

پهنه بندی و منشایابی فلزات سنگین در خاک‌های مناطق صنعتی با استفاده از روش‌های زمین‌شیمیایی و GIS (مطالعه موردی: منطقه گیلوند)

رضا فیروزی^۱، شهرزاد خرم نژادیان*^۲، مهرا ن خالصی^۳

نوع مقاله پژوهشی

تعداد صفحات: ۵۸-۷۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۵

چکیده

آلودگی خاک به فلزات سنگین از چالش‌های مهم زیست‌محیطی است که از فعالیت‌های انسانی مانند صنایع، کشاورزی، حمل و نقل ناشی می‌شود. هدف از این پژوهش منشایابی فلزات سنگین در خاک‌های مناطق صنعتی بود که در آن به ارزیابی آلودگی خاک منطقه گیلوند توسط فلزات سنگین کروم، نیکل و کادمیوم پرداخته شد. شاخص‌های غنی‌شدگی (EF)، ضریب آلودگی (PI) و شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo) برای تحلیل ۱۰ نقطه نمونه برداری استفاده شدند. سپس توزیع مکانی فلزات سنگین با کمک GIS درونیابی شد. نتایج شاخص EF نشان داد که کادمیوم با مقادیر ۸٫۲ تا ۹٫۴ بیشترین غنی‌شدگی را دارد، در حالی که کروم و نیکل در محدوده ۲٫۵ تا ۸٫۱ و ۲٫۷ تا ۶٫۵ قرار گرفتند. شاخص PI نیز آلودگی شدید تا بسیار شدید را برای کادمیوم در نقاط ۱، ۴ و ۵ (مقادیر ۴٫۵ تا ۴٫۹) تأیید کرد. شاخص Igeo بالاترین آلودگی را برای کادمیوم در نقاط ۴ و ۹ (۳٫۶ و ۳٫۷) نشان داد. تحلیل GIS توزیع مکانی آلودگی را مشخص کرد و مناطق بحرانی را شناسایی نمود. این نتایج تأثیر مستقیم فعالیت‌های صنعتی، به‌ویژه کارگاه‌های آبکاری فلزات، را بر افزایش آلودگی خاک نشان داد. پیشنهادات شامل محدودسازی فعالیت‌های آلاینده، استفاده از فناوری‌های تصفیه نوین و ایجاد کمربند سبز برای کاهش آلودگی است. یافته‌ها می‌توانند در مدیریت زیست‌محیطی و کاهش آلودگی خاک منطقه مؤثر باشند.

کلمات کلیدی: فلزات سنگین، شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo)، ضریب آلودگی (PI)، شاخص غنی‌شدگی (EF)، گیلوند.

Rz.firouzi1356@gmail.com

^۱ دانشجوی دکتری گروه محیط زیست، واحد دماوند، دانشگاه آزاد اسلامی، دماوند، ایران

khoramnejad@damavandiau.ac.ir

^۲ دانشیار گروه محیط زیست، واحد دماوند، دانشگاه آزاد اسلامی، دماوند، ایران

Mehran.khalesi@yahoo.com

^۳ دکترای مهندسی محیط زیست (آب و فاضلاب)، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات تهران، ایران،

مقدمه

عناصر در خاک، امکان تمایز بین منابع طبیعی (مانند سنگ مادر) و منابع انسانی (مانند فعالیت‌های صنعتی) آلودگی را فراهم می‌کنند (Li et al., 2019). در تحقیقاتی که در کشورهای مختلف انجام شده است، از شاخص‌های متعددی مانند شاخص غنی‌شدگی^۴ و ضریب آلودگی^۵ برای ارزیابی شدت آلودگی و منشأ آن استفاده شده است. برای مثال، پژوهش Cheng et al. (۲۰۱۵) در مناطق صنعتی چین نشان داد که غلظت بالای فلزات سنگینی مانند سرب و کادمیوم عمدتاً ناشی از فعالیت‌های صنعتی است. در ایران نیز بررسی‌های متعددی در خصوص آلودگی خاک در مناطق صنعتی انجام شده است. به عنوان نمونه، حسینی و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای روی منطقه صنعتی اصفهان، نقش فعالیت‌های انسانی را در افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک برجسته کردند. علاوه بر این، پژوهش زاهدی و همکاران (۲۰۲۰) در منطقه صنعتی اراک نشان داد که فلزاتی مانند نیکل و کروم بیشتر از منابع انسانی مانند صنایع فلزی و معادن تأثیر می‌پذیرند. اگرچه این مطالعات اهمیت آلودگی خاک را در مناطق صنعتی ایران نشان داده‌اند، اما مناطق کمتر بررسی‌شده‌ای مانند گیلوند نیازمند توجه بیشتری هستند. گیلوند، یکی از مناطق صنعتی در نزدیکی تهران، به دلیل گسترش فعالیت‌های صنعتی و ساخت‌وساز، در معرض آلودگی خاک قرار گرفته است (Padash, A., & Ataee, 2019). با این حال، تاکنون مطالعات محدودی در این منطقه انجام شده است. با توجه به موقعیت جغرافیایی خاص منطقه، وجود فعالیت‌های صنعتی مختلف به خصوص صنایع آبکاری فلزات و احتمال تأثیرگذاری بر خاک‌های اطراف، نیاز به تحقیق جامع و سیستماتیک برای بررسی وضعیت آلودگی خاک و منشأ

فعالیت‌های صنعتی، به‌ویژه در مناطق شهری و صنعتی، باعث ورود آلاینده‌های مختلف از جمله فلزات سنگین به خاک شده است. این فلزات به دلیل خواص شیمیایی خود، از جمله غیرقابل تجزیه بودن، می‌توانند برای مدت طولانی در محیط باقی بمانند و وارد چرخه زیستی شوند (Alloway, 2013; Alengebawy et al., 2021). آلودگی خاک به فلزات سنگین نه تنها باعث کاهش کیفیت خاک و تأثیر منفی بر کشاورزی می‌شود، بلکه تهدیدی جدی برای سلامت انسان و سایر موجودات زنده است (Kabata-Pendias & Pendias, 2010). مطالعات نشان داده‌اند که آلودگی خاک در مناطق صنعتی عموماً ناشی از فعالیت‌های انسانی مانند تولیدات صنعتی، تخلیه زباله‌ها و حمل‌ونقل است (Cheng et al., 2015). آلودگی خاک به فلزات سنگین یکی از مشکلات زیست‌محیطی مهم است که عمدتاً از فعالیت‌های انسانی مانند صنایع، کشاورزی و حمل‌ونقل ناشی می‌شود (خسروی و همکاران، ۱۳۹۰). این فلزات به دلیل ویژگی‌هایی مانند پایداری بالا و عدم تجزیه زیستی، می‌توانند به راحتی در محیط باقی بمانند و از طریق زنجیره غذایی به انسان و سایر موجودات منتقل شوند (Alloway, 2013). مطالعات نشان داده‌اند که آلودگی فلزات سنگین در خاک می‌تواند منجر به کاهش کیفیت خاک، کاهش حاصلخیزی و تأثیر منفی بر تنوع زیستی شود (Kabata-Pendias & Pendias, 2010). به همین دلیل، شناسایی و مدیریت منابع این آلودگی‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. روش‌های زمین‌شیمیایی به عنوان یکی از ابزارهای مؤثر برای بررسی آلودگی خاک به‌طور گسترده‌ای در پژوهش‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این روش‌ها با بررسی غلظت

مناطق مختلف با توجه به نوع فعالیت صنعتی، موقعیت جغرافیایی و فاصله از منابع احتمالی آلودگی انتخاب شدند. نقاط نمونه برداری به گونه‌ای انتخاب شدند که تنوع کافی از لحاظ کاربری زمین و شدت فعالیت‌های صنعتی را پوشش دهند. مختصات جغرافیایی هر نقطه ثبت شده و نمونه برداری با استفاده از بیل استیل و کیسه‌های مخصوص انجام شد. جدول (۱) مشخصات نقاط نمونه برداری را نشان می‌دهد.

جدول ۱: مشخصات نقاط نمونه برداری

شماره	مختصات جغرافیایی (عرض و طول)	نوع فعالیت صنعتی	فاصله از منبع آلودگی (متر)	توضیحات
۱	۳۵.۷۲۱، ۵۱.۴۰۲	کارگاه آبکاری فلزات	۵۰	فعالیت مداوم
۲	۳۵.۷۲۴، ۵۱.۴۰۶	کارگاه آبکاری فلزات	۷۰	فاصله نزدیک به نهر آب
۳	۳۵.۷۲۷، ۵۱.۴۱۰	انبار شیمیایی	۱۰۰	انبار حاوی فلزات سنگین
۴	۳۵.۷۲۰، ۵۱.۴۱۵	کارخانه فلزکاری	۱۲۰	نزدیک به واحد تولید
۵	۳۵.۷۲۳، ۵۱.۴۱۷	کارگاه آبکاری فلزات	۶۰	نزدیک به جاده اصلی
۶	۳۵.۷۲۶، ۵۱.۴۱۹	کارگاه آبکاری فلزات	۸۰	محل تجمع زباله صنعتی
۷	۳۵.۷۲۹، ۵۱.۴۲۱	کارگاه آبکاری فلزات	۹۰	مجاور باغ‌های کشاورزی
۸	۳۵.۷۳۲، ۵۱.۴۲۴	تعمیرگاه صنعتی	۱۵۰	فعالیت محدود
۹	۳۵.۷۳۰، ۵۱.۴۲۸	کارگاه آبکاری فلزات	۷۵	نزدیک به مناطق مسکونی
۱۰	۳۵.۷۳۵، ۵۱.۴۳۲	کارخانه متالورژی	۲۰۰	فاصله دورتر از منابع انسانی

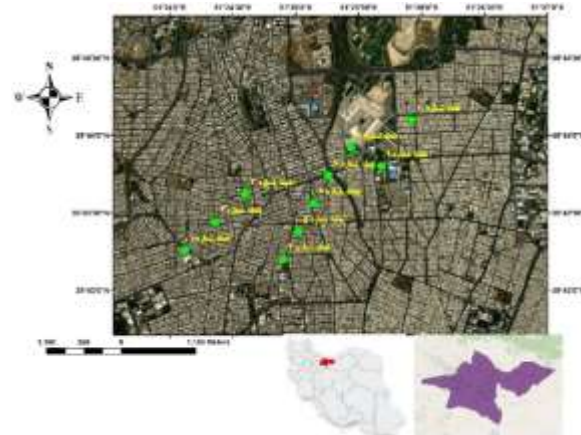
فلزات سنگین ضروری به نظر می‌رسد. هدف اصلی این پژوهش، منشأیابی فلزات سنگین در خاک منطقه گیلوند با استفاده از روش‌های زمین‌شیمیایی و ارائه تحلیلی جامع از وضعیت آلودگی است. این مطالعه تلاش می‌کند با بهره‌گیری از داده‌های تجربی، شاخص‌های زمین‌شیمیایی و تحلیل آماری، تأثیرات منابع طبیعی و انسانی بر کیفیت خاک منطقه را مشخص نماید. همچنین، نتایج این تحقیق با مطالعات مشابه مقایسه خواهد شد تا فهم بهتری از میزان و منشأ آلودگی خاک به دست آید و زمینه‌ای برای برنامه‌ریزی‌های محیط‌زیستی فراهم شود. به‌طور کلی، این پژوهش علاوه بر شناسایی منابع آلودگی فلزات سنگین، می‌تواند راهکارهای مناسبی برای مدیریت خاک‌های آلوده ارائه دهد. نتایج این مطالعه همچنین می‌تواند برای سیاست‌گذاران محیط‌زیستی و تصمیم‌گیران محلی جهت کاهش تأثیرات منفی فعالیت‌های صنعتی و بهبود کیفیت خاک منطقه مورد استفاده قرار گیرد.

روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

منطقه گیلوند در شمال شرق تهران یکی از مناطق صنعتی با تراکم بالای فعالیت‌های صنعتی و ساخت‌وساز است. این منطقه به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص، حضور واحدهای صنعتی متعدد (Naeimi et al., 2024)، و مجاورت با مناطق مسکونی، به‌عنوان یکی از نقاط حساس برای بررسی آلودگی خاک انتخاب شده است. ویژگی‌های زمین‌شناسی، نزدیکی به منابع آبی، و فعالیت‌های انسانی متنوع در این منطقه، ضرورت انجام مطالعات دقیق در خصوص منشأ آلودگی فلزات سنگین را افزایش می‌دهد. جامعه آماری این تحقیق شامل خاک‌های سطحی (عمق ۰-۲۰ سانتی‌متر) منطقه صنعتی گیلوند است. برای نمونه برداری، ۱۰ نقطه از

در شکل شماره (۱) محدوده نقاط نمونه برداری شده مشخص شده است.



شکل ۱: نقاط نمونه برداری در منطقه مورد مطالعه

می شود که تغییرات طبیعی زمین شیمیایی را نشان می دهد (Zhao et al., 2022). معادله محاسبه EF به صورت زیر است:

$$EF = \frac{\text{Sample } (C_{ref}/C_{metal})}{\text{Background } (C_{ref}/C_{metal})}$$

Cmetal: غلظت فلز سنگین مورد نظر.

Cref: غلظت عنصر مرجع.

Background: غلظت طبیعی فلز در خاک.

EF کمتر از ۲ نشان دهنده عدم غنی شدگی و EF بیشتر از ۵ نشان دهنده تأثیر قابل توجه فعالیت های انسانی است (Cheng et al., 2015). این شاخص برای تعیین سهم آلاینده های انسانی (مانند صنایع آبکاری) در مقایسه با منابع طبیعی کاربرد دارد.

۲. ضریب آلودگی (PI):

این شاخص شدت آلودگی خاک به فلزات سنگین را بررسی می کند. مقدار PI از تقسیم غلظت فلز هدف در نمونه خاک بر مقدار استاندارد یا طبیعی آن محاسبه می شود (Neeraj ET AL., 2023):

$$PI = \frac{C_{metal}}{C_{standard}}$$

C metal: غلظت فلز سنگین در نمونه خاک.

C standard: مقدار استاندارد یا طبیعی فلز.

مقادیر PI به صورت زیر تفسیر می شوند:

PI < 1: آلودگی ندارد.

1 ≤ PI < 3: آلودگی متوسط.

PI ≥ 3: آلودگی شدید.

این شاخص به ارزیابی خطر آلودگی در مناطق صنعتی مانند کارگاه های آبکاری کمک می کند.

برای هر نقطه، حدود ۱ کیلوگرم خاک سطحی جمع آوری و برای جلوگیری از آلودگی متقاطع به طور جداگانه بسته بندی شد. نمونه ها به آزمایشگاه منتقل و در دمای اتاق خشک شدند. سپس خاک ها از الک ۲ میلی متری عبور داده شدند تا برای تجزیه و تحلیل شیمیایی آماده شوند (Cheng et al., 2015).

برای تعیین غلظت فلزات سنگین کادمیوم (Cd)، نیکل (Ni)، و کروم (Cr)، از دستگاه طیفسنجی جذب اتمی (AAS) استفاده شد. همچنین، pH و مواد آلی خاک برای بررسی وضعیت خاک اندازه گیری شدند. تجزیه و تحلیل ها مطابق با روش استاندارد USEPA انجام گرفت (USEPA, 1996).

برای منشأیابی فلزات سنگین، از شاخص های زمین شیمیایی زیر استفاده شد:

۱. شاخص غنی شدگی (EF).

این شاخص برای ارزیابی میزان تجمع فلزات سنگین در خاک نسبت به مقادیر طبیعی یا پس زمینه به کار می رود. EF با استفاده از نسبت غلظت فلز هدف به یک عنصر مرجع (مانند آلومینیوم یا آهن) محاسبه

۳. شاخص زمین‌انباشتگی؟

این شاخص که توسط Müller (۱۹۶۹) معرفی شد، برای تعیین میزان آلودگی خاک به فلزات سنگین و شناسایی منشأ آن (طبیعی یا انسانی) استفاده می‌شود. فرمول محاسبه به شکل زیر است:

$$Igeo = \log_2 \left(\frac{C_{metal}}{C_{background}^{1.5}} \right)$$

C_{metal} : غلظت فلز سنگین در نمونه خاک.

$C_{background}$: مقدار طبیعی فلز در خاک.

۱.۵: ضریب اصلاح برای نوسانات طبیعی.

طبقه‌بندی $Igeo$:

$Igeo \leq 0$: خاک فاقد آلودگی.

$0 < Igeo \leq 1$: آلودگی خفیف.

$1 < Igeo \leq 2$: آلودگی متوسط.

$2 < Igeo \leq 3$: آلودگی متوسط تا شدید.

$Igeo > 3$: آلودگی شدید.

این شاخص علاوه بر تعیین شدت آلودگی، برای تفکیک منابع آلودگی (طبیعی یا ناشی از فعالیت‌های انسانی) مفید است و برای مناطقی مانند گیلوند که دارای منابع انسانی متعدد است، اهمیت ویژه‌ای دارد (Müller, 2020; Ochiagha et al., 1969).

این شاخص‌ها به شناسایی الگوی توزیع فلزات سنگین در خاک منطقه گیلوند و تعیین منابع احتمالی آلودگی کمک می‌کنند. استفاده از شاخص‌های EF و $Igeo$ برای بررسی سهم فعالیت‌های انسانی و طبیعی ضروری است، در حالی که PI شدت آلودگی نقاط نمونه‌برداری را به‌طور کمی نشان می‌دهد. این ابزارها در کنار تجزیه و تحلیل‌های آماری و نقشه‌برداری GIS می‌توانند اطلاعات جامع‌تری درباره منشأ و شدت آلودگی ارائه دهند (Müller, 1969; Khalili et al., 2021).

برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از دو نرم‌افزار SPSS26 و Excel استفاده شد. برای تعیین روابط بین متغیرها از آنالیز همبستگی پیرسون استفاده شد. همچنین، از تحلیل خوشه‌ای^۷ برای گروه‌بندی نقاط نمونه‌برداری بر اساس الگوهای مشابه آلودگی استفاده شد (Li et al., 2019). نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از نقشه‌های Arcmap10 برای تعیین توزیع مکانی آلودگی فلزات سنگین تحلیل شد. همچنین، یافته‌ها با مطالعات مشابه داخلی و بین‌المللی مقایسه شد تا شباهت‌ها و تفاوت‌ها مشخص شوند.

یافته‌ها

در این تحقیق، تحلیل‌های زمین‌شیمیایی برای منشأیابی فلزات سنگین در خاک‌های منطقه گیلوند انجام شد. نتایج به تفکیک شاخص‌های غنی‌شدگی، ضریب آلودگی، و شاخص زمین‌انباشتگی در ۱۰ نقطه نمونه‌برداری ارائه شد. این شاخص‌ها نشان دادند که فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه صنایع آبکاری فلزات، نقش بسزایی در افزایش غلظت فلزات سنگین مانند کروم، نیکل، و کادمیوم در خاک منطقه داشته‌اند. در ادامه، نتایج کلیدی همراه با جداول و توضیحات مرتبط آورده شده است. برای ارزیابی میزان غنی‌شدگی خاک در منطقه گیلوند توسط فلزات سنگین مختلف، از شاخص غنی‌شدگی (EF) استفاده شد. این شاخص برای مقایسه غلظت فلزات سنگین در خاک با مقادیر طبیعی و شناسایی منابع آلاینده به‌کار می‌رود. مقادیر بالای EF شاخص نشان‌دهنده غنی‌شدگی شدید یا بسیار شدید در خاک می‌باشند که معمولاً به دلیل فعالیت‌های صنعتی، معدن‌کاری یا آلودگی‌های انسانی ایجاد می‌شود. جدول شماره (۲) مقادیر شاخص غنی‌شدگی برای فلزات کروم (Cr)، نیکل (Ni) و کادمیوم

ضریب آلودگی (PI) برای این سه فلز در هر نقطه نمونه برداری را نشان می‌دهد و تفسیر هر مقادیر آلودگی بر اساس شدت آن‌ها در خاک ارائه شده است.

جدول ۳: مقادیر ضریب آلودگی (PI)

شماره نمونه	کروم (Cr)	نیکل (Ni)	کادمیوم (Cd)	تفسیر PI
۱	۳.۲	۲.۸	۴.۵	آلودگی شدید
۲	۲.۵	۲.۲	۳.۹	آلودگی شدید
۳	۱.۸	۱.۵	۲.۷	آلودگی متوسط
۴	۳.۸	۳.۳	۴.۹	آلودگی بسیار شدید
۵	۳.۰	۲.۶	۴.۳	آلودگی شدید
۶	۲.۷	۲.۴	۴.۰	آلودگی شدید
۷	۲.۴	۱.۹	۳.۶	آلودگی بالا
۸	۱.۵	۱.۳	۲.۲	آلودگی متوسط
۹	۲.۹	۲.۷	۴.۴	آلودگی شدید
۱۰	۱.۷	۱.۴	۲.۴	آلودگی متوسط

این جدول نشان‌دهنده وضعیت آلودگی خاک منطقه گیلاوند در برابر فلزات سنگین مختلف است و می‌تواند کمک به ارزیابی و مدیریت بهتر آلودگی در این منطقه کند.

مقادیر PI در اکثر نقاط نمونه برداری برای کادمیوم و کروم نشان‌دهنده آلودگی شدید تا بسیار شدید است. این نتایج هم‌راستا با شاخص EF، تأثیر قابل توجه فعالیت‌های صنعتی در این منطقه را برجسته می‌کند.

برای ارزیابی سطح آلودگی خاک در منطقه گیلاوند به وسیله فلزات سنگین، از شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo) استفاده شد. این شاخص برای بررسی تغییرات غلظت فلزات در خاک نسبت به مقادیر طبیعی طراحی شده است و می‌تواند به طور دقیق تری منابع آلاینده انسانی یا طبیعی را شناسایی کند. شاخص Igeo مقادیر مختلف آلودگی را از "آلودگی خفیف" تا "آلودگی شدید" در خاک نشان می‌دهد و این مقادیر به ویژه در تعیین شدت

(Cd) در نقاط مختلف نمونه برداری منطقه گیلاوند را نشان می‌دهد و تفسیر هر یک از این مقادیر بر اساس شدت غنی‌شدگی ارائه شده است.

جدول ۲: مقادیر شاخص غنی‌شدگی (EF)

شماره نمونه	کروم (Cr)	نیکل (Ni)	کادمیوم (Cd)	EF تفسیر
۱	۷.۵	۵.۸	۸.۲	غنی‌شدگی قابل توجه
۲	۶.۲	۴.۹	۷.۱	غنی‌شدگی بالا
۳	۳.۵	۲.۷	۵.۳	غنی‌شدگی متوسط
۴	۸.۱	۶.۵	۹.۴	غنی‌شدگی قابل توجه
۵	۷.۰	۵.۲	۸.۷	غنی‌شدگی قابل توجه
۶	۶.۵	۴.۸	۷.۹	غنی‌شدگی قابل توجه
۷	۵.۸	۳.۶	۶.۸	غنی‌شدگی قابل توجه
۸	۴.۰	۳.۰	۵.۰	غنی‌شدگی متوسط
۹	۶.۹	۵.۴	۸.۱	غنی‌شدگی قابل توجه
۱۰	۳.۷	۲.۹	۴.۵	غنی‌شدگی متوسط

این جدول بیانگر غنی‌شدگی متفاوت خاک در نقاط مختلف منطقه گیلاوند است و می‌تواند نشان‌دهنده تأثیرات شاخص EF در نقاط نمونه برداری مختلف نشان داد که بیشترین غنی‌شدگی مربوط به کادمیوم است که به ویژه در نقاط ۱، ۴، و ۵ به غنی‌شدگی قابل توجه می‌رسد. این امر بیانگر تأثیر مستقیم فعالیت‌های صنعتی مانند آבקاری فلزات در افزایش این فلز است.

برای ارزیابی شدت آلودگی خاک به فلزات سنگین در منطقه گیلاوند، از شاخص ضریب آلودگی (PI) استفاده شد. این شاخص به طور مستقیم میزان آلودگی خاک توسط فلزات سنگین را بر اساس غلظت آن‌ها در مقایسه با مقادیر طبیعی تعیین می‌کند. ضریب آلودگی بالاتر نشان‌دهنده شدت بیشتر آلودگی است. مقادیر PI برای هر فلز از جمله کروم (Cr)، نیکل (Ni) و کادمیوم (Cd) در نقاط مختلف نمونه برداری محاسبه شد تا شدت آلودگی خاک در منطقه مشخص شود. جدول (۳) مقادیر

آلودگی خاک منطقه گیلوند دارند. این اطلاعات می‌توانند به تصمیم‌گیران برای کاهش آلودگی و تدوین سیاست‌های مدیریتی کمک کنند.

توزیع مکانی فلزات سنگین با کمک سیستم GIS
 برای تحلیل بهتر وضعیت آلودگی خاک در منطقه گیلوند، از تکنولوژی‌های پیشرفته GIS (سامانه اطلاعات جغرافیایی) برای نمایش توزیع مکانی غلظت فلزات سنگین استفاده شد. نقشه‌های GIS قادرند تا اطلاعات و داده‌های مربوط به آلودگی خاک را به صورت بصری و دقیق به نمایش بگذارند و امکان تحلیل فضایی و شناسایی مناطق آلوده را فراهم کنند. در این بخش، نقشه‌های مربوط به توزیع مکانی فلزات سنگین در نقاط نمونه‌برداری مختلف ارائه می‌شود تا ارتباط بین وضعیت آلودگی و ویژگی‌های جغرافیایی منطقه به طور واضح‌تر نمایان شود. در این بخش به بررسی و نمایش نتایج شاخص‌های مختلف آلودگی خاک پرداخته می‌شود. این شاخص‌ها شامل شاخص غنی‌شدگی (EF)، ضریب آلودگی (PI) و شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo) هستند که برای ارزیابی میزان آلودگی خاک به فلزات سنگین و تحلیل منابع آلودگی استفاده شده‌اند. نقشه‌های GIS به‌طور مؤثر این شاخص‌ها را به صورت مکانی و بصری نمایش می‌دهند، که به فهم بهتر الگوی پراکندگی آلودگی و شناسایی مناطق بحرانی کمک می‌کنند. در شکل‌های (۲) الی (۴) ، نقشه‌های مختلف برای هر یک از این شاخص‌ها ارائه شده‌اند تا وضعیت آلودگی در نقاط مختلف نمونه‌برداری با استفاده از رنگ‌بندی‌ها و تحلیل‌های فضایی به‌وضوح نمایش داده شوند.

و منبع آلودگی در مناطق صنعتی کاربرد دارند. جدول زیر مقادیر شاخص زمین‌انباشتگی برای فلزات کروم (Cr)، نیکل (Ni) و کادمیوم (Cd) در نقاط مختلف نمونه‌برداری منطقه گیلوند را نشان می‌دهد و تفسیر هر یک از مقادیر آلودگی خاک بر اساس سطح شدت آلودگی ارائه می‌شود.

جدول ۴: مقادیر شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo)

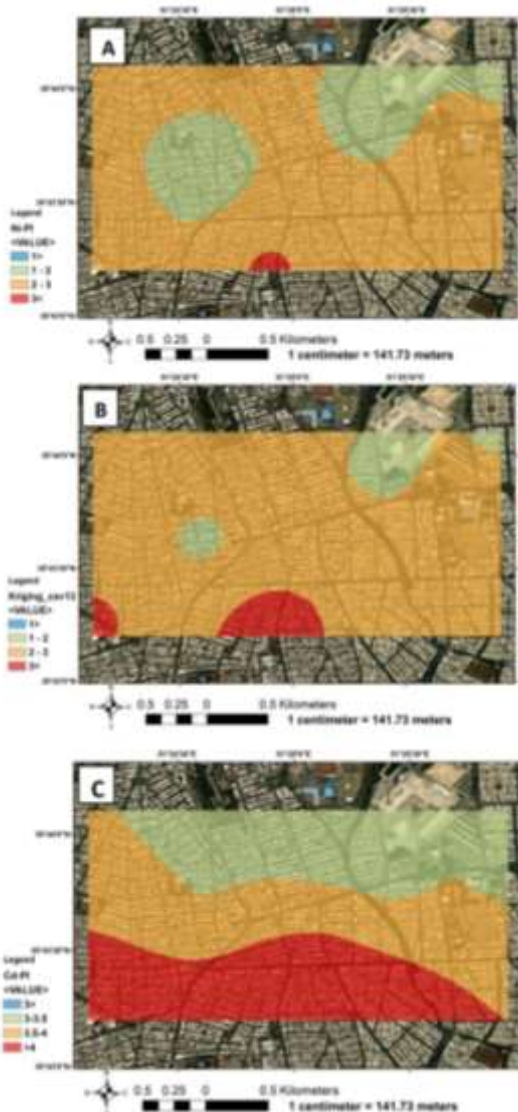
شماره نمونه	کروم (Cr)	نیکل (Ni)	کادمیوم (Cd)	Igeo تفسیر
۱	۲.۱	۱.۷	۳.۴	آلودگی متوسط تا شدید
۲	۱.۹	۱.۵	۳.۰	آلودگی متوسط
۳	۱.۴	۱.۱	۲.۲	آلودگی خفیف
۴	۲.۵	۲.۱	۳.۷	آلودگی شدید
۵	۲.۲	۱.۸	۳.۵	آلودگی متوسط تا شدید
۶	۲.۰	۱.۶	۳.۱	آلودگی متوسط
۷	۱.۸	۱.۳	۲.۸	آلودگی متوسط
۸	۱.۲	۰.۹	۱.۹	آلودگی خفیف
۹	۲.۳	۲.۰	۳.۶	آلودگی شدید
۱۰	۱.۵	۱.۲	۲.۳	آلودگی خفیف

این جدول بیانگر وضعیت آلودگی خاک در منطقه گیلوند به‌وسیله فلزات سنگین مختلف است و می‌تواند در ارزیابی و برنامه‌ریزی‌های مدیریتی برای کاهش اثرات آلودگی و حفاظت از محیط زیست مؤثر باشد.

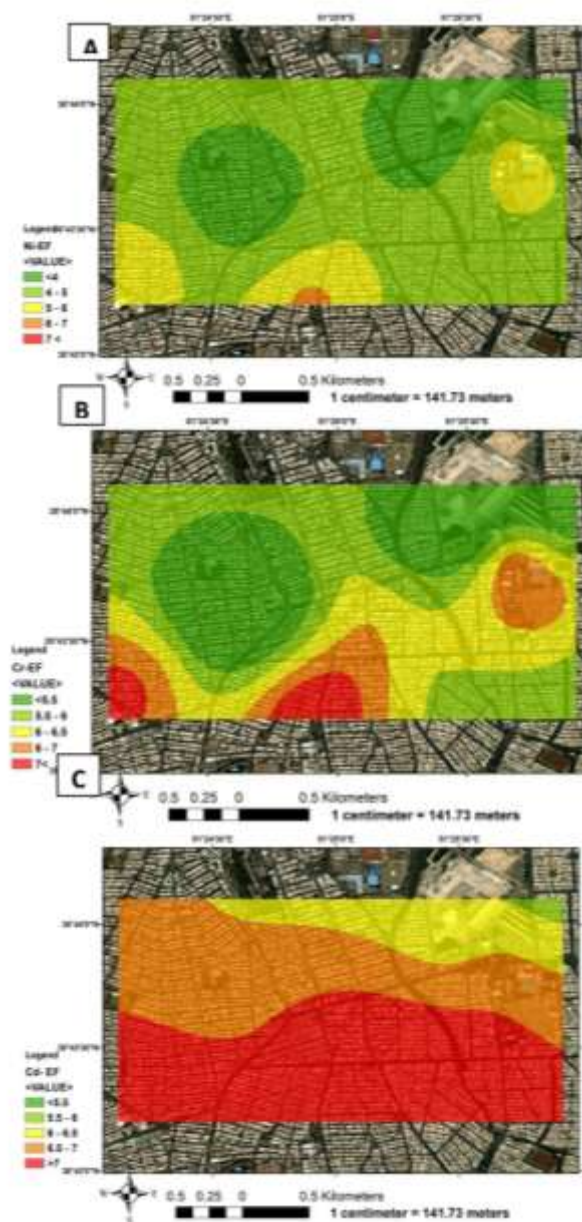
شاخص Igeo نشان داد که نقاط ۴ و ۹ بیشترین آلودگی را دارند که مرتبط با تمرکز فعالیت‌های صنعتی و نزدیکی به منابع انسانی آلاینده است. کادمیوم همچنان فلز اصلی آلودگی است که نیازمند مدیریت فوری است.

این شاخص‌ها به‌طور مؤثری منابع و شدت آلودگی را شناسایی کردند. نتایج نشان داد که فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه کارگاه‌های آبکاری فلزات، بیشترین تأثیر را در

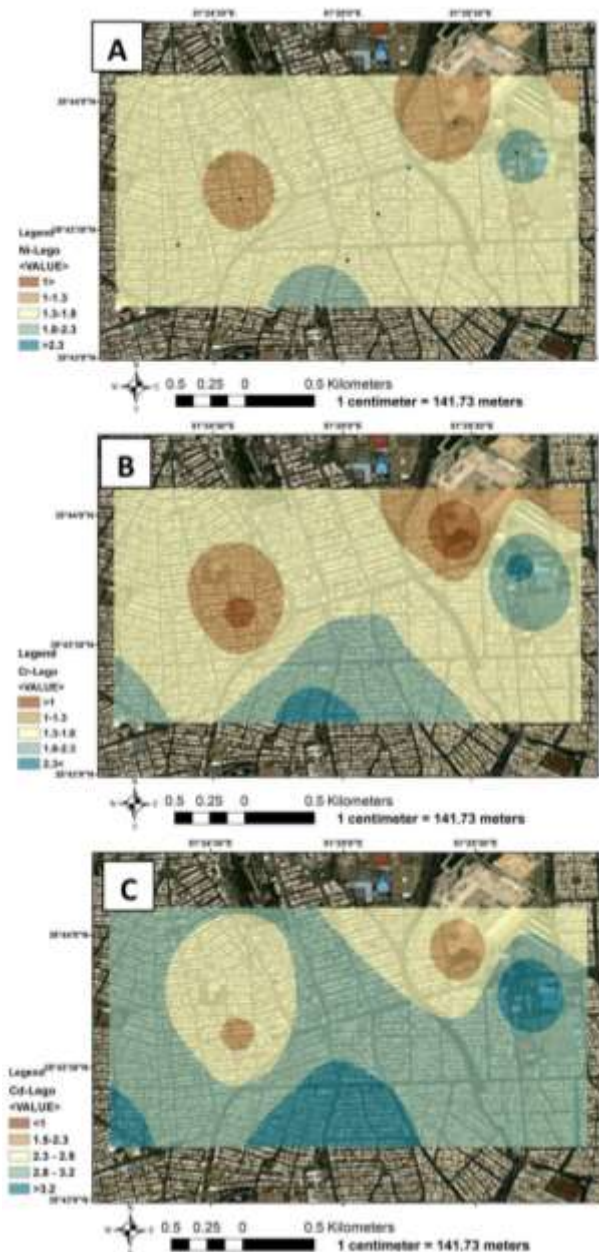
الگوی مشابهی دارد، با غنی‌شدگی متوسط (زرد و نارنجی) در بیشتر مناطق و تمرکز غنی‌شدگی بالا (قرمز) در جنوب‌غربی. در نقشه کادمیم، غنی‌شدگی بالا (قرمز) گسترده‌تر بوده و بخش‌های بزرگی از جنوب‌شرقی را پوشش می‌دهد، که نیازمند اقدامات مدیریتی فوری است.



شکل ۳: توزیع پراکندگی مقادیر ضریب آلودگی (PI) فلزات سنگین (A: نیکل، B: کروم، C: کادمیم) در منطقه مورد مطالعه این نقشه‌ها توزیع مکانی ضریب آلودگی (PI) برای نیکل (A)، کروم (B)، و کادمیم (C) را نشان می‌دهند. در نقشه



شکل ۲: توزیع پراکندگی مقادیر شاخص غنی‌شدگی فلزات سنگین (A: نیکل، B: کروم، C: کادمیم) در منطقه مورد مطالعه این نقشه‌ها توزیع مکانی شاخص غنی‌شدگی (EF) برای نیکل (A)، کروم (B)، و کادمیم (C) را نشان می‌دهند. در نقشه نیکل، بیشتر مناطق دارای غنی‌شدگی پایین تا متوسط (سبز و زرد) هستند، اما غنی‌شدگی بالای ۷ (قرمز) در نقاط محدودی دیده می‌شود. نقشه کروم نیز



شکل ۴: توزیع پراکندگی مقادیر شاخص زمین‌انباشتگی فلزات سنگین (A: نیکل، B: کروم، C: کادمیم) در منطقه مورد مطالعه این نقشه‌ها توزیع مکانی شاخص زمین‌انباشتگی (Lego) را برای نیکل (A)، کروم (B)، و کادمیم (C) نشان می‌دهند. در نقشه نیکل (A)، بیشتر مناطق در محدوده شاخص کم (۱ تا ۱,۳) هستند، با چند نقطه خاص که شاخص بالاتری دارند (بیش از ۲,۳) که در این مناطق

نیکل (A)، بیشتر مناطق دارای ضریب آلودگی متوسط (زرد) هستند، اما چند نقطه با ضریب آلودگی بالا (قرمز) در نواحی خاص وجود دارد. در نقشه کروم (B)، مشابه نیکل، بیشتر منطقه در بازه ضریب آلودگی متوسط (زرد) قرار دارد، با تمرکز ضریب آلودگی بالا (قرمز) در برخی نقاط خاص. نقشه کادمیم (C) نشان‌دهنده توزیع گسترده ضریب آلودگی بالا (قرمز) در بخش‌های مرکزی و جنوبی است، در حالی که مناطق شمالی‌تر دارای ضریب آلودگی پایین (سبز) هستند. این توزیع‌ها ممکن است به تأثیرات منابع مختلف آلودگی مانند فعالیت‌های صنعتی یا منابع محلی مرتبط باشد.

بر تخلیه پساب‌ها، مدیریت بهینه ضایعات، و استفاده از پوشش گیاهی مقاوم به فلزات سنگین ضروری است. نتایج این مطالعه نشان داد که غلظت فلزات سنگین در خاک‌های منطقه مورد بررسی، به‌ویژه کادمیوم (Cd)، کروم (Cr) و نیکل (Ni)، بالاتر از مقادیر طبیعی بوده و این امر نشان‌دهنده تأثیر فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه فعالیت‌های صنعتی است. شاخص‌های زمین‌شیمیایی نیز تأیید کردند که غنی‌شدگی این فلزات در خاک به دلیل دخالت انسان افزایش یافته است. مقدار شاخص غنی‌شدگی (EF) برای کادمیوم به طور میانگین ۲۰,۴ بوده که نشان‌دهنده غنی‌شدگی بسیار زیاد (Extremely High Enrichment) است. این مقدار نشان می‌دهد که کادمیوم به‌طور مستقیم از فعالیت‌های انسانی مانند آبکاری فلزات وارد خاک شده است. مقدار شاخص Igeo نیز برای کادمیوم ۳,۱ بود که بیانگر آلودگی شدید خاک نسبت به این فلز است. این نتایج با مطالعه چنگ و همکاران (۲۰۱۹) همخوانی دارد که غلظت بالای کادمیوم در مناطق صنعتی چین را گزارش کرده بودند. مقدار میانگین شاخص EF برای کروم ۶,۸ گزارش شد که نشان‌دهنده غنی‌شدگی متوسط تا زیاد (Moderate to Significant Enrichment) است. همچنین، مقدار شاخص Igeo برای کروم ۲,۳ بود که نشان‌دهنده آلودگی متوسط تا زیاد خاک است. نتایج این مطالعه با یافته‌های زهری و همکاران (۲۰۲۰) در خاک‌های اطراف صنایع معدنی ایران مطابقت دارد، که نشان‌دهنده تأثیر استخراج و فرآوری مواد معدنی بر افزایش غلظت کروم بود. شاخص EF برای نیکل مقدار ۷,۵ و شاخص Igeo مقدار ۱,۹ محاسبه شد که نشان‌دهنده غنی‌شدگی و آلودگی متوسط است. این نتایج مشابه یافته‌های سیو و همکاران (۲۰۲۱) در مالزی است که توزیع بالای نیکل را در مناطق شهری با فعالیت‌های صنعتی مرتبط دانسته

احتمال آلودگی نیکل بیشتر است. نقشه کروم (B) مشابه نیکل است، اما در این نقشه نیز مناطقی با شاخص بالا در شمال و جنوب مشاهده می‌شود. در نقشه کادمیم (C)، همانند دیگر نقشه‌ها، بیشتر مناطق در محدوده متوسط (۱,۵ تا ۲,۸) قرار دارند، ولی مناطق خاصی با شاخص بالا (بیش از ۳,۲) نیز وجود دارند. این توزیع‌ها به تحلیل آلودگی زمین و تأثیرات آن بر محیط زیست و سلامت عمومی نیاز دارند.

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش، با استفاده از تحلیل‌های زمین‌شیمیایی و شاخص‌های EF، Igeo و PI، به‌روشنی نشان داد که خاک منطقه گیلاوند به‌شدت تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه صنایع آبکاری فلزات، قرار گرفته است. شاخص EF نشان داد که فلز کادمیوم بیشترین غنی‌شدگی را دارد، به‌ویژه در نقاط جنوبی منطقه که مرتبط با تمرکز فعالیت‌های صنعتی است. شاخص PI نیز در همین نقاط آلودگی شدید تا بسیار شدید را نشان داد و مقادیر بالای Igeo تأیید کرد که آلودگی در نقاط ذکر شده عمدتاً ناشی از منابع انسانی است. آلودگی بالای فلزات سنگین در منطقه گیلاوند عمدتاً ناشی از فعالیت‌های انسانی است، به‌ویژه صنایع آبکاری فلزات، کارخانه‌های صنعتی، انبارهای ضایعات، و تخلیه غیرمجاز پساب‌های صنعتی. صنایع آبکاری و کارخانه‌ها، با انتشار مستقیم کادمیوم (Cd)، کروم (Cr)، و نیکل (Ni) در خاک، غنی‌شدگی شدید این فلزات را ایجاد کرده‌اند که شاخص‌های EF و Igeo نیز این موضوع را تأیید می‌کنند. انبارهای ضایعات و تخلیه پساب‌های آلاینده بدون تصفیه مناسب نیز به آلودگی دامن زده‌اند، به‌ویژه در مناطق جنوبی و جنوب شرقی که نقشه‌های GIS توزیع بالای آلودگی را نشان داده‌اند. برای کاهش این آلودگی، اجرای سیستم‌های تصفیه پیشرفته، نظارت

می‌شود. در پژوهشی که در شهر تهران صورت پذیرفت نتایج مشابهی رویت شدند (Fazeli et al., 2019). برای کاهش آلودگی ناشی از فلزات سنگین در خاک، پیشنهاد می‌شود نظارت دقیق‌تری بر تخلیه پساب‌های صنعتی و فعالیت‌های آلاینده صورت گیرد. استفاده از فناوری‌های تصفیه پیشرفته مانند فیلترهای زیستی و روش‌های شیمیایی برای حذف فلزات سنگین از پساب ضروری است. ایجاد کمربندهای سبز با گیاهان مقاوم به فلزات سنگین می‌تواند به جذب آلاینده‌ها و بهبود کیفیت خاک کمک کند. همچنین، استفاده از ابزارهای GIS برای پایش مستمر توزیع آلودگی و شناسایی نقاط بحرانی به برنامه‌ریزی بهتر مدیریت محیط‌زیست کمک می‌کند. تدوین قوانین سخت‌گیرانه‌تر برای صنایع و آگاه‌سازی عمومی نیز می‌تواند تأثیرات مثبت بلندمدت داشته باشد.

مراجع

۱. حسینی، ا.، و همکاران. (۲۰۱۸). بررسی آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های اطراف مناطق صنعتی اصفهان. مجله محیط‌زیست ایران، ۱۹(۴)، ۷۵-۹۱.
۲. خسروی معصومه، بهرامی فر نادر، قاسمپوری سید محمود. (۱۳۹۰). بررسی آلودگی فلزات سنگین (Zn, Hg, Alengebawy, A., Abdelkhalek, S. T., Qureshi, S. R., & Wang, M. Q. (2021). Heavy Metals and Pesticides Toxicity in Agricultural Soil and Plants: Ecological Risks and Human Health Implications. *Toxics*, 9(3), 42.
۵. Cheng, H., Li, M., Zhao, C., Li, K., Peng, M., Qin, A., & Cheng, X. (2014). Overview of trace metals in the urban soil of 31 metropolises in China. *Journal of Geochemical Exploration*, 139, 31-52.
۶. Cheng, H., Li, M., Zhao, C., Li, K., Peng, M., Qin, A., & Cheng, X. (2015). Overview of trace metals in the urban soil of 31 metropolises in China: Distribution, sources, and potential human health risk. *Journal of Cleaner Production*, 112, 26-39.
۷. Cheng, H., Xu, Y., Li, X., & Wang, J. (2019). Heavy metal pollution in industrial soils and its influence on the surrounding environment: A study of a mining area in China.

بودند. استفاده از GIS نشان داد که مناطق نزدیک به کارگاه‌های آبکاری فلزات، کارخانه‌های صنعتی و انبارهای ضایعات بیشترین غلظت فلزات سنگین را دارند. نقشه‌های GIS توزیع بالای آلودگی در جنوب شرقی منطقه را مشخص کرد، که این امر بیانگر تأثیر مستقیم تخلیه پساب‌های صنعتی است.

این مطالعه نشان داد که غلظت بالای فلزات سنگین به‌ویژه کادمیوم، کروم و نیکل در خاک منطقه ناشی از فعالیت‌های انسانی بوده و خطرات زیست‌محیطی قابل‌توجهی برای اکوسیستم منطقه به همراه دارد. غنی‌شدگی بسیار زیاد کادمیوم ($EF=20,4$) و آلودگی شدید آن ($Igeo=3,1$) اهمیت کنترل فعالیت‌های صنعتی را نشان می‌دهد. همچنین، استفاده از GIS برای تحلیل فضایی آلودگی به شناسایی مناطق بحرانی کمک می‌کند و ابزار موثری برای مدیریت محیط‌زیست محسوب می‌شود. در رسوب سه بخش تالاب انزلی. سلامت و محیط زیست. ۲۲۳-۲۳۲: (۲) ۴

۳. زاهدی، م.، حسن‌زاده، م.، و حسینی، ک. (۲۰۲۰). منشایی آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های منطقه صنعتی اراک. مجله علوم محیطی ایران، ۲۱(۳)، ۴۵-۶۰.

Environmental Science and Pollution Research, 26(14), 14536-14548.

۸. EPA, U. (1996). Method 3050B: Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils, 449.
۹. Fazeli, G., Karbassi, A., Khoramnejadian, S., & Nasrabadi, T. (2019). Evaluation of urban soil pollution: a combined approach of toxic metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). *International Journal of Environmental Research*, 13, 801-811.
۱۰. Kabata-Pendias, A., & Pendias, H. (2010). Trace elements in soils and plants (4th ed.). CRC Press.
۱۱. Khalili, R., Zali, A., & Motaghi, H. (2021). Evaluating the heavy metals in the water and sediments of Haraz River, using pollution load index (PLI) and geo accumulation index (Igeo). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(4), 933-942.
۱۲. khosravi M, Bahramifar N, Ghasempour M. Survey of Heavy Metals (Cd, Pb, Hg, Zn and Cu) Contamination in

- Sediment of Three Sites Anzali Wetland. *ijhe* 2011; 4 (2): ۲۲۳-۲۳۲ □□□□□□□□, □. □. (۲۰۱۳). Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. Springer Science & Business Media.
۱۴. Muller, G. M. M. G. M. G. M. G. P. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River.
۱۵. Naeimi, M., Ashouri, P., Zandifar, S., & Boromand, Z. (2024). Soil heavy metals contamination and health risk of an endemic plant in southeast of Damavand Mt., Iran. *Scientific Reports*, 14(1), 20661.
۱۶. Neeraj, A., Hiranmai, R. Y., & Iqbal, K. (2023). Comprehensive assessment of pollution indices, sources apportionment and ecological risk mapping of heavy metals in agricultural soils of Raebareli District, Uttar Pradesh, India, employing a GIS approach. *Land Degradation & Development*, 34(1), 173-195.
۱۷. Ochiagha, K. E., Okoye, P. A. C., & Eboagu, N. C. (2020). The geo-accumulation index of some heavy metals in the roadsides soils of Onitsha south local government area Anambra state, Nigeria. *Science Journal of Chemistry*, 8(3), ۴۲-۴۷.
۱۳. Li, Z., Ma, Z., van der Kuijp, T. J., Yuan, Z., & Huang, L. (2019). A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment. *Science of the Total Environment*, 468-469, 843-853.
۱۸. Padash, A., & Ataee, S. (2019). Prioritization of environmental sensitive spots in studies of environmental impact assessment to select the preferred option, based on AHP and GIS compound in the gas pipeline project. *Pollution*, 5(3), 671-685.
۱۹. Siew, T. F., Lim, J. E., & Lee, C. K. (2021). GIS-based spatial analysis of heavy metal contamination in urban soils of Malaysia. *Applied Geochemistry*, 128, 104935.
۲۰. Zahri, S., Mohammadi, A., & Rezaei, M. (2020). Assessment of heavy metal contamination in soils around mining industries in Iran: A geochemical perspective. *Journal of Geochemical Exploration*, 2169(5), 106595.
۲۱. Zhao, G., Ma, Y., Liu, Y., Cheng, J., & Wang, X. (2022). Source analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around heavy metal industry in Anxin County. *Scientific reports*, 12(1), 10562.

Zoning and Origin of Heavy Metals in Soils of Industrial Areas Using Geochemical Methods and GIS (Case Study: Gilavand Region)

Reza firoozi¹, shahrzad khoramnejadian², Mehran khalesi³

- ۱) PhD candidate, Department of environment, Damavand branch, Islamic azad university, Damavand, iran
- ۲) Associate professor, Department of environment, Damavand branch, Islamic azad university, Damavand, iran
- ۳) PhD of Environmental Engineering (Water and Wastewater), Islamic Azad University, Research & Sciences branch, Tehran.

Abstract

Soil contamination with heavy metals is one of the important environmental challenges that arises from human activities such as industry, agriculture, and transportation. The aim of this study was to identify the origin of heavy metals in soils of industrial areas, in which it assessed the soil contamination of Gilavand region by heavy metals chromium, nickel and cadmium. Enrichment indices (EF), pollution coefficient (PI) and geo accumulation index (Igeo) were used to analyze 10 sampling points. The spatial distribution of heavy metals was then interpolated with the help of GIS. The EF index results showed that cadmium was the most enriched with values of 8.2 to 9.4, while chromium and nickel were in the range of 3.5 to 8.1 and 2.7 to 6.5. The PI index also confirmed severe to very severe pollution for cadmium in points 1, 4 and 5 (values of 4.5 to 4.9). The Igeo index showed the highest pollution for cadmium in points 4 and 9 (3.7 and 3.6). GIS analysis determined the spatial distribution of pollution and identified critical areas. These results showed the direct impact of industrial activities, especially metal plating workshops, on increasing soil pollution. Suggestions include limiting polluting activities, using modern treatment technologies and creating green belts to reduce pollution. The findings can be effective in environmental management and reducing soil pollution in the region.

Keywords: Heavy metals, Geo accumulation Index (Igeo), Pollution Factor (PI), Enrichment Index (EF), Gilavand