

ارزیابی پتانسیل ریسک اکولوژیکی و زیست‌محیطی فلز سنگین کادمیوم در خاک (مطالعه موردی: اراضی شهری، استان تهران)

چکیده

آلودگی خاک به فلزات سنگین، به‌ویژه کادمیوم (Cd)، یکی از چالش‌های جدی زیست‌محیطی است که تأثیرات منفی قابل‌توجهی بر اکوسیستم‌ها و سلامت انسان دارد. این مطالعه به ارزیابی پتانسیل ریسک اکولوژیکی و زیست‌محیطی فلز کادمیوم در بخشی از اراضی منطقه شهری استان تهران می‌پردازد. در این راستا، نمونه‌برداری از ۴۱ نقطه در عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متری خاک انجام شد و غلظت کل عنصر کادمیوم با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی نشری اتمی پلاسمای جفت‌شده القایی (OES-ICP) پس از هضم نمونه‌ها با آکوا راجیا مطابق استاندارد EPA 3050B مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. نتایج نشان داد که میانگین غلظت کادمیوم برابر با ۰/۷۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم بوده و دامنه تغییرات آن بین ۰/۱۷ تا ۲/۰۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم قرار دارد که این مقادیر پایین‌تر از حد مجاز استانداردهای سازمان محیط زیست در ایران است. برای ارزیابی آلودگی، شاخص‌های زیست‌محیطی شامل زمین‌انباشتگی (Igeo)، فاکتور آلودگی (CF)، فاکتور غنی‌شدگی (EF) و پتانسیل ریسک اکولوژیکی (ER) محاسبه شد. شاخص زمین‌انباشتگی با دامنه تغییرات (۲/۷۷-۰/۸۲)، پتانسیل ریسک اکولوژیکی با کمینه و بیشینه (۳۰۷/۵۰-۲۵/۵۰)، شاخص غنی‌شدگی با دامنه تغییرات (۰/۶۹-۸/۵۷) و فاکتور آلودگی نیز با دامنه تغییرات (۱۰/۲۵-۰/۸۵) نشان‌دهنده وضعیت آلودگی متوسط تا نسبتاً زیاد اکثر نمونه‌های خاک به عنصر کادمیوم در منطقه مورد بررسی هستند. تحلیل این چهار شاخص به همراه بازدیدهای میدانی از منطقه، تأییدکننده این واقعیت است که فعالیت‌های انسانی تأثیر قابل‌توجهی در افزایش غلظت این فلز سنگین در خاک‌های سطحی منطقه دارند. این مطالعه بر لزوم مدیریت صحیح آبیاری و کوددهی تأکید دارد تا از انباشت فلزات سنگین جلوگیری شود. همچنین، نتایج به‌وضوح نشان‌دهنده تأثیر فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی بر افزایش غلظت کادمیوم در خاک‌های منطقه است، که می‌تواند عواقب جدی برای سلامت انسان و محیط‌زیست داشته باشد. با توجه به یافته‌ها، اقدامات فوری برای کاهش آلودگی و حفاظت از منابع خاک ضروری است.

کلیدواژه‌ها: کادمیوم، آلودگی خاک، ارزیابی پتانسیل ریسک اکولوژیکی، شاخص‌های زیست‌محیطی، سلامت انسان.

Ecological and Environmental Risk Assessment of Cadmium Heavy Metal in Soil (Case Study: Shahr-e-Ray, Tehran Province)

Abstract

Soil contamination with heavy metals, particularly cadmium (Cd), is one of the serious environmental challenges that has significant negative impacts on ecosystems and human health. This study evaluates the ecological and environmental risks of cadmium in a section of the agricultural lands in the Shahr-e Rey region of Tehran Province. In this regard, soil sampling was conducted from 41 points at a depth of 0 to 20 cm, and the total concentration of cadmium was measured using Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES) after digesting the samples with aqua regia, in accordance with the EPA 3050B standard. The results showed that the average cadmium concentration was 0.79 mg/kg, with a range of 0.17 to 2.05 mg/kg, which is below the permissible limits set by the Environmental Protection Agency of Iran. To assess contamination, environmental indices including the Geo-accumulation Index (Igeo), Contamination Factor (CF), Enrichment Factor (EF), and Ecological Risk Index (ER) were calculated. The Geo-accumulation Index ranged from -0.82 to 2.77, the Ecological Risk Index ranged from 25.50 to 307.50, the Enrichment Factor ranged from 0.69 to 8.57, and the Contamination Factor ranged from 0.85 to 10.25. These indices indicate moderate to relatively high pollution levels in most of the soil samples for cadmium in the studied region. The analysis of these four indices, along with field visits to the area, confirms that human activities have a significant impact on increasing the concentration of this heavy metal in the region's topsoil. This study emphasizes the necessity of proper irrigation and fertilization management to prevent the accumulation of heavy metals. Furthermore, the results clearly demonstrate

the influence of industrial and agricultural activities on the increased concentration of cadmium in the region's soils, which could have serious consequences for human health and the environment. Based on the findings, urgent measures are essential to reduce contamination and protect soil resources.

Keywords: Cadmium, Soil Pollution, Ecological Risk Assessment, Environmental Indices, Human Health.

فصلنامه علمی پژوهشی

خاک به عنوان یک منبع تجدیدناپذیر برای فعالیت‌های مختلف زندگی، به‌ویژه در زمینه تولیدات کشاورزی، ضروری می‌باشد (Ahmed et al., 2024; Anggraeni et al., 2024). آلودگی خاک پیامدهای گسترده‌ای دارد که نه تنها بر محیط‌زیست بلکه بر سلامت انسان، کشاورزی و رفاه ما تأثیر می‌گذارد (George et al., 2023). آلودگی خاک به فلزات سنگین، به‌ویژه کادمیوم (Cd)، یکی از چالش‌های جدی زیست‌محیطی است که تأثیرات منفی قابل‌توجهی بر اکوسیستم‌ها و سلامت انسان دارد. کادمیوم به عنوان یک عنصر سمی، از طریق فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی، صنعتی و شهری به خاک‌ها وارد می‌شود (Zhang et al., 2023). اغلب، آلودگی خاک‌ها در مناطق صنعتی و مرکز شهرهای بزرگ که فعالیت‌های صنعتی و تولیدی انجام می‌شود، رخ می‌دهد (Anggraeni et al., 2024). غلظت‌های بالای فلزات سنگین تأثیرات چندوجهی را به همراه دارد که شامل تغییر در خواص فیزیکی و شیمیایی خاک، تهدیدات مستقیم یا غیرمستقیم برای سلامت انسان و تأثیر بر کیفیت و عملکرد محصولات زراعی دارد (Li et al., 2024). فلزات سنگین آلاینده‌هایی بسیار پایدار، غیرقابل تجزیه و پیچیده هستند که می‌توانند به آرامی در اندام‌های مختلف مانند عضلات، استخوان‌ها، کبد و کلیه انباشته شوند (Rehman et al., 2021).

کادمیوم (Cd) که به دلیل سمیت بالا می‌تواند در خاک و آب‌های زیرزمینی انباشته شود و خطرات قابل‌توجهی برای سلامت انسان و محیط‌زیست ایجاد کند تماس طولانی‌مدت با کادمیوم ممکن است منجر به عوارض جدی سلامتی شامل آسیب به کلیه‌ها، ریه‌ها و استخوان‌ها شود. در گیاهان، انباشت کادمیوم می‌تواند جذب مواد مغذی را مختل کند و رشد را محدود نماید. این موضوع تهدید قابل‌توجهی برای گیاهان، حیوانات و انسان‌ها محسوب می‌شود که منجر به مسمومیت، ناهنجاری‌های رشدی و مشکلات مختلف سلامتی می‌گردد (George et al., 2023; Ahmed et al., 2024). به‌طور کلی، تعیین غلظت این عناصر در خاک به‌تنهایی نمی‌تواند به طور کامل نمایانگر میزان آلودگی و تأثیرات منفی آن‌ها بر محیط‌زیست باشد. بنابراین، نیاز به استفاده از ترکیبی از استانداردها و شاخص‌ها برای دستیابی به ارزیابی دقیق‌تر و جامع‌تر از وضعیت آلودگی خاک احساس می‌شود (Nomas and Al-Shamma., 2023). شاخص‌های متعددی جهت تعیین میزان آلودگی خاک به فلزات سنگین وجود دارد که امکان مقایسه‌های جهانی را در ارزیابی وضعیت آلودگی اکوسیستم‌های مختلف (طبیعی و انسان‌ساخت) فراهم می‌کنند (Lukaszek-Chmielewska et al., 2025).

از این رو برای ارزیابی آلودگی کادمیوم در خاک‌ها، استفاده از شاخص‌های مختلفی نظیر فاکتور آلودگی (CF)، شاخص زمین انباشتگی (Igeo) و ارزیابی پتانسیل ریسک اکولوژیک (ER) ضروری است. فاکتور آلودگی (CF) به عنوان شاخصی برای اندازه‌گیری شدت آلودگی خاک و شناسایی منابع انسانی به کار می‌رود. این شاخص با محاسبه نسبت غلظت فلزات سنگین در خاک به غلظت طبیعی آن‌ها در پوسته زمین تعیین می‌شود (Cano et al., 2024). شاخص زمین انباشتگی (Igeo) نیز می‌تواند درجه آلودگی خاک را تعیین کند. این شاخص یک روش رایج برای ارزیابی آلودگی خاک به فلزات سنگین است؛ بنابراین می‌توان از آن برای تعیین شدت آلودگی استفاده کرد (Mansouri Moghadam et al., 2024). شاخص غنی‌شدگی (EF) برای هر فلز از نسبت بین عنصر و مقدار زمینه‌ای فلزات سنگین محاسبه می‌شود. این شاخص به‌طور خاص برای ارزیابی آلودگی خاک به فلزات سنگین مورد استفاده قرار می‌گیرد (Adamo et al., 2005). پتانسیل ریسک اکولوژیک (ER) برای ارزیابی ریسک‌های اکولوژیک یک فلز سنگین خاص در نمونه‌های خاک به کار می‌رود. این شاخص به منظور ارزیابی تأثیرات منفی اکولوژیکی ناشی از فعالیت‌های انسانی و حفاظت از محیط‌زیست توسعه یافته است. پتانسیل ریسک اکولوژیک می‌تواند یک ارزش کمی سریع و آسان از خطر اکولوژیکی ممکن در یک سیستم ارائه دهد (Gupta et al., 2021; Xie et al., 2022).

Anggraeni et al (2024) با بررسی و کمی‌سازی سطوح آلودگی غلظت فلز سنگین کادمیوم (Cd)، در خاک شهرستان باندونگ، اندونزی با استفاده از فاکتور آلودگی (CF)، پتانسیل ریسک اکولوژیک (ER) و شاخص زمین انباشتگی (Igeo) بیان کردند که سطوح Cd به‌طور نگران‌کننده‌ای در این منطقه بالا بود. علاوه بر این، ارزیابی پتانسیل ریسک اکولوژیک نشان داد که خطر قابل‌توجهی برای

سلامت محیط‌زیست و انسان به دلیل تجمع این فلز سنگین در این منطقه وجود دارد. مطالعه‌ای به‌منظور بررسی غلظت فلز سنگین Cd در خاک‌های شمال اهواز، واقع در جنوب غربی ایران انجام شد. نتایج این مطالعه نشان داد که میانگین فاکتور آلودگی (CF)، فاکتور غنی‌شدگی (EF) و شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo) برای کادمیوم به ترتیب ۷/۸۴، ۷۳/۹۴ و ۲/۳۸ بود. کادمیوم سطوح بالایی از آلودگی را نشان داد و یافته‌ها حاکی از آن بود که آلودگی کادمیوم ناشی از کاربرد نامناسب کودهای شیمیایی، فعالیت‌های صنعتی و انسانی در منطقه است (Mansouri Moghadam et al., 2024).

با توجه به نقش حیاتی کشاورزی در تأمین امنیت غذایی و گسترده‌ی اراضی تحت کشت محصولات متنوعی نظیر سبزیجات، صیفی‌جات، گندم و کلزا، حفظ کیفیت خاک و پیشگیری از آلودگی زیست محیطی از اولویت بالایی برخوردار است. با این حال، تلفیق عوامل متعددی از جمله کمبود منابع آبی، استفاده گسترده از فاضلاب تصفیه‌خانه جنوب تهران برای آبیاری، فعالیت پالایشگاه روغن‌موتور ایرانول، کاربرد بی‌رویه کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها و علف‌کش‌ها، این منطقه را در معرض خطر نفوذ فلزات سنگین، به‌ویژه کادمیوم قرار داده است. کادمیوم به‌عنوان یک آلاینده پایدار با سمیت بالا، قابلیت تجمع در زنجیره غذایی و ایجاد پیامدهای بهداشتی جبران‌ناپذیر برای انسان و اکوسیستم را داراست. با این وجود، مطالعات جامعی در زمینه ارزیابی کمی و کیفی آلودگی کادمیوم در این منطقه و تحلیل پتانسیل ریسک اکولوژیک ناشی از آن با بهره‌گیری از شاخص‌های چندبعدی انجام نشده است.

این پژوهش با هدف ارزیابی نظام‌مند آلودگی کادمیوم در خاک‌های کشاورزی منطقه شهری و با تمرکز بر چهار شاخص، فاکتور آلودگی (CF)، فاکتور غنی‌شدگی (EF)، پتانسیل ریسک اکولوژیک (ER) و شاخص زمین‌انباشت (Igeo) طراحی شد. این شاخص‌ها به‌صورت ترکیبی، امکان تحلیل منشأ آلودگی (طبیعی یا انسان‌ساخت)، میزان تجمع زیست محیطی، پتانسیل ریسک اکولوژیک و سطح زمین‌انباشت کادمیوم را فراهم می‌کنند. دستاوردهای این مطالعه می‌تواند به عنوان پایه‌ای علمی برای تدوین راهبردهای مدیریت پایدار خاک، کاهش مواجهه جوامع محلی با آلاینده‌ها و اصلاح الگوهای کشاورزی در مناطق مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شکل ۱، موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. این منطقه، بخشی از اراضی شهرستان ری در استان تهران است که با شیبی ملایم و در امتداد شمالی-جنوبی، به وسعت تقریبی ۵۵۰۰ هکتار گسترده شده است. شهرستان ری به‌عنوان یکی از نواحی مهم کشاورزی در استان تهران با عمده تولیدات سبزی‌جات، صیفی‌جات، گندم و کلزا می‌باشد. این شهرستان از شمال به کلان‌شهر تهران، از جنوب به شهرستان قم، از شرق به ورامین و پاکدشت و از غرب به شهرستان‌های اسلام‌شهر، زرننده و رباط‌کریم محدود می‌شود. کاربری اصلی اراضی منطقه مورد مطالعه کشاورزی (با عمده تولیدات سبزی‌جات، صیفی‌جات، گندم و کلزا) بوده است، اما با گسترش شهری و صنعتی، بخش‌هایی از این اراضی تغییر کاربری داده و به اراضی مسکونی، صنعتی و خدماتی تبدیل شده‌اند. با این حال، کشاورزی همچنان به‌عنوان یکی از فعالیت‌های مهم اقتصادی و معیشتی در این منطقه مطرح است. آلودگی خاک به فلزات سنگین مانند کادمیوم، ناشی از فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی، می‌تواند تهدیدی برای این کاربری‌ها باشد و نیازمند مدیریت و برنامه‌ریزی دقیق‌تر است.

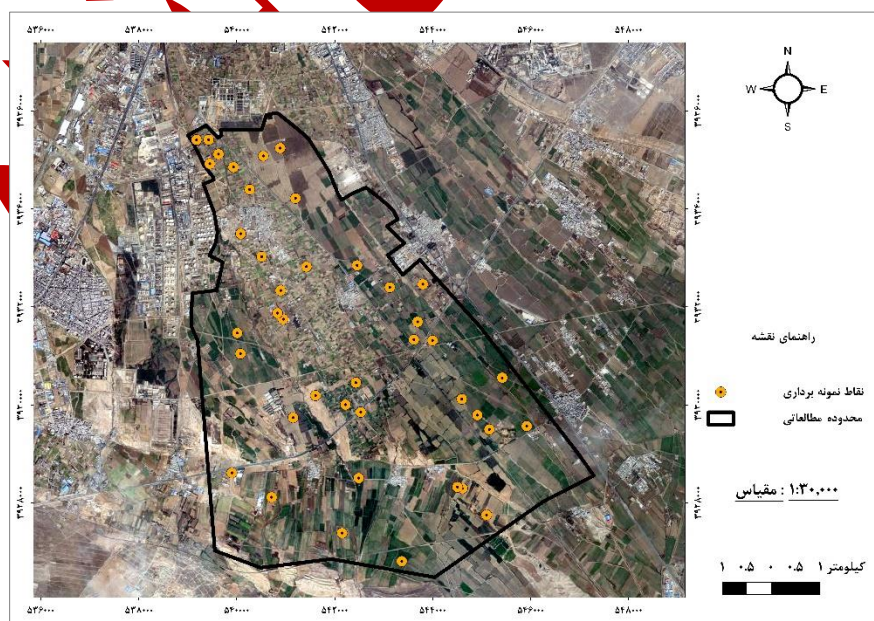
ویژگی‌های اقلیمی و خاک‌شناسی

رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک‌های این منطقه به ترتیب اریدیک و ترمیک هستند. بر اساس داده‌های آماری بلندمدت ۲۰ ساله ایستگاه سینوپتیک امام خمینی (ره)، که نزدیک‌ترین ایستگاه به منطقه محسوب می‌شود، میانگین بارندگی سالیانه در شهرری ۲۰۹ میلی‌متر و میانگین دما ۱۹ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است. ارتفاع این شهرستان از سطح دریا ۱۰۶۰ متر است که بر ویژگی‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی آن تأثیرگذار است.

زمین‌شناسی منطقه

مطابق با تحقیقات انجام‌شده توسط مردانی و همکاران (۱۳۸۹)، سازند آبرفتی تهران شامل آبرفت‌های جوان مخروط‌افکنه‌ای است که در برخی واحدهای ضخامت آن به حدود ۶۰ متر می‌رسد. رسوبات این سازند نسبتاً همگن بوده و عمدتاً از نهشته‌های سیلابی و رودخانه‌ای تشکیل شده‌اند. این نهشته‌ها در گسترش به سمت جنوب به لایه‌های سیلتی کم‌شیب تبدیل می‌شوند. مخروط‌افکنه‌های این سازند منابع اصلی آب‌های زیرزمینی منطقه را تشکیل می‌دهند و نقش حیاتی در تأمین آب کشاورزی ایفا می‌کنند. واحدهای زمین‌شناسی موجود در محدوده مورد مطالعه شامل واحد PIQC (آبرفت‌های رودخانه‌ای و مخروط‌افکنه‌ای) در بخش‌های شمالی و مرکزی و واحد Qlt2 (نهشته‌های پایینی مخروط‌افکنه‌ای و تراس‌های دره) در بخش جنوبی هستند. تشکیلات زمین‌شناسی این منطقه عمدتاً مربوط به دوره‌های کواترنری و ترشیاری است که نشان‌دهنده تاریخچه ژئومورفولوژیکی غنی این ناحیه می‌باشد.

این محدوده به واسطه نزدیکی به کلان‌شهر تهران تحت تأثیر آلودگی فاضلاب‌ها و پساب‌های شهری و صنعتی قرار دارد. مجاورت با مجموعه بزرگ فعالیت‌های پالایش نفت و ذخیره و پخش فرآورده‌های نفتی و متأثر از آلودگی فاضلاب‌ها و پساب‌های شهری و صنعتی نیز بر آلودگی آن افزوده است. آلودگی ناشی از این فعالیت‌ها، خلصت ذاتی آن‌هاست که می‌تواند پیامدهای جدی برای سلامت محیط زیست داشته باشد. باتوجه به اینکه خاک‌های این منطقه تحت تأثیر عوامل آلوده‌کننده متعددی قرار دارند، سلامت محیط‌زیست پیرامون آن به خطر افتاده است. بنابراین، ضروری است که برنامه‌ریزی دقیق برای مدیریت منابع آب‌و خاک انجام شود تا ضمن حفظ اکوسیستم منطقه، کیفیت زندگی ساکنان نیز ارتقا یابد.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در شهرستان ری و جانیای نقاط نمونه برداری از خاک

نمونه برداری و آزمایشات فیزیکی و شیمیایی خاک

پس از انجام بازدیدهای میدانی و تحلیل نقشه‌های پایه، به منظور شناسایی عوامل انسانی مؤثر بر تغییرات غلظت کل کادمیوم در خاک‌های منطقه مورد مطالعه، از جمله شبکه حمل و نقل جاده‌ای، وضعیت کاربری اراضی، موقعیت تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران و پالایشگاه، از روش طبقه‌بندی ایزو کلاستر استفاده گردید. این روش با تأکید بر عوامل مذکور و نظرات کارشناسی به اجرا درآمد. در مرحله اول، ۴۱ نمونه مرکب خاک از عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متری برداشت و با استفاده از دستگاه GPS ثبت گردید. این مرحله شامل انتخاب مکان‌های مناسب برای نمونه‌برداری با توجه به عوامل انسانی شناسایی شده بود. پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، در دمای محیط هوا خشک شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور کردند تا برای آنالیزهای بعدی آماده گردند. در ادامه، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل بافت، کربن آلی (OC)، اسیدیته (pH)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC)، فسفر قابل جذب و مقادیر آهک با استفاده از روش‌های استاندارد آنالیز خاک اندازه‌گیری شدند. برای تعیین غلظت کل عنصر کادمیوم، ابتدا ۱ گرم از نمونه خاک وزن شده و به آن نسبت (۱ به ۳) ۲/۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک (HNO_3) و ۷/۵ میلی‌لیتر اسید پرکلریک (HClO_4) افزوده گردید. سپس نمونه‌ها پس از گذشت ۱۶ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد روی هیتر حرارت داده شدند. عصاره حاصل از نمونه‌ها پس از حرارت‌دهی از کاغذ صافی واتمن ۴۲ عبور داده شد و عصاره برای آنالیز نهایی آماده گردید. در نهایت، غلظت کل عنصر کادمیوم با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی نشری اتمی پلاسمای جفت‌شده القایی (OES-ICP) مدل GBC Integra XL (GBC Scientific Equipment Ltd) مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.

محاسبه شاخص‌های زیست‌محیطی خاک

شاخص‌های ژئوشیمیایی به‌طور گسترده‌ای برای شناسایی آلودگی فلزات سنگین مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نمونه‌های رایج این شاخص‌ها شامل شاخص زمین انباشتگی (Igeo)، فاکتور آلودگی (CF)، شاخص غنی‌شدگی (EF)، پی‌اسیل ریسک اکولوژیکی (ER) هستند (Liao et al., 2021; Cano et al., 2024; Lukaszek-Chmielewska et al., 2025). این شاخص‌ها ابزارهای مهمی برای ارزیابی و مدیریت آلودگی در محیط‌های خاکی به شمار می‌روند و می‌توانند به درک بهتر تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از فعالیت‌های انسانی کمک کنند. این شاخص‌ها با استفاده از فرمول‌های خاص و تعیین مقادیر پس‌زمینه فلزات، امکان شناسایی خطرات بالقوه را فراهم می‌آورند. این تحقیق به ارزیابی آلودگی خاک از طریق شاخص‌های مختلف، از جمله Igeo، CF، EF و ER پرداخته و سطوح قابل توجهی از آلودگی فلز سنگین کادمیوم (Cd) را مورد بحث قرار می‌دهد.

شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo)

شاخص زمین‌انباشتگی به‌عنوان معیاری برای اندازه‌گیری درجه انباشت فلزات سنگین یا سایر آلاینده‌ها در خاک به کار می‌رود. این شاخص به‌طور گسترده‌ای در ارزیابی خاک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Wardani et al., 2020; Lukaszek-Chmielewska et al., 2025). این شاخص با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_{sample}}{1.5 \times C_{background}} \right) \quad \text{رابطه (1)}$$

C_{sample} نمایانگر غلظت اندازه‌گیری‌شده فلزات سنگین در خاک و $C_{background}$ غلظت زمینه فلز است (Anggraeni et al., 2024). عدد ۱/۵ در این رابطه ثابت است که امکان تجزیه و تحلیل تغییرپذیری فلزات سنگین را در نتیجه فرایندهای طبیعی فراهم می‌کند (Nowrouzi and Pourkhabbaz., 2014; Kuang et al., 2024). در این تحقیق، از میانگین هندسی غلظت سه نمونه خاک که تحت تأثیر مستقیم فعالیت‌های انسانی (صنعتی و کشاورزی) قرار نداشتند و از اراضی رها شده به مدت طولانی و غیرآلوده در مجاورت منطقه برداشت شدند، جهت تعیین غلظت زمینه کادمیوم (۰/۲) به منظور محاسبه این شاخص‌ها استفاده شد (Tume et al., 2006; Su et al., 2008). در جدول (۱) کلاس‌بندی شاخص زمین انباشتی ارائه شده است.

جدول ۱. کلاس‌بندی شاخص زمین انباشتی (Lukaszek-Chmielewska et al., 2025)

محدوده شاخص	شرایط خاک
$I_{geo} < 0$	بدون آلودگی
$0 \leq I_{geo} < 1$	بدون آلودگی تا نسبتاً آلوده
$1 \leq I_{geo} < 2$	نسبتاً آلوده
$2 \leq I_{geo} < 3$	آلودگی متوسط تا شدید
$3 \leq I_{geo} < 4$	بیشدت آلوده
$4 \leq I_{geo} < 5$	بیشدت تا بسیار آلوده
$5 \leq I_{geo}$	آلودگی فوق‌العاده بالا

فاکتور آلودگی (C_f)

فاکتور آلودگی (C_f) یک روش مؤثر برای پایش آلودگی خاک در طول زمان است، زیرا می‌تواند نمای کلی از سطح آلودگی فلزات سنگین در خاک را ارائه دهد. ارزش فاکتور آلودگی به عنوان نسبت غلظت فلز موجود در خاک به غلظت فلز در شرایط پس‌زمینه یا غلظت طبیعی آن در پوسته زمین تعریف می‌شود.

$$C_f = \frac{C_{heavy\ metal}}{C_{background}} \quad \text{رابطه (2)}$$

که در این رابطه $C_{heavy\ metal}$ نمایانگر غلظت قابل اندازه‌گیری فلزات در خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم) و $C_{background}$ غلظت فلزات به طور طبیعی موجود در پوسته زمین است (Gupta et al., 2021). در جدول (۲) کلاس‌بندی فاکتور آلودگی آورده شده است.

جدول ۲. کلاس‌بندی فاکتور آلودگی (Ahmed et al., 2024)

محدوده شاخص	شرایط خاک
$C_f < 1$	آلودگی کم
$1 \leq C_f < 3$	آلودگی متوسط
$3 \leq C_f < 6$	آلودگی زیاد
$6 \leq C_f$	آلودگی خیلی زیاد

پتانسیل ریسک اکولوژیک (ER)

پتانسیل ریسک اکولوژیکی که توسط (Hakanson., 1980) توسعه داده شده است. این شاخص برای تعیین پتانسیل ریسک اکولوژیکی و زیست محیطی یک عنصر خاص در نمونه های خاک جمع آوری شده از منطقه مطالعه به کار می رود. ارزش ER به منظور ارزیابی تأثیرات منفی اکولوژیکی ناشی از منابع انسانی توسعه یافته است و هدف آن حفاظت از محیط زیست می باشد. پتانسیل ریسک می تواند سطح تأثیر فلزات سنگین بر اکولوژی محیط زیست را نمایان کند. در محاسبه پتانسیل ریسک اکولوژیکی، فاکتور آلودگی (CF) و عامل پاسخ سمی عناصر (TR) در نظر گرفته می شوند و با استفاده از فرمول زیر محاسبه می شود:

$$ER = Tr \times CF$$

رابطه (3)

که در آن، Tr نمایانگر عامل پاسخ سمی خاص هر فلز است که این مقادیر برای هر فلز سنگین متفاوت و اختصاصی است. به عنوان مثال، برای کادمیوم (Cd) این مقدار ۳۰ تعیین شده است (Hakanson., 1980; Gupta et al., 2021; Pan et al., 2022; Ahmed et al., 2024). در عین حال، CF به فاکتور آلودگی اشاره دارد. در جدول (۳) کلاس بندی پتانسیل ریسک اکولوژیک آورده شده است.

جدول ۳. کلاس بندی پتانسیل ریسک اکولوژیک (Lukaszek-Chmielewska et al., 2025)

محدوده شاخص	شرایط خاک
$ER \leq 40$	ریسک کم
$40 < ER \leq 80$	ریسک متوسط
$80 < ER \leq 160$	ریسک قابل توجه
$160 < ER \leq 320$	ریسک زیاد
$320 < ER$	ریسک خیلی زیاد

فاکتور غنی شدگی (EF)

این فاکتور نمایانگر درجه غنی شدگی یک عنصر در یک ناحیه معین است و معمولاً برای توصیف سطوح آلودگی یا انباشت عناصر شیمیایی خاص در اکوسیستم به کار می رود. فاکتور غنی شدگی (EF) منبع (طبیعی یا انسانی) فلزات در خاک را شناسایی می کند. این فاکتور توسط بسیاری از پژوهشگران برای ارزیابی آلودگی در محیط های مختلف به کار گرفته شده است و با استفاده از عناصری مانند آهن (Fe)، اسکاندیم (Sc)، آلومینیوم (Al) و تیتانیوم (Ti) به عنوان عناصر پس زمینه / مرجع محاسبه می شود (Ahmed et al., 2024). فاکتور غنی شدگی به عنوان نسبت بین غلظت عناصر آلوده کننده در نمونه و غلظت عناصر مرجع تعریف می شود، که با نسبت این غلظت ها در ناحیه زمینه مقایسه می شود. فرمول محاسبه آن به صورت زیر است:

$$EF = \frac{\left(\frac{C_x}{C_{ref}} \right)_{sample}}{\left(\frac{B_x}{B_{ref}} \right)_{background}} \quad \text{رابطه (4)}$$

در این رابطه C_x غلظت عنصر در نمونه مورد مطالعه، C_{ref} غلظت عنصر مرجع در نمونه مورد مطالعه، B_x غلظت عنصر مورد نظر در زمینه (خاک یا پوسته زمین) و B_{ref} غلظت عنصر مرجع در زمینه است (Kuang et al., 2024). در این تحقیق، آهن (Fe) به عنوان عنصر مرجع انتخاب شد، زیرا تأثیر قابل توجهی از فعالیت های انسانی بر منبع آن مشاهده می شود. محتوای Fe در پوسته زمین نسبتاً

پایدار است و این امر آسیب‌پذیری آن را در برابر اختلالات خارجی به حداقل می‌رساند. رابطه بین فلزات سنگین خاک و محتوای Fe می‌تواند به عنوان معیاری برای تشخیص میزان تأثیرگذاری فعالیت‌های انسانی بر یک عنصر خاص عمل کند (Hamid et al., 2022; Pan et al., 2022; Mansouri moghadam., 2024). در جدول (۴) کلاس‌بندی شاخص غنی‌شدگی آورده شده است.

جدول ۴. کلاس‌بندی شاخص غنی‌شدگی (Kuang et al., 2024)

شرایط خاک	محدوده شاخص
حداقل غنی‌شدگی	$EF < 2$
غنی‌شدگی متوسط	$2 < EF < 5$
غنی‌شدگی زیاد	$5 < EF < 20$
غنی‌شدگی خیلی زیاد	$20 < EF < 40$
غنی‌شدگی فوق‌العاده زیاد	$40 < EF$

تهیه نقشه‌ی تغییرپذیری مکانی کادمیوم خاک

در این پژوهش، از روش درون‌یابی نزدیک‌ترین همسایگی در محیط نرم‌افزارهای ArcGIS (10.8) و MATLAB (2024) به منظور تهیه نقشه تغییرپذیری مکانی کادمیوم خاک استفاده گردید. این روش درون‌یابی توسط برخی محققین مانند Rujner et al (2021) در مطالعات رطوبت خاک و Li et al (2020) در مطالعات آلودگی خاک توصیه شده و در شرایطی که داده‌ها به صورت تصادفی طبقه‌بندی شده، انتخاب و توزیع شده باشند، نسبت به روش‌های مرسوم درون‌یابی مانند کریجینگ و عکس وزنی فاصله، ارجحیت داشته و کارایی بالاتری را نشان می‌دهد، به طوری که دارای دقت بالاتر و خطای کمتری است (Li et al. et al., 2021). به این منظور، باتوجه به الگوی پراکندگی نقاط در محدوده مورد مطالعه، شعاع همسایگی در بازه ۵۰۰ متر تا ۲۰۰۰ متر تعیین و سپس بهینه (۱۵۰۰ متر) گردید. پس از بهینه‌سازی شعاع همسایگی، درون‌یابی مکانی اجرا شد و از معیارهای ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین (R^2) و روش اعتبارسنجی حذف یک نقطه‌ای (Leave-One-Out Cross-Validation) (LOOCV) جهت اعتبارسنجی مدل‌سازی مکانی و ارزیابی دقت و خطای نقشه پهنه‌بندی فلز سنگین کادمیوم در خاک بهره گرفته شد.

بحث

تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی

در جدول (۵) به بررسی و تحلیل ویژگی‌های مختلف خاک بر اساس داده‌های ارائه شده پرداخته می‌شود. این اطلاعات شامل کشیدگی، چولگی، انحراف معیار، میانگین، حداکثر و حداقل مقادیر برای چندین ویژگی خاک است.

جدول ۵. آمار توصیفی ویژگی‌های خاک اندازه‌گیری شده (عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متر)

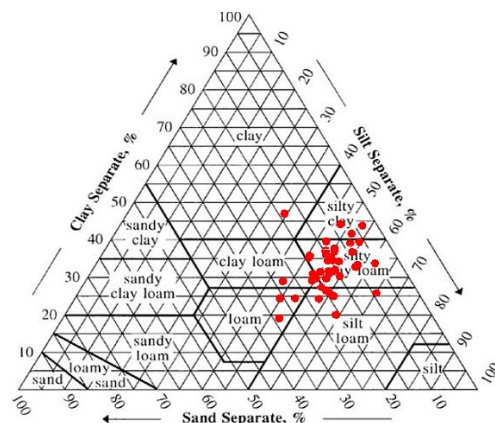
کشیدگی	چولگی	انحراف معیار	میانگین	حداکثر	حداقل	واحد	خصوصیات خاک
-۰/۰۳	-۰/۶۵	۰/۲۴	۸/۳۰	۸/۶۸	۷/۷۲	-	pH

EC	dS/m	۰/۹۷	۷/۵۸	۲/۵۸	۱/۶۵	۱/۵۹	۱/۶۲
فسفر قابل جذب	mg/kg	۴/۶۹	۱۴۱/۷۲	۵۰/۳۳	۳۸/۷۲	۰/۶۹	۰/۷۲
کربن آلی	%	۰/۱۰	۲/۹۶	۱/۴۶	۰/۷۲	۰/۲۲	-۰/۸۵
آهک	%	۱۴/۱۹	۲۲/۳۴	۱۷/۸۷	۱/۸۸	۰/۱۵	-۰/۱۹
شن	%	۳/۸۷	۳۴/۳۸	۱۶/۷۹	۶/۸۱	۰/۴۲	۰/۳۱
سیلت	%	۳۳/۱۸	۶۳/۸۹	۵۰/۱۲	۵/۱۴	-۰/۳۳	۲/۷۶
رس	%	۱۹/۵۶	۴۷/۴۸	۳۳/۰۹	۶/۴۰	۰/۰۴	-۰/۲۱

pH خاک یکی از عوامل کلیدی در تعیین قابلیت دسترسی عناصر برای گیاهان است. بازه pH برابر با (۷/۷۲ - ۸/۶۸) نشان دهنده وضعیت کمی قلیایی تا قلیایی بودن خاک است. چولگی منفی (۰/۶۵-) نشان دهنده توزیع غیرمتقارن داده‌ها به سمت مقادیر پایین‌تر pH است. انحراف معیار پایین نیز نشان می‌دهد که داده‌ها در حول میانگین به صورت یکنواخت پخش شده‌اند. مقدار EC در این خاک‌ها در دامنه (۰/۹۷-۷/۵۸) دسی‌ریمنس بر متر قرار دارد که نشان دهنده خاک‌های غیر شور تا شور در این منطقه است. انحراف معیار (۱/۶۵) نشان دهنده تنوع نسبتاً پایین در مقادیر EC است.

داده‌های فسفر قابل جذب خاک با انحراف معیار ۳۸/۷۲ نشان دهنده پراکندگی بالای این داده‌هاست و این بدان معناست که مقادیر فسفر در نمونه‌های مختلف، اختلافات زیادی دارند. بیشترین مقدار داده‌ها ۱۴۱/۷۲ و کمترین مقدار آن‌ها ۴/۶۹ است. میانگین داده‌ها با مقدار ۵۰/۳۳ واحد نشان دهنده مقدار بالای فسفر در منطقه است. در این مطالعه بیش از ۷۵ درصد نمونه‌های خاک، فسفر قابل جذب بالاتر از ۱۵ ppm داشته که از نظر فسفر قابل جذب در محدوده خاک‌های غنی از فسفر قرار گرفته‌اند. کربن آلی یکی از مهم‌ترین اجزای خاک است که تأثیرات قابل توجهی بر روی ساختار، کیفیت و حاصلخیزی خاک دارد. این ماده به عنوان یک شاخص کلیدی در ارزیابی سلامت خاک و توانایی آن در نگهداری آب و مواد مغذی شناخته می‌شود. در این مطالعه بر اساس داده‌های موجود، وضعیت کربن آلی در خاک منطقه با وجود حداکثر مقدار کربن آلی (۲/۹۶٪) و حداقل (۰/۱۰٪) نشان دهنده میزان ماده آلی در حد متوسط تا خوب قرار دارد. کشیدگی منفی (۰/۸۵-) نشان دهنده توزیع غیرمتقارن داده‌ها به سمت مقادیر پایین‌تر کربن آلی است.

آهک موجود در این خاک‌ها در دامنه (۲۲/۳۴ - ۱۴/۱۹) و با میانگین ۱۷/۸۷ درصد در دسته خاک‌های با آهک زیاد قرار گرفته‌اند. انحراف معیار ۱/۸۸ واحد است که نشانگر پراکندگی نسبتاً بالا داده‌ها نسبت به میانگین است که می‌تواند ناشی از تفاوت‌های محلی در ترکیب خاک یا تأثیرات محیطی باشد. تجزیه و تحلیل بافت ۴۱ نمونه خاک برای سه جزء اصلی خاک یعنی شن، سیلت و رس نشان دهنده قرار گیری عمده نمونه خاک‌های مورد مطالعه در کلاس بافتی متوسط تا سنگین است (شکل ۲). زمانی که محتوای ذرات رس در خاک افزایش می‌یابد، به عبارت دیگر، هنگامی که بافت خاک سنگین‌تر است، فلزات سنگین به راحتی می‌توانند توسط ذرات خاک جذب شوند (Chen et al., 2019). به طور کلی، میزان رس موجود در خاک‌ها می‌تواند به تثبیت فلزات سنگین کمک کرده و خطر رهاسدن این فلزات به محیط‌زیست را کاهش دهد (سلماسی و پیروان، ۱۴۰۰). با توجه به این نکته، مدیریت صحیح آبیاری و کوددهی در خاک‌های این منطقه ضروری است تا از انباشت فلزات سنگین جلوگیری شود.



شکل ۲. توزیع بافت خاک‌های مورد مطالعه در منطقه

تجزیه و تحلیل آمار توصیفی فلز سنگین کادمیوم، شاخص‌های زیست‌محیطی آلودگی خاک و پتانسیل ریسک اکولوژیکی

در جدول (۶) تجزیه و تحلیل آمار توصیفی فلز کادمیوم و شاخص‌های زیست‌محیطی خاک و پتانسیل ریسک اکولوژیکی شامل I_{geo} ، EF ، Cf و ER به منظور ارزیابی آلودگی اراضی جنوب استان تهران محاسبه و ارائه شده است.

کادمیوم (Cd)

در این پژوهش دامنه تغییرات غلظت کادمیوم کل بین $0/17$ تا $2/05$ میلی‌گرم بر کیلوگرم و میانگین غلظت کادمیوم در نمونه‌های مورد بررسی برابر با $0/79$ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. در مجموع، این داده‌ها نشان‌دهنده سطح بالای آلودگی به عنصر کادمیوم در نمونه‌ها بوده و ضرورت انجام اقدامات مناسب جهت کاهش آلودگی را تأکید می‌کند. با توجه به انحراف معیار پایین، می‌توان نتیجه گرفت که میزان عنصر کادمیوم در نمونه‌های خاک مورد بررسی دارای پراکندگی پایینی است. همچنین، کشیدگی برابر با $1/49$ و چولگی برابر با $1/06$ نشان‌دهنده توزیع غیرممتقارن داده‌ها است؛ که این موضوع می‌تواند به وجود منابع آلاینده یا فعالیت‌های صنعتی مرتبط اشاره داشته باشد.

جدول ۶. آمار توصیفی فلز سنگین کادمیوم و شاخص‌های زیست‌محیطی و اکولوژیکی آلودگی خاک

متغیر	حد اقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی
Cd	$0/17$	$2/05$	$0/79$	$0/40$	$1/06$	$1/49$
ER	$25/50$	$307/50$	$118/39$	$60/83$	$1/06$	$1/49$
I_{geo}	$-0/82$	$2/77$	$1/20$	$0/79$	$-0/63$	$-0/79$
EF	$0/69$	$8/57$	$3/29$	$1/69$	$1/02$	$1/37$
Cf	$0/85$	$10/25$	$3/94$	$2/02$	$1/06$	$1/49$

ارزیابی‌های آلودگی خاک‌های منطقه به کادمیوم با محاسبه شاخص‌های زیست‌محیطی و اکولوژیکی آلودگی خاک برای ۴۱ نقطه مورد مطالعه نیز محاسبه و ارائه شد. در شکل (۳)، نمایی از توزیع درصدی نمونه‌ها بر اساس هر یک از شاخص‌های محاسبه شده ارائه شده است.

پتانسیل ریسک اکولوژیک (ER)

از نظر پتانسیل ریسک اکولوژیک (ER) که دارای میانگین $118/39$ ، کمینه $25/50$ و بیشینه $307/50$ برای غلظت کادمیوم خاک است، در ۴۱ نمونه مورد بررسی حدود ۷ درصد نمونه‌ها در کلاس ریسک کم، ۱۷ درصد نمونه‌ها در کلاس ریسک متوسط، ۵۶ درصد نمونه‌ها در کلاس ریسک قابل توجه و ۲۰ درصد نمونه‌ها در کلاس ریسک زیاد قرار گرفتند. با توجه به اینکه شاخص ریسک اکولوژیک (ER) جهت ارزیابی خطر اکولوژیکی فلزات سنگین در خاک استفاده می‌شود (Pan et al., 2022)، بنابراین، بررسی این شاخص نشان می‌دهد که کادمیوم خطر اکولوژیکی قابل توجه تا بسیار بالایی را ایجاد می‌کند، که بر ضرورت اقدامات مدیریتی در منطقه مورد مطالعه تاکید می‌کند. (Kumar et al (2019) در مطالعه‌ای به بررسی آلودگی فلزات سنگین و ریسک زیست محیطی آن‌ها در خاک‌های هند با استفاده از پتانسیل ریسک اکولوژیک (ER) گزارش کردند که کادمیوم، یکی از آلاینده اصلی در خاک‌های مختلف هند است. کوثری و همکاران (۱۴۰۱) نیز به بررسی خطر و شدت آلودگی خاک ناشی از آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های اطراف محل دفن زباله‌های شهری سبزوار به فلزات سنگین پرداختند. شدت آلودگی خاک با استفاده از پتانسیل ریسک اکولوژیکی (ER) ارزیابی شد. غلظت کادمیوم نسبت به مقادیر پس‌زمینه طبیعی بیشتر گزارش شد. بر اساس برآورد شاخص ER برای کادمیوم آلودگی شدید را نشان داد.

شاخص زمین انباشتی (Igeo)

به‌طور کلی، شاخص زمین انباشتی یکی از محبوب‌ترین شاخص‌های محیطی است و به‌طور گسترده‌ای در ارزیابی آلودگی خاک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر اساس نتایج از نظر شاخص زمین انباشتی (Igeo) میانگین $1/20$ ، کمینه $-0/82$ و بیشینه $2/77$ است. که باتوجه به طبقه‌بندی این شاخص حدود ۱۰ درصد از نمونه‌ها در کلاس بدون آلودگی، ۲۴ درصد نمونه‌ها در کلاس بدون آلودگی، ۵۱ درصد از نمونه‌ها در کلاس نسبتاً آلوده و ۱۵ درصد از نمونه‌ها نیز در کلاس آلودگی متوسط تا شدید قرار گرفتند. استفاده از این شاخص‌های زیست‌محیطی شدت آلوده شدن در منطقه را به‌خوبی نشان داد. تغییرات این شاخص برای فلز مشاهده شده در خاک در این مطالعه ممکن است به دلیل فرایندهای طبیعی و منابع مختلف انسانی باشد. اما به‌طور کلی مقادیر بالای Igeo تأثیر فعالیت‌های صنعتی بر خاک در نزدیکی فعالیت‌های انسانی و صنعتی را تأیید می‌کند (Tomczyk et al., 2023). به‌طور کلی بالابودن شاخص زمین انباشتی برای این عنصر را می‌توان به فعالیت‌هایی با منشأ انسانی مانند مصرف بلندمدت پساب و کشاورزی در منطقه دانست (سهرابی زاده و همکاران، ۱۳۹۹). قاسم‌زاده و همکاران (۱۴۰۰) نیز به ارزیابی آلودگی و منشأ برخی عناصر سنگین در خاک‌های کشاورزی جنوب سبزوار پرداختند. آن‌ها گزارش کردند باتوجه به شاخص زمین انباشتی، کادمیوم در محدوده آلودگی شدید قرار گرفتند.

شاخص غنی شدگی (EF)

بر اساس نتایج از نظر شاخص غنی‌شدگی (EF) با میانگین $3/29$ ، کمینه $0/69$ و بیشینه $8/57$ است. که باتوجه به طبقه‌بندی این شاخص حدود 22 درصد از نمونه‌ها در کلاس حداقل غنی‌شدگی، 63 درصد نمونه‌ها در کلاس غنی‌شدگی متوسط و 15 درصد از نمونه‌ها در کلاس غنی‌شدگی زیاد قرار گرفتند. نتایج مقادیر EF که در محدوده $0/5$ تا $1/5$ قرار دارند، نشان‌دهنده این است که فلزات عمدتاً از مواد پوسترهای یا فرایندهای طبیعی ناشی می‌شوند. مقادیر EF بالاتر از $1/5$ ممکن است نشان‌دهنده منشأ فرایندهای انسانی باشد (Ahmed et al., 2024). به‌ویژه با توجه به نزدیکی به تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران، پالایشگاه روغن‌موتور ایرانول و آبیاری منطقه با پساب‌ها در منطقه مورد مطالعه باشد. با در نظر گرفتن این مسئله می‌توان بیان کرد که حدود 95 درصد نمونه‌ها دارای مقادیر EF بالاتر از $1/5$ بوده که این موضوع حاکی از منشأ فرایندهای انسانی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. شایسته‌فر و همکاران (1391) نیز در مطالعه خود بیان کردند یکی از روش‌های متداول جهت تعیین منشأ آلاینده‌های خاک و همچنین ارزیابی آثار عوامل انسانی بر خاک را محاسبه شاخص غنی‌شدگی گزارش کردند.

فاکتور آلودگی (CF)

فاکتور آلودگی (CF) امکان ارزیابی آلودگی یک مکان خاص با فلزات خاص را فراهم می‌کند (Tomczyk et al., 2023). باتوجه به طبقه‌بندی فاکتور آلودگی (CF) که دارای میانگین $3/94$ ، کمینه $0/85$ و بیشینه $10/25$ است، حدود 5 درصد از نمونه‌ها در کلاس آلودگی کم، 29 درصد نمونه‌ها در کلاس آلودگی متوسط، 51 درصد از نمونه‌ها در کلاس آلودگی زیاد و 15 درصد از نمونه‌ها نیز در کلاس آلودگی خیلی زیاد قرار گرفتند. سطوح بالا از شاخص آلودگی نیز تأثیر فعالیت‌های انسانی را بیان می‌کند. نمونه‌ها نشان‌دهنده وضعیت آلودگی کم تا آلودگی خیلی زیاد و عملاً در کلاس آلودگی زیاد بودند. مقادیر بالاتر CF ممکن است نشان‌دهنده نقش مهم‌تری از منابع انسانی آلودگی باشد، در حالی که مقادیر پایین‌تر این شاخص تمایل به بازتاب منشأ طبیعی عناصر در خاک دارد (Tomczyk et al., 2023). این موضوع نشان‌دهنده سطح قابل توجهی از انباشت فلز سنگین کادمیوم ناشی از فعالیت‌های انسانی در چندین نقطه نمونه‌برداری در منطقه مورد مطالعه است. باقری و همکاران (1396) نیز با ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زیست محیطی فلزات سنگین خاک در اراضی زراعی جنوب تهران براساس شاخص CF بیان کردند که اراضی به عنصر کادمیوم در منطقه مطالعاتی از لحاظ این شاخص آلوده بودند و این آلودگی در خاک‌های کشاورزی می‌تواند ناشی از نزدیکی به کارخانجات صنعتی، استفاده زیاد از کودهای شیمیایی و لجن فاضلاب باشد. رحمانی و خان محمدی (1403) با بررسی فلزهای سنگین در خاک برخی از شالیزارهای اطراف اصفهان و تأثیر کادمیم بر امنیت غذایی گزارش کردند که غلظت کادمیم در حدود 21 درصد از نمونه‌ها بیش‌تر از حد مجاز سازمان محیط‌زیست به‌دست آمد. بررسی شاخص CF برای فلز کادمیوم نیز در نمونه‌های خاک نشان‌دهنده حد بالایی این عنصر در منطقه بود.



شکل ۳. نمایش از توزیع درصدی نمونه‌ها بر اساس هر یک از شاخص‌های محاسبه شده

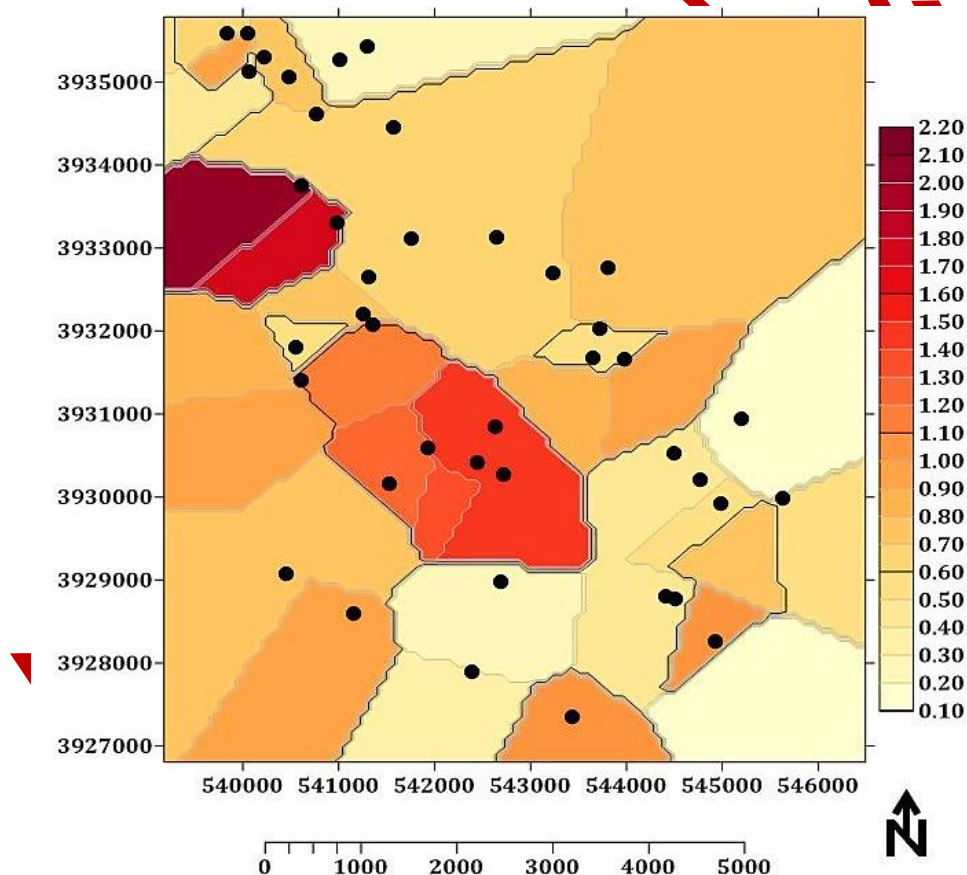
هر چهار شاخص شامل فاکتور غنی‌شدگی، پتانسیل ریسک اکولوژیکی، شاخص زمین‌انباشتگی و فاکتور آلودگی، وضعیت آلودگی بالای اکثر نمونه‌های خاک به عنصر کادمیوم در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهند. بررسی این چهار شاخص آلودگی و همچنین بازدید میدانی از منطقه، مؤید این نکته است که عوامل انسانی نقش قابل توجهی در افزایش غلظت این فلز در خاک‌های سطحی منطقه ایفا می‌کنند. Ahmed et al (2024) نیز با ارزیابی آلودگی نیجریه توسط پتانسیل ریسک اکولوژیکی (ER)، فاکتور آلودگی (CF)، زمین‌انباشتگی (Igeo) و شاخص غنی‌شدگی (EF) نشان داد که شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo) آلودگی قابل توجهی از فلزات سنگین را در خاک‌های منطقه، به‌ویژه کادمیوم (Cd)، مشخص کرده است. مقادیر شاخص غنی‌شدگی (EF) بالای ۱/۵ که نشان‌دهنده تأثیر قوی فعالیت‌های انسانی بر آلودگی خاک می‌باشد و همچنین فاکتور آلودگی (CF) سهم قابل توجه کادمیوم را در کل آلودگی خاک‌های منطقه نمایان ساخت. Karimi et al. (2020) با هدف ارزیابی خطرات فلزات سنگین برای سلامتی انسان و شاخص‌های آلودگی، سطوح آلودگی فلزات سنگین در نمونه‌های خاک را با استفاده از شاخص‌های زمین‌انباشتگی (Igeo)، فاکتور غنی‌شدگی (EF) و فاکتور آلودگی (CF) بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که خاک‌های کشاورزی مورد بررسی به فلزات سنگین آلوده بوده‌اند.

پتانسیل ریسک اکولوژیکی (ER) نیز بر خطرات زیست‌محیطی مرتبط با آلودگی کادمیوم تأکید کرد. Tomczyk et al (2023) به ارزیابی آلودگی فلزات سنگین خاک‌های کشاورزی در لهستان با استفاده از شاخص‌های آلودگی شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo)، فاکتور آلودگی (CF)، پتانسیل ریسک اکولوژیکی (ER) و شاخص غنی‌شدگی (EF)، پرداختند. تحلیل ارزیابی آلودگی خاک‌های زراعی با فلزات سنگین در این منطقه نشان داد که شاخص‌های Igeo و EF مفیدترین شاخص‌ها هستند. Chen et al (2019) نیز در مطالعه‌ای به منظور ارزیابی فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی حوضه رودخانه لیه، شرق چین با استفاده از شاخص غنی‌شدگی (EF) و پتانسیل ریسک اکولوژیکی (ER) انجام شد. نتایج ارزیابی شاخص خطر اکولوژیکی نشان داد که از فلزات مورد مطالعه،

کادمیوم مهم‌ترین خطر اکولوژیکی را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. تجزیه و تحلیل‌های آماری، نقشه‌برداری و تجزیه و تحلیل شاخص غنی‌شدگی نشان داد که کادمیوم عمدتاً از منابع انسانی، از جمله کشاورزی، صنعت و وسایل نقلیه مشتق شده است. Taghavi et al (2024) نیز با بررسی شاخص‌های CF و Igeo در خاک کشاورزی نشان دادند؛ که خاک برخی از باغات این منطقه به فلزات سنگین آلوده شده است. در این پژوهش منابع احتمالی فلزات در خاک، استفاده از سموم دفع آفات، کودهای شیمیایی، کودهای دامی و همچنین آب آبیاری گزارش شد.

بررسی نقشه‌ی تغییر پذیری مکانی کادمیوم خاک

آلودگی خاک‌های منطقه به فلز کادمیوم برای ۴۱ نقطه مورد مطالعه اندازه‌گیری و ارائه شد. در شکل ۴ نقشه پهنه‌بندی کادمیوم خاک به روش نزدیک‌ترین همسایگی در محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۴. نقشه توزیع غلظت کل عنصر کادمیوم در منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش نزدیک‌ترین همسایگی

حداکثر مقدار کادمیوم ($2/05 \text{ mg/kg}$) می‌باشد که این مقدار پایین‌تر از حد مجاز سازمان حفاظت محیط زیست ایران، برای محیط زیست و انسان بوده و همچنین بالاتر از حد مجاز کانادا، آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده آمریکا، سازمان بهداشت

جهانی، میانگین پوسته زمین و میانگین در خاک‌های جهان است (جدول ۷). این امر نشان‌دهنده وجود آلودگی در خاک منطقه می‌باشد که می‌تواند ناشی از فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی یا دیگر منابع آلاینده باشد. میانگین مقدار کادمیوم (0.79 mg/kg) نیز بالاتر از میانگین پوسته زمین (0.6 mg/kg) و میانگین جهانی (0.62 mg/kg) است، که حاکی از آلودگی نسبی خاک منطقه در مقایسه با استانداردهای بین‌المللی می‌باشد. این مقادیر نشان‌دهنده وجود کادمیوم بالا در خاک است که می‌تواند بر روی سلامت گیاهان و موجودات زنده تأثیر منفی بگذارد. تحلیل داده‌های مربوط به کادمیوم در خاک و مقایسه با استانداردهای جهانی و ملی نشان‌دهنده وجود درجات مختلف آلودگی در منطقه مورد مطالعه است که مؤید نیاز به اقدامات لازم برای مدیریت آلودگی و کاهش سطح کادمیوم در خاک می‌باشد.

جدول ۷. غلظت کل عنصر کادمیوم خاک (mg/kg) از دیدگاه استانداردهای مختلف، میانگین جهانی و میانگین پوسته زمین

(Holmgren et al., 1993; Boerngen and Hansford., 1981; Mohammadi et al., 2018; Abbasi and Mohammadi)
(Galangash, 2024

مقدار (mg/kg)	استانداردها
۰/۶	میانگین پوسته زمین
۰/۶۲	میانگین در خاک‌های جهان
۳/۹	سازمان حفاظت محیط زیست ایران، برای محیط زیست
۴	سازمان حفاظت محیط زیست ایران، برای انسان
۱/۴	استاندارد کانادا
۰/۴۸	US EPA, 2002 ^۱
۳	WHO, 1993 ^۲
۳	اروپا (EC, 1986)

تحلیل توزیع مکانی نقشه پهنه‌بندی کادمیوم خاک نشان می‌دهد که کادمیوم به‌طور گسترده‌ای در دو ناحیه شمال غربی و قسمت‌های میانی منطقه مورد مطالعه وجود دارد که تأثیرات قابل‌توجهی از فعالیت‌های انسانی را نشان می‌دهد. به‌ویژه، غلظت‌های قابل‌توجه کادمیوم در ناحیه شمال غربی نزدیک به پالایشگاه روغن‌موتور ایرانول و مناطق تحت‌تأثیر آبیاری با پساب‌ها مشاهده می‌شود. این الگو نشان‌دهنده این مناطق به‌عنوان منابع اصلی آلودگی کادمیوم بوده و بر لزوم اجرای تدابیر مدیریت محیط‌زیست تأکید دارد. سطوح بالای آلودگی فلزات سنگین، به‌ویژه کادمیوم، خطر مستقیمی برای محیط‌زیست و به‌طور بالقوه برای سلامت انسان ایجاد می‌کند.

تجمع کادمیوم ناشی از فعالیت‌های انسانی شامل کشاورزی، معدن‌کاری، احتراق و فاضلاب‌های صنعتی است (Wardani et al., 2020). قرارگیری در معرض این آلاینده‌ها از طریق خاک، آب یا محصولات زراعی کشت‌شده در این منطقه می‌تواند منجر به

۱ آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده آمریکا

۲ سازمان بهداشت جهانی

عوارض نامطلوب در سلامتی اکوسیستم و انسان‌ها می‌باشد (Ahmed et al., 2024). Zhuang et al (2009) نیز با بررسی آلودگی فلزات سنگین در خاک و محصولات غذایی اطراف معدن Dabaoshan در چین و مطالعه بر روی پیامدهای تجمع این فلزات برای سلامت انسان بیان کردند فعالیت‌های معدنی و کشاورزی منجر به افزایش غلظت کادمیوم در خاک و محصولات کشاورزی شده است.

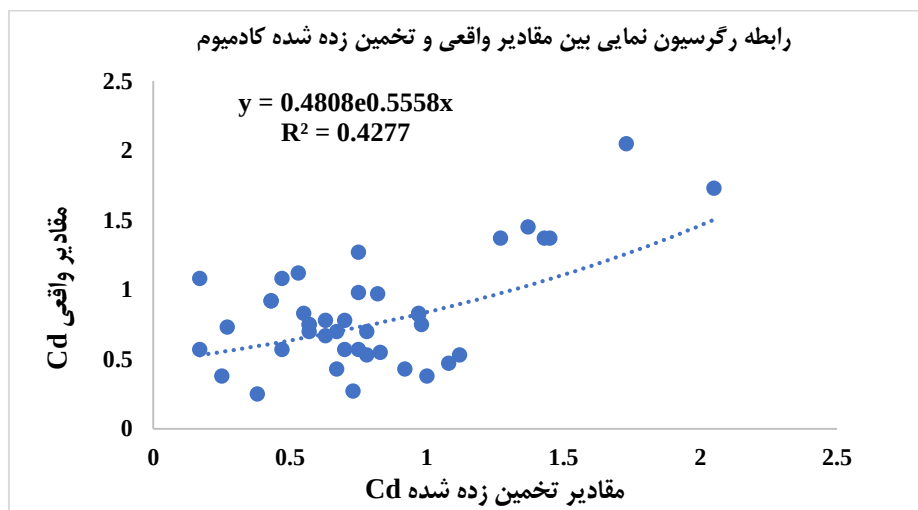
تحقیقات علمی متعددی شواهد تجربی را برای اثبات این ادعا ارائه داده‌اند که غلظت بالای کادمیوم می‌تواند پیامدهای نامطلوبی برای مجموعه‌ای از موجودات ساکن در اکوسیستم‌های خاکی داشته باشد. علاوه بر این، ثابت شده است که این عنصر مضر می‌تواند به راحتی توسط گیاهان در زنجیره غذایی نفوذ کند، و بدین ترتیب تهدیدی جدی برای اکولوژیکی و پایداری کلی ایجاد کند (Khan et al., 2017; Mahar et al., 2020).

به طور کلی علت اصلی بالابودن نسبی مقدار کادمیوم در نمونه‌های سطحی مطالعه حاضر را می‌توان به فعالیت‌های انسانی از جمله فعالیت‌های صنعتی، استفاده از سموم دفع آفات، کودها، قرارگیری پالایشگاه روغن موتور ایرانول در قسمت شمال غربی منطقه و علی‌الخصوص در قسمت‌های میانی قرارگیری این منطقه در مجاورت شاهراه حمل‌ونقلی تهران به جنوب کشور و حجم سنگین خودروهای عبوری در مسیرهای اصلی و فرعی پر تردد این شهرستان را دانست. پدیده غنی‌شدگی کادمیوم در خاک می‌تواند نتیجه فعالیت‌های انسانی، شامل استفاده از کودهای شیمیایی مانند اوره NPK و همچنین آفت‌کش‌های شیمیایی در شیوه‌های کشاورزی باشد. استفاده از کودهای فسفره در کشاورزی به عنوان یکی از عوامل اصلی افزایش غلظت فلز سنگین کادمیوم در خاک‌های زراعی شناخته می‌شود. (Maas et al (2010) نیز عامل بالابودن میزان کادمیوم خاک‌ها را منابع مختلفی از جمله کشاورزی، صنعت، کودهای فسفره و لجن فاضلاب معرفی کردند. (Jiao et al (2012) نیز بیان کردند که استفاده طولانی‌مدت از کودهای فسفاته منجر به تجمع کادمیوم در خاک‌های کشاورزی شده و خطرات زیست‌محیطی ایجاد می‌کند.

بر اساس پژوهش‌های فارسی‌پور (۱۳۸۹)، مقادیر بالای کادمیوم در خاک‌های کشاورزی ناشی از استفاده طولانی‌مدت از کودهای فسفاته و کاربرد لجن فاضلاب است. همچنین، یافته‌های مصلحی و همکاران (۱۳۹۸) نشان می‌دهد که با افزایش مقدار فسفر در خاک، غلظت کادمیوم تجمع یافته در اندام‌های هوایی و ریشه گیاه نیز افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، وجود فسفر باعث افزایش جذب کادمیوم در گیاه می‌شود. در این منطقه، بالابودن سطح فسفر نگرانی‌هایی را درباره غلظت بالای کادمیوم در خاک و گیاهان کشت شده ایجاد می‌کند. مقادیر بالای فسفر می‌تواند با غلظت‌های بالای کادمیوم همبستگی داشته باشد، زیرا کودهای فسفاته معمولاً حاوی کادمیوم هستند. مکارمی یامچی (۱۳۹۵) آبیاری با فاضلاب را یکی از دلایل اصلی افزایش فسفر در خاک‌های آبیاری شده با پساب‌ها و منبعی برای آلودگی خاک‌ها معرفی کرده است. همچنین، استفاده از کودهای فسفاته را به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع آلودگی خاک‌های زراعی به کادمیوم گزارش کرده‌اند.

اعتبارسنجی

جهت اعتبارسنجی عملکرد روش نزدیک‌ترین همسایگی، از تکنیک اعتبارسنجی حذف یک نقطه‌ای (Leave-One-Out Cross-Validation (LOOCV)) که مزیت عدم نیاز به جدا کردن یک بخش مجزا برای اعتبارسنجی و همچنین استفاده کامل از داده‌ها را دارد، انجام شد. در ادامه برای پیش‌بینی مقادیر فلز کادمیوم از دو معیار در اعتبارسنجی شامل ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد. نتایج اعتبارسنجی روش نزدیک‌ترین همسایگی در پهنه‌بندی داده‌های عنصر کادمیوم خاک با استفاده از روش حذف یک نقطه‌ای $R^2 = 0.42$ و $RMSE = 0.35$ را نشان داد.



شکل ۵. اعتبارسنجی مدل سازی مکانی و پهنه بندی داده های عنصر کادمیوم خاک با استفاده از روش Leave-one-out (R² = 0.42, RMSE= 0.35 mg/kg)

نتیجه گیری

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی آلودگی خاک به فلز سنگین کادمیوم در بخشی از اراضی شهری استان تهران، با استفاده از شاخص های زیست محیطی شامل فاکتور غنی شدگی (EF)، شاخص زمین انباشتی (Igeo)، فاکتور آلودگی (CF) و پتانسیل ریسک اکولوژیکی (ER) انجام شد. نتایج این شاخص ها نشان دهنده درجات متفاوتی از سطح آلودگی خاک به کادمیوم در منطقه مورد مطالعه بود. شاخص های مورد بررسی حاکی از آن هستند که خاک های کشاورزی منطقه از نظر آلودگی به کادمیوم در محدوده متوسط تا نسبتاً زیاد قرار دارند. شواهد موجود حاکی از آن است که این آلودگی عمدتاً ناشی از فعالیت های انسانی نظیر کشاورزی، استفاده از کودهای شیمیایی، پساب های صنعتی و شهری و فعالیت های صنعتی در منطقه است. بررسی شاخص های زیست محیطی نشان داد که شاخص زمین انباشتی (Igeo) و فاکتور غنی شدگی (EF) به طور ویژه مؤید تأثیر قابل توجه فعالیت های انسانی بر افزایش غلظت کادمیوم در خاک هستند. این یافته ها نشان می دهد که آلودگی کادمیوم می تواند تهدیدی رو به رشد، برای سلامت انسان و اکوسیستم های محلی باشد. نتایج این مطالعه بر ضرورت اتخاذ اقدامات مدیریتی برای کنترل و کاهش آلودگی خاک تأکید می کند. مدیریت صحیح آبیاری، کاهش استفاده از کودهای فسفاته و پایش مستمر خاک از جمله راهکارهای ضروری برای جلوگیری از انباشت بیشتر فلزات سنگین در خاک هستند. همچنین، اجرای برنامه های محیط زیستی مناسب و افزایش آگاهی کشاورزان در مورد خطرات استفاده بی رویه از کودها و پساب ها می تواند به کاهش آلودگی و حفظ سلامت اکوسیستم ها کمک کند. در نهایت، این پژوهش نشان می دهد که استفاده از شاخص های زیست محیطی به عنوان ابزاری کارآمد در ارزیابی و پایش آلودگی خاک، می تواند نقش مهمی در مدیریت پایدار منابع خاک و کاهش خطرات زیست محیطی ایفا نماید.

منابع

باقری، یوسف رضا؛ مسکینی ویشکایی، فاطمه؛ محمداسماعیل، زهرا؛ سعادت، سعید و رضایی، حامد. (۱۳۹۶). ارزیابی و پهنه بندی خطر زیست محیطی فلزات سنگین خاک با استفاده از شاخص‌های آلودگی در اراضی زراعی جنوب تهران. *نشریه محیط زیست طبیعی*. ۷۰(۴)، ۷۵۷-۸۶۸.

رحمانی، حمیدرضا و خان محمدی، زهرا. (۱۴۰۳). بررسی فلزهای سنگین در خاک برخی از شالیزارهای اطراف اصفهان و تاثیر کادمیم بر امنیت غذایی. *تحقیقات آب و خاک ایران*. ۵۵(۱۰)، ۱۸۴۵-۱۸۶۱.

سلماسی، رامین و پیروان، حمیدرضا. (۱۴۰۰). آلودگی خاک به برخی فلزات سنگین و رابطه این فلزات با ویژگی‌های خاک‌های منطقه‌ی سراسرکند. *فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست*. ۲۳(۴)، ۹۷-۱۰۶.

سهرابی زاده، زهرا؛ سودابی زاده، حمید؛ حکیم‌زاده، محمد علی؛ تقی‌زاده مهرجردی، روح الله و قانعی بافقی، محمد جواد. (۱۳۹۹). ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های پیرامون معدن سرب و روی کوشک بافق با استفاده از شاخص‌های آلودگی و تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی. *جغرافیا و برنامه ریزی محیطی*. ۳۱(۱)، ۱۵-۳۳.

شایسته فر، محمد رضا؛ شعبی، نجمه؛ شیرانی، حسین؛ رضایی، علی و کارگر دیانتی، محمد رضا. (۱۳۹۱). توزیع عناصر آرسنیک و سلیوم در خاک‌های اطراف معدن مس سرچشمه کرمان. *آب و خاک*. ۲۶(۳)، ۵۳۳-۵۴۴.

عباسی، نادر و محمدی گلکش، محسن. (۱۴۰۳). بررسی غلظت فلزات سنگین در خاک‌های سطحی کشاورزی محدوده مرکز دفن میان‌دوآب. *سلامت و محیط زیست*. ۱۷(۲)، ۳۴۳-۳۵۸.

فارسی پور، ساره. (۱۳۸۹). بررسی تغییرات غلظت عناصر کادمیم، آنتیموان، قلع در خاک‌های اطراف مجتمع مس سرچشمه کرمان، *پایان نامه کارشناسی ارشد خاک شناسی، دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران*.

قاسم زاده، آرزو؛ کریمی، علیرضا؛ ضیاوی، عاطفه و فتوت، امیر. (۱۴۰۰). ارزیابی آلودگی و منشأ برخی عناصر سنگین در خاک‌های کشاورزی جنوب سبزوار، شمال شرق ایران. *مجله مدیریت خاک و تولید پایدار*. ۱۱(۱)، ۱-۲۶.

کوثری، محمد حسن؛ ساقی، محمد حسین؛ رستگار، ایوب و سوده، سمیه. (۱۴۰۱). ارزیابی خطر و شدت آلودگی خاک ناشی از آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های اطراف محل دفن زباله‌های شهری. *مجله دانشگاه علوم پزشکی سبزوار*. ۲۹(۱)، ۶۵-۷۶.

مردانی، گشتاسب؛ مهربان، صادقی و آهنکوب، مریم. (۱۳۸۹). بررسی آلودگی خاک‌های منطقه جنوب تهران در مسیر رواناب‌های سطحی به فلزات سنگین. *مجله آب و فاضلاب*. ۳۱(۳)، ۱۰۸-۱۱۳.

مصلحی، امیر؛ فیضیان، محمد و عیسوند، حمیدرضا. (۱۳۹۸). اثر کود فسفات در شرایط تنش شوری بر سرنوشت کادمیم در گیاه و خصوصیات کیفی توتون. *مجله تولید گیاهان زراعی*. ۱۲(۲)، ۸۹-۱۰۶.

مکارمی یامچی، حامد. (۱۳۹۵). بررسی اثرات استفاده از فاضلاب بر کیفیت خاک اراضی کشاورزی در منطقه شهری. *پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود*.

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), 343-58. (in persian).

Adamo, P., Arienzo, M., Imperato, M., Naimo, D., Nardi, G., & Stanzione, D. (2005). Distribution and partition of heavy metals in surface and sub-surface sediments of Naples city port. *Chemosphere*, 61(6), 800-809.

Ahmed, N. O., Fagorite, V. I., Chikwado, A. G., Apata, D. M., Yunusa, L. J., Itiveh, E. S., & Biliaminu, Z. B. (2024). Pollution assessment and index properties of Okpolor soils, Rivers State, Nigeria: geochemical characterization, geotechnical and geoenvironmental implications. *Discover Environment*, 2(1), 60.

Anggraeni, D., Oginawati, K., Fahimah, N., Salami, I. R. S., Absari, H. R., Mukhaiyar, U., & Adiyani, L. (2024). Analysis of heavy metals (Pb and Cd) in soil layers of Indonesia: Spatial distribution, potential source, and groundwater effect. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9, 100652.

- Bagheri, Y. R., Meskini Vishkaei, F., Mohammad Esmail, Z., Saadat, S., & Rezaei, H. (2017). Assessment and zoning of environmental risk of soil heavy metals using pollution indices in agricultural lands south of Tehran. *Journal of Natural Environment*, 70 (4), 757-868. (in persian).
- Boerngen, J. G. S., & Hansford, T. (1981). Chemical analyses of soils and other surficial materials of the conterminous United States.
- Cano, T. G., Lonin, S., & Kim, K. Meta-Analysis of Harmful Heavy Metals in Colombian Sediments (1996-2024); a New Approach for Ecological Risk Assessment from Cartagena Bay to Similar Coastal Environments. Available at SSRN 4916752.
- Chen, L., Wang, G., Wu, S., Xia, Z., Cui, Z., Wang, C., & Zhou, S. (2019). Heavy metals in agricultural soils of the Lihe River watershed, East China: spatial distribution, ecological risk, and pollution source. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(12), 2094.
- Farsi Pour, S. (2010). Study on Changes in the Concentration of Cd, Sb and Sn in the Soils Surrounding the Sarcheshmeh Copper Complex in Kerman. Master's thesis in Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tehran. (in persian).
- George, S. D., Ahmed, N. O., Yunusa, L. J., Senbore, S., & Yomi-Agbajor, E. B. (2023). Ecological and human health impacts of oil spill-induced heavy metal contamination in the Niger Delta environment, Nigeria: post-remedial assessment, risks, and mitigation strategies. *International Journal of Ecology and Environmental Sciences*, 5(3), 24-42.
- Ghasemzade, A., Karimi, A., Ziyaee, A. and Fotovat, A. (2021). Pollution Assessment and Source of Selected Heavy Metals in Agricultural Soils, Southern Sabzevar, Northeastern Iran. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 11(1), 1-26. (in persian).
- Gupta, N., Yadav, K. K., Kumar, V., Cabral-Pinto, M. M., Alam, M., Kumar, S., & Prasad, S. (2021). Appraisal of contamination of heavy metals and health risk in agricultural soil of Jhansi city, India. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 88, 103740.
- Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water research*, 14(8), 975-1001.
- Hamid, E., Payandeh, K., Karimi Nezhad, M. T., & Saadati, N. (2022). Potential ecological risk assessment of heavy metals (trace elements) in coastal soils of southwest Iran. *Frontiers in Public Health*, 10, 889130.
- Holmgren, G. G. S., Meyer, M. W., Chaney, R. L., & Daniels, R. B. (1993). Cadmium, lead, zinc, copper, and nickel in agricultural soils of the United States of America (Vol. 22, No. 2, pp. 335-348). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.
- Jiao, W., Chen, W., Chang, A. C., & Page, A. L. (2012). Environmental risks of trace elements associated with long-term phosphate fertilizers applications: a review. *Environmental pollution*, 168, 44-53.
- Karimi, A., Naghizadeh, A., Biglari, H., Peirovi, R., Ghasemi, A., & Zarei, A. (2020). Assessment of human health risks and pollution index for heavy metals in farmlands irrigated by effluents of stabilization ponds. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 10317-10327.
- Khan, M. A., Khan, S., Khan, A., & Alam, M. (2017). Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments. *Science of the total environment*, 601, 1591-1605.
- Kowsari, M. H., Saghi, M., Rastegar, A., & Sotude, S. (2022). Investigation of Heavy Metals in the Soil around Municipal Waste Landfill. *Journal of Sabzevar University of Medical Sciences*, 29(1), 65-76. (in persian).
- Kuang, Y., Chen, X., & Zhu, C. (2024). Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution and Health Risks in Chenzhou City. *Processes*, 12(3), 623.
- Kumar, V., Sharma, A., Kaur, P., Sidhu, G. P. S., Bali, A. S., Bhardwaj, R.,... & Cerda, A. (2019). Pollution assessment of heavy metals in soils of India and ecological risk assessment: A state-of-the-art. *Chemosphere*, 216, 449-462.

- Li, S., Xi, W., Li, C., & Bi, T. (2020). Study on pollutant model construction and three-dimensional spatial interpolation in soil environmental survey. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 467, No. 1, p. 012154). IOP Publishing.
- Li, W., Zhang, S., Gao, F., Chen, Z., Jiang, J., & Sun, G. X. (2024). Spatial distribution, sources apportionment and risk assessment of heavy metals in the Changchun black soil area, China. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 13, 100402.
- Liao, J., Cui, X., Feng, H., & Yan, S. (2021). Environmental background values and ecological risk assessment of heavy metals in watershed sediments: A comparison of assessment methods. *Water*, 14(1), 51.
- Lukaszek-Chmielewska, A., Rakowska, J., Rachwał, M., & Stawarz, O. (2025). Assessment of forest soil contamination by heavy metals in the Polish National Park near Warsaw. *Scientific Reports*, 15(1), 4099.
- Maas, S., Scheifler, R., Benslama, M., Crini, N., Lucot, E., Brahmia, Z., ... & Giraudoux, P. (2010). Spatial distribution of heavy metal concentrations in urban, suburban and agricultural soils in a Mediterranean city of Algeria. *Environmental pollution*, 158(6), 2294-2301.
- Mahar, A., Ali, A., Lahori, A. H., Wahid, F., Li, R., Azeem, M., ... & Zhang, Z. (2020). Promising technologies for Cd-contaminated soils: drawbacks and possibilities. *Environment, climate, plant and vegetation growth*, 63-91.
- Makarmi Yamchi, H. (2016). Investigation of the Effects of Wastewater Use on Soil Quality in Agricultural Lands in the Shahr-e-Ray Region. Master's thesis, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology. (in persian).
- Mansouri Moghadam, S., Payandeh, K., Koushfar, A., Goosheh, M., & Mohammadi Rouzbahani, M. (2024). Level of heavy metals and environmental pollution index in Ahvaz, Southwest Iran. *Scientific Reports*, 14(1), 14754.
- Mardani, G., Sadeghi, M., & Ahankoob, M. (2010). Soil Pollution along the Surface Runoff in Southern Tehran. *Journal of Water and Wastewater*. 21(3), 108-113. (in persian).
- Mohammadi, A., Hajizadeh, Y., Taghipour, H., Mosleh Arani, A., Mokhtari, M., & Fallahzadeh, H. (2018). Assessment of metals in agricultural soil of surrounding areas of Urmia Lake, northwest Iran: A preliminary ecological risk assessment and source identification. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 24(8), 2070-2087.
- Moslehi, A., Feizian, M., & Eisvand, H. (2019). Effect of Phosphate fertilizer in salinity stress conditions on Cadmium fate in the plant and qualitative characteristics of tobacco. *Journal of Crop Production*, 12(2), 89-106. (in persian).
- Nomas, A. H., and Al-Shamma, A. (2023). Calculation of Pollution Indicators for Heavy Metals in the Surface Soil of Nasiriyah Oil Field. *Journal of Survey in Fisheries Sciences*, 10(3S), 1077-1086.
- Nowrouzi, M. and Pourkhabbaz, A. (2014). Application of geoaccumulation index and enrichment factor for assessing metal contamination in the sediments of Hara Biosphere Reserve, Iran. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 26(2), pp.99-105.
- Pan, Y., Chen, M., Wang, X., Chen, Y., & Dong, K. (2022). Ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in the soils of a lead-zinc mining watershed area. *Water*, 15(1), 113.
- Rahmani, H. R. and Khanmohammadi, Z. (2024). Investigation of heavy metals in the soil of some paddy fields around Isfahan and the effect of cadmium on food security. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(10), 1845-1861. (in persian).
- Rehman, Q., Rehman, K., & Akash, M. S. H. (2021). Heavy metals and neurological disorders: from exposure to preventive interventions. In *Environmental contaminants and neurological disorders* (pp. 69-87). Cham: Springer International Publishing.
- Rujner, H., Flanagan, K., & Viklander, M. (2021). Comparison of spatial interpolation methods for soil moisture in Green Stormwater Infrastructure. In *15th International Conference on Urban Drainage (ICUD 2021)*, October 25-28, 2021, Online/Melbourne, Australia (pp. 598-600).

- Salmasi, R., & Pyrowan, H. (2021). Soil pollution to some heavy metals and their relation with soil properties in Sareshkand, East Azarbayjan. *Journal of Environmental Science and Technology*. 97-106. (in persian).
- Shayestehfar, M., Shafiee, N., Shirani, H., Rezaei, A., & Kargar Dianati, M. (2012). Distribution of As and Se Elements in the Soil of the Sarcheshmeh Copper Mine Area, Kerman. *Water and Soil*, 26(3), doi: 10.22067/jsw.v0i0.14862. (in persian).
- Sohrabizadeh, Z., Sodaiezhadeh, H., Hakimizadeh, M. A., Taghizadeh Mehrjardi, R., & Ghanei Bafaqi, M. J. (2020). Evaluation of Heavy Metal Contamination in Soil Samples around the Lead-Zinc Mine of Kushk, Bafq, using Pollution Indicators and Principal Component Analysis. *Geography and Environmental Planning*, 31(1), 15-34. (in persian).
- Su, Y. Z., & Yang, R. (2008). Background concentrations of elements in surface soils and their changes as affected by agriculture use in the desert-oasis ecotone in the middle of Heihe River Basin, North-west China. *Journal of Geochemical Exploration*, 98(3), 57-64.
- Taghavi, M., Bakhshi, K., Zarei, A., Hoseinzadeh, E., & Gholizadeh, A. (2024). Soil pollution indices and health risk assessment of metal (loid) s in the agricultural soil of pistachio orchards. *Scientific Reports*, 14(1), 8971.
- Tomczyk, P., Wdowczyk, A., Wiatkowska, B., & Szymańska-Pulikowska, A. (2023). Assessment of heavy metal contamination of agricultural soils in Poland using contamination indicators. *Ecological Indicators*, 156, 111161.
- Tume, P., Bech, J., Longan, L., Tume, L., Reverter, F., & Sepulveda, B. (2006). Trace elements in natural surface soils in Sant Climent (Catalonia, Spain). *Ecological Engineering*, 27(2), 145-152.
- Wardani, N. K., Prartono, T., & Sulistiono, S. (2020). Sediments quality based on Geo-Accumulation Index in heavy metals (Pb, Cu, and Cd) of Cengklok coastal waters, Banten Bay. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, 9(4), 574-582.
- Xie, Q., & Ren, B. (2022). Pollution and risk assessment of heavy metals in rivers in the antimony capital of Xikuangshan. *Scientific reports*, 12(1), 14393.
- Zhang, P., Wei, X., Zhang, Y., Zhan, Q., Bocharnikova, E., & Matichenkov, V. (2023). Silicon-mediated alleviation of cadmium toxicity in soil-plant system: historical review. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(17), 48617-48627.
- Zhuang, P., Zou, B., Li, N. Y., & Li, Z. A. (2009). Heavy metal contamination in soils and food crops around Dabaoshan mine in Guangdong, China: implication for human health. *Environmental geochemistry and health*, 31, 707-715.

Ecological and Environmental Risk Assessment of Cadmium Heavy Metal in Soil (Case Study: Shahr-e-Ray, Tehran Province)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction:

Soil, as a non-renewable resource, plays a vital role in agricultural production and meeting human food needs. However, soil contamination with heavy metals, particularly cadmium (Cd), poses a serious environmental challenge with significant negative impacts on ecosystems and human health. Cadmium, as a toxic element, enters soils through human activities such as agriculture, industry, and urbanization, and high concentrations can cause major changes in the physical and chemical properties of soil. This pollution not only threatens human health but also adversely affects the quality and yield of agricultural products. Prolonged exposure to cadmium can lead to severe health issues, including damage to the kidneys and lungs. Therefore, accurate assessment of cadmium concentrations in soil and the use of various indices such as contamination factor (CF), enrichment factor (EF), geoaccumulation index (Igeo), and ecological risk assessment (ER) are essential for better understanding the pollution status. Recent studies have shown that high concentrations of cadmium in certain areas, especially near industrial sites and agricultural regions, are due to improper use of chemical fertilizers and urban wastewater. Continuous assessment of soil pollution status and the implementation of necessary measures to reduce it are crucial for protecting the environment and public health. This research investigates cadmium pollution in the soils of Shahr-e Rey County in Tehran Province and evaluates pollution levels using scientific methods. The results of this study can aid in better management of soil and water resources, contributing to ecosystem preservation and improving the quality of life for local residents.

Materials and Methods:

This study focuses on investigating soil contamination in Shahr-e Rey County, Tehran Province, with an emphasis on cadmium (Cd) concentration and its influencing factors. Shahr-e Rey County is recognized as one of the important agricultural areas in Tehran Province. The study area covers approximately 5,500 hectares. In this research, 41 soil samples were collected from a depth of 0 to 20 centimeters, and various physical and chemical properties of the soil including texture, organic carbon (OC), acidity (pH), electrical conductivity (EC), available phosphorus, and lime content were measured using standard soil analysis methods. Subsequently, total cadmium concentration was determined. Environmental indices including geoaccumulation index (Igeo), contamination factor (CF), enrichment factor (EF), and ecological risk assessment (ER) were calculated. Finally, a spatial variability map of cadmium was created using the nearest neighbor interpolation method. The accuracy of the spatial modeling was validated using metrics such as root mean square error (RMSE) and coefficient of determination (R^2) along with leave-one-out cross-validation (LOOCV).

Results and Discussion:

In this study, cadmium (Cd) concentration in soil samples was examined. The concentration range of cadmium varied from 0.17 to 2.05 mg/kg. The maximum concentration found was 2.05 mg/kg, significantly exceeding national and international permissible limits. The average cadmium concentration was reported at 0.79 mg/kg, indicating considerable soil pollution in the area that could negatively impact plant health and living organisms. The ecological risk index (ER) revealed that approximately 7% of samples fell into the low-risk category, 17% into moderate risk, 56% into significant risk, and 20% into high-risk categories, indicating substantial environmental hazards. The geoaccumulation index (Igeo) averaged 1.20. Based on the classification of this index, approximately 10% of the samples fell into the unpolluted class, 24% into the unpolluted to slightly polluted class, 51% into the moderately polluted class, and 15% into the moderately to severely polluted class. The enrichment factor (EF) had an average of 3.29, with about 22% of the samples classified as having minimal enrichment, 63% as having moderate enrichment, and 15% as having high enrichment. The contamination factor (CF) also showed an average of 3.94, with around 5% of the samples in the low pollution class, 29% in the moderate pollution class, 51% in the high pollution class, and 15% in the very high pollution class. The cadmium distribution map created using the nearest neighbor method showed significant accumulation particularly in the northwestern and central areas influenced by industrial activities and irrigation with wastewater. These findings underscore the need for management measures to mitigate pollution risks. Furthermore, validation of the nearest neighbor method using LOOCV resulted in a coefficient of determination $R^2=0.42$ and root mean square error $RMSE=0.35$. Overall, increased cadmium concentrations in surface soils can be attributed to human activities such as wastewater irrigation practices, pesticide use, chemical fertilizers application, as well as proximity to Iranol Oil Refinery.

Conclusions:

Geochemical analysis focusing on indices such as geoaccumulation index (Igeo), enrichment factor (EF), contamination factor (CF), and ecological risk assessment (ER) indicates relatively severe cadmium pollution in agricultural soils resulting from human activities including agriculture, industry, and wastewater usage. The results highlight significant levels of cadmium pollution in the region's soil necessitating careful management of water and soil resources. Additionally, impacts from human activities such as industrial wastewater discharge on soil contamination were evaluated. Given Shahr-e Rey County's proximity to Tehran metropolis and extensive industrial activities, pollution from these sources could pose serious environmental health risks. Therefore, precise planning for water and soil resource management is essential to preserve regional ecosystems while enhancing residents' quality of life.

Author Contributions

Conceptualization, Sh.R.S., A.K. and F.S.; methodology, Sh.R.S. and A.K.; software, Sh.R.S. and A.K.; validation, Sh.R.S. and A.K.; formal analysis, Sh.R.S. and A.K.; investigation, Sh.R.S. and A.K.; resources, A.K.; data curation, Sh.R.S. and A.K.; writing—original draft preparation, Sh.R.S. and A.K.; writing—review and editing, Sh.R.S., A.K. and F.S.; visualization, Sh.R.S. and A.K.; supervision, A.K.; project administration, A.K.; funding acquisition, A.K. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript. All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank the reviewers and editor for their critical comments that helped to improve the paper. The authors gratefully acknowledge the support and facilities provided by the Department of Soil Science, University of Tehran, Iran.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.