

Evaluation of Heavy Metal Contamination in Desert Soils around Pb-Zinc Mine of Kushk, Bafq Using Pollution Indicators and Principal Component Analysis

Zahra Sohrabizadeh¹, Hamid Sodaiezadeh*², Mohammad Ali Hakimzadeh³, Rouhollah Taghizadeh Mehrjardi⁴, Mohammad Javad Ghanei Bafaqi⁵

1- PhD Candidate of Desertification, Department of Arid and Desert Management, Faculty of Natural Resources, Yazd University, Yazd, Iran

2- Associate Professor, Department of Arid and Desert Management, Faculty of Natural Resources, Yazd University, Yazd, Iran

(*Corresponding Author Email: hsodaie@yazd.ac.ir)

3- Associate Professor, Department of Arid and Desert Management, Faculty of Natural Resources, Yazd University, Yazd, Iran

4- Assistant Professor, Department of Desert Management, Ardakan University, Yazd, Iran

5- Assistant Professor, Department of Desert Management, Ardakan University, Yazd, Iran

Abstract

Soil is a major component of the biosphere that is exposed to pollutants such as heavy metals. Soil pollution by heavy metals is an important issue and heavy metals originate from the two main sources of natural resources and human inputs including mining, various industries, road transport, mineral and chemical fertilizers for agriculture, sewage sludge, and industrial wastes. Mining and mineral processing activities are the most important sources of potentially toxic elements entering the environment and pollute various parts of the environment (including water, soil, air, and vegetation sources). Along with population growth and industrial development, mining activities for metal extraction have also expanded and as a result, the environment around the mines has been more and more affected by metal pollutants.

Kushk Pb-Zn mine has been manually worked since 1940 and mechanized since 1964 and is located in a condensing and processing plant next to the mine. Mining waste is located on the margin of the mine deposited and can be spread downstream by wind or water. Because so far few studies have been conducted on the level and extent of pollution of soil sources around the lead and zinc mine, so the present study aims to evaluate the concentration of heavy metals (Cd, Mn, Cu, Fe, Pb, and Zn) and the extent of pollution and their environmental hazards were assessed in the study area.

Sampling was done in November 2018 and 102 soil samples were collected from the Kushk mine area and its surroundings. Sampling has been done inside and outside the mine up to a radius of about eight kilometers. The location of the samples was determined by the Latin square method. The Latin Square Method is an almost modern sampling method that is stratified or layered. Their concentration was measured using a German model atomic absorption spectrometer (Jena330). After reading the concentration by the atomic absorption spectrometer, the obtained data were analyzed by Excel and IBM SPSS Statistic 22 software. Also, to show the spatial distribution of pollution of different elements considered in the research, the IDW method was used to prepare the maps using Arc GIS 10.3 software. Also, soil pollution was assessed using the pollution factor (CF), enrichment factor (EF), and land accumulation index (Igeo).

This study evaluated six heavy metals in 102 soil samples (Cd, Mn, Cu, Fe, Pb, and Zn) conducted in the Kushk Pb-Zn mine in Bafq. The concentration of the studied heavy metals was in the order of Zn > Pb > Mn > Fe > Cd > Cu and only three elements of cadmium, lead, and zinc were above the alert threshold. The highest amount of elements was present in the southern part of the mine and near the mineral tailings and downstream of the road and sometimes on the road and machine traffic. The results showed the distribution of lead and zinc elements in the margins of the mine, especially in the margins of mineral tailings and downstream of the road. The reasons for this can be considered as the

effect of wind and the existence of seasonal waterways in the transfer of these elements due to human activities such as mining and transportation to the mentioned points. Lead and zinc are gallons, so the amount of lead in the soil can indicate the geological origin of the contamination. The concentrations of copper, iron, and manganese for the soil in the study area were below the warning threshold. The results of the pollution indices used (except the Nemro index) indicated that the area was either not polluted or had little pollution. The Nemro index indicated that all elements (except copper) were severely contaminated. The lead was the highest element in all indicators, which can be said to be due to the type of parent rock and the geology of the region. On the other hand, the results of multivariate statistical analysis of heavy metals showed that vehicle and geological activities were the most important sources of zinc, lead, and cadmium contamination. Iron, copper, and manganese were mainly controlled by geological sources and parent materials, and manganese concentrations can be affected by fertilizers and agricultural soils. Due to the fact that the soil of the study area was contaminated with other heavy metals in addition to lead and zinc, so the need for more research in the area to evaluate strategic plans for soil resource management is necessary.

Keywords: Environmental Standard, Soil Pollution, Cluster Analysis, Enrichment Factor, Human Activity.





جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی

سال ۳۱، پیاپی ۷۷، شماره ۱، بهار ۱۳۹۹

وصول: ۱۳۹۸/۱۱/۳ پذیرش: ۱۳۹۹/۴/۳۰

صص ۳۴-۱۵

ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های پیرامون معدن سرب و روی کوشک بافق با استفاده از شاخص‌های آلودگی و تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی

زهرا سهرابی‌زاده، دانشجوی دکتری گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

sohrabizahra@stu.yazd.ac.ir

حمید سودایی‌زاده^{*}، دانشیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

hsodaie@yazd.ac.ir

محمدعلی حکیم‌زاده، دانشیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

hakim@yazd.ac.ir

روح‌الله تقی‌زاده مهرجردی، استادیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران

rtaghizadeh@ardakan.ac.ir

محمدجواد قانع بافقی، استادیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران

mjghaneib@ardakan.ac.ir

چکیده

آلودگی خاک با فلزات سنگین، مسئله مهمی است. این پژوهش با هدف بررسی غلظت فلزات سنگین (کادمیم، مس، آهن، منگنز، سرب و روی) در ۱۰۲ نمونه خاک معدن سرب و روی کوشک شهرستان بافق در استان یزد انجام و غلظت به روش مربع لاتین تعیین شد؛ همچنین ارزیابی آلودگی خاک با استفاده از عامل آلودگی (CF)، غنی‌شدگی (EF) و شاخص زمین‌انباشتگی (I_{geo}) انجام شد.

نتایج نشان داد میانگین مقادیر کادمیم، مس، آهن، منگنز، سرب و روی در خاک‌های منطقه به ترتیب ۰/۲۶، ۰/۳۹، ۰/۴۱، ۰/۳، ۰/۹ و ۵۱/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم است و در این بین، کادمیم، سرب و روی از حد آستانه ایران و جهان فراتر رفته‌اند. در تمامی شاخص‌های محاسبه‌شده، بیشترین مقدار به عنصر سرب مربوط بوده که دلیل آن، نوع سنگ مادری و زمین‌شناختی و فعالیت‌های انسانی است.

تجزیه و تحلیل آماری چندمتغیره، مؤلفه اصلی و تجزیه و تحلیل خوشه‌ای نشان داد فلزات سنگین بررسی‌شده در دو گروه طبقه‌بندی می‌شوند؛ گروه اول شامل عناصر مس، کادمیم، سرب و روی است که سرب و روی عمدتاً از آلودگی‌های سنگ‌شناختی و فعالیت‌های انسانی ناشی از معدن‌کاری و ترافیک تأثیر می‌پذیرند؛ گروه دوم شامل منگنز و آهن است که این عناصر نیز از منابع سنگ‌شناسی و انسان‌شناختی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و کودهای شیمیایی تأثیر می‌پذیرند.

با توجه به اینکه خاک منطقه پژوهش علاوه بر عناصر سرب و روی به سایر فلزات سنگین نیز آلوده است، انجام پژوهش‌های بیشتر در منطقه برای ارزیابی برنامه‌های راهبردی مدیریت منابع خاک ضروری است.

واژه‌های کلیدی: استاندارد زیست‌محیطی، آلودگی خاک، تحلیل خوشه‌ای، فاکتور غنی‌شدگی، فعالیت انسانی

*نویسنده مسئول

Copyright©2017, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they can't change it in any way or use it commercially.

[10.22108/gep.2020.121263.1260](https://doi.org/10.22108/gep.2020.121263.1260)

مقدمه

خاک، جزء اصلی زیست‌کره است که در معرض آلاینده‌هایی از جمله فلزات سنگین قرار دارد. آلودگی خاک با فلزات سنگین، مسئله مهمی است. فلزات سنگین از دو منبع اصلی منابع طبیعی زمینه و ورودی‌های انسانی شامل معدن‌کاری، صنایع مختلف، حمل‌ونقل جاده‌ای، کودهای معدنی و شیمیایی کشاورزی، لجن فاضلاب و پسماندهای صنعتی سرچشمه می‌گیرند (Jiao et al., 2015: 1; Kumar et al., 2019: 3). معدن‌کاری و فرآوری مواد معدنی، مهم‌ترین منابع ورود عناصر بالقوه سمی به محیط‌زیست است و موجب آلودگی بخش‌های مختلف محیط‌زیست (منابع آب، خاک، هوا و پوشش گیاهی) می‌شود. همزمان با رشد جمعیت و پیشرفت صنایع، فعالیت‌های معدنی برای استخراج فلزات نیز گسترش یافته و در نتیجه محیط پیرامون معادن بیش از پیش از آلاینده‌های فلزی تأثیر پذیرفته است. به‌طور کلی باطله‌های معدنی و زهاب‌های اسیدی حاوی غلظت‌های زیاد عناصر بالقوه سمی هستند و تخلیه این مواد از معادن بدون رعایت استانداردهای زیست‌محیطی موجب آلودگی آب، خاک، هوا و محصولات زراعی در محیط‌های پیرامون شده و از این راه آلاینده‌های فلزی به زنجیره غذایی انسان و دام وارد می‌شود (Kabata pendias & Pendias, 2001: 12).

اجرای برنامه‌های توسعه صنعتی صرف‌نظر از ملاحظات زیست‌محیطی به ورود آلاینده‌های شیمیایی به آب، خاک و هوا در مناطق مختلف منجر شده است. بسیاری از پژوهش‌ها نشان داده‌اند آب، خاک و هوا در مناطق مجاور فعالیت‌های صنعتی بسیار آلوده است؛ بنابراین فعالیت‌های صنعتی بر سلامت ساکنان مناطق پیرامون از راه هوا، آب و خاک تأثیر می‌گذارد و موجب بروز بیماری‌ها و عوارض جانبی می‌شود (Khosravi et al., 2018: 10; Skaldina et al., 2018: 574). ویژگی‌های آلودگی فلزات سنگین خاک و خطرات زیست‌محیطی، اساس ارزیابی کیفیت محیط‌زیست خاک است. فقط تعیین غلظت فلزات سنگین، اثر تخریب‌کننده آنها را بر محیط مشخص نمی‌کند؛ استخراج از معدن سرب و روی کوشک از سال ۱۳۱۸ به صورت دستی و از سال ۱۳۴۲ به صورت مکانیزه شروع شده است و در کنار این معدن، کارخانه تغلیظ و فرآوری آن قرار دارد. باطله‌های معدنی و پسماندهای حاصل از کارخانه تغلیظ در حاشیه معدن و کنار جاده اصلی منطقه انبار می‌شود و ممکن است با باد یا آب به مناطق پایین دست گسترش یابد. با در نظر گرفتن این مسائل و اینکه تاکنون پژوهش‌های کمی درباره میزان آلودگی منابع خاک پیرامون معدن سرب و روی کوشک و میزان گسترش آلودگی آن انجام شده است، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تعیین غلظت فلزات سنگین (کادمیم، مس، آهن، منگنز، سرب و روی) و تعیین میزان آلودگی و خطرات زیست‌محیطی آنها در منطقه پژوهش انجام شد.

پیشینه پژوهش

درباره استفاده از شاخص‌های زیست‌محیطی برای تعیین میزان فلزات سنگین در محیط مرجع، پژوهش‌های بسیاری انجام شده است؛ از جمله:

کشاورزی و کومار^۱ (۲۰۱۹)، کومار و همکاران^۲ (۲۰۱۹) و تیان و همکاران^۱ (۲۰۱۷) این موضوع را بررسی کرده‌اند.

^۱ Keshavarzi & Kumar

^۲ Kumar et al.

کومار و همکاران (۲۰۱۹) بیان کردند EF و I_{geo} مبتنی بر ارزیابی نسبی فلزات سنگین در شرایط خاک آلوده و غیرآلوده‌اند.

همچنین تاکنون پژوهش‌های بسیاری در زمینه آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های معدنی و صنعتی انجام شده است؛ برای نمونه:

شفیعی و همکاران (۱۳۹۲) غنی‌شدگی آرسنیک و سلنیم را در خاک‌های پیرامون معدن مس سرچشمه بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که غلظت این عناصر در نزدیکی معدن بیشتر است و با فاصله‌گرفتن از معدن، غلظت آنها کاهش می‌یابد؛ همچنین عنصر سلنیم در محدوده غیرآلوده و عنصر آرسنیک در محدوده کمی آلوده تا شدیداً آلوده قرار می‌گیرد.

سیستانی و همکاران (۱۳۹۶) آلودگی فلزات سنگین را در خاک‌های مجاور صنایع فولاد کرمان و غنای فلزی و درجه آلودگی خاک را بررسی کردند. آنها از شاخص‌های منشأیابی و تعیین درجه آلودگی از جمله عامل غنی‌شدگی (EF)^۲ و درصد آن، زمین‌انباشت (I_{geo})^۳ و عامل آلودگی (CF)^۴ استفاده کردند. نتایج نشان داد غلظت سرب و کادمیم بیشتر متأثر از مجتمع‌های فولاد و غلظت سایر عناصر متأثر از منابع طبیعی و انسانی است.

مرادی و همکاران (۱۳۹۶) شاخص مخاطره بوم‌شناختی فلزات سنگین را در خاک سطحی بوستان‌های شهری تهران با استفاده از طیف‌سنجی پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP) و شاخص خطرپذیری بالقوه بوم‌شناختی تجمع‌ی فلزات سنگین (RI)^۵ ارزیابی کردند. نتایج نشان داد میانگین غلظت سرب و مس در نمونه‌ها بیش از میزان یادشده در سازمان بهداشت جهانی (WHO)^۶ بود؛ همچنین شاخص RI در محدوده کم‌خطر قرار داشت.

خسروی و همکاران^۷ (۲۰۱۸) توزیع مکانی و محتوای شش فلز سنگین (کبالت، نیکل، مس، روی، کادمیم و سرب) را در خاک‌های پیرامون شرکت ملی سرب و روی ایران (NILZ) در شهرک صنعتی بناب (زنجان-ایران) بررسی کردند. گزارش آنها بیان‌کننده تأثیر زیاد فعالیت‌های این شرکت بر توزیع فلزات سنگین در منطقه مدنظر بود.

کشاورزی و کومار (۲۰۱۹) در پژوهش خود توزیع مکانی و ریسک اکولوژیکی بالقوه فلزات سنگین را در خاک‌های کشاورزی شمال شرقی ایران بررسی و ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که هر دو فعالیت‌های انسانی و عوامل طبیعی، مسئول محتوای فلزات سنگین بودند.

همچنین کومار و همکاران (۲۰۱۹) آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های هند و ریسک زیست‌محیطی آن را بررسی کردند. ضریب آلودگی (CF)، عامل غنی‌شدگی (EF) و شاخص آلودگی بالقوه (Cp) نشان دادند کادمیم و آرسنیک، آلاینده‌های اصلی هستند و شاخص ریسک زیست‌محیطی نشان داد کادمیم، آلاینده اصلی خاک‌های مختلف هند است.

1. Tian et al.

2. Enrichment Factor

3. Geoaccumulation Index

4. Contamination factor

5. Risk Index

6. World Health Organization

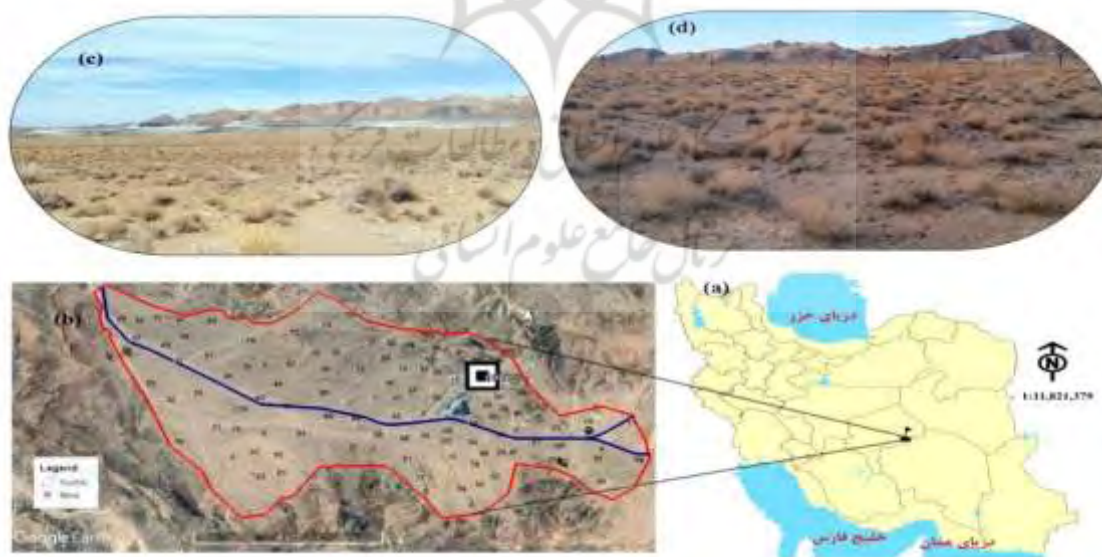
7. Keshavarzi et al.

موکوپادپایی و همکاران^۱ (۲۰۲۰) در پژوهش خود فلزات سنگین و کربن آلی خاک را با استفاده از طیف‌سنجی قابل حمل اشعه X و حسگر NixProTM در خاک‌های محل دفع زباله هند ارزیابی کردند. نتایج بررسی‌های شیمیایی نشان داد روی، منگنز، مس و سرب در همه نمونه‌ها از حد آستانه فراتر بوده است. آنها همچنین چهار شاخص آلودگی مختلف (ER ، CF ، EF ، I_{geo}) را محاسبه و از لحاظ مکانی با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج بررسی‌های شیمیایی حاکی از آن بود که عناصر روی، منگنز، مس و سرب در همه نمونه‌ها از حد آستانه فراتر بوده است.

روش‌شناسی پژوهش

منطقه پژوهش

معدن سرب و روی کوشک در ۴۵ کیلومتری شمال شرقی شهرستان بافق و در ۱۶۰ کیلومتری شرق استان یزد ($31^{\circ}43'$ و $55^{\circ}45'$ تا $31^{\circ}46'15''$ و $31^{\circ}46'15''$) واقع شده است (شکل ۱). متوسط ارتفاع منطقه، حدود ۲۰۷۰ متر بالاتر از سطح دریاست. این منطقه، آب‌وهوایی خشک و بیابانی دارد. میانگین بارش سالیانه منطقه با دوره آماری ۹ ساله بیش از ۹۷ میلی‌متر، میانگین سالیانه درجه‌حرارت $26/14$ درجه سلسیوس، گرم‌ترین ماه سال تیر، سردترین ماه سال دی، حداقل و حداکثر دمای ثبت‌شده به ترتیب -24 و $+5/47$ درجه سلسیوس است. جهت باد غالب، شمال غربی و غربی است. کانسار کوشک از مواد معدنی اصلی پیریت، اسفالریت، گالن و مقدار بسیار کمی کالکوپیریت و سایر مواد معدنی فرعی تشکیل شده است. به طور کلی مهم‌ترین مواد معدنی موجود در کانسار کوشک، مواد معدنی ای هستند که در اوایل تشکیل و همزمان با رسوب‌گذاری ایجاد شده‌اند. مواد معدنی ثانویه از تغییر مواد معدنی اولیه و بستر به دست می‌آید که مهم‌ترین آنها، سولفات‌ها، کربنات‌ها، مواد معدنی فسفات و رس هستند (نادری و همکاران، ۱۳۹۴: ۲).



شکل ۱. شمای کلی؛ (a). موقعیت منطقه پژوهش در ایران؛ (b). موقعیت نقاط نمونه‌برداری؛ (c و d). نمای کلی از بخش‌های مختلف نمونه‌برداری

¹. Mukhopadhyay et al.

روش نمونه‌برداری و تجزیه‌های آزمایشگاهی

نمونه‌برداری در آبان ۱۳۹۷ انجام و ۱۰۲ نمونه خاک از منطقه معدن کوشک و پیرامون آن جمع‌آوری شد. در واقع نمونه‌برداری در محدوده داخلی معدن و نیز خارج از آن تا شعاع حدود ۸ کیلومتری انجام و محل نمونه‌ها به روش مربع لاتین^۱ تعیین شد. روش مربع لاتین، یک شیوه نمونه‌برداری تقریباً مدرن طبقه‌بندی شده^۲ یا لایه‌ای است. در این روش، متغیرهای کمکی به دسته‌های یکنواخت تقسیم‌بندی می‌شوند. روش کار مربع لاتین به این صورت است که کاربر تصمیم می‌گیرد از تعدادی نمونه مشخص استفاده کند. این روش، داده‌های متغیرهای محیطی را به همان تعداد نمونه‌های مدنظر به صورت خوشه تقسیم و یک نمونه تصادفی از داده‌های ورودی متغیرهای محیطی هر خوشه را انتخاب و سعی می‌کند پوشش کاملی از هر متغیر ایجاد کند (Minasny & McBratney, 2006: 1380).

از هر نمونه ۱/۵ تا ۲/۰ کیلوگرم براساس نیاز از عمق ۰ تا ۵ سانتی‌متری (خاک سطحی) جمع‌آوری شد. نمونه‌برداری با استفاده از بیل‌های فولادی و کیسه‌های پلاستیکی برای هر نمونه به صورت جداگانه انجام شد تا از انتقال آلودگی به نمونه‌های دیگر جلوگیری شود. همه نمونه‌های خاک هوا خشک و سپس برای تعیین غلظت عناصر کادمیم، مس، آهن، منگنز، سرب و روی، از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد؛ در ادامه نمونه‌ها با روش DTPA استخراج شدند (Lindsay & Norvell, 1978: 422) و غلظت آنها با استفاده از طیف‌سنج جذب اتمی مدل (Jena330) ساخت آلمان اندازه‌گیری شد (Ungureanu et al., 2017). پس از قرائت غلظت با دستگاه جذب اتمی، داده‌های به دست آمده با نرم‌افزارهای اکسل و IBM SPSS Statistic 22 تحلیل شد؛ همچنین به منظور نمایش توزیع مکانی آلودگی عناصر مختلف مدنظر در پژوهش، روش عکس فاصله (IDW)^۳ برای تهیه نقشه‌ها با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS 10.3 به کار رفت.

شاخص‌های آلودگی

فاکتور آلودگی (Contamination factor, CF)

روش‌های متفاوتی برای تخمین درجه غنی‌شدگی رسوبات با فلزات سنگین وجود دارد؛ یکی از راه‌های بیان سطح آلودگی فلزات، تعیین آن با فاکتور آلودگی (CF) است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$CF = \frac{C_{heavy\ metal}}{C_{background}} \quad (1)$$

C heavy metal، غلظت فلز سنگین در نمونه و C background، غلظت عنصر مرجع است (Hakanson, 1980: 984). زمان نمونه‌برداری، نمونه‌ای خارج از منطقه پژوهش به مثابه نقطه مرجع انتخاب شد که در مکانی واقع بوده که هیچ‌گونه فعالیت و آلودگی وجود نداشته است.

¹. Hypercube

². Stratified random sampling

³. Inverse Distance Weighting, IDW

جدول ۱. درجه‌بندی سطوح آلودگی خاک براساس شاخص CF (Hakanson, 1980: 984)

فاکتور آلودگی	درجه آلودگی
$CF > 1$	آلودگی کم
$1 \geq CF \geq 3$	آلودگی متوسط
$3 \geq CF \geq 6$	آلودگی زیاد
$CF > 6$	آلودگی خیلی زیاد

فاکتور غنی‌شدگی (Enrichment Factor, EF)

ضریب غنی‌شدگی در تحلیل‌های محیط‌زیستی، یکی از عوامل مهم ارزیابی ریسک آلودگی خاک به عناصر سنگین شناخته می‌شود. این ضریب براساس رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$EF = \frac{\left(\frac{C_X}{C_{ref}}\right)_{\text{sample}}}{\left(\frac{C_X}{C_{ref}}\right)_{\text{Background}}} \quad (2)$$

در این معادله، C_X غلظت عنصر در نمونه بررسی شده، C_{ref} غلظت عنصر مرجع، sample مقدار عنصر در نمونه‌ها و Background غلظت عنصر در زمینه است. عنصر مرجع در تعیین ضریب غنی‌شدگی، عنصری است که منشأ کاملاً زمین‌شناسی داشته باشد. در پژوهش‌های محیط‌زیستی معمولاً از Ti, Zr, Al, Fe, Sc به‌مثابه عناصر مرجع استفاده می‌شود (Abraham and Parker, 2008: 234). در این پژوهش از عنصر آهن به‌مثابه عنصر مرجع استفاده شده است؛ علاوه بر نمونه‌های یادشده، نمونه‌ای به‌مثابه شاهد لازم بود تا میزان سرب و روی موجود در نمونه‌های منطقه مدنظر با آن مقایسه شود. به این منظور در منطقه مجاور با زمین‌شناسی شبیه به زمین‌شناسی منطقه پژوهش و محلی دور از دسترس باد، نمونه‌ای تهیه شد (قانع‌ی بافقی، ۱۳۹۳: ۶۷). چنانچه اشاره شد، در این پژوهش عنصر آهن به دلیل داشتن این شرایط به‌مثابه عنصر مرجع در نظر گرفته شد.

جدول ۲. درجه‌بندی سطوح آلودگی خاک براساس شاخص EF (Taylor, 1964: 1275)

مقدار EF	درجه غنی‌شدگی
$EF < 1$	نبود آلودگی یا درجه غنای حداقل
$1 > EF \geq 3$	درجه غنای کم
$3 > EF \geq 5$	درجه غنای متوسط
$10 > EF \geq 5$	نسبتاً دارای غنا
$25 > EF \geq 10$	درجه غنای زیاد
$50 > EF \geq 25$	غنای بسیار زیاد
$EF > 50$	غنای فوق‌العاده زیاد

شاخص زمین‌انباشت (Geoaccumulation Index, I_{geo})

با استفاده از شاخص زمین‌انباشت درجه آلودگی خاک تعیین می‌شود. این شاخص را مولر^۱ (۱۹۷۹) معرفی کرده است. روش محاسبه براساس رابطه زیر است:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_i}{1.5B_i} \right) \quad (3)$$

I_{geo} شاخص زمین‌انباشتگی یا شدت آلودگی، C_i میزان عنصر در نمونه‌های خاک بررسی شده و B_i مقدار عنصر در محیط مرجع است. ضریب ثابت ۱/۵ به منظور به حداقل رساندن اثر تغییرات احتمالی در غلظت‌های پس‌زمینه است که معمولاً این اختلافات به دلیل تغییرات سنگ‌شناسی خاک‌هاست (Muller, 1979: 111).

جدول ۳. درجه‌بندی سطوح آلودگی خاک براساس شاخص I_{geo} (Muller, 1979: 111)

شاخص زمین‌انباشتگی	درجه آلودگی
<۰	غیرآلوده
۰-۱	غیرآلوده تا کمی آلوده
۱-۲	کمی آلوده
۲-۳	کمی آلوده تا خیلی آلوده
۳-۴	خیلی آلوده
۴-۵	خیلی آلوده تا شدیداً آلوده
>۵	شدیداً آلوده

شاخص آلودگی نمر (Nemro Integrated Pollution Index, NIPI)

شاخص نمر برای هر نقطه نمونه برداری شده بر مبنای رابطه زیر محاسبه شد:

$$NIPI = \sqrt{\frac{(P_{i\text{ave}})^2 + (P_{i\text{max}})^2}{2}} \quad (4)$$

در این رابطه، NIPI، شاخص آلودگی نمر و P_{i ave}، میانگین شاخص آلودگی عنصر i است که در واقع میانگین هریک از عناصر اندازه‌گیری شده در منطقه پژوهش محسوب می‌شود. P_{i max}، بیشترین میزان شاخص آلودگی عنصر i یا بیشترین مقدار هریک از عناصر اندازه‌گیری شده در منطقه پژوهش است (Lei et al., 2004: 532).

^۱. Muller

جدول ۴. درجه‌بندی شاخص جامع آلودگی نمره (Lei et al., 2004: 530)

شاخص آلودگی (NIPI)	درجه آلودگی
$NIPI > 0.7$	غیرآلوده
$0.7 \leq NIPI < 1$	نسبتاً غیرآلوده
$1 \leq NIPI < 2$	کمی آلوده
$2 \leq NIPI < 3$	آلودگی متوسط
$NIPI \geq 3$	آلودگی شدید

تجزیه به مؤلفه اصلی (Principal Component Analysis, PCA) و آنالیز خوشه‌ای (Cluster Analysis, CA)

به منظور تعیین ارتباط بین عناصر سنگین و تشخیص عوامل انسانی و طبیعی کنترل‌کننده تغییرات هر یک از عناصر بررسی شده، از روش تجزیه به مؤلفه اصلی (PCA) استفاده شد. برای داشتن ساختاری ساده و تفسیر بهتر نتایج تجزیه، چرخش داده‌ها از نوع واریماکس انجام شد. در تجزیه و تحلیل خوشه‌ای، هدف دست‌یافتن به ملاکی برای طبقه‌بندی هرچه مناسب‌تر متغیرها یا نمونه‌ها براساس تشابه هرچه بیشتر درون‌گروهی و اختلاف بیشتر بین گروهی است (افشاری و خادمی، ۱۳۹۵: ۱۹). در این پژوهش از روش الگوریتم وارد (Ward) و فاصله اقلیدسی برای تحلیل خوشه‌ای و رسم دندروگرام استفاده شد.

یافته‌های پژوهش

خلاصه آماری نتایج حاصل از غلظت عناصر مختلف در منطقه پژوهش در جدول ۵ نشان داده شده است. دامنه غلظت مس، کادمیم، آهن، منگنز، سرب و روی به ترتیب $0.06 - 2.5$ ، $0.03 - 0.7$ ، $0.09 - 0.7$ ، $0.07 - 123.9$ ، $13.7 - 394.7$ و $28.2 - 1079.1$ میلی گرم بر کیلوگرم و با میانگین مقادیر 0.26 ، 0.39 ، 0.1 ، 0.3 ، 40.9 و 51.9 میلی گرم بر کیلوگرم به دست آمد. میانگین غلظت فلزات سنگین به ترتیب $Cu > Cd > Fe > Mn > Pb > Zn$ بود. یانگمینگ و همکاران^۱ (۲۰۰۶) گزارش دادند ضرایب تغییرات (CV) فلزات سنگینی که با منابع طبیعی کنترل می‌شوند، تقریباً کم است؛ در حالی که برای فلزات سنگین متأثر از منابع انسانی، این ضریب زیاد است؛ بنابراین براساس ضرایب تغییرپذیری به دست آمده در این پژوهش (جدول ۵)، فلزات سنگین بررسی شده را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد؛ مقدار CV آهن کمتر از 0.4 است؛ در حالی که مس، کادمیم، منگنز، سرب و روی مقدار CV بیش از ۱ دارند؛ بنابراین به نظر می‌رسد آهن با منابع طبیعی در ارتباط است، در حالی که مس، کادمیم، منگنز، سرب و روی متأثر از فعالیت‌های انسانی اند.

^۱. Yongming et al.

جدول ۵. آمار توصیفی غلظت فلزات سنگین خاک منطقه پژوهش (mg/kg)

روى	سرب	منگنز	آهن	مس	کادمیم	عناصر مقادیر
۲۸/۲۷	۱۳/۷۹	۰/۰۷	۰/۷۶	۰/۰۶	۰/۰۳	حداقل
۱۰۷۹/۱۲	۳۹۴/۴	۱۲۳/۹۲	۹/۰۹	۲/۵۳	۷/۹۸	حداکثر
۵۱/۹۲	۴۰/۹۲	۵/۳۶	۴/۱۶	۰/۳۹	۰/۲۶	میانگین
۳۴/۱۱	۱۸/۲	۲/۸۶	۴/۲۶	۰/۳۶	۰/۱۷	میانه
۱۰۴/۹۱	۵۳/۷۱	۱۶/۷۹	۱/۵۵	۰/۲۴	۰/۷۷	انحراف استاندارد
۲/۰۲	۱/۳۱	۳/۱۳	۰/۳۷	۰/۶۲	۲/۹۱	ضریب تغییرات
۹/۴۹	۳/۹۹	۴۷/۱۶	۰/۱۳	۶/۷۱	۹/۸۷	چولگی
۹۳/۴۹	۲۰/۲۵	۶/۹	۰/۴۵	۵۸/۱۹	۹۸/۸۷	کشیدگی

جدول ۶. غلظت فلزات سنگین خاک براساس استانداردهای جهانی (mg/kg)

روى	سرب	منگنز	آهن	مس	کادمیم	عناصر مقادیر
۵۰	۸۵	-	-	۳۶	۰/۸	استاندارد سازمان بهداشت جهانی ^a
۳۰۰	۳۰۰	-	-	۱۴۰	۳	استاندارد اتحادیه اروپا ^b
۳۰۰	۱۰۰	-	-	۱۰۰	۵	استاندارد اتریش ^c
۹۰	۳۵	-	-	۳۰	۰/۳۵	مقدار متوسط در خاک‌های جهان ^d
۲۰۰	۳۰۰	-	-	۶۳	۳/۶	استانداردهای کیفیت منابع خاک ایران ^e

a. (WHO, 1996: 85)
b. (McGrath et al., 1994: 110)
c. (El-Bassam and Tietjen, 1977: 255)
d. (Adriano, 2001: 200)
e. (معاونت محیط‌زیست انسانی، دفتر آب و خاک ایران، ۱۳۹۷: ۵)

ضرایب چولگی کادمیم، مس، منگنز، سرب و روی بسیار بیشتر از صفر بوده و حاکی از توزیع مثبت است که مقادیر نسبتاً زیاد موجود در نمونه‌ها را نشان می‌دهد؛ از سوی دیگر، ضریب چولگی آهن به صفر نزدیک‌تر است و نشان می‌دهد از توزیع نرمال پیروی می‌کند (Chen et al., 2010: 642; Ungureanu et al., 2017: 24).

حداکثر استاندارد کادمیم در خاک‌های جهان، ۰/۳۵ (Adriano, 2001: 200) و در ایران، ۳/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم است (معاونت محیط‌زیست انسانی، دفتر آب و خاک ایران، ۱۳۹۷: ۵)؛ در حالی که غلظت کادمیم در نمونه‌های بررسی شده بین ۰/۰۳ تا ۷/۹۸ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. حداکثر مقدار کادمیم در نمونه‌های خاک نسبت به حد استانداردهای یادشده در جدول ۶ بیشتر بود.

خسروی و همکاران (۲۰۱۸) در برآورد الگوی توزیع مکانی فلزات سنگین پیرامون کارخانه تولید سرب و روی در استان زنجان، میانگین محتوای کادمیم خاک را ۵/۷۹ میلی‌گرم در کیلوگرم تخمین زده‌اند. آنها عامل انسانی را دلیل زیادبودن مقدار کادمیم بیان کردند.

عوامل تولید کادمیم در خاک ممکن است منابع مختلفی از جمله کشاورزی، کودهای فسفات، رسوبات صنعت یا لجن فاضلاب داشته باشد (Maas et al., 2010: 2294). مقدار مس در خاک منطقه مدنظر بین ۰/۰۶ - ۲/۵۳ میلی‌گرم در کیلوگرم است.

آلودگی مس به‌طور کلی حاصل مواد شیمیایی کشاورزی (قارچ‌کش‌ها) یا رسوب ناشی از فعالیت‌های صنعتی است (Kabata-pendias and Pendias, 2001: 121; Maas et al., 2010: 2294). بعضی قارچ‌کش‌ها از جمله قارچ‌کش بردوبهسم برای جلوگیری از آسیب دیدن انگورها استفاده می‌شود. بردوبهسم بیشتر از پنج پی‌پی‌ام یون مس آزاد می‌کند و جزو سالم‌ترین سموم است. در پژوهشی مقادیر مس در خاک تانستان ۵۰ - ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد که تا ۳۰۰ برابر بیش از مقادیر زمینه (۵ - ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بوده است (Chaignon et al., 2003: 1). مقایسه مقادیر موجود در خاک و آستانه‌های هشدار در ایران در جدول ۶، آلودگی خاک به این عنصر را نشان نمی‌دهد.

غلظت منگنز نمونه‌های بررسی شده بین ۰/۰۷ تا ۱۲۳/۹۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم با میانگین مقدار ۵/۳۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. لو و همکاران^۱ (۲۰۱۶) در بررسی توزیع و منبع عناصر بالقوه سمی (PTE)^۲ در خاک‌های شهری گوانگژو، میزان منگنز را در محدوده، ۲۱/۲ - ۱۲۸۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم تخمین زدند.

غلظت سرب در نمونه‌های بررسی شده بین ۱۳/۷ تا ۳۹۴/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم با میانگین ۴۰/۹۲ میلی‌گرم در کیلوگرم است و از آستانه‌های هشدار فراتر رفته است و می‌توان گفت منطقه آلودگی سرب دارد. پراکنش آلودگی سرب در محدوده جنوبی معدن به دلیل وجود فعالیت معدنی و در مسیر جاده به علت تردد ماشین‌آلات در مقایسه با سایر نقاط منطقه بیشتر است. پژوهش‌های بسیاری درباره سرب انجام شده است که نتایج مشابهی را نشان دادند (Khosravi et al., 2018: 14; Santos-Francés et al., 2017: 6; Ungureanu et al., 2017: 24) مقدار طبیعی سرب در خاک به ترکیب مواد مادری مربوط است و عمدتاً با مواد معدنی رس، اکسیدهای منگنز، هیدروکسیدهای آهن و آلومینیوم و مواد آلی در ارتباط است. منابع انسانی سرب شامل ترافیک، معادن فلزات، باتری‌ها، رنگ‌های قدیمی با پایه سرب و هرزآب فاضلاب‌هاست (Salminen et al., 2005: 525).

غلظت روی در منطقه بررسی شده بین ۲۸/۲۶ و ۱۰۷۹/۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. حداکثر استاندارد روی در خاک‌های جهان بر مبنای جدول ۵، ۹۰ و در ایران، ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. با توجه به اینکه بعضی از نمونه‌ها از آستانه‌های هشدار بیشترند، منطقه پژوهش به روی آلوده است. گفتنی است بیشترین میزان آلودگی در محدوده باطله‌های معدنی^۳ و به سمت پایین دست معدن است.

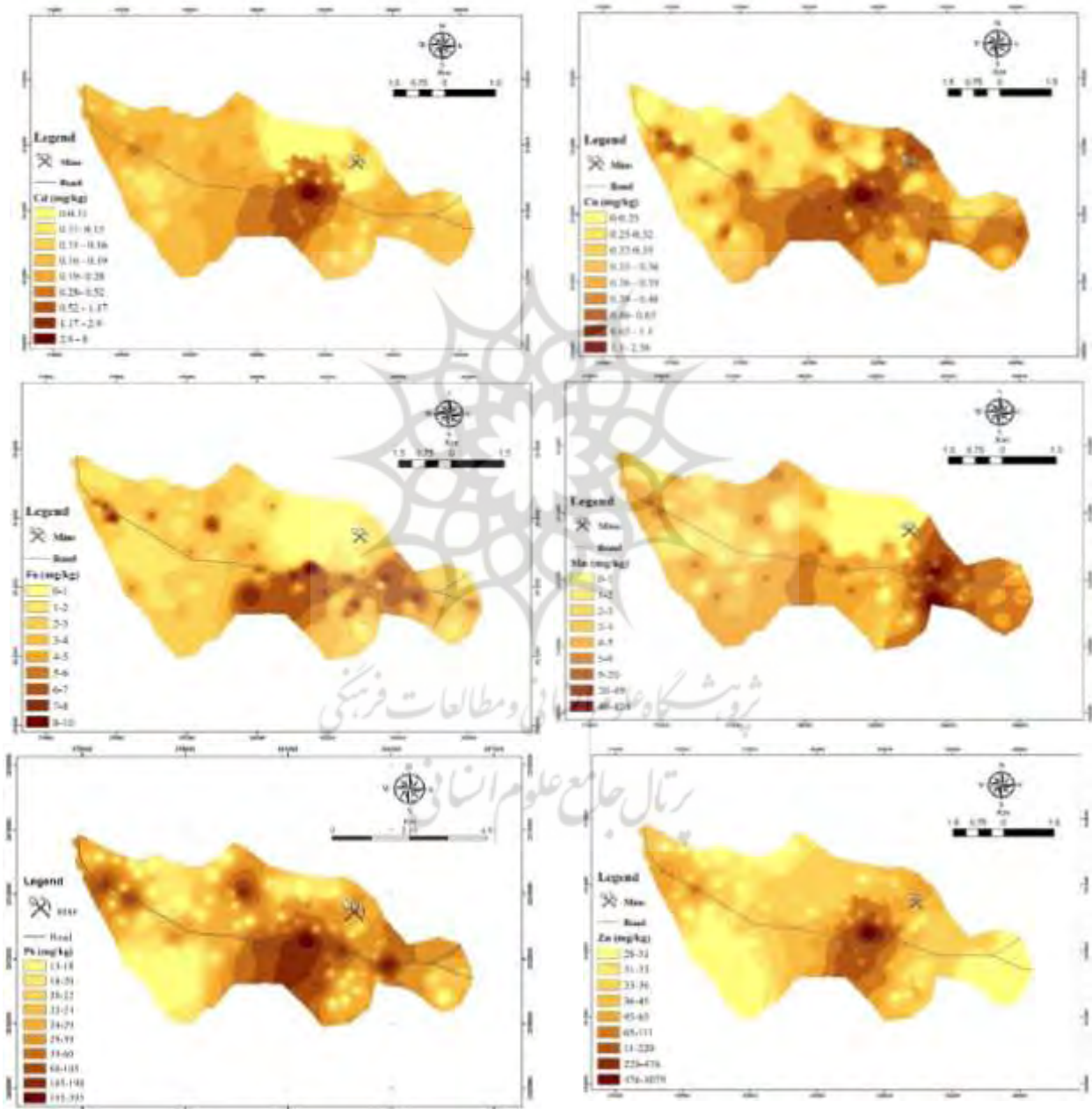
خسروی و همکاران (۲۰۱۸) میانگین محتوای روی خاک پیرامون کارخانه تولید سرب و روی زنجان را ۶۸۴/۱۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری کرده‌اند.

^۱ Lu et al.

^۲ Potentially Toxic Elements, PTE

^۳ Mine waste

سانتوس-فرانسیس و همکاران^۱ (۲۰۱۷) در پژوهش خود دربارهٔ توزیع مکانی فلزات سنگین و کیفیت زیست‌محیطی خاک در فلات شمالی اسپانیا، میانگین روی خاک را ۳۵/۳۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش کردند. محتوای روی در خاک با ماهیت سنگ مادری، بافت، مادهٔ آلی و pH ارتباط نزدیکی دارد. منابع انسانی روی شامل فعالیت‌های صنعتی از جمله معدن‌کاری، باطله‌های سوختی و زغال سنگ و پرداخت فولاد است (Salminen et al., 2005: 525). شناسایی الگوهای جغرافیایی برای شناخت رفتار خاک مهم است (Teng et al., 2013: 91); به همین منظور توزیع مکانی آلودگی عناصر مختلف مدنظر در پژوهش با روش IDW (شکل ۲) انجام شد.



شکل ۲. نقشهٔ توزیع مکانی فلزات سنگین در خاک منطقهٔ پژوهش به روش IDW

¹. Santos- Francés et al.

توزیع مکانی عناصر کادمیم، مس، سرب و روی در خاک مشابه بود. این ممکن است به دلیل منابع مشابه و انسان‌شناختی باشد (Lee et al., 2006: 49). براساس شکل ۲، بیشترین مقدار کادمیم در قسمت جنوبی معدن و در نزدیکی باطله وجود داشت؛ از سویی بیشترین غلظت مس در حوالی باطله‌های معدنی، قسمت‌های میانی و شرقی منطقه پژوهش بوده است. آهن کمتر از سایر فلزات پراکنش داشت. منگنز در قسمت شرقی منطقه توزیع شده و متأثر از اراضی کشاورزی منطقه پژوهش بوده است؛ با وجود این عناصر مس، آهن و منگنز از آستانه فراتر نرفته و آلودگی ایجاد نکرده است؛ بنابراین ممکن است منبع این عناصر سنگ مادری باشد. مقدار زیاد سرب در بخش غربی، شمال غربی، حاشیه جنوبی معدن و پایین جاده مشاهده شده است. توزیع عنصر سرب در کنار جاده و معدن بیشتر بوده که ممکن است ناشی از ترافیک و زمین‌شناسی باشد. عنصر روی فقط در بخش جنوبی معدن توزیع شده است. مشابه نتایج سایر پژوهشگران، مقادیر زیاد عناصر سرب و روی در مجاورت جاده‌های پرتراфик و نیز در مجاورت و حوالی جاده اصلی بوده است (Ungureanu et al., 2017: 24).

در این پژوهش شاخص‌های ژئوشیمیایی EF ، I_{geo} ، CF ، $NIPI$ و $EF\%$ برای درجه‌بندی سطوح آلودگی خاک استفاده شدند که در جدول‌های ۱ تا ۴ بیان شده است؛ همچنین چگونگی توزیع داده‌ها براساس شاخص‌های محاسبه‌شده برای هر یک از فلزات در نمودار جعبه‌ای نشان داده شده است (شکل ۳).

یکی از روش‌های متداول برای تعیین منشأ آلاینده‌ها و ارزیابی آثار عوامل انسان‌زاد بر خاک‌ها، محاسبه عامل غنی‌شدگی است (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۲: ۷). با توجه به جدول ۷، مشخص شد متوسط میزان EF اندازه‌گیری شده به ترتیب سرب < کادمیم < منگنز < روی < مس است؛ به بیان دیگر بیشترین میزان غنی‌شدگی خاک با فلزات براساس شاخص EF ، به فلز سرب و کمترین نیز به فلز مس مربوط است.

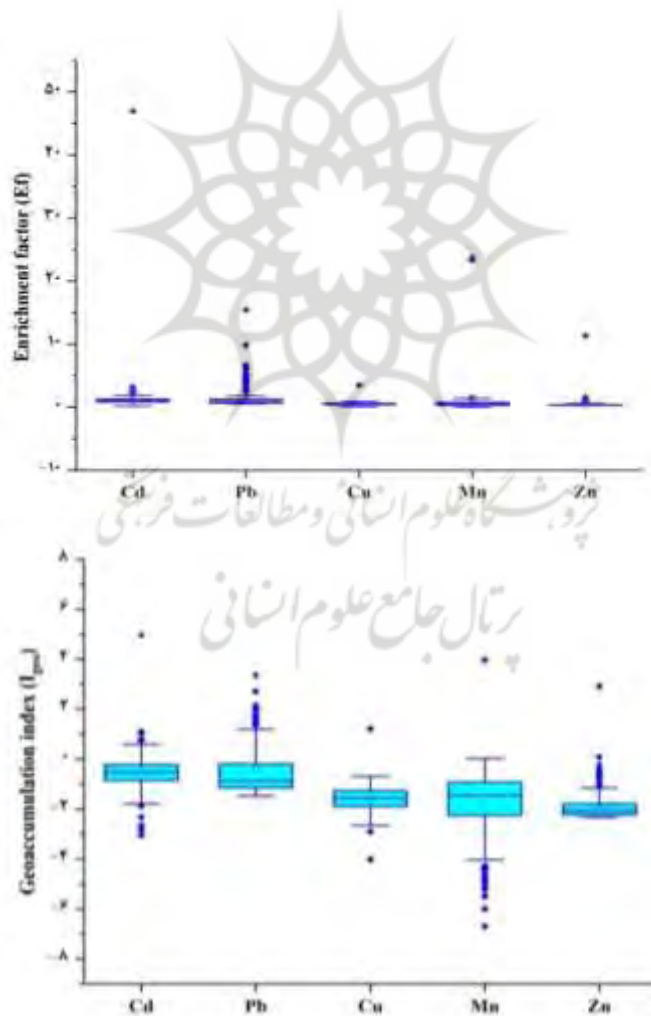
براساس نظریه ژانگ و لیو^۱ (۲۰۰۲) مقادیر عامل غنی‌شدگی بین ۰/۵ - ۱/۵، بیان‌کننده آن است که فلز کاملاً از مواد پوسته زمین یا فرایندهای طبیعی نشئت گرفته است. مقادیر عامل غنی‌شدگی بین ۰/۵ - ۲ به‌مثابه وجود منشأ زمین‌زاد و مقادیر بیش از ۲، تأثیر فعالیت‌های انسان‌زاد است (Hernandez et al., 2003: 209). به همین ترتیب فنگ و همکاران^۲ (۲۰۰۴) بیان کردند مقادیر غنی‌شدگی کمتر از ۱/۵ به‌مثابه منشأ پوسته‌ای یا هواپدیدگی طبیعی و مقادیر بیش از ۱/۵ به‌مثابه منشأ مواد غیرپوسته‌ای یا هواپدیدگی غیرطبیعی است. براساس مقایسه داده‌های موجود در جدول ۷ با طبقه‌بندی یادشده در جدول ۲، جز سرب که غنای کمی داشت، سایر عناصر بدون غنا بودند.

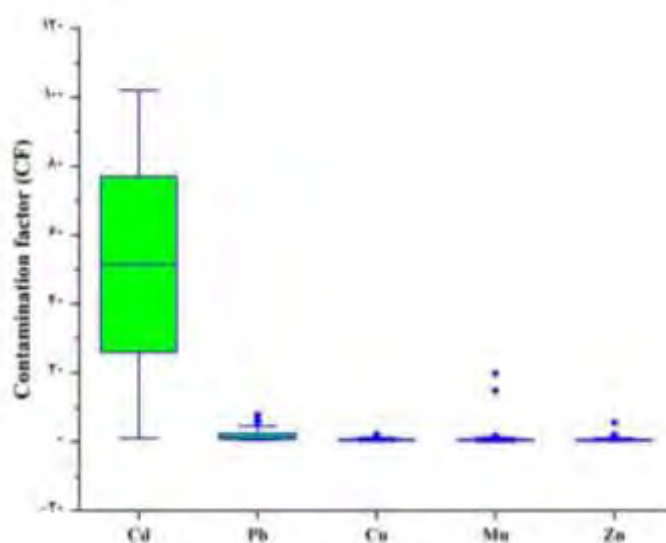
^۱. Zhang & Liu

^۲. Feng et al.

جدول ۷. مقادیر شاخص‌های ژئوشیمیایی

شاخص	مقادیر	کادمیم	مس	منگنز	سرب	روی
EF	حداقل	۰/۴۴	۰/۲۲	۰/۰۳	۰/۴۶	۰/۲۲
	حداکثر	۲۳/۲۲	۲/۱۹	۱۹/۸۵	۷/۷۶	۵/۶
I _{geo}	میانگین	۱/۵	۰/۶۷	۰/۹۱	۱/۷۹	۰/۶۴
	حداقل	-۳/۰۵	-۴/۰۱	-۶/۶۹	-۱/۴۷	-۲/۳۳
	حداکثر	۴/۹۶	۱/۲۱	۳/۹۸	۳/۳۶	۲/۹۱
	میانگین	-۰/۵۳	-۱/۶۰	-۱/۷۵	-۰/۴۴	-۱/۸۴
CF	حداقل	۰/۱۷	۰/۰۹	۰/۰۱	۰/۵۳	۰/۲۹
	حداکثر	۴۶/۹۵	۳/۴۷	۲۳/۶۹	۱۵/۴۱	۱۱/۳۳
	میانگین	۱/۵۶	۰/۵۴	۱/۲۵	۱/۵۹	۰/۵۴
	NIPI	۵/۶۴	۱/۸۱	۸۷/۷	۲۸۰/۳۸	۷۶۳/۹۳





شکل ۳. نمودار جعبه‌ای مقادیر شاخص‌های EF ، I_{geo} و CF فلزات سنگین

متوسط میزان I_{geo} روند سرب < کادمیم < مس < منگنز < روی داشت. این شاخص نشان داد بیشترین و کمترین میزان زمین‌انباشتگی خاک با فلزات به ترتیب به سرب و روی مربوط است. مقایسه نتایج حاصل از محاسبه شاخص I_{geo} (جدول ۷) با جدول ۳ نشان می‌دهد خاک منطقه کاملاً غیرآلوده است.

جوان‌سیامردی و همکاران (۱۳۹۳) در بررسی غلظت فلزات سنگین (آهن، نیکل، مس، روی و سرب) در خاک کشاورزی بخش مرکزی سیستان به این نتیجه رسیدند که خاک‌های این قسمت کاملاً غیرآلوده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده از عامل آلودگی CF برای فلزات سنگین موجود در خاک (جدول ۷) و مقایسه آن با سطوح آلودگی (جدول ۱) نشان داد فلزات روی و مس در محدوده آلودگی کم و کادمیم، منگنز و سرب در محدوده آلودگی متوسط قرار می‌گیرند.

ارزیابی آلودگی فلزات سنگین براساس شاخص آلودگی (NIPI) در جدول ۷ ارائه شده است. براساس مقدار عددی میانگین شاخص جامع آلودگی نمره و مقایسه با جدول ۸؛ عناصر کادمیم، منگنز، سرب و روی آلودگی شدید داشتند و مس کمی آلوده بود. مومولا و همکاران^۱ (۲۰۱۱) بیان کردند سطح آلودگی زیاد فلزات سنگین نشان‌دهنده وجود آلودگی فلزی شدید و انسان‌زاد بودن منبع این فلزات سنگین در خاک است (Lu et al., 2012: 71).

روابط بین عناصر در ماتریس خاک، اطلاعاتی را درباره منابع فلز و مسیرهای موجود در محیط‌زیست ارائه می‌دهد (Dragović et al., 2008: 493). روابط بین فلزات سنگین خاک در منطقه پژوهش با استفاده از ماتریس همبستگی پیرسون (جدول ۸) بررسی شد. با توجه به مقادیر ضریب همبستگی پیرسون، همبستگی مثبت معناداری بین کادمیم/مس، کادمیم/سرب، کادمیم/روی، مس/سرب، مس/روی و سرب/روی وجود داشت. براساس این جدول، همبستگی منفی بین روی و منگنز ($r = -0.01$) مشاهده شد. این همبستگی‌های معنادار و نسبتاً قوی نشان می‌دهد این فلزات از منابع مشابه حاصل شده و عمدتاً از فعالیت‌های انسان سرچشمه گرفته‌اند.

¹. Mmolawa et al.

جدول ۸. ماتریس همبستگی پیرسون برای غلظت فلزات سنگین

Zn	Pb	Mn	Fe	Cu	Cd
					۱
				۱	۰/۸۹۰**
			۱	۰/۴۳۸**	۰/۳۸۴**
		۱	۰/۲۶۵**	۰/۱۰۲	۰/۰۰۷
	۱	۰/۰۰۴	۰/۴۳۸**	۰/۶۸۴**	۰/۷۱۲**
۱	۰/۷۴۸**	-۰/۰۱۰	۰/۳۴۹**	۰/۸۹۱**	۰/۹۹۰**

* همبستگی در سطح ۰/۰۵ معنادار است.

** همبستگی در سطح ۰/۰۱ معنادار است.

برای ارزیابی بیشتر میزان آلودگی فلزات در منطقه پژوهش و شناسایی منبع آن از روش PCA استفاده شد. مقدار آماری KMO برابر با ۰/۷۱۰ بود؛ بنابراین داده‌ها برای تجزیه و تحلیل عاملی مناسب‌اند؛ همچنین نتایج آزمون کروی بارتلت معنادار بود که نشان می‌دهد فرض مخالف تأیید شده است و بین متغیرها همبستگی معناداری وجود دارد (Miller and Miller, 2005: 50 ; Möller et al., 2005: 67).

برای بهتر نشان‌دادن مؤلفه‌های اصلی از چرخش واریماکس (Varimax Rotation) استفاده شد. براساس نتایج جدول ۹، دو مؤلفه اول ۸۱/۱۵۴ درصد از تغییرات کل واریانس را توجیه می‌کند. فاکتور اول ۶۰/۰۰۱ درصد از تغییرات کل واریانس را توجیه می‌کند و روی، کادمیم، مس و سرب در این گروه قرار گرفتند که نشان‌دهنده تأثیر فعالیت‌های انسانی موضعی ناشی از ترافیک یا تأثیر سنگ‌شناختی در نمونه‌های خاک است (Khosravi et al., 2018: 14; Ungureanu et al., 2017: 28).

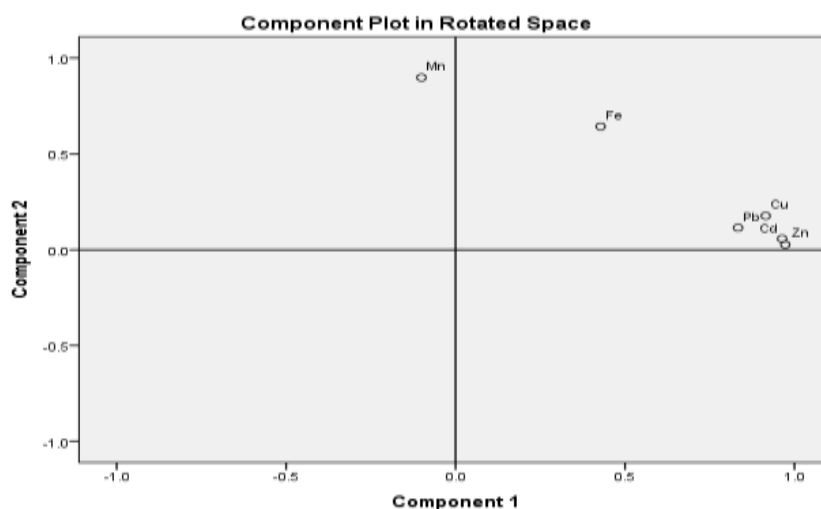
آنگوریانو و همکاران^۱ (۲۰۱۷) بیان کردند که کرم و کادمیم ممکن است متأثر از کنترل سنگ‌شناختی و منابع انسانی قرار گیرند؛ حتی اگر از مقادیر آستانه هشدار در خاک تجاوز نکنند.

فاکتور دوم شامل منگنز و آهن است و حدود ۲۱/۱۵۳ درصد از کل واریانس را توجیه می‌کند. نتایج PCA محتویات فلزات سنگین در شکل ۴ نشان داده شده است.

جدول ۹. فاکتور چرخش واریماکس PCA فلزات سنگین در منطقه پژوهش

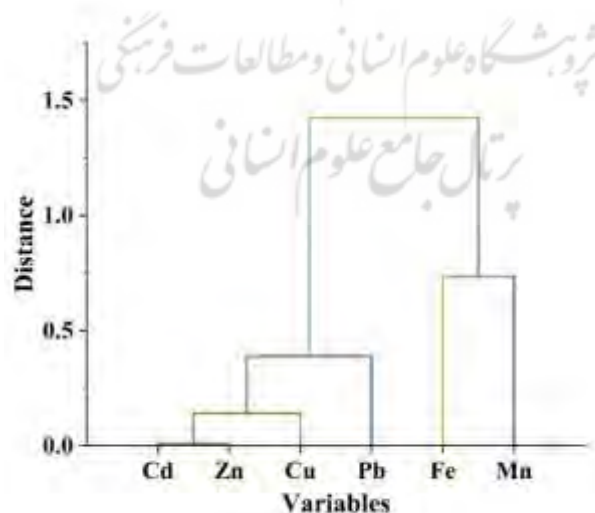
۲	۱	
۰/۰۲۷	۰/۹۳۷	Zn
۰/۰۵۷	۰/۹۶۴	Cd
۰/۱۷۷	۰/۹۱۵	Cu
۰/۱۱۵	۰/۸۳۴	Pb
۰/۸۹۸	-۰/۱۰۱	Mn
۰/۶۴۳	۰/۴۲۸	Fe
۱/۲۶	۳/۶	مقدار ویژه
۲۱/۱۵۳	۶۰/۰۰۱	درصد واریانس

^۱. Ungureanu et al.



شکل ۴. پیش‌بینی متغیرها با روش PCA

نتایج به دست آمده از تجزیه و تحلیل خوشه‌ای (CA) همانند نتایج تجزیه به مؤلفه اصلی (PCA) است و آن را تأیید می‌کند (شکل ۵). در گروه اول تجزیه و تحلیل خوشه‌ای پارامترهای مس، کادمیم، سرب و روی و در گروه دوم پارامترهای منگنز و آهن قرار گرفته‌اند. عموماً سرب و روی متأثر از آلودگی‌های سنگ‌شناختی و انسان‌شناختی ناشی از ترافیک هستند (افشاری و خادمی، ۱۳۹۵: ۲۲). منگنز و آهن ممکن است متأثر از منابع لیتوژنیک و انسان‌شناختی قرار بگیرند (Khosravi et al., 2018: 16). لو و همکاران^۱ (۲۰۰۷) گزارش دادند غلظت عناصری مانند منگنز در خاک‌های سطحی شهر تغییر معناداری نداشته و این عنصر بیشتر متأثر از مواد مادری است (Johnson, 1998: 254).



شکل ۵. تجزیه و تحلیل خوشه‌ای با استفاده از روش اتصال Ward و فاصله Euclidean

^۱. Lue et al.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر تنوع و همبستگی متنوعی را از محتوای فلز انتخاب شده نشان داد. توزیع فلزات در خاک، تغییرات مکانی و تجزیه و تحلیل چندمتغیره آلودگی انسانی فلزات را در خاک نشان داد. غلظت فلزات سنگین بررسی شده به ترتیب روی < سرب > منگنز < آهن > کادمیم < مس بود و فقط سه عنصر کادمیم، سرب و روی بیشتر از آستانه هشدار بودند. بیشترین مقدار عناصر در قسمت جنوبی معدن و نزدیک باطله‌های معدنی و پایین دست جاده و گاه در مسیر جاده و تردد ماشین‌آلات وجود داشت. در واقع نتایج نشان‌دهنده توزیع عناصر سرب و روی در حاشیه معدن به‌ویژه در حواشی باطله‌های معدنی و نیز پایین دست جاده بوده است. دلایل آن، میزان تأثیر باد و نیز وجود آبراهه‌های فصلی در انتقال این عناصر ناشی از فعالیت‌های انسانی از جمله معدن‌کاری و حمل‌ونقل به نقاط یادشده بوده است. سنگ سرب و روی از نوع گالن بوده است؛ بنابراین مقدار سرب در خاک منشأ زمین‌شناسی آلودگی را نشان می‌دهد. غلظت مس، آهن و منگنز برای خاک در منطقه پژوهش کمتر از آستانه هشدار بود.

نتایج شاخص‌های آلودگی استفاده شده (جز شاخص نمره) بیان‌کننده این بود که منطقه یا آلودگی ندارد یا آلودگی کمی دارد. شاخص نمره بیان‌کننده این بود که تمام عناصر (جز مس) آلودگی شدید دارند. در تمامی شاخص‌ها بیشترین عنصر سرب بود که این به دلیل نوع سنگ مادری و زمین‌شناسی منطقه است.

از سویی نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آماری چندمتغیره ترکیبی فلزات سنگین نشان داد فعالیت‌های مربوط به وسایل نقلیه و زمین‌شناختی، مهم‌ترین منابع آلودگی روی، سرب و کادمیم بوده‌اند. آهن، مس و منگنز عمدتاً با منابع زمین‌شناختی و مواد مادری کنترل می‌شوند و غلظت منگنز ممکن است متأثر از کودها و زمین‌های کشاورزی باشد. با توجه به اینکه خاک منطقه پژوهش علاوه بر عناصر سرب و روی به سایر فلزات سنگین نیز آلوده بوده، بنابراین انجام پژوهش‌های بیشتر در منطقه برای ارزیابی برنامه‌های راهبردی مدیریت منابع خاک ضروری است.

منابع

افشاری، علی، خادمی، حسین، (۱۳۹۵). ترکیب پارامترهای مغناطیسی: راهی مؤثر در تشخیص منابع آلودگی خاک؛

مطالعه موردی: خاک‌های اطراف شهر زنجان، فصلنامه انسان و محیط‌زیست، دوره ۱۴، شماره ۳۶، ۱۷-۲۹.

جوان‌سیامردی، صفورا، رضایی کهخا، محمدرضا، صفایی‌مقدم، عاطفه، نوری، رقیه، (۱۳۹۳). بررسی غلظت فلزات

سنگین (آهن، نیکل، مس، روی، سرب) در خاک کشاورزی بخش مرکزی سیستان، مجله مهندسی بهداشت

محیط، دوره ۱، شماره ۲، ۴۶-۵۳.

سیستانی، ندا، معین‌الدینی، مظاهر، خراسانی، نعمت‌الله، حمیدیان، امیرحسین، علی‌طالشی، محمدصالح، عظیمی

یانچشمه، رخساره، (۱۳۹۶). آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های مجاور صنایع فولاد کرمان: ارزیابی غنای

فلزی و درجه آلودگی، مجله سلامت و محیط‌زیست، فصلنامه علمی پژوهشی انجمن علمی بهداشت محیط

ایران، دوره ۱۰، شماره ۱، ۷۵-۸۶.

شفیعی، نجمه، شیرانی، حسین، اسفندیار پوربروجنی، عیسی، (۱۳۹۲). غنی‌شدگی آرسنیک و سلنیم در خاک‌های اطراف معدن مس سرچشمه، مجله مدیریت خاک، دوره ۲، شماره ۲، ۱-۱۱.

قانع بافقی، محمدجواد، (۱۳۹۳). بررسی نقش نهشته‌های معدنی و معدن‌کاری در گسترش آلودگی و تخریب خاک و گیاه؛ مطالعه موردی: معدن سرب و روی کوشک- بافق، رساله دکتری رشته مهندسی منابع طبیعی گرایش بیابان‌زدایی، استاد راهنما: فیض‌نیا، سادات، دانشگاه تهران، گروه احیای مناطق خشک و بیابانی.

محمدمرادی، بهزاد، سبحان اردکانی، سهیل، چراغی، مهرداد، (۱۳۹۶). ارزیابی شاخص مخاطره بوم‌شناختی فلزات سنگین در خاک سطحی بوستان‌های شهری تهران، مجله سلامت و محیط‌زیست، فصلنامه علمی پژوهشی انجمن علمی بهداشت محیط ایران، دوره ۱۰، شماره ۴، ۴۲۹-۴۴۲.

معاونت محیط زیستی انسانی، دفتر آب و خاک، (۱۳۹۷). استانداردهای کیفیت منابع خاک و راهنماهای آن، ۱۶۴ ص.

نادری، مرجان، میرنژاد، حسن، زند، محمد مهدی، (۱۳۹۴). بررسی خصوصیات کانی‌شناسی و ساختی کانسار روی و سرب کوشک بافق، استان یزد، هفتمین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران، دانشگاه دامغان، دوره ۷، ۸-۱

Abraham, G.M., Parker, R., (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, Vol 136 (1-3): 227-238.

Adriano, D., (2001). **Trace Elements in the Terrestrial Environment, Biochemistry, Bioavailability and Risks of Metals (2nd editio)**, New York: Springer-Verlag, 867 p.

Chaignon, V., Sanchez-Neira, I., Herrmann, P., Jaillard, B., Hinsinger, P., (2003). **Copper bioavailability and extractability as related to chemical properties of contaminated soils from a vine-growing area**, Environmental Pollution, Vol 123 (2): 229-238.

Chen, X., Xia, X., Zhao, Y., Zhang, P., (2010). **Heavy metal concentrations in roadside soils and correlation with urban traffic in Beijing, China**, Journal of Hazardous Materials, Vol 181 (1-3): 640-646.

Dragović, S., Mihailović, N., Gajić, B., (2008). **Heavy metals in soils: distribution, relationship with soil characteristics and radionuclides and multivariate assessment of contamination sources**, Chemosphere, Vol 72 (3): 491-495.

El-Bassam, N., Tietjen, C., (1977). **Municipal sludge as organic fertilizer with special reference to the heavy metals constituents**, Soil Organic Matter Studies, Vol 2: 253-258.

Feng, H., Han, X., Zhang, W., Yu, L., (2004). **A preliminary study of heavy metal contamination in Yangtze River intertidal zone due to urbanization**, Marine Pollution Bulletin, Vol 49 (11-12): 910-915.

Hakanson, L., (1980). **An ecological risk index for aquatic pollution control**, A sedimentological approach, Water Research, Vol 14 (8): 975-1001.

Hernandez, L., Probst, A., Luc Probst, J., Ulrich, E., (2003). **Heavy metal distribution in some French forest soils: evidence for atmospheric contamination**, Science of the Total Environment, Vol 312 (1-3): 195-219.

Jiao, X., Teng, Y., Zhan, Y., Wu, J., Lin, X., (2015). **Soil heavy metal pollution and risk assessment in Shenyang industrial district, Northeast China**, PLoS ONE, Vol 10 (5): 1-9.

Johnson, D., (1998). **Applied Multivariate Methods for Data Analysis**, Duxbury Press, Pacific Grove, California, USA., 567 p.

- Kabata-pendias, A., Pendias, H., (2001). **Trace Elements in Soils and Plants**, 403 p.
- Keshavarzi, A., Kumar, V., (2019). **Spatial distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in agricultural soils of Northeastern Iran**, *Geology, Ecology, and Landscapes*, Vol 29 (5): 544– 560.
- Khosravi, V., Doulati Ardejani, F., Yousefi, S., Aryafar, A., (2018). **Monitoring soil lead and zinc contents via combination of spectroscopy with extreme learning machine and other data mining methods**, *Geoderma*, Vol 318: 29– 41.
- Khosravi, Y., Ali, A., Abadol Hossein, P., (2018). **Assessment of spatial distribution pattern of heavy metals surrounding a lead and zinc production plant in Zanjan Province, Iran**, *Geoderma Regional*, Vol 12: 10– 17.
- Kumar, V., Sharma, A., Kaur, P., Singh Sidhu, G.P., Bali, A.S., Bhardwaj, R., Cerda. A., (2019). **Pollution assessment of heavy metals in soils of India and ecological risk assessment: A state-of-the-art**, *Chemosphere*, Vol 216: 449– 462.
- Lee, C.S.L., Li, X., Shi, W., Cheung, S.C.N., Thornton, I., (2006). **Metal contamination in urban, suburban, and country park soils of Hong Kong: A study based on GIS and multivariate statistics**, *Sci Total Environ*, 356: 45– 61.
- Lei, Y., Zhang, B., Zhang, S., (2004). **Heavy metal elements pollution evaluation on the ecological environment of the Sanjiang Plain based on GIS**, *Chinese Journal of Soil Science*, Vol 35 (5): 529– 532.
- Lindsay, W.L., Norvell, W.A., (1978). **Development of a DTPA Soil Test for Zinc, Iron, Manganese, and Copper**, *Soil Science Society of America Journal*, Vol 42 (3): 421– 428.
- Lu, A., Wang, J., Qin, X., Wang, K., Han, P., Zhang, S., (2012). **Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and origin of heavy metals in the agricultural soils in Shunyi, Beijing, China**, *Science of the Total Environment*, Vol 425: 66–74.
- Lu, S.G., Bai, S.Q., Xue, Q.F., (2007). **Magnetic properties as indicators of heavy metals pollution in urban topsoils: a case study from the city of Luoyang, China**, *Geophysical Journal International*, Vol 171: 568– 580.
- Lu, Y., Jia, C., Zhang, G., Zhao, Y., Wilson, M.A., (2016). **Spatial distribution and source of potential toxic elements (PTEs) in urban soils of Guangzhou, China**, *Environmental Earth Sciences*, Vol 75 (4): 1– 15.
- Maas, S., Schei, R., Benslama, M., Crini, N., Lucot, E., Brahmia, Z., Giraudoux, P., (2010). **Spatial distribution of heavy metal concentrations in urban, suburban and agricultural soils in a Mediterranean city of Algeria**, *Environmental Pollution*, Vol 158: 2294– 2301.
- McGrath, S.P., Chang, A.C., Page, A.L., Witter, E., (1994). **Land application of sewage sludge: Scientific perspectives of heavy metal loading limits in Europe and the United States**, *Environ.Rev*, Vol 2 (1): 108– 118.
- Miller, J., Miller, J., (2005). **Statistics and chemometrics for analytical chemistry**, Harlow, England: Pearson Education Limited.
- Minasny, B., McBratney, A.B., (2006). **A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information**, *Computers and Geosciences*, Vol 32 (9): 1378– 1388.
- Mmolawa, K., Likuku, A., Gaboutloeloe, G., (2011). **Assessment of heavy metal pollution in soils along major roadside areas in Botswana**, *African Journal of Environmental Science and Technology*, Vol 5 (3): 186– 196.
- Möller, A., Müller, H., Abdullah, A., Abdelgawad, G., Utermann, J., (2005). **Urban soil pollution in Damascus, Syria: concentrations and patterns of heavy metals in the soils of the Damascus Ghouta**, *Geoderma*, Vol 124 (1– 2): 63– 71.
- Mukhopadhyay, S., Chakraborty, S., Bhadoria, P.B.S., Li, B., Weindorf, D.C., (2020). **Assessment of heavy metal and soil organic carbon by portable X-ray fluorescence spectrometry and NixPro™ sensor in land fill soils of India**, *Geoderma Regional*, Vol 20: e00249.
- Muller, G., (1979). **Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River**, *Geo Journal*, Vol 2: 108– 118.
- Salminen, R., Batista, M., Bidovec, M., Demetriades, A., DeVivo, B., DeVos, W., Duris, M., Tarvainen,

- T., (2005). **FOREGS Geochemical Atlas of Europe, Part 1: Background Information, Geochemical Atlas of Europe Part 2 Interpretation of Geochemical Maps, Additional Tables**, EuroGeoSurveys, 525 p.
- Santos-Francés, F., Martínez-Graña, A., Zarza, C.Á., Sánchez, A.G., Rojo, P.A., (2017). **Spatial distribution of heavy metals and the environmental quality of soil in the Northern Plateau of Spain by geostatistical methods**, International Journal of Environmental Research and Public Health, Vol 14 (6): 1- 20.
- Skaldina, O., Peräniemi, S., Sorvari, J., (2018). **Ants and their nests as indicators for industrial heavy metal contamination**, Environmental Pollution, Vol 240: 574– 581.
- Tang, R., Ma, K., Zhang, Y., Mao, Q., (2013). **The spatial characteristics and pollution levels of metals in urban street dust of Beijing, China**, Appl Geochemistry, 35: 88– 98.
- Taylor, S., (1964). **Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table**, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol 28 (8): 1273– 1285.
- Tian, K., Huang, B., Xing, Z., Hu, W., (2017). **Geochemical baseline establishment and ecological risk evaluation of heavy metals in greenhouse soils from Dongtai, China**, Ecological Indicators, Vol 72: 510– 520.
- Ungureanu, T., Iancu, G.O., Pintilei, M., Chicoş, M.M., (2017). **Spatial distribution and geochemistry of heavy metals in soils: A case study from the NE area of Vaslui county, Romania**, Journal of Geochemical Exploration, Vol 176: 20– 32.
- Who., (1996). **The World Health report**, 137 p.
- Yongming, H., Peixuan, D., Junji, C., Posmentier, E.S., (2006). **Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China**, Science of the Total Environment, vol 355 (1– 3): 176– 186.
- Zhang, J., Liu, L.C., (2002). **Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China-weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes**, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol 54 (6): 1051– 1070.