

Environmental Studies of Soil Pollution in Alteration and Mineralization Areas (Case Study Northwest Meshginshahr)

Alireza Saffari

PhD Candidate in Economic Geology, University of Tabriz, Iran.

Seyyed Ghafoor Alavi

* Assistant Professor, Department of Earth Sciences, Economic Geology, University of Tabriz, Iran. (Corresponding Author)
ghafour_alavi@tabrizu.ac.ir

Abstract

Background and purpose: Soils in northwest Meshginshahr, influenced by alteration and mineralization processes, exhibit elevated concentrations of toxic and heavy elements, resulting in significant pollution. This study evaluates the environmental sources of soil contamination in alteration and mineralization zones within the region.

Materials and Methods: A combination of library-based research and field investigations was utilized. Hydrographic maps of the region were prepared using topographic maps (1:250,000 and 1:50,000) and aerial photographs (1:20,000). Soil sampling targeted agricultural, orchard, rangeland, and barren soils overlying rocks and mineralized zones, with 70 selective surface soil samples collected from the root penetration zone. Each sample (~1 kg) was divided, retaining 500 g as a reference and sending the remaining portion for chemical analysis. Concentrations of 47 critical elements were determined using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS).

Results: Comparison of soil analysis data with environmental standards revealed significant contamination, particularly with gold, iron, vanadium, sulfur, and arsenic, alongside other elements exceeding permissible limits. The pollution index (PI) indicated that 55.7% of the samples were classified as polluted (PI > 1).

Conclusion: The alignment of elemental concentrations with environmental standards, enrichment factors, and pollution indices suggests extensive pollution in the studied soils. Mitigation strategies, including soil excavation and relocation, physical remediation (e.g., soil washing and flushing), and biological remediation (e.g., slurry bioremediation, in-situ/ex-situ stabilization, and resistance-based bioremediation), are recommended to address the contamination.

Keywords: Pollution, Alteration, Mineralization, Environmental, Soil, Meshginshahr

Open Access Policy: This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Received: 2024/05/24

Accepted: 2024/10/21

Doi:10.22038/jreh.2025.25643

► **Citation:** Saffari A, Alavi S.Gh. Environmental Studies of Soil Pollution in Alteration and Mineralization Areas (Case Study Northwest Meshginshahr). *Iranian Journal of Research in Environmental Health*. Winter 2025; 10(4):36-53.

مطالعات زیست‌محیطی منبع آلودگی خاک در مناطق دگرسانی و کانی‌سازی

(مورد پژوهی: شمال غرب مشگین‌شهر)

علیرضا صفاری

دانشجوی دکتری زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

سیدغفور علوی

* استادیار گروه علوم زمین، زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. (نویسنده مسئول)
ghafour_alavi@tabrizu.ac.ir

چکیده

زمینه و هدف: خاک شمال غرب مشگین‌شهر که در معرض فرایندهای کانی‌سازی و دگرسانی قرار گرفته‌اند، حاوی مقادیر زیادی عناصر سمی و سنگین هستند که موجب آلودگی این منطقه می‌گردد. بر این مبنا هدف پژوهش حاضر مطالعات زیست محیطی منابع خاک در مناطق دگرسانی و کانی‌سازی در شمال غرب مشگین‌شهر می‌باشد.

مواد و روش‌ها: در پژوهش حاضر به فراخور نیاز از مطالعات کتابخانه‌ای، میدانی بهره برده شده است. بدین‌گونه با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی (۱:۵۰۰۰۰، ۱:۲۵۰۰۰) و مطالعه‌ی عکس‌های هوایی (۱:۲۰۰۰۰) نقشه هیدروگرافی منطقه تهیه شد. در ادامه نیز به نمونه‌برداری خاک و آماده‌سازی آن پرداخته شد. برای تجزیه‌ی شیمیایی خاک‌های زراعی، باغی، مرتعی و لم یزرع روی سنگ‌ها و زون‌های کانی‌سازی و دگرسانی این منطقه، از حدود ۷۰ نقطه نمونه به‌صورت انتخابی تهیه شد. نمونه‌های خاک از افق سطحی یعنی محل نفوذ ریشه برداشته شده است. بعد از برداشت نمونه‌های خاک به وزن تقریبی یک کیلوگرم، ۵۰۰ گرم آن به‌عنوان نمونه شاهد نگهداری و ۵۰۰ گرم آن نیز به آزمایشگاه جهت تجزیه‌ی شیمیایی منتقل شد. لازم به ذکر است نمونه‌ها به روش ICP-MS مورد تجزیه‌ی شیمیایی قرار گرفته و مقادیر ۴۷ عنصر مهم مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.

یافته‌ها: مقایسه‌ی نتایج به‌دست آمده از تجزیه‌ی خاک‌های منطقه با مقادیر مجاز و استانداردهای زیست محیطی موجود نشان داد که آلودگی خاک‌ها به عناصر طلا، آهن، وانادیوم، گوگرد، و آرسنیک شدید بوده و غلظت بسیاری از عناصر دیگر نیز از مقادیر استاندارد بیشتر است. بر اساس مقادیر شاخص آلودگی به‌کار رفته در پژوهش ۵۵/۷ درصد از نمونه‌ها با $PI > 1$ آلوده محسوب می‌شوند.

نتیجه‌گیری: با توجه به تشابهات نتایج مقایسات غلظت عناصر با استانداردها و حدود مجاز آن‌ها، فاکتورهای غنی‌ساز و شاخص‌های آلودگی می‌توان نتیجه گرفت که بیشتر نمونه‌های تجزیه‌شده از خاک منطقه مورد مطالعه آلوده هستند. با توجه به نتایج پژوهش پیشنهاد می‌گردد نسبت به خاک‌برداری و جابه‌جایی، بهسازی فیزیکی (شست‌وشوی خاک، فلاشینگ خاک) و بهسازی‌های بیولوژیکی (تجزیه بیولوژیکی دوغابی، بهسازی بیولوژیکی نابرجا و برجا بهسازی به روش مقاوم‌سازی و پایدارسازی) اقدام گردد.

کلیدواژه‌ها: آلودگی، دگرسانی، کانی‌سازی، زیست محیطی، خاک، مشگین‌شهر

◀ **استناد:** صفاری، ع.، علوی، س.غ. مطالعات زیست‌محیطی منبع آلودگی خاک در مناطق دگرسانی و کانی‌سازی (مورد پژوهی: شمال غرب مشگین‌شهر). فصلنامه‌ی پژوهش در بهداشت محیط. زمستان ۱۴۰۳؛ ۱۰(۴): ۳۶-۵۳.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۳۰

نوع مقاله: پژوهشی

آلودگی محیط زیست یکی از مهم‌ترین مشکلاتی است که سلامت و امنیت غذایی جامعه را تهدید می‌کند (۱). توسعه صنایع و فعالیت‌های انسانی عامل اصلی این مشکلات می‌باشد (۲). در جهان امروز با پیشرفت تکنولوژی آلودگی‌های محیط زیست نیز افزایش قابل توجهی داشته‌اند. در این میان آلودگی خاک یکی از انواع آلودگی‌ها می‌باشد خاک در تولید مواد غذایی نقش عمده‌ای دارد و هم‌چنین به‌عنوان عاملی در پاکسازی طبیعت به‌کار می‌رود. آلودگی خاک‌های کشاورزی سبب ورود آلاینده‌ها به زنجیره غذایی می‌گردد. در واقع خاک، بستری برای رشد گیاهان و اکوسیستمی منحصر به فرد می‌باشد. سلامت خاک عامل مهمی در سلامت محیط زیست و جامعه است. هم‌اکنون آلودگی خاک‌ها به‌خصوص خاک‌های کشاورزی به سموم، فلزات سنگین و سایر آلاینده‌ها سبب نگرانی‌ها در سطح جهانی شده است (۳). خاک، یکی از منابع زمین به‌شمار می‌رود در اکثر نقاط محیط زیست پیرامون انسان وجود دارد و علاوه بر تأمین مواد غذایی، نقش پایداری و تصفیه‌کنندگی نیز دارد (۴). منابع آلودگی، اساساً به دو گروه زمین‌زاد و انسان‌زاد تقسیم‌بندی می‌شوند. منابع زمین‌زاد شامل آلودگی‌های ناشی از سازندهای زمین‌شناسی، اندیس‌های معدنی، چشمه‌های معدنی، منابع آب‌شور و لب‌شور است و از آلودگی‌های انسان‌زاد می‌توان به فعالیت‌های صنعتی، حمل‌ونقل، مصرف کودهای کشاورزی، فعالیت‌های معدن‌کاری و پسماندها و پساب‌ها اشاره کرد (۵). خاک منبع طبیعی فلزات سنگین و دیگر عناصر شیمیایی است و فعالیت‌های بشری نیز موجب افزایش چند برابری غلظت فلزات سنگین در خاک شده (۶) و یک تهدید روزافزون برای سلامتی و همین‌طور کاهش کیفیت محیط‌زیست انسانی می‌باشد (۷). آلودگی فلزات سنگین از مهم‌ترین معضلات جهانی آلودگی خاک می‌باشد که با فعالیت‌های انسانی از قبیل معدن‌کاو، صنایع فلزی و شیمیایی، وسایل نقلیه فرسوده و غیره در ارتباط است (۸). از طرف دیگر کانی‌سازی و دگرسانی‌های حاصل از آن‌ها، تغییرات مهمی را در ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی سنگ‌های اولیه به‌وجود می‌آورد و باعث آزادسازی و تمرکز برخی از عناصر فلزی سمی و سنگین در محیط می‌شود. لذا در چنین مناطقی گسترش و پراکندگی

عناصر سمی در منابع آب، خاک و گیاه و ایجاد آلودگی‌های زیست محیطی دور از انتظار نیست. بنابراین تخریب سنگ‌های مناطق کانی‌سازی و دگرسانی می‌تواند به‌عنوان مرکزی برای آلودگی‌های غیرمتمرکز طبیعی تلقی شود. از آن‌جا که زون قره‌داغ- طارم در شمال غرب کشور به‌عنوان یک زون فلززایی (دارای مناطق کانی‌سازی و دگرسانی‌های وسیع) مطرح است و در برخی از مناطق آن نیز فعالیت‌های معدنی وسیعی انجام گرفته و یا در حال انجام است، بررسی امکان آلودگی این گونه مناطق از دیدگاه زیست محیطی و مشکلات به‌وجود آمده در منابع آبی و خاکی آن‌ها ضروری به‌نظر می‌رسد، چرا که فلزات سنگین و سمی نهایتاً در خاک تجمع یافته و از طریق گیاهان و یا آب وارد چرخه غذایی دام و انسان می‌شوند (۹). مطالعات زیادی در ایران و در سایر نقاط جهان در خصوص گسترش و تغلیظ عناصر فلزی و غیر فلزی سمی در منابع خاک صورت گرفته است. به‌عنوان مثال می‌توان به نتایج برخی از این منابع اشاره کرد:

حاجی‌زاده و همکاران، آب‌های زیرزمینی منطقه‌ی فیروزآباد شاهرود را از دیدگاه زیست محیطی مورد ارزیابی قرار داده و به این نتیجه رسیده‌اند که ترکیب سنگ‌شناسی افیولیت‌ها بر کیفیت آب‌های منطقه تأثیر منفی داشته است (۱۰). سیستانی و همکاران نیز آلودگی فلزات سنگین بر روی خاک‌های مجاور صنایع فولاد را مطالعه کردند. نتایج آنالیز و بررسی شاخص‌های آلودگی خاک نشان داد که ۹۰ درصد نمونه‌ها دارای آلودگی متوسط تا قابل‌توجه به عنصر سرب هستند (۱۱). فلاح و همکاران خاک منطقه شهری کرج را از نظر فلزات سنگین مورد ارزیابی قرار دادند و نتایج نشان داد که مقدار سرب در نمونه‌های سطحی خاک بیشتر از سایر عناصر است. آرسنیک در مرکز و جنوب شهر کرج دارای بیشترین مقدار است. غلظت زیاد سرب و گوگرد در نمونه‌های سطحی برداشت‌شده از این محدوده مؤید این موضوع است که این عناصر منشأ انسان‌زاد دارند. نتایج مطالعه‌ی آلودگی عناصر سنگین معدنی در منطقه کوه زر (شمال شرق ایران) در خاک‌های کشاورزی و منطقه‌ی معدنی نشان دادند که شاخص تجمع جغرافیایی برای عنصر کادمیوم در همه‌ی نمونه‌ها بسیار

بالا و فاکتور غنی‌شدگی نیز مقدار بسیار بالایی را نشان می‌دهد که در اثر فعالیت‌های معدنی معدن طلا در منطقه می‌باشند (۱۲). جمشیدی و همکاران آلودگی خاک‌های شرق شهرستان ازنا (استان لرستان) به فلزات سنگین را بررسی کردند. نتایج مطالعات این پژوهشگران نشان داد که منطقه‌ی بررسی شده، آلودگی کلی نسبت به فلزات سنگین ندارد ولی غلظت برخی از فلزات به صورت نقطه‌ای در برخی از نقاط بسیار بالاست. آن‌ها بیان کردند در صورت منشأ طبیعی آلودگی (سنگ و خاک) می‌توان از این نقاط به‌عنوان نقاط دارای پتانسیل معدن کاری استفاده کرد (۱۳). در مطالعه‌ای که بر روی آلودگی فلزات سنگین در محدوده‌ی معدن فعال سرب-روی و مس کویول هیسار در ترکیه که توسط کسکین و توپتاس انجام گرفت، نشان داده شد که اکسیداسیون کانیهای سولفیدی باعث تولید آب‌های اسیدی با مقادیر بالای سولفات و آهن شده است (۱۴). بررسی آلودگی ۸ فلز سنگین در یک شهرک صنعتی واقع در شمال چین توسط لی نشان داد که غلظت فلزات سرب، کادمیوم و مس فراتر از میزان پس زمینه مورد مطالعه است (۱۵).

نورا و همکاران، توزیع مقدار عنصر آرسنیک را در خاک و محصولات کشاورزی، به‌منظور اندازه‌گیری میزان تأثیر آبیاری با آب‌های زیرزمینی غنی از آرسنیک بر روی سیستم خاک-گیاه و نیز میزان تأثیر آن بر سلامتی انسان و محیط زیست، مورد بررسی قرار داده‌اند. این مطالعه در دلتای بنگال که یک ناحیه کشاورزی با کاربرد شدید کودهای شیمیایی است، انجام گرفته و نتایج به‌دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که آبیاری بیش از اندازه محصولات کشاورزی (برنج و گندم) با آب زیرزمینی که محتوی بیش از ۵۰۰ میکروگرم بر لیتر آرسنیک است، سبب غنی‌شدن خاک‌های لایه‌های فوقانی به‌میزان چهار برابر مقدار زمینه شده است (۱۶). چپو من و جیو، غلظت عناصر فلزی سنگین و کمیاب را در آب‌های زیرزمینی دامنه‌های طبیعی و مناطق شهری هنگ کنگ مطالعه کرده و تأثیرات سوء مس را مورد ارزیابی قرار داده‌اند (۱۷). بررسی سوابق تحقیق بیان‌کننده‌ی این مطلب است که مراکز متمرکز و غیرمتمرکز می‌توانند در تغلیظ عناصر سمی فلزی، شبه‌فلزی و غیرفلزی در منابع آب، خاک و گیاه موثر باشند و با وارد کردن این عناصر به چرخه‌ی زیستی، اثرات سوء

زیست‌محیطی زیادی را به‌وجود آورند. این اثرات زمانی که در مناطق غیرمتمرکز معدنی و به‌ویژه با فعالیت‌های استخراج و فرآوری همراه باشد تأثیرات محسوسی خواهد داشت. از آن‌جا که در منطقه‌ی مورد مطالعه منبع آلوده‌کننده‌ی خاک از نوع غیرمتمرکز بوده و هیچ‌گونه بررسی علمی زیست‌محیطی در آن تا به حال صورت نگرفته، لذا انجام این تحقیق جهت شناخت کمیت و کیفیت آلودگی ضروری به‌نظر می‌رسد. هم‌چنین با توجه به این‌که بخش وسیعی از شمال‌غرب کشور به‌ویژه امتداد زون قره‌داغ- طارم را مناطق دگرسانی و کانی‌سازی تشکیل می‌دهند بدیهی است که مطالعه‌ی موردی این منطقه (به‌عنوان یک منطقه‌ی پایلوت آزمایشی) می‌تواند بسیار سودمند باشد. هدف از انجام این پژوهش بررسی میزان آلودگی خاک منطقه‌ی مورد مطالعه و نیز تعیین منشأ این آلودگی است. بر این اساس با نمونه‌برداری از خاک و تجزیه شیمیایی آن‌ها میزان تغییرات عناصر سمی مورد بررسی قرار گرفت.

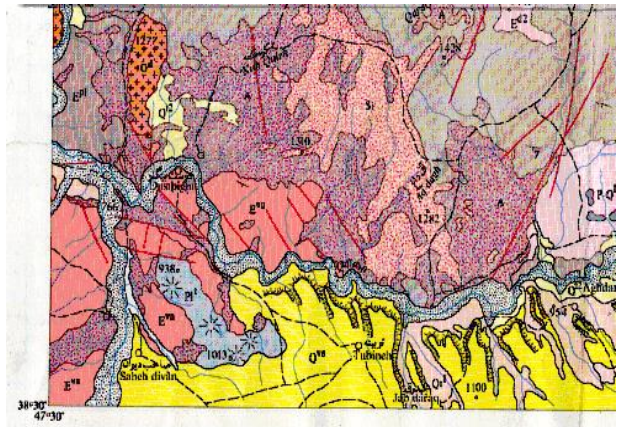
روش کار

موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه

محدوده‌ی مطالعاتی در شمال و شمال‌غرب آتشفشان سبلان و در قسمتی از دامنه‌های جنوبی رشته کوه‌های آذربایجان- البرز غربی در شمال‌غرب شهرستان مشگین‌شهر در یک ناحیه نسبتاً کوهستانی واقع شده است. رشته کوه‌های این منطقه تقریباً دارای دو روند هستند؛ یک روند آن دارای جهت غربی- شرقی و روند دیگر دارای جهت شمال‌غربی- جنوب‌شرقی است. شیب مورفولوژی در کل منطقه تند است. البته در نواحی اطراف رودخانه‌ی قره‌سو تراس‌های آبرفتی تشکیل شده است که این تراس‌ها نسبت به مناطق دیگر ارتفاع کمتری داشته و در نتیجه پست‌تر از نقاط دیگر منطقه هستند. بلندترین نقطه‌ای که در منطقه‌ی دوست‌بیگلو و پیرامون آن وجود دارد قلعه ارشق، با ارتفاع ۱۳۱۰ متر از سطح دریا است و پست‌ترین نقطه نیز مربوط به کف رودخانه‌ی قره‌سو با ارتفاع حدود ۸۰۰ متر از سطح دریا است. محدوده‌ی معدنی و دگرسانی شمال مشگین‌شهر تحت عنوان منطقه‌ی دوست‌بیگلو در ۲۷ کیلومتری شمال‌غرب شهرستان مشگین‌شهر، بین طول‌های جغرافیایی $32^{\circ} 12'$ تا $47^{\circ} 9'$ و عرض‌های جغرافیایی $38^{\circ} 46'$ تا $34^{\circ} 25'$

پیمایش و پی جویی سطح منطقه و با استفاده از عکس‌های هوایی ۱:۵۰۰۰۰ و نقشه‌های توپوگرافی، اقدام به تهیه نقشه‌ی زمین‌شناسی و دگرسانی شد. به این صورت که کلیه‌ی واحدهای زمین‌شناسی اعم از واحدهای سنگی-رسوبی، ولکانیک‌ها و پلوتونیک، ساختارهای تکتونیکی، آثار کانی‌سازی و محل نمونه‌های برداشت‌شده، بر روی نقشه‌های پایه مشخص شد. با توجه به اهمیت مشخص کردن ارتباط دگرسانی‌ها و کانی‌سازی موجود با منابع آب و خاک سعی شد منطقه دگرسانی با استفاده از داده‌های موجود و با دقت زیاد تفکیک شد. در این مرحله از نتایج مطالعات پتروگرافی، مینرالوگرافی، XRD و ICP انجام گرفته توسط سازمان صنایع و معادن استان استفاده شد (۱۸)، در مرحله‌ی بعدی نیز به نمونه‌برداری خاک و آماده‌سازی آن پرداخته شد. لازم به ذکر است با توجه به این‌که خود ناحیه‌ی پیلوتی که برای مطالعه انتخاب شده بود به چند زیر ناحیه تقسیم شده بود و علت آن هم تعدد نواحی دگرسانی است و با عنایت به این‌که یکی از اهداف این پژوهش تاثیر هر کدام از انواع دگرسانی‌ها بر روی آلودگی خاک منطقه می‌باشد. هر کدام از این نواحی دگرسانی دارای اشکال نامنظم و مساحت مختلف است و گاهی حتی پراکندگی یک نوع دگرسانی در سطح منطقه منظم نبود به طوری که یک نوع دگرسانی در بخش‌های مختلفی از ناحیه پیلوت مشاهده شد، لذا در جهت رسیدن به هدف پژوهش روش نمونه‌برداری به صورت انتخابی بود. برای تجزیه‌ی شیمیایی خاک‌های زراعی، باغی، مرتعی و لم‌بزرع روی سنگ‌ها و زون‌های کانی‌سازی و دگرسانی این منطقه، نمونه‌های دست‌خورده از حدود ۷۰ نقطه به صورت انتخابی تهیه شد. نمونه‌های خاک از افق سطحی یعنی محل نفوذ ریشه برداشته شد. علاوه بر نتایج شیمیایی ۷۰ نمونه انتخابی فوق، از داده‌های ۳۷۵ نمونه سنگ (۱۹) جهت تعیین منشأ آلودگی‌ها استفاده شد. بعد از برداشت نمونه‌های خاک به وزن تقریبی یک کیلوگرم، ۵۰۰ گرم آن به‌عنوان نمونه‌ی شاهد نگهداری و ۵۰۰ گرم آن نیز به آزمایشگاه جهت تجزیه‌ی شیمیایی منتقل شد. در موقع نمونه‌برداری وسایل حفاری و برداشت بعد از هر نمونه‌برداری کاملاً تمیز و پاک‌سازی گردید. جهت نگهداری و انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه از کیسه‌های

۳۸° واقع شده است. این محدوده در یک ناحیه‌ی کوهستانی تا تپه ماهوری در شمال و شمال‌شرق روستای دوست‌بیگلو و نیز شرق و شمال‌شرق قشلاق ذخور قرار گرفته است. شکل ۱ موقعیت محدوده‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت محدوده‌ی مورد مطالعه به همراه نقشه‌ی زمین‌شناسی، A: زون‌های دگرسانی آرژبلیکی و فلیک، S: سیلیسی، Epl، E d2، E va: آذرآوری‌ها و گدازه‌های ائوسن، Qd: توده‌های نیمه‌نفوذی و Qvc، Qtl و Qal: نهشته‌های کواترنری

روش پژوهش

در پژوهش حاضر به فراخور نیاز از مطالعات کتابخانه‌ای، میدانی بهره برده شده است. بدین‌گونه که طی انجام این مطالعه پس از گردآوری اطلاعات قبلی، محدوده‌های دگرسان شده و کانی‌سازی با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰۰، ۱:۵۰۰۰۰ و عکس‌های هوایی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ به همراه اطلاعات زمین‌شناسی تهیه شد. در این نقشه‌ها ضمن ترسیم همبری لیتولوژی‌های مختلف و پدیده‌های کانی‌سازی و دگرسانی حاصل از آن‌ها، ساختارهای تکتونیکی مهم هم‌چون گسل‌ها مشخص شدند. ضمن مطالعه‌ی عکس‌های هوایی و نقشه‌های توپوگرافی موجود، نقشه‌ی هیدروگرافی منطقه تهیه و در آن رودخانه‌ها، آب‌راه‌ها، چشمه‌ها و چاه‌های آب موجود نشان داده شدند. بعد از جمع‌آوری اطلاعات و داده‌های قبلی موجود و مطالعه‌ی آن‌ها و تهیه‌ی نقشه‌های پایه و مقدماتی مطالعات میدانی انجام شد. در این خصوص به کنترل و اصلاح نقشه‌های تهیه شده بر اساس بازدیدهای صحرائی پرداخته شد. در این مرحله با

مقاوم در برابر رطوبت استفاده شد. نمونه‌ها به روش ICP-
Ms مورد

تجزیه‌ی شیمیایی قرار گرفته و مقادیر ۴۷ عنصر مهم مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. عناصر فلزی تعیین‌شده عبارتند از (کلسیم^۱، آهن^۲، آلومینیوم^۳، وانادیم^۴، استرانسیم^۵، قلع^۶، مولیبدن^۷، سرب^۸، نیکل^۹، کادمیم^{۱۰}، لیتیوم^{۱۱}، مس^{۱۲}، کروم^{۱۳}، کبالت^{۱۴}، رنیوم^{۱۵}، برلیوم^{۱۶}، نقره^{۱۷}، تیتانیوم^{۱۸}، منگنز^{۱۹}، منیزیم^{۲۰}، روی^{۲۱}) هم‌چنین برای تعیین شدت آلودگی خاک و هم‌چنین مشخص کردن پتانسیل آلودگی چند عنصری شاخص‌های آلودگی^{۲۲} محاسبه شده‌اند. اگرچه معادله‌های PI متفاوت هستند اما مفهوم مشابهی دارند. یعنی PI به صورت نسبت غلظت عناصر فلزی در نمونه‌ها به حد مجاز مفروض فلزات تعریف می‌شود. در این مطالعه از رابطه‌ی پیشنهادی جونگ برای محاسبه PI استفاده شده است به صورت زیر:

$$PI = \frac{\frac{As}{20} + \frac{Cu}{100} + \frac{Zn}{300}}{3}$$

اندیس آلودگی‌های فوق جهت مشخص کردن میزان مسمومیت‌های چند عنصری مورد استفاده قرار می‌گیرد (۲۰). بر این اساس شاخص چند عنصری بزرگتر از ۱ نشان‌دهنده آلودگی است. جهت محاسبه میزان آلودگی عناصر فلزی در سال‌های گذشته به‌طور گسترده از فاکتورهای غنی‌سازی^{۲۳} (EF:Enrichment factors) نیز استفاده می‌شود (۲۱). این فاکتور براساس نسبت غلظت یک عنصر به غلظت متوسط آن در پوسته محاسبه می‌شود. ارزیابی‌های مبتنی بر مقادیر فاکتورهای غنی‌سازی نسبت به مقادیر حداکثر مجاز پندیس و کاباتا (۲۲) و یا مقادیر رهنمود اسوارتجس (۲۳) مناسب‌تر است، چرا که فاکتورهای

غنی‌سازی به‌خوبی بیانگر تغییرات زمین‌شناسی (نوع سنگ، دگرسانی و کانی‌سازی) و تاثیرات انسانی هستند. این فاکتورها بیشتر نسبت به عناصری مانند آلومینیوم، آهن، تیتانیوم و یا زیرکونیوم که تحرک کمتری دارند، محاسبه می‌شوند. در این مطالعه فاکتور غنی‌سازی براساس تیتانیوم و به صورت زیر محاسبه شده است:

$$EF = \frac{\left(\frac{X}{Ti}\right)_{\text{Soil}}}{\left(\frac{X}{Ti}\right)_{\text{Crust}}}$$

غلظت تیتانیوم پوسته ۳۱۱۷ میلی‌گرم در کیلوگرم در نظر گرفته شده است (۲۴). هر چه فاکتور غنی‌سازی بزرگتر باشد آلودگی بیشتر است.

هم‌چنین به منظور مقایسه‌ی میانگین غلظت عناصر در گروه‌های مختلف خاک با مقدار استاندارد از آزمون T استفاده شده است. در جداول این آزمون آماره t بر اساس رابطه $t =$

$\frac{\text{استاندارد - میانگین}}{\text{معیار انحراف}}$ محاسبه شده و با استفاده از مقادیر درجه

آزادی سطح معنی‌دار بودن آزمون تعیین شده است. مقادیر ستون‌های با عناوین پایین و بالا، به ترتیب کران بالا و پایین فاصله اطمینان ۹۵٪ برای (استاندارد - میانگین) را نشان می‌دهند، به عبارت دیگر با اطمینان ۹۵٪، مقدار واقعی (استاندارد - میانگین) در فاصله ارقام (بالا، پایین) قرار می‌گیرد. در ادامه به رفتار ژئوشیمیایی عناصر (طلا، آهن، وانادیم، گوگرد و آرسینگ) در خاک پرداخته می‌شود.

یافته‌ها

بعد از اتمام مطالعات میدانی و دریافت نتایج حاصل از تجزیه‌ی شیمیایی، داده‌های به‌دست آمده از این مطالعات مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در این بخش به نحوه‌ی

¹³ Cr

¹⁴ Co

¹⁵ Re

¹⁶ Be

¹⁷ Ag

¹⁸ Ti

¹⁹ Mn

²⁰ Mg

²¹ zn

²² EF:Enrichment Factors

¹ Ca

² Fe

³ AL

⁴ V

⁵ sr

⁶ Sn

⁷ Mo

⁸ pb

⁹ Ni

¹⁰ Cd

¹¹ Li

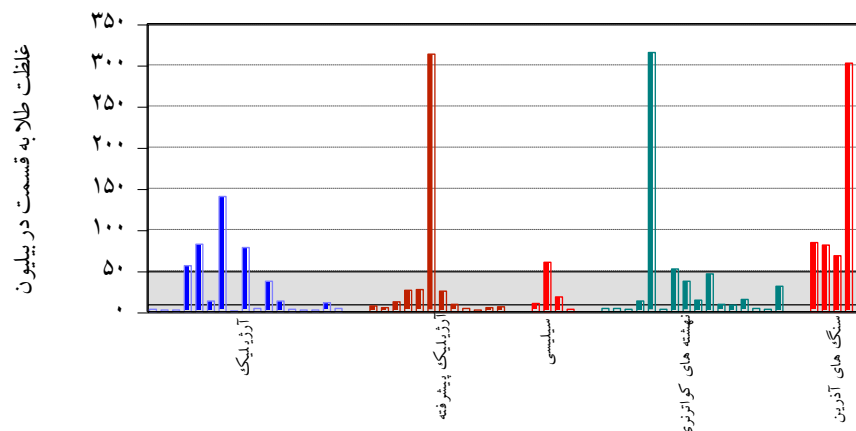
¹² Cu

تا ۲۰ ppb در نظر گرفته شود (۲۶) ۴۳ نمونه (۷۸/۲ درصد از نمونه‌ها) غلظت عادی و ۱۲ نمونه (۲۱/۸ درصد از نمونه‌ها) نیز غلظت بحرانی خواهند داشت. هر چند این عنصر جزء عناصر مسمومیت‌زا طبقه‌بندی شده است (۲۷). ولی حد بحرانی قطعی برای این عنصر تعریف نشده و از اثرات بهداشتی مصرف بیش از حد آن نیز اطلاعات چندانی در دست نیست. در شکل ۲ نتایج تجزیه‌ی شیمیایی نمونه‌های خاک برای عنصر طلا، نوار خاکستری رنگ محدوده نرمال (۱۰-۵۰ ppb) نشان داده شده است.

تجزیه و تحلیل این نتایج پرداخته می‌شود. جهت مطالعه میزان آلودگی نمونه‌های خاک در زون‌های مختلف دگرسانی، مقادیر عناصر مختلف با استانداردهای موجود برای خاک‌ها مورد مقایسه قرار گرفت و شدت آلودگی آن‌ها تعیین شد.

طلا

ریدما غلظت عادی طلا در خاک را ۱۰ تا ۵۰ (ppb) تعیین کرده است. بر اساس این استاندارد ۱۲ نمونه از ۵۵ نمونه خاک تجزیه‌شده (۲۱/۸ درصد از نمونه‌ها) دارای بیش از ۵۰ ppb طلا هستند (۲۵). مقدار متوسط طلا در خاک‌ها را ۰/۰۰۱ میلی‌گرم در کیلوگرم پیشنهاد کرده است. بر اساس این استاندارد به جز یک نمونه که غلظت طلا در آن با این استاندارد برابر است در بقیه نمونه‌ها غلظت طلا بیش از این مقدار است. همچنین اگر غلظت عادی عنصر طلا در خاک ۱



شکل ۲. نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های خاک برای عنصر طلا، نوار خاکستری رنگ محدوده نرمال (۱۰-۵۰ ppb)

اما در سطح بالای ۵٪ بین مقادیر آن و استاندارد ۲۰ ppb اختلاف‌ها معنی‌دار است. اختلاف معنی‌دار بین خاک‌های روی سنگ‌های آذرین با مقدار استاندارد در سطح فراتر از ۱٪ به دلیل غلظت پایین آن در این گروه از خاک‌ها است (جدول ۱). مقادیر منفی اختلاف میانگین در تمام نمونه‌ها نشان‌دهنده غلظت کم میانگین غلظت طلا در خاک‌های منطقه نسبت به استاندارد مورد نظر است.

مقایسه مقادیر میانگین غلظت عنصر طلا در خاک‌های روی زون‌های دگرسانی و لیتولوژی‌های مختلف با مقادیر استانداردهای موجود و با استفاده از آزمون تی-تک نمونه^۱ نشان می‌دهد که با قبول مقدار ۲۰ ppb طلا به‌عنوان حد استاندارد این عنصر در خاک، اختلاف معنی‌دار بین میانگین غلظت‌ها و مقدار آزمون در خاک‌های روی زون‌های دگرسانی آرزبلیک پیشرفته، آرزبلیک و رسوبات کوتاه‌تری وجود ندارد.

¹ One sample T test

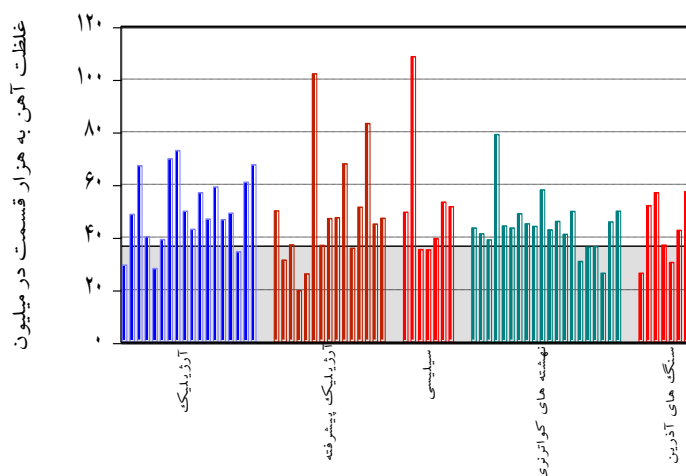
جدول ۱. نتیجه مقایسه میانگین غلظت عنصر طلا در خاک‌های مختلف با مقدار آزمون (۵۰ ppb) به روش T

زون زیر خاک	آماره آزمون	درجه آزادی	سطح معنی دار بودن آزمون	اختلاف میانگین	فاصله اطمینان ۹۵٪
آرژلیک	-۲/۴۱۸	۱۶	۰/۰۲۸	-۲۳/۳۵۲	پائین -۲/۸۸
آرژلیک پیشرفته	-۰/۵۱۵	۱۱	۰/۶۱	-۱۳/۲۵	پائین -۶۸/۸۳۹
سیلیسی	-۲/۱۳۱	۳	۰/۱۲۳	-۲۷/۱۵	پائین -۶۷/۹۵
رسوبات کواترنری	-۰/۷۸۲	۱۵	۰/۴۴۶	۱۴/۹۳۷	بالا ۲۵/۷۶۴
سنگ‌های آذرین	۰/۹۹۵	۵	۰/۳۶۶	۴۳/۵	بالا -۶۸/۹۰۴

آهن

عیار عادی آهن در پوسته زمین ۵۰۰۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم است (۲۸ و ۲۵). مقدار متوسط آهن در خاک را ۳۷۰۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم تعیین کرده است. بر این اساس ۵۲ نمونه (۷۴ درصد) دارای غلظت بیش از این مقدار هستند. اما به عقیده بوون (۱۹۷۹)، مقدار متوسط آهن در خاک ۴۰۰۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم است که با فرض این مقدار به‌عنوان حد استاندارد، ۴۸ نمونه (۶۸/۵ درصد)، دارای غلظت بیشتر از حد استاندارد تعیین‌شده توسط بوون هستند. این عنصر نیز مانند

آلومینیوم در حالت عادی بی‌خطر است. مقادیر استاندارد که نشان‌دهنده آلوده بودن خاک به این عنصر باشد اعلام نشده است. از سوی دیگر آهن یک عنصر ضروری در تغذیه انسان است ولی مصرف آن در مقادیر زیاد باعث هموکروماتوزیس و مسمومیت در کودکان می‌شود (۲۹). در شکل ۳ نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های خاک برای عنصر آهن، نوار خاکستری رنگ محدوده غلظت عادی (۳۷۰۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) آورده شده است.



شکل ۳. نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های خاک برای عنصر آهن، نوار خاکستری رنگ محدوده غلظت عادی (۳۷۰۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم)

و نهشته های کواترنر در سطح فراتر از ۰/۰۱ معنی دار است (جدول ۲).

مقایسه میانگین غلظت آهن در خاک‌های منطقه با مقدار متوسط ۳۷۰۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نشان می‌دهد که اختلاف بین میانگین غلظت آهن خاک‌های روی زون‌های مختلف با میانگین آزمون، برای خاک‌های روی زون آرژلیکی

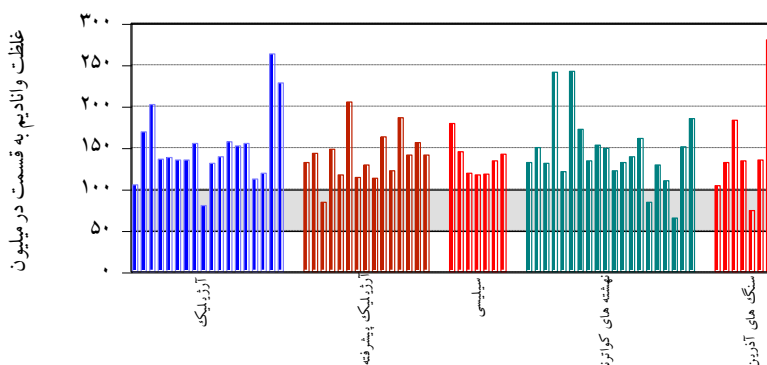
جدول ۲. نتیجه مقایسه میانگین غلظت آهن در خاک‌های مختلف با مقدار آزمون (۳۷۰۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) به روش T

زون زیر خاک	آماره آزمون	درجه آزادی	سطح معنی‌دار بودن آزمون	اختلاف میانگین	فاصله اطمینان ۹۵٪	
					پائین	بالا
آرژیلیک	۴/۱۶۳	۱۷	۰/۰۰۱	۱۳۴۵۰	۶۶۳۴/۲۹۵	۲۰۲۶۵/۷۰۵
آرژیلیک پیشرفته	۲/۰۵۲	۱۴	۰/۰۵۹	۱۱۴۴۶/۶۶	-۵۱۶/۹۸۹	۲۳۴۱۰/۳۳۳
سیلیسی	۱/۶۷۶	۶	۰/۱۴۵	۱۶۱۸۵/۷۱۴	-۷۴۴۶/۰۶۶	۳۹۸۱۷/۴۹۴
رسوبات کواترنری	۳/۱۳۹	۱۹	۰/۰۰۵	۷۴۹۰	۲۴۹۵/۴۹۱	۱۲۴۸۴/۵۰۸
سنگ‌های آذرین	۱/۸۸۳	۹	۰/۰۹۲	۷۳۰۰	-۱۴۷۱/۴۱۵	۱۶۰۷۱/۴۱۵

وانادیم

شده توسط کاباتا و پندپاس نشان می‌دهد که ۶ نمونه (۸/۶ درصد) در محدوده بحرانی و بقیه نمونه‌ها (۹۱/۴) بالاتر از محدوده بحرانی قرار می‌گیرند. بر اساس مقادیر ارائه‌شده توسط یاگودین و دونالد هم‌همی نمونه‌ها دارای غلظت بالاتر از مقدار عادی (۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) هستند (شکل ۴).

مقدار متوسط وانادیوم در پوسته زمین ۱۳۵ میلی‌گرم در کیلوگرم است (۲۸). محدوده‌ی نرمال این عنصر در خاک توسط بوون، بین ۳ تا ۵۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و مقدار متوسط آن ۹۰ میلی‌گرم گزارش شده است. مقایسه مقادیر نمونه‌های آنالیز شده از خاک‌های منطقه با استانداردهای ارائه



شکل ۴. نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های خاک برای عنصر وانادیم، نوار خاکستری رنگ مقادیر بحرانی ۵۰-۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم

۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیز اختلاف‌های معنی‌داری را نشان می‌دهد (جدول ۳). بر این اساس اختلاف بین میانگین غلظت وانادیم با مقدار آزمون در همه‌ی خاک‌ها کاملاً معنی‌دار است.

با توجه به تحرک کم این عنصر و غلظت بالای آن در زون‌های کانی‌سازی و دگرسانی، می‌توان آلودگی‌های نسبتاً شدید خاک‌های منطقه مورد مطالعه را پذیرفت. به‌طوری‌که مقایسه میانگین غلظت وانادیم در خاک‌های منطقه با مقدار متوسط

جدول ۳. نتیجه‌ی مقایسه‌ی میانگین غلظت عنصر وانادیم در خاک‌های مختلف با مقدار آزمون (۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) به روش T

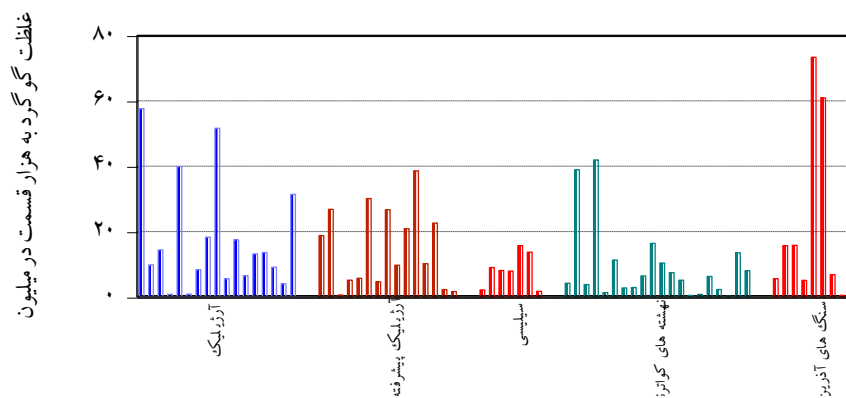
زون زیر خاک	آماره آزمون	درجه آزادی	سطح معنی‌دار بودن آزمون	اختلاف میانگین	فاصله اطمینان ۹۵٪	
					پائین	بالا
آرژیلیک	۶/۸۳۹	۱۷	۰/۰۰	۷۰/۶۱۱	۴۸/۸۲۸	۹۲/۳۹۳

۷۶/۳۳	۴۲/۸۶۹	۵۹/۶	۰/۰۰	۱۴	۷/۶۴۱	آرژلیک پیشرفته
۷۶/۷۷	۳۵/۸	۵۶/۲۸۵	۰/۰۰۱	۶	۶/۷۲۴	سیلیسی
۸۵/۶۴	۴۵/۳۵	۶۵/۱۵	۰/۰۰	۱۹	۶/۸۱۳	رسوبات کواترنری
۱۱۰/۳۹۲	۲۵/۲۰۷	۶۷/۸	۰/۰۰۶	۹	۳/۶۰۱	سنگ‌های آذرین

گوگرد

از نظر کراسکویف، دنیس و همچنین یاگودین مقدار متوسط گوگرد در پوسته‌ی زمین ۲۶۰ میلی‌گرم در کیلوگرم است. مقدار متوسط گوگرد موجود در خاک را ۸۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم تعیین کرده است که بر این اساس ۶۳ نمونه (۹۰ درصد) دارای غلظت بیشتر از این مقدار هستند. این در حالی است که دونالد مقدار متوسط این عنصر را ۱۶۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش کرده است که با فرض این مقدار به‌عنوان حد استاندارد ۶۰ نمونه (۸۵/۷ درصد) دارای غلظت بیشتری

هستند. در شکل ۵ نتایج تجزیه‌ی شیمیایی نمونه‌های خاک برای عنصر گوگرد، محدوده‌ی خاکستری رنگ مقادیر میانگین ۸۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نشان داده شده است. چنان‌که در شکل ۵ نیز مشاهده می‌شود در اکثر نمونه‌های خاک منطقه مقدار گوگرد حتی به بیش از ۶۷ برابر میانگین اعلام شده در خاک‌ها می‌رسد. بر این اساس مقایسه میانگین غلظت گوگرد در خاک‌های منطقه با مقدار متوسط ۸۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، به غیر از نمونه‌های خاک روی سنگ‌های آذرین با دگرسانی کم و یا بدون دگرسانی، اختلاف‌های معنی‌داری را نشان می‌دهد (جدول ۴).



شکل ۵. نتایج تجزیه‌ی شیمیایی نمونه‌های خاک برای عنصر گوگرد، محدوده خاکستری رنگ مقادیر میانگین ۸۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم

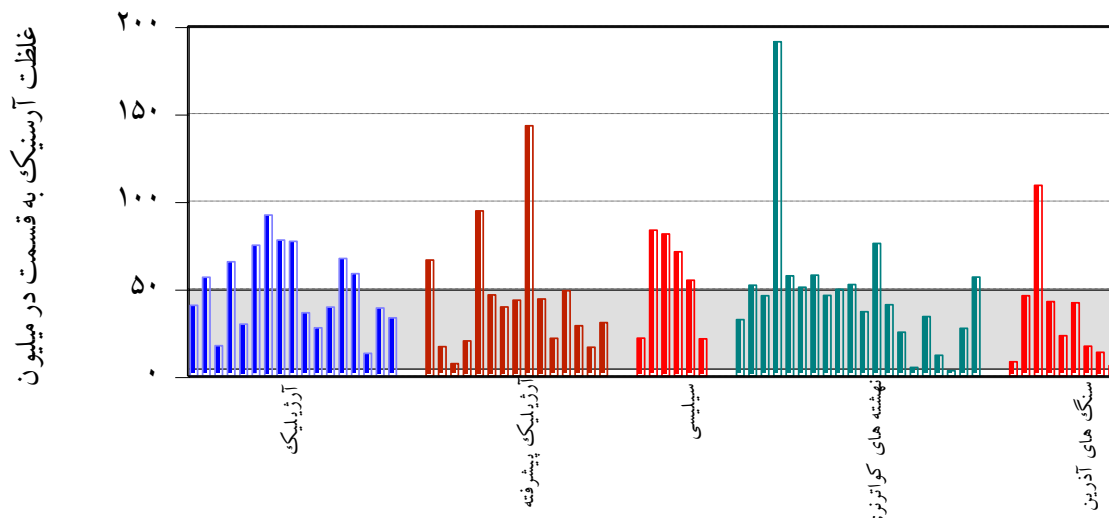
جدول ۴. نتیجه‌ی مقایسه‌ی میانگین غلظت عنصر گوگرد در خاک‌های مختلف با مقدار آزمون (۸۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) به روش T

زون زیر خاک	آماره	درجه آزادی	سطح معنی‌دار بودن آزمون	اختلاف میانگین		فاصله اطمینان ۹۵٪
				پائین	بالا	
آرژلیک	۳/۵۸	۱۷	۰/۰۰۲	۲۱۵۶۶/۱۱۱	۸۸۵۷/۹۳۴	۳۴۲۷۴/۲۸۷
آرژلیک پیشرفته	۴/۵۲۶	۱۴	۰/۰۰	۱۴۱۶۴/۶۶۶	۷۴۵۱/۶۱۹	۲۰۸۷۶/۷۱۳
سیلیسی	۳/۷۹۵	۶	۰/۰۰۹	۷۵۲۸/۵۷۱	۲۶۷۳/۸۰۲	۱۲۳۸۳/۳۴
رسوبات کواترنری	۳/۲۶۱	۱۹	۰/۰۰۴	۸۴۲۶/۵	۳۰۱۸/۷۹۳	۱۳۸۱۳۴/۲۹۶
سنگ‌های آذرین	۲/۱۲	۹	۰/۰۶۲	۱۷۶۹۰	-۱۱۸۱/۹۹۴	۳۶۵۶۱/۹۹۴

آرسنیک

آلودگی خاک‌ها و منابع آبی به عنصر آرسنیک به‌عنوان یک مشکل اساسی در دنیا مطرح شده است. مقدار متوسط آرسنیک در پوسته زمین ۱/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش شده است (۲۸). مقدار متوسط آرسنیک در خاک را ۷/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش کرده است که بر این اساس ۶۵ نمونه (۹۲/۸ درصد) دارای غلظت بیشتر از این مقدار هستند (۲۵). غلظت متوسط این عنصر را ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم ذکر کرده است که بر مبنای این استاندارد هم ۶۷ نمونه (۹۵/۷ درصد) دارای تمرکز بیشتر از این مقدار هستند. میزان عنصر آرسنیک در ۳۸ نمونه (۵۴/۳ درصد) از خاک‌های روی سنگ‌ها و رسوبات دگرسانی و مینرالیزه منطقه نسبت به حد استاندارد ارائه‌شده توسط کاباتا و پندیس در محدوده‌ی بحرانی (۱۰ تا ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) و ۲۶ نمونه (۳۷/۱ درصد)

نیز بالاتر از این محدوده (۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) واقع شده و حالت آلودگی نشان می‌دهند. براساس استانداردهای جیسلر و وزرات مسکن و محیط زیست نترزلند ۲۱ نمونه (۳۰ درصد) از خاک‌های منطقه با مقدار آرسنیک بین ۳۰ تا ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم در محدوده‌ی خاک‌های گروه B تا C قرار می‌گیرند (گروه B از خاک‌ها نیاز به بررسی بیشتر دارند و خاک‌های گروه C نیاز به پالایش دارند). هم‌چنین ۲۶ نمونه از خاک‌های منطقه (۳۷/۱ درصد) دارای تمرکز آرسنیک بیش از ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم هستند و جزء خاک‌های گروه C محسوب می‌شوند. در شکل ۶ نتایج تجزیه‌ی شیمیایی نمونه‌های خاک (به غیر از دو نمونه) برای عنصر آرسنیک، محدوده‌ی خاکستری رنگ غلظت بحرانی ۵۰-۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نشان داده شده است.



شکل ۶. نتایج تجزیه‌ی شیمیایی نمونه‌های خاک (به غیر از دو نمونه) برای عنصر آرسنیک، محدوده‌ی خاکستری رنگ غلظت بحرانی ۵۰-۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم

این عنصر در محیط‌های خاکی منطقه می‌توان آلوده‌بودن 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 استاندارد آن را در چرخه غذایی دام‌ها و انسان‌ها بررسی کرد. بر این اساس مقایسه میانگین غلظت عنصر آرسنیک در خاک‌های منطقه با مقدار متوسط ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم. به غیر از نمونه‌های خاک روی سنگ‌های آذرین با دگرسانی کم و یا بدون دگرسانی، اختلاف‌های معنی‌داری را نشان می‌دهد (جدول ۵).

براساس استانداردهای ارائه‌شده توسط آکفرمرجیک تعداد ۲۱ نمونه (۳۰ درصد) از خاک‌ها دارای آلودگی ضعیف، ۲۱ نمونه (۳۰ درصد) دارای آلودگی متوسط و ۵ نمونه (۷/۲ درصد) دارای آلودگی شدید هستند و ۲۳ نمونه (۳۲/۸ درصد) نیز در گروه خاک‌های غیرآلوده قرار می‌گیرند. غلظت آرسنیک در دو نمونه از خاک روی زون سیلیسی و آرژیلیک به‌ترتیب ۳۴۳۰ و ۳۴۱۲ میلی‌گرم در کیلوگرم است، که نسبت به غلظت استاندارد (۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) حدود ۶۸ برابر افزایش نشان می‌دهد. با توجه به غلظت زیاد

جدول ۵. نتیجه‌ی مقایسه‌ی میانگین غلظت عنصر آرسنیک در خاک‌های مختلف با مقدار آزمون (۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) به روش T

زون زیر خاک	آماره آزمون	درجه آزادی	سطح معنی‌دار بودن آزمون	اختلاف میانگین		فاصله اطمینان ۹۵٪
				پائین	بالا	
آرژیلیک	۳/۳۷۲	۱۷	۰/۰۰۴	۶۲/۴۴۳	۲۳/۳۷۱	۱۰۱/۵۱۵
آرژیلیک پیشرفته	۴/۳۶۱	۱۴	۰/۰۰۱	۳۹/۴۹۷	۲۰/۰۷۳	۵۸/۹۲
سیلیسی	۱/۱۰۵	۶	۰/۳۱۲	۵۳۲/۶۲۸	-۶۴۷/۱۷۶	۱۷۱۲/۴۳۲
رسوبات کواترنری	۴/۹۳۵	۱۹	۰/۰۰	۴۲/۵۶۵	۲۴/۵۱۴	۶۰/۶۱۶
سنگ‌های آذرین	۲/۶۲۶	۹	۰/۰۲۸	۲۶/۲	۳/۶۲۹	۴۸/۷۷

آلومینیم شکل ۹ است. با این وجود نقش سولفیدها و ذرات ریز خاک در جذب عناصر فرعی و در نتیجه غنی‌سازی آن‌ها در محیط اساسی است (۳۲ و ۳۳). حضور کانی‌های سولفیدی و اکسیدی مانند پیریت^۱، کالکوپیریت^۲، گالن^۳، اسفالریت^۴، مولیبدنیت^۵، همتایت^۶، مگنتیت^۷، گوتیت^۸، لیمونیت^۹ و غیره در منطقه (۱۸). می‌تواند در جذب عناصر فلزی موثر باشد. تجزیه XRD خاک‌های منطقه نشان‌دهنده‌ی وجود کانی‌های رسی و آلومینوسیلیکاتی مانند: کائولینیت^{۱۰}، ژاروسیت^{۱۱} (از خانواده آلونیت‌ها^{۱۲}، ایلیت^{۱۳} و آلونیت^{۱۴}، به‌صورت فاز اصلی در منطقه است (۳۱).

فرایندهای کانی‌سازی و دگرسانی‌های مربوط به منطقه‌ی شمال‌غرب مشگین‌شهر باعث تغییرات فیزیکی و شیمیایی گسترده در سنگ‌های آذرین منطقه شده و در نتیجه بر توزیع عناصر فلزی در محیط تاثیر گذاشته است. تغییرات شدید غلظت عناصر در محیط‌های سنگی، خاکی و آبی می‌تواند به‌دلیل تنوع فلزایی و دگرسانی‌های به‌وجود آمده و هم‌چنین فرایندهای هوازدگی و تغییرات متعاقب آن در منطقه باشد. مقایسه‌ی بین غلظت مجموع عناصر فرعی با غلظت گوگرد، آلومینیم، آهن، منگنز و ذرات کوچکتر از ۶۳ میکرومتر خاک نشان‌دهنده‌ی وجود همبستگی منفی بین این عناصر و گوگرد شکل ۷، و همبستگی مثبت با ذرات ریز خاک شکل ۸ و

⁹ 2Fe2O3. 3H2O

¹⁰ Al4{Si4O10}(OH)8

¹¹ KFe3+(OH)6(SO4)2

¹² KFe3+(OH)6(SO4)2

¹³ (1.6K+[(OH)4(Si7.1Al0.9)IV(Al3.3Mg0.7)VI O20]-1.6)

¹⁴ (KAl3(OH)6(SO4)2

¹ FeS2

² CuFeS2

³ PbS

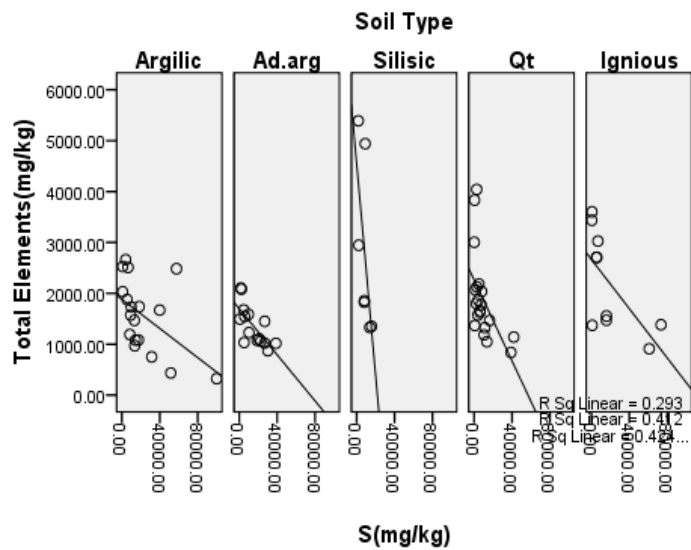
⁴ ZnS

⁵ MoS2

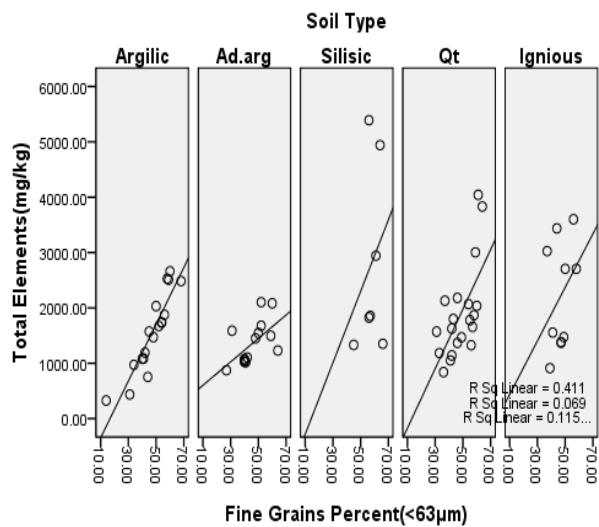
⁶ Fe2O3

⁷ FeFe2O4

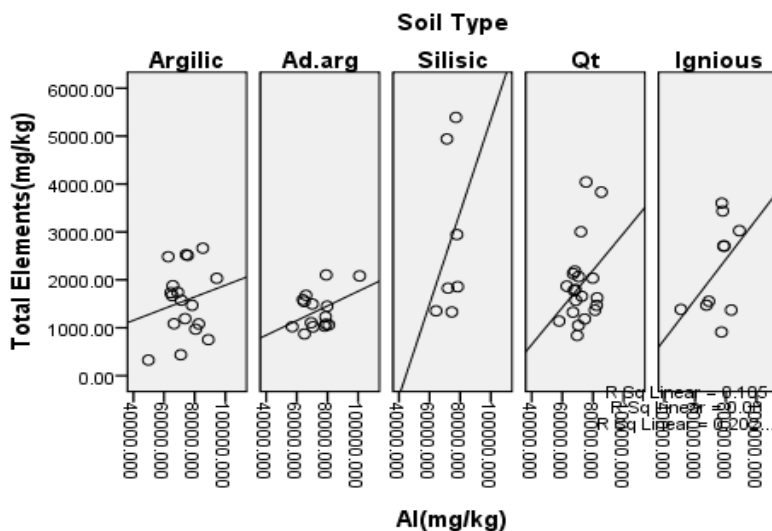
⁸ FeO(OH)



شکل ۷. مقایسه بین غلظت مجموع عناصر فرعی با غلظت گوگرد، آلومینیم، آهن، منگنز و ذرات کوچکتر از ۶۳ میکرومتر خاک نشان‌دهنده وجود همبستگی منفی بین این عناصر و گوگرد



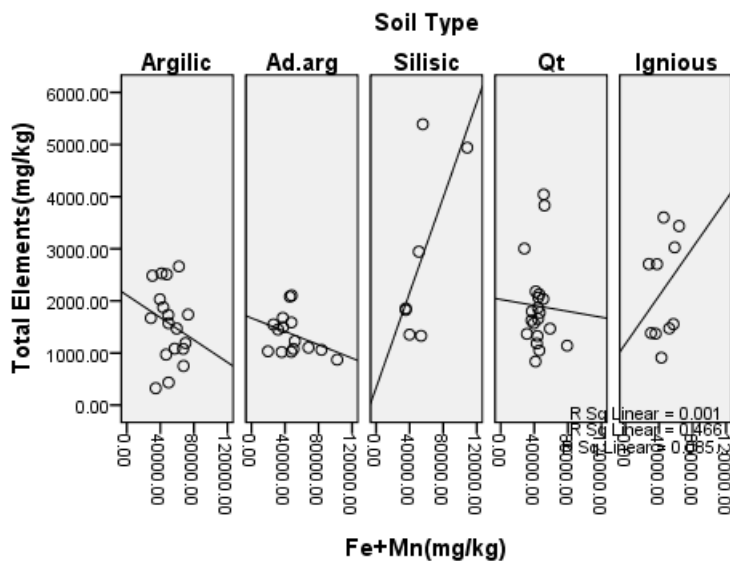
شکل ۸. همبستگی مثبت با ذرات ریز خاک



شکل ۹. همبستگی مثبت با ذرات آلومینیم

قلع، کادمیم، آهن، منگنز است. بین میزان کل عناصر فلزی و غلظت آهن و منگنز خاک‌های سطحی رابطه مشخصی وجود ندارد. به طوری که همبستگی بین کل عناصر فلزی در خاک‌های روی زون دگرسانی سیلیسی و سنگ‌های آذرین با دگرسانی ضعیف مثبت و در بقیه‌ی خاک‌ها منفی است (شکل ۱۰).

شکل ۷ نمودار پراکندگی غلظت کل عناصر فرعی در مقابل غلظت گوگرد، شکل ۸ نمودار پراکندگی غلظت کل عناصر فرعی در مقابل درصد ذرات ریز، شکل ۹ نمودار پراکندگی غلظت کل عناصر فرعی در مقابل غلظت آلومینیم، غلظت کل عناصر برابر مجموع غلظت عناصر کروم، منگنز، باریوم، وانادیم، آرسینک، کبالت، مس، مولیبدن، نیکل، سرب، آنتیموان، روی،



شکل ۱۰. پراکندگی غلظت کل عناصر فرعی در مقابل غلظت آهن، منگنز، غلظت کل عناصر برابر مجموع غلظت عناصر Be، Ba، Mn، Cr،

Cd و Sn، Zn، Sb، Pb، Ni، Mo، Cu، Co، As، V

شیمیایی گسترده در سنگ‌های آذرین منطقه شده و در نتیجه بر توزیع عناصر فلزی در محیط تاثیر گذاشته است. تغییرات شدید غلظت عناصر در خاکی می‌تواند به دلیل تنوع

بحث

فرایندهای کانی‌سازی و دگرسانی‌های مربوط به آن در منطقه‌ی شمال غرب مشگین‌شهر باعث تغییرات فیزیکی و

فلززایی و دگرسانی‌های به وجود آمده و هم‌چنین فرایندهای هوازدگی و تغییرات متعاقب آن در منطقه باشد. تمرکز بیش از حد برخی از عناصر و هم‌چنین کمبود آن‌ها در برخی از گیاهان منطقه علاوه بر نوع گونه به میزان عناصر فلزی خاک نیز بستگی دارد. علاوه بر این‌ها غلظت آهن، منگنز و گوگرد، تغییرات شرایط اکسیداسیون- احیا و اسیدیته محیط در توزیع عناصر تاثیر می‌گذارند. مقایسه بین غلظت مجموع عناصر فرعی با غلظت گوگرد، آلومینیم، آهن، منگنز و ذرات کوچکتر از ۶۳ میکرومتر خاک نشان‌دهنده‌ی وجود همبستگی منفی بین این عناصر و گوگرد و همبستگی مثبت با ذرات ریز خاک و آلومینیم است. با این وجود نقش سولفیدها و ذرات ریز خاک در جذب عناصر فرعی و در نتیجه غنی‌سازی آن‌ها در محیط اساسی است، لذا علت این رفتار گوگرد می‌تواند غلظت خیلی زیاد و تقریباً یکنواخت گوگرد در همه‌ی نمونه‌ها باشد که مانع ارائه یک الگوی همبستگی مناسب و مطابق انتظار می‌شود. حضور کانی‌های سولفیدی و اکسیدی مانند پیریت^۱، کالکوپیریت^۲، گالن^۳، اسفالریت^۴، مولیبدنیت^۵، همتایت^۶، مگنتیت^۷، گوتیت^۸، لیمونیت^۹ و غیره در منطقه می‌تواند در جذب عناصر فلزی موثر باشد. تجزیه XRD خاک‌های منطقه نشان‌دهنده‌ی وجود کانی‌های رسی و آلومینوسیلیکاتی مانند: کائولینیت^{۱۰}، ژاروسیت (از خانواده‌ی آلونیت‌ها^{۱۱})، ایلیت^{۱۲} و آلونیت^{۱۳}، به صورت فاز اصلی در منطقه است. سطح بزرگ و بار منفی این کانی‌ها می‌تواند به عنوان جذب‌کننده اصلی فلزات عمل کند. تغلیظ عنصر گوگرد در خاک‌های مناطق دگرسان شده می‌تواند به دلیل منشاء هیدروترمال آن باشد. نفوذ محلول‌های هیدروترمال و تشکیل کانی‌های سولفیدی و تاثیر فرایندهای جوی بعدی سبب تشکیل سولفات و گوگرد خالص شده و در نتیجه باعث افزایش غلظت این عنصر در خاک‌های مناطق کانی‌سازی و دگرسانی می‌شود. به دلیل حضور سولفید آهن

(پیریت) فراوان در منطقه و اکسیداسیون آن‌ها سولفات آهن سه‌ظرفیتی و اسیدسولفوریک تشکیل می‌شود. سولفات آهن سه‌ظرفیتی با اسیدسولفوریک ترکیب شده و به سولفات آهن دو ظرفیتی تبدیل می‌شود که در اثر آن گوگرد خالص نیز آزاد شده و وارد محیط می‌شود. در محیط خاکی آرسنیک هم به صورت آرسنات (AsO_4^{3-}) و هم به صورت آرسنیت (AsO_2^-) وجود دارد. آرسنیت از آرسنات سمی‌تر است. به دلیل شباهت شیمیایی، رفتار آرسنات در خاک شبیه فسفات است. آرسنات مثل فسفات با آهن، آلومینیم و کلسیم رسوبات نامحلول تشکیل می‌دهد. در خاک موثرترین عامل کنترل‌کننده تحرک پذیری آرسنات، آهن است. مقایسه میانگین غلظت آرسنیک در خاک‌های منطقه با مقدار متوسط ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم (۲۵)، نشان می‌دهد که اختلاف‌های بین میانگین غلظت آرسنیک خاک‌ها با میانگین آزمون، به غیر از خاک روی زون دگرسانی سیلیسی (آن هم به دلیل وجود یک مقدار غیر عادی)، شدیداً معنی‌دار است و این نیز به دلیل تغلیظ آن در خاک‌های تحت‌تاثیر زون‌های دگرسانی است. به نظر می‌رسد اکسیداسیون کانی‌های سولفیدی دلیل تمرکز زیاد آرسنیک در محیط است (۳۰). در خصوص علت رفتار گوگرد می‌توان گفت غلظت خیلی زیاد و تقریباً یکنواخت گوگرد در همه نمونه‌ها باشد که مانع ارائه یک الگوی همبستگی مناسب و مطابق انتظار می‌شود. در رابطه با تغییرات آرسینک می‌توان گفت به دلیل تاثیر pH پایین بر عدم جذب آرسینک، مس و روی توسط اکسیدهای آهن و منگنز باشد (۶). هم‌چنین همبستگی ضعیف در روند بین غلظت کل عناصر فلزی و Fe+Mn نشان‌دهنده تاثیر اندازه‌ی ذرات خاک و فازهای ثانویه دیگر (مانند سولفیدها، آلومینیم و یا کانی‌های رسی) در جذب این عناصر است، به طوری که سالومونس و فورستتر و هوروویتز نیز بر نقش مهم سولفیدها، اکسیدهای آلومینیوم، آهن و منگنز و هم‌چنین کانی‌های رسی در جذب عناصر فلزی تاکید کرده و معتقدند که با این

⁸ FeO(OH)

⁹ 2Fe2O3. 3H2O

¹⁰ (Al4{Si4O10}(OH)8)

¹¹ KFe3+(OH)6(SO4)2

¹² (1.6K+[(OH)4(Si7.1Al0.9)IV(Al3.3Mg0.7)VIO20]-1.6)

¹³ (KAl3(OH)6(SO4)2)

¹ FeS2

² CuFeS2

³ PbS

⁴ ZnS

⁵ MoS2

⁶ Fe2O3

⁷ FeFe2O4

هستند، باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر پیشنهاد می‌گردد نسبت به خاک‌برداری و جابه‌جایی، بهسازی فیزیکی (شست‌وشوی خاک، فلاشینگ خاک) و بهسازی‌های بیولوژیکی (تجزیه بیولوژیکی دوغابی، بهسازی بیولوژیکی نابرجا و برجا بهسازی به روش مقاوم‌سازی و پایدارسازی) اقدام گردد.

تشکر و قدردانی: بدین‌وسیله از همه کسانی که در جهت جمع‌آوری داده‌ها و پیشبرد این مطالعه بودند تشکر و قدردانی می‌شود.

تعارض منافع: نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافع با یکدیگر ندارند.

حمایت مالی: این مقاله حمایت مالی نداشته است.

ملاحظات اخلاقی: این مقاله برگرفته از رساله دکتری آقای علیرضا صفاری عیسی‌لو می‌باشد. نویسندگان تمام نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. همچنین هر گونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر نتایج یا تفسیر مقاله تاثیر بگذارد را رد می‌کنند.

سهام نویسندگان: تمام نویسندگان به طور یکسان در اجرا و انجام تحقیق مشارکت داشته‌اند و پژوهش حاضر را مطالعه و تأیید نمودند.

References

- Cai, L., Xu, Z., Ren, M., Guo, Q., Hu, X., Hu, G. and Peng, P. (2012). Source identification of eight hazardous heavy metals in agricultural soils of Huizhou, Guangdong Province, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 78: 2-8 <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.07.004> PMID:22257794
- Safari, M., Jafarian, A., Ganjovian, M.A., Esmaili, J. (2022). Investigating the severity of heavy element pollution in surface soils (study area: Shahr Kord city). *Iran Quaternary* 7 (3), 1006-1023. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/irqua.2022.702442>
- Khorrām Nejadīan, Sh., Atapour, M. (2019). Measurement of the heavy element concentration of arsenic in soil (Abik industrial town case

مکانیسم‌ها تغلیظ عناصر فلزی در محیط اتفاق می‌افتد (۳۲ و ۳۳).

نتیجه‌گیری

مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه‌ی خاک‌های منطقه با مقادیر مجاز و استانداردهای زیست محیطی موجود نشان داد که آلودگی خاک‌ها به عناصر طلا، آهن، وانادیوم، گوگرد، و آرسنیک شدید بوده و غلظت بسیاری از عناصر دیگر نیز از مقادیر استاندارد بیشتر است. در برخی از خاک‌های منطقه غلظت کروم، بریلیوم، استرانسیم، نقره و کبالت از حد مجاز بیشتر است. همچنین در این خاک‌ها نیکل، قلع، کادمیوم و جیوه غلظت کمتر از حد مجاز دارند. نتایج پژوهش نشان داد بر اساس مقادیر شاخص آلودگی جونگ ، $55/7$ درصد از نمونه‌ها با $PI > 1$ آلوده محسوب می‌شوند. همچنین با توجه به استفاده گسترده از فاکتور غنی‌سازی، به‌عنوان روشی مناسب در تعیین آلودگی خاک‌ها سالومونس و فورسترن و هورویتز، این ضریب نیز برای همه‌ی نمونه‌های خاک محاسبه شده است. بر اساس این پارامتر نیز می‌توان بیشتر خاک‌های منطقه را آلوده به حساب آورد، به‌ویژه عناصری مانند آرسنیک، وانادیوم در بیش از 50 درصد از نمونه‌های خاک منطقه کاملاً تغلیظ یافته‌اند. با توجه به تشابهات نتایج مقایسات غلظت عناصر با استانداردها و حدود مجاز آن‌ها، فاکتورهای غنی‌ساز و شاخص‌های آلودگی می‌توان نتیجه گرفت که بیشتر نمونه‌های تجزیه‌شده از خاک منطقه آلوده

- study) *Environmental Science Studies*, 5 (3), 2733-2729. (In Persian). https://www.jess.ir/article_108362.html
- Karmi, G., Ghasemi Dehnavi, A., Jamshidi, A. (2022). Assessment of heavy metal contamination of soils in the vicinity of Gol Zard lead and zinc mine, northeast of Algodrez (Lorestan province), *Quaternary Journal of Iran*, 8 (3, 4), 431-454. (Persian). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.24237108.1401.8.2.7.2>
 - Misra S., Newsom H. E., Prasad M. S., Geissman J. W., Dube, A., Sengupta, D., "Geochemical identification of impactor for Lonar crater, India", *Meteoritics & Planetary Science*, 44 (7) (2009) 1001-1018.

[5100.2009.tb00784.x](https://doi.org/10.1201/9781420039900)

6. Kabata-Pendias, A., Pendias, H. (2001). Trace Elements in Soils and Plants, third ed. CRC Press, Boca Raton, Florida. <https://doi.org/10.1201/9781420039900>
7. Chandrasekaran, A., Ravisankar, R., Hari Krishnan, N., Satapathy, K. K., Prasad, M. V. R., & Kanagasabapathy, K. V. (2015). Multivariate statistical analysis of heavy metal concentration in soils of Yelagiri Hills, Tamilnadu, India- Spectroscopical approach. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 137, 589-600 <https://doi.org/10.1016/j.saa.2014.08.093> PMID:25240831
8. Igwe, J., and Abia, A. A. (2006). A bioseparation process for removing heavy metals from waste water using biosorbents. African Journal of Biotechnology. 5(11): 1167-1179. <http://dx.doi.org/10.4314/ajb.v5i11.43005>
9. Colin B. (1995) Environmental chemistry . Freeman and Company.
10. Hajizadeh, H., Karmi G. H., Saadat, S. (2016). Environmental assessment of underground water in Firozabad Shahrood area. 10th Conference of Geological Society of Iran, Tarbiat Modares University. (Persian). <https://civilica.com/doc/28575>
11. Sistani, N, et al .(2016). Heavy metal pollution in soils near Kerman steel industries: assessment of metal richness and degree of pollution, Health and Environment Quarterly, 10 (1), 75-86. (Persian). <http://ijhe.tums.ac.ir/article-1-5754-fa.html>
12. Fallah, A. Madbari, S., Alireza, S., Tabakh Shabani, A.A. (2018). Assessment of heavy metal contamination in the urban soil of Karaj (Iran), Earth Sciences, 29 (14), 240-231. (Persian).
13. Jamshidi, A. Sarikhani, R., Karmi, G., Ghasemi, Dehnavi, A. (2019). Investigating heavy metals and their origin in the east of Azna city, Lorestan province, Journal of New Findings of Applied Geology, 14 (28), 43-29. (Persian). <https://civilica.com/doc/1205840>
14. Keskin, T., Toptas, E.) 2012.(Heavy metal pollution in the surrounding ore deposits and mining activity: a case study from Koyulhisar (Sivas-Turkey), Environmental Earth Science, No. 67, PP. 859-866. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1541-2>
15. Lee, C.H.(2015). Assessment of contamination load on water, soil and sediment affected by the Kongjujeil mine drainage, Republic of Korea, Environmental Geology, No. 44, PP. 501-515. <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0786-1>
16. Norra S., Z.A. Berner, P. Agarwala , F. Wagner, D. Chandrasekharan, D. Stuben .(2005). Impact of irrigation with As rich groundwater on soil and crops: A geochemical case study in West Bengal Delta Plain, India. Applied Geochemistry, 20: 1890-1906. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2005.04.019>
17. Chi-Man L. and Jiu J. J. (2006). Heavy metal and trace element distributions in groundwater in natural slopes and highly urbanized spaces in Mid-Levels area, Hong Kong. Water Research, 40(753-767) <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.12.016> PMID:16448684
18. Organization of Industries and Mines of Ardabil Province(2002).
19. Ardabil Province Industries and Mines Organization(2002).
20. Jung, M.C.(2001). Heavy metal contamination of soils and waters in and around the Imcheon Au-Ag mine, Korea. Appl. Geochem. 16, 1369-1375. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(01\)00040-3](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00040-3)
21. Sinex, S.A., Helz, G.R., 1981. Regional geochemistry of trace elements in Chesapeake Bay sediments. Environ. Geol. 3,315-323. <https://doi.org/10.1007/BF02473521>
22. Kabata-Pendias, A., & Mukherjee, A. B. (2007). Trace Elements From Soil To Human. Springer Science & Business Media.550 pp <https://doi.org/10.1007/978-3-540-32714-1>
23. Swartjes, F.A., 1999. Risk-based assessment of soil and ground water quality in the Netherlands: standards and remediation urgency. Risk Anal. 19, 1235-1249. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1999.tb01142.x> PMID:10765460
24. Wedepohl, K.H.,)1995(. The composition of the continental crust. Geochim. Cosmochim. Acta 59, 1217-1232. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2)
25. Yagodin B. A.(1984) Agricultural chemistry. Mir Publishers, Moscow. Vol. 1 ,2 .Translated

from the Russian by Vopyan V. G. <https://www.ebay.com/itm/314106124424>

26. Bowen H. J. M. (1979). Environmental chemistry of the elements. Academic <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1803052>

27. Zarin Kofesh, M. (1997) Basics of soil science in relation to plant and environment. first volume . Islamic Azad University Scientific Publishing Center (Persian).

28. Krauskopf K. P. and Dannis K. B. (1995). Introduction to geochemistry, Third edition , McGraw-Hill.

<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2331365>

29. EPA (1997). Drinking water standards, Environment of Critreia and Assesment.

30. Koski, R. A.; Munk L.A.; Foster A. I.; Shanks

W. C. and Stillings, L. L.)2008(. Sulfide oxidation and distribution of metals near abandoned copper mines in coastal environments, Prince William Sound, Alaska, USA. Applied Geochemistry, 23: 227-254.

<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2007.10.007>

31. Industries and Mines .(2004).

32. Salomons, W., Forstner, U.) 1984(. Metals in the Hydrocycle. Springer-Verlag, New York. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-69325-0>

33. Horowitz, A.J.) 1991.(A Primer on Sediment-trace Element Chemistry. Lewis Publishers, Chelsea

<https://doi.org/10.3133/ofr9176>