کل ۶۴۰۵۷ کیلومترمربع و جمعیت ۴۵۳۱۷۳۰ نفر، به‌عنوان یک قطب کشاورزی و صنعتی مورد توجه قرار دارد. این استان دارای منابع سرشار آب و خاک بوده و با داشتن ۲/۲ میلیون هکتار اراضی مستعد و جریان پنج رودخانه بزرگ (کارون، کرخه، دز، مارون و جراحی) و چندین رودخانه کوچک، با حجم جریان بیش از ۳۱ میلیارد مترمکعب در سال می‌باشد. این استان بین ۲۹ درجه و ۵۷ دقیقه تا ۳۳ درجه و صفر دقیقه عرض شمالی از خط استوا و ۴۷ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۳ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ در جنوب غربی ایران قرار دارد (شکل ۱).



شکل۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه، نقشه پهنه‌بندی کادمیم و پراکنش نقاط نمونه برداری

روش تحقیق

در این پژوهش، از داده‌های حاصل از طرح مدل‌سازی روند انباشت کادمیم در خاک استان خوزستان استفاده شد (جعفرنژادی و همکاران، ۱۳۸۹). این داده‌ها شامل ۲۵۴ نقطه نمونه‌برداری خاک از مناطق مختلف استان بودند. پس از جمع‌آوری و سامان‌دهی اطلاعات، داده‌ها به محیط GIS منتقل گردید. برای تهیه نقشه پهنه‌بندی غلظت کادمیم، از روش درون‌یابی کریجینگ به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین تکنیک‌های زمین‌آمار استفاده شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، ۱۳ نقطه با غلظت کادمیم بیش از ۱/۴۸ میلی‌گرم در کیلوگرم، به‌عنوان نواحی آلوده شناسایی شدند (شکل ۱). مختصات این مناطق با استفاده از سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) و تصاویر Google Earth تعیین گردید. به‌منظور شناسایی منابع بالقوه آلودگی در هر منطقه، تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌های توپوگرافی و بازدیدهای میدانی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، مساحت نواحی با ریسک بالای آلودگی محاسبه و شاخص‌های آماری توصیفی مربوط به غلظت کادمیم استخراج و تحلیل شد.

نتایج و بحث

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل مکانی داده‌ها و پایش میدانی، منابع و مسیرهای احتمالی آلودگی کادمیم در استان خوزستان شناسایی شدند. این منابع شامل فعالیت‌های کشاورزی (مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی)، تخلیه زه‌آب‌ها، فعالیت‌های صنعتی،

نفتی و شرایط زمین‌شناسی خاص (نظیر خاک‌های شور، گچی، یا عوامل زمین‌ساختی) هستند. نتایج شناسایی مناطق آلوده به کادمیم در استان خوزستان نشان داد که ۱۳ پایگاه دارای غلظت بالای این فلز سنگین هستند که در مجموع مساحتی معادل ۷۴۲۴/۸۸ هکتار از اراضی را تحت تأثیر قرار داده‌اند. بیشترین غلظت کادمیم با مقدار ۴/۳۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم در منطقه اهواز مشاهده شد، در حالی که بیشترین وسعت آلودگی به منطقه خرمشهر با مساحت ۴۲۰۰ هکتار اختصاص داشت. مهم‌ترین منابع احتمالی آلاینده در این مناطق شامل زه‌آب‌های کشاورزی (دشت آزادگان)، فاضلاب ناشی از فعالیت حوضچه‌های پرورش ماهی (اهواز)، پساب صنایع نیشکر و آلودگی ناشی از چاه‌های نفتی (خرمشهر)، ورودی‌های آلوده به تالاب شادگان، پساب صنایع پتروشیمی (ماهشهر)، و مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی در اراضی کشاورزی (بهبهان، باغملک، ایذه و رامهرمز) بوده‌اند (جدول ۲). بررسی آماره‌های توصیفی غلظت کادمیم در مناطق مورد مطالعه نشان داد که میانگین غلظت کادمیم ۰/۳۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم و بیشینه آن ۰/۶۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم بوده است، این مقادیر بیانگر احتمال آلودگی بخشی از اراضی کشاورزی استان به کادمیم بوده و بر ضرورت انجام پژوهش‌های بیشتر در این زمینه تأکید دارند (جدول ۱). مشخصات مناطق مشکوک به آلودگی به همراه مساحت و غلظت کادمیم در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱– پارامترهای آمار توصیفی کادمیم خاک (میلی‌گرم در کیلوگرم) در استان خوزستان.

منبع	تعداد	میانگین	میانه	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی	کمینه	بیشینه
خاک کشاورزی	۱۳	۰/۳۸	۰/۲۱	۰/۰۱۶	۰/۷۵۳	-۰/۸۶۸	/۲۳	۰/۶۲

جدول ۲- مشخصات مناطق مشکوک به آلودگی همراه با مساحت و غلظت کادمیم

غلظت کادمیم (میلی‌گرم/کیلوگرم)	مساحت (هکتار)	محیط پذیرنده	مسیر انتقال آلاینده‌ها	منبع آلودگی	مختصات (طول، عرض)	موقعیت
۱/۶۹	۹۱۴	اراضی کشاورزی	زهکشی رودخانه	زه‌آب مزارع بالادست	780272, 3490724	دشت آزادگان
۴/۳۸	۷۲۳	اراضی کشاورزی	تخلیه فاضلاب	حوضچه‌های پرورش ماهی	256385, 3451224	اهواز
۱/۵	۴۲۰۰	اراضی کشاورزی	زهکشی به اراضی کشاورزی	کشت و صنعت نیشکر، چاه‌های نفتی	245127, 3428749	خرمشهر
۲	۱۰۳۶	اراضی کشاورزی	زهکشی رودخانه جراحی	آلودگی ورودی به تالاب	279464, 3400651	شادگان
۱/۷۵	۵/۴۹	اراضی کشاورزی	سیستم زهکش	پتروشیمی، مناطق نفتی	326993, 3402138	ماهشهر
۱/۹	۱۵۷	اراضی کشاورزی	پساب رودخانه جراحی	مناطق نفتی، خاک‌های شور	345871, 3425919	رامشیر
۲/۱	۱۵۷	اراضی کشاورزی	سیستم زهکش	آلودگی زمین‌ساختی، خاک‌های شور	371218, 3375527	هندیجان
۱/۴۴	۵/۵۱	اراضی کشاورزی	سیستم زهکش	مناطق نفتی، شور بودن اراضی	384938, 3393221	امیدیه
۱/۸۱	۵/۱۸	اراضی کشاورزی	سیستم زهکش	کودهای شیمیایی، کشت‌های گسترده	419351, 3401455	بهبهان
۱/۶۳	۳۸/۳	اراضی کشاورزی	سیستم زهکش	مناطق نفتی، احتمال آلودگی زمین‌ساختی	347801, 3476506	هفتگل
۱/۷۵	۸/۵۴	اراضی کشاورزی	سیستم زهکش	کودهای شیمیایی، آلودگی زمین‌ساخت	375844, 3494000	باغملک
۱/۵۶	۱۳	اراضی کشاورزی	سیستم زهکش	کودهای شیمیایی، آلودگی زمین‌ساخت	390960, 3522704	ایذه
۱/۶۹	۹۱۴	اراضی کشاورزی	سیستم زهکش	کودهای شیمیایی، آلودگی زمین‌ساخت، خاک‌های گچی	367444, 3458129	رامهرمز

نتیجه‌گیری:

پژوهش حاضر نشان داد که برخی مناطق استان خوزستان با آلودگی قابل‌توجهی به عنصر کادمیم مواجه هستند؛ این آلودگی احتمالی ناشی از منابع انسانی مانند زه‌آب‌های کشاورزی، فاضلاب‌های صنعتی و مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی و همچنین عوامل طبیعی نظیر شرایط زمین‌ساختی و شور بودن خاک‌ها است. بهره‌گیری از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) در تلفیق داده‌های مکانی، آماری و میدانی، ابزار مؤثری برای شناسایی و تحلیل مناطق بحرانی آلودگی فراهم کرده است. در این پژوهش، توزیع مکانی غلظت کادمیم با استفاده از روش پهنه‌بندی مبتنی بر کریجینگ مدل‌سازی شد و نقشه‌های حاصل، به‌خوبی مناطق پرخطر را شناسایی کردند؛ این نقشه‌ها می‌توانند به‌عنوان ابزاری کارآمد در برنامه‌ریزی کنترل و مدیریت آلودگی مورد استفاده قرار گیرند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، پایش دوره‌ای کیفیت خاک در مناطق پرخطر، مدیریت منابع آلاینده و اصلاح الگوهای کاربری اراضی به‌عنوان راهکارهای مؤثر برای کاهش مخاطرات زیست‌محیطی ناشی از آلودگی کادمیم توصیه می‌شود.

فهرست منابع

۱-بوستانی‌کوشکی، ف،۱۴۰۴، مروری بر ارزیابی فلزات سنگین در خاک برخی از شالیزارهای اطراف اصفهان و تاثیر کادمیم بر امنیت غذایی، مجله نخبگان علوم و مهندسی، جلد۱، شماره ۱.

۲- جعفرنژادی، ع.، همائی، م، بای بوردی، م.، صیاد، غ.، ۱۳۸۹، مدل‌سازی روند انباشت کادمیم در خاک مزارع گندم، پایان نامه دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.

۳- رضایی، ح.، شهبازی، ک.، سعادت، س.، بازرگان، ک. ۱۴۰۱، بررسی وضعیت آلودگی خاک و محصولات کشاورزی در ایران، نشریه علمی مدیریت اراضی/ جلد ۱۰ / شماره ۱.

4. Saghir AA, Asmelash F, Maryo M, Boularbah A, Kebede F. 2025 Extent of natural soil cadmium, its bioavailability, and pollution treat analysis in the agroforestry systems of the Gedeo Zone of southern Ethiopia. Heliyon. 2025 Feb 15;11(4): e42742. *http://doi: 10.1016/j.heliyon.2025.e42742*.

5. Yang, S., Yang, D., Taylor, D., Mingjiang, L., Xingmei, X. 2023. Tracking Cadmium Pollution from Source to Receptor: A Health-Risk Focused Transfer Continuum Approach. Available at SSRN *.http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4107453* .

Assessment, Mapping, and Conceptual Modeling of Soil Cadmium Contamination in Khuzestan Province, Iran

Ali Reza Jafarnejadi*[1], Zeinab Zaheri Abdehvand [2], Hamed Rezaei [3]

[1]Associate Professor, Soil and Water Research Department, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ahvaz, Iran.

[2] Ph.D. in Remote Sensing and GIS, Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ahvaz, Iran.

[3]Associate Professor, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

Abstract

Soil contamination with heavy metals, particularly cadmium, is one of the most significant environmental issues in industrial and agricultural areas, posing a threat to both human health and the environment. Khuzestan province is considered a region prone to cadmium contamination due to extensive industrial and farming activities and unique geological features. In this study, data from 254 soil samples, combined with GIS technology and the kriging interpolation method, were used to create a map of cadmium concentrations in the region. The results showed that 13 areas had high cadmium concentrations, affecting approximately 7,424 hectares. Sources of pollution include agricultural runoff, industrial effluents, oil-related activities, and tectonic factors. In addition, a conceptual model was designed and implemented to simulate the pathways of cadmium transport and accumulation, which helped identify high-risk areas and analyze potential sources. This study emphasizes that continuous monitoring of soil quality, management of pollution sources, and adaptation to changing land use patterns are among the most important strategies to mitigate the environmental risks associated with cadmium contamination.

Keywords: Soil contamination, Khuzestan Province, Cadmium, GIS.