



ارزیابی و پهنه‌بندی آلودگی کادمیوم و مس با استفاده از شاخص‌های آلودگی در دشت شبستر، آذربایجان شرقی، ایران

فاطمه سربازان^۱، امید رفیعیان*^۱، محمدرضا دلایان^۲، فاطمه ذیحی^۳

۱- گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، تبریز، ایران

۲- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، تبریز، ایران

۳- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

نوع مقاله:	چکیده
پژوهشی	مقدمه: امروزه آلودگی اراضی کشاورزی به فلزات سنگین مانند سرب، کادمیوم، روی و نیکل از منابعی نظیر کودهای شیمیایی فسفاته، کاربرد لجن فاضلاب، پساب‌های شهری و فاضلاب‌های خانگی یکی از مشکلات مهم و تهدیدی جدی برای محیط زیست و سلامت انسان می‌باشد. فلزات سنگین به دلیل غیرقابل تجزیه‌بودن و تحرک کم، آثار زیان‌بار فیزیولوژیک برای سلامتی جانداران و محیط‌زیست دارد. هنگامی که فلزات سنگین به هر وسیله‌ای وارد بدن انسان می‌شود، احتمال تحریک سیستم ایمنی بدن وجود دارد و ممکن است باعث تهوع، بی‌اشتهایی، استفراغ، ناهنجاری‌های گوارشی و درماتیت شود. به منظور رفع مشکل، ابتدا بایستی از میزان و نحوه پراکندگی آلودگی در اراضی مشکوک به آلودگی مطلع شد. سپس با شناسایی پهنه‌های با شدت آلودگی متفاوت، می‌توان در بحث آمایش سرزمین، راهکارهای مدیریتی در راستای احیای مناطق آلوده ارائه داد. هدف از این پژوهش، تعیین میزان آلودگی فلزات سنگین کادمیوم و مس در اراضی کشاورزی دشت شبستر با استفاده از شاخص‌های آلودگی و پهنه‌بندی آن می‌باشد.
تاریخچه مقاله:	مواد و روش‌ها: این پژوهش در دشت شبستر در فاصله ۷۰ کیلومتری غرب شهر تبریز و تقریباً شمال دریاچه ارومیه انجام شد. تعداد ۶۰ نمونه از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک تهیه و جهت انجام آزمایش‌های فیزیکوشیمیایی لازم به آزمایشگاه منتقل شد. نقاط نمونه‌برداری با استفاده از دستگاه موقعیت‌یاب جغرافیایی مشخص گردید. غلظت عناصر کادمیوم و مس در عصاره‌های تهیه گردیده از نمونه‌های خاک با استفاده از TEA و DTPA با استفاده از دستگاه جذب اتمی (ICP) اندازه‌گیری شد. سپس شاخص‌های آلودگی شامل شاخص آلودگی (PI)، شاخص زمین‌انباشت (I_{geo})، شاخص غنی‌شدن (EF) و شاخص آلودگی نمره (PI_n) محاسبه گردید. در نهایت توزیع مکانی آلودگی کادمیوم و مس در منطقه مورد مطالعه بر اساس شاخص‌های آلودگی و با استفاده از روش وزن‌دهی عکس فاصله انجام شد.
کلیمات کلیدی:	نتایج: نتایج نشان داد نمونه‌های خاک مورد بررسی از لحاظ شوری و میزان کربن آلی ناهمگن بوده، اما از لحاظ میزان آهن همگن بود. میانگین غلظت کادمیم ۱/۰۵۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم و افزون‌تر از حد بالایی استاندارد جهانی به مقدار ۰/۳۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم و کمتر از حد بالایی استاندارد ایران به مقدار ۳/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. خاک‌های منطقه از لحاظ PI، در کلاس آلودگی متوسط برای کادمیوم ($PI = ۱/۰۵$) و آلودگی کم برای مس ($PI = ۰/۰۳$) و از لحاظ شاخص I_{geo} ، در کلاس آلودگی متوسط تا زیاد برای کادمیوم ($I_{geo} = ۲/۸۳$) و غیرآلوده برای مس ($I_{geo} = -۵/۰۵$) قرار داشت. از لحاظ شاخص غنی‌شدن در کلاس آلودگی بسیار زیاد برای

کادمیوم ($EF = 76/1$) و در کلاس کمینه آلودگی برای مس ($EF = 0/35$) قرار داشت.

بحث: نتایج شاخص آلودگی نمره (PI_n) نشان داد که خاک‌های منطقه مورد مطالعه در کلاس کمی آلوده نسبت به عنصر مس قرار دارد ($PI_n = 1/38$). توزیع مکانی پیش‌بینی شده توسط روش ریاضی وزن‌دهی عکس فاصله برای شاخص‌های آلودگی (EF و I_{geo} , PI) نشان داد که اراضی با کاربری کشاورزی، دارای بیش‌ترین مقدار این شاخص برای کادمیوم بود و در کلاس‌های آلودگی بسیار زیاد تا متوسط قرار گرفت و آلودگی فلز مس، در کلاس آلودگی کم تا غیرآلوده قرار داشت. برای کاهش آلودگی خاک‌ها به فلزات سنگین، استفاده از فن‌آوری سبز یا گیاه‌پالایی پیشنهاد می‌گردد.

مقدمه

افزایش تدریجی یا تجمع فلزات سنگین در خاک و سایر زیست‌بوم‌ها یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی امروز است. افزایش فعالیت‌های صنعتی و معدنی در اطراف شهرها، مراتع و رویشگاه‌ها از یک طرف و استفاده از پساب‌های حاصل از این واحدها به منظور آبیاری اراضی کشاورزی، از طرف دیگر موجب آلوده ساختن خاک‌ها و آب‌های زیرزمینی و سطحی شده است. با ورود این عناصر به چرخه غذایی انسان و دام، خطری بالقوه نسل بشر را تهدید می‌کند (Kishe & Machiwa, 2003; Savic *et al.*, 2015). در بسیاری از نقاط جهان استفاده از فاضلاب‌های شهری و صنعتی در آبیاری اراضی زراعی به امری متداول تبدیل شده است (Singh & Agrawal, 2008). مهم‌ترین فلزات سنگین که از دیدگاه خطرات زیست‌محیطی در محیط‌های آبی و خاکی دارای اهمیت می‌باشد: کادمیوم، آرسنیک، جیوه، روی، وانادیم، کبالت، آهن، منگنز، نیکل، سرب، کروم و مس می‌باشد. در بین انواع آلاینده‌های خاک، فلزات سنگین به دلیل غیر قابل تجزیه بودن در طبیعت، سمی بودن، ماندگاری و طول عمر زیستی زیاد به عنوان یک آلاینده بسیار مهم در محیط‌زیست محسوب می‌شوند که به راحتی از طریق زنجیره‌های غذایی انتقال یافته و سلامت موجودات زنده را به خطر می‌اندازند (Wu & Zhang, 2010; Jing *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2022). ورود و تجمع فلزات سنگین در اراضی زراعی به طور عمده ناشی از فعالیت‌های صنعتی، ترافیک، مصرف کودهای شیمیایی و حیوانی، فاضلاب شهری، کمپوست و آفت‌کش‌هاست. تأثیر فلزات سنگین بر روی انسان، مختلف بوده و عمده‌ترین آن مربوط به بروز اختلالات عصبی است، افزون بر این احتمال تحریک سامان ایمنی

بدن، بروز ناهنجاری‌های گوارشی مانند تهوع، بی‌اشتهایی، استفراغ و درماتیت هم وجود دارد (Chui *et al.*, 2013). استفاده از شاخص‌های زیست محیطی یکی از روش‌های رایج برای بررسی، شناسایی و کمی‌سازی مقدار آلودگی خاک است. این شاخص‌ها معمولاً در خاک به دو گروه شاخص‌های منفرد و شاخص‌های تجمعی تقسیم می‌شود. شاخص‌های منفرد شامل عامل آلودگی، عامل غنی‌شدگی و عامل زمین انباشتگی می‌باشند، اما شاخص‌های تجمعی مواردی مانند درجه آلودگی و شاخص خطر اکولوژیک بالقوه را شامل می‌گردند که اثر تجمعی بیش از یک عنصر را مورد بررسی قرار می‌دهند (Qingjie *et al.*, 2008). نخستین گام در راستای چاره‌اندیشی و نیز پیشگیری از گسترش مشکل، آگاهی از میزان و چگونگی پراکنش آلودگی، شامل شناخت کانون‌ها و شدت گسترش آلودگی است که در طراحی و برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای نقش اساسی دارد. بدیهی است که پراکنش آلودگی در خاک احتمالاً حالتی کاملاً پیوسته داشته و تغییرات آن تدریجی است (Hendricks *et al.*, 1997). بنابراین استفاده از روشی که بتواند ماهیت پیوسته تغییرات عوامل آلاینده را در خاک نشان دهد، قادر به ارائه بینشی از گسترش و شدت آلودگی خواهد بود (Abdollahi *et al.*, 2013). حضور فلزات سنگین بیش از استانداردهای تعریف شده در محیط باعث بروز مشکلات و عوارض زیست محیطی برای ساکنان آن محل و اکوسیستم می‌گردد. تفاوت فلزات سنگین با ترکیبات آلی سمی در تخریب ناپذیری فلزات است (Kasraei, 2009). آگاهی از الگوی توزیع مکانی خاک‌های حاوی فلزات سنگین، می‌تواند نقش مهمی در ارزیابی پتانسیل آلودگی در یک منطقه داشته باشد. در مطالعه‌ای که Khosravi و همکاران (2017) بر روی پراکنش فلزات سنگین خاک‌های اطراف کارخانه سرب و

شمار می‌آید، شناسایی الگوهای جغرافیایی توزیع مکانی خاک‌های حاوی فلزهای سنگین می‌تواند نقش مهمی در ارزیابی پتانسیل آلودگی در یک منطقه، برنامه‌ریزی راهکارهای مدیریتی و بازیابی خاک‌های منطقه داشته باشد (Tang et al., 2013; Khosravi et al., 2017). هدف از این پژوهش، تعیین میزان آلودگی کادمیوم و مس در اراضی کشاورزی دشت شبستر با استفاده از شاخص‌های آلودگی منفرد (شاخص آلودگی PI، شاخص زمین‌انباشت I_{geo} ، شاخص غنی‌شدن EF) و تجمعی (شاخص آلودگی PI_n) در اراضی کشاورزی دشت شبستر و تغییرات مکانی غلظت این فلزات (پهنه‌بندی) می‌باشد. نتایج این تحقیق می‌تواند برای سازمان محیط زیست، سازمان منابع طبیعی و سازمان جهاد کشاورزی در تدوین برنامه‌های راهبردی کاهش آلودگی خاک‌ها به فلزات سنگین مفید واقع شود.

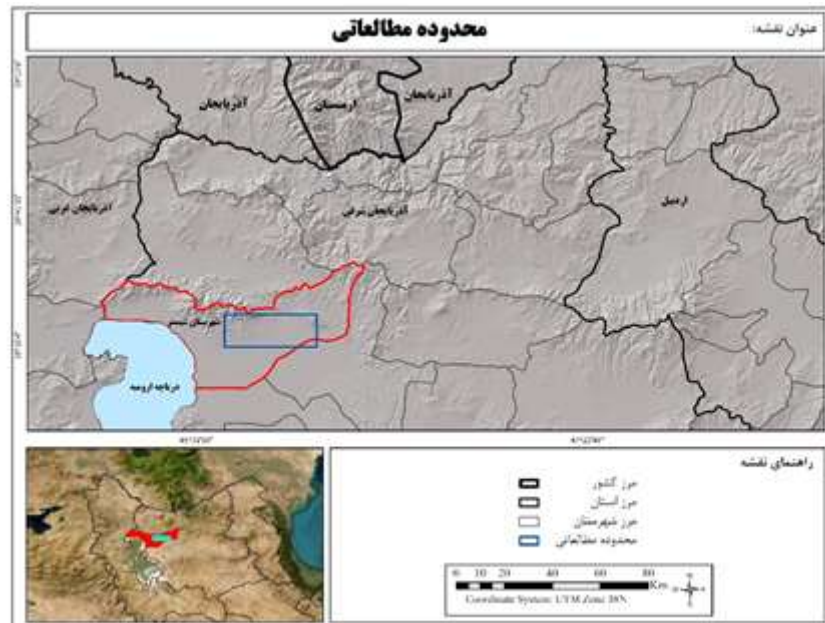
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی در محدوده جغرافیایی ۴۵ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی و ۴۲ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۴۲ درجه و ۶۰ دقیقه عرض شمالی دشت شبستر است که بخشی از حوضه آبریز دریاچه ارومیه بوده و در ۷۰ کیلومتری غرب شهر تبریز و در شمال دریاچه ارومیه قرار دارد (شکل ۱)، انجام شد. منطقه مطالعاتی ۱۲۹۳ کیلومترمربع مساحت دارد که ۵۰/۱/۱ کیلومتر مربع آن را آبخوان و بقیه را ارتفاعات تشکیل می‌دهد. بر اساس داده‌های ایستگاه هواشناسی بندر شرفخانه میانگین بارندگی در منطقه ۲۸۵/۶ میلی‌متر، میانگین تبخیر و تعرق ۱۶۵۷ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه هوا ۸/۱۲ درجه سانتی‌گراد است (Jeyhouni, 2018). زمین شناسی منطقه اغلب شامل سازندها و برون‌زدهای مارنی، گچی و آهکی میوسن است. اقلیم منطقه بر اساس روش دومارتن نیمه‌خشک و بر اساس روش آمبرژه، خشک سرد می‌باشد (Pirmohammadi Alisha et al., 2022).

روی زنگان انجام دادند، نتیجه گرفتند که بالاترین میانگین غلظت فلزات سنگین در خاک‌های سطحی، مربوط به عنصر روی و کمترین غلظت مربوط به کبالت بود (به ترتیب ۳۰۱۶۷ و ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) که در مقایسه با استانداردهای جهانی خارج از دامنه محدوده‌های اندازه‌گیری شده قرار داشت. آن‌ها مهم‌ترین دلیل چنین توزیع مکانی را فعالیت کارخانه دانستند. نتایج این مطالعه همچنین نشان داد که غلظت فلزات سنگین در مناطق مختلف با توجه به منابع آلاینده در هر منطقه متفاوت می‌باشد و غلظت این فلزات در مقایسه با میانگین خاک‌های منطقه به مراتب بالاتر است. در پژوهشی Gheshlagi و همکاران (۲۰۱۲) در بررسی آلودگی فلزی خاک‌های اطراف کوره ذوب فلز روی (Zn)، نتیجه گرفتند که خاک‌های اطراف کوره از لحاظ اکثر فلزات، آلودگی شدید تا خیلی شدید نشان دادند. در مطالعه‌ای که بر روی اثرات زیست محیطی فلزات سنگین (Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, V و Zn) در اطراف بزرگ‌ترین نیروگاه با سوخت زغال سنگ در صربستان انجام شد، بیشترین ضریب آلودگی را برای نیکل، سپس روی، کبالت و کادمیم گزارش شد (Ćujić et al., 2016). بررسی اثر رژیم جریان‌های رودخانه‌ای بر توزیع مکانی سه عنصر آرسنیک، مس و روی در خاک‌های بستر یک رودخانه فصلی و نیز خاک سطحی محدوده معدنی کارخانه‌های ذوب در حوزه آبخیز کوچک Guadalix در مادرید اسپانیا، نشان داد غلظت این سه عنصر در خاک بستر رودخانه نسبت به خاک سطحی، بسیار زیاد است (Helmhart et al., 2012). نتایج ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی با استفاده از چندین شاخص مانند فاکتور غنی‌شدگی، شاخص زمین انباشتگی و شاخص بارآلودگی، نشان از غنی‌شدگی معنی‌دار خاک‌ها با فلزات تیتانیوم، منگنز، روی، سرب، آرسنیک، آهن، استرانسیم و آنتیموان حاصل از ورودی از فعالیت‌های معدنی داد (Bhuiyana et al., 2010).

از آنجایی که آلودگی خاک به فلزات سنگین یکی از مشکلات اساسی و در حال گسترش خاک‌های کشور به



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

اس نسخه ۲۶ مورد تجزیه- تحلیل قرار گرفت. برای ترسیم نقشه‌های پیش‌بینی توزیع مکانی شاخص‌های آلودگی کادمیوم و مس از نرم‌افزار آرک/جی‌آی‌اس نسخه ۱۰.۸.۲ استفاده شد. با توجه به هدف مطالعه و همچنین مساحت منطقه مطالعاتی، از روش وز دهی عکس فاصله^۷ (IDW^۸) برای پهنه‌بندی و درون‌یابی غلظت فلزات سنگین استفاده شد و الگوی توزیع جغرافیایی مناطق آلوده به فلزات سنگین کادمیوم و مس با استفاده از شاخص‌های آلودگی، پیش‌بینی و تفکیک شد (Tang et al., 2013).

تعیین شاخص‌های آلودگی: ارزیابی آلودگی فلزات سنگین با استفاده از شاخص‌های منفرد از جمله شاخص آلودگی^۹، شاخص زمین‌انباشت (I_{geo}) و شاخص غنی‌شدن^{۱۰} صورت گرفت. شاخص آلودگی از معادله ۱ به‌دست آمد (Hakanson, 1980):

$$PI_i = \frac{C_i}{C_{Fi}} \quad (1)$$

در معادله ۱، C_i : غلظت فلز سنگین مورد مطالعه در نمونه خاک و C_{Fi} : غلظت زمینه فلز مربوطه می‌باشد (جدول ۱). کلاس‌های آلودگی خاک بر اساس این شاخص در جدول ۲ ارائه شده است (Hakanson, 1980).

نمونه‌برداری و تجزیه و تحلیل داده‌ها: برای دستیابی به اهداف این پژوهش، نمونه‌برداری از خاک سطحی و عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری انجام شد. موقعیت جغرافیایی محل‌های نمونه‌برداری با استفاده از دستگاه موقعیت‌یاب مکانی مشخص شد. جامعه آماری شامل تعداد ۶۰ نمونه خاک بود که به آزمایشگاه ارسال، هوا خشک و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. حجم همه نمونه‌ها به صورت تصادفی بود. آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی لازم شامل ویژگی‌های واکنش خاک (پ‌هاش)، هدایت الکتریکی در عصاره اشباع خاک^۱، درصد مواد خنثی شونده^۲، مقدار کربن آلی خاک^۳ با روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد (Soil conservation Service, 1992). به منظور اندازه‌گیری غلظت فلزات مس و کادمیوم، ابتدا از نمونه‌های خاک با استفاده از TEA^۴ و DTPA^۵ عصاره‌گیری گردید (Lindsay & Norvell, 1978). پس از عصاره‌گیری، غلظت فلزات کادمیوم و مس با دستگاه جذب اتمی (ICP^۶) اندازه‌گیری شد. پس از انجام تجزیه‌های آزمایشگاهی، شاخص‌های آلودگی تعیین و اطلاعات حاصل با استفاده از نرم افزار آماری اس پی اس

^۱Electrical conductivity in soil saturated paste

^۲Total neutralized volum (CaCO₃)

^۳Organic carbon

^۴Tri Ethanol Amine

^۵Diethylene Triamine Pentaacetic Acid

^۶Inductively Coupled Plasma Spectroscopy

^۷ Inverse distance weighting (IDW)

^۸ Inverse Distance Weighting

^۹ Pollution index (PI)

^{۱۰} Enrichment factor (EF)

جدول ۱- مقادیر غلظت زمینه برخی عناصر

فلز سنگین	Hg	Cd	As	Cu	Pb	Cr	Zn
غلظت زمینه (mg.kg ⁻¹)	۰/۲۵	۱/۰	۱۵	۵۰	۷۰	۹۰	۱۷۵
غلظت زمینه ژئوشیمیایی (mg.kg ⁻¹)	۰/۰۵	۰/۰۹	۴/۸	۲۸	۱۷	۹۲	۶۷

جدول ۲- کلاس‌های آلودگی خاک بر اساس شاخص آلودگی

شاخص آلودگی	کلاس بندی
PI < ۱	آلودگی کم
۱ ≤ PI < ۳	آلودگی متوسط
۳ ≤ PI < ۶	آلودگی قابل توجه
۶ ≤ PI	آلودگی خیلی زیاد

تأثیر نوسانات احتمالی در غلظت‌های زمینه که عموماً به تغییرات سنگ‌شناسی خاک و تأثیر عوامل انسانی نسبت داده می‌شود، اعمال شده است (Muller, 1981). این ضریب با تفکیک نوسانات طبیعی موجود در غلظت یک ماده معین در محیط، تغییرات حتی اندک ناشی از اثرات انسان‌زاد را نمایان می‌سازد (Rashid Shomali & Khodaverdiloo, 2012). بر طبق اظهارات مولر، شدت آلودگی خاک‌ها بر اساس مقدار شاخص I_{geo} در هفت کلاس گروه‌بندی می‌شود (جدول ۳).

شاخص زمین انباشت (I_{geo}) از معادله ۲ به دست آمد (Muller, 1981):

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_n}{1.5GB} \right] \quad (2)$$

در معادله ۲، I_{geo}: شاخص انباشت ژئوشیمیایی یا شاخص شدت آلودگی، C_n: غلظت فلز سنگین مورد مطالعه در خاک و GB: غلظت زمینه ژئوشیمیایی فلز مورد مطالعه می‌باشد. مقادیر غلظت زمینه ژئوشیمیایی برخی عناصر در جدول ۱ ارائه شده است (Muller, 1981). ضریب ۱/۵، ضریب تصحیحی است که به منظور به کمینه رساندن

جدول ۳- کلاس‌های شدت آلودگی خاک‌ها بر اساس شاخص زمین‌انباشت (اقتباس از Muller, 19080)

کلاس	مقدار شاخص زمین‌انباشت	شدت آلودگی
A	I _{geo} ≤ ۰	غیرآلوده
B	۰ < I _{geo} ≤ ۱	غیرآلوده تا آلودگی متوسط
C	۱ < I _{geo} ≤ ۲	آلودگی متوسط
D	۲ < I _{geo} ≤ ۳	آلودگی متوسط تا زیاد
E	۳ < I _{geo} ≤ ۴	آلودگی زیاد
F	۴ < I _{geo} ≤ ۵	آلودگی شدید
G	I _{geo} ≥ ۵	آلودگی بسیار شدید

به‌عنوان مرجع در نظر گرفته که این عنصر باید غیرمتحرک بوده و تحت تأثیر فعالیت‌های بشر قرار نگیرد. لیتیم (Li)، آلومینیوم (Al)، آهن (Fe)، اسکاندیم (Sc)، تیتانیوم (Ti)، و زیرکونیوم (Zr) عناصری هستند که از

یکی از روش‌های رایج برای ارزیابی اثرات انسان‌زاد بر روی خاک، محاسبه ضریب غنی‌شدن (EF) است. محاسبه ضریب غنی‌شدن بر اساس استانداردسازی عنصر اندازه‌گیری شده در برابر یک مرجع با تغییرپذیری کم مشخص می‌شود. برای تعیین این شاخص، یک عنصر را

است. مقادیر شاخص غنی‌شدن نزدیک به واحد، به عنوان عناصر منشاء پوسته زمین و عدم تغییر در شرایط طبیعی عنصر مورد مطالعه تفسیر می‌شود. برعکس، اگر مقادیر شاخص غنی‌شدن بزرگتر از واحد باشد، سهم سایر منابع طبیعی (مانند آتشفشان‌ها، انتشار نمک دریا، آتش‌سوزی جنگل‌ها و منابع زیست‌زای دریایی) یا منابع انسانی مهم می‌شود (Rashki *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2015; Norouzi *et al.*, 2017). ویژگی‌های پنج کلاس آلودگی بر اساس مقادیر شاخص غنی‌شدن در جدول ۴ ارائه شده است (Han *et al.*, 2014; Norouzi *et al.*, 2017).

آن‌ها بیشتر به عنوان عناصر مرجع استفاده می‌شود. ضریب غنی‌شدگی از معادله ۳ محاسبه می‌شود:

$$EF = \frac{[\frac{C_n}{LV}]_{\text{sample}}}{[\frac{C_n}{LV}]_{\text{background}}} \quad (3)$$

در معادله ۳، C_n Sample: غلظت فلز سنگین مورد مطالعه در نمونه و LV Sample: غلظت عنصر مرجع در نمونه است که در این مطالعه، آهن در نظر گرفته شد. GB background و LV background نیز به ترتیب غلظت یا مقدار زمینه فلز سنگین مورد مطالعه و عنصر مرجع را نشان می‌دهد (جدول ۱). هر چه مقدار شاخص غنی‌شدن افزون‌تر باشد، نشان می‌دهد که سهم عوامل انسانی در افزایش آلودگی فلز مورد نظر در خاک منطقه افزون‌تر

جدول ۴- کلاس‌بندی شدت آلودگی خاک بر اساس مقادیر شاخص غنی‌شدن و شاخص آلودگی نمره

نتیجه ارزیابی	مقدار عددی شاخص آلودگی نمره (PI_n)	نتیجه ارزیابی	مقدار عددی فاکتور غنی‌سازی (EF)	شماره کلاس آلودگی
دامنه ایمن	$PI_n \leq 0.7$	کمینه آلودگی	< 2	۱
دامنه احتیاط	$0.7 < PI_n \leq 1$	آلودگی متوسط	۲-۵	۲
دامنه کمی آلوده	$1 < PI_n \leq 2$	آلودگی قابل توجه	۵-۲۰	۳
دامنه نسبتاً آلوده	$2 < PI_n \leq 3$	آلودگی زیاد	۲۰-۴۰	۴
دامنه به شدت آلوده	$3 < PI_n$	آلودگی بسیار زیاد	> 40	۵

لحاظ آلودگی در پنج کلاس طبقه‌بندی می‌شود (جدول ۴) (Kowalska *et al.*, 2018).

نتایج

خلاصه‌ای از وضعیت آماری برخی ویژگی‌های نمونه‌های مورد مطالعه در جدول ۵ ارائه شده است. نمونه‌های مورد مطالعه جزو خاک‌های قلیایی محسوب گردیده و از لحاظ شوری و مقدار کربن آلی خاک منطقه ناهمگن است. همچنین از آنجایی که نوع کاربری اراضی مورد مطالعه دگرگونه می‌باشد (مراتع، اراضی کشاورزی و مناطق مسکونی)، این موضوع بر روی شوری و مقدار مواد آلی خاک تأثیرگذار بوده است. از لحاظ درصد مواد خنثی شونده که حاکی از میزان آهک خاک است، خاک همگن است (میانگین ۱۷/۱۸ درصد).

به منظور ارزیابی آلودگی مجموعه‌ای از فلزات سنگین، از شاخص آلودگی نمره (PI_n) استفاده شد. از این شاخص برای بررسی مقدار خطر آلودگی و آگاهی از پتانسیل آلودگی استفاده می‌شود. مزیتی که این شاخص نسبت به شاخص‌های دیگر دارد این است که در این شاخص، ریسک آلودگی به همه فلزاتی که مورد مطالعه قرار می‌گیرد در منطقه مشخص می‌شود. این شاخص با استفاده از معادله ۴ به دست آمد (Kowalska *et al.*, 2018):

$$PI_n = \sqrt{\frac{(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n PI_i)^2 + PI_{\max}^2}{n}} \quad (4)$$

در معادله ۴، PI_n : شاخص آلودگی نمره، PI_{\max} : بیشینه شاخص آلودگی فلزات سنگین و n : تعداد فلزات سنگین می‌باشد. بر اساس شاخص آلودگی نمره، کیفیت خاک از

جدول ۵- خلاصه آماری برخی خصوصیات خاک در منطقه مورد مطالعه

مواد خنثی شونده (%)	کربن آلی (%)	هدایت الکتریکی (dS.m ⁻¹)	واکنش خاک (پهاش)	
۹/۷۵۰	۰/۳۱۰	۰/۹۲۰	۷/۲۰۰	کمینه
۲۳/۵۰۰	۱/۶۹۰	۱۹/۵۰۰	۸/۳۳۰	بیشینه
۱۷/۱۷۶	۰/۷۷۱	۴/۲۸۲	۷/۷۴۶	میانگین
۳/۰۶۸	۰/۳۰۰	۳/۷۹۸	۰/۱۹۸	انحراف استاندارد
۹/۴۱۳	۰/۰۹۰	۱۴/۴۲۳	۰/۰۳۹	واریانس

مقالات برای غلظت کادمیوم (۲-۰/۰۱ میلی گرم بر کیلوگرم) خاک‌های منطقه مورد مطالعه دارای غلظت زیادی از کادمیوم می‌باشد.

خلاصه آماری غلظت فلزات سنگین کادمیوم و مس در نمونه‌های مورد مطالعه در جدول ۶ ارائه شده است. میانگین غلظت کادمیوم و مس به ترتیب، ۱/۰۵۱ و ۱/۳۴۲ میلی گرم بر کیلوگرم بود. طبق محدوده اعلام شده در

جدول ۶- خلاصه آماری غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های مورد مطالعه (mg/kg)

مس	کادمیوم	
۶۰	۶۰	تعداد نمونه
۰/۶۶۰	۰/۳۳۰	کمینه
۲/۸۸۰	۱/۸۷۰	بیشینه
۱/۳۴۲	۱/۰۵۱	میانگین
۱/۳۱۰	۰/۹۵۰	میانه
۰/۴۵۷	۰/۴۳۸	انحراف استاندارد
۰/۲۰۹	۰/۱۹۲	واریانس
۱۵۰ ^c -۵۰۰ ^d	---	استاندارد کیفیت خاک کانادا ^a
۲-۲۵۰	۰/۰۱-۲	محدوده اعلام شده در مقالات ^b

a: Canadian Soil Quality Guideline, b: Typical literature ranges, c: کاربری اراضی صنعتی، d: کاربری اراضی کشاورزی

می‌گیرد. محدوده تغییرات شاخص آلودگی برای فلز مس ۰/۰۱۳ تا ۰/۰۵۸ و مقدار میانگین این شاخص ۰/۰۲۶۷ بود (جدول ۷). مقادیر به دست آمده این شاخص در تمام نمونه‌های خاک کمتر از یک بود (آلودگی کم). در پژوهشی که به بررسی غلظت عناصر کمیاب در خاک و گیاهان اطراف معدن مس میدوک در استان کرمان انجام شد، علت بالا بودن عناصر مس، آرسنیک، روی، سرب، نقره کادمیم و سلنیم در خاک منطقه معدن مس، تأثیر عوامل انسان‌زاد معدن‌کاوی و نیز وجود سد رسوب‌گیر در منطقه گزارش شد (Mor et al., 2014).

شاخص آلودگی (PI): محاسبه شاخص آلودگی فلز کادمیوم در نمونه‌های خاک (جدول ۷) نشان داد بیشینه مقدار این شاخص برای فلز کادمیوم ۱/۸۷۰ و کمینه مقدار آن ۰/۳۳۰ بود. مقدار میانگین این شاخص برای فلز کادمیوم ۱/۰۵۱ به دست آمد. نتایج نشان داد که در ۴۳/۳۴ درصد نمونه‌ها (۲۶ نمونه از ۶۰ نمونه) مقادیر این شاخص عددی بین ۳ تا ۱ بود ($PI < 3$)، که طبق کلاس‌بندی (Hakanson, 1980) (جدول ۲) در کلاس آلودگی متوسط و در بقیه نمونه‌ها، مقدار این شاخص کمتر از ۱ بود ($PI < 1$) که در کلاس آلودگی کم قرار

جدول ۷- مقادیر شاخص‌های آلودگی محاسبه شده در نمونه‌های مورد مطالعه

شاخص	مقادیر	کادمیوم	مس
شاخص آلودگی	میانگین	۱/۰۵۱	۰/۰۲۶۷
	کمینه	۰/۳۳۰	۰/۰۱۳
	بیشینه	۱/۸۷۰	۰/۰۵۸
شاخص زمین‌انباشت	میانگین	۲/۸۲۹	-۵/۰۵۰
	کمینه	۱/۲۹۰	-۵/۹۹۲
	بیشینه	۳/۷۹۲	-۳/۸۶۶
شاخص غنی‌شدن	میانگین	۷۶/۰۹۵	۰/۳۵۳
	کمینه	۱۹/۱۷۱	۰/۱۳۰
	بیشینه	۲۰۳/۱۹۴	۱/۱۱۷
شاخص آلودگی نمره	میانگین	۱/۳۸۴	
	کمینه	۱/۳۲۹	
	بیشینه	۱/۴۸۴	

(جدول ۷). در همگی نمونه‌ها، مقادیر این شاخص کمتر از ۲ بود ($EF < 2$) که طبق جدول ۴ در کلاس مقدار آلودگی کم^{۱۳} قرار گرفت. در پژوهش‌هایی که از شاخص غنی‌شدن و شاخص انباشتگی زمین برای بررسی آلودگی فلزات سنگین در رسوبات رودخانه‌ای استفاده شده است، نتایج نشان داد که شاخص غنی‌شدن افزون‌تر از ۱/۵ نشان دهنده آن است که منبع فلزات سنگین عمدتاً از فعالیت‌های انسان‌زاد مانند معدن‌کاری، میدان‌های نفتی، کارخانجات صنعتی و غیره می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که غلظت مس در رسوبات رودخانه در مدت زمان ۱۱ سال، به میزان ۲۰ تا ۳۸ برابر افزایش یافته است (Lin et al., 2015).

شاخص آلودگی نمره (PI_n): بیشینه مقدار شاخص آلودگی نمره (PI_n) برای فلزات سنگین مورد مطالعه (کادمیوم و مس) ۱/۴۸۴ و کمینه مقدار آن ۱/۳۲۹ بود. مقدار میانگین این شاخص ۱/۳۸۴ به‌دست آمد (جدول ۷). همچنین نتایج نشان داد که تمام مقادیر به‌دست آمده این شاخص، دارای اعدادی بین ۱ و ۲ ($1 < PI_n \leq 2$) بوده است. طبق کلاس‌بندی این شاخص (جدول ۴) تمام نمونه‌های مورد مطالعه در کلاس آلودگی کم^{۱۴} قرار گرفت. در پژوهشی که از شاخص آلودگی نمره (PI_n) و شاخص آلودگی (PI) برای ارزیابی آلودگی محیط زیست

شاخص زمین‌انباشت (I_{geo}): بررسی نمونه‌ها از لحاظ شاخص زمین‌انباشت (I_{geo}) نشان داد که مقادیر این شاخص اعدادی بین ۳/۷۹۲ تا ۱/۲۹۰ برای آلودگی فلز کادمیوم بود. در واقع اعدادی بین ۱ و ۴ به‌دست آمد که طبق کلاس‌بندی مولر (جدول ۳)، در کلاس‌های آلودگی C (آلودگی متوسط) تا E (آلودگی زیاد) قرار می‌گیرد. اما میانگین عددی این شاخص ($I_{geo} = 1/290$) نشان می‌دهد که در کل، خاک‌های منطقه از لحاظ آلودگی کادمیوم، در کلاس متوسط قرار می‌گیرند. برای آلودگی فلز مس، مقادیر این شاخص اعدادی منفی و کمتر از صفر بود (جدول ۷). طبق کلاس‌بندی مولر، این خاک‌ها غیرآلوده محسوب می‌گردد.

شاخص غنی‌شدن (EF): محدوده تغییرات شاخص غنی‌شدن برای فلز کادمیوم ۱۹/۱۷۱ تا ۲۰۳/۱۹۴ و مقدار میانگین برابر ۷۶/۰۹۵ به‌دست آمد (جدول ۷). در بیشتر نمونه‌ها مقادیر این شاخص بیشتر از ۴۰ بود ($EF > 40$)، که در کلاس آلودگی بسیار زیاد^{۱۱} (Norouzi et al., 2017) قرار می‌گیرد (جدول ۴). در بقیه نمونه‌ها، مقادیر این شاخص بین ۲۰ تا ۴۰ بود ($20 < EF \leq 40$) که در کلاس آلودگی خیلی زیاد^{۱۲} قرار می‌گیرد. محدوده تغییرات فاکتور شاخص غنی‌شدن برای فلز مس ۰/۱۳۰ تا ۱/۱۱۷ بود و مقدار میانگین برابر ۰/۳۵۳ به‌دست آمد

¹³ Minimal pollution¹⁴ Slightly polluted domain¹¹ Extremely high pollution¹² Very high pollution

بیشترین مقدار این شاخص بوده و در کلاس آلودگی بسیار زیاد^{۲۰} قرار گرفت. هر چه از سمت شرق منطقه به سمت غرب پیش می‌رویم، از میزان آلودگی کاسته شده است. توزیع مکانی آلودگی خاک به فلزات سنگین کادمیوم و مس بر اساس عامل شاخص آلودگی نمره در شکل ۵ ارائه شده است.

استفاده شده است، نتایج نشان داده است که آلودگی فلزات سنگین در گرد و غبار بسیار زیاد بوده و مناطق با تراکم جمعیت زیاد، دارای ترافیک سنگین و دارای فعالیت‌های صنعتی زیاد، آلودگی شدید ناشی از فلزات سنگین دارند. همچنین نتایج نشان داده است که منشأ عناصر سرب، روی، مس و کروم انسان‌زاد و منشأ فلزات کادمیوم و آرسنیک زمین‌زاد بوده است (Qanawati & Nazarpour, 2018).

پهنه‌بندی بر اساس شاخص‌های آلودگی: توزیع مکانی آلودگی خاک به فلز کادمیوم بر اساس شاخص آلودگی نشان داد که قسمت شمال‌شرقی منطقه مورد مطالعه دارای افزون‌ترین مقدار این شاخص بوده و در کلاس آلودگی شدید^{۱۵} ($6 \leq PI$) قرار داشت. قسمت‌های مرکزی در کلاس آلودگی متوسط^{۱۶} ($1 < PI < 3$) و قسمت‌های غرب در کلاس آلودگی کم^{۱۷} ($PI < 1$) قرار داشت (شکل ۲-الف). توزیع مکانی آلودگی خاک به فلز مس نشان داد که قسمت‌های مرکزی و قسمت کوچکی از شمال‌شرقی منطقه مورد مطالعه از لحاظ این شاخص در کلاس آلودگی شدید ($6 \leq PI$) قرار داشت. هر چه از سمت غرب منطقه مورد مطالعه به سمت شرق پیش می‌رویم، میزان آلودگی بیشتر شده است (شکل ۲-ب).

توزیع مکانی آلودگی خاک به فلزات سنگین کادمیوم (شکل ۳-الف) و مس (شکل ۳-ب) بر اساس شاخص زمین‌انباشت نشان داد که قسمت‌های شمال شرقی و مرکزی منطقه مورد مطالعه دارای بیشترین مقدار این شاخص بوده و در کلاس آلودگی شدید^{۱۸} قرار گرفت. بقیه مناطق نیز در کلاس آلودگی متوسط تا زیاد^{۱۹} قرار داشت. بررسی‌ها نشان داد در واقع مناطقی که دارای کاربری کشاورزی بوده، از لحاظ فلز کادمیوم و مس آلوده محسوب می‌گردد. به نظر می‌رسد مصرف بی‌رویه آفت‌کش‌های شیمیایی (مانند علف‌کش‌ها، حشره‌کش‌ها، قارچ‌کش‌ها و غیره) در این مناطق، علت این موضوع باشد.

توزیع مکانی آلودگی خاک به فلزات کادمیوم (شکل ۴-الف) و مس (شکل ۴-ب) بر اساس شاخص غنی‌شدن نشان داد که قسمت‌های شرقی منطقه مورد مطالعه دارای

¹⁵ Very high contaminated

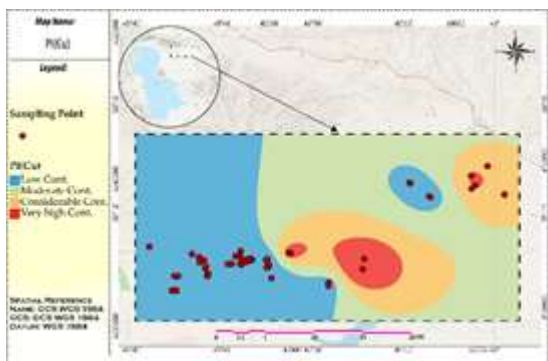
¹⁶ Moderat contaminated

¹⁷ Low contaminated

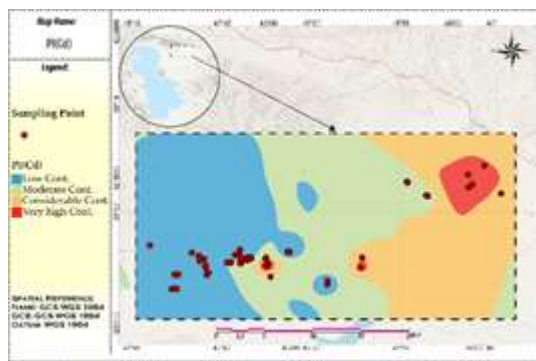
¹⁸ Strongly/ Extremely contaminated

¹⁹ Moderately/ Strongly contaminated

²⁰ Extremely high pollution

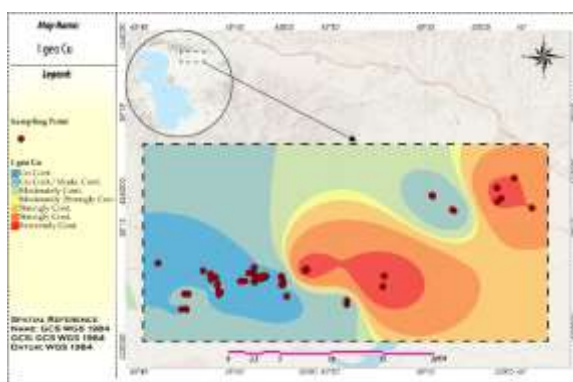


(ب)

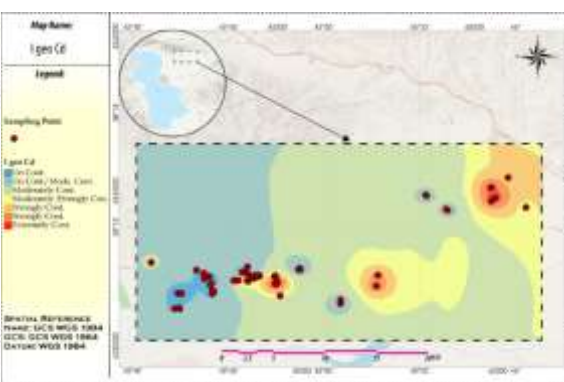


(الف)

شکل ۲- پهنه‌بندی شاخص آلودگی (PI برای الف) فلز کادمیوم و ب) فلز مس در منطقه مورد مطالعه (Low Cont.: آلودگی کم، Moderate Cont.: آلودگی متوسط، Considerable Cont.: آلودگی قابل توجه، Very high Cont.: آلودگی خیلی زیاد)

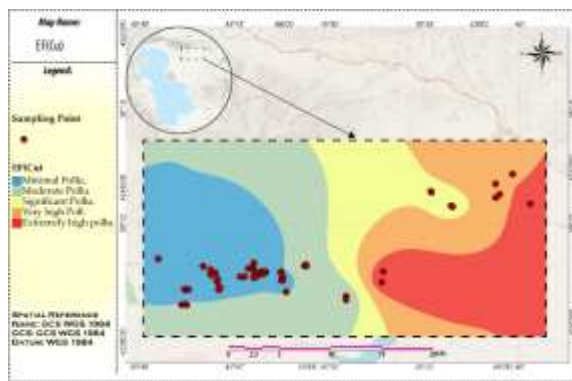


(ب)

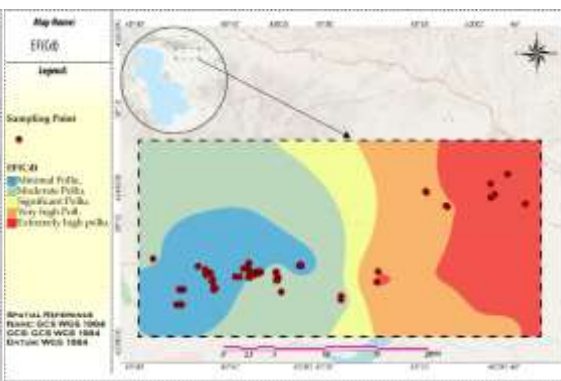


(الف)

شکل ۳- پهنه‌بندی شاخص زمین‌انباشت (I_{geo} برای الف) فلز کادمیوم و ب) فلز مس در منطقه مورد مطالعه (Un Cont./Mode. Cont.: غیر آلوده، Moderately/Strongly Cont.: آلودگی متوسط، Moderately Cont.: آلودگی متوسط تا زیاد، Strongly Cont.: آلودگی زیاد، Extremely Cont./Strongly/Extremely Cont.: آلودگی شدید، Extremely Cont.: آلودگی بسیار شدید)

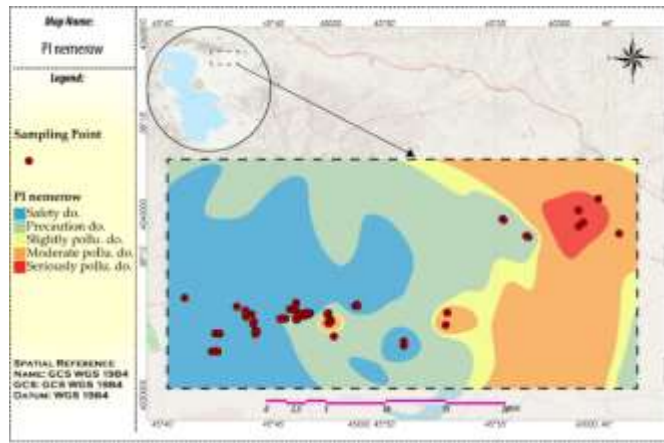


(ب)



(الف)

شکل ۴- پهنه بندی شاخص غنی‌شدن برای الف) فلز کادمیوم و ب) فلز مس در منطقه مورد مطالعه (Minimal Pollu.: کمینه آلودگی، Moderate Pollu.: آلودگی متوسط، Significant Pollu.: آلودگی قابل توجه، Very high Pollu.: آلودگی زیاد، Extremely high Pollu.: آلودگی بسیار زیاد)



شکل ۵- پهنه بندی شاخص آلودگی نمره (PI_n) برای فلزات کادمیوم و مس در منطقه مورد مطالعه

Safety do. : دامنه ایمن، Precaution do. : دامنه احتیاط، Slightly pollu. do. : دامنه کمی آلوده، Moderate pollu.do. : دامنه نسبتاً آلوده، Seriously pollu. do. : دامنه به شدت آلوده)

داد که غلظت فلزات سنگین در مناطق مختلف با توجه به منابع آلاینده در هر منطقه متفاوت می‌باشد و غلظت این فلزات در مقایسه با میانگین خاک‌های منطقه به مراتب بالاتر است. از آنجائی‌که در اطراف منطقه مورد مطالعه، کارخانه‌ای وجود ندارد، غلظت مس در نمونه‌های مورد مطالعه کم بود، اما بیشتر بودن غلظت کادمیوم احتمالاً دلیل دیگری دارد. از آنجائیکه نوع کاربری منطقه کشاورزی است، می‌تواند به علت مصرف کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها باشد. حضور فلزات سنگین بیش از استانداردهای تعریف شده در محیط باعث بروز مشکلات و عوارض زیست محیطی برای ساکنان آن محل و اکوسیستم می‌گردد (Kasraei, 2009). از آنجائی‌که در مطالعات متعددی از این شاخص، برای ارزیابی میزان آلودگی خاک‌ها استفاده شده است، لذا می‌توان به نتایج به‌دست آمده از آن استناد کرد (Qanawati & Nazarpour, 2018; Sadeghdoust et al., 2019).

در پژوهشی Rashid Shomali و Khodaverdiloo (۲۰۱۲) که برای بررسی سطوح آلودگی خاک‌ها و گیاهان پیرامون جاده با بار ترافیکی زیاد به فلزات سنگین، از شاخص زمین‌انباشت استفاده شد، نتایج نشان داد که میانگین این شاخص برای فلزات کادمیوم، سرب، روی و نیکل به ترتیب مقادیر ۰/۴۸، ۱/۲۰، ۰/۶۷ و ۰/۴۲ به‌دست آمد. در پژوهشی که توسط Rubio و همکاران (۲۰۰۰) بر روی آلودگی فلزات سنگین در رسوبات رودخانه‌ای صورت گرفت، نتایج نشان داد ۹۰ درصد نمونه‌ها از لحاظ آلودگی مس در کلاس A (غیرآلوده) قرار داشت. نمونه‌های مورد

بحث

عوامل تولید کادمیوم در خاک ممکن است منابع مختلفی از جمله کشاورزی، کودهای فسفات، رسوبات صنعت یا لجن فاضلاب باشد (Maas et al., 2010). در پژوهشی بیشترین آلودگی کادمیم در کاربری کشاورزی به‌دست آمده است (Zarei et al., 2023). با توجه به این‌که نوع کاربری منطقه کشاورزی بود، این نتیجه دور از انتظار نیست. پیشینه استاندارد غلظت کادمیوم در خاک‌های جهان، ۰/۳۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم (Adriano, 2001) و در ایران ۳/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم است (Deputy of Human Environment, 2017)، درحالی‌که غلظت کادمیوم در نمونه‌های بررسی شده در این مطالعه بین ۰/۳۳ تا ۱/۸۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود.

نتایج مطالعات Khodakarami (۲۰۱۰) نشان داده است که عامل اصلی مؤثر بر افزایش غلظت عناصر کروم، مس، نیکل و روی در منطقه مورد بررسی، ساختار زمین شناسی است. در پژوهشی میانگین غلظت مس در خاک پارک‌های شهر اهواز ۲۸/۷۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است (Kaydan et al., 2019). به غیر از اثرات سمی، گزارش شده است که فلزات خاصی همانند مس، سلنیم و روی دارای برخی نقش‌های مهم و مفید در سوخت و ساز بدن انسان هستند.

در پژوهشی که بر روی غلظت فلزات نیکل، مس و کادمیوم در اطراف کارخانه سرب و روی اطراف شهر زنجان صورت گرفت، مهم‌ترین دلیل غلظت بالای این فلزات را فعالیت کارخانه دانستند. نتایج این مطالعه نشان

فعالیت‌های شهری در مناطق شهری، باعث افزایش غلظت عنصر مس و روی در این دو کاربری شده است. نتایج نشان داد خاک منطقه جزو خاک‌های قلیایی بوده، اما از آنجایی که نوع کاربری اراضی متفاوت است، لذا این موضوع بر روی میزان مواد آلی خاک و شوری خاک تأثیر می‌گذارد. از طرفی خاک‌های منطقه مورد مطالعه، از لحاظ میزان آهن همگن بوده (با میانگین ۱۷/۱۸ درصد) و جزو خاک‌های آهکی طبقه‌بندی می‌گردد. در کل نتایج بررسی وضعیت آلودگی فلز کادمیوم در خاک‌های منطقه مورد مطالعه نشان داد که میانگین غلظت کادمیوم (۱/۰۵۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) زیادتیر از بیشینه استاندارد جهانی (۰/۳۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود، اما پایین‌تر از بیشینه استاندارد ایران (۳/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) است) بود. نتایج بررسی شاخص‌های آلودگی نشان داد خاک‌های منطقه از لحاظ شاخص آلودگی، در کلاس آلودگی متوسط برای فلز کادمیوم و آلودگی کم برای فلز مس قرار داشت. از لحاظ شاخص زمین‌انباشت، نتایج نشان داد اکثر خاک‌های منطقه از لحاظ آلودگی کادمیوم در کلاس آلودگی متوسط تا زیاد و از لحاظ آلودگی مس در کلاس غیرآلوده قرار داشت. همچنین از لحاظ شاخص غنی‌شدن، خاک‌های منطقه در کلاس آلودگی بسیار زیاد از لحاظ آلودگی فلز کادمیوم و در کلاس کمینه آلودگی از لحاظ آلودگی فلز مس قرار داشت. از آنجایی که خاک‌های منطقه مورد مطالعه از لحاظ فلز مس آلوده نبود، در نتیجه نتایج شاخص آلودگی نمره نشان داد که خاک‌های منطقه مورد مطالعه در کلاس با آلودگی کم قرار دارد. توزیع مکانی آلودگی فلزات سنگین بر اساس شاخص‌های آلودگی و با استفاده از روش وزن‌دهی عکس فاصله نشان داد که قسمت‌های شمال شرقی منطقه مورد مطالعه که دارای کاربری کشاورزی می‌باشد، دارای افزون‌ترین مقدار این شاخص برای کادمیوم بوده و از لحاظ آلودگی کادمیوم در کلاس آلودگی بسیار زیاد تا متوسط و از لحاظ آلودگی فلز مس، در کلاس آلودگی کم تا غیرآلوده قرار داشت. در راستای تکمیل این پژوهش، پیشنهاد می‌گردد تا توزیع مکانی سایر فلزات سنگین مانند نیکل (Ni)، آرسنیک (As)، سرب (Pb) و روی (Zn) در منطقه مورد مطالعه نیز مورد بررسی قرار بگیرد. افزون بر این، برای پیشگیری، کنترل و کاهش آلودگی خاک‌ها به فلزات سنگین، راه‌های مؤثر، برنامه‌ریزی‌های مدیریتی مناسب و کارآمدتر ارائه

بررسی آن‌ها از لحاظ آلودگی سرب، بیشترین مقدار این شاخص را نشان داد. آن‌ها همچنین در نتایج خود گزارش نمودند که در استنباط آلودگی منطقه به فلزات سنگین، غلظت زمینه مورد استفاده نقش بسیار مهمی دارد. در مطالعه‌های دیگر که توسط Young و همکاران (۲۰۱۲) صورت گرفت، آلودگی فلزات مختلف در رسوبات رودخانه‌ای بر اساس شاخص زمین‌انباشت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تمام رسوبات تجزیه و تحلیل شده از نظر فسفر، روی و کروم بسیار آلوده و از نظر سرب و نیکل متوسط هستند.

در مطالعاتی که از شاخص غنی‌شدن برای ارزیابی آلودگی خاک‌ها استفاده شده است، نتایج نشان داده است که فعالیت‌های کشاورزی ناشی از مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی، موجب افزایش غلظت این عناصر در خاک شده است (Rubio et al., 2000; Khodakarmi et al., 2014; Kaydan et al., 2019; Norouzi et al., 2017).

نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که مصرف کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها در اراضی کشاورزی، موجب افزایش غلظت کادمیوم می‌گردد (Kaydan et al., 2019; Sadeghdoust et al., 2019). در منطقه مورد مطالعه نیز، اراضی با کاربری کشاورزی، آلودگی کادمیوم بیشتری نشان داد.

همانگونه که اشاره شد از روش وزن‌دهی عکس فاصله برای پهنه‌بندی و درون‌یابی غلظت فلزات سنگین در منطقه مورد مطالعه استفاده شد. Lotfi و Atabaki (۲۰۱۸) در پژوهشی چنین نتیجه گرفته‌اند که برای ارزیابی دقت و صحت روش‌های گوناگون درون‌یابی برای تعداد نمونه‌های کم، روش وزن‌دهی عکس فاصله، دقیق‌ترین روش می‌باشد. بررسی توزیع مکانی فلزات سنگین کادمیوم، مس و سرب در خاک‌های شهرستان نهاوند با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و زمین‌آمار نشان داده است که عناصر کادمیوم، مس و سرب منشأ زمین‌شناسی و کشاورزی داشته و در حقیقت این فلزات به طور طبیعی در خاک وجود دارد، اما فعالیت‌های انسان سبب تجمع بیشتر این فلزات در خاک شده است (Azimzade Ismaili Kandi, Shabbazi et al., 2011). در مطالعات خود نتیجه گرفته‌اند که فعالیت‌های انسانی در کاربری کشاورزی و همچنین حمل و نقل و

- approach. *Journal of Water Research*, 14 (8): 975–1001.
11. **Han, N.M.M., Latif, M.T., Othman, M., Dominick, D., Mohamad, N., Juahir, H. and Tahir, N.M., 2014.** Composition of selected heavy metals in road dust from Kuala Lumpur city center. *Environ. Earth Sci.*, 72, 849-859.
 12. **Helmhart, M., O'Day, P.A., Garcia-Guinea, J., Serrano, S. and Garrido, F., 2012.** Arsenic, Copper, and Zinc leaching through preferential flow in mining-impacted soils. *Soil Chemistry*, 76 (2), 449-462.
 13. **Hendricks Franssen, H.J.W.M., Van Eijnsbergen, A.C. and Stien, A., 1997.** Use of spatial prediction techniques and fuzzy classification for mapping soil pollutants. *Geoderma*, 77: 243-262.
 14. **Henry, J.R., 2000.** An Overview of the Phytoremediation of Lead and Mercury. U.S. Environmental Protection Agency Office of Solid Waste and Emergency Response Technology Innovation office. Washington, D.C. P. 55.
 15. **Jeyhouni, A., 2018.** Determining the underground water balance of Shabstar Plain and investigating the possibility of feeding it, National Conference on Management of Drought Stress and Water Shortage in Agriculture, Arsanjan, Iran. (In Persian)
 16. **Jing, F., Chen, X., Yang, ZH. and Guo, B., 2018.** Heavy metals status, transport mechanisms, sources, and factors affecting their mobility in Chinese agricultural soils. *Environmental Earth Sciences*, 77, 104.
 17. **Kasraei, P., 2009.** Heavy metals in the environment. *Electronic Journal of Ecology*, 1, 28-32 (In Persian).
 18. **Kaydan, Z., Nazarpour, A. and Ghanavati, N., 2019.** Evaluation of Soil Pollution with Heavy Metals (Pb, Zn, Cu, Cr, Ni and V) in Ahvaz Parks (in 2016), *health and health Journal*, 10(2), 228-239 (In Persian).
 19. **Kishe, M. and Machiwa, J., 2003.** Distribution of heavy metals in sediments of Mwanza Gulf of Lake Victoria, Tanzania. *Environment International*. 28(7); 619-25.
 20. **Khodakarami, L., 2010.** Assessment of Non-Point Source Agricultural Pollution Using GIS and RS, Master of Science (M. Sc) Thesis, Isfahan University of Thechnologh, Isfahan, Iran (In Persian)
 21. **Khodakarmi, L., Sufianian, A.R., Mohammadi Tofiq, A. and Mirghafari, N.A., 2014.** Investigating the concentration of Copper, Zinc and Arsenic in the soil using RS and GIS (case study: Kabudar Ahang, Razan and Khunjin-Talkhab watershed in Hamadan province). *Remote sensing and geographic information system in natural resources*, 5 (3), 45-55 (In Persian).
- گردد. یکی از روش‌های مؤثر و کارآمد برای کاهش آلودگی خاک‌ها به فلزات سنگین، استفاده از فن‌آوری سبزی یا گیاه‌پالایی^{۲۱} می‌باشد. لذا پیشنهاد می‌گردد پژوهش‌هایی در زمینه استفاده از گیاهان بومی منطقه برای کاهش آلودگی خاک‌ها به فلزات سنگین انجام پذیرد.

منابع

1. **Abdollahi, S., Delavar, M.A. and Shekari, P., 2013.** umeral Analysis of Soil Pollution Distribution of Heavy Metals in Anguran Area, Zanzan, *Water and soil Journal*, 26 (5), 1140-1151(In Persian with English abstract).
2. **Adriano, D., 2001.** Trace Elements in the Terrestrial Environment, *Biochemistry, Bioavailability and Risks of Metals* (2nd editio), New York: Springer-Verlag, 867 p.
3. **Atabaki, M.R. and Lotfi, A., 2018.** Investigation of heavy metal soil concentration (Pb, Cd, Zn and Cu) in different areas of Isfahan in 1396, *Quarterly journal of research in environmental health*, 4(1), 21-30. (In Persian with English abstract)
4. **Azimzade Ismaili Kandi, B., 2012.** Spatial analysis and monitoring of some heavy metals in the surface soil of a part of Mazandaran province, Master of Science (M. Sc) Thesis, Isfahan University of Thechnologh, Isfahan, Iran (In Persian).
5. **Bhuiyana, M.A.H., Parvez, L., Islam, M.A., Dampare, S.B. and Suzukia, S., 2010.** Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh. *Journal of Hazardous Materials*. 173: 384–392.
6. **Chui, S., Wong, Y.H., Chio, H.I., Fong, M.Y. and Chi, Y.M., 2013.** Study of heavy metal poisoning in frequent users of Chinese medicines in Hong Kong and Macau. *Phytother. Res.*, 27: 859-863.
7. **Ćujić, M., Dragović, S., Đorđević, M., Dragović, R. and Gajić, B., 2016.** Environmental assessment of heavy metals around the largest coal fired power plant in Serbia. *Catena*, 139: 44-52.
8. **Deputy of Human Environment, Water and Soil Office, 2017.** Quality standards of soil resources and its guidelines, p:164.
9. **Gheshlagi, A., Ghayouraneh, M. and Sayarah, A., 2012.** Investigation of metal contamination in soils around the Zanzan zinc smelting furnace. The 6th National Conference and Specialized Exhibition on Environmental Engineering. Tehran. Iran (In Persian).
10. **Hakanson, L., 1980.** Ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological

²¹ Phytoremediation

33. **Pirmohammadi Alisha, F., Mohammad Rezaei, M. and Jahangiri, A., 2022.** Investigating geomorphological processes and their impact on the water crisis in Shabstar Plain (north of Lake Urmia), the 4th National Conference on Solutions in Iran and the Middle East, Tehran. Iran. March 13, 2022. (In Persian)
34. **Rashid Shomali, A. and Khodaverdiloo, H., 2012.** Contamination of Soils and Plants Along Urmia-Salmas Highway (Iran) to Some Heavy Metals, *Water and Soil Science Journal*, 22(3), 157-172 (In Persian with English abstract).
35. **Rashki, A., Eriksson, P.G., de Rautenbach, C.J.W., Kaskaoutis, D.G., Grote, W. and Dykstra, J., 2013.** Assessment of chemical and mineralogical characteristics of airborne dust in the Sistan region. Iran. *Chemosphere*, 90, 227-236.
36. **Rubio, B., Nombela, M.A. and Vilas, F., 2000.** Geochemistry of Major and Trace Elements in Sediments of the Ria de Vigo (NW Spain): an Assessment of Metal Pollution, *Marine Pollution Bulletin*, 40 (11), 968- 980.
37. **Sadeghdoust, F., Ghanavati, N., Nazarpour, A., Babaenejad, T. and Watts, M.J., 2019.** Status, Source and Environmental Pollution Assessment of Some Heavy Metals in Street Dust of Dezful City. *Water and soil sciences - agricultural sciences and techniques and natural resources*, 23 (3), 109-123 (In Persian with English abstract).
38. **Savic, R., Ondrasek, G. and Josimov-Dundjerski, J., 2015.** Heavy metals in agricultural landscapes as hazards to human and ecosystem health: a case study on zinc and cadmium in drainage channel sediments, *J. Sci. Food Agric.*, 95: 466- 470.
39. **Shahbazi, A., Sufianian, A.R., Afraz, R.A. and Khodakarmi, L., 2011.** Investigating the spatial distribution of heavy metals cadmium, copper and lead in the soil and determining the origin of these metals (case study: Nahavand city). *Remote Sensing and Geographical Information System in Natural Resources (Application of Remote Sensing and GIS in Natural Resources Sciences)*, 2 (2): 97-109 (In Persian).
40. **Singh, R.P. and Agrawal, M., 2008.** Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Management*, 28(2), 347-358.
41. **Soil Conservation Service, 1992.** Soil survey laboratory methods and procedures for collecting soil sample. USDA Soil sur. Invest. Rep. No 2. US. GOV. Print office. Washington DC.
42. **Tang, R., Ma, K., Zhang, Y. and Mao, Q., 2013.** The spatial characteristics and pollution levels of metals in urban street dust of Beijing, China, *Appl Geochemistry*, 35: 88– 98.
43. **Wang, R., Zou, X., Cheng, H., Wu, X., Zhang, C. and Kang, L., 2015.** Spatial distribution and source apportionment of atmospheric dust fall at Beijing
22. **Khosravi, Y., Zamani, A.A., Peri Zanganeh, A.H. and Yaftyan, M.R., 2017.** Investigating the distribution of heavy metals in the soils around Zanjan lead and zinc factory, *Soil Research (Soil and Water Sciences)*, 31 (4), 627-639 (In Persian).
23. **Kowalska, J.B., Mazurek, R., Gąsiorek, M. and Zaleski, T., 2018.** Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination—A review. *Environmental geochemistry and health*, 40, 2395–2420.
24. **Lindsay, W.L. and Norvell, W.A., 1978.** Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42(3), 421-428.
25. **Lin, C.Y., Cleophas, F., Abdullah, M.H. and Musta, B., 2015.** Assessment of heavy metals contamination in Mamut river sediments using sediment quality guidelines and geochemical indices, *Environmental Monitoring and Assessment*, 187: 4190 .
26. **Liu, Z., Fei, Y., Shi, H., Mo, L. and Qi, J., 2022.** Prediction of high-risk areas of soil heavy metal pollution with multiple factors on a large scale in industrial agglomeration areas. *Sci. Total Environ.* 808, 151874.
27. **Maas, S., Schei, R., Benslama, M., Crini, N., Lucot, E., Brahmia, Z. and Giraudoux, P., 2010.** Spatial distribution of heavy metal concentrations in urban, suburban and agricultural soils in a Mediterranean city of Algeria, *Environmental Pollution*, Vol 158: 2294– 2301.
28. **Mor, F., Dehghani, S. and Keshavarzi, B., 2014.** Determining the concentration of trace elements in soil and plants around Midok copper mine, *Economic Geology*, 6 (2): 314-305 (In Persian).
29. **Muller, G., 1981.** The Heavy Metal Pollution of the Sediments of Neckars and its Tributary: A Stocktaking. *Chemiker Zeitung*, 105, 157-164.
30. **Norouzi, S., Khademi, H., Ayoubi, S., FazCano, A. and Acosta, J., 2017.** Seasonal and spatial variations in dust deposition rate and concentrations of dust-borne heavy metals, a case study from Isfahan, central Iran, *Atmospheric Pollution Research*, 8 (4): 686-699.
31. **Qanawati, N. and Nazarpour, A., 2018.** Investigating the environmental pollution of heavy metals in the street dust of Ahvaz using Geographical Information System (GIG). *Environmental Science*, 44 (3), 393- 410 (In Persian).
32. **Qingjie, G., Jun, D., Yunchuan, X., Qingjie, W. and Liqiang, Y., 2008.** Calculating Pollution Indices by Heavy Metals in Ecological Geochemistry Assessment and a Case Study in Parks of Beijing. *Journal of China University of Geosciences*, 19, 230-241.



- Conference Paper in APCBEE Procedia, Hong Kong. 2012, January 5-7.
46. **Zarei, L., Hashemi, S. and Najafi Ghiri, M., 2023.** Spatial distribution of some heavy metals in agricultural and pasture uses (case study: Shazand Industrial City of Arak), Remote Sensing and Geospatial Information System in Natural Resources, 14 (2): 51.
- during spring of 2008-2009. Environmental Science Pollution Research, 22, 35-47, 3557.
44. **Wu, C. and Zhang, L., 2010.** Heavy metal concentrations and their possible sources in paddy soils of a modern agricultural zone, southeastern China. Environmental Earth Sciences. 60(1), 45-56.
45. **Young, S.M., Ishiga, H. and Pitawala, A., 2012.** Geochemical Assessment of Upper Mahaweli River and Polgolla Reservoir Sediments, Sri Lanka,



Evaluation and Zoning of Cadmium and Copper Pollution Using Pollution Indices in Shabstar Plain, East Azerbaijan, Iran

Fatemeh Sarbazan¹, Omid Rafieyan^{*1}, Mohammad Reza Dalalian², Fatemeh Zabihi³

1- Department of Environment Engineering, Agriculture and Natural Resources Faculty, Islamic Azad University, Tabriz Branch, Tabriz, Iran

2- Department of Soil Sciences and Engineering, Agriculture and Natural Resources Faculty, Islamic Azad University, Tabriz Branch, Tabriz, Iran

3- Department of Soil Sciences and Engineering, Agriculture and Natural Resources Faculty, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

Abstract

Original Article

Received:
2024.03.25

Accepted:
2025.09.21

Keywords:

Contamination Indices, Heavy Metals, Inverse Distance Weighting (IDW), Zoning

Introduction: Contamination of agricultural land with heavy metals such as Pb, Cd, Zn, and Ni from sources such as phosphate fertilizers, the use of sewage sludge, urban effluents and domestic sewage is one of the important problems and a serious threat to the environment and human health. Heavy metals, due to their non-degradability and low mobility, have harmful physiological effects on the health of living organisms and the environment. When heavy metals enter the human body by any way, there is a possibility of stimulating the body's immune system and may cause nausea, anorexia, vomiting, digestive abnormalities and dermatitis. In order to solve the problem, first of all, the amount and manner of contamination dispersion should be determined in the suspicious lands. Then, by identifying areas with different levels of contamination, management strategies can be proposed in the discussion of land use planning to restore contaminated areas. The purpose of this research is to determine the amount of heavy metal contamination (such as Cd and Cu) in the agricultural farms of the Shabstar Plain using contamination indices and their zoning.

Materials and Methods: This research was carried out in the Shabstar plain, which is located in 70 km west of Tbriz city and north of Lake Urmia. 60 samples were prepared from the depth of 0-30 cm and transferred to the laboratory. Sampling locations were done using a specific geographic locator device. The concentrations of Cd and Cu in extracts prepared from soil samples using TEA and DTPA were measured using an Inductively Coupled Plasma Spectrometer (ICP). Then contamination indices including pollution index (PI), geo accumulation index (I_{geo}), enrichment factor (EF) and Nemerow pollution index (PI_n) were calculated. Finally, the spatial distribution of Cd and Cu contamination in the studied area was done based on contamination indices and by using the Inverse Distance Weighting (IDW) method.

Results: The results showed that the studied soil samples were heterogeneous in terms of salinity and organic carbon content, but they were homogeneous

in terms of lime content. The average concentration of Cd is 1.051 mg/kg and more than the upper limit of the international standard and less than the upper limit of the Iranian standard. In terms of PI, the studied soils are in the moderate contamination class for Cd (PI=1.05) and low contamination class for Cu (PI=0.03) and in terms of the I_{geo} index, in the moderately/strongly contamination class for cadmium ($2.83 = I_{geo}$) and uncontaminated for Cu ($I_{geo} = -5.05$). In terms of the enrichment factor, the studied soils were in the Extremely high pollution class for Cd (EF=76.1) and in the minimum pollution class for copper (EF=0.35).

Discussion: The results of Nemerow pollution index (PI_n) showed that the soils of the studied area are in the slightly polluted class in terms of the Cu ($PI_n = 1.38$). The spatial distribution predicted by the mathematical method of Inverse Distance Weighting for pollution indices (PI, I_{geo} and EF) showed that the studied area with agricultural use had the highest amount of these indices for Cd. The pollution of Cd was in extremely high to moderate pollution classes. The contamination of Cu was in the low to non-contaminated class. To reduce soil contamination with heavy metals, the use of green technology or phytoremediation is suggested.