

## Determination of arsenic and sulfur anomalies in the soils of Dasht-e-Khash, SE Iran: long-term effects of the Taftan volcano

Azam Shirin-e-Shandiz<sup>1</sup>, Mostafa Ghomashi<sup>2\*</sup> , Ali Ahmadi<sup>3</sup>

1. MSc of Geochemistry. Department of Geology. Faculty of Science. University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
2. *Corresponding Author*, Assistant Professor of Geology Department. Faculty of Science. University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
3. Associate Professor of Geology Department. Faculty of Science. University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

---

### Article Info

**Article type:**  
Research Article

**Article history:**

**Received:** 03 May 2022

**Revised:** 29 June 2022

**Accepted:** 11 July 2022

**Keywords:**

Soil Geochemistry, Taftan Volcano, Arsenic, Sulfur.

---

### ABSTRACT

In this research pollution of soil samples from the southern slopes of the Taftan volcano, SE Iran, and the Khash Plain to the south of the volcano is studied. The concentrations of Arsenic and Sulfur in the soil samples are 6-14 ppm and 0.03-0.51 wt.%, respectively, both more than the quality standard values of USEPA. Pollution zoning maps indicate that samples from Khash Plain to the south are, generally, more polluted in comparison with the samples from Taftan slopes to the north of the area. This phenomenon is associated with an increase in the fine-grained portion (silt-clay), and the pH of the soil samples. It is inferred from the comparison of the AS and S contents of the Khash Plain aquifer (0.005-0.1 and 72-528 mg/L, respectively) and the groundwater pollution zoning maps that water-soil ion-exchange reactions have played important role in the soil pollution processes. Some significant arsenic anomalies in the soil sample, despite the lack of the same in the groundwater, are attributed to arsenic mineralization due to Taftan hydrothermal activities. The mineralization is related to mercury-gold generation in the area which is usually accompanied by arsenic sulfide minerals realgar, AsS and orpiment, As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>. Therefore, hydrothermal activities of the Taftan volcano produce a particular effect on arsenic and sulfur soil pollution.

---

**Cite this article:** Shirin Shandiz, A., Ghomashi, M., & Ahmadi, A. (2022). Determination of arsenic and sulfur anomalies in the soils of Dasht-e-Khash, SE Iran: long-term effects of the Taftan volcano. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 11(33), 217-232. DOI: 10.22111/jneh.2022.42297.1898



© MostafaGhomashi

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

DOI: 10.22111/jneh.2022.42297.1898

---

\* Corresponding Author Email: [ghomashi@science.usb.ac.ir](mailto:ghomashi@science.usb.ac.ir)

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره یازدهم، شماره ۳۳، پاییز ۱۴۰۱

## تعیین مقادیر نابهنجاری‌های آرسنیک و گوگرد در خاک‌های دشت خاش، جنوب شرق ایران: با تأکید بر تأثیر دراز مدت آتش‌فشان تفتان

اعظم شیرین شاندیز<sup>۱</sup>، مصطفی قماش<sup>۲\*</sup>، علی احمدی<sup>۳</sup>

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد ژئوشیمی، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۲. استادیار گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان (نویسنده مسئول)

۳. دانشیار گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	در این پژوهش، میزان آلودگی آرسنیک و گوگرد در نمونه‌های خاک دامنه‌های آتش‌فشان تفتان و دشت خاش واقع در جنوب تفتان، جنوب شرق ایران، مطالعه شده است. غلظت عناصر آرسنیک و گوگرد در نمونه‌های مطالعه شده به ترتیب بین ۶ تا ۱۴ پی‌پی‌ام و ۰/۰۳ تا ۰/۵۱ درصد متغیر بوده و بالاتر از حد مجاز استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا است. نقشه‌های پهنه‌بندی آلودگی برای منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهند که به طور کلی نمونه‌های دشت خاش، بویژه بخش جنوبی آن، نسبت به نمونه‌های دامنه‌های تفتان، آلوده‌تر هستند. این پدیده با افزایش بخش سیلتی و رسی خاک و افزایش پی‌اچ در نمونه‌های بخش جنوبی تفتان همراه است. از مقایسه مقادیر آرسنیک و گوگرد در نمونه‌های آب زیرزمینی دشت خاش (به ترتیب ۰/۰۰۵ تا ۰/۱ و ۷۲ تا ۵۲۸ میلی‌گرم در لیتر) و نقشه‌های پهنه‌بندی آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که واکنش‌های تبادل یونی، بین ذرات خاک و آب زیرزمینی وجود داشته است. وجود برخی نابهنجاری‌های آرسنیک در نمونه‌های خاک دشت خاش و عدم وجود آن‌ها در نمونه‌های آب زیرزمینی، نشان از وجود کانی‌زایی‌های محلی آرسنیک مرتبط با فعالیت‌های گرمایی تفتان دارد. این کانی‌زایی‌ها اغلب مربوط به ترکیبات دارای جیوه و طلا هستند که کانی‌های سولفید آرسنیک (رآلگار و اورپیمنت) را به همراه دارند و در دوره‌هایی از فعالیت تفتان در این مناطق شکل گرفته اند. لذا مهمترین عامل در آلودگی خاک‌های منطقه مورد مطالعه، فعالیت‌های آتش‌فشانی-گرمایی تفتان بوده است.

استناد: شیرین شاندیز، اعظم، قماش، مصطفی، & احمدی، علی. (۱۴۰۱). تعیین مقادیر نابهنجاری‌های آرسنیک و گوگرد در خاک‌های دشت خاش،

جنوب شرق ایران: با تأکید بر تأثیر دراز مدت آتش‌فشان تفتان. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۱(۳۳)، ۲۳۲-۲۱۷.

DOI: 10.22111/jneh.2022.42297.1898



© اعظم شیرین شاندیز، مصطفی قماش<sup>\*</sup>، علی احمدی.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

## مقدمه

آلودگی خاکها معمولاً در نتیجه فعالیتهای کشاورزی، روشهای نادرست دفن زبالهها، معدنکاری و همچنین فرآیندهای طبیعی، نظیر فعالیت آتشفشانها، به وقوع می‌پیوندند (ریاگو و همکاران، ۲۰۰۷، پارونه و همکاران، ۲۰۲۰، وو و همکاران، ۲۰۲۲). آلودگی خاک به عنصر آرسنیک، به عنوان یک آلودگی زیست محیطی جدی، در بسیاری از کشورها وجود دارد (کای و همکاران، ۲۰۰۲، فاجینو و همکاران، ۲۰۰۴، ملو و همکاران، ۲۰۰۶، هی و همکاران، ۲۰۱۰). مقادیر قابل توجهی از آرسنیک، به‌طور طبیعی از فرآیندهای آتش‌فشانی و نیز تجزیه سنگ‌های آذرین حاصل می‌شود (سلین و همکاران، ۲۰۰۳، وانگ و مولیگان، ۲۰۰۶). یکی دیگر از منابع مهم تمرکز آرسنیک، کانی‌های سولفیدی هستند که آرسنیک را در ساختار خود جای داده‌اند (کنت و فاکس، ۲۰۰۴). معمولاً غلظت آرسنیک در خاکها، نسبت به سنگ مادر بیشتر است؛ زیرا که آرسنیک در اثر هوازدگی و جایگزینی در بخش کلونیدی تجمع می‌یابد (یانچو، ۱۹۹۴).

یکی از مهم‌ترین خطرات زیستی آتش‌فشانها، افزودن عناصر خطرناکی نظیر آرسنیک به ذخایر آبی و خاکهای منطقه است (اشمینکی، ۲۰۰۶، ماسودا، ۲۰۱۸، پارونه و همکاران، ۲۰۲۰). چرا که این عنصر به راحتی به وسیله گیاهان جذب می‌شود و به این ترتیب، به منابع غذایی دام و انسان وارد می‌شود. به‌علاوه، قرار گرفتن طولانی مدت در معرض آلودگی آرسنیک غیرآلی، می‌تواند سبب بروز بیماری‌هایی نظیر مشکلات گوارشی، کاهش تولید گلوبول‌های سفید و قرمز، بیماری‌های پوستی و ریوی شود (برینکل و همکاران، ۲۰۰۹). مقادیر بیشتر آرسنیک، می‌تواند شدت پیشرفت سرطان‌هایی مثل سرطان پوست، کبد، کلیه و غدد لنفاوی را افزایش دهد. مقادیر بالای آلودگی آرسنیک غیرآلی، موجب نازایی، آسیب‌های مغزی و قلبی و حتی آسیب به ژنوم می‌شود (کیا، ۲۰۰۴).

آتش‌فشانها به دلیل جذب نزولات جوی و آب و هوای مساعد و همچنین خاک حاصلخیز، حاصل از مواد خروجی، جمعیت بیشتری را به خود جذب می‌کنند (مونت گُمیری، ۲۰۰۰، یوگولینی و دالگرن، ۲۰۰۲، بارتولی و همکاران، ۲۰۰۳). از این رو، این جمعیت‌ها در معرض آلودگی‌های زیستی آتش‌فشانها قرار می‌گیرند و همچنین محصولات کشاورزی آنها ممکن است واجد چنین آلودگی‌هایی باشد. آتش‌فشان تفتان، واقع در جنوب‌شرق ایران، نیز شرایط مساعدی را برای رشد جمعیت در اطراف خود ایجاد نموده و کشاورزی در این منطقه، از رونق نسبی برخوردار است. لذا، مطالعه اثرات فعالیت‌های تفتان بر آلودگی خاک‌های دشت خاش، و در نتیجه سلامت ساکنین و محصولات کشاورزی تولید شده در این منطقه، از اهمیت قابل توجهی برخوردار است.

تفتان، یک آتش‌فشان جوان به سن پلیوسن-کواترنر ( $6/95 \pm 0/03$  میلیون سال) است (معین وزیری، ۱۹۸۵، بیابانگرد و مرادیان، ۲۰۰۸) که در ۹۹ کیلومتری جنوب- جنوب‌شرقی زاهدان و ۴۵ کیلومتری شمال-شمال‌غربی شهرستان خاش قرار دارد. دشت خاش با مساحت حدود ۱۸۰۰ کیلومتر مربع، به شکل یک زبانه کشیده شمالی- جنوبی، در جنوب آتش‌فشان تفتان واقع شده است. گسترش قابل توجه لایه‌های خاکستر، لاپیلی و آگلومرا در آتش‌فشان تفتان، نشان می‌دهد که فعالیت‌های انفجاری متعدد و بسیار شدید، طی حدود ۷ میلیون سال فعالیت این آتش‌فشان، اتفاق افتاده‌اند (فیروز کوهی، ۱۳۹۶). از این رو، طی سالیان متمادی، موادی به زمین‌های اطراف افزوده شده‌اند که می‌توانند به‌طور مستقیم، باعث آلودگی خاک در این منطقه شده باشند.

آتش‌فشان تفتان می‌تواند به صورت غیرمستقیم نیز، بر کیفیت خاک‌های منطقه، تاثیر گذاشته باشد. ارتفاع افزوده این آتش‌فشان، به جریان‌ات رطوبتی این امکان را می‌دهد که به ارتفاعات بالاتر صعود نموده، و بارش‌های بیشتری را در تفتان ایجاد نمایند. خاک‌های تفتان، به ویژه در مناطق مرتفع، و آبرفت‌های تشکیل‌دهنده آبخوان و خاک پوشاننده آن در دامنه‌های تفتان، از نفوذپذیری بیشتری برخوردارند. این دو عامل، به همراه عوامل مربوط به توپوگرافی منطقه و هیدرولوژی حوضه، سبب شده است که تفتان به عنوان مهم‌ترین عامل تغذیه آب‌های زیرزمینی در آبخوان‌های خاش، تهلاب، لادیز و میرجاوه مطرح باشد (آبرومند، ۱۳۸۸، سراوانی، ۱۳۸۹، سهرابی زاده، ۱۳۸۹). پژوهش‌ها نشان داده که گازهای گوگردی خروجی از آتش‌فشان تفتان، واجد غلظت قابل توجه آرسنیک هستند (مختاری، ۱۳۸۸). به علاوه، تجزیه نمونه‌های چشمه‌ها و آب‌های زیرزمینی این منطقه نیز آلودگی به گوگرد و آرسنیک را نشان می‌دهند (فیروزکوهی، ۱۳۸۸). از آنجا که کمپلکس‌های مختلف آرسنیک‌دار آبی، می‌توانند از طریق جذب سطحی به خاک منتقل شوند، امکان آلودگی خاک به شکل غیرمستقیم و از طریق آب، نیز وجود دارد.

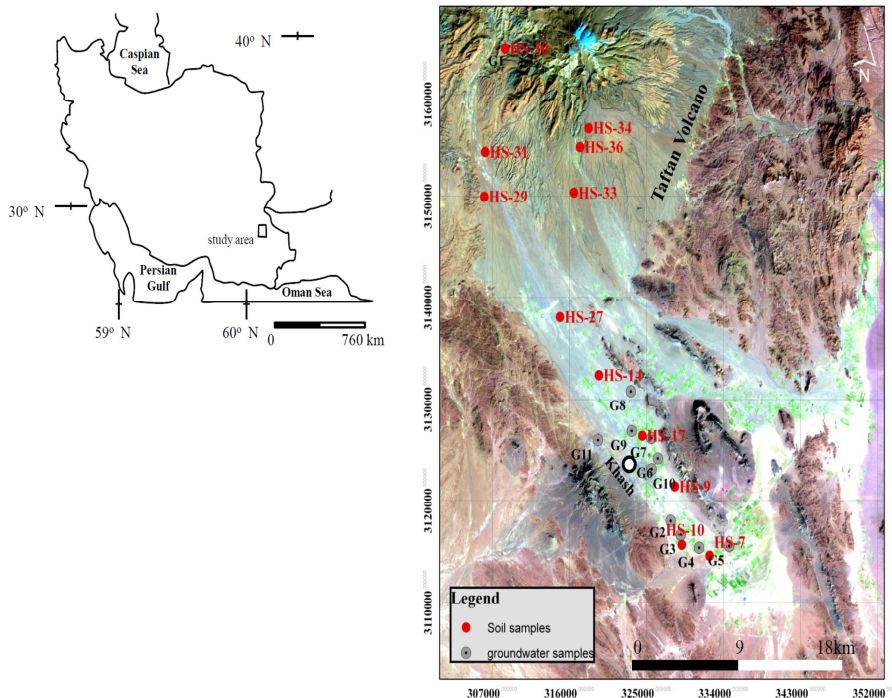
در این پژوهش، نمونه‌های خاک دشت خاش، با هدف مطالعه آلودگی به عنصر آرسنیک، در اثر فعالیت‌های آتش‌فشان تفتان، مطالعه شده‌اند. به علاوه، از آن جایی که گوگرد در مواد حاصل از فعالیت‌های آتش‌فشان تفتان فراوان بوده و غالباً در آلودگی‌های زمین‌زاد، رفتاری مشابه با آرسنیک داشته و همراه آن مشاهده می‌شود، در این پژوهش، به عنوان یک عنصر شاهد مطالعه شده است. همچنین، به منظور بررسی تأثیر فرآیند جذب سطحی و انتقال آلودگی از آب به خاک، از داده‌های مربوط به غلظت آرسنیک و گوگرد در آب‌های زیرزمینی دشت خاش (فیروزکوهی، ۱۳۸۸)، نیز استفاده شده است.

## داده‌ها و روش‌ها

در این پژوهش، نمونه‌برداری از بادبزنی‌های آبرفتی واقع در دامنه‌های جنوبی تفتان تا منتهی الیه جنوبی دشت خاش، به صورت پراکنده انجام شده (شکل ۱) و موقعیت دقیق این مناطق، ثبت گردیده است. با توجه به اهداف مطالعه، سعی شد که نمونه‌برداری خارج از زمین‌های کشاورزی انجام شود. بعد از انتخاب محل مناسب، گودالی به عمق ۲۰ تا ۳۰ سانتی متر حفر، و در حدود ۲ تا ۳ کیلوگرم خاک در کیسه‌های پلاستیکی جمع‌آوری شدند و مشخصات منطقه نمونه‌برداری شده نیز ثبت گردید (شکل ۱). در مجموع از ۳۶ منطقه، نمونه خاک جمع‌آوری شد که از این تعداد، ۱۲ نمونه، برای انجام تجزیه‌های لازم، انتخاب گردید. معیار انتخاب نمونه‌ها موقعیت جغرافیایی آن‌ها بوده است. به شکلی که داده‌ها از شمال تا جنوب منطقه مورد مطالعه را پوشش دهند. به علاوه برای بررسی میزان کاهش یا افزایش آلودگی، همراه با افزایش فاصله از تفتان، تعداد ۶ نمونه از آبرفت‌های دامنه‌های جنوبی تفتان، که خاک آن مستقیماً از مواد آتش‌فشانی حاصل شده، برداشت گردید و بقیه نمونه‌ها، از دشت خاش و هم‌روند با کشیدگی دشت، انتخاب شدند. در نمونه‌برداری از خاک‌های منطقه، تلاش شد که نمونه‌های برداشت شده از دشت خاش، از محل‌های مجاور به نمونه‌برداری‌های فیروزکوهی (۱۳۸۸)، برداشت شوند، تا مقایسه و نتیجه‌گیری پیرامون انتقال آلودگی از آب به خاک، مورد آزمون قرار گیرد.

در ابتدا نمونه خاک‌های برداشت شده از منطقه، به مدت چند روز در معرض هوای آزاد قرار گرفتند تا خشک شوند. پس از خشک شدن، مطابق روش غربال خشک (موسوی حرمی و محبوبی، ۱۳۸۲)، نمونه‌ها برای اندازه‌گیری قطر دانه‌ها، از سری الک‌ها عبور داده شدند. هنگام الک کردن، برای جلوگیری از انتقال آلودگی، در هر مرحله از آماده سازی، الک‌ها کاملاً تمیز شدند. به منظور انجام آزمایشات شیمیایی خاک، نیمی از نمونه‌های سیلت و رس به دست‌آمده از آخرین الک (مش ۲۳۰، ۶۳ میکرون)، برای انجام تجزیه شیمیایی به آزمایشگاه ارسال گردید. زیرا، ریزدانه‌ترین بخش نمونه‌ها، شامل سیلت و رس، فعال‌ترین بخش خاک در فرآیند جذب سطحی هستند و برای تخمین میزان آلودگی در خاک، به کار می‌روند (ایبای، ۲۰۰۴).

برای اندازه‌گیری پی‌اچ، نمونه‌های خاک را با نسبت ۱ به ۱۰، در آب مقطر ریخته و بعد از گذشت هفتاد و دو ساعت، پی‌اچ نمونه‌های انتخاب شده برای تجزیه، با استفاده از دستگاه سنجش پی‌اچ، اندازه‌گیری شد (جدول ۱). تجزیه‌های شیمیایی در آزمایشگاه اس‌جی‌اس کانادا، برای دو عنصر آرسنیک و گوگرد، به ترتیب با روش‌های پلاسمای مزدوج القایی - نوع طیف‌سنج جرمی و پلاسمای مزدوج القایی - نوع طیف‌سنج نشر اتمی، صورت گرفته است. نتایج تجزیه نمونه‌های خاک برای عناصر آرسنیک، بر حسب پی‌پی‌ام و برای گوگرد، بر حسب درصد، در جدول ۱ آمده است. همچنین نتایج تجزیه نمونه‌های آب زیرزمینی حاصل پژوهش فیروزکوهی (۱۳۸۸)، در جدول ۲ آمده است.



شکل ۱: موقعیت منطقه مطالعه شده و تصویر ماهواره ای دشت خاش و آتش‌فشان تفتان، برگرفته از گوگل ارث. موقعیت جغرافیایی نمونه‌های خاک تجزیه شده در این پژوهش و نمونه‌های آب زیرزمینی تجزیه شده، برگرفته از فیروزکوهی (۱۳۸۸)، در تصویر مشخص شده‌اند.

جدول ۱: موقعیت جغرافیایی (مقیاس متریک<sup>۱</sup>)، مقادیر پی‌اچ، آرسنیک (بر حسب پی‌پی‌ام) و گوگرد (بر حسب درصد)، در نمونه‌های خاک دشت خاش (تجزیه شده در این پژوهش).

شماره نمونه	محل	X	Y	pH	As (ppm)	S (%)
HS-۷	فیض آباد	۳۳۲۳۷۹	۳۱۱۴۵۷۷	۸/۵۴	۱۲	۰/۱۴
HS-۹	نصرت آباد	۳۲۸۳۲۴	۳۱۲۱۴۰۴	۷/۷۸	۹	۰/۰۴
HS-۱۰	بیت آباد	۳۲۹۱۴۶	۳۱۱۵۶۴۶	۸/۱۶	۱۴	۰/۵۱
HS-۱۴	اکبر آباد	۳۱۹۴۶۵	۳۱۳۲۳۷۵	۹/۱۴	۱۱	۰/۱۱
HS-۱۷	محمودآباد	۳۲۴۵۲۱	۳۱۲۶۳۹۵	۷/۶۳	۱۳	۰/۱
HS-۲۷	نوک آباد	۳۱۴۹۳۲	۳۱۳۸۰۵۲	۸/۹۲	۱۲	۰/۰۹
HS-۲۹	غرب تفتان (مخروط تفتان)	۳۰۶۰۹۰	۳۱۴۹۹۶۱	۸/۹۴	۱۳	۰/۰۶
HS-۳۰	گمچین (مخروط تفتان)	۳۰۸۵۱۳	۳۱۶۴۵۰۷	۸/۰۳	۹	۰/۰۸
HS-۳۱	چاهوک (مخروط تفتان)	۳۰۶۱۸۸	۳۱۵۴۳۲۳	۷/۵۳	۱۱	۰/۰۳
HS-۳۳	مسیر ترشاب (مخروط تفتان)	۳۱۶۵۳۶	۳۱۵۰۳۴۵	۸/۹	۱۴	۰/۲۴
HS-۳۴	مسیر ترشاب (مخروط تفتان)	۳۱۸۲۶۰	۳۱۵۶۶۶۰	۷/۶۳	۶	۰/۰۳
HS-۳۶	مسیر ترشاب (مخروط تفتان)	۳۱۷۲۵۸	۳۱۵۴۸۱۲	۷/۵۸	۷	۰/۰۴

جدول ۲: موقعیت جغرافیایی (مقیاس متریک) و مقادیر آرسنیک و گوگرد (بر حسب پی‌پی‌ام)، در نمونه‌های آب زیرزمینی تجزیه شده از چشمه دره‌گل، واقع در دامنه تفتان و چاه‌های آب دشت خاش، برگرفته از فیروزکوهی (۱۳۸۸).

نام نمونه	نام منطقه	X	Y	pH	As (ppm)	S (ppm)
G <sub>۱</sub>	چشمه دره‌گل	۳۰۹۰۰۷	۳۱۶۴۷۴۳	۴/۴۳	۰/۰۰۵	۱۱۶
G <sub>۲</sub>	ناصری	۳۲۸۷۴۷	۳۱۱۸۰۰۹	۷/۱	۰/۰۱۵۴	۴۶۳
G <sub>۳</sub>	بیت آباد	۳۲۹۰۱۷	۳۱۱۶۶۵۱	۷/۱۱	۱/۱۰۱	۴۹۱
G <sub>۴</sub>	کمال آباد	۳۳۱۱۷۵	۳۱۱۵۲۸۰	۶/۷۷	۰/۰۰۶۸	۴۲۹
G <sub>۵</sub>	کلکلی	۳۳۴۶۷۴	۳۱۱۵۵۵۵	۶/۴۶	۰/۰۰۵۲	۵۲۸
G <sub>۶</sub>	اسلام آباد	۳۲۶۳۴۰	۳۱۲۴۱۷۶	۶/۱۱	۰/۰۱۵۱	۲۶۲
G <sub>۷</sub>	شکاری	۳۲۵۶۰۸	۳۱۲۶۱۸۶	۶/۱۷	۰/۰۲۲۲	۲۳۹
G <sub>۸</sub>	اسپیتک	۳۲۳۱۹۳	۳۱۳۰۸۰۷	۶/۳۱	۰/۰۱۷۵	۲۱۰
G <sub>۹</sub>	نجف آباد	۳۲۳۳۰۶	۳۱۲۶۸۹۲	۵/۸۴	۰/۰۰۹۴	۴۶۰
G <sub>۱۰</sub>	خاش	۳۲۵۶۲۰	۳۱۲۳۱۱۷	۶/۶۵	۰/۰۱۰۹	۷۲/۴
G <sub>۱۱</sub>	اکبرآباد	۳۱۹۴۵۳	۳۱۲۵۹۸۵	۵/۸۵	۰/۸۳	۱۳۳

همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، پی‌اچ نمونه‌های خاک، بین ۷/۵ تا ۹/۱ متغیر است. این مقدار با توجه به سه نکته زمین‌شناختی-جغرافیایی، توجیه پذیر است. اولاً، حجم قابل توجهی از سنگ‌های کرتاسه تا الیگوسن (معین وزیری، ۱۹۸۵)، که آتشفشان تفتان بر روی آن‌ها قرار گرفته و در حال حاضر در اطراف آتشفشان فراوانند، دارای ترکیب کربناتی هستند. ثانیاً، سنگ‌های آتشفشان تفتان، واجد مقادیر قابل توجهی سدیم هستند. سدیم، در

<sup>۱</sup>utm

فرآیندهای خاکزایی عنصری به شدت نامتحرک است، و در اثر تجزیه سنگ‌ها، در ترکیبات خاک متمرکز می‌شود. ثالثاً، منطقه مورد مطالعه جزء مناطق خشک و کم باران به‌شمار می‌آید، به طوری که مقادیر تبخیر و تعرق، از میزان بارندگی در منطقه، بیشتر بود و این خود دلیلی بر بالا ماندن عناصر قلیایی و قلیایی خاکی در خاک‌های منطقه است. هر سه عامل ذکر شده، باعث افزایش پی‌اچ خاک می‌شوند.

نتایج دانه‌سنجی خاک‌ها نشان داد که اندازه ذرات تشکیل‌دهنده رسوبات در نمونه‌های برداشت‌شده از دشت خاش و دامنه‌های تفتان، در حد گراول (قطر بیش از ۲ میلی‌متر)، ماسه (قطر ۰/۰۶ تا ۲ میلی‌متر)، سیلت (قطر ۰/۰۰۴ تا ۰/۰۶ میلی‌متر) و رس (قطر کمتر از ۰/۰۰۴ میلی‌متر) هستند. مقدار گراول‌ها در قسمت‌های دامنه بیشتر بوده و هرچه از دامنه به سمت دشت پیش می‌رویم، مقادیر ذرات درشت‌دانه کاهش، و به‌عکس، ذرات ریزدانه افزایش می‌یابند، لذا انتظار می‌رود آلودگی در دشت خاش، بویژه بخش‌های جنوبی آن، نسبت به دامنه‌های تفتان، بیشتر باشد. ترسیم نمودارهای هیستوگرام، نشان داد که رسوبات از یک منشأ سرچشمه گرفته‌اند (یونی‌مدال هستند). همچنین بیشترین فراوانی اندازه ذرات تشکیل‌دهنده دشت خاش، در محدوده ۳ تا ۳/۲۵ فی (ماسه بسیار ریزدانه) می‌باشند. کمترین فراوانی ذرات هم در محدوده گراول و ماسه‌های بسیار درشت‌دانه با جورشدگی متوسط تا بد، قرار می‌گیرند. ترسیم منحنی‌های تجمعی نیز نشان داد که محیط رسوبگذاری از نوع بادبزنی آبرفتی، با غلبه جریان‌های سیلابی صفحه‌ای (برای مثال، بال<sup>۱</sup>، ۱۹۷۷) بوده است (شیرین شان‌دیز، ۱۳۸۹). این یافته‌ها نشان می‌دهد که منبع اصلی تشکیل خاک (سنگ بستر) در دشت خاش، آتش‌فشان تفتان بوده است.

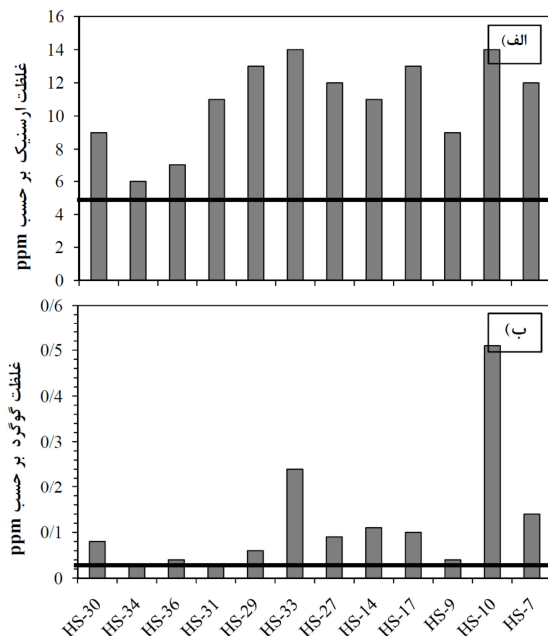
مقادیر گوگرد و آرسنیک، حاصل از تجزیه نمونه‌های خاک مورد مطالعه، در جدول ۱ آورده شده است. مقدار آرسنیک در نمونه‌های مورد مطالعه بین ۶ تا ۱۴ پی‌پی‌ام و مقدار گوگرد نیز بین ۰/۰۳ تا ۰/۵۱ درصد، متغیر است. کمترین مقدار آرسنیک مربوط به نمونه اچ‌اس-۳۴ و بیشترین مقدار آن نیز مربوط به نمونه‌های اچ‌اس-۱۰ و اچ‌اس-۳۳ است. کمترین غلظت گوگرد مربوط به نمونه‌های اچ‌اس-۳۱ و اچ‌اس-۳۴ (۰/۰۳ درصد) و بیشترین غلظت آن نیز مربوط به نمونه اچ‌اس-۱۰ (۰/۵۱ درصد) است. همچنین، نتایج حاصل از تجزیه نمونه‌های آب زیرزمینی برداشت شده از چاه‌های دشت خاش و چشمه دره‌گل در دامنه تفتان، برگرفته از پژوهش فیروزکوهی (۱۳۸۸)، در جدول ۲ آمده است. مقدار پی‌اچ در آب‌های زیرزمینی دشت خاش، بین ۴/۴۳ و ۷/۱۱ و غلظت عناصر آرسنیک و گوگرد به ترتیب بین حدود ۰/۰۵ تا ۱/۱ و ۷۲/۴ تا ۵۲۸ میلی‌گرم بر لیتر (پی‌پی‌ام)، متغیر است.

## نتایج و بحث

حد مجاز آرسنیک موجود در خاک، بر اساس استاندارد سازمان حفاظت از محیط‌زیست آمریکا<sup>۱</sup>، ۰/۳۹ پی‌پی‌ام است (ژو<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۷) و در گزارشی دیگر، میانگین مجاز گوگرد در خاک، ۷/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم، تعیین شده است (اسپارکز<sup>۴</sup>، ۱۹۹۵). حد مجاز گوگرد در خاک نیز، بین ۰/۰۶ تا ۰/۰۶ درصد و به طور میانگین ۰/۰۳ درصد،

1Bull  
2USEPA  
3Zhou  
4Sparks

تعیین شده است (طباطبایی و برمنر<sup>۱</sup>، ۱۹۷۲). مقدار آرسنیک و گوگرد اندازه‌گیری شده در همه نمونه‌های منطقه، از این مقادیر بیشتر است. همان‌طور که در شکل ۲، الف و ب مشاهده می‌شود، اکثر نمونه‌های منطقه از نظر آرسنیک و گوگرد، آلودگی نشان می‌دهند؛ به‌ویژه نمونه‌های خاک نواحی جنوبی دشت خاش، به شدت آلوده به گوگرد هستند.

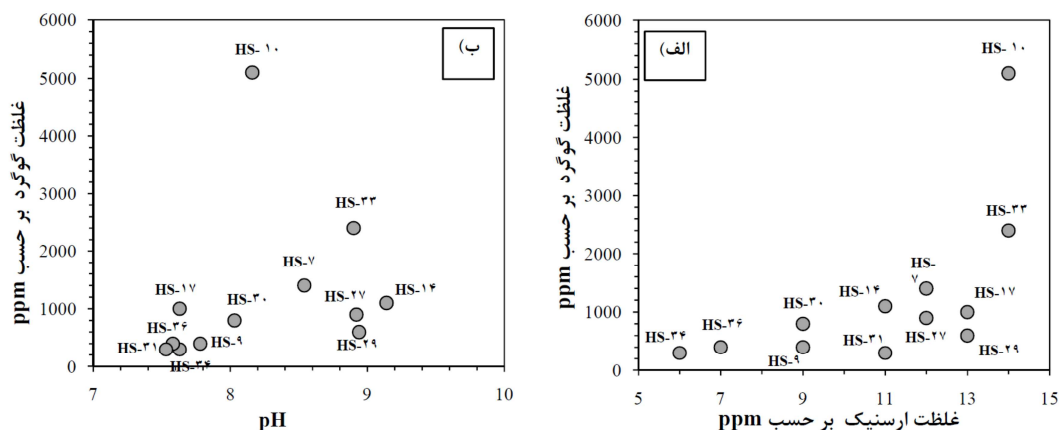


شکل ۲: هیستوگرام غلظت آرسنیک (الف) و گوگرد (ب) در نمونه‌های خاک منطقه. در این تصاویر همچنین، میانگین حد مجاز این عنصر توسط استاندارد USEPA، با خط تیره افقی، نشان داده شده است.

گازهای گوگردی که از تفتان به اتمسفر منتشر می‌شوند، به طور مستقیم می‌توانند جذب خاک شده و موجبات افزایش گوگرد خاک را فراهم آورند. پی‌اچ این گازها به شدت اسیدی (حدود ۳)، است (مختاری، ۱۳۸۸) و دگرسانی-های وسیعی را در سنگ‌های آتشفشانی تفتان، ایجاد کرده‌اند. فرسایش این سنگ‌ها نیز در طول زمان، به افزایش محتوای گوگرد در خاک‌های دشت خاش، کمک کرده است. همچنین، غلظت آرسنیک در گازهای خروجی از تفتان، قابل توجه است (۰/۶۷ پی‌پی‌ام) (مختاری، ۱۳۸۸). بررسی ضرایب ماتریس همبستگی (بال، ۱۹۷۷)، مؤید همبستگی مثبت (ضریب همبستگی برابر ۰/۷۶) گوگرد با آرسنیک است (شکل ۳، الف) که می‌تواند تأییدی بر منشأ آتشفشانی آن باشد. به‌علاوه، بین مقدار گوگرد و پی‌اچ، نیز ضریب همبستگی قابل توجهی (برابر با ۰/۶۱) وجود دارد (شکل ۳، ب) که نشان‌دهنده وجود یک محیط قلیایی و غنی از گوگرد، در خاک است.

<sup>1</sup>Bremner

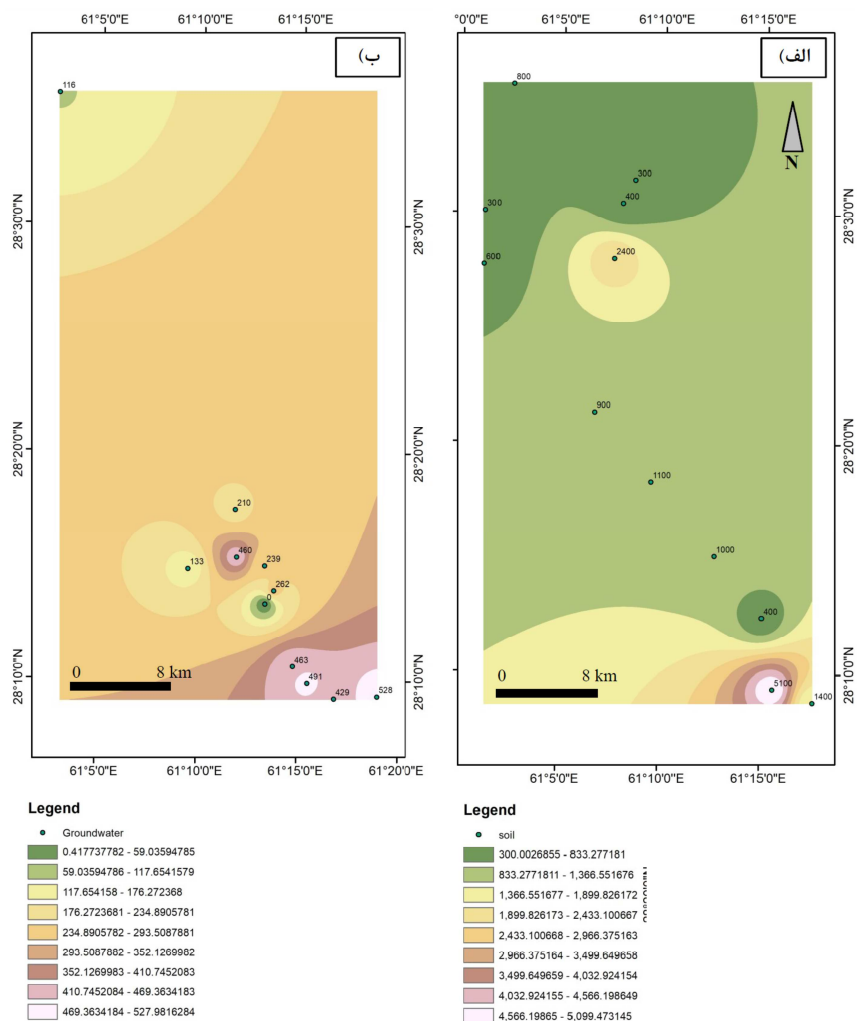




شکل‌های ۴ و ۵ (الف و ب) به ترتیب، پهنه‌بندی آلودگی به گوگرد و آرسنیک را در نمونه‌های خاک (پژوهش حاضر) و نمونه‌های آب زیرزمینی (فیروزکوهی، ۱۳۸۸) منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهند. این تصاویر بر اساس درون‌یابی نتایج تجزیه نمونه‌های مطالعه شده ترسیم شده است. مطابق شکل ۴ (الف)، مقدار گوگرد در نمونه‌های خاک برداشت شده از آبرفت‌های دامنه تفتان، کمتر از مقدار گوگرد در اغلب نمونه‌های برداشت شده از دشت خاش است. دو نمونه اچ‌اس-۱۰ و اچ‌اس-۲۷، نسبت به سایر نمونه‌ها، کمی آلوده‌تر هستند. در نمونه‌های آب زیرزمینی (شکل ۴، ب)، نیز نمونه برداشت شده از چشمه دره‌گل، واقع در نزدیکی تفتان، نسبت به نمونه‌های دشت خاش، آلودگی کمتری به گوگرد نشان می‌دهد. نمونه‌های آب زیرزمینی بخش جنوبی دشت خاش، بیشترین میزان آلودگی به گوگرد را نشان می‌دهند و در نمونه جی-۶، ناپهنجاری مشاهده می‌شود.

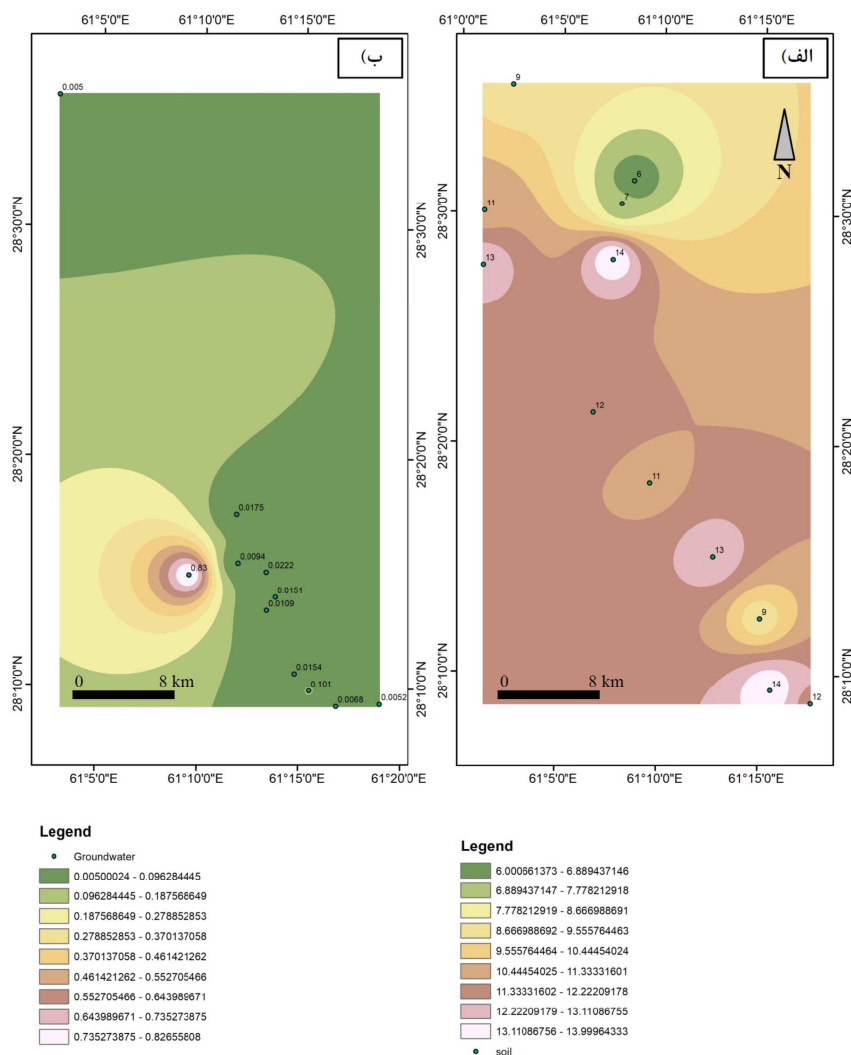
با توجه به نتایج پهنه‌بندی آلودگی، بین فاصله‌گرفتن از آتش‌فشان تفتان، و میزان آلودگی به گوگرد، ارتباط مستقیم مشاهده می‌شود. افزایش آلودگی به گوگرد در بخش‌های جنوبی دشت خاش، با افزایش پی‌اچ خاک در این مناطق همراه است که به دلیل وجود ترکیبات آهکی و افزایش مقدار سدیم در این نمونه‌ها، حاصل شده است (شیرین‌شاندیز، ۱۳۸۹). در اثر افزایش ترکیبات آهکی و قلیایی شدن محیط خاک، انحلال‌پذیری گوگرد در بخش‌های جنوبی دشت خاش کاهش یافته، و در نتیجه موجبات ته‌نشست گوگرد به صورت عنصری و در قالب ترکیباتی نظیر ژپس و پیروتیت، فراهم شده است (برای مثال، استام<sup>۱</sup> و مورگان<sup>۲</sup>، ۱۹۹۶). افزایش آلودگی در بخش‌های جنوبی دشت خاش، با نتایج دانه‌بندی رسوبات، که حاکی از افزایش مقدار سیلت و رس در بخش‌های جنوبی دشت خاش است، نیز همخوانی دارد. هر چند عوامل دیگری نظیر جذب گوگرد توسط موجودات زنده خاک، باعث تجمع این عنصر به صورت سولفات‌ها در خاک می‌گردد (برای مثال، بارتون<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۴، پینا<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۵) اما این فرآیند، دلیل جوان بودن خاک و اقلیم خشک، و در نتیجه محتوای بسیار پایین مواد آلی در خاک‌های دشت خاش، کمتر محتمل است.

<sup>1</sup>Stumm  
<sup>2</sup>Morgan  
<sup>3</sup>Burton  
<sup>4</sup>Pigna



شکل ۴: پهنه‌بندی آلودگی گوگرد (الف) در نمونه‌های خاک (داده‌های این پژوهش) و (ب) نمونه‌های آب زیرزمینی (داده‌ها برگرفته از فیروزکوهی، ۱۳۸۸). مقدار گوگرد در نقاط نمونه‌برداری شده، روی تصویر مشخص شده است. توضیحات کامل در متن آمده‌است.

مطابق شکل ۵ (الف)، مقدار آرسنیک در نمونه‌های آبرفت‌های دامنه تفتان، کمتر از مقدار آرسنیک در خاک‌های دشت خاش است. به علاوه، مقدار آرسنیک در دو نمونه اچ‌اس-۱۰ و اچ‌اس-۲۷ نابهنجاری شدید نشان می‌دهد و در دو نمونه اچ‌اس-۱۷ و اچ‌اس-۲۹، نیز با شدت کمتری نابهنجار است. در نمونه‌های آب زیرزمینی تفاوتی بین مقدار آرسنیک موجود در نمونه آب برداشت شده از چشمه دره گل (نمونه جی ۱)، واقع در دامنه تفتان، و نمونه‌های آب زیرزمینی برداشت شده از چاه‌های دشت خاش، وجود ندارد (شکل ۵، ب). به‌طور کلی، به جز نمونه جی ۱۱، که نابهنجاری نشان می‌دهد، توزیع آرسنیک در آب‌های زیرزمینی سایر بخش‌های دشت، یکنواخت است.



شکل ۵: پهنه‌بندی آلودگی آرسنیک (الف) در نمونه‌های خاک (داده‌های این پژوهش) و (ب) نمونه‌های آب زیرزمینی (داده‌ها برگرفته از فیروزکوهی، ۱۳۸۸). مقدار گوگرد در نقاط نمونه‌برداری شده، روی تصویر مشخص شده است. توضیحات کامل در متن آمده‌است.

در مجموع، همانند آلودگی گوگرد، بین مقدار آلودگی به آرسنیک و فاصله‌گرفتن از آتشفشان تفتان، نیز رابطه مستقیم وجود دارد. در عین حال، بین مقادیر ناهنجاری‌های آرسنیک، در نمونه‌های خاک و آب، هم هماهنگی نسبی مشاهده می‌شود. شکل ۶، (الف و ب) تغییرات آرسنیک و گوگرد در نمونه‌های خاک (این پژوهش) و آب زیرزمینی (فیروزکوهی، ۱۳۸۸) دشت خاش، را نسبت به عرض جغرافیایی نشان می‌دهد. از آنجا که غلظت آرسنیک در نمونه‌های آب نسبت به نمونه‌های خاک، بسیار کمتر است، مقادیر عناصر در نمودار با مقیاس لگاریتمی نشان داده شده‌اند. با دقت در نمودار، می‌توان دریافت که اگر چه بین ناهنجاری‌های موجود در مقدار آرسنیک و گوگرد تطابق کامل مشاهده نمی‌شود، اما میان روندهای افزایشی و کاهش‌ی گوگرد و آرسنیک، در نمونه‌های خاک و آب زیرزمینی،

هماهنگی کلی وجود دارد. این موضوع را از شکل ۳، که هبستگی گوگرد و آرسنیک را نشان می‌دهد، نیز می‌توان برداشت نمود. هماهنگی کلی بین تغییرات گوگرد و آرسنیک، در نمونه‌های خاک و آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه، نشان می‌دهد که واکنش‌های تبادل کاتیونی بین مولکول‌های آب و خاک (برای مثال، اسپوسیتو<sup>۱</sup>)، ۱۹۸۹، استام<sup>۲</sup>، ۱۹۹۲، تا حدودی برقرار بوده است.

آرسنیک به‌طور طبیعی متحرک بوده، و احتمال تمرکز آن در یک محل، کم است. این عنصر، بیشتر تحت تأثیر پی‌اچ و ای‌اچ<sup>۳</sup> محیط، قرار می‌گیرد (برای مثال، برینگر<sup>۴</sup> و رایلی<sup>۵</sup>، ۲۰۱۳). هر چه محیط احیایی تر (و فاقد سولفید هیدروژن<sup>۶</sup>) و دارای پی‌اچ بیشتر باشد، آرسنیک در آن محیط، انحلال‌پذیری بیشتری پیدا می‌کند. در نتیجه در محیط‌های اسیدی و غنی از سولفید هیدروژن، آرسنیک از حالت محلول درآمده و جذب خاک می‌شود (امیربهمن و همکاران، ۲۰۰۶). به این ترتیب، تحرک آرسنیک در خاک‌های اسیدی کم است؛ اما در خاک‌های قلیایی تا خنثی، نظیر خاک‌های تفتان و دشت خاش، که به‌ویژه غنی از سدیم هستند، آرسنیک می‌تواند به صورت آرسنات سدیم محلول و متحرک، وجود داشته باشد (برای مثال، ملو<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۰۶).

---

<sup>۱</sup>Sposito

<sup>۲</sup>Stumm

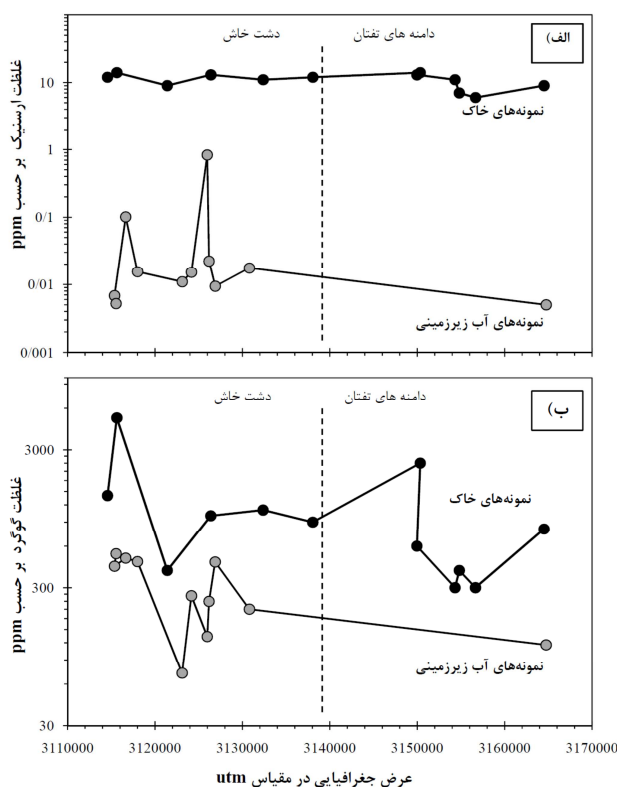
<sup>۳</sup>Eh

<sup>۴</sup>Barringer

<sup>۵</sup>Reilly

<sup>۶</sup>H<sub>2</sub>S

<sup>۷</sup>Mello



شکل ۶: الف) مقادیر عناصر آرسنیک و ب) گوگرد در نمونه‌های خاک و آب زیرزمینی دشت خاش (در مقیاس لگاریتمی). نمونه‌ها از چپ به راست، بترتیب از جنوب به شمال، مرتب شده‌اند. خط‌چین دامنه تفتان را از دشت جدا نموده است.

در آب‌های زیرزمینی دشت خاش، مقادیر پی‌اچ بین ۴/۴۳ تا ۷/۱۱ (جدول ۲) و پی‌اچ، بیش از ۳۵۰ میلی‌ولت (شرایط اکسیدان) اندازه‌گیری شده و آنیون‌های مهم آرسنیک و گوگرددار در آب‌های زیرزمینی دشت خاش، لیگاندهای سولفات<sup>۱</sup> و آرسنات<sup>۲</sup> تعیین شده‌اند (فیروزکوهی، ۱۳۸۸). دو لیگاند آرسنات یاد شده (۵ ظرفیتی)، که نسبت به یون‌های آرسنیت خاصیت سمی کمتری دارند (برای مثال، امیربهمن و همکاران، ۲۰۰۶)، حاصل تفکیک اسید آرسنیک<sup>۳</sup> هستند و به صورت کمپلکس‌های آبی، در آب‌های زیرزمینی حضور دارند. این یون‌ها در پی‌اچ‌های پایین، بیشتر به صورت یون آرسنات (۵ ظرفیتی)، جذب کانی‌های اکسیدی شده و در مقابل، در پی‌اچ نزدیک به خنثی، بیشتر به صورت آرسنیت (۳ ظرفیتی)، جذب خاک می‌گردند. با توجه به پی‌اچ نسبتاً اسیدی تا خنثی آب‌های زیرزمینی در بخش‌های شمالی دشت خاش (فیروزکوهی، ۱۳۸۸)، و نیز شرایط اکسیدان و غلظت قابل توجه گوگرد، به نظر می‌رسد که آرسنیک، به صورت یون‌های آرسنات، به ذرات خاک جذب شده است. با افزایش مقدار پی‌اچ در آب‌های زیرزمینی بخش جنوبی دشت خاش (فیروزکوهی، ۱۳۸۸)، این امکان وجود دارد که آرسنیک به صورت یون آرسنیت، که خاصیت سمی بیشتری دارد، جذب خاک شود.

<sup>۱</sup>SO<sub>4</sub><sup>۲-</sup>

<sup>۲</sup>H<sub>2</sub>AsO<sub>4</sub><sup>-</sup> و HAsO<sub>4</sub><sup>۲-</sup>

<sup>۳</sup>H<sub>3</sub>AsO<sub>4</sub>

چنانکه در شکل ۵ مشاهده شد، نابهنجاری‌های آرسنیک در نمونه‌های خاک مطالعه شده، در ترکیب آب‌های زیرزمینی مشاهده نمی‌شود. یکنواختی مقدار آرسنیک در نمونه‌های آب زیرزمینی دشت خاش، و در عوض وجود نابهنجاری شدید در ۴ نمونه خاک، اچ اس-۱۰، اچ اس-۱۷، اچ اس-۲۷ و اچ اس-۲۹، می‌تواند به وجود کانی‌زایی‌های محلی مرتبط با فعالیت آتش‌فشان تفتان، ارتباط داشته باشد (برای مثال، ریچاردز<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۸). در آتش‌فشان تفتان، کانسارزایی توده‌ای و رگه‌ای آتش‌فشانی و ترکیبات دارای جیوه و طلا، با کانی‌های رآلگار<sup>۲</sup> و اورپیمنت<sup>۳</sup> همراه هستند (ریچاردز و همکاران، ۲۰۱۸).

### نتیجه‌گیری

نتایج مطالعات دانه‌بندی ۳۶ نمونه خاک مطالعه شده در این پژوهش، نشان داد که همه نمونه‌ها عمدتاً از ذرات ماسه، سیلت و رس تشکیل شده‌اند. در بخش‌های جنوبی دشت خاش، محتوای سیلت و بویژه رس خاک‌ها، افزایش یافته است. همچنین نمودارهای هیستوگرام و منحنی‌های تجمعی نشان دادند که محیط ته‌نشست رسوبات، سیلابی-آبرفتی بوده و عمدتاً از آتش‌فشان تفتان، منشأ گرفته‌اند. اندازه‌گیری پی‌اچ، در ۱۲ نمونه انتخابی، نشان داد که این نمونه‌ها، نسبتاً قلیایی هستند و میانگین پی‌اچ آنها، ۸/۲۳ است. همچنین، با افزایش فاصله از تفتان، پی‌اچ افزایش یافته و نمونه‌ها به طور میانگین، قلیایی‌تر می‌شوند.

نتایج تجزیه ۱۲ نمونه منتخب نشان داد که همه نمونه‌ها، از نظر آرسنیک و گوگرد، آلوده‌تر از حد استانداردهای تعیین شده برای سلامت خاک هستند. نقشه‌های پهنه‌بندی آلودگی برای منطقه مورد مطالعه نیز نشان داد که به طور کلی، نمونه‌های دشت خاش، بویژه بخش جنوبی آن، نسبت به نمونه‌های دامنه‌های تفتان، آلوده‌تر هستند و این موضوع با نتایج مطالعات دانه‌بندی مطابقت دارد. علاوه بر تغییرات نسبتاً منظم و افزایشی آلودگی در بخش‌های جنوبی دشت خاش، روندهای کلی افزایشی و کاهش گوگرد و آرسنیک، در نمونه‌های خاک و آب‌های زیرزمینی، از هماهنگی کلی برخوردارند، که وجود تبادل یونی بین ذرات خاک و آب را اثبات می‌کند. در عین حال، وجود برخی نابهنجاری‌های آرسنیک، در نمونه‌های خاک دشت خاش، که در نمونه‌های آب زیرزمینی مشاهده نمی‌شوند، نشان از وجود کانی‌زایی‌های محلی آرسنیک، مرتبط با فعالیت‌های گرمایی تفتان دارد. این کانی‌ها، اغلب ترکیبات دارای جیوه و طلا، همراه با کانی‌های سولفید آرسنیک (رآلگار و اورپیمنت) هستند که در دوره‌هایی از فعالیت تفتان، در این مناطق شکل گرفته‌اند. این نتایج همچنین گویای آن است که بیشتر آلودگی‌ها به طور مستقیم، از فعالیت تفتان به خاک منتقل شده‌اند و برهم‌کنش میان آب و خاک، اگرچه برقرار بوده، اما به عنوان یک عامل اساسی در تغییر ترکیب خاک، مؤثر نبوده است. بنابراین، در مطالعه آلودگی‌های خاک‌های دشت خاش، باید پی‌سنگ آتش‌فشانی دشت و نیز کانی‌زایی گرمایی آتش‌فشان، مد نظر قرار گیرند.

<sup>1</sup> Richards

<sup>2</sup> AsS

<sup>3</sup> As2S3

## منابع

- آبرومند، محمد (۱۳۸۸). بررسی ویژگی های زمین شناختی و آب شناختی آبخوان دشت خاش. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ۱۹۵ ص.
- سراوانی، سمیه (۱۳۸۹). هیدروژئوشیمی آب های زیرزمینی در شمال و شرق تفتان، جنوب شرق ایران، با تاکید بر تاثیرات دراز مدت آتشفشان تفتان. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ۱۱۶ ص.
- سهرابی زاده، مرضیه (۱۳۸۹). ژئوشیمی خاک های مناطق شرق و شمال شرق تفتان، جنوب شرق ایران، با تاکید بر تاثیرات دراز مدت آتشفشان تفتان. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ۱۱۶ ص.
- شیرین شانديز، اعظم (۱۳۸۹). ژئوشیمی خاک های دشت خاش، جنوب شرق ایران، با تاکید بر اثرات دراز مدت آتشفشان تفتان. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ۱۴۷ ص.
- فیروزکوهی، زهرا (۱۳۸۸). هیدروژئوشیمی آبخوان دشت خاش، جنوب شرق ایران با تاکید بر اثرات دراز مدت آتشفشان تفتان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ۱۴۷ ص.
- فیروزکوهی، زهرا (۱۳۹۶). تبیین و تفسیر ماهیت ژئوشیمیایی ماگماتیسم سنوزوئیک پسین در شمال مکران ایران. پایان نامه دکتری، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ۳۵۰ ص.
- مختاری، زهرا (۱۳۸۸). شیمی گازهای آتشفشانی و چشمه های آب گرم آتشفشان تفتان، جنوب شرق ایران: نگرشی زیست محیطی. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ۱۳۵ ص.
- موسوی حرمی، رضا؛ محبوبی، اسدالله (۱۳۸۲). رسوب شناسی کاربردی: مرکز نشر دانشگاهی، چاپ اول، ۲۶۶ ص.
- Amirbahman, A., Kent, B.D., Curtis, G.P., Davis, J.A. (2006). Kinetics of sorption and abiotic oxidation of arsenic (III) by aquifer materials. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.10.036>.
- Barringer, J. L., Reilly, P.A. (2013). Arsenic in Groundwater: Summary of Sources and the Biochemical and Hydrogeologic Factors Affecting Arsenic Occurrence and Mobility. in Bradley P. M. ed Current respective in contaminant hydrology and water resources sustainability. <http://dx.doi.org/105772/55354>.
- Bartoli, F. Buurman, P. Delvaux, B. Madeira, M. (2003). Volcanic soils: properties and processes as a function of soil genesis and land use. *Geoderma*, 117(3), pp 183-184.
- Biabangard, H., Moradian, A. (2008). Geology and geochemical evaluation of Taftan Volcano, Sistan and Baluchestan Province, southeast of Iran. *Chinese Journal of Geochemistry*, 27, pp 356- 369. <https://doi.org/10.1007/s11631-008-0356-z>.
- Brinkel, J., Mobarak M., Khan, H., Kraemer, A. (2009). A Systematic Review of Arsenic Exposure and Its Social and Mental Health Effects with Special Reference to Bangladesh Johanna. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 6 (5), pp 1609- 1619.
- Bull, W.B. (1977). The alluvial-fan environment, *Progress in Physical Geography*, 1, pp 222-270.
- Burton, E.D., Johnston, S.G., Kocar, B.D. (2014). Arsenic Mobility during Flooding of Contaminated Soil: The Effect of Microbial Sulfate Reduction. *Environmental Science and Technology*, 48, pp 1360-1367. <https://doi.org/10.1021/es503963k>.
- Cai, Y, Cabrera, J.C., Georgiadis, M., Jayachandran, K. (2002). Assessment of arsenic mobility in the soils of some golf courses in South Florida. *Science of the Total Environment*, 291(1-3), pp 123-134.
- Eby, G. N. (2004) *Principles of Environmental Geochemistry*. Thomson Publication, 514 p.
- Fujino, Y.; Guo, X.; Liu, J.; You, L.; Miyatake, M., Yoshimura, T. (2004). Japan Inner Mongolia Arsenic Pollution (JIAMP) Study group. Mental health burden amongst inhabitants of an arsenic-affected area in Inner Mongolia, China. *Social Science and Medicine*, 59(9), pp 1969-1973.
- He, Y.T., Fitzmauric, A.G., Bilgin, A., Choi, S., O'Day, P., Horst, J., Harrington, J., Reisinger, H.J., Burris, D., Hering, J.G. (2010). Geochemical processes controlling arsenic mobility in groundwater: A case study of arsenic mobilization and natural attenuation. *Applied Geochemistry*, 25, pp 69- 80.
- Kent, D.B., Fox, P.M. (2004). The influence of groundwater chemistry on arsenic concentrations and speciation in quartz sand and gravel aquifer. *Geochemical Transactions*, 5(1), pp 1-12.
- Keya, M.K. (2004). The mental health of arsenic victims in Bangladesh. *South African Anthropol*, 4, pp 215-223.
- Masuda, H. (2018). Arsenic Cycling in the Earth's crust and the hydrosphere: interaction between naturally occurring arsenic and human activities. *Progress in Earth and Planetary Science*, 5(68), pp 55-66. <https://doi.org/10.1186/s40645-018-0224-3>.
- Mello, J., Roy, W., Talbott, J., Stucki, J. (2006). Mineralogy and arsenic mobility in arsenic-rich Brazilian soils and sediments. *Journal of Soils and Sediments*, 6, pp 9- 19.
- Moinevaziri, H. (1985). *Volcanism tertiary and quaternary in Iran*. PhD Thesis, Orsay University, In French.
- Montgomery, C. W. (2000). *Environmental Geology updated the fifth edition*. McGraw-Hill, United State of America, 546 p.

- Nriagu, J.O., Bhattacharya, P., Mukherjee, A.B., Bundschuh, J., Zevenhoven, R., Loeppert, R.H. (2007). Arsenic in soil and groundwater: an overview. *Trace Metals and other Contaminants in the Environment*, 9, pp 3-60.
- Parrone, D., Ghergo, S., Frollini, E., Rossi, D., Preziosi, E. (2020). Arsenic-fluoride co-contamination in groundwater: Background and anomalies in a volcanic-sedimentary aquifer in central Italy. *Journal of Geochemical Exploration*. <http://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106590>.
- Pigna, M., Caporale, A.G., Cavalca, L., Sommella, A., Violante, A. (2015). Arsenic in the Soil Environment: Mobility and phyto availability. *Environmental Engineering Science*. <https://doi.org/10.1089/ees.2015.0018>.
- Richards, P. J., Razavi, A. M., Spell, T. R., Locock, A., Sholeh, A., Aghazadeh, M. (2018). Magmatic evolution and porphyry-epithermal mineralization in the Taftan volcanic complex, southeastern Iran. *Ore Geology Reviews*, 95, pp 258 – 279.
- Schmincke, H. U. (2006). *Volcanism*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 324p.
- Selene, C.H., Chou, J., De Rosa, C. T. (2003). Case studies arsenic. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 206(4-5), pp 381- 386.
- Sparks, D. L. (1995). *Environmental Soil Chemistry*. Academic Press, 267 p.
- Sposito, G. (1989). *The Chemistry of Soils*. Oxford University Press, New York, 277 p.
- Stumm, W. (1992). *Chemistry of the Solid-Water Interface, Processes at the Mineral-Water and Particle-Water Interface in Natural Systems*. John Wiley and Sons, Inc. New York, 428 p.
- Stumm, W., Morgan, J. J. (1996). *Aquatic Chemistry, Chemical Equilibria, and Rates in Natural Waters*. John Wiley and Sons, inc., New York, 1005 p.
- Tabatabai, M.A., Bremner, J.M. (1972). From of sulfur, and carbon, nitrogen, and Sulfur relationships, in Lwa soils. *Soil Science*, 114, pp 380-386.
- Ugolini, F., C., Dahlgren, R A. (2002). Soil Development in Volcanic Ash. *Journal of Global Environmental Research*, 6(2), pp 69-81.
- Wang, S., Mulligan, C.N. (2006). Occurrence of arsenic contamination in Canada: Sources, behavior, and distribution. *Science of The Total Environment*, 366(2-3), pp 701- 721.
- Wu, J., Liang, J., Björn, L., Li, J., Shu, W., Wang, Y. (2022). Phosphorus-arsenic interaction in the ‘soil-plant-microbe’ system and its influence on arsenic pollution. *Science of The Total Environment*, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149796>.
- Yan-Chu, H. (1994). Arsenic Distribution in Soils. In Nriagu, J. O (Ed). *Arsenic in the environment (Part II)*. Willey, New York, pp 17-49.
- Zhou, Q., Teng, Y., Liu, Y. (2017). A study on soil-environmental quality criteria and standards of arsenic. *Applied Geochemistry*, 77, pp 158-166.





## References

### References (in Persian)

- Aberoumand, M. (2009). Geological and hydrological characteristics of the Dasht-e-Khash aquifer. MSc thesis, University of Sistan and Baluchestan, 250 p. [in Persian]
- Firouzkouhi, Z. (2009). Hydrogeochemistry of the Dasht-e-Khash aquifer, SE Iran, Long-term effects of the Taftan volcano. MSc thesis, University of Sistan and Baluchestan, 150 p. [In Persian]
- Firouzkouhi, Z. (2017). Geochemical Characterization and Interpretation of Late Cenozoic Volcanism in the north of Iranian Makran. PhD Thesis, University of Sistan and Baluchestan, 350 p. [In Persian]
- Mokhtari, Z. (2009). Chemistry of volcanic gases and hot springs of Taftan volcano. MSc thesis, University of Sistan and Baluchestan, 135 p. [In Persian]
- Mousavi Harami, R., Mahboubi, A. (2003). Applied Sedimentology, Center for University Publication, Tehran, Iran. [In Persian]
- Saravani, S. (2010). Hydrogeochemistry of groundwater in Noth and east of Taftan Mountain, SE Iran, Long-term effects of volcanic activity. MSc thesis, University of Sistan and Baluchestan, 116 p. [In Persian]
- Shirin-e-Shandiz, A. (2010). Geochemistry of soils in Dasht-e-Khash, SE Iran, Long-term effects o volcanic activity. MSc thesis, University of Sistan and Baluchestan, 137 p. [In Persian]
- Sohrabzade, M. (2010). Geochemistry of soils in eastern and northeastern Taftan Mountain, SE Iran, Long-term effects of volcanic activity. MSc thesis, University of Sistan and Baluchestan, 116 p. [In Persian]

### References (in English)

- Amirbahman, A., Kent, B.D., Curtis, G.P., Davis, J.A. (2006). Kinetics of sorption and abiotic oxidation of arsenic (III) by aquifer materials. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.10.036>.
- Barringer, J. L., Reilly, P.A. (2013). Arsenic in Groundwater: Summary of Sources and the Biochemical and Hydrogeologic Factors Affecting Arsenic Occurrence and Mobility. in Bradley P. M. ed Current respective in contaminant hydrology and water resources sustainability. <http://dx.doi.org/105772/55354>.
- Bartoli, F. Buurman, P. Delvaux, B. Madeira, M. (2003). Volcanic soils: properties and processes as a function of soil genesis and land use. *Geoderma*, 117(3), pp 183–184.
- Biabangard, H., Moradian, A. (2008). Geology and geochemical evaluation of Taftan Volcano, Sistan and Baluchestan Province, southeast of Iran .*Chinese Journal of Geochemistry*, 27, pp 356- 369. <https://doi.org/10.1007/s11631-008-0356-z>.
- Brinkel, J., Mobarak M., Khan, H., Kraemer, A. (2009). A Systematic Review of Arsenic Exposure and Its Social and Mental Health Effects with Special Reference to Bangladesh Johanna. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 6 (5), pp 1609- 1619.
- Bull, W.B. (1977). The alluvial-fan environment, *Progress in Physical Geography*, 1, pp 222-270.
- Burton, E.D., Johnston, S.G., Kocar, B.D. (2014). Arsenic Mobility during Flooding of Contaminated Soil: The Effect of Microbial Sulfate Reduction. *Environmental Science and Technology*, 48, pp 1360–1367. <https://doi.org/10.1021/es503963k>.
- Cai, Y, Cabrera, J.C., Georgiadis, M., Jayachandran, K. (2002). Assessment of arsenic mobility in the soils of some golf courses in South Florida. *Science of the Total Environment*, 291(1-3), pp 123-134.
- Eby, G. N. (2004) Principles of Environmental Geochemistry. Thomson Publication, 514 p.
- Fujino, Y.; Guo, X.; Liu, J.; You, L.; Miyatake, M., Yoshimura, T. (2004). Japan Inner Mongolia Arsenic Pollution (JIAMP) Study group. Mental health burden amongst inhabitants of an arsenic-affected area in Inner Mongolia, China. *Social Science and Medicine*, 59(9), pp 1969-1973.
- He, Y.T., Fitzmauric, A.G., Bilgin, A., Choi, S., O’Day, P., Horst, J., Harrington, J., Reisinger, H.J., Burris, D., Hering, J.G. (2010). Geochemical processes controlling arsenic mobility in groundwater: A case study of arsenic mobilization and natural attenuation. *Applied Geochemistry*, 25, pp 69- 80.
- Kent, D.B., Fox, P.M. (2004). The influence of groundwater chemistry on arsenic concentrations and speciation in quartz sand and gravel aquifer. *Geochemical Transactions*, 5(1), pp 1–12.
- Keya, M.K. (2004). The mental health of arsenic victims in Bangladesh. *South African Anthropol*, 4, pp 215-223.
- Masuda, H. (2018). Arsenic Cycling in the Earth's crust and the hydrosphere: interaction between naturally occurring arsenic and human activities. *Progress in Earth and Planetary Science*, 5(68), pp 55-66. <https://doi.org/10.1186/s40645-018-0224-3>.
- Mello, J., Roy, W., Talbott, J., Stucki, J. (2006). Mineralogy and arsenic mobility in arsenic-rich Brazilian soils and sediments. *Journal of Soils and Sediments*, 6, pp 9- 19.
- Moinevaziri, H. (1985). Volcanism tertiary and quaternary in Iran. PhD Thesis, Orsay University, In French.
- Montgomery, C. W. (2000). *Environmental Geology* updated the fifth edition. McGraw-Hill, United State of America, 546 p.
- Nriagu, J.O., Bhattacharya, P., Mukherjee, A.B., Bundschuh, J., Zevenhoven, R., Loeppert, R.H. (2007). Arsenic in soil and groundwater: an overview. *Trace Metals and other Contaminants in the Environment*, 9, pp 3-60.
- Parrone, D., Ghergo, S., Frollini, E., Rossi, D., Preziosi, E. (2020). Arsenic-fluoride co-contamination in groundwater: Background and anomalies in a volcanic-sedimentary aquifer in central Italy. *Journal of Geochemical Exploration*. <http://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106590>.

- Pigna, M., Caporale, A.G., Cavalca, L., Sommella, A., Violante, A. (2015). Arsenic in the Soil Environment: Mobility and phyto availability. *Environmental Engineering Science*. <https://doi.org/10.1089/ees.2015.0018>.
- Richards, P. J., Razavi, A. M., Spell, T. R., Locock, A., Sholeh, A., Aghazadeh, M. (2018). Magmatic evolution and porphyry–epithermal mineralization in the Taftan volcanic complex, southeastern Iran. *Ore Geology Reviews*, 95, pp 258 – 279.
- Schmincke, H. U. (2006). *Volcanism*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 324p.
- Selene, C.H., Chou, J., De Rosa, C. T. (2003). Case studies arsenic. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 206(4-5), pp 381- 386.
- Sparks, D. L. (1995). *Environmental Soil Chemistry*. Academic Press, 267 p.
- Sposito, G. (1989). *The Chemistry of Soils*. Oxford University Press, New York, 277 p.
- Stumm, W. (1992). *Chemistry of the Solid-Water Interface, Processes at the Mineral-Water and Particle–Water Interface in Natural Systems*. John Wiley and Sons, Inc. New York, 428 p.
- Stumm, W., Morgan, J. J. (1996). *Aquatic Chemistry, Chemical Equilibria, and Rates in Natural Waters*. John Wiley and Sons, inc., New York, 1005 p.
- Tabatabai, M.A., Bremner, J.M. (1972). From of sulfur, and carbon, nitrogen, and Sulfur relationships, in Lwa soils. *Soil Science*, 114, pp 380-386.
- Ugolini, F., C., Dahlgren, R A. (2002). Soil Development in Volcanic Ash. *Journal of Global Environmental Research*, 6(2), pp 69-81.
- Wang, S., Mulligan, C.N. (2006). Occurrence of arsenic contamination in Canada: Sources, behavior, and distribution. *Science of The Total Environment*, 366(2-3), pp 701- 721.
- Wu, J., Liang, J., Björn, L., Li, J., Shu, W., Wang, Y. (2022). Phosphorus-arsenic interaction in the ‘soil-plant-microbe’ system and its influence on arsenic pollution. *Science of The Total Environment*, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149796>.
- Yan-Chu, H. (1994). Arsenic Distribution in Soils. In Nriagu, J. O (Ed). *Arsenic in the environment (Part II)*. Willey, New York, pp 17-49.
- Zhou, Q., Teng, Y., Liu, Y. (2017). A study on soil-environmental quality criteria and standards of arsenic. *Applied Geochemistry*, 77, pp 158-166.