

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و دوم، شماره دو، اردیبهشت ماه ۹۹

ارزیابی آلودگی خاک‌های اطراف کارخانه آلومینیوم‌سازی اراک به عناصر آلومینیوم، آهن، منگنز و سرب

هانیه صابری^۱

احمد گلچین^۲

پریسا علمداری^{۳*}

p_alamdari@znu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۰/۲۰

تاریخ دریافت: ۹۴/۳/۳۰

چکیده

زمینه و هدف: با صنعتی شدن شهرها و افزایش تعداد کارخانجات، آلودگی خاک رو به گسترش بوده و یکی از مشکلات زیست محیطی قرن حاضر به حساب می‌آید. با توجه به اهمیت شهر اراک از نظر فعالیت‌های صنعتی، هدف این پژوهش، بررسی شدت آلودگی خاک به عناصر فلزی در اطراف کارخانه آلومینیوم‌سازی این شهر می‌باشد.

روش بررسی: ده نمونه مرکب خاک از عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متری و در دو جهت شمال شرقی و شمال غربی تا شعاع ۵ کیلومتری از کارخانه برداشته شد. جهت اندازه‌گیری شدت آلودگی خاک به عناصر فلزی، غلظت‌های کل عناصر آلومینیوم، آهن، منگنز و سرب در نمونه‌های خاک پس از عصاره‌گیری با اسید توسط دستگاه ICP تعیین گردیدند. جهت برآورد شدت آلودگی از ضریب و درجه آلودگی، شاخص ژئوآنباشت و ضریب غنی‌شدگی استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که شدت آلودگی خاک به عناصر آلومینیوم، آهن، منگنز و سرب در جهت شمال غربی کارخانه بیش‌تر از جهت شمال شرقی بوده و مقدار این عناصر به ترتیب برابر با ۴۱۳۱۶/۵، ۲۳۲۸۲/۱، ۵۶۷/۱۳۸ و ۷۱/۰۳۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک اندازه‌گیری گردید.

بحث و نتیجه‌گیری: بر اساس شاخص ضریب آلودگی، شدت آلودگی خاک‌های منطقه در جهت شمال شرقی به عنصر آلومینیوم قابل توجه و به عناصر آهن، منگنز و سرب، در حد متوسط بود که نشان می‌دهد که فعالیت کارخانه آلومینیوم‌سازی اراک باعث آلودگی خاک منطقه به عناصر فلزی در حد متوسط شده است.

واژه‌های کلیدی: آلودگی عناصر سنگین، شاخص ژئوآنباشت، ضریب غنی‌شدگی.

۱ - دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه زنجان

۲ - استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه زنجان

۳ - استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه زنجان* (مسئول مکاتبات)

Evaluation of Soils Contamination around Aluminum Smelting Plant of Arak City by Aluminum, Iron, Manganese and Lead

Hanieh Saberi¹
Ahmad Golchin²
Parisa Alamdari^{3*}
P_alamdari@znu.ac.ir

Admission Date: January 10, 2016

Date Received: June 20, 2015

Abstract

Background and Objective: With increase in the number of factories and industrialized cities, soil contamination is becoming an environmental problem in recent century. Considering the industrial activities of Arak city, the aims of this study was to evaluate metal contamination status of soils around Aluminum smelting factory of this city.

Method: Ten composite samples were taken from the surface layers (0-15) of soils located in north-west and north-east directions of the factory with a distance interval of 1 km and up to a distance of 5 km from the factory. Total concentration of aluminum, iron, manganese and lead were extracted from the soil samples by acid and determined using ICP device. To determine the pollution intensity of the soils studied, contamination coefficient, degree of contamination, index of geo accumulation and enrichment factor were calculated for the soil samples.

Findings: The results showed that the pollution intensities of soils by aluminum, iron, manganese and lead were higher in North West direction compared to North East direction and the total concentration of these elements were 41316.5, 23282.1, 567.13 and 71.04 mg/kg soil respectively.

Discussion and Conclusion: According to the contamination coefficients calculated for the soil samples, the pollution intensity of the soils, in the north-west direction, was considerable for aluminum and moderate for iron, manganese and lead and indicated that industrial activities of the factory caused moderately soil pollution by metals.

Keywords: Aluminum Factory, Heavy Metals, Pollution Intensity.

1- M.Sc., Soil Science Departement, University of Zanzan,Iran

2- Proffessor, Soil Science Departement, University of Zanzan,Iran

3- Assistant Proffessor, Soil Science Departement, University of Zanzan,Iran*(Corresponding Authors)

مقدمه

ها در انسان و حیوانات باشد و تاثیر مضر بر روی ریشه گیاهان داشته باشد (۹). مگننز از جمله فلزاتی است که علی رغم ضروری بودن آن‌ها برای سلامتی انسان مقدار زیاد آن به عنوان آلاینده محیط زیست محسوب می‌شود. این فلز در ساختار بسیاری از آنزیم‌ها، پروتئین و هیدرات‌های کربن وجود داشته و در لخته شدن خون نقش دارد (۱۰). سرب عنصری است که تشابه خواص آن با کلسیم می‌تواند باعث آسیب رساندن به مغز استخوان، بافت های عصبی، مغز و کلیه‌ها شود (۱۱). مطالعات متعددی در کشورهای مختلف روی آلودگی خاک‌ها، گیاهان، آب‌ها و رسوبات به فلزات سنگین در اثر فعالیت‌های صنعتی و معدنی انجام شده است (۱۲ و ۱۳). مور و همکاران (۱۴) غلظت فلزات سنگین را در خاک اطراف یک کارخانه ذوب روی در جزیره قشم ایران اندازه‌گیری کردند، نتایج آن‌ها نشان داد که مناطق آلوده در مجاورت کارخانه ذوب روی قرار داشت و غلظت فلزات سنگین در خاک با افزایش فاصله از منابع آلاینده کاهش یافت. ایپیدا و همکاران (۱۵) نیز ترکیب عنصری خاک و گیاه را در مجاورت کارخانه ذوب آلومینیوم مورد بررسی قرار دادند، نتایج آن‌ها نشان داد که غلظت آلومینیوم و روی در عمق صفر تا ۵ سانتی متری بیش‌تر و غلظت کادمیوم، مگننز، آهن و کبالت در عمق ۱۵-۱۰ سانتی‌متری خاک بیش‌تر بود، در حالی که غلظت سرب تقریباً ثابت برآورد شد. ایگبو و همکاران (۱۶) آلودگی خاک به فلزات سنگین را در مناطق شهری جنوب نیجریه مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که غلظت فلزات سنگین در تمام مکان‌ها و اعماق مورد بررسی از ۰/۱ تا ۳۸۳/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم برای مگننز، ۴ تا ۱۱/۳ برای نیکل، ۱۷۴۶/۴ تا ۲۸۳۹/۶ برای آهن، ۰/۱ تا ۳/۷۰ برای کروم، ۳/۷ تا ۲۹/۵ برای مس، ۲۱/۹ تا ۹۷/۳ برای روی، ۰/۱ تا ۱/۶ برای کادمیوم و کم‌تر از ۰/۱ برای سرب متغیر بود که بخش قابل توجهی از آن‌ها توسط فعالیت‌های انسانی وارد خاک شده بودند. اتیم و انی‌آنوا (۱۷) آلودگی خاک سطحی به فلزات سنگین را در یک شهرک صنعتی واقع در جنوب غربی نیجریه بررسی کردند و نشان

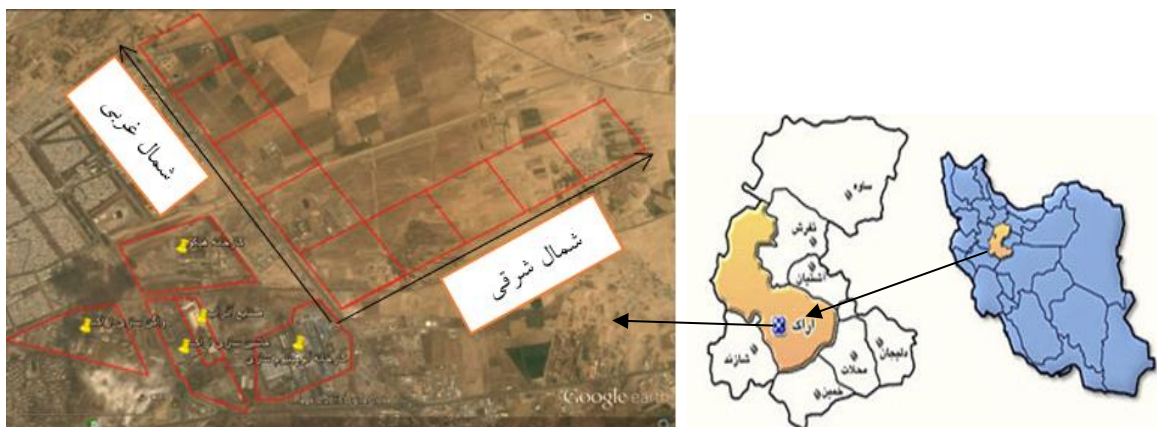
آلودگی خاک، آب و گیاه یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست محیطی در همه جوامع بشری است که حیات موجودات زنده به ویژه انسان را با خطر جدی مواجه ساخته است. پس از آب و هوا، خاک مهم‌ترین جزء محیط زیست برای انسان تلقی می‌شود (۱) که در تبادل مواد و انرژی با اتمسفر، هیدروسفر، بیوسفر و لیتوسفر نقش حیاتی ایفا می‌کند. وقتی آلاینده‌ها به خاک وارد می‌شوند می‌توانند به اکوسیستم‌های دیگر نیز وارد شده و سلامت آن‌ها و انسان را تحت تاثیر قرار دهند (۲). آلاینده‌ها باعث اختلال در وظایف اجزای محیط زیست می‌شوند و از میان آن‌ها فلزات سنگین خاک به دلیل غیر قابل تجزیه بودن و داشتن توانایی تجمع برای مدت طولانی از اهمیت زیادی برخوردارند (۳). این فلزات به طور بالقوه برای سلامت محیط زیست آلوده مضر هستند و می‌توانند در غلظت‌های کم روی سلامت انسان تاثیر گذار باشند (۴). فلزات سنگین به طور طبیعی در مقادیر مختلف در محیط زیست وجود دارند و مقدار آن‌ها در خاک تحت تاثیر عوامل مختلفی هم‌چون خصوصیات سنگ مادر، وجود منابع آلوده کننده، کاربرد کودهای آلی و شیمیایی و استفاده از پساب‌های صنعتی و شهری برای آبیاری قرار می‌گیرد (۵). رها سازی پسماندها و کنسانتره‌های معدنی غنی از فلزات سنگین در محیط زیست و فعالیت کارخانه‌های ذوب می‌توانند سیستم خاک را با مقادیر زیادی فلزات سمی آلوده کنند (۶). غلظت فلزات سنگین در خاک سطحی اطراف یک کارخانه ذوب فلز به اندازه منطقه آلوده، فاصله از کارخانه، مدت قرار گرفتن خاک در معرض فلزات سنگین و نیز به غلظت، میزان، نحوه توزیع و طول مدت انتشار گازها از دودکش، ارتفاع دودکش، ثبات اتمسفر، سرعت و جهت باد و پیکربندی عوارض زمین بستگی دارد (۷). ذوب آلومینیوم بدون مشکلات زیست محیطی نبوده و برخی از مطالعات به بررسی انتشار آلاینده‌های مختلف طی فرآیند ذوب آلومینیوم پرداخته و به طور کمی گونه‌های موجود در گازهای دودکش را تعیین کرده‌اند (۸). مطالعات سم‌شناسی محیط زیست در سال‌های اخیر نشان داده است که آلومینیوم می‌تواند عامل بسیاری از بیماری‌-

کارخانه بر آلودگی خاک به فلزات سنگین آلومینیوم، آهن، منگنز و سرب می‌باشد.

روش بررسی

موقعیت منطقه مورد مطالعه: شرکت آلومینیوم ایران (ایرالکو)، به عنوان اولین تولید کننده شمش‌های آلومینیومی و بزرگ‌ترین تولید کننده آلومینیوم کشور در زمینی به مساحت ۲۳۲ هکتار و در کیلومتر ۵ جاده اراک-تهران و به مختصات ۳۴ درجه و ۴ دقیقه شمالی و ۴۹ درجه و ۴۶ دقیقه شرقی واقع شده است (شکل ۱). شهر اراک دارای ویژگی‌های اقلیمی فلات مرکزی ایران است و دارای زمستان‌های سرد و مرطوب و تابستان‌های گرم و خشک می‌باشد که میزان بارندگی آن در سال‌های مختلف میان ۲۳۰ تا ۶۳۸ میلی‌متر متغیر است و به طور متوسط حدود ۳۴۱/۷ میلی‌متر برآورد شده است. جهت وزش باد غالب شهر اراک غرب به شرق (۲۴۰ درجه) می‌باشد.

دادند که دفع نامناسب زباله‌های صنعتی منبع احتمالی آلودگی فلزی در این شهرک می‌باشد. مسلم‌پور و همکاران (۱۸) آلودگی خاک به فلزات سنگین را در اطراف کارخانه سیمان خاش در جنوب شرقی ایران بررسی کردند و مشاهده نمودند که منطقه مورد مطالعه نسبت به هشتاد درصد فلزات سمی مورد مطالعه غیر آلوده بود و فقط نسبت به بیست درصد از فلزات سمی آلودگی متوسطی داشت. خاک‌های مورد مطالعه نسبت به عناصر آرسنیک، کبالت، مس، کروم، منگنز، مولیبدن، سرب و روی غیر آلوده نبود و نسبت به عناصر نیکل و کادمیوم آلودگی متوسطی داشت. اگرچه تاثیر فعالیت کارخانجات ذوب فلز بر آلودگی خاک و گیاه به فلزات سنگین در بسیاری از نقاط ایران مورد بررسی قرار گرفته است ولی در مورد تاثیر کارخانه آلومینیوم‌سازی اراک بر آلودگی خاک و گیاهان منطقه مطالعه جامعی در دست نیست و هدف این پژوهش بررسی اثر این



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

Figure 1. Location of study area

تکرار از عمق دو متری و به فواصل مختلف از کارخانه جمع آوری گردید و به‌عنوان نمونه مرجع مورد استفاده قرار گرفت. **تجزیه خاک:** نمونه‌های خاک جهت اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پس از هوا خشک شدن ابتدا کوبیده و سپس از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند و تا زمان تجزیه درون ظروف پلاستیکی نگهداری گردیدند. بافت خاک به روش هیدرومتری (۲۰)، pH خاک توسط دستگاه pH متر در گل اشباع، کربن آلی به روش اکسیداسیون تر (۲۱) و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع با دستگاه هدایت

نمونه‌برداری از خاک و اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی نمونه‌ها: در این پژوهش در مجموع ده نمونه مرکب خاک از عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متری تهیه شد (۱۹). نمونه‌برداری از مرکز کارخانه تا شعاع ۵ کیلومتری و در دو جهت شمال شرقی و شمال غربی و در شبکه‌های ۱km*1km صورت گرفت. در هر شبکه ۱۰ نمونه فرعی خاک جمع‌آوری و با هم مخلوط گردید تا یک نمونه مرکب حاصل گردد. برای بررسی شاخص‌های آلودگی خاک دو نمونه با سه

ضریب آلودگی پایین ($C_f^i < 1$)، ضریب آلودگی قابل توجه ($1 \leq C_f^i < 3$)، ضریب آلودگی بالا ($3 \leq C_f^i < 6$) و ضریب آلودگی خیلی بالا ($6 \leq C_f^i$) می باشد.

مجموع ضرایب آلودگی همه عناصر در یک محیط، درجه آلودگی محیط را نشان می دهد و به چهار کلاس تقسیم می شود که شامل درجه آلودگی کم ($C_{deg} < 8$)، درجه آلودگی متوسط ($8 \leq C_{deg} < 16$)، درجه آلودگی قابل توجه ($16 \leq C_{deg} < 32$) و درجه آلودگی خیلی بالا ($32 \leq C_{deg}$) می باشد (۲۵).

شاخص ژئوانباشت: این شاخص که برای ارزیابی درجه آلودگی محیط های زیست آبی و زمینی به فلز به کار می رود، از معادله (۲) محاسبه می شود (۲۶).

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

در این معادله I_{geo} شاخص ژئوانباشت، B_n غلظت زمینه و C_n غلظت کل فلز در نمونه خاک می باشد. ضریب 1.5 برای به حداقل رساندن تغییرات احتمالی غلظت فلز در زمین های است که ممکن است با تغییرات سنگ های پوسته زمین و مواد مادری خاک مرتبط باشد (۲۵).

این شاخص بر اساس افزایش مقدار عددی آن به هفت کلاس آلودگی شامل غیر آلوده (صفر I_{geo})، غیر آلوده تا آلودگی متوسط ($1 < I_{geo} < 2$)، آلودگی متوسط ($2 < I_{geo} < 3$)، آلودگی زیاد ($3 < I_{geo} < 4$)، آلودگی شدید ($4 < I_{geo} < 5$) و آلودگی بسیار شدید ($I_{geo} \geq 5$) تقسیم می شوند (۲۷).

عامل غنی شدگی (EF): این عامل یک راهکار برای برآورد شدت آلودگی از خاک به فلزات سنگین است که برای فلزاتی که غلظت آنها بالاتر از سطح غلظت زمینه است محاسبه می شود (۲۸). عامل غنی شدگی از نسبت غلظت فلز مورد مطالعه به غلظت آهن در نمونه مورد بررسی به نسبت غلظت فلز به غلظت آهن در نمونه مرجع (غلظت زمینه) به دست می آید.

تعیین گردید. برای اندازه گیری مقدار کل عناصر سنگین از روش هضم تر با اسید استفاده شد، در حدود ۱۰ میلی لیتر اسید نیتریک ۶۵ درصد به یک گرم خاک افزوده شد و در حرارت ۸۵ درجه سانتی گراد قرار گرفت. پس از خشک شدن نمونه خاک ۵ میلی لیتر دیگر اسید نیتریک به آن اضافه و حرارت داده شد تا مجدداً خشک شود. سپس ۱۰ میلی لیتر اسید کلریدریک ۳۷ درصد به نمونه اضافه و حرارت داده شد تا خشک شود. بعد از سرد شدن نمونه ۳۰ میلی لیتر اسید کلریدریک یک نرمال به آن اضافه و از کاغذ صافی واتمن ۴۲ عبور داده شد و حجم آن با آب مقطر به ۵۰ میلی لیتر رسانده شد و غلظت عناصر سنگین در آن توسط دستگاه ICP اندازه گیری گردید (۲۲). برای اندازه گیری مقدار قابل جذب عناصر سنگین ۲/۵ گرم خاک به یک لوله سانتریفوژ منتقل و سپس ۲۵ میلی لیتر محلول کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار به آن اضافه و برای مدت ۲ ساعت توسط هم زن برقی هم زده شد و سوسپانسیون به دست آمده در دور ۳۰۰۰ برای مدت ۱۵ دقیقه سانتریفوژ گردید و سپس غلظت فلزات سنگین در عصاره به دست آمده توسط دستگاه ICP اندازه گیری شد (۲۳).

برای بررسی شدت آلودگی از ضریب آلودگی C_f^i ، درجه آلودگی C_{deg} ، شاخص ژئوانباشت I_{geo} و ضریب غنی شدگی EF استفاده شد.

ضریب و درجه آلودگی: ضریب آلودگی برای بیان آلودگی خاک به یک عنصر و درجه آلودگی برای بیان آلودگی کل خاک بیان می شود. ضریب آلودگی از معادله (۱) محاسبه می شود که به شرح زیر است (۲۴):

$$C_f^i = \frac{C_n^i}{C_{0-1}^i} \quad (1)$$

در این فرمول C_f^i ضریب آلودگی، C_n^i و C_{0-1}^i به ترتیب غلظت فلز در نمونه مورد بررسی و نمونه مرجع (غلظت زمینه) می باشد. ضریب آلودگی به چهار کلاس تقسیم می شود که شامل

- 1 - Contamination coefficient
- 2 - Degree of contamination
- 3 - Index of Geo accumulation
- 4 - Enrichment factor

کربنات کلسیم بین ۱۵/۳۷ تا ۲۶/۸۸ درصد و میزان کربن آلی نمونه‌ها بین ۱/۰۸ تا ۱/۳۱ درصد متغیر بود. جدول (۲) غلظت کل عناصر فلزی در نمونه‌های خاک مرجع را بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم نشان می‌دهد. تاثیر جهت و فاصله نمونه‌برداری بر میانگین غلظت کل آلومینیوم خاک در سطح پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۳) و بیش‌ترین میزان آن در جهت شمال غربی مشاهده شد که نسبت به جهت شمال شرقی حدود یک درصد افزایش داشت (جدول ۴). همان‌طور که جدول تجزیه واریانس (۳) و جدول (۵) نشان می‌دهد تاثیر فاصله از کارخانه بر میانگین غلظت کل آهن خاک معنی‌دار نبود اما با افزایش فاصله از کارخانه مقدار آن کاهش یافت، کم‌ترین غلظت کل آهن در فاصله ۵ کیلومتری و بیش‌ترین غلظت آن در فاصله ۳ کیلومتری از کارخانه اندازه‌گیری گردید. تاثیر جهت نمونه‌برداری بر میانگین غلظت کل آهن در سطح ۵ درصد معنی‌دار و بیش‌ترین میزان آن در جهت شمال غربی مشاهده شد که نسبت به جهت شمال شرقی حدود ۱۲ درصد افزایش داشت. اثر متقابل جهت و فاصله بر غلظت کل آهن در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود و بر اساس نتایج تجزیه واریانس اثر ساده جهت و اثر متقابل جهت و فاصله نمونه‌برداری بر میانگین غلظت کل منگنز خاک معنی‌دار نبود ولی تاثیر فاصله نمونه‌برداری بر آن در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). پاینده و لندی (۳۱) نیز در بررسی میزان فلزهای سنگین خاک اطراف کارخانجات صنعتی فولاد و نورد اهواز گزارش نمودند که خاک تا شعاع ۱۰ کیلومتری تحت تاثیر غبار این کارخانجات قرار گرفته و مقدار فلزات سنگین خاک در فاصله یک کیلومتری از کارخانجات حداکثر بود.

عامل غنی‌شدگی برای فلزات سنگین در خاک‌ها از معادله (۳) محاسبه می‌شود (۲۹):

$$EF = \frac{(Me/Fe)_{sample}}{(Me/Fe)_{background}} \quad (3)$$

در این معادله EF عامل غنی‌شدگی، $(Me/Fe)_{sample}$ نسبت غلظت فلز به غلظت آهن در نمونه مورد بررسی و $(Me/Fe)_{background}$ نسبت غلظت فلز به غلظت آهن در نمونه مرجع یا غلظت زمینه خاک است.

عامل غنی‌شدگی EF می‌تواند به تمایز فلزاتی که از فعالیت‌های انسانی منشا گرفته‌اند و آن‌هایی که طی روند طبیعی ایجاد شده‌اند بپردازد. پنج کلاس آلودگی بر اساس عامل غنی‌شدگی وجود دارد که به شرح زیر است (۳۰):

غنی‌شدگی کم ($EF < 2$)، غنی‌شدگی متوسط ($2 < EF < 5$)، غنی‌شدگی زیاد ($5 < EF < 20$)، غنی‌شدگی خیلی زیاد ($20 < EF < 40$) و غنی‌شدگی بینهایت شدید ($EF > 40$)

تجزیه‌های آماری: این پژوهش به صورت یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی انجام شد و در آن تاثیر جهت نمونه‌برداری و فاصله از منبع آلودگی بر غلظت عناصر فلزی در خاک مورد بررسی قرار گرفت. تجزیه‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹،۱) انجام و جداول تجزیه واریانس تشکیل گردید و مقایسه میانگین تیمارها با آزمون دانکن صورت پذیرفت.

یافته‌ها

نتایج حاصل از تجزیه‌های فیزیکی شیمیایی نمونه‌های خاک (جدول ۱) نشان دادند که بافت خاک مناطق نمونه‌برداری عمدتاً لوم رسی، pH آنها بین ۷/۶۵ تا ۷/۹، EC نمونه‌ها بین ۳۵۳/۲۵ تا ۱۰۹۰/۷۵ میکرو زیمنس بر سانتی‌متر، میزان

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی نمونه‌های خاک

Table 1. Some physicochemical properties of soil samples

فاصله از کارخانه (کیلومتر)					جهت نمونه
۵	۴	۳	۲	۱	برداری
pH					

۷/۸۵	۷/۷۰	۷/۸۷	۷/۸۸	۷/۶۵	شمال غربی
۷/۹	۷/۸۸	۷/۸۰	۷/۷۹	۷/۶۵	شمال شرقی
EC($\mu\text{S}/\text{cm}$)					
۷۷۶/۸۷۵	۷۱۱/۲۵	۶۰۱/۱۲۵	۸۱۷/۲۵	۹۱۱/۲۵	شمال غربی
۳۵۳/۲۵	۱۰۹۰/۷۵	۶۳۴/۲۵	۸۰۸/۲۵	۹۱۱/۲۵	شمال شرقی
% CaCO ₃					
۲۰/۴۳	۱۶/۱۸	۱۶/۳۷	۱۵/۳۷	۱۸/۷۷	شمال غربی
۲۶/۸۸	۲۳/۴۳	۲۰/۲۸	۱۷/۲۲	۱۸/۷۷	شمال شرقی
%CO					
۱/۱۹	۱/۳۱	۱/۱۸	۱/۰۹	۱/۰۸	شمال غربی
۱/۲۳	۱/۲۲	۱/۱۷	۱/۲۳	۱/۰۸	شمال شرقی
بافت					
Clay Loam	Clay Loam	Clay Loam	Loam	Loam	شمال غربی
Clay Loam	Clay Loam	Clay Loam	Clay Loam	Loam	شمال شرقی

جدول ۲- غلظت کل عناصر فلزی در نمونه های خاک مرجع (میلی گرم بر کیلوگرم)

Table 2. Total concentration of heavy metals in reference soil samples (mg/kg)

میانگین	تکرار			جهت
	۳	۲	۱	
		آلومینیوم		
۱۳۱۰۴/۵	۱۳۱۰۴/۵	۱۳۱۰۸/۴	۱۳۱۰۰/۶	شمال غربی
۱۲۴۹۱/۵	۱۲۴۹۱/۵	۱۲۳۷۳/۷۵	۱۲۶۰۹/۲۵	شمال شرقی
		آهن		
۸۸۱۶	۸۸۱۶	۸۷۷۷	۸۸۵۵	شمال غربی
۶۹۱۱/۵	۶۹۱۱/۵	۶۸۱۷/۲۵	۷۰۰۵/۷۵	شمال شرقی
		منگنز		
۳۰۶	۳۰۶	۳۱۰	۳۰۲	شمال غربی
۲۵۱/۵	۲۵۱/۵	۲۵۷/۷۵	۲۴۵/۲۵	شمال شرقی
		سرب		
۲۹	۲۹	۲۷	۳۱	شمال غربی
۲۹	۲۹	۲۵/۵	۳۲/۵	شمال شرقی

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر جهت و فاصله نمونه برداری بر غلظت عناصر فلزی در خاک

Table 3. Variance analysis of direction and distance of sampling effect on metal concentration in soil

میانگین مربعات غلظت عناصر فلزی در خاک (میلی گرم بر کیلوگرم)				درجات آزادی	منابع تغییرات
سرب	منگنز	آهن	آلومینیوم		
۱۱۰۹/۴۴۸۰۰۴۷**	۲۱۷/۶۸۸۶۷۲ ^{NS}	۴۶۲۶۵۲۸۳/۱۹*	۴۲۳۲۹۶۱/۳*	۱	جهت
۶۲/۳۶۰۱۵۶**	۲۳۷۶/۴۵۲۳۴۴**	۸۱۰۲۰۶۳/۲۳ ^{NS}	۲۲۹۷۹۰۴۲۰/۵**	۴	فاصله
۱۷۹/۱۱۹۹۲۲**	۷۳/۵۸۳۲۰۳ ^{NS}	۱۲۴۶۸۵۱۴/۴*	۶۲۹۵۳۷۴**	۴	جهت*فاصله
۳/۲۶۰۵۴۷	۱۶۵/۴۳۸۶۷	۴۱۴۷۰۴۵/۲	۸۸۱۸۳۷/۷	۲۰	خطا

***، * و NS به ترتیب نشان دهنده معنی دار بودن اثر در سطح یک درصد و پنج درصد و عدم معنی داری می باشند.

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر فاصله و جهت نمونه برداری بر غلظت کل آلومینیوم خاک (میلی گرم بر کیلوگرم)

Table 4. Mean comparisons of distance and direction of sampling effect on total concentration of aluminum (mg/kg)

میانگین	فاصله (کیلومتر)					جهت
	۵	۴	۳	۲	۱	
۴۱۳۱۶/۵ A	۴۱۳۱۶/۵ ^f	۳۹۵۰۷/۵ ^d	۴۲۱۳۰/۹ ^c	۴۴۳۲۹/۴ ^b	۴۸۴۲۳/۳ ^a	شمال غربی
۴۰۵۶۵/۲ B	۳۲۹۲۶/۹ ^b	۳۵۳۴۴ ^e	۴۱۰۵۰/۳ ^{c d}	۴۵۰۸۱/۵ ^b	۴۸۴۲۳/۳ ^a	شمال شرقی
	۳۲۵۵۹ E	۳۷۴۲۵/۸ D	۴۱۵۹۰/۶ C	۴۴۷۰۵/۵ B	۴۸۴۲۳/۳ A	میانگین

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر فاصله و جهت نمونه برداری بر غلظت کل آهن خاک (میلی گرم بر کیلوگرم)

Table 5. Mean comparisons of distance and direction of sampling effect on total concentration of iron (mg/kg)

میانگین	فاصله (کیلومتر)					جهت
	۵	۴	۳	۲	۱	
۲۳۲۸۲/۱ A	۲۳۰۳۸ ^b	۲۳۶۲۹ ^{ab}	۲۶۷۰۵ ^a	۲۰۷۱۱ ^{bc}	۲۲۳۲۸ ^b	شمال غربی
۲۰۷۹۸/۴ B	۱۸۸۰۸ ^c	۱۹۹۹۷ ^{bc}	۲۱۰۶۴ ^{bc}	۲۱۷۹۷ ^{bc}	۲۲۳۲۸ ^{cb}	شمال شرقی
	۲۰۹۲۳ B	۲۱۸۱۳ AB	۲۳۸۸۴ A	۲۱۲۵۴ AB	۲۲۳۲۸ AB	میانگین

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر فاصله و جهت نمونه برداری بر غلظت کل منگنز خاک (میلی گرم بر کیلوگرم)

Table 6. Mean comparisons of distance and direction of sampling effect on total concentration of manganese (mg/kg)

میانگین	فاصله (کیلومتر)					جهت
	۵	۴	۳	۲	۱	
۵۶۷/۱۳۸ A	۵۴۵/۸۸ ^{cd}	۵۴۹/۳۸ ^{cd}	۵۷۰/۱۳ ^{abc}	۵۷۷/۶۳ ^{ab}	۵۹۲/۶۹ ^a	شمال غربی
۵۶۱/۷۵۰ A	۵۳۷/۷۵ ^d	۵۵۲/۵۰ ^{cd}	۵۵۵/۶۳ ^{bcd}	۵۷۰/۱۹ ^{abc}	۵۹۲/۶۹ ^a	شمال شرقی
	۵۴۱/۸۱۳ D	۵۵۰/۹۳۸ CD	۵۶۲/۸۷۵ BC	۵۷۳/۹۰۶ B	۵۹۲/۶۸۸ A	میانگین

جدول ۷- مقایسه میانگین اثر فاصله و جهت نمونه برداری بر غلظت کل سرب خاک (میلی گرم بر کیلوگرم)

Table 6. Mean comparisons of of distance and direction of sampling effect on total concentration of lead (mg/kg)

میانگین	جهت					جهت
	۵	۴	۳	۲	۱	
۷۱/۰۳۷۵ A	۷۰/۸۷۵ ^c	۷۵ ^b	۸۲/۲۵۰ ^b	۶۱/۶۲۵ ^e	۶۵/۴۳۸ ^d	شمال غربی
۵۸ /۸۷۵۰ B	۵۷/۷۵۰ ^{ef}	۵۵/۶۲۵ ^g	۵۶/۵۰۰ ^{gf}	۵۹/۰۶۳ ^{ef}	۶۵/۴۳۸ ^d	شمال شرقی
	۶۴/۳۱۳ B	۶۵/۳۱۳ B	۶۹/۳۷۵ A	۶۰/۳۴۴ C	۶۵/۴۳۸ B	میانگین

جدول ۸- حداکثر غلظت مجاز عناصر و میانگین غلظت جهانی آن ها در خاک (میلی گرم بر کیلوگرم)

Table 8. The maximum allowable and average global concentration of elements (mg/kg)

فلز	حداکثر مقدار مجاز در خاک ها ^۱	میانگین جهانی ^۲	میانگین جهانی ^۳
آلومینیوم			۷۱۰۰۰
آهن	۵۰۰۰۰	۳۲۰۰۰	۳۸۰۰۰
منگنز	۲۰۰۰	۴۳۷	۶۰۰
سرب	۱۰۰	۲۹	۱۰

۱- ارایه شده توسط استاندارد WHO ۲- کاباتا و همکاران (۳۲) و اسپارکز (۳۳) ۳- ارایه شده توسط لیندزی (۳۴).

افزایش داشت (جدول ۷). گودرزی و همکاران (۳۴) نیز در بررسی آلودگی خاک به سرب و روی پیرامون کارخانه سرب و روی در کانادا گزارش کردند که با افزایش فاصله از کارخانه از تاثیر دودکش ها کاسته شد به طوری که دودکش ها در فاصله ۱/۸ کیلومتری بیشترین سهم را در آلودگی خاک داشتند که با افزایش فاصله تا حدود ۱۱ کیلومتری از تاثیر آلودگی دودکش ها کاسته شد. تاثیر جهت نمونه برداری بر میانگین شاخص ضریب آلودگی آلومینیوم در سطح احتمال ۵ درصد و

با توجه به نتایج حاصل از مقادیر کل عناصر فلزی در منطقه مورد مطالعه مقادیر منگنز، آهن و سرب در تمام نقاط مورد مطالعه کمتر از حداکثر مقدار مجاز آن ها در خاک طبق استاندارد WHO بوده ولی مقادیر منگنز و سرب در تمام نقاط از میانگین جهانی آن ها بیشتر بود (جدول ۸). اثر ساده و متقابل جهت و فاصله نمونه برداری بر غلظت کل سرب خاک معنی دار بوده و بیشترین غلظت کل سرب در جهت شمال غربی اندازه گیری شد که حدود ۲۰٪ نسبت به جهت شمال شرقی

تاثیر فاصله نمونه برداری بر میانگین این شاخص و اثر متقابل جهت و فاصله نمونه برداری بر شاخص ضریب آلودگی آلومینیوم در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۹). نتایج جدول تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تاثیر جهت بر میانگین شاخص ضریب آلودگی آهن در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار است (جدول ۹). میانگین شاخص ضریب آلودگی آهن در جهت شمال غربی بیش‌تر از جهت شرقی و به ترتیب برابر با ۲/۶۴۰۸۶ و ۲/۸۶۹۶۸ بود که برای هر دو جهت این شاخص در کلاس آلودگی قابل توجه قرار داشت (جدول ۱۰). اثر ساده و متقابل جهت و فاصله نمونه برداری بر شاخص ضریب آلودگی منگنز و تاثیر جهت بر میانگین شاخص ضریب آلودگی سرب در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۹) و مقدار میانگین شاخص ضریب آلودگی سرب در جهت شمال غربی حدود ۱۰ درصد نسبت به جهت شرقی بیش‌تر بود و برای هر دو جهت در کلاس آلودگی قابل توجه قرار داشت. اثر متقابل جهت و فاصله بر شاخص ضریب آلودگی سرب در سطح ۵ درصد معنی دار بود (جدول ۹) و با افزایش فاصله از کارخانه شاخص ضریب آلودگی سرب در جهت شمال شرقی تا شعاع ۴ کیلومتری دارای روند نزولی و در جهت شمال غربی حداکثر مقدار آن در شعاع ۳ کیلومتری گزارش شد که برابر با ۲/۶۷۴۱ بود و برای تمام نقاط در کلاس آلودگی قابل توجه طبقه بندی شد (جدول ۱۰). تاثیر فاصله بر میانگین شاخص درجه آلودگی عناصر فلزی و اثر متقابل جهت و فاصله بر درجه آلودگی عناصر فلزی در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۱۱). تاثیر جهت نمونه برداری بر میانگین شاخص ژئوآبناشت آلومینیوم در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار بوده (جدول ۱۳) و در جهت شمال شرقی برابر با ۱/۰۸۵۲۷ و در جهت شمال غربی برابر با ۱/۰۵۸۲۶ بود که برای هر دو جهت شاخص ژئوآبناشت آلومینیوم در کلاس آلودگی متوسط قرار گرفت (جدول ۱۴). تاثیر فاصله بر میانگین شاخص ژئوآبناشت آلومینیوم در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۱۳) و با افزایش فاصله نمونه برداری در هر دو جهت از مقدار آن کاسته شد. در جهت شمال غربی تا فاصله ۴ کیلومتری و در

جهت شمال شرقی تا فاصله ۳ کیلومتری در کلاس آلودگی متوسط و در بقیه نقاط در کلاس غیر آلوده تا آلودگی متوسط بود (جدول ۱۴). اثر جهت بر میانگین شاخص ژئوآبناشت آهن در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار بود و مقدار آن در جهت شمال شرقی بیش‌تر از جهت شمال غربی و به ترتیب برابر با ۰/۹۲۴۹۰ و ۰/۸۰۸۹۳ بود (جدول ۱۴). اثر ساده و متقابل جهت و فاصله نمونه برداری بر شاخص ژئوآبناشت منگنز در سطح یک درصد معنی دار بود (جدول ۱۳). مطابق با جدول (۱۴) تاثیر فاصله بر میانگین شاخص ژئوآبناشت منگنز دارای روند خاصی نبوده و بیش‌ترین مقدار این شاخص در فاصله ۲ کیلومتری دیده شده است که برابر با ۰/۴۶۳۵۶ بود و آلودگی تمام نقاط در کلاس غیر آلوده تا آلودگی متوسط قرار داشتند. تاثیر فاصله بر میانگین عامل غنی‌شدگی آلومینیوم در سطح یک درصد معنی دار بود (جدول ۱۵). با توجه به فرمول مربوط به عامل غنی‌شدگی، از آن‌جا که غنی‌شدگی هر عنصر نسبت به آهن سنجیده شده است پس عامل غنی‌شدگی را در مورد آهن نمی‌توان محاسبه نمود و در تمام جهات و فاصله‌ها مقدار عددی این عامل برابر یک می‌باشد (جدول ۱۶). نتایج جدول تجزیه واریانس ۱۵ نشان داد که تاثیر جهت بر میانگین عامل غنی‌شدگی منگنز در سطح ۵ درصد معنی دار و مقدار آن در جهت شمال شرقی بیش‌تر از جهت شمال غربی بود که به ترتیب برابر با ۰/۷۷۱۸۰ و ۰/۷۰۸۹۴ گزارش شد و در کلاس غنی‌شدگی کم قرار گرفت. اثر جهت بر میانگین عامل غنی‌شدگی سرب در سطح یک درصد معنی دار بود و مقدار آن در جهت شمال غربی بیش‌تر از جهت شرقی و به ترتیب برابر با ۰/۹۲۹۶۵ و ۰/۷۲۰۱۷ اندازه‌گیری شد که برای هر دو جهت کلاس عامل غنی‌شدگی سرب در کلاس غنی‌شدگی کم قرار داشت. اثر متقابل جهت و فاصله بر عامل غنی‌شدگی سرب در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار و در هر دو جهت دارای روند خاصی نبود. میانگین عامل غنی‌شدگی سرب در دو جهت و تمام فواصل در کلاس غنی‌شدگی کم قرار داشت (جدول ۱۵ و ۱۶).

جدول ۹- نتایج تجزیه واریانس اثر جهت و فاصله نمونه برداری بر ضریب آلودگی عناصر فلزی در خاک

Table 9. Variance analysis of direction and distance of sampling effect on metals contamination coefficient in soil

میانگین مربعات شاخص ضریب آلودگی عناصر فلزی خاک				درجات آزادی	منابع تغییرات
سرب	منگنز	آهن	آلومینیوم		
۰/۹۸۷۶۴۸۵۲ **	۰/۳۴۷۹۱۳۴۰ **	۰/۳۹۲۵۵۶۴۱ *	۰/۰۲۵۵۰۲۱۵ *	۱	جهت
۰/۰۶۸۷۵۲۸۸ ns	۰/۰۱۲۷۱۹۲۹ **	۰/۲۰۷۷۲۲۹۲ ns	۱/۲۵۷۴۸۰۸۳ **	۴	فاصله
۰/۱۹۳۴۶۳۴۳ *	۰/۰۲۲۴۹۱۱۱۴ **	۰/۱۶۶۰۳۹۰۷ ns	۰/۰۳۹۶۷۸۲۹ **	۴	جهت*فاصله
۰/۰۵۰۶۶۲۷۰	۰/۰۰۲۰۷۸۱۳	۰/۰۷۴۲۰۱۴۳	۰/۰۰۵۳۲۲۳۳	۲۰	خطا

***, ** و * ns به ترتیب نشان دهنده معنی دار بودن اثر در سطح یک درصد و پنج درصد و عدم معنی داری می باشد.

جدول ۱۰- مقایسه میانگین اثر فاصله و جهت نمونه برداری بر ضریب آلودگی عناصر فلزی در خاک

Table 10. Mean comparisons of distance and direction of sampling effect on metals contamination coefficient in soil

میانگین	فاصله (کیلومتر)					جهت
	۵	۴	۳	۲	۱	
			آلومینیوم			
۳/۱۵۲۸۴ B	۲/۴۵۶۴۹ g	۳/۰۱۴۸۰ d	۳/۲۱۵۰۰ c	۳/۳۸۲۷۶ b	۳/۶۹۵۱۷ a	شمال غربی
۳/۲۱۱۱۶ A	۲/۶۳۵۹۴ f	۲/۸۲۹۴۴ e	۳/۲۸۶۲۵ bc	۳/۶۰۸۹۷ a	۳/۶۹۵۱۷ a	شمال شرقی
	۲/۵۴۶۲۲ E	۲/۹۲۲۱۲ D	۳/۲۵۰۶۳ C	۳/۴۹۵۸۷ B	۳/۶۹۵۱۷ A	میانگین
			آهن			
۲/۶۴۰۸۹ B	۲/۶۱۳۲ bc	۲/۶۸۰۳ abc	۳/۰۲۹۱ ab	۲/۳۴۹۳ c	۲/۵۳۲۶ bc	شمال غربی
۲/۸۶۹۶۸ A	۲/۷۲۱۲ abc	۲/۸۹۳۲ ab	۳/۰۴۷۶ ab	۳/۱۵۳۷ a	۲/۵۳۲۶ bc	شمال شرقی
	۲/۶۶۷۲ B	۲/۷۸۶۷ AB	۳/۰۳۸۴ A	۲/۷۵۱۵ AB	۲/۵۳۲۶ B	میانگین
			منگنز			
۱/۹۵۵۶۵ B	۱/۸۸۲۳۳ e	۱/۸۹۴۴۰ de	۱/۹۶۵۹۵ cd	۱/۹۹۱۸۱ c	۲/۰۴۳۷۵ c	شمال غربی
۲/۱۷۱۰۳ A	۲/۱۳۸۱۷ b	۲/۱۹۶۸۲ ab	۲/۲۰۹۲۴ ab	۲/۲۶۷۱۵ a	۲/۰۴۳۷۵ c	شمال شرقی
	۲/۰۱۰۲۵ C	۲/۰۴۵۶۱ BC	۲/۰۸۷۶۰ AB	۲/۱۲۹۴۸ A	۲/۰۴۳۷۵ BC	میانگین
			سرب			
۲/۳۰۹۵۹ A	۲/۳۰۴۳ abc	۲/۴۳۸۴ ab	۲/۶۷۴۱ a	۲/۰۰۳۶ bcd	۲/۱۲۷۵ bcd	شمال غربی
۱/۹۱۴۱۶ B	۱/۸۷۷۶ cd	۱/۸۰۸۵ d	۱/۸۳۶۹ d	۱/۹۲۰۳ cd	۲/۱۲۷۵ bcd	شمال شرقی
	۲/۰۹۰۹ A	۲/۱۲۳۵ A	۲/۲۵۵۵ A	۱/۹۶۱۹ A	۲/۱۲۷۵ A	میانگین

میانگین هایی که دارای حداقل یک حرف مشترک هستند از نظر آماری تفاوت معنی داری با هم ندارند.

جدول ۱۱- نتایج تجزیه واریانس اثر جهت و فاصله نمونه برداری بر درجه آلودگی عناصر فلزی در خاک

Table 11. Variance analysis of direction and distance of sampling effect on metals contamination coefficient in soil

منابع تغییرات	درجات آزادی	میانگین مربعات شاخص درجه آلودگی عناصر فلزی در خاک (میلی گرم بر کیلوگرم)
جهت	۱	۰/۰۵۱۷۶۲۷۳ ^{ns}
فاصله	۴	۱/۶۵۳۴۷۴۷۴ ^{**}
جهت*فاصله	۴	۰/۷۰۴۴۵۹۲۴ ^{**}
خطا	۲۰	۰/۰۶۴۴۲۸۵۹

***، * و ns به ترتیب نشان دهنده معنی دار بودن اثر در سطح یک درصد و پنج درصد و عدم معنی داری می باشند.

جدول ۱۲- مقایسه میانگین اثر فاصله و جهت نمونه برداری بر درجه آلودگی عناصر فلزی در خاک

Table 12. Mean comparisons of distance and direction effect of sampling on metals contamination degree in soil

میانگین	فاصله (کیلومتر)					جهت
	۵	۴	۳	۲	۱	
۱۰/۱۹۸۹۵ A	۹/۳۹۵۹ ^d	۱۰/۱۷۵۷ ^{bc}	۱۱/۰۴۶۳ ^a	۹/۸۴۸۹ ^{cd}	۱۰/۵۲۸۰ ^b	شمال غربی
۱۰/۲۸۲۰۳ A	۹/۴۸۶۷ ^d	۹/۸۳۷۶ ^{cd}	۱۰/۴۹۱۴ ^b	۱۱/۰۶۶۵ ^a	۱۰/۵۲۸۰ ^b	شمال شرقی
	۹/۴۴۱۳ C	۱۰/۰۰۶۶ B	۱۰/۷۶۸۸ A	۱۰/۴۵۷۷ A	۱۰/۵۲۸۰ A	میانگین

جدول ۱۳- نتایج تجزیه واریانس اثر جهت و فاصله نمونه برداری بر شاخص ژئوآبناشت عناصر فلزی در خاک

Table 13. Variance analysis of f direction and distance of sampling effect on metals geoaccumulation index in soil

میانگین مربعات شاخص ژئوآبناشت عناصر فلزی در خاک (میلی گرم بر کیلوگرم)				درجات آزادی	منابع تغییرات
سرب	منگنز	آهن	آلومینیوم		
۰/۲۸۴۹۴۶۹۱ ^{ns}	۰/۳۳۹۵۳۸۳۹ ^{**}	۰/۱۰۰۸۶۷۹۷ [*]	۰/۰۰۵۴۷۲۷۲ [*]	۱	جهت
۰/۰۱۴۲۵۱۶۳ ^{ns}	۰/۰۰۹۲۳۷۱۹ ^{**}	۰/۰۵۳۴۷۳۰۴ ^{ns}	۰/۲۷۶۳۶۶۰۷ ^{**}	۴	فاصله
۰/۰۴۱۵۸۵۸۰ ^{ns}	۰/۰۲۱۶۱۸۷۳ ^{**}	۰/۰۴۶۹۴۲۸۱ ^{ns}	۰/۰۰۹۲۵۶۱۹ ^{**}	۴	جهت*فاصله
۰/۰۷۳۶۲۰۳۵	۰/۰۰۱۱۰۳۵۸	۰/۰۱۸۸۶۷۵۵	۰/۰۰۱۱۱۶۸۷	۲۰	خطا

***، * و ns به ترتیب نشان دهنده معنی دار بودن اثر در سطح یک درصد و پنج درصد و عدم معنی داری می باشند.

جدول ۱۴- مقایسه میانگین اثر فاصله و جهت نمونه برداری بر شاخص ژئوآنباشت عناصر فلزی در خاک

Table 14. Mean comparisons of distance and direction of sampling effect on heavy metals geoaccumulation index in soil

میانگین	فاصله (کیلومتر)					جهت
	۵	۴	۳	۲	۱	
	آلومینیوم					
۱/۰۵۸۲۶ B	۰/۷۱۱۳۰ ^g	۱/۰۰۶۷۸ ^d	۱/۰۰۹۹۸ ^c	۱/۱۷۲۹۶ ^b	۱/۳۰۰۴۱ ^a	شمال غربی
۱/۰۸۵۲۷ A	۰/۸۱۲۷۴ ^f	۰/۹۱۵۵۱ ^e	۱/۱۳۱۳۵ ^{bc}	۱/۲۶۶۳۳ ^a	۱/۳۰۰۴۱ ^a	شمال شرقی
	۰/۷۶۲۰۲ E	۰/۹۶۱۱۵ D	۱/۱۱۵۵۹ C	۱/۲۱۹۶۴ B	۱/۳۰۰۴۱ A	میانگین
			آهن			
۰/۸۰۸۹۳ B	۰/۸۰۰۸ ^{bc}	۰/۸۳۳۹ ^{abc}	۱/۰۱۱۳ ^{ab}	۰/۶۴۶۳ ^c	۰/۷۵۲۴ ^{bc}	شمال غربی
۰/۹۲۴۹۰ A	۰/۸۵۳۵ ^{abc}	۰/۹۴۲۲ ^{ab}	۱/۰۰۸۳ ^{ab}	۱/۰۶۸۱ ^a	۰/۷۵۲۴ ^{bc}	شمال شرقی
	۰/۸۲۷۱۵ B	۰/۸۸۸۰۴ AB	۱/۰۰۹۸۱ A	۰/۸۵۷۱۶ AB	۰/۷۵۲۴ B	میانگین
			منگنز			
۰/۳۰۴۱۳ B	۰/۲۴۹۱۶ ^e	۰/۲۵۹۰۳ ^{de}	۰/۳۱۲۶۶ ^{cd}	۰/۳۳۱۲۰ ^c	۰/۳۶۸۶۱ ^c	شمال غربی
۰/۵۱۶۹۰ A	۰/۵۱۱۰۹ ^b	۰/۵۵۰۳۲ ^{ab}	۰/۵۵۸۵۹ ^{ab}	۰/۵۹۵۹۱ ^a	۰/۳۶۸۶۱ ^c	شمال شرقی
	۰/۳۸۰۱۳ C	۰/۴۰۴۶۷ BC	۰/۴۳۵۶۲ AB	۰/۴۶۳۵۶ A	۰/۳۶۸۶۱ C	میانگین
			سرب			
۰/۵۰۸۱۲ A	۰/۵۲۱۳ ^a	۰/۵۷۳۷ ^a	۰/۶۷۱۲ ^a	۰/۳۶۵۳ ^a	۰/۴۰۹۱ ^a	شمال غربی
۰/۳۱۳۲۰ A	۰/۲۸۸۹ ^a	۰/۲۶۱۳ ^a	۰/۲۸۷۷ ^a	۰/۳۱۹۱ ^a	۰/۴۰۹۱ ^a	شمال شرقی
	۰/۴۰۵۱ A	۰/۴۱۷۵ A	۰/۴۷۹۵ A	۰/۳۴۲۲ A	۰/۴۰۹۱ A	میانگین

جدول ۱۵- نتایج تجزیه واریانس اثر جهت و فاصله نمونه برداری بر فاکتور غنی شدگی عناصر فلزی در خاک

Table 15. Variance analysis of of direction and distance of sampling effect on metals enrichment factor in soil

میانگین مربعات فاکتور غنی شدگی عناصر فلزی در خاک (میلی گرم بر کیلوگرم)				درجات آزادی	منابع تغییرات
سرب	منگنز	آهن	آلومینیوم		
۰/۳۲۹۱۲۱۷۴ ^{**}	۰/۰۲۹۶۳۴۷۳ [*]	.	۰/۰۳۹۲۹۰۰۴ ^{ns}	۱	جهت
۰/۰۱۲۹۴۵۳۲ ^{ns}	۰/۰۰۷۴۳۷۲۴ ^{ns}	.	۰/۲۵۳۳۹۷۴۶ ^{**}	۴	فاصله
۰/۰۲۲۹۵۲۷۸ [*]	۰/۰۱۱۸۵۱۲۵ ^{ns}	.	۰/۰۳۱۰۱۶۲۱ ^{ns}	۴	جهت*فاصله
۰/۰۰۶۲۳۴۸۱	۰/۰۰۴۹۰۰۴۹	.	۰/۰۱۷۳۸۵۹۷	۲۰	خطا

ns و * ، ** به ترتیب نشان دهنده معنی دار بودن اثر در سطح یک درصد و پنج درصد و عدم معنی داری می باشند.

جدول ۱۶- مقایسه میانگین اثر فاصله و جهت نمونه برداری بر فاکتور غنی‌شدگی عناصر فلزی در خاک

Table 16. Mean comparisons of distance and direction of sampling effect on metals enrichment factor in soil

میانگین	فاصله (کیلومتر)					جهت
	۵	۴	۳	۲	۱	
			آلومینیوم			
۱/۲۰۹۶۱ A	۰/۹۴۰۰ ^b	۱/۱۳۲۱ ^b	۱/۰۶۵۶ ^b	۱/۴۴۲۹ ^a	۱/۴۶۷۵ ^a	شمال غربی
۱/۱۳۷۲۳ A	۰/۹۷۹۱ ^b	۰/۹۸۴۸ ^b	۱/۱۰۲۳ ^b	۱/۱۵۲۵ ^b	۱/۴۶۷۵ ^a	شمال شرقی
	۰/۹۵۹۵۱ C	۱/۰۵۸۴۳ C	۱/۰۸۳۹۱ C	۱/۲۹۷۷۳ B	۱/۴۶۷۵ A	میانگین
			آهن			
۱ A	۱ ^a	۱ ^a	۱ ^a	۱ ^a	۱ ^a	شمال غربی
۱ A	۱ ^a	۱ ^a	۱ ^a	۱ ^a	۱ ^a	شمال شرقی
	۱ A	۱ A	۱ A	۱ A	۱ A	میانگین
			منگنز			
۰/۷۰۸۹۴ B	۰/۶۸۲۵۳ ^{abc}	۰/۶۷۴۰۵ ^{bc}	۰/۶۱۶۸۵ ^c	۰/۸۰۳۸۷ ^{ab}	۰/۷۶۷۴۲ ^{ab}	شمال غربی
۰/۷۷۱۸۰ A	۰/۸۱۱۷۶ ^a	۰/۷۸۲۶۴ ^{ab}	۰/۷۵۴۹۴ ^{ab}	۰/۷۴۲۲۵ ^{abc}	۰/۷۶۷۴۲ ^{ab}	شمال شرقی
	۰/۷۴۷۱۵ A	۰/۷۲۸۳۵ A	۰/۶۸۵۹۰ A	۰/۷۷۳۰۶ A	۰/۷۶۷۴۲ A	میانگین
			سرب			
۰/۹۲۹۶۵ A	۰/۹۳۵۳۵ ^a	۰/۹۶۹۶۳ ^a	۰/۹۳۹۷۵ ^a	۰/۹۰۵۷۳ ^a	۰/۸۹۷۷۷ ^a	شمال غربی
۰/۷۲۰۱۷ B	۰/۷۳۶۳۱ ^b	۰/۶۶۷۸۳ ^b	۰/۶۴۹۸۸ ^b	۰/۶۴۹۰۴ ^b	۰/۸۹۷۷۷ ^a	شمال شرقی
	۰/۸۳۵۸۳ AB	۰/۸۱۸۷۳ AB	۰/۷۹۴۸۲ B	۰/۷۷۷۳۹ B	۰/۸۹۷۷۷ A	میانگین

بحث و نتیجه‌گیری

شمال غربی واقع شده است. لازم به ذکر است که کارخانجات دیگری هم‌چون ماشین سازی اراک که تولیدکننده تجهیزات پتروشیمی و پالایشگاهی، صنایع نفت و گاز، حمل و نقل، سیمان و معدن می‌باشد و صنایع آذراب که جزء پیشروهای ساخت نیروگاه‌های برق و تجهیزات پالایشگاهی به حساب می‌آید در محدوده بین کارخانه آلومینیوم‌سازی و کارخانه هپکو قرار دارند که در فواصل دورتر حدود ۲ کیلومتر از مسیر نمونه برداری واقع شده‌اند. در جهت شمال شرقی با افزایش فاصله از کارخانه غلظت کل آهن کاهش یافت که علت آن می‌تواند دور شدن از منابع آلاینده باشد. بیش‌ترین میانگین غلظت کل منگنز در فاصله یک کیلومتری و کم‌ترین میانگین غلظت آن در فاصله ۵ کیلومتری از کارخانه اندازه‌گیری گردید. با افزایش

نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش فاصله از کارخانه، میانگین غلظت کل آلومینیوم کاهش یافت، دلیل افزایش غلظت کل آلومینیوم در جهت شمال غربی می‌تواند مربوط به متفاوت بودن مواد مادری، فرآیند تشکیل خاک و فعالیت انسان‌ها باشد (۳۴). در جهت شمال غربی نزدیک بودن محل‌های نمونه برداری به کارخانجات ماشین‌سازی، صنایع آذراب و واگن سازی و هم‌چنین وجود باد غالب منطقه می‌تواند باعث آلودگی خاک به آلومینیوم شده باشد (۱۴). در جهت شمال غربی با افزایش فاصله از کارخانه تا شعاع ۳ کیلومتری غلظت کل آهن افزایش یافت که می‌تواند به دلیل وجود کارخانه هپکو می‌باشد که یک کارخانه مونتاژ کننده ماشین آلات راه‌سازی است. این کارخانه در فاصله‌ی یک کیلومتری از شبکه نمونه‌برداری در جهت

فاصله از کارخانه میانگین غلظت کل سرب از روند خاصی پیروی نکرد. میانگین شاخص ضریب آلودگی آلومینیوم در جهت شمال شرقی حدود ۱/۸۱ درصد نسبت به جهت شمال غربی افزایش داشت. با افزایش فاصله از کارخانه میانگین شاخص ضریب آلودگی آلومینیوم کاهش یافت و بیشترین مقدار آن در شعاع یک کیلومتری و کمترین آن در شعاع ۵ کیلومتری بود که میانگین شاخص ضریب آلودگی تا شعاع ۳ کیلومتری در کلاس آلودگی بالا و در فواصل ۴ و ۵ کیلومتری در کلاس آلودگی قابل توجه قرار داشت. در هر دو جهت با افزایش فاصله شاخص ضریب آلودگی کاهش نشان داد که در جهت شمال غربی تا شعاع ۴ کیلومتری و در جهت شمال شرقی تا شعاع ۳ کیلومتری در کلاس آلودگی بالا و در فاصله ۵ کیلومتری جهت شمال غربی و ۴ تا ۵ کیلومتری جهت شمال شرقی در کلاس آلودگی قابل توجه قرار داشت. میانگین شاخص ضریب آلودگی منگنز در جهت شمال شرقی حدود ۱۱ درصد بیش تر از جهت شمال غربی بود که برای هر دو جهت میانگین ضریب آلودگی منگنز در کلاس آلودگی قابل توجه قرار داشت. با افزایش فاصله از کارخانه میانگین شاخص ضریب آلودگی منگنز کاهش یافت و بیشترین مقدار آن در فاصله یک کیلومتری و کمترین مقدار آن در فاصله ۵ کیلومتری از کارخانه مشاهده شد و در کلاس آلودگی قابل توجه قرار گرفت. شاخص ضریب آلودگی منگنز برای هر دو جهت با افزایش فاصله کاهش پیدا کرد ولی در جهت شمال شرقی در فاصله ۲ کیلومتری از کارخانه بیش تر از فاصله یک کیلومتری آن بود و در تمام نقاط ضریب آلودگی در کلاس آلودگی قابل توجه قرار داشت. بیشترین مقدار درجه آلودگی در فاصله ۳ کیلومتری دیده شد که برابر با ۱۰/۷۶۸۸ بود و سپس مقدار آن تا فاصله ۵ کیلومتری کاهش یافت و برای تمام نقاط درجه آلودگی عناصر فلزی در کلاس آلودگی متوسط قرار داشت. با افزایش فاصله در هر دو جهت شاخص درجه آلودگی عناصر فلزی روند خاصی نداشت ولی در جهت شمال غربی بیشترین مقدار آن در فاصله ۳ کیلومتری و در جهت شمال شرقی در فاصله ۲ کیلومتری دیده شد و برای تمام نقاط درجه آلودگی عناصر فلزی در کلاس

آلودگی متوسط گزارش شد. بیشترین میانگین شاخص ژئوآبست برای آلومینیوم در فاصله یک کیلومتری دیده شد که نسبت به فاصله ۵ کیلومتری حدود ۷۰ درصد افزایش داشت. میانگین این شاخص برای آلومینیوم تا شعاع ۳ کیلومتری در کلاس آلودگی متوسط و در ۲ کیلومتر نهایی نمونه برداری در کلاس غیر آلوده تا آلودگی متوسط قرار داشت. جهت شمال شرقی بیشترین میانگین شاخص ژئوآبست منگنز را دارا بود که تفاوت معنی داری نسبت به جهت شمال غربی نشان داد و برای هر دو جهت شاخص ژئوآبست در کلاس غیر آلوده تا آلودگی متوسط بودند. در جهت شمال غربی با افزایش فاصله این شاخص روند نزولی داشت ولی در جهت شمال شرقی از روند خاصی پیروی نکرد. با افزایش فاصله میانگین فاکتور غنی شدگی آلومینیوم روند نزولی را نشان داد که مقدار آن در فاصله یک کیلومتری نسبت به فاصله ۵ کیلومتری حدود ۵۲ درصد افزایش داشت که در تمام نقاط عامل غنی شدگی آلومینیوم در کلاس غنی شدگی کم قرار داشتند. میانگین عامل غنی شدگی منگنز در شمال شرقی بیش تر از شمال غربی بود و در کلاس غنی شدگی کم قرار گرفت. میانگین عامل غنی شدگی سرب در جهت شمال غربی بیش تر از شمال شرقی اندازه گیری شد و برای هر دو جهت کلاس عامل غنی شدگی سرب در کلاس غنی شدگی کم قرار داشت. میانگین عامل غنی شدگی سرب در دو جهت و تمام فواصل در کلاس غنی شدگی کم قرار داشت (جدول ۱۵ و ۱۶). به طور کلی می توان بیان کرد که غلظت عناصر فلزی آلومینیوم، آهن، منگنز و سرب در خاک اطراف کارخانه آلومینیوم سازی اراک تا شعاع ۵ کیلومتری بالاتر از غلظت این عناصر در نمونه های مرجع بود. میانگین شاخص های ضریب آلودگی و ژئوآبست منگنز و سرب برای تمام نقاط به ترتیب در کلاس آلودگی قابل توجه و کلاس غیر آلوده تا آلودگی متوسط گزارش گردیدند. میانگین عامل غنی شدگی آلومینیوم، منگنز و سرب برای تمام نقاط در کلاس غنی شدگی کم قرار داشتند و با توجه به این که غنی شدگی هر عنصر نسبت به آهن سنجیده شده است پس این عامل را برای محاسبه غنی شدگی آهن نمی توان به کار برد. به نظر می رسد

7. Nikolić, Đ., Milošević, N., Živković, Ž., Mihajlović, I., Kovačević, R. and Petrović, N., 2011. Multi-criteria analysis of soil pollution by heavy metals in the vicinity of the Copper Smelting Plant in Bor (Serbia). *Journal of the Serbian Chemical Society*. Vol. 76 (4), pp. 625-641.
8. Wei, Y-L., 1996. Distribution study of priority pollutant PAHs from a laboratory aluminium-can chip smelting furnace. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 49, Pp. 267-80.
9. Nowak, P. and Brus, R., 1996. Doświadczalne i kliniczne aspekty neurotoksycznego działania glinu. *Podst. Hig. Med. Dośw.* Vol. 50, pp. 621-633.
10. Perk, M., 2006. *Soil and Water Contamination: From Molecular to Catchment Scale*. Taylor and Francis group plc, London, UK.
11. Faiz, Y., Tufail, M., Javed, M.T. and Chaudhry, M.M., 2009. Road dust pollution of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn along Islamabad Expressway, Pakistan. *Microchemical Journal*, Vol. 92(2), Pp. 186-192.
12. Oliva, S.R. and Espinosa, A.F., 2007. Monitoring of heavy metals in topsoils, atmospheric particles and plant leaves to identify possible contamination sources. *Microchemical Journal*, Vol. 86(1), pp. 131-139.
13. Abraham, G. M. S. and Parker, R. J., 2008. Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand. *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 136, pp. 227-238.

شاخص درجه آلودگی و ضریب آلودگی برای بررسی شدت آلودگی خاک اطراف کارخانه آلومینیوم سازی اراک بهتر است. پیشنهاد می شود در پژوهش های بعدی این ارزیابی در جهات دیگر کارخانه به خصوص برای عنصر فلزی آلومینیوم انجام شود.

Reference

1. Malakouti, M.J., 2005. Sustainable agriculture and increasing yield by optimizing fertilizer use in Iran. Tehran. Iran (In Persian).
2. Micó, C., Recatalá, L., Peris, M. and Sánchez, J., 2006. Assessing heavy metal sources in agricultural soils of a European Mediterranean area by multivariate analysis. *Chemosphere*, Vol. 65(5), pp. 863-872.
3. Wu, C. and Zhang, L., 2010. Heavy metal concentrations and their possible sources in paddy soils of a modern agricultural zone, southeastern China. *Environmental Earth Sciences*, Vol. 60 (1), pp. 45-56.
4. Kim, I.S., Choi, Y.S. and Jang, A., 1997. Remediation of polluted soil and sediment: perspectives and failures. In *Proceedings of First International Conference on Contaminated Restoration*, Ljubljana, Slovenia. pp. 83-90.
5. Yaron, B., Calvet, R. and Prost, R., 1996. *Soil pollution: processes and dynamics*. Springer Science and Business Media.
6. Wang, J., Zhang, C.B. and Jin, Z.X., 2009. The distribution and phytoavailability of heavy metal fraction in rhizosphere soils of paulownia fortune (seem) Hems near a Pb/Zn smelter in Guangdong, PR China. *Geoderma*. Vol. 148, pp. 299-306.

- Madison, Wisconsin, USA, and PP: 1189.
21. Walkley, A. and Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, Vol. 37 (1), pp. 29-38.
 22. Carter, M.R., 1993. *Soil sampling and method of analysis*. Canadian Society of Soil Science, Lewis Publishers.
 23. Houba, V.J.G., Lexmond, T.M., Novozamsky, I. and Vander Lee, J.J., 1996. State of the art and future developments in soil analysis for bioavailability assessment. *Science of the Total Environment*, 178 (1), pp. 21-28.
 24. Ergin, M., Saydam, C., Basturk, O., Erdem, E. and Yoruk, R., 1991. Heavy metal concentrations in surface sediments from the two coastal inlets (Golden Horn Estuary and Izmit Bay) of the northeastern Sea of Marmara. *Chem. Geo*, Vol. 91 (3), pp. 269-285.
 25. Hakanson, L., 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*, 14 (8), pp. 975-1001.
 26. Tijani, M.N. and Onodera, S., 2009. Hydro geochemical Assessment of metals contamination in an urban drainage system: A case study of Osogbo Township, SW-Nigeria". *J. Water Resource and Protection*, vol .3, pp 164-173.
 27. Mendiola, L. M. and Guadalupe, L., 2008. Environmental Assessment of an Active Tailings Pile in the State of Mexico.
 28. Huu, H.H., Rudy, S. and Damme, A.V., 2010. Distribution and contamination status of heavy metals
 14. Moore, F., Kargar, S. and Rastmanesh, F., 2013. Heavy metal concentration of soils affected by Zn-smelter activities in the Qeshm Island, Iran. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, Vol. 24(4), pp. 339-346.
 15. Ipeaiyeda, A.R., Umo, N.S. and Okojevo, G.E., 2012. Environmental Pollution Induced By an Aluminium Smelting Plant in Nigeria. *Glo. J. Sci. Front. Res. Chem.* 12:1.
 16. Iwegbue, C.M.A., Bassey, F.I., Tesi, G.O., Nwajei, G.E. and Tsafe, A.I., 2013. Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils around Cassava Processing Mills in Sub-Urban Areas of Delta State, Southern Nigeria. *Nigerian Journal of Basic and Applied Sciences*, Vol. 21(2), pp. 96-104.
 17. Etim, E.U. and Onianwa, P.C., 2013. Heavy Metal Pollution of Topsoil in the Vicinity of an Industrial Estate Co-Located with a Housing Estate in Southwestern Nigeria.
 18. Moslempoor, M.E., Shahdadi, S., & naemi, R. 2012. Evaluation of toxic metal contamination around Khash Cement Plant in southeastern Iran. The first national conference on environmental protection and planning, Hamedan, Shahid Mofteh University (In Perisian).
 19. Hseu, Z. Y., Chen, Z. S., Tsai, C. C., Tsui, C. C., Cheng, S. F., Liu, C. L., & Lin, H. T. 2002. Digestion methods for total heavy metals in sediments and soils. *Water, air, and soil pollution*, 141(1-4), 189-205.
 20. Klute, A., 1986. *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*, (2 nd Ed), Soil Science Society of American.,

- human. Department of Biological and Environmental Sciences Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p550.
33. Sparks, D.L., 2003. Environmental Soil Chemistry. Second Edition, Academic Press, p18.
34. Lindsay, W.L., 1979. Chemical equilibria in soils. John Wiley and Sons Ltd.
35. Goodarzi, F., Sanei, H. Labonte, L. and Duncan, W.F., 2003. Deposition of trace element in the trail region, British, Columbia. An Assessment of the environmental effect of a base metal smelter on land. Geological Survey of Canada Bulletin 573.
36. Solgi E., Esmaili-Sari, A., Riyahi-Bakhtiari, A. and Hadipour, M., 2012. Soil contamination of metals in the three industrial estates, Arak, Iran. Bulletin of environmental contamination and toxicology. Vol. 88(4), pp. 634-638.
- in estuarine sediments near Cau Ong harbor, Ha Long Bay, Vietnam. Geol. Belgica, Vol.13, pp. 37-47.
29. Sutherland, R.A. 2000. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. Environmental Geology, 39: 6. 611-627.
30. Rubio, B., Nombela, M.A. and Vilas, F., 2000. Geochemistry of major and trace elements in sediments of the Ria de Vigo (NW Spain) an assessment of metal pollution, Marine Pollution Bulletin, Vol. 40 (11), pp. 968-980.
31. Payande, Kh. and Landi, A. 2007. Investigating the amount and impact of heavy metals resulting from the production activities of Ahwaz steel and rolling mills on soil quality, crop health and presenting phytoremediation method as a solution to improve it, 10th Congress of Soil Sciences, Karaj (In Persian).
32. Kabata-Pendias, A. and Mukherjee, A.B., 2007. Trace element from soil to