

## Investigating the level of arsenic (As) and nickel (Ni) contamination caused by the emission of dust from bauxite crushers

Ali Mohammadian Behbahani<sup>\*1</sup>, Mohsen Hosseinalizadeh<sup>2</sup>,  
Khadijeh Khermandar<sup>3</sup>, Ahmadreza Kalamati<sup>4</sup>, Hassan Rezaei<sup>5</sup>

1. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Arid Zone Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: [ali.mohammadian@gau.ac.ir](mailto:ali.mohammadian@gau.ac.ir)
2. Associate Prof., Dept. of Arid Zone Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: [alizadeh\\_m2001@yahoo.com](mailto:alizadeh_m2001@yahoo.com)
3. Ph.D. Graduate, Dept. of Arid Zone Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: [khermandar625@yahoo.com](mailto:khermandar625@yahoo.com)
4. Ph.D. Dept. of Environmental Protection of North Khorasan Province, Bojnord, Iran. E-mail: [kalamati\\_ar@yahoo.com](mailto:kalamati_ar@yahoo.com)
5. Associate Prof., Dept. of Environmental Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: [hassanrezaei1979@gmail.com](mailto:hassanrezaei1979@gmail.com)

### Article Info

**Article type:**  
Full Length Research Paper

**Article history:**  
Received: 04.29.2019  
Revised: 11.28.2023  
Accepted: 12.02.2023

### Keywords:

Enrichment Factor,  
Environmental dusts,  
Heavy metals,  
Land Accumulation Index

### ABSTRACT

**Background and Objectives:** Industrial development and human activities caused to accelerate environmental pollution. Heavy metals from various sources, such as industrial and agricultural activities, lead to serious hazards in the ecosystem. The purpose of this study was to investigate the effect of industrial dust emitted from the Bauxite crusher located in the Jajarm Alumina factory on the level of soil contamination to Arsenic (As) and Nickel (Ni).

**Materials and Methods:** In this research, with the regime of the study area plotted from wind rose and dust rose, the direction of the dominant and erosive winds was determined. Then, two transects were considered: a transect in the direction of erosive wind (transect A) with a 3 km length and a transect in the direction of the dominant wind (transect B) with a 5 km length. Samples from the soil surface (depth of 0-2 cm) were taken on these transects at regular intervals from the source of dust, i.e. Bauxite crusher (0-500 m intervals, one sample every 50 m, 500-1000 m interval, one sample every 100 m interval, 1000- 2000 meters, one sample every 200 meters and in the last distance for transect B 2000-5000 meters, one sample every 500 meters and for transect A 2000-3000 meters, one sample every 500 meters) in total, 46 soil samples were collected and the concentration of Arsenic and Nickel in the soil samples was determined by the method of Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometry (ICP-OES). Finally, the indicators of land accumulation, pollution index, comprehensive pollution index and enrichment factor were used to determine the contamination level of the elements. The analysis of the significance of the increase in Arsenic and Nickel concentration and pollution level coefficients was implemented in the SPSS software using the analysis of variance (ANOVA) and T-test.

**Results:** The land accumulation index in the direction of erosive wind for Arsenic, at a distance of 200 to 250 m from the source, showed a medium to severe contamination. For the nickel, from the source of dust production to 350 m distance, the area was identified as unpolluted to medium

---

contaminated. For Arsenic, in the dominant wind direction at a distance of 150 m and 250 to 450 m, moderate to severe pollution was determined. For Nickel, up to 900 m from the source of dust, the area was identified as unpolluted to medium contaminated. For Arsenic and Nickel, The pollution index in the direction of erosive wind up to 450 meters from the source of dust production shows a high to medium pollution level. And show medium and low to end transect, for Arsenic and Nickel. By this indicator, the high pollution levels in the dominant wind direction were determined for Arsenic up to 1200 m from the source of dusts, and medium pollution levels of the index of pollution were determined for Nickel from the source of dust production up to 500 m far apart. And show medium and low to end transect, for Arsenic and Nickel. A comprehensive index of pollution in the case of erosive and prevailing winds for Arsenic and Nickel showed high and medium pollution levels, respectively. The enrichment factor in the direction of erosive wind indicated a medium concentration of Arsenic at 350 and 400 m from the Bauxite crusher and a low enrichment for Nickel at all points. In the dominant wind direction, a medium enrichment factor for Arsenic was observed up to 250 m from the bauxite crusher. In contrast, the level of Nickel enrichment at all locations was low.

**Conclusion:** Finally, the statistical analysis justified the significance of the measured concentrations of Arsenic and Nickel, as well as the other coefficients of pollution level in the direction of prevailing and erosive winds. Each of the coefficients of surface contamination in the direction of prevailing and erosive winds has risen to a distance of 500 m from the source. But the most coefficients of surface contamination, the index of pollution, in the wind direction is dominant to a distance of 1200 m from the source, for Arsenic, that is high pollution, and the most coefficients of surface contamination, the land accumulation, in the wind direction is dominant to a distance of 900 m from the source, for Nickel, that is medium pollution. On the other hand, a comprehensive pollution index, which indicates the average amount of pollution index of each element, shows high contamination of Arsenic and medium pollution of Nickel under both erosive and prevailing winds.

---

Cite this article: Mohammadian Behbahani, Ali, Hosseinalizadeh, Mohsen, Khermandar, Khadijeh, Kalamati, Ahmadreza, Rezaei, Hassan. 2024. Investigating the level of arsenic (As) and nickel (Ni) contamination caused by the emission of dust from bauxite crushers. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 14 (1), 95-113.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/EJSMS.2024.16584.1886

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

---



## بررسی سطح آلایندگی به آرسنیک (As) و نیکل (Ni) ناشی از انتشار گرد و غبار از سنگ‌شکن‌های بوکسیت

علی محمدیان بهبهانی<sup>۱\*</sup>، محسن حسینعلی‌زاده<sup>۲</sup>، خدیجه خرمن‌دار<sup>۳</sup>، احمدرضا کلماتی<sup>۴</sup>، حسن رضائی<sup>۵</sup>

۱. نویسنده مسئول، استادیار گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: [ali.mohammadian@gau.ac.ir](mailto:ali.mohammadian@gau.ac.ir)
۲. دانشیار گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: [alizadeh\\_m2001@yahoo.com](mailto:alizadeh_m2001@yahoo.com)
۳. دانش‌آموخته دکتری گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: [khermandar625@yahoo.com](mailto:khermandar625@yahoo.com)
۴. اداره کل حفاظت محیط زیست استان خراسان شمالی، بجنورد، ایران. رایانامه: [kalamati\\_ar@yahoo.com](mailto:kalamati_ar@yahoo.com)
۵. دانشیار گروه محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: [hassanrezaei1979@gmail.com](mailto:hassanrezaei1979@gmail.com)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: توسعه صنعتی و فعالیت‌های انسانی باعث تشدید آلودگی‌های محیطی می‌شوند. فلزات سنگین که از منابع مختلف مانند فعالیت‌های صنعتی، معدنی و کشاورزی وارد محیط می‌شوند و خطرات محیط‌زیستی جدی بر روی اکوسیستم ایجاد می‌نمایند. هدف از این پژوهش بررسی اثر انتشار ذرات گرد و غبار صنعتی سنگ‌شکن‌های بوکسیت کارخانه آلومینای جاجرم، بر سطح آلودگی خاک منطقه به فلزات آرسنیک (As) و نیکل (Ni) می‌باشد.
تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۰۹	
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۹/۰۷	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۱	
واژه‌های کلیدی: شاخص زمین انباشت، فاکتور غنی‌شدگی، فلزات سنگین، گردوغبار محیطی	مواد و روش‌ها: در این پژوهش ابتدا با توجه به گلبادها و گل طوفان‌های تهیه شده از منطقه، به ترتیب جهت بادهای غالب و بادهای فرساینده شناسایی و در جهت هر یک از این بادهای دو ترانسکت A و B در نظر گرفته شد. ترانسکت A در جهت باد فرساینده به طول ۳ کیلومتر و ترانسکت B در جهت باد غالب منطقه به طول ۵ کیلومتر بودند. نمونه‌برداری از خاک سطحی (در عمق ۲-۱۰ سانتی‌متر) بر روی این ترانسکت‌ها در فواصل منظم از سنگ‌شکن‌های بوکسیت (فواصل ۵۰۰-۰ متر، هر ۵۰ متر یک نمونه، فاصله ۱۰۰۰-۵۰۰ متر، هر ۱۰۰ متر یک نمونه، فاصله ۲۰۰۰-۱۰۰۰ متر، هر ۲۰۰ متر یک نمونه و در فاصله آخر برای ترانسکت B ۲۰۰۰-۵۰۰۰ متر، هر ۵۰۰ متر یک نمونه و برای ترانسکت A ۳۰۰۰-۲۰۰۰ متر، هر ۵۰۰ متر یک نمونه) در مجموع ۴۶ نمونه خاک برداشت و میزان غلظت آرسنیک و نیکل در نمونه‌ها

توسط دستگاه ICP-OES به روش پلاسما جفت شده القایی تعیین گردید. در نهایت جهت تعیین سطح آلودگی، شاخص‌های زمین‌انباشت، شاخص آلودگی، شاخص جامع آلودگی و فاکتور غنی‌شدگی مورد بررسی قرار گرفت. آنالیز معنی‌دار بودن افزایش غلظت آرسنیک و نیکل و ضرایب سطح آلودگی در محیط نرم‌افزار SPSS و با استفاده از روش تجزیه واریانس و آزمون T-Test انجام شد.

**یافته‌ها:** شاخص زمین‌انباشت در جهت باد فرساینده برای آرسنیک، در فاصله ۲۵۰-۲۰۰ متر از منشأ انتشار، آلودگی متوسط تا به شدت آلوده و برای عنصر نیکل، از فاصله ۳۵۰-۵۰ متر، غیرآلوده تا آلودگی متوسط را نشان می‌دهد. در جهت باد غالب، برای عنصر آرسنیک، در فاصله ۱۵۰ متر و ۴۵۰-۲۵۰ متر، آلودگی متوسط تا به شدت آلوده و برای نیکل، تا ۹۰۰ متر از منبع تولید گرد و غبار، غیرآلوده تا آلودگی متوسط را به خود اختصاص دادند. شاخص آلودگی در جهت باد فرساینده، برای آرسنیک و نیکل، تا ۴۵۰ متر از منبع، به ترتیب سطح آلودگی بالا و متوسط و تا انتهای ترانسکت برای آرسنیک و نیکل، شاخص آلودگی دارای مقادیر متوسط و پایین بود. برای این شاخص در جهت باد غالب، برای آرسنیک، تا ۱۲۰۰ متر از منشأ، سطح آلودگی بالا و برای نیکل، تا ۵۰۰ متر از منبع، متوسط و تا انتهای این ترانسکت برای آرسنیک و نیکل، متوسط و پایین تعیین شد. شاخص جامع آلودگی در جهت بادهای فرساینده و غالب برای آرسنیک و نیکل به ترتیب، دارای سطح آلودگی بالا و متوسط می‌باشد. فاکتور غنی‌شدگی در جهت باد فرساینده، برای آرسنیک در فاصله ۳۵۰ و ۴۰۰ متر سنگ‌شکن بوکسیت، غنی‌شدگی متوسط و برای نیکل در تمام نقاط، غنی‌شدگی کم را نشان داد. در جهت باد غالب، فاکتور غنی‌شدگی برای آرسنیک تا ۲۵۰ متر، غنی‌شدگی متوسط و برای عنصر نیکل در تمام نقاط، فاکتور غنی‌شدگی دارای مقدار کم می‌باشد.

**نتیجه‌گیری:** تجزیه و تحلیل آماری، نشان‌دهنده معنی‌دار بودن غلظت آرسنیک و نیکل و نیز هر یک از ضرایب سطح آلودگی در جهت بادهای غالب و فرساینده بود. هر یک از ضرایب سطح آلودگی در جهت بادهای غالب و فرساینده اکثراً تا فاصله ۵۰۰ متر از منشأ افزایش داشت، اما بیش‌ترین سطح آلودگی آرسنیک، از نظر شاخص آلودگی و در جهت باد غالب تا فاصله ۱۲۰۰ متر از منشأ، می‌باشد که میزان آلودگی بالا را نشان می‌دهد. بیش‌ترین سطح آلودگی نیکل، از نظر شاخص زمین‌انباشت تا فاصله ۹۰۰ متر با سطح آلودگی متوسط می‌باشد. از طرفی شاخص جامع آلودگی که نشان‌دهنده میانگین شاخص آلودگی هر عنصر است، بیانگر آلودگی بالا برای آرسنیک و آلودگی متوسط برای نیکل، در هر دو جهت باد غالب و فرساینده بود.

**استناد:** محمدیان بهبهانی، علی، حسینعلی‌زاده، محسن، خرمن‌دار، خدیجه، کلماتی، احمدرضا، رضائی، حسن (۱۴۰۳). بررسی سطح آلاینده‌ی به آرسنیک (As) و نیکل (Ni) ناشی از انتشار گرد و غبار از سنگ‌شکن‌های بوکسیت. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۴(۱)، ۹۵-۱۱۳.

DOI: 10.22069/EJSMS.2024.16584.1886



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

## مقدمه

به‌طور کلی چرخه جهانی گرد و غبار شامل سه مرحله فیزیکی جدایش ذرات از منطقه منشأ، انتشار ذرات در اتمسفر و ترسیب این ذرات در محل رسوب‌گذاری می‌باشد که هر کدام از این فرآیندها قادر به تغییر در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی گرد و غبار و محل رسوب‌گذاری آن می‌باشند (۱). این گرد و غبار می‌تواند به‌عنوان حامل فلزات سنگین در اتمسفر عمل کند و در نهایت از طریق این مسیر وارد خاک شوند. گرد و غبار و خاک سطحی در مناطق شهری نیز، شاخص‌های آلودگی فلزات سنگین از طریق فرونشست اتمسفری می‌باشند (۲). در واقع فلزات سنگین عناصری هستند که تهدیدی جدی برای محیط زیست تلقی می‌شوند و علت این امر حضور گسترده آن‌ها در آب، هوا و زمین است که برخی از آن‌ها از جمله آرسنیک، سرب و جیوه سمی و برخی دیگر از جمله نیکل، مس، کبالت، روی و کروم تا حد معینی برای موجودات زنده ضروری هستند (۳). آرسنیک فلز غیرضروری و سمی برای گیاهان محسوب می‌شود که به‌طور طبیعی و یا از طریق فعالیت‌های انسانی منجر به آلودگی محیط زیست می‌گردد (۴). این فلز توانایی تجمع در اندام‌های مختلف گیاهان و جانوران را داشته و منجر به انتقال به زنجیره غذایی انسان‌ها می‌گردد (۵). نیکل نیز از جمله فلزات طبیعی می‌باشد که در فرم‌های مختلف در محیط و پیکره موجودات زنده وجود دارد، اما غلظت‌های بالای این فلز عاملی تنش‌زا برای گیاهان محسوب می‌گردد (۴). در واقع غلظت بالای نیکل منجر به محدود کردن رشد گیاهان و تأثیر بر ویژگی‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی آن‌ها می‌شود (۵). در خصوص سطح آلودگی و بررسی شاخص‌های آلودگی گرد و غبار حاصل از صنایع و ترافیک، مطالعات متعددی در صورت گرفته است. لی و

همکاران به پژوهش در خصوص سطوح آلودگی گرد و غبار، آلودگی فلزات و خطرات بالقوه اکولوژیکی آن با استفاده از شاخص‌های زمین‌انباشتگی<sup>۱</sup> و شاخص آلودگی<sup>۲</sup> در چین پرداختند. نتایج دو شاخص نشان‌دهنده آلودگی جزئی تا متوسط کروم، سرب، جیوه، مس، روی و کادمیوم در گرد و غبار سطحی منطقه بود. هم‌چنین نتایج نشان داد که فلزات موجود در گرد و غبار سطحی خطر اکولوژیکی خفیفی داشته و تهدید جدی برای سلامتی موجودات زنده نیستند (۶). کبیر و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی به ارزیابی آلودگی فلزات در گرد و غبار جاده‌ای در بنگلادش با استفاده از روش طیف‌سنجی جرمی پلاسما جفت‌شده القایی پرداختند و میزان فاکتور غنی‌شدگی<sup>۳</sup>، شاخص زمین‌انباشتگی، آلودگی و درجه آلودگی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که گرد و غبار جاده‌ای منجر به آلودگی منطقه نسبت به فلزات سنگین شده و شاخص زمین‌انباشتگی فلزات روی و کادمیوم دارای آلودگی متوسط تا شدید است و فاکتور غنی‌شدگی فلزات سرب، کادمیوم، روی و مس بالا بود. شاخص خطر زیست‌محیطی نشان داد که فلز کادمیوم دارای خطر متوسط تا بالا در گرد و غبار جاده‌ای است (۷). کبیر و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی آلودگی فلزات سنگین در نمونه گرد و غبار جاده‌ای در بنگلادش پرداختند و برخی شاخص‌های آلودگی را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که در فصل زمستان غلظت بالایی از سرب، نیکل، کروم، منگنز، مس و روی در گرد و غبار یافت شد. شاخص زمین‌انباشتگی و فاکتور آلودگی نیز بیانگر آلوده بودن منطقه به روی و مس در فصل زمستان بود. فاکتور غنی‌شدگی نیز بیانگر کم بودن فلزات منگنز و کبالت و قابل توجه بودن فلزات مس و

1- Igeo (Geo-accumulation Index)  
2- PI (Pollution Index)  
3- EF (Enrichment Factor)

اولیه اصلی در تولید آلومینیوم می‌باشد، احداث شده است. معادن بوکسیت به تعداد هفت معدن در ارتفاعات بالادست کارخانه با وسعت تقریبی ۱۱ کیلومتر مربع به‌عنوان بزرگ‌ترین معدن بوکسیت شناخته شده در ایران است که میزان استخراج سالیانه آن ۶۰۰۰۰۰ تن در سال است. بوکسیت استخراج شده از معادن، توسط سه سنگ‌شکن که در فاصله حدود ۵ کیلومتر شمال کارخانه و در دامنه ارتفاعات بالادست قرار دارند، به مواد اولیه قابل استفاده در کارخانه آلومینا فرآوری می‌شود. برای جلوگیری از تولید غبار محیطی بالا توسط سنگ‌شکن‌های بوکسیت، باید مواد اولیه ورودی، پس از کوبیدن، خرد و هدایت بر روی نوار نقاله‌ها، با تعبیه نازل‌های آب‌پاش و مه‌پاش بر روی نوار نقاله‌ها، مرطوب گردند، اما به دلیل واقع شدن محل این واحدها در منطقه بیابانی و خشک، مشکلات عدیده‌ای در تأمین آب وجود دارد. بنابراین در ایامی از سال این سنگ‌شکن‌ها با غبار محیطی بالا فعالیت داشته و گرد و غبار تولیدی در دامنه و دشت پایین‌دست منتشر می‌شوند. در بررسی اولیه از نقاط غبارزای کارخانه آلومینای جاجرم، چهار نقطه محل (دپوی نمک کربنات سدیم، در داخل کارخانه آلومینا، دپوی گل قرمز در ۲ کیلومتری شرق کارخانه، سنگ‌شکن آهک، در ۷ کیلومتری شمال غرب کارخانه و سنگ‌شکن‌های بوکسیت، واقع در ۴ کیلومتری شمال شرق کارخانه) شناسایی شد که از این بین سنگ‌شکن‌های بوکسیت تولید غبار محیطی بالاتر از استاندارد تعیین شده برای هوای پاک (۱۵۰ میکروگرم بر کیلوگرم) داشتند (۱۳). در این پژوهش فرض می‌شود که آلودگی خاک سطحی در مقایسه با منطقه شاهد (محدوده خارج از منطقه مورد مطالعه) ناشی از انتشار و رسوب ذرات گرد و غبار صنعتی سنگ‌شکن بوکسیت می‌باشد. هدف از پژوهش حاضر بررسی اثر

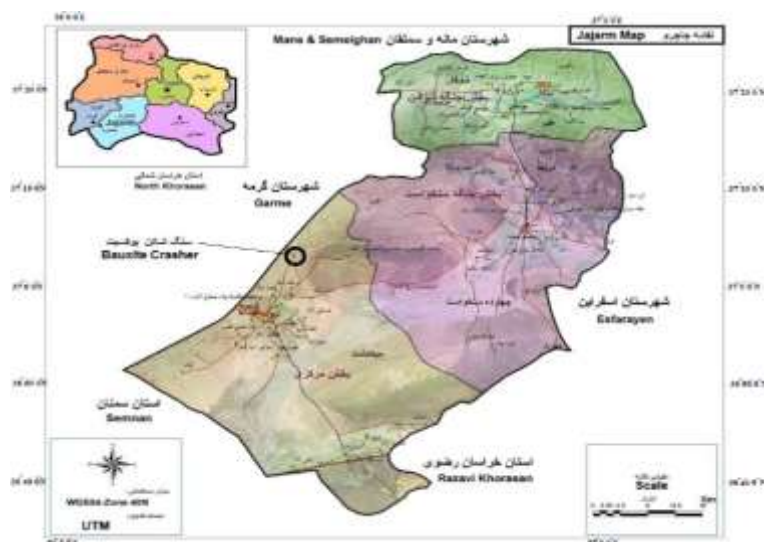
روی در تابستان و زمستان بود (۸). تایوو و همکاران (۲۰۲۰) در بررسی شاخص آلودگی و خطرات فلزات در گرد و غبار جاده‌ای در نیجریه با استفاده از پلاسما جفت شده القایی پرداختند و دریافتند که گرد و غبار و خاک محدوده دارای غلظت بالایی از فلزات روی، آهن، تیتانیوم، منیزیم و کلسیم است. هم‌چنین ارزیابی شاخص آلودگی، شاخص خطر اکولوژیکی و فاکتور غنی‌شدگی سطوح بالای آلودگی فلزات روی، آرسنیک، کادمیوم و سرب را در گرد و غبار و خاک منطقه نشان داد (۹). لی ژیانگ و همکاران (۲۰۱۸) سطوح غلظت، درجه غنی‌شدگی و ویژگی گرد و غبار فلزات سنگین در چین را با استفاده از طیف‌سنجی جرمی پلاسما جفت‌شده القایی بررسی کردند که نتایج حاصل، بالا بودن مقدار استاندارد کادمیوم، مس و روی در نمونه‌های گرد و غبار، ضریب غنی‌شدگی جزئی در فلزات نیکل، سرب، مس و بیسموت و ضریب غنی‌شدگی متوسط در کروم، کادمیوم، روی و مولیبدین نشان داد (۱۰). بر اساس عناصر بافتی بوکسیت‌ها به دلیل تغییرات متناوب کانی‌شناسی و شیمیایی دارای ساختار هم‌مرکز می‌باشند و می‌توانند تغییرات دوره‌ای محیطی و اقلیمی را به نمایش بگذارند (۱۱). سنگ معدن بوکسیت دارای ۷۰٪-۵۰٪ آلومینیوم می‌باشد که عموماً در عمق ۲-۱ متر زیر سطح خاک پیدا می‌شوند و با استفاده از روش‌های معدن باز، استخراج نواری و حذف لایه پوشش‌دهنده خاک استخراج می‌گردند. به‌دنبال این امر نابودی مواد آلی، موجودات زنده و پوشش گیاهی، اختلال در خاکدانه‌ها، ساختمان خاک و چرخه مواد و در نهایت نابودی عناصر غذایی و کمیاب خاک می‌گردد (۱۲). شهرستان جاجرم در نواحی بیابانی استان خراسان شمالی قرار دارد و کارخانه تولید آلومینا از بوکسیت جاجرم در سال ۱۳۸۳، به‌منظور تهیه آلومینا که ماده

دومارتن از نوع خشک بیابانی و متوسط ریزش‌های جوی سالیانه در این محدوده بین ۱۵۰-۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد (۱۲). منطقه موردنظر در دامنه ارتفاعات موسوم به کوه اوزوم در شمال شهرستان جاجرم و بر روی یک مخروط افکنه قرار دارد. گیاهان غالب منطقه درمنه دشتی<sup>۱</sup> و شور شرقی<sup>۲</sup> می‌باشند. فاصله محدوده تا مرکز شهرستان جاجرم ۱۰ متر بوده که سنگ‌شکن‌های بوکسیت مورد مطالعه در ۴ متر کارخانه آلومینا واقع شده‌اند. این سنگ‌شکن‌ها مواد اولیه لازم برای این صنعت بزرگ در استان را تهیه و سنگ بوکسیت لازم غالباً از معادن ارتفاعات بالادست کارخانه تأمین می‌گردد. کارخانه آلومینا این مواد اولیه را پس از طی یک فرآیند تولید به پودر آلومینا که محصول این کارخانه به‌شمار می‌رود، تبدیل می‌کند.

انتشار ذرات گرد و غبار صنعتی سنگ‌شکن‌های بوکسیت کارخانه آلومینای جاجرم، بر سطح آلودگی خاک منطقه به فلزات آرسنیک و نیکل (با توجه به گزارشات محیط زیست منطقه، حساسیت زیست محیطی بالا و به درخواست کارفرما دو فلز آرسنیک و نیکل انتخاب شدند تا تأثیر گرد و غبار بوکسیت بر میزان تجمع فلزات در خاک بررسی شوند) و تعیین شاخص‌های سطح آلودگی، زمین‌انباشت، آلودگی، جامع آلودگی و فاکتور غنی‌شدگی است.

### مواد و روش‌ها

**محدوده مورد مطالعه:** منطقه مورد مطالعه در شهرستان جاجرم در قسمت جنوب غرب استان خراسان شمالی واقع شده است (شکل ۱). این منطقه در محدوده‌ای از نواحی بیابانی با مختصات جغرافیایی  $40^{\circ}9'56''$  شمالی و  $45^{\circ}12'37''$  شرقی واقع شده است که در ارتفاع ۱۱۰۰-۱۲۰۰ متر از سطح دریا با اقلیم‌نمای



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه.

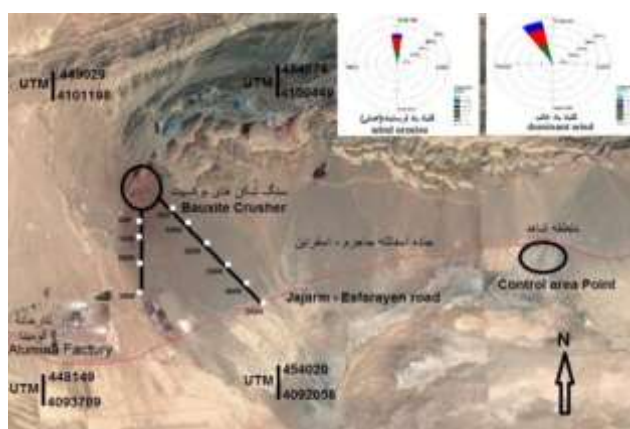
Figure 1. Geographical Location of the study area.

1- *Artemisia seiberi*

2- *Salsola orientalis*

جاده ارتباطی جاجرم به اسفراین می‌باشد (شکل ۲). در این پژوهش، نمونه‌برداری خاک بدین صورت بود که نمونه‌برداری از خاک سطحی (در عمق ۰-۲ سانتی‌متر) بر روی این ترانسکت‌ها در فواصل منظم از سنگ‌شکن‌های بوکسیت (فواصل ۰-۵۰۰ متر، هر ۵۰ متر یک نمونه، فاصله ۱۰۰۰-۵۰۰ متر، هر ۱۰۰ متر یک نمونه، فاصله ۲۰۰۰-۱۰۰۰ متر، هر ۲۰۰ متر یک نمونه و در فاصله آخر برای ترانسکت B ۲۰۰۰-۵۰۰۰ متر، هر ۵۰۰ متر یک نمونه و برای ترانسکت A ۳۰۰۰-۲۰۰۰ متر، هر ۵۰۰ متر یک نمونه) و منطقه شاهد انجام شد. بنابراین ۲۲ نمونه خاک در امتداد ترانسکت A، ۲۴ نمونه خاک در امتداد ترانسکت B و ۳ نمونه خاک در منطقه شاهد نمونه‌برداری شد.

روش نمونه‌برداری و تجزیه و تحلیل: برای نمونه‌برداری‌های غبار محیطی و نمونه‌برداری از خاک سطحی منطقه، دو ترانسکت جهت‌های باد غالب (شمال غرب- جنوب شرق) و فرساینده (شمالی- جنوبی) منطقه بر اساس تحلیل داده‌های باد ایستگاه هواشناسی جاجرم در محیط نرم‌افزار WRPLOT View، در نظر گرفته شد که در قسمت سمت راست بالای شکل ۲ گلبادهای باد فرساینده و غالب ارائه شده است. ترانسکت A، در جهت باد فرساینده، به طول ۳ کیلومتر، از محل سنگ‌شکن‌های بوکسیت تا تیرهای برق فشارقوی نزدیک به ضلع شمالی کارخانه آلومینای جاجرم و ترانسکت B، در جهت باد غالب، به طول ۵ کیلومتر و از سنگ‌شکن‌های بوکسیت تا



شکل ۲- موقعیت ترانسکت‌ها در محدوده مورد مطالعه.

Figure 2. Position of transects in the study area.

تیزاب به روش هضم اسیدی انجام و مقادیر فلزات مذکور سنجش شد (۱۴).  
بررسی سطح آلودگی ناشی از انتشار گرد و غبار سنگ‌شکن‌های بوکسیت: سطح آلودگی فلزات سنگین با استفاده از فاکتورهای شاخص زمین‌انباشت، شاخص آلودگی، شاخص جامع آلودگی یکنواخت و نیز در نظر گرفتن فاکتور غنی‌شدگی به صورت زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد (۱۵).

برای سنجش و آنالیز آزمایشگاهی دو فلز آرسنیک و نیکل، دارای غلظت بالاتر از استاندارد بودند (مقدار استاندارد فلزات طبق استاندارد محیط زیست، آرسنیک ۱۷ و نیکل ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) انتخاب گردید. برای آنالیز فلزات آرسنیک و نیکل از دستگاه ICP-OES Germany GmbH (مدل: ICP OES Germany GmbH) و روش (Boschstr ESPECTRO ACROS) و روش اسپکترومتری نشری پلاسمای جفت‌شونده القایی، استفاده شد (۰/۲ گرم از نمونه با ۵ میلی‌لیتر اسید



شاخص زمین‌انباشت: این شاخص که بیانگر درجه آلودگی خاک متأثر از پارامتر مورد نظر در مقایسه با مقدار طبیعی آن در نمونه خاک منطقه شاهد است با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید (۱۶).

$$I_{geo} = \log_2 [C_n / 1.5B_n]$$

که در آن،  $C_n$  غلظت اندازه‌گیری شده در نمونه و  $B_n$  غلظت اندازه‌گیری شده در منطقه شاهد (منطقه خارج از محدوده مطالعاتی) است. رده‌بندی شاخص زمین‌انباشت در جدول ۱ آورده شده است (جدول ۱).

جدول ۱- رده‌بندی شاخص زمین‌انباشت (۱۷).

**Table 1. Land accumulation index classification.**

بی‌نهایت آلوده Very strong pollution	تا بی‌نهایت آلوده Strong to very strong pollution	به شدت آلوده Strong pollution	آلودگی متوسط تا به شدت آلوده Moderate to strong pollution	آلودگی متوسط Moderate pollution	غیرآلوده تا آلودگی متوسط Unpolluted to moderate	غیرآلوده Practically Unpolluted
$5 < I_{geo}$	$4 < I_{geo} \leq 5$	$3 < I_{geo} \leq 4$	$2 < I_{geo} \leq 3$	$1 < I_{geo} \leq 2$	$0 < I_{geo} \leq 1$	$I_{geo} \leq 0$

شاخص آلودگی: این شاخص بیانگر شدت آلودگی خاک منطقه تحت تأثیر عناصر آلاینده در مقایسه با منطقه شاهد می‌باشد و با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید (۱۱).

$$PI = C_n / B_n$$

که در آن،  $C_n$  غلظت اندازه‌گیری شده در نمونه و  $B_n$  غلظت اندازه‌گیری شده در منطقه شاهد است. رده‌بندی شاخص آلودگی در جدول ۲ ارائه شده است (جدول ۲).

جدول ۲- رده‌بندی شاخص آلودگی (۱۸).

**Table 2. Pollution Index Classification.**

سطح بالای آلودگی High Pollution	سطح متوسط آلودگی Moderate Pollution	سطح پایین آلودگی Low Pollution
$PI > 3$	$1 < PI \leq 3$	$PI \leq 1$

شاخص جامع آلودگی: شاخص جامع آلودگی مقدار میانگین شاخص آلودگی هر عنصر است، که به صورت جدول ۳ رده‌بندی می‌شود (۱). این شاخص را می‌توان با استفاده از رابطه زیر نیز محاسبه کرد

$$IPI = CPI = \sum_{i=1}^m C_f^i / m$$

جدول ۳- رده‌بندی شاخص جامع آلودگی (۱۰).

**Table 3. Comprehensive index of pollution rating.**

سطح بالای آلودگی High Pollution	سطح متوسط آلودگی Moderate Pollution	سطح پایین آلودگی Low Pollution
$IPI > 2$	$1 < IPI \leq 2$	$IPI \leq 1$

به غلظت طبیعی آن خاک منطقه شاهد است و از رابطه زیر به دست می‌آید (۱).

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

که در آن،  $C_n$  غلظت عنصر موردنظر در نمونه،  $C_{ref}$  غلظت عنصر مرجع در منطقه شاهد،  $B_n$  غلظت عنصر موردنظر در منطقه شاهد و  $B_{ref}$  غلظت عنصر مرجع در منطقه شاهد است (در این پژوهش عنصر مرجع، آهن در نظر گرفته شده است). رده‌بندی فاکتور غنی‌شدگی در جدول ۴ آورده شده است (جدول ۴).

فاکتور غنی‌شدگی: اساس این روش بر مبنای مقایسه غلظت فلز موردنظر در نمونه‌ها با غلظت همان فلز در ناحیه غیرآلوده است. این غلظت‌ها بر اساس غلظت عنصر مرجع که می‌تواند آلومینیوم یا آهن باشد، نرمال می‌شوند. چون توزیع آهن در محیط در ارتباط با سایر فلزات نیست و هم‌چنین غلظت طبیعی آن در پوسته زمین زیاد است. بنابراین مقدار آن به‌طور عمده وابسته به فعالیت‌های انسانی نیست (۱۹). این شاخص نشان‌دهنده افزایش غلظت یک عنصر نسبت

جدول ۴- رده‌بندی فاکتور غنی‌شدگی (۱۸).

Table 4. Enrichment factor rating.

غنی‌شدگی کم	غنی‌شدگی متوسط	غنی‌شدگی زیاد	غنی‌شدگی خیلی زیاد	غنی‌شدگی به شدت زیاد
Low Enrichment	Moderate Enrichment	High Enrichment	Very High Enrichment	Strong Enrichment
$EF < 2$	$2 \leq EF < 5$	$5 < EF < 20$	$20 \leq EF < 40$	$EF \geq 40$

(۰/۳۳ تا ۰/۱)، که در این فاصله این شاخص غیرآلوده تا آلودگی متوسط را نشان داده است. بنابراین نتایج این شاخص نشان‌دهنده آن است که شدت غنی‌شدگی عناصر مذکور بیش‌تر ناشی از زمین‌شناسی منطقه است. شاخص آلودگی نیز در جهت باد فرساینده بیش‌ترین آلودگی برای آرسنیک و نیکل در فاصله ۴۵۰-۵۰ متر از منبع تولید گرد و غبار و به‌ترتیب با آلودگی بالا (۴/۳۵ تا ۲/۳۴) و متوسط (۱/۸۹ تا ۱/۰۹) بود. شاخص جامع آلودگی، برای آرسنیک و نیکل در جهت باد فرساینده، به‌ترتیب سطح آلودگی بالا ( $IPI=2/75$ ) و متوسط ( $IPI=1/127$ ) بود. در نهایت بیش‌ترین مقدار فاکتور غنی‌شدگی ( $EF$ ) برای آرسنیک فاصله ۳۵۰ و ۴۰۰ متر از سنگ‌شکن بوکسیت با غنی‌شدگی متوسط (۲/۱۷۸ و ۲/۰۲۳) و برای نیکل در تمام نقاط غنی‌شدگی کم (۰/۴۲) تا (۰/۷۷) نشان داد. بنابراین نتایج نشان‌دهنده آن است که شدت غنی‌شدگی عناصر مذکور بیش‌تر ناشی از زمین‌شناسی منطقه است (شکل‌های ۳ الی ۱۱). نتایج

## نتایج و بحث

نمودارهای مربوط به نتایج آنالیز آرسنیک و نیکل، سطوح آلودگی و شاخص‌های غنی‌شدگی، آلودگی و زمین‌انباشت برای هر یک از دو فلز سنگین نیکل و آرسنیک در طول دو ترانسکت A و B به شرح زیر است که با توجه به بررسی به‌عمل‌آمده و نتایج آنالیز آزمایشگاهی از نمونه‌های خاک برداشت‌شده از منطقه مورد مطالعه می‌باشد (شکل‌های ۳ الی ۲۰). نتایج در ترانسکت A (شکل‌های ۳ الی ۱۱) نشان داد که مقدار نیکل در فواصل ۵۰ تا ۳۵۰ متر بالاتر از حد استاندارد، مقدار آرسنیک نیز در فواصل ۵۰ تا ۴۰۰ متر بالاتر از حد استاندارد و مقدار آهن در تمام فواصل به استثناء ۱۸۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ متر بالاتر از حد استاندارد است. هم‌چنین شاخص زمین‌انباشت، در جهت باد فرساینده برای آرسنیک، بیش‌ترین آلودگی در فاصله ۲۵۰-۲۰۰ متر نشان داده شد (۲/۰۳ تا ۲/۱)، که در این فاصله آلودگی متوسط تا شدید بوده است. برای نیکل نیز بیش‌ترین مقدار از فاصله ۳۵۰-۵۰ متر بوده است

آلودگی بالا (۲/۲۴ تا ۳/۱۱) و نیکل، ۴۵۰-۵۰۰ متر، آلودگی بالا (۲ تا ۲/۰۳) را نشان داد. شاخص جامع آلودگی، برای آرسنیک و نیکل در جهت باد غالب نیز به ترتیب سطح آلودگی بالا (IPI=۴/۸۸) و متوسط (IPI=۱/۵۱) بود. فاکتور غنی‌شدگی، در جهت باد غالب، برای آرسنیک، بیش‌ترین غنی‌شدگی فاصله ۱۵۰-۲۵۰ متر از سنگ‌شکن بوکسیت بود که غنی‌شدگی متوسط (۲/۱۱ تا ۲/۲۲) و برای نیکل در تمام نقاط غنی‌شدگی کم (۰/۶۱ تا ۰/۴۰) بود. بنابراین نتایج نشان داد که شدت غنی‌شدگی عناصر مذکور بیش‌تر ناشی از زمین‌شناسی منطقه است (شکل‌های ۱۲ الی ۲۰). هم‌زمان با نمونه‌برداری از خاک منطقه، از منطقه شاهد که از انتهای ترانسکت در جهت باد غالب، به طرف شرق، ۶ کیلومتر فاصله دارد نیز نمونه‌برداری انجام شد که در این منطقه مقدار آرسنیک و نیکل کم‌تر از حد استاندارد بود (جدول ۵).

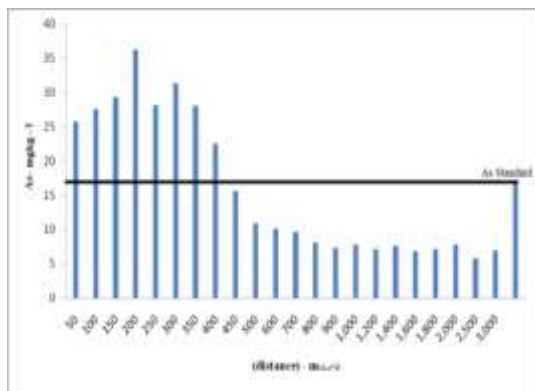
در ترانسکت B (شکل‌های ۱۲ الی ۲۰) نشان داد که مقدار نیکل در فواصل ۵۰ تا ۸۰۰ متر بالاتر از حد استاندارد، مقدار آرسنیک نیز در فواصل ۵۰ تا ۱۲۰۰ متر بالاتر از حد استاندارد و مقدار آهن در تمام فواصل بالاتر از حد استاندارد است. شاخص زمین‌انباشت، در جهت باد غالب برای آرسنیک، بیش‌ترین آلودگی در فاصله ۱۵۰ و ۲۵۰-۴۵۰ متر با آلودگی متوسط تا به شدت آلوده (به ترتیب ۲/۷۲ و ۲/۸۷ تا ۲/۱۸) و فاصله ۲۰۰ متر، به شدت آلوده (۳/۰۴)، داشته است و برای نیکل، بیش‌ترین آلودگی از فاصله ۵۰-۹۰۰ متر از منبع تولید گرد و غبار بوده است که این شاخص غیرآلوده تا آلودگی متوسط (۰/۲۰ تا ۰/۱۱) را نشان داد. بنابراین نتایج نشان‌دهنده آن است که شدت آلودگی عناصر مذکور بیش‌تر ناشی از زمین‌شناسی منطقه است. شاخص آلودگی، در جهت باد غالب نیز برای آرسنیک، از فاصله ۱۰۰-۱۲۰۰ متر، سطح

جدول ۵- میزان فلزات سنگین آرسنیک و نیکل (میلی‌گرم بر کیلوگرم) سنجش شده در خاک منطقه شاهد.

Table 5. The amount of arsenic and nickel (mgkg<sup>-1</sup>) heavy metals in the control area.

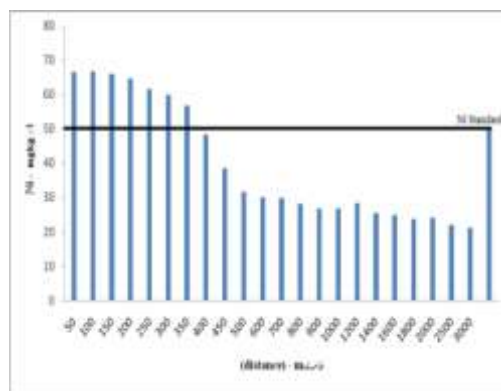
مقدار آهن amount "Fe"	مقدار استاندارد نیکل Standard amount "Ni"	مقدار استاندارد آرسنیک Standard amount "As"	مقدار نیکل amount "Ni"	مقدار آرسنیک amount "As"	نمونه خاک soil sample
14971	50	17	35.1	5.9	خاک منطقه شاهد (Control area soil)

## ۱- ترانسکت A



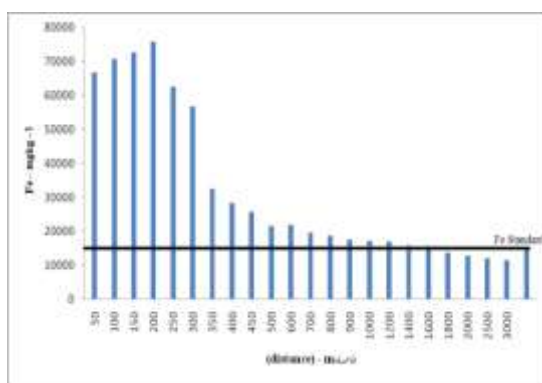
شکل ۴- مقدار آرسنیک سنجش شده.

Figure 4. Amount of Arsenic measured.



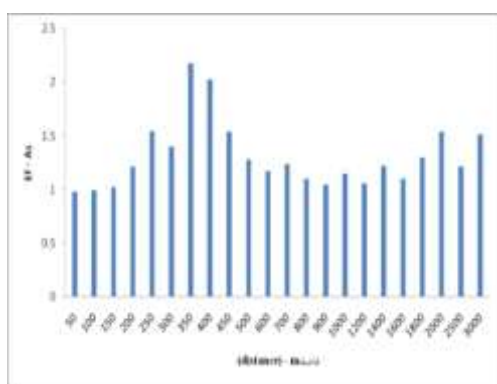
شکل ۳- مقدار نیکل سنجش شده.

Figure 3. Amount of Nickel measure.



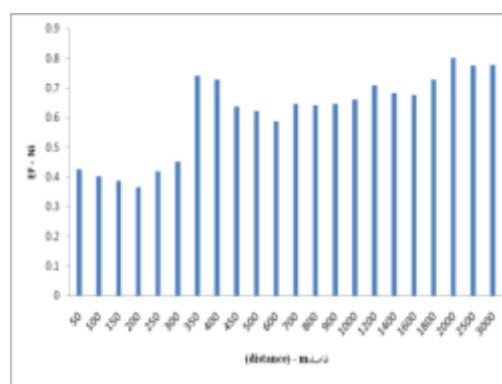
شکل ۵- مقدار آهن (عنصر مرجع) سنجش شده.

Figure 5. Amount of Iron (reference element) measured.



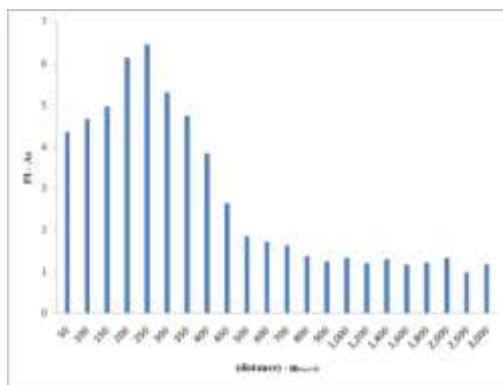
شکل ۷- مقدار فاکتور غنی شدگی آرسنیک.

Figure 7. Amount of Arsenic Enrichment Factor.



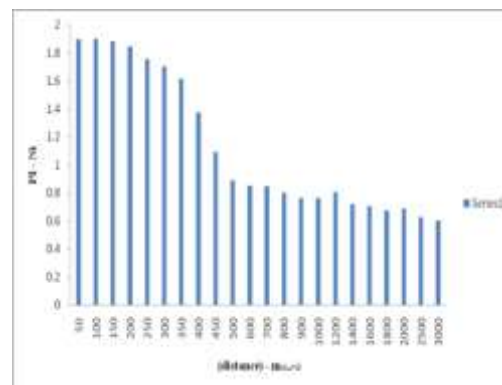
شکل ۶- مقدار فاکتور غنی شدگی نیکل.

Figure 6. Amount of Nickel Enrichment Factor.



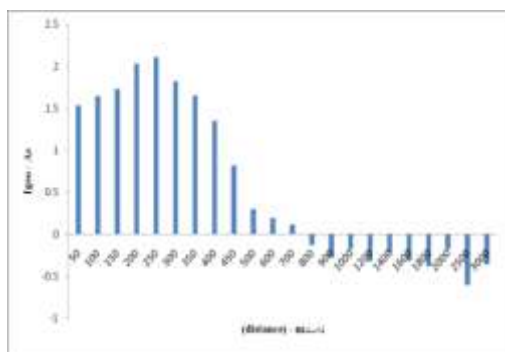
شکل ۹- مقدار شاخص آلودگی آرسنیک.

Figure 9. Amount of Arsenic Pollution Index.



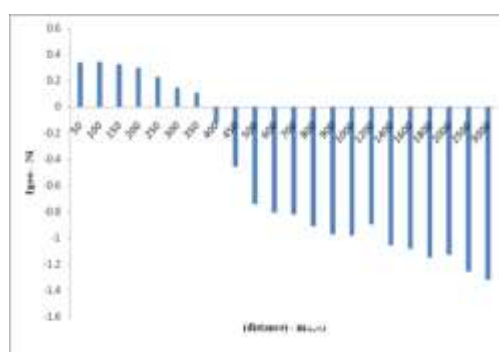
شکل ۸- مقدار شاخص آلودگی نیکل.

Figure 8. Amount of Nickel Pollution Index.



شکل ۱۱- مقدار شاخص زمین‌انباشت آرسنیک.

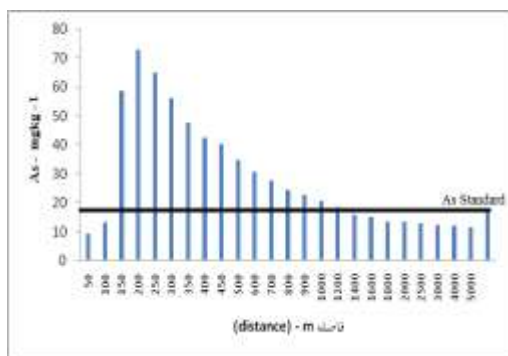
Figure 11. Amount of Arsenic Geo-accumulation.



شکل ۱۰- مقدار شاخص زمین‌انباشت نیکل.

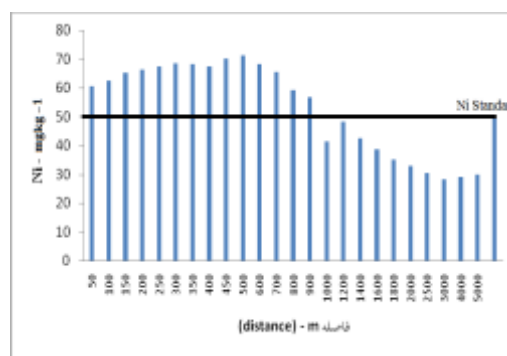
Figure 10. Amount of Nickel Geo-accumulation.

- ترانسکت B



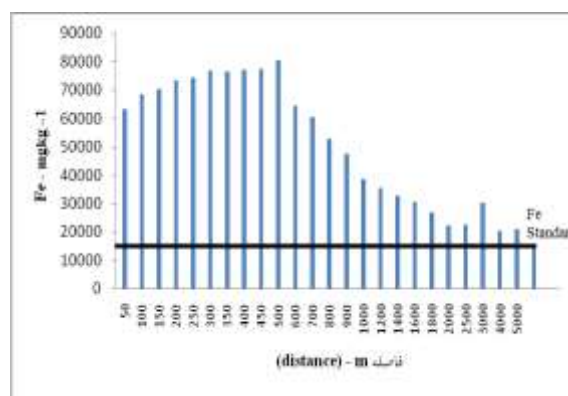
شکل ۱۳- مقدار آرسنیک سنجش شده.

Figure 13. Amount of Arsenic measured.



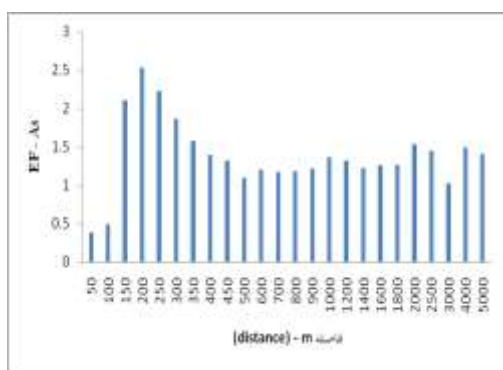
شکل ۱۲- مقدار نیکل سنجش شده.

Figure 12. Amount of Nickel measure.



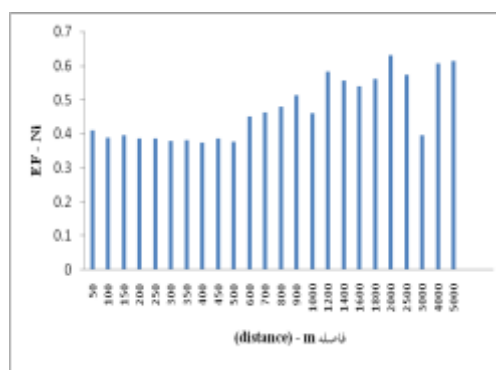
شکل ۱۴- مقدار آهن (عنصر مرجع) سنجش شده.

Figure 14. Amount of Iron (reference element) measured.



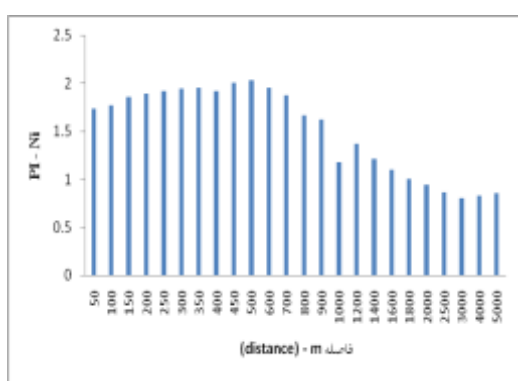
شکل ۱۶- مقدار فاکتور غنی‌شدگی آرسنیک.

Figure 16. Amount of Arsenic Enrichment Factor.



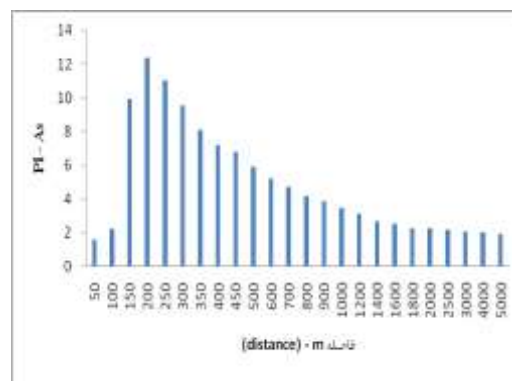
شکل ۱۵- مقدار فاکتور غنی‌شدگی نیکل.

Figure 15. Amount of Nickel Enrichment Factor.



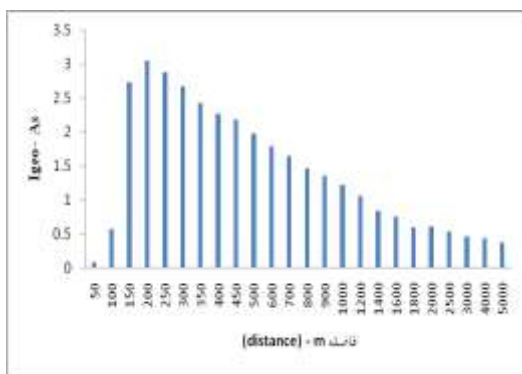
شکل ۱۸- مقدار شاخص آلودگی آرسنیک.

Figure 18. Amount of Arsenic Pollution Index.



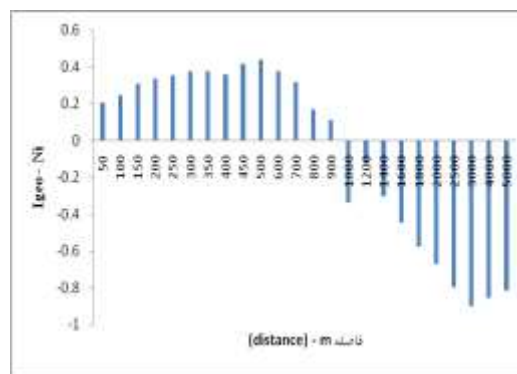
شکل ۱۷- مقدار شاخص آلودگی نیکل.

Figure 17. Amount of Nickel Pollution Index.



شکل ۲۰- مقدار شاخص زمین‌انباشت آرسنیک.

Figure 20. Amount of Arsenic Geo-accumulation.



شکل ۱۹- مقدار شاخص زمین‌انباشت نیکل.

Figure 19. Amount of Nickel Geo-accumulation.

فواصل از سنگ‌شکن معنی‌دار بوده و با فاصله گرفتن از منشأ، مقدار و غلظت عناصر کم شد.

نتایج تجزیه تحلیل آماری و آزمون T-Test نشان داد که جهت‌های باد غالب و فرساینده در افزایش غلظت دو فلز و ضرایب آلودگی تأثیر نداشته و

جدول ۶- سطح معنی‌داری ضرایب آلودگی بر روی ترانسکت‌های A و B.  
Table 6. Significant level of contamination coefficients on transects A&B.

سطح احتمال		آماره		میانگین مربعات		مجموع مربعات		درجه آزادی		منبع
Sig		F		Mean squares		Sum of squares		df		Source
B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	ترانسکت
0.998	0.000	0.00	23.39	0.00	0.09	0.00	0.09	23	21	غنی‌شدگی آرسنیک EF-As
0.000	0.000	24.07	23.39	0.22	0.97	0.22	0.97	23	21	غنی‌شدگی نیکل EF-Ni
0.000	0.001	31.15	14.01	11.83	7.53	11.83	7.53	23	21	زمین انباشت آرسنیک Igeo-As
0.000	0.000	43.07	77.85	5.40	4.22	5.40	4.22	23	21	زمین انباشت نیکل Igeo-Ni
0.000	0.000	20.27	10.65	37.58	78.97	37.58	78.97	23	21	آلودگی آرسنیک PI-As
0.000	0.000	29.34	58.94	3.12	3.46	3.12	3.46	23	21	آلودگی نیکل PI-Ni

جدول ۷- آزمون Ttest برای دو پارامتر مشابه در دو ترانسکت A و B.  
Table 7. Ttest for two similar parameters in two transect A and B.

سطح احتمال	درجه آزادی	آماره t	اختلاف جفت‌ها				میانگین	نمونه‌های جفت شده	
			Paired Differences						
			اختلاف معنی‌دار		خطای استاندارد	انحراف			میانگین
			%95 Confidence Interval of the difference						
Sig	df	Upper	Lower	Std. Error Mean	Std. deviation	Mean	Paired Samples		
0.572	21	-0.57	0.16	-0.28	0.11	0.50	-0.06	ضریب غنی‌شدگی آرسنیک در ترانسکت‌ها EF- As Transect A & EF-As Transect B	
0.000	21	6.35	0.21	0.10	0.02	0.11	0.15	ضریب غنی‌شدگی نیکل در ترانسکت‌ها EF- Ni Transect A & EF-Ni Transect B	
0.000	21	-5.71	-0.60	-1.29	0.16	0.77	-0.94	شاخص زمین‌انباشت آرسنیک در ترانسکت‌ها Igeo- As Transect A & Igeo-As Transect B	
0.000	21	-6.08	-0.36	-0.74	0.09	0.42	-0.55	شاخص زمین‌انباشت نیکل در ترانسکت‌ها Igeo- Ni Transect A & Igeo-Ni Transect B	
0.000	21	-5.17	-1.43	-3.35	0.46	2.17	-2.39	شاخص آلودگی آرسنیک در ترانسکت‌ها PI- As Transect A & PI-As Transect B	
0.000	21	-5.33	-0.27	-6.17	0.83	0.39	-0.44	شاخص آلودگی نیکل در ترانسکت‌ها PI- Ni Transect A & PI-Ni Transect B	

ندارد. ولی با سطح آلودگی متوسط نیکل، همخوانی دارد (۱۶). اما در پژوهش حاضر شاخص زمین‌انباشت نیز بیانگر عدم آلودگی تا آلودگی متوسط نمونه‌ها به نیکل، آرسنیک و وانادیوم بود که با توجه به این که در پژوهش حاضر ضریب غنی‌شدگی برای آرسنیک و نیکل خصوصاً آرسنیک غالباً غنی‌شدگی کم تا متوسط را نشان می‌دهد، تطابق دارد. با توجه به مقایسه سطح آلودگی متوسط نیکل و آرسنیک در پژوهش‌های فوق با پژوهش پیش‌رو، می‌توان به این نتیجه رسید که سطح آلودگی خصوصاً شاخص جامع آلودگی آرسنیک در این پژوهش، به‌ویژه در جهت باد غالب بالاست که با توجه به شدت و قدرت این باد که قادر به جابجایی حجم بالایی از گرد و غبار بوکسیت به پایین‌دست سنگ‌شکن بوکسیت را دارد، نقش مهم و مؤثر باد غالب را در پراکنش آلودگی و افزایش سطح آلودگی بیان می‌کند.

### نتیجه‌گیری کلی

نتایج به‌دست‌آمده از محاسبه و آنالیز شاخص‌های سطح آلودگی (شاخص‌های زمین‌انباشت، آلودگی، جامع آلودگی و فاکتور غنی‌شدگی) نشان می‌دهد، شاخص زمین‌انباشت که گویای میزان افزایش یک عنصر از مقدار طبیعی آن در خاک یک منطقه است، برای آرسنیک در جهت باد فرساینده، تا ۷۰۰ متر منشأ، آلودگی شدید، غیرآلوده تا آلودگی متوسط و تا انتهای ترانسکت غیرآلوده و برای نیکل تا ۳۵۰ متر، غیرآلوده تا آلودگی متوسط و تا انتهای ترانسکت، غیرآلوده بوده است. هم‌چنین بر روی ترانسکت B، برای آرسنیک تا فاصله ۴۵۰ متر از منشأ، آلودگی شدید، متوسط تا شدید و تا انتهای ترانسکت نشان‌دهنده غیرآلوده تا آلودگی متوسط و برای نیکل از مبدأ تا ۹۰۰ متر غیرآلوده تا آلودگی متوسط و از ۱۰۰۰

همان‌گونه که اشاره شد در این پژوهش نمونه‌برداری‌های خاک در امتداد دو ترانسکت در جهت بادهای فرساینده و غالب انجام شد که در مستندات علمی مروری، از دیگر روش‌های نمونه‌برداری استفاده شده است. در یافته‌های این پژوهش افزایش غلظت آرسنیک و نیکل بر روی ترانسکت‌ها در جهت باد غالب و فرساینده می‌باشد که با نتیجه مطالعه فرهمندکیا و همکاران (۲۰۱۰) در مورد فلزات سنگین در ذرات رسوب‌شونده در هوای شهر زنجان که ناشی از فعالیت‌های صنعتی است (۲۰) و پژوهش گودرزی و همکاران (۲۰۱۸) راجع به آنالیز خصوصیات شیمیایی ذرات گرد و غبار رسوب‌شونده در شهر اهواز که غلظت بیش‌تر این ترکیبات را در روزهای گرد و غباری را ناشی از تماس بیش‌تر این ذرات با آلاینده‌های صنعتی و شهری می‌داند، همخوانی دارد (۲۱). این بدان معنی است که در پژوهش‌های فوق، منطقه شاهد به لحاظ حد فلزات موردنظر، در حد استاندارد بوده است و عامل ثانویه که همانا صنعت می‌باشد در افزایش غلظت این عناصر در خاک تأثیرگذار بوده است. در مطالعه‌ای دیگر قناتی (۲۰۱۸) در خصوص به بررسی خطر فلزات سرب، روی، مس، کروم، کادمیوم، نیکل، وانادیوم، آرسنیک، کبالت و کروم بر سلامت انسانی در گرد و غبار خیابانی شهر آبادان، مقدار سطح آلودگی بر اساس میانگین شاخص ریسک، نمونه‌ها دارای سطح آلودگی متوسط بودند، که با آلودگی متوسط نیکل در محدوده مورد مطالعه در این پژوهش، همسو ولی با آلودگی بالای آرسنیک در این پژوهش غیرهمسو می‌باشد (۲۲) در پژوهشی دیگر جاویدانه و همکاران نتایج، سطح متوسط آلودگی نمونه‌ها به نیکل، آرسنیک و وانادیوم را نشان داد، که با سطح آلودگی بالای آرسنیک در این پژوهش همخوانی



ضرایب سطح آلودگی، در طول ترانسکت‌ها و فواصل تعیین شده، بیانگر این موضوع است. در نهایت می‌توان گفت با این که هر یک از ضرایب سطح آلودگی در دو جهت بادهای غالب و فرساینده تا فاصله ۵۰۰ متر از منشأ افزایش داشت. ولی شاخص آلودگی، آلودگی فلز آرسنیک در جهت باد غالب تا فاصله ۱۲۰۰ متر از منشأ را بالا و شاخص زمین انباشت تا فاصله ۹۰۰ متر، آلودگی متوسط را برای نیکل نشان می‌داد. از طرفی شاخص جامع آلودگی که نشان‌دهنده مقدار میانگین شاخص آلودگی هر عنصر است، بیانگر آلودگی بالا برای آرسنیک و آلودگی متوسط برای نیکل، در هر دو جهت باد غالب و فرساینده بوده است.

### سپاسگزاری

بدین وسیله از حمایت‌های اداره کل حفاظت محیط زیست استان خراسان شمالی، شرکت آلومینای ایران- جاجرم و هم‌چنین دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان جهت فراهم نمودن امکان انجام این پژوهش قدردانی می‌گردد.

متر تا انتهای ترانسکت غیرآلوده بوده است. باین‌که شاخص آلودگی، در جهت باد فرساینده، برای آرسنیک تا ۴۵۰ متر از مبدأ، بالا و از ۳۰۰۰-۵۰۰ متر متوسط و برای نیکل تا ۴۵۰ متر منشأ، متوسط و از ۳۰۰۰-۵۰۰ متر پایین می‌باشد و در جهت باد غالب، برای آرسنیک تا ۱۲۰۰ متر سنگ‌شکن‌های بوکسیت، بالا و تا انتهای ترانسکت (۵۰۰۰ متر) متوسط و برای نیکل تا ۱۸۰۰ متر متوسط و تا انتهای ترانسکت آلودگی پایین را نشان می‌دهد، اما شاخص جامع آلودگی بیانگر آلودگی بالا برای آرسنیک و آلودگی متوسط برای نیکل، بر روی هر دو ترانسکت می‌باشد. ضریب غنی‌شدگی نیز که نشان‌دهنده افزایش غلظت یک عنصر نسبت به غلظت طبیعی آن در پوسته، سنگ بستر یا خاک است، این ضریب، در جهت باد فرساینده، برای آرسنیک تا ۴۰۰ متر از مبدأ انتشار، متوسط و تا انتهای ترانسکت، غنی‌شدگی کم و برای نیکل در طول کل ترانسکت، غنی‌شدگی کم را نشان می‌دهد و در جهت باد غالب، تا ۲۵۰ متر غنی‌شدگی متوسط و تا انتهای ترانسکت غنی‌شدگی کم و برای نیکل در تمام طول ترانسکت غنی‌شدگی کم می‌باشد. تجزیه و تحلیل و آزمون آماری به عمل آمده و معنی‌دار بودن افزایش غلظت آرسنیک و نیکل و نیز هریک از

### منابع

1. Lasat, M. M. (2002). Phytoextraction of toxic metals: a review of biological mechanisms. *Journal of Environmental Quality*, 31(1), 109-120. <http://doi.org/10.2134/jeq2002.1090>.
2. Al-Khashman, O. A. (2004). Heavy metal distribution in dust, street dust and soils from the work place in Karak Industrial Estate, Jordan. *Atmospheric environment*, 38 (39), 6803-6812. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.09.011>.
3. Khermandar, Kh., Hossinalizadeh, M., Mahdavi, A., Mohammadian Behbahani, A., & Yeganeh, H. (2023). Investigating the Phytoremediation of Desert Plants *Seidlitzia rosmarinus* and *Haloxylon aphyllum* (Case Study: Bauxite Crusher of Jajarm Alumina Mine). *Journal of Desert Ecosystem Engineering*, 12 (38), 48-58. [In Persian]. <http://doi.org/10.22052/deej.2023.252496.1010>.
4. Hosseinalizadeh, M., Mohammadian Behbahani, A., & Khermandar, Kh. (2020). Investigating the geochemical composition of the elements in industrial bauxite crushing dust on soil and vegetation in Jajarm region. Research project between Gorgan University of

- Agricultural Sciences and Natural Resources and Jajarm Alumina. 487 p. [In Persian].
5. Hosseinalizadeh, M., Yeganeh, H., Mohammadian Behbahani, A., & Khermandar, K. H. (2023). Investigating the potential of pasture species in plant remediation of soils in the downstream area of bauxite mine crushers of Alumina Company of Iran-Jajarm. Research project between Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources and Jajarm Alumina. 511 p. [In Persian].
  6. Li, J., Li, K. M., Wang, X. H., Jiao, L., Zang, F., Mao, X. X., Yang, Y. Q., & Tai, X. S. (2023). Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou. *Huan Jing Ke Xue*, 44 (6), 3475-3487. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202206166>.
  7. Kabir, M. H., Rashid, M. H., & Wang, Q. (2022). Estimation of Pollution Levels and Assessment of Human Health Risks from Potentially Toxic Metals in Road Dust in Mymensingh City of Bangladesh. *Processes*, 10 (12), 1-21. <https://doi.org/10.3390/pr10122474>.
  8. Kabir, M. H., Rashid, M. H., Wang, Q., Wang, W., Lu, S., & Yonemochi, S. (2021). Determination of Heavy Metal Contamination and Pollution Indices of Roadside Dust in Dhaka City, Bangladesh. *Processes*, 9 (10), 1-20. <https://doi.org/10.3390/pr9101732>.
  9. Taiwo, A. M., Musa, M. O., Oguntoke, O., Afolabi, T. A., Sadiq, A. Y., Akanji, M. A., & Shehu, M. R. (2020). Spatial distribution, pollution index, receptor modelling and health risk assessment of metals in road dust from Lagos metropolis, Southwestern Nigeria. *Environmental Advances*, 2, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2020.100012>.
  10. Lin Xiong, Q., Ji Zhao, W., Li, D. J., & Zhou, T. (2018). Enrichment Levels and Comprehensive Pollution Assessment of Dust Heavy Metals in Winter in Beijing. *Huan Jing Ke Xue*, 39 (9), 4051-4059. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.201707194>.
  11. Norouzi, S., Khademi, H., Cano, A. F., & Acosta, J. A. (2016). Biomagnetic monitoring of heavy metals contamination in deposited atmospheric dust, a case study from Isfahan, Iran. *Journal Environmental Management*, 173 (15), 55-64. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.035>.
  12. Khermandar, Kh., Hossinalizadeh, M., Mahdavi, A., Mohammadian Behbahani, A., & Yeganeh, H. (2023). Ecological restoration of polluted soils in arid region (Case study: bauxite crusher of Jajarm alumina). *Desert Management*, 10 (4), 55-80. [In Persian]. <http://doi.org/10.22034/JDMAL.2023.1972534.1401>.
  13. Kalamati, A. R., Hossinalizadeh, M., Mohammadian Behbahani, A., & Rezaei, H. (2019). Impact of Fugitive Dust Emission from Bauxite Crushing Industry on Soil Contamination (Case Study: Jajarm Alumina Factory). *Journal of North Khorasan University of Medical Sciences*, 11 (2), 37-44. [In Persian]. <http://doi.org/10.52547/nkums.11.2.36>.
  14. Cao, J. J., Chow, J. C., Watson, J. G., Wu, F., Han, Y. M., Jin, Z. D., Shen, Z. X., & An, Z. S. (2008). Size-differentiated source profiles for fugitive dust in the Chinese Loess Plateau. *Atmospheric Environment*, 42 (10), 2261-2275. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.12.041>.
  15. Bardossy, G., Melfi, A. J., & Carvalio, A. (1983). A Comparison of the Main Lateritic Bauxite Region of Our Globe. P 15-51, In: Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Seminar on the Lateralization Processes.
  16. Javidaneh, Z., Zarsevandi, A., & Rast Manesh, F. (2016). Determination of geo-environmental factors and source of heavy metals in street dust, Masjed-e-Soleiman City, Khouzestan Province. *Iranian Journal of Health and Environment*, 9 (2), 155-170. [In Persian]. <http://ijhe.tums.ac.ir/article-1-5376-en.html>.
  17. Muller, G. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of Rhine River. *Geology Journal*, 2 (3), 108-118.

18. Lu, X., Wang, L., Lei, K., Huang, J., & Zhai, Y. (2009). Contamination assessment of copper, lead, zinc, manganese and nickel in street dust of Baoji, NW China. *Journal of Hazardous Materials*, 161 (2), 1058-1062. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.052>.
19. Ridgwell, A. J. (2003). Implications of the glacial CO<sub>2</sub> iron hypothesis for quaternary climate change. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(9), 1-10. <https://doi.org/10.1029/2003GC000563C>.
20. Farahmandkia, Z., Mahra Sabi, M. R., Sekhavatjoo, M. S., Hasanalizadeh, A. Sh., & Ramezanzadeh, Z. (2010). Study of Heavy Metals in the Atmospheric deposition in Zanjan, Iran. *Iranian Journal of Health and Environment*, 2 (4), 240-249. [In Persian].
21. Goodarzi, G. H., Asgharipour Dashtbozorg, N., Naimabadi, A., Ghorbanpoor, R., Hedari, M., Hashemzadeh, B., & Mohammadi, M. J. (2018). Analysis of Chemical Properties of Precipitating Particles in Ahvaz. *Iranian Journal of North Khorasan University of Medical Sciences*, 9 (4), 56-65. [In Persian]. <http://doi.org/10.29252/nkjmd-09049>.
22. Ghanavati, N. (2018). Human health risk assessment of heavy metals in street dust in Abadan. *Iranian Journal of Health and Environment*, 11 (1), 63-74. [In Persian].

