

ارزیابی کمی آلودگی فلزات سنگین در خاک

رقیه حمزه نژاد تقلیدآباد^۱، حبیب خداوردیلو^{۲*}

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۱۶)

چکیده

آلودگی و انباشت فلزات سنگین در آب و خاک به دلیل سمیت، فراوانی منابع آلاینده، تجزیه‌ناپذیر بودن و انباشت آنها در محیط، مشکلی جدی در سطح جهان است. آگاهی از میزان آلودگی فلزات سنگین در سیستم‌های خاک در تصمیم‌گیری جهت کاهش آلودگی، کاهش در معرض قرارگیری انسان با آلودگی ناشی از فلزات سنگین و حفاظت انسان از خطرات آلودگی ضروری به نظر می‌رسد. در این راستا شاخص‌های ارزیابی آلودگی به عنوان ابزاری مفید برای ارزیابی میزان آلودگی استفاده می‌کنند. در این مقاله برای ارزیابی میزان آلودگی فلزات سنگین در خاک شاخص زمین‌انباشت (I_{geo})، فاکتور غنی‌سازی (EF)، شاخص آلودگی (PI)، فاکتور آلودگی (C_f)، فاکتور خطر اکولوژیکی (E_r^i)، مجموع شاخص آلودگی (PI_{sum})، شاخص آلودگی نمره ($PI_{Nemerow}$)، شاخص بار آلودگی (PLI)، میانگین شاخص آلودگی (PI_{avg})، ضریب برداری شاخص آلودگی (PI_{Vector})، فاکتور غنی‌سازی زمینه (PIN)، آلودگی چند-عنصری (MEC)، شاخص امنیت آلودگی (CSI)، شاخص احتمال سمیت ($MERMQ$)، درجه آلودگی (C_{deg})، خطر اکولوژیکی بالقوه (RI)، درجه آلودگی اصلاح شده (mcd) و فاکتور در معرض قرارگیری (ExF) مرور شدند. در پایان، روشی برای بی‌بعدسازی شاخص‌های فوق و محاسبه شاخصی تلفیقی حاصل از مجموع نمره وزن‌دار شده همه شاخص‌های منفرد برای تصمیم‌گیری در خصوص آلودگی خاک پیشنهاد گردید. استفاده از این شاخص‌ها می‌تواند در ارزیابی کمی و پهنه‌بندی آلودگی خاک برای اهداف مدیریتی سودمند باشد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، شاخص‌های ارزیابی آلودگی، فلزات سنگین

حمزه نژاد تقلیدآباد ر.، خداوردیلو ح. ۱۳۹۹. ارزیابی کمی آلودگی فلزات سنگین در خاک. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۸، شماره ۲. صفحه: ۳۷-۵۲.

۱-دانش‌آموخته دکتری گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه

۲-دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه (مکاتبه کننده)

* پست الکترونیک: h.khodaverdiloo@urmia.ac.ir

مقدمه

فلزات سنگین، پایدارترین و پیچیده‌ترین آلاینده‌ها از نظر پایش در طبیعت هستند. فلزات سنگین نه تنها کیفیت اتمسفر، پیکره‌های آبی و محصولات غذایی را کاهش می‌دهند، بلکه سلامت و رفاه حیوانات و انسان‌ها را به خطر می‌اندازند. فلزات در بافت‌های موجودات زنده انباشت می‌شوند، زیرا بر خلاف اکثر ترکیبات آلی، تجزیه متابولیکی نمی‌شوند. در میان فلزات سنگین، Cu و Co ، Ni ، Zn نسبتاً بیشتر برای گیاهان سمیت ایجاد می‌کنند، در حالی که Hg و As ، Cr ، Pb ، Cd نسبتاً بیشتر برای حیوانات سمی هستند (McBride, 1994). منابع اصلی انسان‌پدید فلزات سنگین عبارتند از مناطق صنعتی، دنباله معدن، دفع زباله‌های حاوی مقادیر بالای فلز، بنزین و رنگ حاوی سرب، کاربرد کودهای شیمیایی، کود دامی، لجن فاضلاب، آفت‌کش‌ها، آبیاری با پساب، بقایای احتراق زغال‌سنگ، نشت فرآورده‌های پتروشیمی و نهشته‌های اتمسفری حاصل از منابع مختلف (Alloway, 2012).

جهت ارزیابی اثرات زیست‌محیطی عناصر سنگین در خاک‌های یک منطقه، بایستی میزان غلظت عناصر در آن با یک استاندارد شناخته شده مقایسه شود. بهترین حالت مقایسه با استانداردهای موجود برای همان منطقه است چرا که شرایط زمین‌شناسی و اقلیمی گوناگون در نقاط مختلف دنیا، غلظت‌های متفاوتی از عناصر سنگین ایجاد می‌کند. در کشور ما به دلیل عدم وجود استاندارد خاصی برای درجه آلودگی خاک، بهتر است از معیارهای دیگری برای بررسی آلودگی عناصر سنگین استفاده شود.

برای ارزیابی کمی و کیفی آلودگی فلزات سنگین و منشأ آنها، در محیط‌های آبی و خاک، روش‌های متفاوتی وجود دارد. یکی از روش‌های رایج کمی‌سازی آلودگی خاک، استفاده از شاخص‌های زیست‌محیطی است که تاکنون پژوهشگران متعددی کیفیت خاک را از نظر آلودگی با استفاده از این شاخص‌ها مورد ارزیابی قرار داده‌اند. شاخص‌های آلودگی فلزات سنگین معمولاً در خاک به دو گروه شاخص‌های منفرد و شاخص‌های تجمعی در یک دیدگاه تقسیم می‌شوند. شاخص‌های منفرد مانند عامل آلودگی، عامل غنی‌شدگی و شاخص زمین‌انباشتی می‌باشند اما شاخص‌های تجمعی مانند درجه آلودگی و شاخص خطر اکولوژیکی بالقوه، اثر

تجمعی بیش از یک فلز را مورد بررسی قرار می‌دهند (Qingjie *et al.*, 2008).

در بسیاری از مطالعات در کشورهای مختلف جهان، برای تخمین سطوح آلودگی از این شاخص‌ها استفاده شده است (Liu *et al.*, 2005; Gong *et al.*, 2009). کرباسی و همکاران (Karbasi *et al.*, 2016)، ژنوشیمی عناصر خاک و رسوبات سطحی ناحیه اطراف دریاچه ارومیه را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه ارزیابی هر دو شاخص زمین‌انباشتی و غنی‌سازی بیانگر عدم آلودگی عناصر کادمیم، کبالت، کروم، مس، منگنز، نیکل، سرب، وانادیوم، روی و آهن بود. بهویانا و همکاران (Bhuiyana *et al.*, 2010) آلودگی فلزات سنگین را در خاک‌های کشاورزی با استفاده از چندین شاخص، فاکتور غنی‌شدگی، شاخص زمین‌انباشتی و شاخص بارآلودگی، مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان از غنی‌شدگی معنی‌دار خاک‌ها با فلزات تیتانیوم، منگنز، روی، سرب، آرسنیک، آهن، استرانسیم و آنتیموان حاصل از ورودی از فعالیت‌های معدنی بود. خداکرمی (Khodakarami, 2009) غلظت ۱۴ فلز سنگین را در کاربری‌های مختلف در بخشی از استان همدان بررسی نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که عامل اصلی موثر بر افزایش غلظت عناصر کروم، مس، نیکل و روی در منطقه مورد بررسی، ساختار زمین‌شناسی است. موسوی و همکاران (Mousavi *et al.*, 2013) غلظت فلزات سنگین کادمیوم، سرب، مس، نیکل، کروم و کبالت را در ۱۶ نمونه خاک سطحی اطراف کارخانه سیمان توسط دستگاه ICP-OES اندازه‌گیری کردند. براساس نتایج به دست آمده و مقایسه آنها با استانداردهای موجود و نیز با استفاده از معیارهای ضریب غنی‌شدگی، شاخص آلودگی و شاخص زمین‌انباشتی مشخص کردند که کارخانه سیمان تاکنون از نظر داشتن این فلزات، آلودگی خاصی را روی خاک سطحی مناطق اطراف خود ایجاد نکرده است. در مطالعه مشیعت‌الله و همکاران (Mashiatullah *et al.*, 2013)، نتایج شاخص زمین‌انباشتی نشان داد که تنها روی و سرب به عنوان آلاینده‌های متوسط در برخی از ایستگاه‌های مورد مطالعه بودند و فلزات دیگر وضعیت آلوده برای ایستگاه‌های دیگر را نشان دادند. چویچ و همکاران (Cujic *et al.*, 2016) مطالعه‌ای روی ارزیابی زیست‌محیطی فلزات سنگین در اطراف بزرگترین

۱- شاخص‌های ارزیابی آلودگی

معیارهای متعددی برای بررسی درجه آلودگی خاک ارائه شده است که می‌توان بر اساس آن‌ها به وجود یا عدم وجود آلودگی خاک پی برد. ارزیابی آلودگی فلزات سنگین با استفاده از شاخص‌های منفرد از جمله شاخص زمین انباشتگی، فاکتور غنی‌شدگی نرمال، درجه آلودگی، فاکتور آلودگی و شاخص‌های جامع یا تجمعی مانند شاخص بار آلودگی صورت می‌گیرد. شاخص‌های منفرد تنها آلودگی یک عنصر یا آلاینده را محاسبه می‌کنند ولی شاخص‌های جامع یا تجمعی آلودگی چند عنصر را با هم بررسی کرده و عمدتاً از روی شاخص‌های منفرد محاسبه می‌شوند.

۱-۱- شاخص‌های منفرد

در این شاخص‌ها، برای بیان درجه یا شدت آلودگی از یک مقدار مرجع استفاده می‌شود و تقریباً در تمامی شاخص‌های منفرد آلودگی، مقدار عنصر هدف با یک مقدار مرجع عنصر و یا با مقدار آن عنصر در محیط مرجع مورد مقایسه قرار می‌گیرد تا درجه آلودگی عنصر هدف ارزیابی شود. ولی مقادیر مرجع از جمله سطح مرجع قبل از صنعتی شدن، سطح میانگین در پوسته، سطح زمین، خط پایه، مقادیر آستانه آلودگی و راهنماهای کیفیت خاک^۲ و غیره یکنواخت نیست و در صورت مقایسه مقدار فلز در منطقه با مقدار مرجع همان فلز، ممکن است مقادیر مرجع عنصر در منابع مختلف متفاوت باشد. این مسئله ممکن است مشکلاتی را در ارزیابی سبب شود. شاخص‌های منفرد مقدار آلوده بودن یا نبودن را نشان نمی‌دهند بلکه شدت آلوده شدن را نشان می‌دهند و مقدار آن‌ها نسبی است و نسبت به یک مرجع بیان می‌شود. مطالعات در مورد مقادیر زمینه یا پایه فلزات سنگین در خاک‌های ایران بسیار کم‌شمار هستند (Beygi & Jalali, 2018). بیگی و جلالی (Beygi & Jalali, 2018) محدوده مقادیر پایه ژئوشیمیایی برخی فلزات سنگین از جمله کادمیم ($0.1-40/5 \text{ mg kg}^{-1}$)، کبالت ($7/17-8/9 \text{ mg kg}^{-1}$)، کروم ($44-8 \text{ mg kg}^{-1}$)، مس ($8/38-8/6 \text{ mg kg}^{-1}$)، آهن ($34-1 \text{ g kg}^{-1}$)، نیکل ($9/3 \text{ mg kg}^{-1}$)، منگنز ($106/448-1/2 \text{ mg kg}^{-1}$)، سرب ($23/66-4/61 \text{ mg kg}^{-1}$) و روی ($2/71-3/1 \text{ mg kg}^{-1}$) و روی ($2/71-3/1 \text{ mg kg}^{-1}$)

نیروگاه با سوخت زغال سنگ در صربستان انجام دادند و غلظت فلزات سنگین (Ni, Mn, Fe, Cu, Cr, Co, Cd) را با استفاده از طیف سنجی جذب اتمی (Zn و V, Pb) را با استفاده از طیف سنجی جذب اتمی اندازه‌گیری کردند، و بیشترین ضریب آلودگی را برای نیکل، سپس روی، کبالت و کادمیم گزارش کردند. در استان اصفهان غلظت فلزات سنگین در ۸۳ منطقه مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد مقادیر غلظت Zn, Cu, Pb, As در خاک‌های شهر اصفهان نسبت به غلظت فلزات سنگین در شهرهای انتخاب شده در سراسر جهان نسبتاً غنی‌تر می‌باشد (Rastegari Mehr *et al.*, 2007). با توجه به نگرانی‌های زیست‌محیطی و سلامت انسان در ارتباط با فلزات سنگین، همچنین نقش اساسی خاک و کیفیت آن در سلامت اکوسیستم، آگاهی از غلظت این عناصر به عنوان شاخصی مهم در پیش‌بینی خطرات بیماری‌های ناشی از این فلزات و تعیین استانداردهای کیفیت ضروری به نظر می‌رسد. در بسیاری از موارد، تعیین کمی سطح آلودگی خاک از جنبه‌های مختلف اهمیت می‌یابد که مستلزم استفاده از شاخص‌های مناسب برای این منظور است. لذا هدف از این مطالعه، مرور شاخص‌های ارزیابی آلودگی فلزات سنگین است. هر چند شاخص‌های تجمعی برای تجمیع هر کدام از شاخص‌های منفرد پیشنهاد شده است، ولی در برخی موارد استفاده همزمان از چند شاخص برای ارزیابی آلودگی خاک در یک منطقه یا برای مقایسه آلودگی در نقاط مختلف ضرورت می‌یابد. با توجه به متفاوت بودن مقیاس هر کدام از شاخص‌ها، ممکن است نتیجه‌گیری بر اساس هر کدام متفاوت باشد. لذا، در این مقاله روشی برای گزینش، اولویت‌بندی و نمره‌دهی (بی‌بعد سازی) شاخص‌ها و در نهایت محاسبه شاخصی واحد و مرکب (از نمره وزن‌دار شده همه شاخص‌های برگزیده) برای تصمیم‌گیری در خصوص آلودگی خاک پیشنهاد شده است.

روش‌های ارزیابی شاخص‌های آلودگی

به منظور ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در خاک می‌توان شاخص‌ها را در دو دسته، شاخص‌های آلودگی و شاخص‌های سلامت تقسیم‌بندی نمود.

1. Integrated Indices

2. Effect range low and effect range medium

کشوری به کشور دیگر و حتی در مناطق مختلف یک کشور، متفاوت است. این حدود بر اساس عوامل منطقه‌ای و قوانین ویژه هر منطقه تعیین می‌گردند (جدول ۱). برخی از این حدود مجاز براساس زیان‌های وارده به سلامت انسان از راه تماس مستقیم با خاک و برخی دیگر بر اساس خطرات بوم‌شناختی و یا سایر محورها وضع شده‌اند. بنابراین، این ملاک‌ها عمدتاً به عنوان راهنمایی برای ارزیابی آلودگی مناطق به کار می‌روند. حدود مجاز هر فلز در خاک نیز متفاوت از سایر فلزات بوده و اختصاصی است. حد مجاز برخی فلزات سنگین در خاک‌های ایران برای اهداف متفاوت در جدول ۲ آمده است.

را در خاک‌های همدان گزارش نموده و با مقادیر گزارش شده در سایر مطالعات مشابه در ایران و جهان مقایسه نمودند. اگر به جای مقادیر مرجع، از حد آستانه استفاده شود این شاخص‌ها آلوده بودن یا آلوده نبودن را نشان می‌دهند نه شدت آلودگی آن را. غلظت مجاز، مقدار بیشینه عنصر در خاک است که انتظار می‌رود خطرات زیست‌محیطی یا سلامتی ایجاد نکند. از آنجا که خطر سازی هر کدام از فلزات متفاوت از دیگری است، لذا حدود مجاز هر فلز نیز متفاوت از سایر فلزات بوده و اختصاصی است. افزون بر این، حدود مجاز فلزات در خاک برای کاربری‌های گوناگون و حتی در خاک‌های مختلف و هم‌چنین از

جدول ۱- حداکثر غلظت کل مجاز فلزات سنگین در خاک بر اساس استانداردهای JRC Ispra^۱

Table 1. Maximum value of total heavy metals in soil according to JRC Ispra standard

Element	maximum value of heavy metals (mg kg ⁻¹)			
	6<pH<7 [#]	5≤pH<6	6≤pH<7	7≤pH
Cd	1-3	0.5	1	1.5
Cr	-	50	75	100
Cu	50-140	40	50	100
Hg	1-1.5	0.2	0.5	1
Ni	30-75	30	50	70
Pb	50-300	50	70	100
Zn	150-300	100	150	200

#: این ستون گستره پیشنهادی در دستورالعمل EEC / ۲۷۸/۸۶ سال ۱۹۸۶ در مورد حفاظت از محیط زیست، و به ویژه از خاک، است در مواقعی که لجن فاضلاب در کشاورزی استفاده می‌شود.

#: This column is Council Directive 86/278/EEC of 12 June 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture.

جدول ۲- حد مجاز مقادیر کل عناصر در خاک (Afyuni, 2013) (mg kg⁻¹)

Table 2. Maximum acceptable concentration of heavy metals in soil (mg kg⁻¹) (Afyuni, 2013)

Heavy metal	Iran's environmental protection	Groundwater protection
Cd	3.9	20
Pb	300	300
Cu	63	1500
Zn	200	3000
As	17	100
Cr (+6)	0.4	100
Cr (+3)	0.4	3000
Co	20	1000
Hg	12	10
Ni	50	600

به غلظت زمینه فلز با استفاده از شاخص I_{geo} است که توسط مولر (Muller, 1969) ارائه گردید.

شاخص زمین انباشت (I_{geo})^۲

یک روش متداول برای تخمین آلودگی خاک به فلزات سنگین، به دست آوردن غلظت فلزات سنگین در خاک

2. Geo-accumulation Index

1. Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability Soil and waste Unit (JRC)

نسبت داده می شود، اعمال شده است. این ضریب با تفکیک نوسانات طبیعی موجود در غلظت یک ماده معین در محیط، تغییرات حتی اندک ناشی از اثرات انسان پدید را نمایان می سازد (Shomali rashidi & Khodaverdiloo, 2012). مولر ۷ رده مختلف را برای این شاخص عنوان کرد که مقادیر عناصر در بالاترین رده حداقل ۱۰۰ برابر مقادیر مرجع است (جدول ۴) (Zhang et al., 2007).

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_i}{1.5C_{ri}} \right] \quad (1)$$

که در آن I_{geo} شاخص انباشت ژئوشیمیایی یا شاخص شدت آلودگی؛ C_i ، غلظت فلز سنگین در خاک و C_{ri} ، غلظت زمینه (غلظت متوسط شیل (جدول ۳)) می باشد. ضریب ۱/۵ ضریب تصحیح می باشد که به منظور کمینه کردن اثر تغییر احتمالی در غلظت های زمینه که عموماً به تغییرات سنگ شناسی خاک و تاثیر عوامل انسانی

جدول ۳- مقادیر میانگین شیل فلزات سنگین (میکروگرم در گرم) (Turekian & Wedepohl, 1961)

Table 3. Mean value of Shale in heavy metals (mg kg^{-1}) (Turekian & Wedepohl, 1961)

Heavy metal	Mean value of Shale
Cd	-
Pb	20
Cu	45
Zn	95
As	13
Co	19
Cr	90
Fe	47000
Ni	50

جدول ۴- کیفیت خاک بر اساس شاخص زمین انباشت (I_{geo}) (Muller, 1969)

Table 4. Soil quality according to Geoaccumulation Index (I_{geo}) values (Muller, 1969)

Class	Values of I_{geo}	Soil quality
0	$I \leq 0$	unpolluted
1	0-1	unpolluted to moderately polluted
2	1-2	moderately polluted
3	2-3	moderately to highly polluted
4	3-4	highly polluted
5	4-5	highly to extremely high polluted
6	5-6	extremely high polluted

$$EF = \frac{\left(\frac{C_i}{C_{ie}}\right)_{\text{Sample}}}{\left(\frac{C_i}{C_{ie}}\right)_{\text{Reference Sample}}} \quad (2)$$

که در آن C_i غلظت عنصر مورد بررسی در نمونه و C_{ie} غلظت عنصر رفرنس در نمونه (عمدتاً آهن) می باشد. هر چه مقدار فاکتور غنی سازی بیشتر باشد نشان می دهد که سهم عوامل انسانی در افزایش آلودگی فلز مورد نظر در خاک منطقه بیشتر شده است، که کلاس بندی مقادیر آن به صورت زیر می باشد.

فاکتور غنی سازی (EF)^۱

ضریب غنی شدگی روش مناسبی جهت تفکیک منشا طبیعی و انسان پدید آلودگی است (Sutherland, 2000). برای تعیین این شاخص، یک عنصر را به عنوان رفرنس در نظر می گیرند که این عنصر باید غیرمتحرک^۲ بوده و تحت تاثیر فعالیت های بشر قرار نگیرد مانند Al, Li, Sc, Zr or Ti, Fe. ضریب غنی شدگی از رابطه ۲ محاسبه می شود:

2. immobile element

1. Enrichment factor

جدول ۵- مقادیر شاخص ضریب غنی شدگی EF (Kowalska et al., 2018)
 Table 5. Categories of Enrichment Factor (EF) (Kowalska et al., 2018)

EF Value	Enrichment of soil
< 2	deficiency to minimal enrichment
2-5	moderate enrichment
5-20	significant enrichment
20-40	very high enrichment
> 40	extremely high enrichment

شاخص آلودگی (PI) ^۱

که در آن C_m میانگین مقدار آلاینده یا فلز سنگین در نمونه‌های دریاچه است که تعداد نمونه‌ها حداقل از ۵ نقطه برداشت شده‌اند و C_{p-i} مقدار ماده در دریاچه قبل از صنعتی شدن است و به عنوان مقدار سطح مرجع در همان دریاچه است. طبق طبقه‌بندی ها کانسون (Hakanson, 1980) برای فاکتور آلودگی جهت ارزیابی آلودگی فلزات سنگین، اگر مقدار فاکتور آلودگی بیش از یک باشد آلودگی متوسط تا بسیار بالا است که جدول زیر کلاس‌بندی را نشان می‌دهد:

$$PI_i = \frac{C_i}{C_{ri}} \quad (3)$$

که در آن C_i غلظت عنصر مورد بررسی در نمونه و C_{ri} غلظت زمینه می‌باشد.

فاکتور آلودگی (C_f) ^۲

با این فاکتور می‌توان مقدار عناصر را نسبت به مقدار طبیعی خود سنجید و میزان آلودگی خاک را تعیین کرد.

$$C_f = \frac{C_m}{C_{p-i}} \quad (4)$$

جدول ۶- کلاس آلودگی بر اساس شاخص آلودگی (PI) (Kowalska et al., 2018)

Table 6. Contamination classes of Single Pollution Index (PI) (Kowalska et al., 2018)

Class	Value of PI	Soil pollution
1	$PI < 1$	absent
2	$1 < PI < 2$	low
3	$2 < PI < 3$	moderate
4	$3 < PI < 5$	strong
5	$PI > 5$	very strong

جدول ۷- کلاس آلودگی بر اساس فاکتور آلودگی (C_f) (Kowalska et al., 2018)

Table 7. Contamination Factor (C_f) interpretation (Kowalska et al., 2018)

Class	Value of C_f	Soil pollution
1	< 1	low contamination
2	1-3	moderate contamination
3	3-6	considerable contamination
4	> 6	very high contamination

بیشتر نشان ندهد و در یک یا کمتر از آن باقی بماند. به جای مخرج می‌توان اعداد سطر اول جدول ۸ را وارد کرد. مقادیر این جدول برای دریاچه‌های آمریکا و اروپا می‌باشد که در صورت نیاز می‌توان از آن‌ها برای مثال برای دریاچه ارومیه استفاده کرد.

اگر فاکتور آلودگی برابر یک باشد نشان می‌دهد که آلودگی بیش‌تر نشده است در حالی که حتی تفسیر مقادیر کمتر از یک آن نیز به این معنی است که آلودگی پایین است چون در طول این مدت آلودگی زیادتر بوده ولی عواملی مانند رسوب و یا غیره سبب شده‌اند آلودگی

2. Contamination factor

1. Single Pollution Index

جدول ۸- مقادیر مرجع قبل از صنعتی شدن و مقادیر سمیت طبق طبقه بندی هاکانسون (Hakanson, 1980)، ($\mu\text{g g}^{-1}$)

Table 8. Pre-industrial reference level and toxicity response by Hakanson (1980) ($\mu\text{g g}^{-1}$)

Elements	Hg	Cd	As	Cu	Pb	Cr	Zn	Ni
Pre-industrial reference level	0.25	1.0	15	50	70	90	175	5
toxicity response	40	30	10	5	5	2	2	5

در حالیکه برای روی، این مقدار به ۱ کاهش می یابد یعنی خطراً فرینی بیولوژیکی جیوه ۴۰ برابر بیش تر از خطراً فرینی روی است. در این جدول جیوه سمی ترین عنصر بوده و حتی در مقادیر کم تر هم خطراً فرین است. این متغیر به ماندگاری فلزات در خاک یا رسوب مربوط نیست بلکه به شدت سمیت فلزات مربوط است. جدول ۹ کلاس بندی آلودگی بر اساس فاکتور اکولوژیکی خطر را نشان می دهد:

فاکتور خطر اکولوژیکی (E_r^i)^۱

با آن که این فاکتور پیشتر برای کنترل کیفیت آب به کار می رفت، امروزه برای ارزیابی کیفیت رسوبات و خاکها از لحاظ عناصر سنگین نیز به کار می رود.

$$E_r^i = T_r^i \cdot PI_i \quad (5)$$

که در آن، T_r^i شدت آلودگی و PI_i شاخص آلودگی است. اعداد ردیف دوم جدول ۸ (پاسخ به سمیت) نشان دهنده مقادیر T_r^i است که برای جیوه ۴۰ می باشد،

جدول ۹- کلاس آلودگی بر اساس فاکتور اکولوژیکی خطر (E_r^i) (Kowalska et al., 2018)

Table 9. Ecological risk factor (E_r^i) interpretation (Kowalska et al., 2018)

Class	E_r^i	Soil pollution
1	$<40E_r^i$	low ecological risk
2	$40 \leq E_r^i < 80$	moderate ecological risk
3	$80 \leq E_r^i < 160$	considerable ecological risk
4	$160 \leq E_r^i < 320$	high ecological risk
5	$\geq 320E_r^i$	very high ecological risk

شاخص نسبت به شاخص های دیگر دارد این است که در این شاخص، ریسک آلودگی به همه فلزاتی که مورد مطالعه قرار می گیرد در منطقه مشخص می شود. این شاخص با استفاده از رابطه زیر به دست می آید (Kowalska et al., 2018):

$$PI_{Nemerow} = \sqrt{\frac{(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n PI)^2 + PI_{max}^2}{n}} \quad (7)$$

که در آن، PI شاخص آلودگی، PI_{max} ماکزیمم شاخص آلودگی فلزات سنگین و n تعداد فلزات سنگین می باشد. بر اساس شاخص آلودگی نمره، کیفیت خاک در ۵ سطح طبقه بندی می شود (جدول ۱۰).

۲-۱- شاخص های تجمعی

مجموع شاخص آلودگی (PI_{sum})^۲

این شاخص کاربردی گسترده در ارزیابی کیفیت خاک و رسوب از لحاظ عناصر سنگین دارد.

$$PI_{sum} = \sum_{i=1}^m PI_i \quad (6)$$

که در آن، PI شاخص آلودگی فلز سنگین، و m تعداد فلزات مورد بررسی در مطالعه می باشد.

شاخص آلودگی نمره ($PI_{Nemerow}$)^۳

از این شاخص برای بررسی کمیت ریسک آلودگی و آگاهی از پتانسیل آلودگی استفاده شد. مزیتی که این

جدول ۱۰- کلاس آلودگی بر اساس شاخص آلودگی نمره (Kowalska et al., 2018)

Table 10- Nemerow Pollution Index ($PI_{Nemerow}$) soil pollution classes (Kowalska et al., 2018)

Class	Value of $PI_{Nemerow}$	Quality of soil
1	≤ 0.7	Clean
2	0.7-1	Warning limit
3	1-2	Slight pollution
4	2-3	Moderate pollution
5	≥ 3	Heavy pollution

3. Nemerow Pollution Index

1. Ecological risk factor
2. sum of pollution index

(Kowalska et al., 2018).

$$PLI = \sqrt[n]{PI_1 \times PI_2 \times PI_3 \times \dots \times PI_n} \quad (8)$$

که در آن، n تعداد فلزات سنگین مورد مطالعه و PI شاخص آلودگی است. کلاس آلودگی خاک بر اساس این شاخص در جدول ۱۱ ارایه شده است.

جدول ۱۱- کلاس آلودگی بر اساس شاخص بار آلودگی (PLI) (Kowalska et al., 2018)

Table 11. Contamination categories of Pollution Load Index (PLI) (Kowalska et al., 2018)

Class	PLI	Quality of soil
1	< 1	denote perfection
2	1	only baseline levels of pollution
3	> 1	deterioration of soil quality

$$PI_{vector} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n PI^2} \quad (10)$$

که در آن n تعداد فلز سنگین مورد مطالعه و PI شاخص آلودگی می باشد.

فاکتور غنی سازی زمینه (PIN)

این شاخص توسط کائورو و همکاران (Caeiro et al., 2005) معرفی شده است که برای ارزیابی غنی سازی خاک توسط فلزات سنگین با استفاده از کلاس آلودگی PI (جدول ۶) و همچنین مقادیر مناسب C_{ri} مفید است. PIN از فرمول زیر بدست می آید.

$$PIN = \sum_{i=1}^n \frac{PI_{class}^2 \times C_i}{C_{ri}} \quad (11)$$

که در آن PI_{class} کلاس آلودگی فلز سنگین (ارایه شده در جدول ۶)، C_i آلودگی فلز سنگین و C_{ri} غلظت زمینه است. تفسیر مقادیر PIN در جدول ۱۲ آمده است.

جدول ۱۲- کلاس آلودگی بر اساس فاکتور غنی سازی زمینه (PIN) (Kowalska et al., 2018)

Table 12. Interpretation of Background Enrichment Factor (PIN) (Kowalska et al., 2018)

Class	PIN	Contaminants
1	0-7	Clean
2	7-95.1	Trace
3	95.1-518.1	Lightly
4	518.1-2548.5	Contaminant
5	≥ 2548.8	Highly

شاخص بار آلودگی (PLI)^۱

این شاخص نیز برای ارزیابی کل درجه آلودگی در خاک، استفاده می شود. این شاخص راه آسانی برای اثبات تخریب خاک در اثر انباشت فلزات سنگین را فراهم می سازد. شاخص بار آلودگی از رابطه زیر بدست می آید

میانگین شاخص آلودگی (PI_{avg})^۲

این شاخص برای اولین بار توسط گنگ و همکاران (Gong et al., 2008) و اینگیتی و همکاران (Inengite et al., 2015) برای ارزیابی کیفیت خاک استفاده شد. شاخص PI_{avg} از فرمول زیر محاسبه می شود.

$$PI_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n PI \quad (9)$$

که در آن n تعداد فلز سنگین مورد مطالعه و PI شاخص آلودگی می باشد. مقادیر PI_{avg} بالای ۱/۰ بیانگر کیفیت پایین خاک و آلودگی شدید است (Inengite et al., 2015).

ضریب برداری شاخص آلودگی (PI_{vector})^۳

از این معادله استفاده بیشتری می شود. در این شاخص شدیدترین عنصر آلودگی وزن بیشتری دارد زیرا به توان دو رسانده شده است و واقع بینانه تر می باشد (Kowalska et al., 2018).

3. Vector Modulus of Pollution Index
4. Background enrichment factor

1. Pollution Load Index
2. Average of pollution index

اثرات انسان‌پدید بر غلظت فلزات سنگین در خاک است.

MEC بر اساس فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$MEC = \frac{\left(\frac{C_1}{T_1} + \frac{C_2}{T_2} + \frac{C_3}{T_3} + \dots + \frac{C_n}{T_n}\right)}{n} \quad (12)$$

که در آن C مقدار فلزات سنگین، T سطوح قابل تحمل^۲ توسط کلوکی (Kloke, 1979) (جدول ۱۳) و n تعداد فلزات سنگین است.

جدول ۱۳- سطوح قابل تحمل فلزات سنگین در خاک (Kloke, 1979)

Table 13. Tolerable levels of heavy metals in soil (Kloke, 1979)

Heavy metals	As	Cd	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
tolerable levels	20	3	100	2	100	100	300

است. شاخص CSI بر اساس فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$CSI = \sum_{i=1}^n w \left(\left(\frac{C_i}{ERL} \right)^2 + \left(\frac{C_i}{ERM} \right)^2 \right) \quad (13)$$

که در آن w وزن محاسبه شده هر فلز سنگین بر اساس پژمان و همکاران (Pejman et al., 2015) (جدول ۱۵) و C_i غلظت فلز سنگین می‌باشند. مقادیر ERM و ERL از جدول ۱۴ قابل استخراج است. تفسیر مقادیر CSI در جدول ۱۶ آمده است.

جدول ۱۴- مقادیر ERM و ERL ارائه شده توسط لانگ و همکاران (Long et al., 1995)

Element	ERM	ERL
As	70	8.2
Cd	9.6	1.2
Cr	370	81
Cu	270	34
Pb	218	46.7
Hg	0.71	0.15
Ni	51.6	20.9
Ag	3.7	1.0
Zn	410	150

ERM-effects range median; ERL-effects range low

جدول ۱۵- وزن محاسبه شده فلزات سنگین بر اساس پژمان و همکاران (Pejman et al., 2015)

Table 15. Weight of each heavy metal according to Pejman et al. (2015)

Element	Computed weight
Cu	0.075
Zn	0.075
Cr	0.134
Ni	0.215
Pb	0.251
Cd	0.25

4. effects range low
5. range median effects

1. Multi-element contamination
2. tolerable levels
3. Contamination Security Index

جدول ۱۶- طبقه بندی شاخص امنیت آلودگی (CSI) (Kowalska et al., 2018)

Table 16. Classification of Contamination Security Index (CSI) (Kowalska et al., 2018)

Class	CSI	Contamination severity
1	< 0.5	uncontaminated
2	0.5-1	very low severity
3	1-1.5	low severity
4	1.5-2	low to moderate severity
5	2-2.5	moderate severity
6	2.5-3	moderate to high severity
7	3-4	high severity
8	4-5	very high severity
9	> 5	ultra-high severity

$$MERMQ = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{ERM}}{n} \quad (14)$$

که در آن C_i غلظت فلزات سنگین، مقادیر ERM ارایه شده توسط لانگ و همکاران (Long et al., 1995) (جدول ۱۴) و n تعداد فلزات سنگین مورد مطالعه است. تفسیر این شاخص در جدول ۱۷ نشان داده شده است.

شاخص احتمال سمیت (MERMQ)^۱

این شاخص به عنوان ابزاری برای تشخیص اثرات مضر فلزات سنگین در محیط خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد (Pejman et al., 2015). $MERMQ$ بر اساس فرمول زیر محاسبه می‌شود:

جدول ۱۷- تفسیر شاخص احتمال سمیت (MERMQ) (Kowalska et al., 2018)

Table 17. The Probability of Toxicity Index interpretation (MERMQ) (Kowalska et al., 2018)

MERMQ value	Risk level	Probability of toxicity (%)
< 0.1	low	9
0.1-0.5	medium	21
0.5-1.5	high	49
> 1.5	very high	76

$$C_{deg} = \sum_{i=1}^n PI \quad (15)$$

که در آن PI شاخص آلودگی و n تعداد فلزات سنگین مورد بررسی می‌باشد. تفسیر C_{deg} در جدول ۱۸ نشان داده شده است.

درجه آلودگی (Cdeg)^۲

بر اساس هاکنسون (Hakanson, 1980)، ارزیابی آلودگی با استفاده از شاخص آلودگی C_{deg} امکان‌پذیر می‌باشد که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

جدول ۱۸- تفسیر درجه آلودگی (C_{deg}) (Kowalska et al., 2018)

Table 18. Degree of Contamination (C_{deg}) interpretation (Kowalska et al., 2018)

C_{deg}	Contaminants
< 8	low degree of contamination
8-16	moderate degree of contamination
16-32	considerable degree of contamination
> 32	very high degree of contamination

هاکنسون (Hakanson, 1980) ارایه شد که با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (16)$$

که n تعداد فلزات سنگین و E_r^i شاخص خطر اکولوژیکی

خطر اکولوژیکی بالقوه (RI)^۲

خطر اکولوژیکی بالقوه (RI)، شاخصی برای ارزیابی میزان خطر اکولوژیکی ناشی از غلظت فلزات سنگین در آب، هوا و همچنین خاک است. این شاخص اولین بار توسط

3. Potential ecological risk

1. The probability of toxicity
2. Degree of contamination

می‌باشد. کیفیت خاک بر اساس خطر اکولوژیکی بالقوه به پنج کلاس طبقه‌بندی شده است (جدول ۱۹).

جدول ۱۹- طبقه‌بندی کیفیت خاک بر اساس خطر اکولوژیکی بالقوه (RI) (Kowalska et al., 2018)

Table 19. Grades of Potential Ecological Risk (RI) (Kowalska et al., 2018)

RI	Potential Ecological Risk
< 90	low
90-180	moderate
180-360	strong
360-720	very strong
≥ 720	highly-strong

که در آن n تعداد فلزات سنگین و C_i غلظت فلزات سنگین است.

فاکتور در معرض قرارگیری (ExF)^۲

فاکتور ExF برای ارزیابی منطقه مطالعاتی که دارای بار فلزات سنگین بالایی است، بسیار مفید می‌باشد (Bazbełewska, 2010) و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$y = \sum \frac{C_i - C_{av}}{C_{av}} \quad (18)$$

که در آن C_i غلظت فلزات سنگین و C_{av} میانگین غلظت فلزات سنگین در نیمرخ خاک است.

جدول ۲۰- طبقه‌بندی درجه آلودگی اصلاح شده (mCd) (Kowalska et al., 2018)

Table 20. Classification of Modified Degrees of Contamination (mCd) (Kowalska et al., 2018)

mCd	Degree of contamination
< 1.5	very low
1.5-2	low
2-4	moderate
4-8	high
8-16	very high
16-32	extremely high
> 32	ultra-high

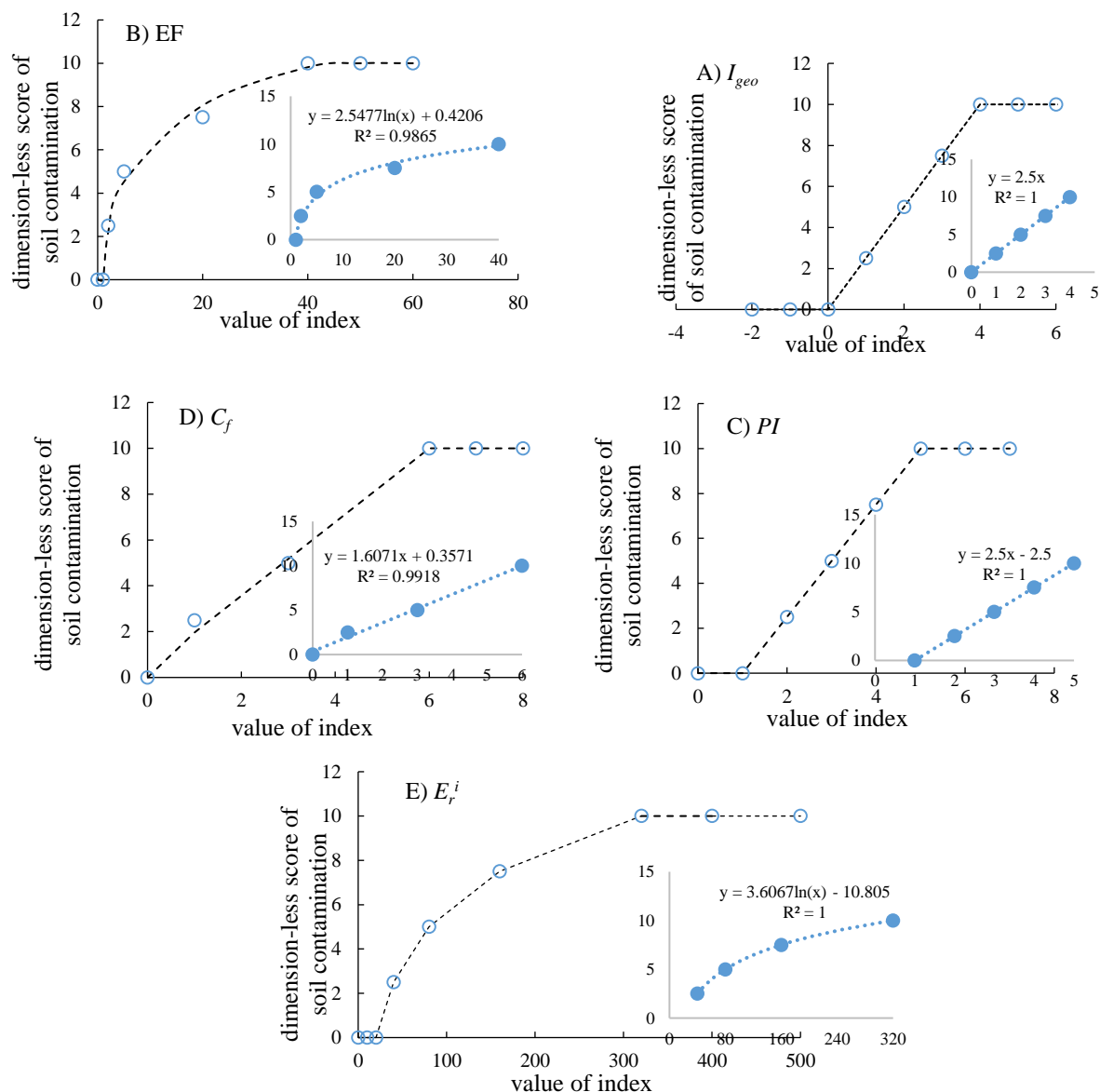
مقادیر مرزی برای کلاس‌های آلودگی بر اساس جداول ارزیابی شده در بخش ۱-۱ (رجوع شود به جداول ۴ تا ۹) انتخاب شدند که در معادلات زیر نیز قید شده‌اند. تمامی توابع نمره‌دهی توابعی سه‌بخشی هستند بطوریکه در کمتر از یک مقدار معین از هر شاخص، خاک غیرآلوده است (بخش اول)، در بخش دوم با افزایش مقدار آن شاخص، شدت آلودگی خاک افزایش می‌یابد (که شکل‌های درونی در شکل ۱ در واقع افزایش آلودگی خاک با افزایش مقدار آن شاخص را در این بخش نشان می‌دهند) و مقداری معین از هر شاخص که در بیشتر از آن، خاک به شدت آلوده پنداشته می‌شود (بخش سوم).

درجه آلودگی اصلاح شده (mca)^۱

این شاخص برای اولین بار توسط آبراهین و پارکر (Abrahin & Parker, 2008) استفاده شد. با این شاخص امکان ارزیابی آلودگی کل خاک با فلزات سنگین وجود دارد. برای محاسبه این شاخص، مجموع مقدار محتوای فلزات سنگین مورد نیاز است. تفسیر مقادیر mca در جدول ۲۰ آمده است. mca با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$mCd = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n} \quad (17)$$

۲- روشی پیشنهادی برای محاسبه شدت آلودگی خاک می‌توان توابعی برای نمره‌دهی شاخص‌های منفرد آلودگی پیشنهاد نمود (شکل ۱) که مقادیر شاخص‌های مختلف که هر کدام دامنه متفاوتی از مقدار و مقیاسی متفاوت دارند را به نمره‌ای مثلاً بین صفر تا ۱۰ تبدیل نماید. در این پیشنهاد، نمره‌ها به گونه‌ای انتخاب شدند که نقطه شروع محدوده آلودگی با شدت "کم" نمره صفر و پایان آن (و شروع محدوده آلودگی "متوسط") نمره ۲/۵، پایان متوسط و شروع محدوده آلودگی "زیاد" ۵ و پایان آن ۷/۵ که نقطه شروع محدوده آلودگی با شدت "خیلی زیاد" پیدا شده شد و تا ۱۰ ادامه یافت و برای آلودگی‌های "شدید" این نمره همان ۱۰ فرض شد.



شکل ۱- توابع سه بخشی نمره‌دهی شاخص‌های منفرد آلودگی خاک (I_{geo} , Geo-accumulation Index; EF , Enrichment factor; PI , Single Pollution Index; C_f , Contamination factor; E_r^i , Ecological risk factor)

Figure 1. Three-segment scoring functions of single soil pollution indices (I_{geo} , Geo-accumulation Index; EF , Enrichment factor; PI , Single Pollution Index; C_f , Contamination factor; E_r^i , Ecological risk factor) مقادیر هر شاخص آلودگی (محور x) را به نمره‌ای بدون بعد بین صفر تا ۱۰ تبدیل می‌کند (محور y) که بیانگر شدت آلودگی خاک است. شکل‌های درونی، افزایش شدت آلودگی خاک با افزایش مقدار هر شاخص را در بخش دوم نشان می‌دهند.

Convert the value of given index (x-axis) to a dimension-less score ranging from 0 to 10 (y axis) which indicates the degree of soil contamination. The inner figures indicate the increase in soil contamination degree with increasing the value of given index in segment two.

$$EF = IF(X < 2, 0, IF(X \leq 40, 2.5477 * LN(X) + 0.4206, 10)) \quad (32)$$

$$PI = IF(X < 1, 0, IF(X \leq 5, 2.5 * X - 2.5, 10)) \quad (33)$$

$$C_f = IF(X < 1, 0, IF(X \leq 6, 1.6071 * X + 0.3571, 10)) \quad (34)$$

$$E_r^i = IF(X < 40, 0, IF(X \leq 320, 3.6067 * LN(X) - 10.805, 10)) \quad (35)$$

این توابع با یک دستور IF (یا اگر-آنگاه) سه بخشی قابل محاسبه در محیط اکسل هستند. این توابع برای هر شاخص به صورت زیر نوشته می‌شود که در آنها X بیانگر سلول حاوی مقدار شاخص مورد نظر در صفحه اکسل است:

$$I_{geo} = IF(X < 0, 0, IF(X \leq 4, 2.5 * X, 10)) \quad (31)$$

همچنین مشکلات فراهمی زیستی از آلاینده‌های مهم و خطرناک محیط زیست هستند. به دلیل پیامدهای مخرب آنها بر انسان و محیط زیست، و با توجه به تأثیر بالای آنها بر زندگی انسان، گیاه و حیوان، ارزیابی غلظت فلزات سنگین در خاک و پیامدهای زیست محیطی و سلامتی آنها اهمیت ویژه‌ای دارد. شاخص‌های آلودگی ابزاری مفید برای ارزیابی شدت آلودگی خاک و منشأ آنها می‌باشند. شاخص‌های مختلفی برای ارزیابی میزان آلودگی فلزات سنگین در خاک ارائه شد. شاخص‌های ارزیابی میزان آلودگی فلزات سنگین در خاک به دو گروه منفرد و تجمعی تقسیم شد. همچنین، روشی برای گزینش، اولویت‌بندی و نمره‌دهی (بی‌بعدسازی) شاخص‌ها و در نهایت محاسبه شاخصی واحد و مرکب (از نمره وزن‌دار شده همه شاخص‌های برگزیده) برای تصمیم‌گیری در خصوص آلودگی خاک پیشنهاد گردید. استفاده از این شاخص‌ها می‌تواند در پهنه‌بندی مدیریتی خاک‌های آلوده و خطرآفرینی آنها برای گیاه و انسان سودمند باشد. همچنین روش بی‌بعدسازی پیشنهادی امکان مقایسه نتایج مطالعات مختلف که ممکن است بر اساس شاخص‌های متفاوت باشند را فراهم می‌آورد.

از برتری‌های این روش پیشنهادی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: (۱) با تبدیل مقادیر شاخص‌های منفرد آلودگی، که هر کدام مقدار و مقیاسی متفاوت دارند، به نمره آلودگی خاک، شدت‌های آلودگی بیان شده با شاخص‌های مختلف با هم قابل مقایسه می‌گردند. (۲) اگر از چندین شاخص منفرد برای بررسی آلودگی استفاده گردد، می‌توان با روشی مشابه با تعیین شاخص کیفیت خاک (Rezaei et al., 2006; Rasouli Sadaghiani et al., 2016; Azarneshan et al., 2018) به روش تجزیه عاملی^۱ یا تجزیه مولفه‌های اصلی^۲ اقدام به وزن‌دهی شاخص‌ها و تلفیق و تجمیع نمرات بدون بعد وزن‌دار شدن در قالب شاخص واحد برای نمونه همانند زیر نمود:

$$SCI = \sum_{i=1}^n W_i \times S_i \quad (36)$$

که در آن SCI شاخص آلودگی خاک^۳ برای یک نمونه خاک، W_i وزن هر شاخص و S_i نمره کسب شده برای شدت آلودگی خاک برای هر شاخص (شکل ۱) و $i = 1, \dots, n$ تعداد شاخص‌های منفرد به کار رفته است.

نتیجه‌گیری کلی

فلزات سنگین به دلیل پایداری و تجزیه‌ناپذیری و

References

- Abraham G.M.S., and Parker R.J. 2008. Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand. *Environmental Monitoring and Assessment*, 136: 227–238.
- Adamu C.L., and Nganje T.N. 2010. Heavy metal contamination of surface soil in relationship to land use patterns: A case study of Benue State, Nigeria. *Materials Sciences and Applications*, 1: 127–134.
- Afyuni M. 2013. Soil Quality Standards and its Guides, Office of Vice Human Environment, Water and Soil Office, 161p.
- Alloway B.J. 2012. Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. 3rd Ed. Springer Science & Business Media, 614p.
- Azarneshan S., Khormali F., Sarmadian F., Kiani F., and Eftekhari K. 2018. Soil Quality Evaluation of Semi-arid and Arid Lands in Qazvin Plain, Iran. *Journal of Water and Soil*. 32: 359-374. (In Persian)
- Bazbelewska A. 2010. The impact of industrial emissions on heavy metal and sulphur contamination level within the area of the projected Jurassic National Park. *Pradnik Studies and Reports of the Prof Wladyslaw Szafer Museum*, 20: 135–145.
- Beygi M. and Jalali M. 2018. Background levels of some trace elements in calcareous soils of the Hamedan Province, Iran. *Catena*, 162: 303-316.
- Bhuiyana M.A.H., Parvez L., Islam M.A., Dampare S.B., and Suzukia S. 2010. Heavy metal

3. soil contamination index

1. factor analysis
2. principal component analysis

- pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh. *Journal of Hazardous Materials*, 173: 384–392.
- Caeiro S., Costa M.H., Ramos T.B., Fernandes F., Silveira N., and Coimbra A. 2005. Assessing heavy metal contamination in Sado Estuary sediment: An index analysis approach. *Ecological Indicators*, 5: 151–169.
- 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.
- Gong M., Bi X.Y., Ren L.M., Wang L., Ma Z.D., Bao Z.Y., and Li Z.G. 2009. Assessing heavy-metal contamination and sources by GIS-based approach and multivariate analysis of urban–rural topsoil's in Wuhan, central China. *Journal of Environmental Geochemistry and Health*, 32(1): 59-72.
- Gong Q., Deng J., Xiang Y., Wang Q., and Yang L. 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.
- Hakanson L. 1980. Ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach. *Journal of Water Research*, 14: 975–1001.
- Inengite A.K., Abasi C.Y., and Walter C. 2015. Application of pollution indices for the assessment of heavy metal pollution in flood impacted soil. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, 8: 175–189.
- Karbasi A., Lak M., and Sanaee M. 2016. Study on environmental geochemistry of toxic elements in the west area of Khoy city to the Razi border. *Journal of environmental sciences Studies*, 1(3): 57-66. (In Persian)
- Khodakarami L. 2009. Evaluation of non-point sources of pollution in agriculture using RS and GIS. M.Sc. Thesis. Esfahan University of Technology, Iran.
- Khodaverdiloo H., and Ghorbani Dashtaki Sh., 2012. A brief survey of metal-accumulated plants and their host soils in Iran, *Journal of Environment Science*, 51: 3-12. (In Persian)
- Kloke A. 1979. Content of Arsenic, Cadmium, Chromium, Fluorine, Lead, Mercury, and Nickel in Plants Grown on Contaminated Soils. United Nations-ECE symposium, Geneva, 51p.
- Kowalska J.B., Mazurek R., Gašiorek 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.
- Liu W., Zhao J., Ouyang Z., Söderlund L., and Liu G. 2005. Impacts of sewage irrigation on heavy metal distribution and contamination in Beijing, China. *Journal of Environment International*, 31(6): 805–812.
- Liu Y., Zhu Y.G., and Hui D. 2007. Lead and cadmium in leaves of deciduous trees in Beijing, China: Development of a metal accumulation index (MAI). *Environmental Pollution*, 145: 387-390.
- Long E.R., MacDonald D.D., Smith L., and Calder F.D. 1995. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management*, 19: 81–97.
- Mashiatullah A., Chaudhary M.Z., Ahmad N., Javed T., and Ghaffar A. 2013. Metal pollution and ecological risk assessment in marine sediments of Karachi Coast, Pakistan. *Environmental Monitoring Assessment*, 185:1555–1565.
- McBride M.B. 1994. Environmental Chemistry of Soils. Oxford University Press. New York, 89p.
- Mousavi M.H., Purnia M., and Amiri F. 2013. Distribution of heavy metals in agricultural soils around factory of Karoon Cement, South-East Masjed Soleiman. *Journal of geochemistry*, 3: 215-226.
- Müller G. 1969. Index of geoaccumulation in the sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 2: 108-118.
- Pejman A., Gholamrez Nabi B., Saeedi M., and Baghvanda A. 2015. A new index for assessing heavy metals contamination in sediments: A case study. *Ecological Indicators*, 58: 365–373.
- 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.
- Rashid Shomali A., and Khodaverdiloo H. 2012. Contamination of soils and plants along urmiasalmas highway (Iran) to some heavy metals. *Water and Soil Science*, 22(3): 157-172. (In Persian)
- Rasouli Sadaghiani M.H., Ghodrati K., Ashrafi S., Jafari M., and Khodaverdiloo H. 2016. Evaluation

- of soil quality indices in Northern Zagros Forests (case study: Oshnaviye-west Azirbaijan). *Soil Management and Sustainable Production*, 3:83-89. (In Persian with English abstract)
- Rastegari Mehr M., Keshavarzi B., Moore F., Sharifi R., Lahijan-zadeh A., and Kermani M. 2017. Distribution, source identification and health risk assessment of soil heavy metals in urban areas of Isfahan province, Iran. *Journal of African Earth Sciences*, 132: 16-26.
- Rezaei S.A., Gilkes R.J., and Andrews S.S. 2006. A minimum data set for assessing soil quality in rangelands. *Geoderma*, 136:229-234.
- Sutherland R.A. 2000. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream Oahu, Hawaii. *Environmental Geology*, 39: 611-627.
- Turekian K.K., and Wedepohl K.H. 1961. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geological Society of America Bulletin*, 72(2): 175-92.
- Zhang L., Ye X., Feng H., Jing Y., Ouyang T., Yu X., Liang R., Gao C., and Chen W. 2007. Heavy metal contamination in western Xiamen Bay sediments and its vicinity, China. *Marine Pollution Bulletin*, 54: 974-982.
- Zhu Z.Q., Zhu Y.W., and Shi Z. 2009. Research of Agricultural Soil Environment and Agricultural Product Safety. China Agriculture Press, Beijing, China, 69p.

Quantitative Assessment of Soil Heavy Metals Pollution

Roghaie Hamzenejad Taghliabad¹, Habib Khodaverdiloo^{2*}

(Received: April 2020 Accepted: August 2020)

Abstract

Heavy metal (HM) contamination and accumulation in soil and water is a serious problem throughout the world due to the toxicity, abundant sources, non-biodegradable nature, and accumulative behavior of HMs in environment. A comprehensive understanding of the HM pollution in soil is essential in order to make informed decisions on the approaches to reduce contamination, minimize human exposure, and protect populations from the risk. Pollution indices widely considered as useful tools for evaluation of the degree of contamination. In this paper, geo-accumulation Index (I_{geo}), enrichment factor (EF); single pollution index (PI), contamination factor (C_f), ecological risk factor (E_r^i), sum of pollution index (PI_{sum}), Nemerow pollution index ($PI_{Nemerow}$), pollution load index (PLI), vector modulus of pollution index (PI_{vector}), background enrichment factor (PIN), multi-element contamination (MEC), contamination security index (CSI), the probability of toxicity ($MERMQ$), degree of contamination (C_{deg}), modified degree of contamination (m_{cd}), potential ecological risk (RI), exposure factor (ExF) were suggested to address the degree of HM pollution in soil. Finally, a method was proposed for non-dimensionalisation of the above-mentioned indices as well as for calculation of an integrated soil contamination index derived from the sum of the weighted-average scores of all individual indicators. Using these indicators is useful in quantitative evaluation and digital mapping of soil pollution for management purposes.

Keywords: Heavy metal, Pollution Indices, Soil pollution

Hamzenejad taghliabad R. and Khodaverdiloo H. 2020. Quantitative assessment of soil heavy metals pollution. *Applied Soil Research*, 8(2): 37-52.

1. Ph.D Graduated, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University

2. Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University

* Corresponding Author Email: h.Khodaverdiloo@Urmia.ac.ir