Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Soil Management and Sustainable Production

Print ISSN: 2322-1267
Online ISSN: 2322-1275

Soil Science Society of Iran

(OPEN ACCESS)

Investigation of heavy metal contamination in soils around Yazd Industrial City

Azam Razavi Nasab[*1], Abbas Faghih Khorasani[2]

1. Corresponding Author, Assistant Prof., Soil and Water Research Department, Yazd Province Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Yazd, Iran. E-mail: a.razavinasab@areeo.ac.ir
2. Ph.D. in Sociology, Social Development, University of Tehran and Director of Yazd Water Market, Yazd, Iran. E-mail: abbas.faghih@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 05.07.2024
Revised: 10.01.2025
Accepted: 10.08.2025

Keywords:
Hamaneh,
Khezrabad,
Pollutant,
Shehneh,
Toxicity

ABSTRACT

Background and Objectives: Heavy metals in agricultural soils may be naturally present in the soil under the influence of the soil parent materials (geogenic) or may be added to the soil as a result of human activities (anthropogenic). Heavy metal pollution not only reduces the physical and chemical quality of the soil, but also reduces biological activity and biological availability of soil nutrients, and poses a serious threat to human health and environmental security through entry into the food chain and penetration into groundwater. Industries are one of the main sources of heavy elements production, which lead to the entry of these materials into the soil and its accumulation through irrigation with contaminated water and through atmospheric deposition. The toxic properties and bioaccumulation of heavy metals in soil and plants, as well as their entry into the human food chain, double their risks. Therefore, industries can respond to society's expectations of responsibility and reduce concerns about human health through social and environmental initiatives.

Materials and Methods: A completely randomized experimental design was conducted in three replications and three depths (0-20, 20-40, and 40-60 cm) and three areas (clean or control (Hamaneh), semi-polluted (Khazarabad), and polluted (Shahneh)) in the west of Yazd city. The fields in question were planted with pistachio, pomegranate, and walnut, respectively. All fields were irrigated by flooding. About one kilogram of soil samples was collected from each field from three points and at each point of three depths, using an auger, and a total of 27 samples were transferred to the laboratory. After preparing the samples according to the instructions for measuring heavy metals in soil, the total concentrations of heavy metals lead, cadmium, arsenic, nickel, selenium, mercury, beryllium, chromium, and thallium were measured at all three depths with an atomic absorption spectrometer equipped with a furnace, and then the land accumulation indices and enrichment factor were measured, and the data were statistically analyzed.

Results: The concentrations of mercury, beryllium, chromium, and thallium were not significant in any sample. In all three areas and at all

three depths, lead and selenium contamination was within the permissible limits. Cadmium contamination was recorded only in the contaminated area of Shahneh, and arsenic and nickel contamination were recorded in the contaminated area of Shahneh and the semi-contaminated area of Khezrabad. The interaction effect of the level of contamination and soil depth was significant, and the 40-60 cm depth of the soil of Shahneh (contaminated) area had the highest concentrations of cadmium, lead, arsenic, nickel and selenium compared to Khezrabad (semi-contaminated) and Hamaneh (clean) areas. The concentrations of mercury, beryllium, chromium and thallium were not significant in any sample. The results showed that heavy metal contamination, especially in flood irrigation, has the ability to move in depth. Thus, in the contaminated area (Shehneh), with increasing depth, the cadmium, lead, arsenic, nickel and selenium concentration increased by 92.63%, 44.48%, 97.14%, 71.72% and 91.75% compared to the soil surface, respectively. According to the two measured indicators, the concentrations of cadmium, lead, and selenium were in severe and dangerous conditions in all three regions. Arsenic was in a dangerous state in the Khezrabad and Shahneh areas, and nickel was only in the Shahneh area**.**

Conclusion: These results could be a warning sign that these pollutants may reach groundwater and canals. Also, following soil contamination, the absorption of these substances by plant roots increases, causing toxicity in the plant and subsequent entry into the food chain, which requires prevention of this process. The social responsibility of industries requires that any pollution they release into nature be minimal or in accordance with international standards and limits**.**

Cite this article: Razavi Nasab, Azam, Faghih Khorasani, Abbas. 2026. Investigation of heavy metal contamination in soils around Yazd Industrial City. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 15 (4), 35-61.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/ejsms.2026.23412.2184
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار
شاپا چاپی: ۱۲٦۷-۲۳۲۲
شاپا آنلاین: ۱۲۷۵-۲۳۲۲
انجمن علوم خاک ایران

بررسی آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های اطراف شهرک صنعتی یزد

اعظم رضوی‌نسب*[۱]، عباس فقیه خراسانی[۲]

۱. نویسنده مسئول، استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان یزد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران. رایانامه: a.razavinasab@areeo.ac.ir
۲. دکتری جامعه‌شناسی، توسعه اجتماعی، دانشگاه تهران و مدیر بازار آب یزد، یزد، ایران. رایانامه: abbas.faghih@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱٤۰۳/۱۲/۱۸
تاریخ ویرایش: ۱٤۰٤/۰۷/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱٤۰٤/۰۷/۱٦

واژه‌های کلیدی:
آلاینده،
خضرآباد،
سمیت،
شحنه،
هامانه

چکیده

سابقه و هدف: فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی ممکن است تحت‌تأثیر مواد مادری خاک، به‌طور طبیعی در خاک وجود داشته باشند (زمین‌زاد) و یا این‌که در اثر فعالیت‌های انسانی به خاک افزوده شوند (بشرزاد). آلودگی فلزات سنگین نه تنها باعث کاهش کیفیت فیزیکی و شیمیایی خاک، کاهش فعالیت زیستی و دستیابی زیستی مواد مغذی خاک می‌شوند، بلکه تهدیدی جدی برای سلامتی انسان و امنیت زیست‌محیطی از طریق ورود به زنجیره غذایی و نفوذ به آب‌های زیرزمینی به‌شمار می‌روند. صنایع، یکی از منابع اصلی تولید عناصر سنگین هستند که از دو طریق تولید پساب‌های آلوده و آلاینده‌های ناشی از دودکش کارخانه‌ها، منجر به ورود این مواد به خاک و تجمیع آن از طریق آبیاری با آب‌های آلوده و طریق فرونشست جوی می‌شوند. خاصیت سمی و قابلیت تجمع زیستی فلزات سنگین در خاک و گیاهان و هم‌چنین ورود به زنجیره غذایی انسان، خطرات آن‌ها را دوچندان می‌سازد. از این‌رو، صنایع می‌توانند با ابتکارات اجتماعی و زیست‌محیطی، انتظار جامعه از مسئولیت‌پذیری خود را پاسخ دهند و از دغدغه سلامت بشری بکاهند.

مواد و روش‌ها: یک طرح آزمایشی کامل تصادفی در قالب فاکتوریل، در سه تکرار و سه عمق (۲۰-۰، ٤۰-۲۰ و ٦۰-٤۰ سانتی‌متری) و سه منطقه (پاک یا شاهد (هامانه)، نیمه‌آلوده (خضرآباد) و آلوده (شحنه)) در غرب شهرستان یزد انجام شد. مزارع موردنظر به ترتیب زیر کشت پسته، انار و گردو بود. آبیاری همه مزارع به صورت غرقابی انجام می‌شد. از هر مزرعه از سه نقطه و در هر نقطه از سه عمق، به کمک اوگر، حدود یک کیلوگرم نمونه خاک برداشت شد و در مجموع ۲۷ نمونه به آزمایشگاه منتقل گردید. غلظت کل فلزات سنگین سرب، کادمیم، آرسنیک، نیکل، سلنیم، جیوه، برلیم، کروم و تالیم با دستگاه جذب اتمی مجهز به کوره تعیین و آن‌گاه شاخص‌های زمین‌انباشتگی و فاکتور غنی‌شدگی اندازه‌گیری شد و داده‌ها مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت.

یافته‌ها: غلظت عناصر جیوه، برلیم، کروم و تالیم در هیچ نمونه‌ای معنی‌دار نبود در هر سه منطقه و هر سه عمق، آلودگی سرب و سلنیم در حد غیر مجاز قرار داشت. آلودگی کادمیم فقط در منطقه آلوده شحنه و آلودگی ارسنیک و نیکل در منطقه آلوده شحنه و نیمه‌آلوده خضرآباد ثبت گردید. اثر متقابل میزان آلودگی و عمق خاک معنی‌دار بوده و عمق ٦٠-٤٠ سانتی‌متری خاک منطقه شحنه (آلوده) دارای بیش‌ترین غلظت کادمیم، سرب، آرسنیک، نیکل و سلنیم نسبت به منطقه خضرآباد (نیمه‌آلوده) و هامانه (پاک) بود. نتایج نشان داد که آلودگی فلزات سنگین به‌ویژه در آبیاری غرقابی قابلیت حرکت در عمق را دارد. به‌طوری‌که در منطقه آلوده (شحنه) با افزایش عمق غلظت کادمیم نسبت به سطح خاک ۹۲/٦۳٪، غلظت سرب نسبت به سطح خاک ٤٤/٤٨٪، غلظت ارسنیک ۹۷/۱٤٪ نسبت به سطح خاک، غلظت نیکل ۷۱/۷۲٪ نسبت به سطح خاک و غلظت سلنیم ۹۱/۷۵٪ نسبت به سطح خاک افزایش نشان داد. طبق دو شاخص اندازه‌گیری شده غلظت کادمیم، سرب و سلنیم در هر سه منطقه در وضعیت شدید و خطرناک قرار داشت. ارسنیک در منطقه خضرآباد و شحنه و نیکل تنها در منطقه شحنه در وضعیت خطرناک قرار داشت.

نتیجه‌گیری: این نتایج می‌تواند زنگ خطری مبنی بر احتمال رسیدن این آلودگی‌ها به آب‌های زیرزمینی و قنوات نیز باشد. هم‌چنین به دنبال آلودگی خاک، جذب این مواد از ریشه گیاهان هم افزایش و باعث ایجاد سمیت در گیاه و به دنبال آن ورود به زنجیره غذایی هم می‌شود که نیازمند جلوگیری از این فرایند است. مسئولیت اجتماعی صنایع ایجاب می‌کند که هر گونه آلودگی از جانب ایشان که به طبیعت وارد می‌شود در حداقل مقدار و یا طبق موازین و مقادیر بین‌المللی باشد.

استناد: رضوی‌نسب، اعظم، فقیه خراسانی، عباس (۱۴۰۴). بررسی آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های اطراف شهرک صنعتی یزد. *نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار*، ۱۵ (۴)، ۶۱-۳۵.

DOI: 10.22069/ejsms.2026.23412.2184

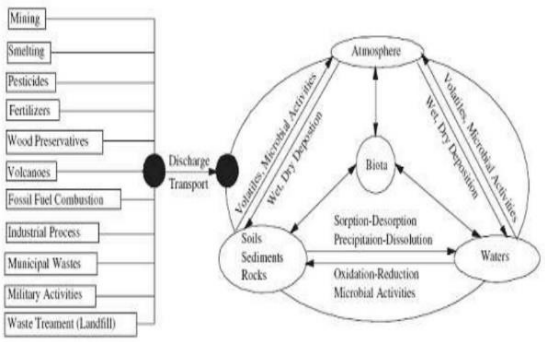
ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

مقدمه

خاک به عنوان منبع طبیعی غیرقابل‌تجدید در حال تخریب بوده که به کاهش تولیدات کشاورزی منجر شده است. آلودگی خاک‌ها و محیط‌های آبی با فلزات سنگین یک مشکل جدی و در حال گسترش است. ورود فلزات سمی از طریق فعالیت‌های انسانی باعث آلودگی بسیاری از خاک‌ها شده است به‌طوری‌که شدت آلودگی در این خاک‌ها یا بیش از حد طبیعی است و یا به زودی به آن خواهد رسید (۱ و ۲). فعالیت‌های انسانی مانند صنعتی شدن، شهرنشینی، فعالیت‌های کشاورزی و تغییر در سیستم مدیریت اراضی، اثرات عمیقی بر تغییرپذیری ویژگی‌های خاک دارد که به عنوان تغییرات غیرطبیعی یا به‌عبارتی آلودگی خاک مطرح می‌گردد (۳). از دیدگاه جهانی پس از آب و هوا، خاک سومین جز عمده محیط زیست تلقی می‌شود. آلودگی فلزات سنگین در خاک معمولاً نتیجه مصرف بی‌رویه و نا به جای کودهای شیمیایی در کشاورزی و روش‌های غلط دفع مواد زائد جامد و مایع می‌باشد و علاوه بر این ریزش عوامل آلوده‌کننده هوا در اثر نزولات جوی نیز در ایجاد آلودگی خاک می‌تواند مؤثر واقع گردد. در گذشته، آلودگی خاک به اندازه آلودگی هوا و آب از اهمیت خاصی برخوردار نبوده است؛ زیرا آلودگی خاک ملموس نیست و کنترل آلودگی خاک از آلودگی هوا و آب دشوارتر است. میزان خطر آلودگی خاک کم‌تر از دیگر آلودگی‌ها نیست و آلودگی آن کیفیت محیط زیست را کاهش می‌دهد. امروزه حفاظت از خاک یک موضوع مهم جهانی تلقی می شود (٤، ٥ و ٦).

خاک در اثر بی مبالاتی‌هایی به شدت به وسیله مواد شیمیایی از جمله فلزات سنگین و فرآورده‌های صنعت نفت آلوده شده و از این طریق وارد زنجیره غذایی آب‌های سطحی یا زیرزمینی گشته و وارد بدن انسان می‌گردد (٦) که با رسیدن به غلظت‌های بحرانی اثرات سوء متابولیکی و فیزیولوژیکی در موجودات زنده به‌جای می‌گذارد (شکل ۱، چرخه عناصر سنگین).



شکل ۱- چرخه عناصر سنگین (۷).

Figure 1. Heavy element cycle (7).

تأثیرات سوء فلزات سنگین در خاک زمانی آشکار می شود که غلظت آن ها از میزان معینی افزایش یابد که این افزایش بستگی به نوع فلز، نوع خاک، فعالیت‌های مختلف انسانی و زمان تجمع فلز دارد (٤ و ٨). فلزات سنگین شامل کادمیم، جیوه، سرب، کروم، آرسنیک، روی و مس توانایی تجمع در محیط‌های مختلف را دارند (۹ و ۱۰). با توجه به نبود قابلیت تجزیه بیولوژیکی، پایداری بسیار بالا، سمیت و توانایی تجمع تدریجی در بافت بدن جانوران و گیاهان از طریق زنجیره غذایی، تأثیرات مخربی بر

سلامتی انسان و جانوران دارند (۱۱، ۱۲ و ۱۳). البته فلزات سنگین از اجزای طبیعی خاک هستند و غلظت بالای آن‌ها در خاک می‌تواند منشأ زمین‌شناسی، مواد مادری و فرایندهای مختلف تشکیل خاک داشته یا حاصل فعالیت‌های انسانی مانند صنایع آهن و فولاد، معدن‌کاری، حمل ونقل جاده‌ای، دفع فاضلاب‌های صنعتی، استفاده از مواد و کودهای شیمیایی و سموم در کشاورزی و دفن غیربهداشتی زباله‌ها باشد (٤، ۹، ١٤ و ١٥). طالئی (۲۰۰۷) به بررسی نقش مناطق معدنی شمال مشگین‌شهر بر میزان آلودگی منابع آب و خاک به عنصر آرسنیک پرداخته است. مقایسه مقادیر به‌دست آمده از آب‌های منطقه با استانداردهای جهانی عناصر نشان‌گر افزایش چند ده برابری این عنصر در آب‌های سطحی و زیر سطحی منطقه بود. مقایسه مقادیر این عنصر در نمونه‌های آب رودخانه‌ها، چشمه‌ها و چاه‌های منطقه نشان داد که تمام نمونه‌ها دارای غلظت بیش از حد استاندارد بودند. اگر مقادیر استاندارد این عنصر ۰/۰۱میلی‌گرم بر کیلوگرم فرض شود مقدار آرسنیک نمونه‌ها از ٢٤ تا ١١٣٠ برابر افزایش نشان داد.

بررسی غلظت عناصر سنگ‌ها در این منطقه معدنی نشان می‌دهد که غلظت آرسنیک در اکثر نمونه‌ها از متوسط آن بالاتر است. با توجه به غلظت زیاد این عنصر در محیط‌های سنگی و خاکی منطقه می‌توان آلوده بودن آن‌ها را به این عنصر بسیار سمی، از منبع مواد معدنی و سنگ‌های دگرسان شده مورد توجه قرار داده و امکان ورود بیش از حد استاندار آن را در چرخه زیست‌محیطی از جمله آب‌های سطحی و زیرزمینی توجیه کرد (١٦).

در پژوهش انجام گرفته توسط الکاتسو و همکاران (١٩٩٦) بر روی خاک‌ها و سبزی‌های اطراف فعالیت‌های معدن‌کاری در منطقه‌ای از کشور رومانی، آلودگی خاک‌ها و سبزیجات منطقه توسط فلزات سرب، کادمیم، مس و روی مشخص شد و با توجه به مصرف اهالی منطقه از رستنی‌ها، مخاطراتی پیشگویی شد که با نتایج آزمایش بیماری آن منطقه همخوانی داشت. آزمایش‌های بعدی وجود ناراحتی‌های عصبی و کبدی را در بین اهالی اثبات کرد که ناشی از سمیت عناصر سنگین بوده است (۱۷). ماگالس (۲۰۰۷) در پژوهشی میزان و گسترش آلودگی ارسنیک را در خاک‌ها و رسوبات حومه فعالیت‌های صنعتی در برزیل بررسی کرده‌اند. با توجه به نتایج به‌دست آمده، این پژوهش‌گران احتمال دادند که ماهیان رودخانه و چهارپایان منطقه، ممکن است به وسیله آرسنیک آلوده شده و بدین‌وسیله سلامتی ساکنین منطقه به مخاطره بیفتد (۱۸).

تائو و همکاران (۲۰۰۸) میزان عناصر نادر موجود در خاک‌های ناحیه‌ای در چین را بررسی کرده و به روش آنالیز چندمتغیره عناصر آلاینده ارسنیک، کادمیم، مس، جیوه، سرب و روی را از عناصر غیرآلاینده منگنز، کبالت، کروم و نیکل جدا کردند. همبستگی قابل‌توجهی که بین عناصر غیرآلاینده با اکسیدهای آلومینیوم، آهن و سیلیسیم در کل خاک‌ها یافت شد، نشان داد منبع این عناصر توسط فاکتورهای تشکیل خاک کنترل می‌شوند. از طرفی همبستگی نسبتاً ضعیف عناصر آلوده‌کننده با یکدیگر و تغییرپذیری فاصله‌ای بیش‌تر عناصر آلوده‌کننده نشان داد که غنی‌شدگی توسط ورودی‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی تحت‌تأثیر قرار گرفته است (۱۹). هنس و همکاران (۲۰۰۷) توزیع و رفتار آرسنیک را در خاک‌ها و آب‌های مجاور معدن طلا- آرسنیک مطالعه کردند. نتایج نشان دادند که افزایش غلظت آرسنیک توسط pH قلیایی غالب در آب‌های سطحی و زیرزمینی و نیز حضور فازهای جامد ثانویه (اکسی هیدروکسیدهای آهن و آلومینیوم، رس‌ها و کانی‌های کربناته) بوده است. توزیع آرسنیک در خاک‌ها و

رسوبات توسط چرخش آب‌های کم‌عمق و سطحی غنی از آرسنیک توسط خزش ثقلی مواد باطله یا انتقال به‌صورت اجزاء معلق در آب بیش‌تر تحت‌تأثیر قرار می‌گیرد (۲۰).

مناطق صنعتی، عامل اصلی آلودگی هوا و سایر ویژگی‌های محیط زیست در هر منطقه هستند. در مناطق صنعتی آلوده مانند برخی نواحی دشت یزد- اردکان که احتمال آلودگی هوا و فاضلاب آلوده به‌علت تجمع صنایع مختلف بویژه مجموعه‌های تولید کاشی و فولاد بسیار زیاد است، این آلودگی می‌تواند به خاک سرایت کند و در این صورت با آبیاری زمین‌های کشاورزی، احتمال رسیدن آلودگی به ریشه گیاه و به آب‌های زیرزمینی هم وجود دارد که مسئولیت اجتماعی صنایع ایجاب می‌کند که علاوه بر حذف زباله و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای با فیلتراسیون کارآمد، دودکش‌های قوی، دفع صحیح و بهداشتی نخاله‌های صنعتی در مکان‌های مناسب و استفاده مجدد از فاضلاب در صورت امکان با بازچرخانی مناسب، به حداکثر رساندن بهره‌وری و مصرف بهینه انرژی و به حداقل رساندن شیوه‌هایی که ممکن است بر منابع طبیعی در نسل‌های آینده تأثیر منفی بگذارد، در الویت برنامه‌ها قرار بگیرد. حال این پژوهش به جهت پایش آلودگی فلزات سنگین در پروفیل خاک در سه منطقه مورد آزمایش (روستای کوهستانی هامانه به عنوان نمونه شاهد یا پاک، بخش خضرآباد به‌عنوان منطقه بین منطقه پاک و آلوده به‌عنوان منطقه نیمه‌آلوده و روستای شحنه به‌عنوان منطقه‌ای درست در مجاورت شهرک صنعتی یزد به‌عنوان منطقه آلوده در غرب شهرستان یزد که یکی از قطب‌های صنعتی کشور، پرداخته است تا هم امکان حرکت آلودگی در طول پروفیل خاک مورد بررسی قرار گیرد و هم خطرات ناشی از این حرکت احتمالی در مناطق صنعتی گوشزد گردد. باشد که به سبب اهمیت بالای سلامت مردم، چاره‌ایی اندیشیده شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: گام اول در این پروژه یافتن مکان مناسب از لحاظ آلودگی بود که به سه منطقه قابل‌تقسیم است. این مناطق در غرب شهرستان یزد انتخاب شد. زیرا شهرک صنعتی یزد و مجموعه کارخانجات فولاد در غرب یزد واقع شده‌اند (شکل ۲).



شکل ۲- موقعیت مکانی شهر یزد، روستای شحنه، بخش خضرآباد، روستای هامانه، شهرک صنعتی و کارخانه‌های فولاد.

Figure 2. Location of Yazd city, Shahneh, Khezrabad, Hamaneh, industrial town and steel factories.

منطقه اول منطقه آلوده مجاور شهرک صنعتی که به طبع آلودگی بالایی دارد که پژوهش‌گران دیگر هم تأیید نموده‌اند که این همسایگی باعث ایجاد آلودگی‌های مختلف می‌گردد (۲۱ و ۲۲). برای این منظور روستای شحنه در فاصله ۱۰ کیلومتری از مرکز شهر یزد انتخاب گردید. این روستا علاوه بر مجاورت در شهرک صنعتی در مجاورت صنایع فولاد یزد نیز است. مزرعه انتخابی تحت کشت پسته و آبیاری به‌صورت غرقابی بود (شکل ۳).



شکل ۳- فاصله روستای شحنه تا مرکز شهر یزد.

Figure 3. Distance from Shahneh to Yazd center.

منطقه دوم منطقه نیمه آلوده که با توجه به فاصله از شهرک صنعتی و کارخانجات فولاد یزد بخش خضرآباد در ٤٠ کیلومتری شهرستان یزد انتخاب گردید. مزرعه انتخابی تحت کشت انار و آبیاری به‌صورت سنتی و غرقابی بود (شکل ٤).



شکل ٤- فاصله بخش خضرآباد تا مرکز شهر یزد.

Figure 4. Distance from Khezrabad to Yazd center.

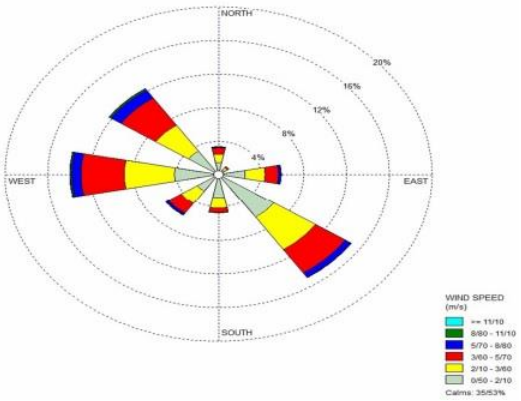
منطقه سوم منطقه پاک یا شاهد بود که روستای هامانه در٦٠ کیلومتری از شهرستان یزد و در دامنه کوه انتخاب گردید. مزرعه موردنظر کوهستانی و زیر کشت گردو و آبیاری به صورت غرقابی بود (شکل ٥).



شکل ۵- فاصله روستای هامانه تا مرکز شهر یزد.

Figure 5. Distance from Hamaneh to Yazd center.

طرح آماری: طرح آزمایشی فوق به صورت طرح کامل تصادفی در سه تکرار و سه عمق (۲۰-۰، ٤۰-۲۰ و ٦۰-٤۰ سانتی‌متری) و سه منطقه (پاک یا شاهد (هامانه)، نیمه‌آلوده (خضرآباد) و آلوده (شحنه)) و نهایتاً ۲۷ نمونه در غرب شهرستان یزد (در جهت باد غالب) انجام شد (شکل ٦، گلباد منطقه).



شکل ٦- گلباد غالب شهرستان یزد.

Figure 6. Predominant wind direction in Yazd city.

نمونه‌برداری و اندازه‌گیری عناصر سنگین: از هر مزرعه سه نمونه و هر نمونه از سه عمق به کمک اوگر حدود یک کیلوگرم نمونه خاک برداشت و بعد از برچسب‌گذاری به داخل نایلون پلاستیکی ریخته شد و جمعاً ۲۷ نمونه به آزمایشگاه منتقل گردید. برای اندازه‌گیری غلظت عناصر سنگین در نمونه‌های خاک ابتدا نمونه‌های خاک حاصل از مرحله نمونه‌برداری بعد از هوادهی به مدت یک هفته، با استفاده از پتک چوبی کوبانده شدند. در مرحله بعد نمونه‌های کوبانده شده از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شد. سپس ۲ گرم از نمونه‌های خاک خشک با استفاده از ترازو با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم توزین و در بالن ۵۰ میلی لیتری ریخته شد و ۱۰ میلی‌لیتر تیزاب که مخلوطی از ۱۰۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک و ۳۰۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک بود، با نسبت ۳:۱ به آرامی به نمونه‌ها اضافه گردید. در مرحله بعد نمونه‌ها روی دستگاه گرمکن (هیتر) ابتدا به مدت یک ساعت در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد و بعد به مدت یک ساعت در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد گذاشته شد. با احتیاط قبل از به جوش آمدن، نمونه‌ها برداشته و با استفاده از آب مقطر به حجم رسانده شد. در نهایت نمونه‌ها به ظروف مخصوص ۸۰ میلی‌لیتری انتقال داده شد و جهت

تعیین غلظت کل فلزات سنگین سرب، کادمیم، ارسنیک، نیکل، سلنیم، جیوه، برلیم، کروم و تالیم از دستگاه جذب اتمی پرکین المر مدل ۷۰۰ استفاده گردید (۲۳) که غلظت فلزات جیوه، برلیم،کروم و تالیم معنی‌دار نبود. بافت خاک نیز در هر سه منطقه نیز اندازه‌گیری شد که بافت خاک شحنه لوم شنی، بافت خاک خضرآباد شن لومی و بافت خاک هامانه لوم بود. در نهایت داده‌های به‌دست آمده توسط برنامه آماری SAS آنالیز و سپس جدول تجزیه واریانس میانگین‌ها با آزمون مقایسه میانگین دانکن در سطح معنی‌داری ۱٪ و ۵٪ مقایسه آماری شد و نمودارهای مربوطه در برنامه اکسل رسم گردید.

محاسبه شاخص‌های آلودگی: در این مقاله دو شاخص آلودگی شاخص زمین انباشتگی و فاکتور غنی‌شدگی برای عناصر سنگین ارسنیک، کادمیم، نیکل، سرب و سلنیم در هر سه منطقه آلوده (شحنه)، نیمه‌آلوده (خضرآباد) و پاک یا شاهد (هامانه) اندازه‌گیری شد.

شاخص زمین انباشتگی: این شاخص برای اولین بار توسط مولر (۱۹٦۹) پیشنهاد شد (۲٤) به‌طور گسترده‌ای برای اندازه گیری درجه آلودگی فلزات سنگین در خاک مورد استفاده قرار گرفته است (۲۵ و ۲٦). این شاخص با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$I_{geo}=\log_2[C_n/1.5B_n] \quad (۱)$$

جایی که، C_n غلظت اندازه‌گیری شده فلز سنگین در زمینه نمونه خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم) و B_n غلظت زمینه‌ای ژئوشیمیایی همان فلز سنگین در پوسته زمین (میلی‌گرم بر کیلوگرم) می‌باشد. ضریب ۱/۵ برای به حداقل رساندن تأثیر نوسانات احتمالی در مقدار زمینه است. مقادیر شاخص زمین انباشتگی به هفت کلاس آلودگی طبقه‌بندی می‌شود. طبقات آلودگی فلزات سنگین بر اساس شاخص زمین انباشتگی در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- طبقات آلودگی بر حسب شاخص زمین انباشتگی.

Table 1. Classes based geo-accumulation index.

کلاس Classes	مقدار Value	شاخص Geo-accumulation index
1	$I_{geo}<0$	غیرآلوده Practically unpolluted
2	0-1	آلودگی کم Unpolluted to moderately polluted
3	1-2	آلودگی متوسط Moderately polluted
4	2-3	آلودگی نسبتاً شدید Moderately to heavily polluted
5	3-4	آلودگی شدید Heavily polluted
6	4-5	آلودگی بسیار شدید Heavily to extremely polluted
7	$I_{geo}>5$	آلودگی فوق‌العاده شدید Extremely polluted

فاکتور غنی‌شدگی: این فاکتور سطح آلودگی فلزات در خاک را نشان می‌دهد و شاخص مفیدی برای جدا کردن منابع طبیعی و انسانی فلزات از یکدیگر می‌باشد. در این شاخص نرمال‌سازی عنصر موردنظر در مقابل یک عنصر مرجع صورت می‌گیرد. عنصر مرجع عنصری است که غلظت آن در محیط تغییرپذیری اندکی داشته باشد و تحت‌تأثیر عوامل انسان‌زاد نباشد. عناصری از جمله آلومینیوم، آهن، منگنز، تیتانیوم، وانادیوم و سیلیسیوم غالباً به عنوان عنصر مرجع به‌کار می‌روند. در این مطالعه عنصر آهن به‌دلیل فراوانی آن در خاک به عنوان عنصر مرجع استفاده شد. غنی‌شدگی برای عناصر موجود در خاک با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$EF=[(C_n/C_{ref}\ sample/(B_n/B_{ref})\ background) \quad (۲)$$

که، C_n غلظت فلز در نمونه مورد مطالعه و C_{ref} غلظت فلز مرجع در نمونه مورد مطالعه و B_n غلظت زمینه‌ای فلز موردنظر و B_{ref} غلظت زمینه‌ای فلز مرجع است. مقادیر فاکتور غنی‌شدگی به ٦ گروه طبقه‌بندی می‌شود که در جدول ۲ آورده شده است.

در کشور ایران استاندارد خاصی برای غلظت زمینه‌ای فلزات تهیه نشده است. بسیار از پژوهش‌گران از متوسط مقدار متوسط پوسته زمین به عنوان غلظت زمینه ای استفاده می‌کنند (۲۷ و ۲۸) که در این مقاله هم از همین روش استفاده شد.

جدول ۲- مقادیر آلودگی بر حسب فاکتور غنی‌شدگی.

Table 2. Pollution levels according to Enrichment Factor.

عامل و منشاء Factor and origin	شاخص EF Index	مقدار Value
طبیعی/زمین‌شناسی Natural/Geological	عدم غنی‌شدگی Lack of enrichment	EF<1
طبیعی/انسانی Natural/Human	غنی‌شدگی جزیی Partial enrichment	1<EF<2
انسانی/آلودگی قابل‌توجه Human/Significant contamination	غنی‌شدگی متوسط Moderate enrichment	2<EF<5
صنعتی/شهری (انسان‌زاد) Industrial/Urban (Man-made)	غنی‌شدگی شدید Severe enrichment	5<EF<20
منابع آلودگی نقطه‌ای Point sources of pollution	غنی‌شدگی بسیار شدید Very intense enrichment	20<EF<40
صنعتی/شهری (انسان‌زاد)/نقطه‌ای Industrial/Urban (Man-made)/Point	غنی‌شدگی فوق‌العاده Extraordinary enrichment	EF>40

نتایج و بحث

خاک آلوده به فلزات سنگین ناشی از صنعتی شدن سریع و شهرنشینی به یک تهدید جدی برای سلامت بشر در سراسر جهان و سلامت محیط زیست تبدیل شده است (۲۱). آلودگی فلزات سنگین از طریق فرآیندهای طبیعی از جمله فوران آتشفشانی، هوازدگی واحدهای سنگی و فعالیت‌های مصنوعی از جمله استخراج سنگ معدن، فعالیت‌های انسانی مانند تخلیه فاضلاب، صنایع مختلف، وجود شهرک‌های صنعتی و استفاده بیش از حد از آفت‌کش‌ها و کودهای شیمیایی به خاک وارد می‌شوند (۲۲).

از آن‌جایی‌که غلظت عناصر سنگین در آب آبیاری و خاک کشاورزی ارتباط مستقیم با غلظت آن‌ها در بافت‌های حیوانی و انسانی دارد و افزون بر آلودگی خاک، گیاه و حتی منابع آب، به‌دلیل خطر انتقال فلزات سنگین از طریق زنجیره غذایی به انسان می‌تواند منجر به بیماری‌های جهش‌زا و سرطان‌زا شود، در جدول ۳ حدود مجاز عناصر سنگین خاک طبق سه استاندارد بین‌المللی (۲۹) بیان شده است. نشریه فنی سازمان استاندارد نیز برای استاندارد آلودگی منابع خاک (۳۰) حد مجاز تعریف کرده که در جدول٤ آمده است.

جدول ۳- حدود مجاز عناصر سنگین در خاک طبق استانداردهای مختلف.

Table 3. Permissible limits of heavy elements in soil according to various standards.

استاندارد	سرب Pb	سلنیم Se	کادمیم Cd	نیکل Ni	ارسنیک As
EU, 2002	300	3	3	75	25
FAO/WHO 1984	30	5	0.35	-	20
USEPA 1983	10	4	0.06	40	23

جدول ٤- حد مجاز عناصر سنگین در خاک کشاورزی.

Table 4. Permissible limits of heavy elements in agricultural soil.

عناصر Elements	ارسنیک As	کادمیم Cd	سرب Pb	نیکل Ni	سلنیم Se
خاک (Soil) $mgkg^{-1}$	40	5	75	110	3

با توجه به نتایج به‌دست آمده و آنالیز آن‌ها، جدول تجزیه واریانس عناصر سنگین خاک‌های مورد مطالعه به‌دست آمد (جدول ۵).

کادمیم: نتایج این طرح نشان داد که با توجه به استاندارد ذکر شده در جدول ۲، خاک منطقه هامانه (شاهد) و خضرآباد (نیمه‌آلوده) عاری از آلودگی کادمیم و خاک هر سه عمق منطقه شحنه (آلوده) به فلز سنگین کادمیم آلوده است. در منطقه شحنه بیش‌ترین غلظت کادمیم در عمق سوم مشاهده شد که نسبت به سطح خاک ۹۲/٦۳٪ افزایش نشان داد. اثر نوع منطقه بر میزان آلودگی کادمیم در خاک نشان داد که از لحاظ غلظت کادمیم بین منطقه هامانه و خضرآباد اختلاف معنی‌داری مشاهده نشده ولی غلظت کادمیم در عمق سوم منطقه شحنه نسبت به عمق سوم منطقه هامانه ۹٤/۷٤٪ (در سطح معنی‌داری ۱٪) افزایش نشان داد (شکل ۷).

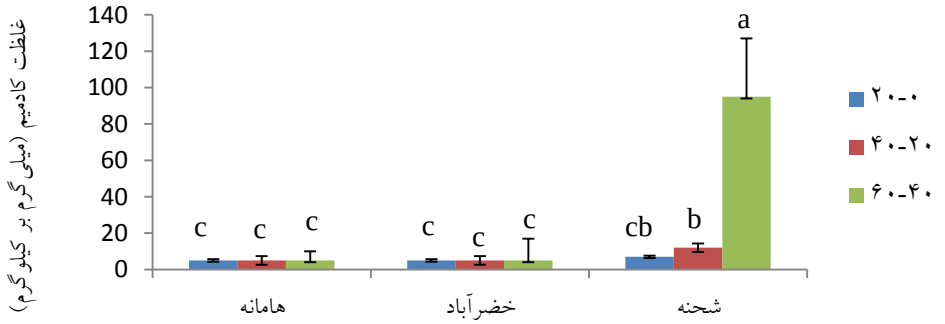
جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس عناصر سنگین در خاک.

Table 5. Results of analysis of variance of heavy elements in soil.

منابع تغییرات S.O.V.	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of Squares				
		کادمیم Cd	سرب Pb	ارسنیک As	نیکل Ni	سلنیم Se
مکان Place	2	3289**	4876558**	21103**	200171**	16680**
عمق Depth	2	2434**	667237**	12240**	43409*	13765**
عمق * مکان Depth*Place	4	2434**	202627*	6050**	67840*	6825**
خطا Error	18	16.93	62007	41.81	11008	158
ضریب تغییرات C.V.		25.65	21.47	15.08	61.85	29.21

** و * به‌ترتیب معنی‌داری در سطح ۱٪ و معنی‌داری در سطح ۵٪

** and * are significant at the 1% and 5% levels, respectively



شکل ۷- اثر متقابل منطقه و عمق بر غلظت کادمیم خاک (mg/kg).

Figure 7. Interaction effect of place and depth on soil Cd concentration (mg/kg).

جدول ٦- شاخص زمین‌انباشتگی و غنی‌شدگی کادمیم در هر سه منطقه.

Table 6. Geo. A. and EF Index of Cd in all 3 places.

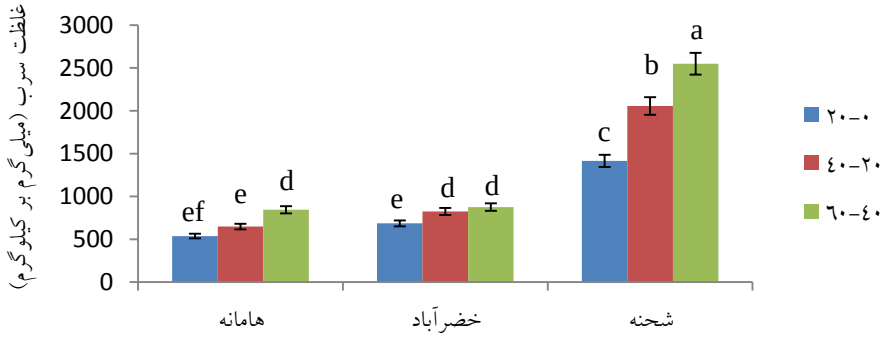
منطقه Place	عمق Depth	غلظت کادمیم Cd Con. (mg/kg)	شاخص زمین‌انباشتگی Igeo Index	سطح آلودگی Pollution level of Igeo	شاخص غنی‌شدگی EF Index	سطح آلودگی Pollution level of EF
Hamaneh	0-20	5	4.06	Heavily polluted	25	Very intense
Hamaneh	20-40	5	4.06	Heavily polluted	25	Very intense
Hamaneh	40-60	5	4.06	Heavily polluted	25	Very intense
khezrAbad	0-20	5	4.06	Heavily polluted	25	Very intense
khezrAbad	20-40	5	4.06	Heavily polluted	25	Very intense
khezrAbad	40-60	5	4.06	Heavily polluted	25	Very intense
Shehneh	0-20	7	4.54	Heavily polluted	35	Very intense
Shehneh	20-40	12	5.32	Heavily to extremely	60	Extraordinary
Shehneh	40-60	95	8.31	Extremely pollute	475	Extraordinary

نتایج جدول ٦ نیز نشان داد که کل منطقه مورد مطالعه به کادمیم آلوده است. حتی منطقه پاک یا شاهد و منطقه نیمه‌آلوده هم آلودگی کادمیم را تا سطح شدید نشان دادند و این آلودگی در منطقه شحنه به بسیار شدید و فوق‌العاده شدید هم در هر دو شاخص زمین انباشتگی و غنی شدگی رسیده است.

کادمیوم به‌طور طبیعی در خاک‌ها در غلظت‌های یک دهم تا ۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم وجود دارد. کادمیوم به راحتی برای جذب توسط محصولات غذایی در دسترس است و آلودگی زنجیره غذایی به کادمیوم از خاک‌های آلوده را سبب می‌شود. منابع پراکنده کادمیوم عمدتاً کودهای فسفری و ریزش‌های اتمسفری غلظت کادمیوم خاک را تا حدود یک دهم تا سه دهم میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش داده است. نگهداری کادمیوم در خاک به‌وسیله واکنش‌های جذب کنترل شده و pH خاک عامل اصلی تعیین‌کننده است. فراهمی کادمیوم خاک برای جذب شدن توسط محصولات در میان خاک‌ها با ضریب ۱۰ تغییر می‌کند و معمولاً به ازای هر واحد کاهش pH حدود یک و نیم برابر افزایش می‌یابد (۳۱). احتمال دارد به دلیل سبک بودن بافت کادمیم از لایه‌های سطحی به راحتی آبشویی شده و به اعماق خاک آمده باشد. در پژوهش سلگی و همکاران (۲۰۲۰) در مقایسه آبیاری با فاضلاب شهری در مقایسه با آبیاری با آب چاه مشخص گردید که غلظت کادمیم در عمق خاک در آب‌های آبیاری شده با چاه نسبت به خط سطحی بیش‌تر است و آن را به شنی بودن خاک و حرکت آن در عمق نسبت داده‌اند (۳۲). این روند افزایش غلظت فلزات سنگین در اثر افزایش فعالیت صنعتی تنها منوط به ایران نبوده و در خارج از کشور نیز گزارش شده است. برای مثال دراگوویچ و همکاران (۲۰۱٤) در کشور صربستان در خاک‌های اطراف کارخانه فولادسازی نتایج مشابهی مبنی بر افزایش غلظت عناصر روی، سرب، کادمیم، مس و آرسنیک را گزارش کردند (۳۳).

با توجه به سطح گسترده زمین‌های کشاورزی در منطقه مورد مطالعه، منشأ کادمیم در منطقه نیز ممکن است ناشی از مصرف کودهای فسفر باشد. کادمیم معمولاً در کودهای فسفره یافت می‌شود زیرا کادمیم معمولاً به‌عنوان ناخالصی در سنگ‌های فسفاتیک موجود است (۳۱). کادمیم یک عنصر نشانگر در فعالیت‌های کشاورزی در نظر گرفته می‌شود که شامل استفاده از کودهای شیمیایی و کودهای دامی است (۳٤). ماروگو- نگرته و همکاران (۲۰۱۷) دریافتند که شیوه‌های مدیریت کشاورزی مانند کوددهی و استفاده از سموم دفع آفات منبع اصلی کادمیم، سرب، روی، مس و نیکل در خاک‌های کشاورزی است. رسوبات اتمسفری و انتشار از گازهای خروجی از نیروگاه حرارتی موجود در منطقه نیز ممکن است یکی دیگر از عوامل تجمع کادمیم در خاک‌های منطقه باشد (۳۵).

سرب: با توجه به استاندارد موجود در جدول ۲ خاک هر سه منطقه در هر سه عمق آلوده به سرب است. نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که هر دو عامل عمق و مکان بر غلظت سرب در سطح ۵٪ خاک معنی‌دار است. با افزایش عمق در منطقه خضرآباد میزان سرب از سطح به عمق ۲۱/۷۱٪ افزایش و در منطقه شحنه با افزایش عمق میزان سرب ٤٤/٤٨٪ افزایش یافت (شکل ۸).



شکل ۸- اثر متقابل منطقه و عمق بر غلظت سرب خاک (mg/kg).

Figure 8. Interaction effect of place and depth on soil Pb concentration (mg/kg).

جدول ۷- شاخص زمین انباشتگی و غنی شدگی سرب در هر سه منطقه.

Table 7. Geo. A. and EF Index of Pb in all 3 places.

منطقه Place	عمق Depth	غلظت کادمیم Pb Con. (mg/kg)	شاخص زمین‌انباشتگی Igeo Index	سطح آلودگی Pollution level of Igeo	شاخص غنی‌شدگی EF Index	سطح آلودگی Pollution level of EF
Hamaneh	0-20	537	4.49	Heavily to extremely	26.87	Very intense
Hamaneh	20-40	649	4.76	Heavily to extremely	32.44	Very intense
Hamaneh	40-60	844	5.14	Extremely	42.22	Extraordinary
khezrAbad	0-20	686	4.84	Heavily to extremely	34.29	Very intense
khezrAbad	20-40	824	5.10	Extremely	41.22	Extraordinary
khezrAbad	40-60	875	5.20	Extremely	43.77	Extraordinary
Shehneh	0-20	1415	5.90	Extremely	7.75	Extraordinary
Shehneh	20-40	2056	6.10	Extremely	102.8	Extraordinary
Shehneh	40-60	2549	6.75	Extremely	127.45	Extraordinary

داده‌های جدول ۷ نشان داد که کل منطقه مورد مطالعه به شدت به سرب آلوده است. حتی منطقه پاک یا شاهد و منطقه نیمه‌آلوده هم آلودگی سرب را تا سطح بسیار شدید و فوق‌العاده شدید در هر دو شاخص زمین انباشتگی و غنی‌شدگی نشان داد.

نگرانی‌ها به دلیل تأثیر آلودگی سرب بر سلامتی به‌ویژه در مناطق شهری و نیز به علت جذب سرب در محصولات کشاورزی منجر به توسعه روش‌های متنوع اصلاح خاک گردیده است. منبع سرب در خاک مواد مادری و در خارج از خاک ریزش‌های اتمسفری است. میانگین مقدار سرب در خاک‌های غیرآلوده جهان در حدود ۱۷ میلی‌گرم در کیلوگرم تخمین زده شده است، اما در مورد ریزش‌های اتمسفری باید گفت چندین ترکیب سرب نسبتاً قابل تصور هستند و بنابراین به راحتی از فرآیندهای با دمای زیاد مانند کوره‌های ذوب سرب، سوختن زغال سنگ و مصرف بنزین سرب‌دار در خودروها منتشر می‌شوند. به این ترتیب در مناطق صنعتی به وفور در سطح خشک زمین تجمع واصل نموده و منجر به آلودگی گسترده خاک‌های سطحی شده است. سرب تمایل دارد روی

ذرات ریزتر منتشر شده ناشی از فرایندهای با دمای زیاد متمرکز گردیده و بنابراین امکان انتقال آن در اتمسفر به نقاط دوردست فراهم می‌گردد. آلودگی گسترده سرب در خاک‌های سطحی بسیاری از قسمت‌های جهان شامل مناطق وسیعی آلوده باعث ایجاد نگرانی درباره آلودگی احتمالی منابع آب آشامیدنی در آینده گردیده است (۳۱).

این‌گونه به‌نظر می‌رسد که علاوه‌بر این‌که ضایعات کارخانه و دود ناشی از سوختن زغال‌سنگ در منطقه شهرک صنعتی یزد باعث افزایش غلظت سرب در منطقه می‌شود، دود ناشی از وسایل نقلیه به‌علت نزدیکی به جاده اصلی ترانزیتی کشور (جاده بندرعباس- تهران) که از یزد می‌گذرد و تردد زیاد وسایل نقلیه در کنار کارخانه‌ها تأثیر به‌سزایی در افزایش غلظت سرب در خاک منطقه داشته باشد. گودرزی و همکاران (۲۰۰۲) طی مطالعه‌ای در کانادا بیان کردند عامل اصلی آلودگی خاک‌های اطراف کارخانه ذوب فلزات، دود خروجی دودکش‌ها و محل تخلیه سرباره‌های صنعتی بدون پوشش می‌باشند. آن‌ها بیان نمودند که باد باعث انتقال سرباره‌های صنعتی به زمین‌های اطراف می‌شود. هم‌چنین بیان نمودند که این سرباره‌های صنعتی حاوی حدود ۷۰ درصد سرب و روی می‌باشند که باعث آلودگی منابع خاک و آب می‌شوند (۳٦). در این پژوهش با توجه به این‌که غلظت سرب در منطقه شحنه نسبت به خضرآباد و هامانه بیش‌تر است می‌توان نتیجه گرفت که غلظت این عنصر در بخشی از خاک‌های منطقه به‌وسیله فعالیت‌های انسانی کنترل می‌شود. از سوی دیگر در منطقه شحنه با افزایش عمق غلظت سرب افزایش یافته که نشان‌دهنده اثر بافت خاک بر حرکت فلزات سنگین به سمت لایه‌های پایین‌تر است. تمایل سرب و فلزات دیگر به جزء رس به‌صورت رس > سیلت > شن و ماسه است. رس اهمیت زیادی در غیرمتحرک‌سازی فلزات در خاک دارد. وجود بافت سبک خاک می‌تواند یکی از دلایل درصد زیاد انتقال زیاد عناصری چون سرب در خاک باشد (۳۷).

طبری و صالحی (۲۰۱۱) در پژوهش خود در بررسی اثر آبیاری با فاضلاب شهری بر غلظت عناصر سنگین در خاک در مورد غلظت سرب دریافتند که با توجه به بالا بودن غلظت فلز سنگین سرب در تمام نمونه‌های آب و خاک شاید بتوان پیش‌بینی کرد که این فلز سنگین علاوه‌بر فاضلاب شهری از منبع دیگری مثل آلودگی هوا نیز وارد آب و خاک منطقه مورد مطالعه شده است (۳۸).

نادری و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهش خود در مورد آلودگی‌های اطراف معادن گل‌گهر سیرجان دریافتند که باتوجه به گلباد منطقه و جهت غالب باد که از سمت جنوب‌غربی است و وجود معادن گل‌گهر در جنوب‌غربی منطقه مطالعاتی، احتمال این‌که عناصر سنگین همراه غبار وارد منطقه شده باشند و منشأ آلایندگی باشد وجود دارد (۳۹).

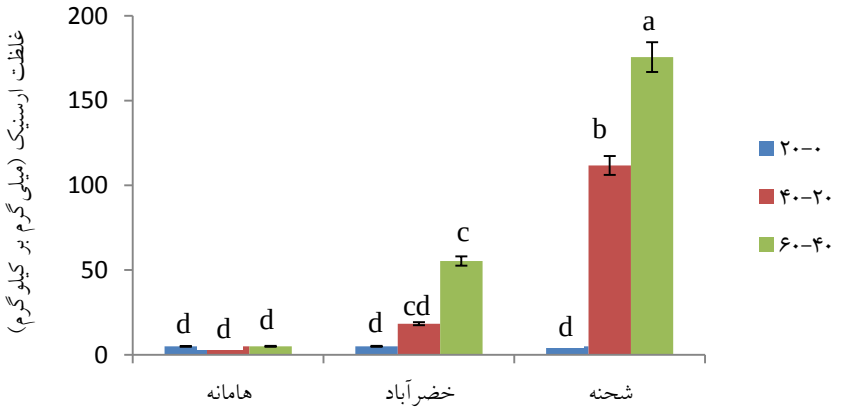
رودرینگز و همکاران (۲۰۰۸) گزارش کردند که همبستگی معنی دار اجزای بافت خاک با عناصر سنگین نشان‌دهنده تأثیر فرایندهای پدوژنیک و مواد مادری بر غلظت فلزات سنگین است. بنابراین ورود غبار و بادرفت‌ها به منطقه در درازمدت امکان دارد عامل آلودگی خاک‌های منطقه به فلزات سنگین آهن و مس باشد (٤٠). دینگ و همکاران (۲۰۱۷) نیز گزارش کردند که باد در گسترش عناصر سنگین و آلودگی مناطق اطراف معادن در چین نقش با اهمیتی داشته است (٤١).

ولی‌نژاد و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که به‌طورکلی، به‌دلیل وجود مناطق آلوده‌کننده مانند کارخانه‌های تولید خودرو (ایران‌خودرو و سایپا) و افزایش تدریجی آن‌ها (افزایش صنعتی شدن)، در کل منطقه غلظت عناصر کادمیم، کروم و سرب در حال

افزایش است که این امر می‌تواند نشان‌دهنده نقش فعالیت‌های انسانی و صنعتی در اضافه شدن این عناصر به خاک باشد (۴۲). در این راستا، یان و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی میزان آلودگی برخی از عناصر سنگین در خاک سطحی شهرک صنعتی سمنان گزارش کردند که فعالیت‌های صنعتی ناشی از این شهرک صنعتی منجر به افزایش معنی‌دار سرب، روی و مس در خاک شده است (۴۳).

نکویی‌نیا و همکاران (۲۰۱۶) غلظت بالای سرب و روی و مس را در خاک‌های اطراف معدن ایرانکوه در غرب ایران گزارش کردند. هم‌چنین آن‌ها گزارش کردند به علت قرارگیری صنایع پتروشیمی، پالایشگاه و نیروگاه، انتشار گازهای خروجی از دودکش‌های نیروگاه حرارتی و پالایشگاه و پتروشمی نیز از طریق رسوبات جوی باعث تجمع سرب در خاک‌های منطقه شده است (۴۴). راستمنش و همکاران (۱۳۹۵) نیز علت بالاتر بودن غلظت سرب در خاک‌های مجتمع پالایشگاه و پتروشیمی را ناشی از فعالیت این صنایع بیان کردند (۴۵).

آرسنیک: با توجه به استاندارد ارائه شده در جدول ۲، خاک منطقه هامانه (شاهد) عاری از آلودگی ارسنیک، عمق ۰ تا ۲۰ منطقه خضرآباد (نیمه‌آلوده) آلوده به ارسنیک و خاک عمق اول و دوم منطقه شحنه (آلوده) به ارسنیک آلوده است. جدول تجزیه واریانس (جدول ۵) نشان داد که اثر عمق و منطقه و اثر متقابل آن‌ها بر غلظت ارسنیک خاک در سطح ۱٪ معنی‌دار است. به‌طوری‌که بیش‌ترین آلودگی در منطقه شحنه و سپس خضرآباد دیده شد. نتایج نشان داد که در منطقه شحنه با افزایش عمق خاک غلظت ارسنیک از سطح نسبت به عمق خاک ۹۷/۱۴٪ و در منطقه خضرآباد با حرکت از سطح به عمق با افزایش ۹۰ درصدی غلظت ارسنیک نشان داده شد. در منطقه پاک غلظت ارسنیک معنی‌دار نبود (شکل ۹).



شکل ۹- اثر متقابل عمق و منطقه بر غلظت ارسنیک خاک (mg/kg).

Figure 9. Interaction effect of place and depth on soil As concentration (mg/kg).

جدول ۸- شاخص زمین‌انباشتگی و غنی‌شدگی ارسنیک در هر سه منطقه.

Table 8. Geo. A. and EF Index of As in all 3 places.

منطقه Place	عمق Depth	ارسنیک As Con. (mg/kg)	شاخص زمین‌انباشتگی Igeo Index	سطح آلودگی Pollution level of Igeo	شاخص غنی‌شدگی EF Index	سطح آلودگی Pollution level of EF
Hamaneh	0-20	5	-0.58	unpolluted	2.5	Moderate
Hamaneh	20-40	5	-0.58	unpolluted	2.5	Moderate
Hamaneh	40-60	5	-0.58	unpolluted	2.5	Moderate
khezrAbad	0-20	5	-0.58	unpolluted	2.5	Moderate
khezrAbad	20-40	18.33	1.29	Moderately	9.16	Severe
khezrAbad	40-60	55.33	2.88	Moderately to heavily	27.66	Very intense
Shehneh	0-20	5	-0.58	unpolluted	2.5	Moderate
Shehneh	20-40	111.7	3.90	Heavily	55.85	Very intense
Shehneh	40-60	175.7	4.55	Heavily to extremely	87.85	Very intense

طبق شاخص‌های محاسبه شده در جدول ۸، منطقه هامانه (پاک) و خاک سطحی منطقه خضرآباد (نیمه آلوده) و فاقد آلودگی ارسنیک بوده و بیش‌ترین آلودگی سرب در لایه های پایینی خاک خضرآباد و خاک شحنه (آلوده) مشاهده شد. طبق جدول فوق این‌گونه به‌نظر می‌آید که در غلظت‌های پایین‌تر عناصر سنگین، شاخص فاکتور غنی شدگی حساسیت بیش‌تری به آلودگی دارد تا شاخص زمین‌انباشتگی.

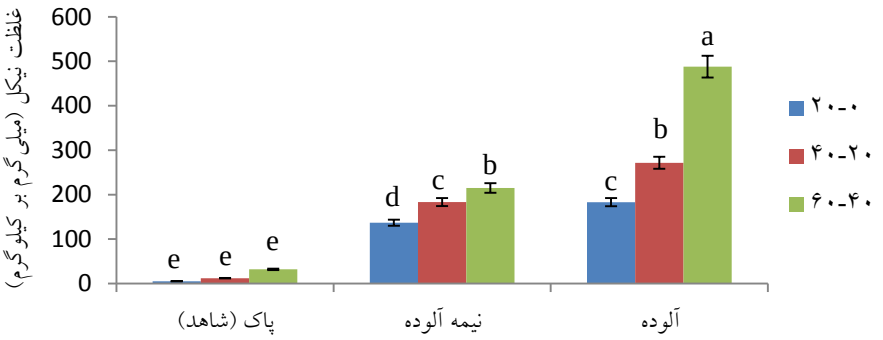
آرسنیک عمدتاً از جنبه اثرات سمی آن برای محیط زیست معروف است. اگر چه توانایی زیاد سمیت ارسنیک شناخته شده و از زمان‌های گذشته تاکنون از آن استفاده شده است. برآوردهای غلظت میانگین جهانی ارسنیک در خاک‌ها در محدوده حدود ۵ تا ۷ و نیم میلی‌گرم بر کیلوگرم با گستره معمول بین ۰/۱ و ۵۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. دیگر غلظت‌های بالاتر ارسنیک یافت شده در مناطق خاص به ناهنجاری‌های با منشاء زمین شناختی یا سنگ بستر یا فعالیت‌های انسان‌زاد نسبت داده می‌شود. ریزش‌های اتمسفری منبع مهم دیگری از ارسنیک خاک به ویژه در مجاورت مناطق مربوط به فعالیت‌های معدنی و کوره‌های ذوب فلزات در مناطق شهری محسوب می‌گردد. آرسنیک در هوا ناشی از مناطق دوردست خیلی‌کم و مشخصاً با مقدار میانگین کم‌تر از یک صدم نانوگرم در مترمکعب است اما در مناطق شهری و اطراف معادن می تواند تا چند ده برابر افزایش پیدا کند. این عنصر از طریق خشک و مرطوب شدن ته‌نشست می‌کند و تشکیل‌دهنده پل ورودی ارسنیک اتمسفری است که معمولاً ۵۰ تا ۸۰ درصد آن به‌صورت محلول است. غلظت آرسنیک در پل ریزش‌های اتمسفری بسیار متغیر و کم‌ترین مقدار آن ۰/۰۰۰۹ دوردست تا ۱۲۳۰۰ گرم در لیتر در محیط زیست‌های شهری است (۳۱). می‌توان نتیجه گرفت که فعالیت‌های انسان‌زاد می‌تواند مهم‌ترین دلیل این آلودگی باشد به‌ویژه که منطقه شحنه درست در مجاورت شهرک صنعتی یزد نیز قرار گرفته و بافت سبک خاک نیز به حرکت آلودگی در طول پروفیل کمک کرده است.

آرسنیک ممکن است منشأ متفاوتی از فلزات دیگر داشته باشد. آرسنیک در خاک ممکن است ناشی از فعالیت‌های صنعتی باشد. نتایج مطالعات مختلف بیان شده که منابع متعدد آلاینده از جمله بخش حمل و نقل، فعالیت‌های صنعتی و استفاده از مواد سوختی در

نیروگاه‌ها باعث انتقال فلزات سنگین به اتمسفر شده و متعاقباً به وسیله فرونشست وارد خاک می‌شوند (٤٦). از سوی دیگر با توجه به سطح زیاد اراضی کشاورزی در منطقه و استفاده از علفکش‌هایی مانند گلایفوزیت (رانداپ) و اکسپرس برای از بین بردن علف‌های هرز توسط کشاورزان که حاوی آرسنیک هستند سبب افزایش غلظت آن در خاک‌های اراضی کشاورزی شده است (۳۱). نتایج پژوهش‌ها نشان داده است که کودهای مرغی دارای میزان آرسنیک قابل‌توجهی نسبت به سایر کودها هستند (۳۱).

در مطالعه قدیمی و همکاران (۲۰۱۹) در محل دفن زباله‌های اراک در تمام گمانه‌ها غلظت ارسنیک در نمونه‌های عمقی بیش‌تر از سطحی بود (٤٧) که ناشی از محصولات مواد افزودنی خوراک دام، مواد نگهدارنده چوب، مواد شیشه‌های ویژه، سرامیک، آفت‌کش‌ها، حشره‌کش‌ها و علف‌کش‌ها، قارچ‌کش‌ها، قطعات الکترونیکی، مواد نساجی، مواد دباغی، رنگدانه‌ها، ضدرسوب، فیلتر نور، آتش‌بازی، دامپزشکی حاصل شده باشد (٤٨). کریمی و همکاران (۲۰۱٦) دریافتند که تغییرات فلز آرسنیک در خاک کم‌تر از فلز منگنز و منگنز کم‌تر از فلز روی می‌باشد. این به این معنی است که تحرک و جابه‌جایی آرسنیک در خاک کم‌تر از سایر فلزها بوده و بیش‌ترین مقدار آرسنیک در محل آبیاری (نزدیک گیاه) است (٤٩).

نیکل: طبق استاندارد ارائه شده در جدول ۲، خاک هامانه (شاهد) عاری از آلودگی نیکل و خاک هر سه عمق مناطق خضرآباد (نیمه‌آلوده) و شحنه (آلوده) به فلز سنگین نیکل آلوده هستند و جدول آنالیز واریانس (جدول ۳) نشان داد که اثر عمق و منطقه و اثر متقابل آن‌ها بر غلظت نیکل خاک در سطح ۵٪ معنی‌دار است. به‌طوری‌که در منطقه شحنه با حرکت از سطح خاک تا عمق ٦۰ سانتی‌متری غلظت نیکل ۷۱/۷۲٪ افزایش یافت. هم‌چنین نتایج نشان داد که در منطقه خضرآباد با حرکت از سطح خاک تا عمق ٦۰ سانتی‌متری غلظت نیکل ۳٦/٤۲٪ به‌طور معنی‌دار افزایش نشان داد. غلظت نیکل در عمق‌های مختلف خاک در منطقه هامانه در سطح آلوده و معنی‌دار نبود (شکل ۱۰).



شکل ۱۰- اثر متقابل عمق و منطقه بر غلظت نیکل خاک (mg/kg).

Figure 10. Interaction effect of place and depth on soil Ni concentration (mg/kg).

جدول ۹- شاخص زمین‌انباشتگی و غنی‌شدگی نیکل در هر سه منطقه.

Table 9. Geo. A. and EF Index of Ni in all 3 places.

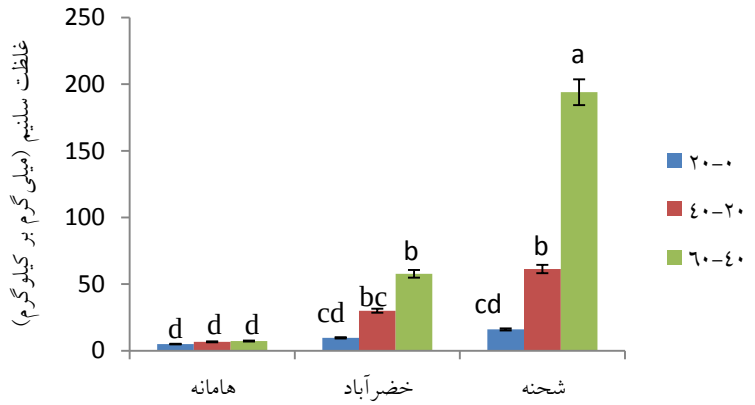
منطقه Place	عمق Depth	غلظت کادمیم Ni Con. (mg/kg)	شاخص زمین‌انباشتگی Igeo Index	سطح آلودگی Pollution level of Igeo	شاخص غنی‌شدگی EF Index	سطح آلودگی Pollution level of EF
Hamaneh	0-20	5	-3.91	unpolluted	0.1	Lack
Hamaneh	20-40	12	-2.64	unpolluted	0.24	Lack
Hamaneh	40-60	32	-1.23	Unpolluted to moderately	0.64	Lack
khezrAbad	0-20	136.7	0.87	Moderately	2.73	Moderate
khezrAbad	20-40	183.3	1.29	Moderately	3.67	Moderate
khezrAbad	40-60	215	1.52	Moderately to heavily	4.30	Moderate
Shehneh	0-20	183	1.29	Moderately	3.66	Moderate
Shehneh	20-40	271.7	1.86	Moderately to heavily	5.43	Severe
Shehneh	40-60	488	2.70	Heavily	9.76	Severe

میزان آلودگی به نیکل خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۹ طبق شاخص زمین‌انباشتگی و فاکتور غنی‌شدگی نشان داده شده است. طبق این داده‌ها خاک منطقه هامانه (پاک) عاری از آلودگی نیکل و خاک منطقه خضرآباد (نیمه‌آلوده) دارای آلودگی متوسط در عمق اول و دوم و خاک منطقه شحنه (آلوده) به نیکل آلوده است. در این جدول هر دو شاخص سطوح آلودگی را تقریباً برابر اعلام نموده‌اند. حتی ممکن است این آلودگی منشأ زمین‌شناسی هم داشته باشد. وو و همکاران (۲۰۱٦) مس و نیکل را وابسته به فاکتورهای ساختاری از جمله مواد مادری، هوازدگی و نوع خاک بیان کردند که دارای رابطه مهندسی ژیوشیمی زیست‌محیطی قوی مشترکی هستند (۵۰).

در دهه‌های اخیر مقادیر زیاد رهاسازی نیکل توسط فعالیت‌های صنعتی عمدتاً ساخت فلزات ضدزنگ و مصرف لجن فاضلاب به عنوان اصلاح‌کننده در خاک‌های کشاورزی سبب افزایش بسیار زیاد این فلز در خاک و محیط زیست شده است. معمولاً آلودگی‌های موضعی در مکان‌هایی که در آن فعالیت‌های مربوط به کوره‌های ذوب یا آبکاری فلزات صورت می‌گیرد یا با عملیات معدنی همراه است رخ می‌دهد. یک منبع مهم نیکل در خاک می‌تواند مصرف کودهای شیمیایی فسفری و کودهای مواد پسماندی مانند لجن فاضلاب و خاکستر مواد سوختنی است (۳۱). در واقع فعالیت‌های انسانی در بعضی موارد بیش‌تر از جنس ماده مادری بر میزان فلز نیکل اثرگذار است. از جمله در مطالعه نعیمی مرندی و همکاران (۲۰۱۳) غلظت نیکل کل تحت‌تأثیر فعالیت‌های انسانی در منطقه قرار نگرفته و بیش‌تر تحت‌تأثیر مواد مادری در منطقه مورد بررسی بود. از آن‌جا که مواد مادری منطقه مورد مطالعه تحت‌تأثیر رسوبات آبرفتی بوده و این رسوبات شامل شیل‌های ژوراسیک و سنگ آهک کرتاسه می‌باشد که اغلب غنی از فلزات سنگینی چون نیکل هستند، این رسوبات می‌تواند عامل کنترل‌کننده غلظت برخی از فلزات سنگین در منطقه مورد بررسی باشند (۵۱). افزایش در نیکل در عمق پروژه پیش‌رو نیز می‌تواند به همین دلیل باشد. در کشور چین نیز زو و همکاران (۲۰۱۹) توزیع مکانی برخی عناصر سنگین را در خاک‌های سطحی استان شانگهای مورد بررسی و روند ورود عناصر سنگین سرب، روی و مس به خاک را افزایش و ناشی از فعالیت‌های انسانی و صنعتی بیان نمودند. به علاوه، وجود زیاد وسایل نقلیه به‌خصوص وسایل نقلیه شخصی و فرسوده، از عوامل مهم در

افزایش غلظت عناصر سنگین گزارش شده است (۵۲) که هم‌راستا با نتایج به‌دست آمده در این پژوهش است. براساس نتایج به‌دست آمده، تجمع عناصر سنگین در نواحی شحنه و خضرآباد بیش‌تر بوده و با افزایش فاصله از محل تجمع صنایع، مقادیر این عناصر کاهش می‌یابد.

سلنیم: طبق استاندارد ذکرشده در جدول ۲، همه خاک‌های هر سه عمق در هر سه منطقه به سلنیم آلوده هستند. نتایج تجزیه واریانس (جدول ۵) نشان داد که اثر عمق، منطقه و هم‌چنین اثر متقابل آن‌ها بر غلظت سلنیم در خاک در سطح ۱٪ معنی‌دار است. در منطقه هامانه در اعماق مختلف تغییرات غلظت سلنیم معنی‌دار نبود. اما در خاک هر دو منطقه خضرآباد و شحنه با افزایش عمق افزایش چشمگیر غلظت سلنیم مشاهده گردید به‌طوری‌که در خضرآباد با حرکت از عمق ۲۰ به ۶۰ سانتی‌متری غلظت سلنیم ۸۳/۲۳٪ افزایش نشان داد و در منطقه شحنه با حرکت از عمق دوم به سوم (۲۰ به ۶۰ سانتی‌متری) ۹۱/۷۵٪ افزایش غلظت سلنیم مشاهده گردید (شکل ۱۱).



شکل ۱۱- اثر متقابل عمق و منطقه بر غلظت سلنیم خاک (mg/kg).

Figure 11. Interaction effect of place and depth on soil Se concentration (mg/kg).

جدول ۱۰- شاخص زمین‌انباشتگی و غنی‌شدگی سلنیم در هر سه منطقه.

Table 10. Geo. A. and EF Index of Se in all 3 places.

منطقه Place	عمق Depth	غلظت کادمیم Se Con. (mg/kg)	شاخص زمین‌انباشتگی Igeo Index	سطح آلودگی Pollution level of Igeo	شاخص غنی‌شدگی EF Index	سطح آلودگی Pollution level of EF
Hamaneh	0-20	5	3.42	Heavily	10	Severe
Hamaneh	20-40	6.67	3.83	Heavily	13.34	Severe
Hamaneh	40-60	7.33	3.97	Heavily	14.66	Severe
khezrAbad	0-20	9.67	4.43	Heavily to extremely	19.34	Severe
khezrAbad	20-40	30	5.42	Extremely	60	Extraordinary
khezrAbad	40-60	57.67	6.33	Extremely	115.34	Extraordinary
Shehneh	0-20	16	4.83	Heavily to extremely	32	Very intense
Shehneh	20-40	61.33	6.42	Extremely	122.66	Extraordinary
Shehneh	40-60	194	7.72	Extremely	388	Extraordinary

داده‌های جدول ۱۰ نشان داد که هر سه منطقه مورد مطالعه بر طبق شاخص زمین انباشتگی و فاکتور غنی‌شدگی دارای آلودگی شدید تا فوق‌العاده شدید است که این آلودگی در عمق‌های پایین‌تر منطقه خضرآباد و شحنه شدت بیش‌تری پیدا کرده است که می‌تواند زنگ خطری مبنی بر چاره‌اندیشی در این رابطه باشد.

غلظت سلنیم خاک غالباً اندک و در حدود یک‌صدم تا دو میلی‌گرم در کیلوگرم است. مقدار قابل‌دسترس سلنیم خاک ارتباط ضعیفی با غلظت کل سلنیم خاک داشته و در هر دو مقیاس منطقه‌ای و جهانی بسیار متغیر است. قابلیت فراهمی سلنیم خاک برای گیاه به گونه‌های شیمیایی اصلی سلنیم و ویژگی‌های خاک شامل مقدار مواد جاذب از جمله اکسید و هیدروکسیدهای آلومینیوم و آهن، pH و وضعیت اکسایش کاهش بستگی دارد. علاوه بر این حضور آنیون‌های رقابت‌کننده برای سطوح جذب مانند سولفات فسفات و آنیون‌های آلی جذب ریشه‌ای و نگهداری سلنیم را در خاک تحت‌تأثیر قرار می‌دهد و فعالیت میکروبی در برهمکنش سلنیم با مواد آلی مهم است (۳۱). این‌گونه به‌نظر می‌آید که سلنیم هم تحت‌تأثیر بافت سبک خاک و آبشویی به علت غرقاب بودن روش آبیاری به عمق‌های پایین‌تر حرکت کرده است.

در پژوهش طبری و صالحی (۳۸) در بررسی تغییرات عمقی فلزات سنگین در پروفیل خاک در هر یک از دو توده مورد بررسی نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار آماری است به‌طوری‌که غلظت فلزات سنگین آهن، منگنز، کروم و سرب خاک در هر دو توده در لایه سطحی بیش‌تر از لایه‌های عمقی می‌باشد. با توجه به این‌که بافت خاک هر دو توده لوم رسی است و از طرفی هرچه بافت خاک سنگین‌تر باشد میزان نفوذپذیری فلزات سنگین در خاک کاهش می‌یابد، احتمال انتقال فلزات سنگین به لایه‌های زیرین خاک کم و این فلزات بیش‌تر در لایه‌های بالایی خاک انباشت می‌شوند. با وجود این روند معکوسی در مورد برخی فلزات سنگین مانند آهن، منگنز، روی و مس توسط بتی و سینگ (۲۰۰۳) گزارش شده که این روند معکوس می‌تواند به دلیل تفاوت در بافت خاک (بافت شنی) و درصد پایین کربن آلی خاک در مطالعه یادشده باشد (۵۳). در همین راستا آقابراتی و همکاران (۲۰۰۸) به نتایج مشابهی درست یافتند. غلظت کم‌تر فلزات سنگین در لایه‌های پایین‌تر خاک به‌علت پویایی کم این فلزات و در نتیجه حرکت ضعیف آن‌ها به‌سمت لایه‌های پایینی خاک است (٥٤).

آلاینده‌های محیط شهری مانند فلزات سنگین از منابع مختلف ناشی از فعالیت‌های انسانی از جمله صنعت و سوختن سوخت‌های فسیلی در ماشین‌ها است. در این میان این منابع وسایل نقلیه منبع اصلی آلودگی هوا در محیط شهری هستند که سبب تولید آلاینده‌های مهمی از جمله سرب و کادمیوم می‌شوند. آلاینده‌های محیط شهری در اشکال جامد یا مایع در اندازه‌های مختلف حاصل می‌شود که مبدا آن‌ها از سوختن ناقص سوخت‌های فسیلی از وسایل نقلیه دیزلی یا فعالیت‌های صنعتی است (۵۵). لازم به ذکر است مقادیر عناصر جیوه، برلیم، کروم و ناچیز گزارش گردید.

فلزات سنگین از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی در قرن حاضر بوده که با تداوم روند صنعتی شدن در دنیا، بر غلظت آن‌ها افزوده خواهد شد. بر اساس استانداردهای جهانی، بیش‌ترین خطرات ناشی از فلزات سنگین مربوط به عناصر سرب، آرسنیک، کادمیم، مس و روی است که بر اساس مطالعات، غلظت آن‌ها در محدوده مناطق صنعتی دارای روند افزایش معنی‌دار است (٥٦ و ٥٧). کادمیم، کروم و

سرب از جمله عناصری هستند که غلظت آن‌ها در خاک سطحی مناطق صنعتی و شهری در حال افزایش است (۵۸).

با در نظر گرفتن عوامل صنعتی و ترافیک که مهم‌ترین عوامل ایجاد آلودگی هستند و رسوب این فلزات از هوا در خاک، می‌توان استدلال کرد که غلظت آن‌ها در هوا نیز بحرانی است. ادامه روند صنعتی شدن نیز موجب تشدید افزایش تولید آلودگی خواهد شد. به همین دلیل مدیران و تصمیم‌گیران محلی و منطقه‌ای باید با اتخاذ راهکارهای مناسب مانند استفاده از گیاهان دارای قابلیت گیاه‌پالائی به‌وسیله گیاهان بومی منطقه و حذف فلزات سنگین در کنار کاهش آلودگی کارخانه‌ها و حذف وسایل نقلیه فرسوده، مانع از افزایش غلظت این فلزات سنگین شوند.

این نتایج، بیان‌کننده اهمیت مسئولیت‌پذیری اجتماعی و زیست‌محیطی صنایع به‌ویژه در راستای تجربه یک توسعه پایدار در مناطق محلی است. در حقیقت، مطالبه از صنایع برای مسئولانه عمل کردن در قبال جامعه، موضوعی است که با گسترش روزافزون اثرگذاری آن‌ها بر محیط زیست شدت گرفت و منجر به این شد که مفهومی به نام مسئولیت اجتماعی صنایع ظهور پیدا کند. مسئولیت اجتماعی و زیست‌محیطی صنایع به مجموعه‌ای از انتظارات جامعه محلی و اقدامات متقابل صنایع در برابر این انتظارات اشاره دارد. مسئولیت اجتماعی و زیست‌محیطی صنایع یک مفهوم جامع است که رابطه بین کسب و کار و جامعه را توضیح می‌دهد و می‌تواند به عنوان یک مسیریاب به هدف توسعه پایدار خدمت کند. این مفهوم اینک در کشورهای توسعه‌یافته به شدت از سوی تمامی مشارکت‌کنندگان در فرآیند توسعه پایدار هم‌چون حکومت‌ها، صنایع، جامعه مدنی، سازمان‌های بین‌المللی و مراکز علمی دنبال می‌شود (۵۹). بر مبنای تأیید اثرگذاری صنایع بر الودگی خاک بر اساس نتایج این مقاله، به‌نظر می‌رسد که حداقل انتظار جامعه محلی از صنایع در راستای مسئولیت‌پذیری اجتماعی و زیست‌محیطی آنان شامل فیلتراسیون به روز، نصب دودکش‌های خروجی مؤثر و مناسب و دفع صحیح و بهداشتی نخاله‌های صنعتی و بازچرخانی و تصفیه صحیح فاضلاب ناشی از فرایند تولید باشد. هم‌چنین سرمایه‌گذاری آنان برای تاسیس و توسعه یک سیستم یکپارچه هوشمند به منظور رصد آلاینده‌های جوی و خاک و برقراری ارتباط آن با میزان و نحوه آبیاری به‌منظور صرفه‌جویی در میزان مصرف آب و جلوگیری از آلوده شدن گیاهان و آب‌های زیرزمینی می‌تواند بخشی از مسئولیت‌پذیری اجتماعی و زیست‌محیطی آنان در این‌باره باشد (۵۹).

نتیجه‌گیری کلی

در پژوهش فوق ثابت شد که فلزات سنگین قابلیت وارد شدن به خاک و حرکت در پروفیل خاک داشته به‌نحوی‌که غلظت عناصر کادمیم، سرب، ارسنیک، نیکل و سلنیم با افزایش عمق افزایش یافت و در منطقه شحنه به عنوان منطقه آلوده و مجاور شهرک صنعتی یزد به بیش‌ترین مقدار خود نسبت به منطقه نیمه‌آلوده خضرآباد و پاک هامانه رسید. آلودگی به کادمیم، سرب و سلنیم در هر سه خاک و در هر سه عمق مشاهده گردید که این نتایج می‌تواند زنگ خطری مبنی بر احتمال رسیدن این آلودگی‌ها به آب‌های زیرزمینی و قنوات نیز باشد و در درازمدت باعث انباشت آلودگی و تخریب خاک گردد. هم‌چنین به دنبال آلودگی خاک، جذب این مواد از ریشه گیاهان هم افزایش و باعث ایجاد سمیت در گیاه و به‌دنبال آن ورود به زنجیره غذایی هم داشته باشد که نیازمند جلوگیری از این فرایند است که البته با محدودیت‌هایی مانند نامشخص بودن دقیق منبع

آلودگی و جهت حرکت آن‌ها و سختی‌های اندازه‌گیری عناصر سنگین نیز مواجه هستیم. نتایج این مقاله بیان‌کننده و پیشنهاددهنده اهمیت لزوم تاسیس و توسعه یک سیستم یکپارچه هوشمند به عنوان مثال در بستر اینترنت اشیاء به منظور رصد آلاینده‌های جوی و خاک و برقراری ارتباط آن با میزان و نحوه آبیاری به‌منظور صرفه‌جویی در میزان مصرف آب و جلوگیری از آلوده شدن گیاهان و آب‌های زیرزمینی بوده که قطعاً نیازمند اراده قوی و زیرساخت‌های مناسب از سوی متولیان امر است. ضمن این‌که لازم است پژوهش‌های دیگری انجام گیرد تا بین منشأ زمین‌زاد و بشرزاد فلزات سنگین اندازه‌گیری‌شده این طرح تفکیک صورت گیرد. از این جهت که این موضوع در مواقعی که تصمیم‌گیری روی پاکسازی خاک یا آگاهی از محدودیت‌های خاک آلوده مورد نیاز است، اهمیت ویژه‌ای در ارزیابی خطر این فلزات دارد.

منابع

1. Wilson, T., & Temple, N. (2001). Nutritional health: strategies for disease prevention. *Human Press;* p. 16-93.
2. World Health Organization. (2003). Reducing risks, promoting health life: The world health report. Geneva: p. 162-163.
3. Zhao, Y., Wang, Z., Sun, W., Huang, B., Shi, X., & Ji, J. (2010). Spatial interrelations and multi-scale sources of soil heavy metal variability in a typical urban–rural transition area in Yangtze River Delta region of China. *Geoderma*, 156 (3), 216-27.
4. Artiningsih, A., Zubair, H., Imran, A., & Widodo, S. (2019). Contamination and characteristic of Ni and Cr metal on top soil from Antang landfill, Makassar City, South Sulawesi Province, Indonesia. IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*, 175 (1), 012-021.
5. Ravankhah, N., & Mirzaei, R. S. M. (2015). Evaluation of Geoaccumulation Index, Contamination Factor, and Principal Component Analysis for Estimating Soil Contamination. *Iranian Journal of Health & Environment*, 8 (3), 345-56. [In Persian]
6. Karabi, S. M., Shahcheraghi, S. M., & Nazari Jaghargh, A. (2013). The importance and necessity of soil pollution management (with emphasis on agricultural pollution). The first national conference on conservation planning, environmental protection and sustainable development. Shahid Mofateh College, Hamadan. [In Persian]
7. Polemio, M. N. (1982). Soil contamination by metals. A survey in industrial and rural areas of Sonthem Italy. *The Science of Total Environment*, 25, 71-79.
8. Hosseinzade, F., Moomeni, A. A., & Bagheri, R. (2018). Assessment of heavy metals pollution in soils around Behshahr landfill. *Applied Geology*, 12 (24), 77-88. [In Persian]
9. Saheed, I., Azeez, S., Jimoh, A., Obaro, V., & Adepoju, S. (2020). Assessment of Some Heavy Metals Concentration in Soil and Groundwater Around Refuse Dumpsite in Ibadan Metopolis Nigeria. *Nigerian Journal of Technology*, 39 (1), 301-305.
10. Yang, X., Zhou, M., Cang, L., Ji, Q., & Xie, J. (2020) Enhanced Electrokinetic Remediation of Heavy-Metals Contaminated Soil in presence tetrasodium N, N-bis (carboxymethyl) glutamic acid (GLDA) as chelator. *International Journal of Electrochem Science*, 15, 696-709.
11. Boateng, T. K., Opoku, F., & Akoto, O. (2019) Heavy metal contamination assessment of groundwater quality: A case study of Oti landfill site, Kumasi. *Applied Water Science*, 9 (2), 33-45.

12.Alam, R., Ahmed, Z., & Howladar, M. F. (2020). Evaluation of heavy metal contamination in water, soil and plant around the open landfill site Mogla Bazar in Sylhet, Bangladesh. *Groundwater for Sustainable Development*, 10, Article100311.
13.Rezaei, A., Hassani, H., Mousavi, S. B. F., Hassani, S., & Jabbari, N. (2019) Assessment of Heavy Metals Contamination in Surface Soils in Meiduk Copper Mine Area, Selenium Iran. *Earth Sciences Malaysia (ESMY)*, 3(2), 01-8. [In Persian]
14.Nezhad, M. T. K., Tabatabaii, S. M., & Gholami, A. (2015). Geochemical assessment of steel smelter-impacted urban soils, Ahvaz, Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 152, 91-109. [In Persian]
15.Zaheri, N., Khosravi, Y., Mokhtari, M. A. A. & Zamani, A. (2019). Distribution pattern of the heavy metals in stream sediments of the Baycheh-Bagh area, northwest of Zanjan. *Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches*, 35 (2), 135-50. [In Persian]
16.Talaei, E. (2007). Study of role of north Meshkinshahr regions on soil pollution to arsenic. 10th congress of Iranian soil science, Tehran University. [In Persian]
17.Lacatusu, R. (1996). "Soil-plant-man relationship in heavy metal polluted areas in Romania", *Application Geochemistry*, 11, 105-107.
18.Magalhaes, V. F. (2007). "As concentration and distribution in Engenho Inlet, Sepetiba Bay, Brazil", *Water, Air and Soil pollution*, 18, 83-91.
19.Tao., C., Xingmei, L., Muzhi, Z., Keli, Z. J. W. J. X., & Panming, H., (2008). "Identification of trace element sources and associated risk assessment in vegetable soils of the urban-rural transitional area of Hangzhou, China", *Environmental Pollution*, 151, 67-78.
20.Hans-Rudolf, P., Anne Häussermann, L., & Werner, H. (2007). "Distribution and behavior of arsenic in soils and waters in the vicinity of the former gold-arsenic mine of Salanfe, Western Switzerland", *Journal of Geochemical Exploration*, 93, 121-134.
21.Xiang, M., Li, Y., Yang, J., Lei, K., Li, Y., Li, F., Zheng, D., Fang, X., & Cao, Y. (2021). Heavy metal contamination risk assessment and correlation analysis of heavy metal contents in soil and crops. *Environmental Pollution*, 278, Article 116911.
22.Irshad, M. K., Ibrahim, M., Noman, A., Shang, J., Mahmood, A., Mubashir, M., Khoom, K. S., Ng, H. S., & Show, P. L. (2022). Elucidating the impact of goethite-modified biochar on arsenic mobility, bioaccumulation in paddy rice (Oryza sativa L.) along with soil enzyme activities. *Process Safety and Environmental Protection*, 160, 958-967.
23.Kabata-Pendias, A. (2000). Trace Element in Soils and Plants, Third edition, CRC Press, 413.
24.Müller, G. (1969). Index of geo accumulation in the sediments of the Rhine River. *Geo Journal*, 2, 108-118. **doi.10.4236/ampc.2011.12005.**
25.Ghasera, K. M., & Rashid, S. A. (2024). Assessment of Heavy Metal Contamination and Ecological Risk in Soils Developed on Different Rock Types in Southern Bundelkhand Region, Central India. Soil and Sediment Contamination: *An International Journal*, 1-17. **doi.org/10.1080/ 15320383.2024. 2305414.**
26.Kuang, Y., Chen, X., & Zhu, C. (2024). Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution and Health Risks in Chenzhou City. Processes, 12 (3), p. 623. **doi.org/10.3390/pr12030623.**
27.Yildiz, U., & Ozkul, C. (2024). Heavy metals contamination and ecological risks in agricultural soils of Uşak, western Türkiye: a geostatistical and multivariate analysis. *Environmental Geochemistry and Health*, 46 (2), p. 58. **doi.org/10.1007/s10653-024-01856-0.**
28.Zou, H., Li, W. Q., Ren, B. Z., Xie, Q., Cai, Z. Q., Chen, L. Y., & Wang, J. (2024). Heavy metal pollution and

ecological risk assessment: A study on Linli County soils based on self-organizing map and positive factorization approaches. *Journal of Central South University*, 1-12. **doi.org/10.1007/s11771-024-5624-5.**

29. European Union. (2002). Heavy Metals in Wastes, European Commission on Environment.http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/heavy metal sreport. Pdf> (accessed 12.06.12).
30. Deputy for Human Environment. Water and Soil Office. Soil resource pollution standards and its guidelines. 166 p. [In Persian]
31. Fotovat, A. (2013). Heavy metal in soil (Alloway B. J). Ferdowsi University Press. 704 p. [In Persian]
32. Solgi, A., Shahverdi Nik, M., & Ramezani, M. (2020). The effect of irrigation with untreated urban wastewater on the accumulation of heavy metals in surface and subsurface soils. *Environmental Science and Technology*, 22 (3), 317-333 [In Persian]
33. Dragović, R., Gajić, B., Dragović, S., Đorđević, M., Đorđević, M., Mihailović, N., & Onjia, A. (2014). Assessment of the impact of geographical factors on the spatial distribution of heavy metals in soils around the steel production facility in Smederevo (Serbia). *Journal of cleaner production*, 84, 550-562.
34. Yang, X., Li, Q., Tang, Z., Zhang, W., Yu, G., Shen, Q., & Zhao, F. J. (2017). Heavy metal concentrations and arsenic speciation in animal manure composts in China. *Waste Management*, 64, 333-339. **doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.015.**
35. Marrugo-Negrete, J., Pinedo-Hernández, J., & Díez, S. (2017). Assessment of heavy metal pollution, spatial distribution and origin in agricultural soils along the Sinú River Basin, Colombia. *Environmental Research*, 154, 380-388. **doi.org/10.1016/j.envres.2017.01.021.**
36. Goodarzi, F., Sanei, H., Labonte, L., & Duncan, W. F. (2002). Sources of lead and zinc associated with metal smelting activities in the Trail area, British Columbia, Canada. *Journal of Environmental Monitoring*. 4, 400-407. [In Persian]
37. Rieuwerts, J. S., Thornton, I., Farago, M. E., & Ashmore, M. R. (1998). Factors influencing metal bioavailability in soils: preliminary investigations for the development of a critical loads approach for metals. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 10 (2), 61-75 (15).
38. Tabari, M., & Salehi, A. (2011). Studying the effect of irrigation using urban wastewater on the accumulation of heavy metals in soil. *Environmental Science and Technology* 13(4):49-59. [In Persian]
39. Naderi Khorasgani, M., Azar Beig, T., & Mohamadi, J. (2023). Factors affecting the zoning of soil contamination by heavy metals in the Sirjan Plain - Kerman Province. *Journal of Soil and Water Sciences*, 27 (3), 165-177.
40. Rodrigues, J. A., Nanos, N., Grav, J. M., & Gil, L. (2008). Multiscale analysis of heavy metal content in Spanish agricultural topsoils. *Chemosphere*, 70, 1085-1096.
41. Ding, Q., Cheng, G., Wang, Y., & Zhuang, D. (2017). Effects of natural factors on spatial distribution of heavy metals in soils surrounding mining regions. *Science of the Total Environment*, 578, 577-585.
42. Vali Nejad, F., Arbabi, A., & Borna, R. (2023). Investigation of heavy metal concentrations and soil pollution indices in the western region of Tehran. *Iranian Natural Ecosystems Quarterly Journal* 14 (52), 39-53. [In Persian]
43. Yan, C., Zhuang, T., Bai, J., Wen, X., Lu, Q., & Zhang, L. (2020). Assessment of As, Cd, Zn, Cu and Pb pollution and toxicity in river wetland sediments and artificial wetland soils affected by urbanization in a Chinese delta. *Wetlands*, 40, 2799-2809.
44. Nekoeinia, M., Mohajer, R., Salehi, M. H., & Moradlou, O. (2016). Multivariate statistical approach to identify metal contamination sources in agricultural

soils around Pb-Zn mining area, Isfahan province, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 75 (9), 1-10. **doi.org/10.1007/s12665-016-5597-2.**

45. Rastmanesh, F., Safaie, S., Zarasvandi, A. R., & Edraki, M. (2018). Heavy metal enrichment and ecological risk assessment of surface sediments in Khorramabad River, West Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190 (5), 1-9. **doi.org/10.1007/s10661-018-6650-2.**
46. Boudia, H., Vassalo, L., Hadjel, M., Prudent, P., & Boudenne, J. L. (2019). Spatial contamination and health risks of heavy metal (loid) s in surface soils from a petrochemical complex in the northeastern region of Algeria. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16 (8), 4707-4718. **doi.org/10.1007/ s13762-018-02195-1.**
47. Ghadimi, F., & Mirzaie, M. (2019). Study of contamination and depth profile of heavy metals in sediments around the Arak city landfill. *Iranian Quaternary Quarterly*. 5 (4), 541-579. [In Persian]
48. Kabata-Pendias, A. A., & Pendias, H. (2006). Trace elements in soils and plants. 4nd ed., CRC Press, Boca Raton, Florida.
49. Karimi, B., Abdi, Ch., Fathi Tilko, Z., & Goililen, H. (2016). The effect of using treated urban wastewater on the amount and pattern of accumulation of some heavy metals in the soil profile under corn and tomato cultivation. *Journal of Water Research in Agriculture B*, 30 (1), 89-101. [In Persian]
50. Wu, J., Song, J., Li, W., & Zheng, M. (2016). The accumulation of heavy metals in agricultural land and the associated potential ecological risks in Shenzhen, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 23 (2), 1428-1440. **doi.org/10.1007/s11356-015-5303-z.**
51. Naimi Marandi, S., Ayoubi, S., & Khademi, H. (2013). Vertical and Horizontal Variability of Lead and Nicel in Zobahan Industrial District, Isfahan. *Journal of Water and Soil*, 27 (2), 394-405. [In Persian]
52. Zhu, Y., Xu, F., Liu, Q., Chen, M., Liu, X., Wang, Y., Sun, Y., & Zhang, L. (2019). Nanomaterials and plants: Positive effects, toxicity and the remediation of metal and metalloid pollution in soil. *Science of the Total Environment*, 662, 414-421.
53. Bhati, M., & Singh, G. (2003). Growth and mineral accumulation in Eucalyptus camaldulensis seedlings irrigated with mixed industrial effluents. *Bioresource Technology*, 88 (3), 221-228.
54. Aghabarati, A., Hosseini, S. M., & Maralian, H. (2008). Heavy metal contamination of soil and olive trees (*Olea europaea* L.) in suburban areas of Tehran, Iran. *Research Journal of Environmental Science*, 2(5), 323-329.
55. Sillanppa, M., & Janson, H. (2007). Status of cadmium, lead, cobalt and selenium in soils and plant of thirty countries. FAO soils Bulletin 66, Romet, Italy.
56. Antoci, A., Galeotti, M., & Sordi, S. (2018). Environmental pollution as engine of industrialization. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 58, 262-273.
57. Ebenstein, A. (2012). The consequences of industrialization: evidence from water pollution and digestive cancers in China. *Review of Economics and Statistics*, 94(1), 186-201.
58. Adimalla, N. (2020). Heavy metals pollution assessment and its associated human health risk evaluation of urban soils from Indian cities: a review. *Environmental geochemistry and health*, 42(1), 173-190.
59. Faghih Khorasani, A. A. (2017). Theoretical Analysis of Cultural Contexts for Realizing Social Responsibility in Iran. Culture, Art and Communication Research Institute, Ministry of Culture and Islamic Guidance. 202 p.