

# زمین‌شیمی آرسنیک در محیط‌های آب، خاک و رسوب و ارتباط آن با تجمع زیستی در منطقه بردسیر، کمر بند ارومیه-دختر

راحله هاتفی<sup>(۱\*)</sup>، فرهاد اسدیان<sup>(۲)</sup>، زهرا بوسلیک<sup>(۳)</sup> و بتول جان‌جانه<sup>(۳)</sup>

۱. استادیار، گروه مواد نوین، سازمان جهاد دانشگاهی خراسان رضوی، مشهد، ایران
۲. گروه زمین‌شناسی محیطی، پژوهشکده علوم پایه کاربردی، جهاد دانشگاهی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۰

## چکیده

پژوهش حاضر با هدف بررسی زمین‌شیمی آرسنیک در اجزای محیطی (آب، خاک و رسوب) و ارتباط آن با تجمع زیستی در موی انسان در منطقه بردسیر، واقع در کمر بند آتشفشانی-پلوتونیک ارومیه-دختر انجام شد. برای این منظور، در مجموع ۲۴۰ نمونه شامل ۱۰۰ نمونه آب، ۶۸ نمونه خاک، ۲۱ نمونه رسوب و ۱۰۲ نمونه مو برداشت و به روش ICP-MS آنالیز شد. نتایج نشان داد که میانگین غلظت آرسنیک در آب، خاک و رسوب به ترتیب ۶۶ میکروگرم در لیتر، هفت و پنج میلی‌گرم در کیلوگرم است. در بخشی از آب‌های زیرزمینی، غلظت آرسنیک از حد مجاز جهانی (۱۰ میکروگرم در لیتر، WHO) بیشتر شده و بیانگر آلودگی زمین‌زاد ناشی از حضور سنگ‌های دگرسان شده و سولفیددار است. بررسی‌ها نشان داد که در ۶۱ درصد از نمونه‌های موی انسان، غلظت آرسنیک بالاتر از حد طبیعی (۱ mg/kg) است که گویای رویارویی مزمن جمعیت محلی با آرسنیک می‌باشد. تحلیل همبستگی و رگرسیون نشان داد که رابطه بین آرسنیک مو و آب ( $r=0.48$ ,  $R^2=0.23$ ) قوی‌تر از خاک ( $r=0.25$ ,  $R^2=0.06$ ) و رسوب ( $r=0.14$ ,  $R^2=0.02$ ) است. این موضوع نقش غالب آب زیرزمینی در انتقال آرسنیک به بدن انسان را نشان می‌دهد. از نظر زمین‌شیمیایی، شرایط احیایی آبخوان (اغلب بین ۱۰۰- تا ۲۰۰ mV)، pH قلیایی (۹-۱۰)، و وجود گسل‌های نفوذپذیر در امتداد شمال غرب-جنوب شرق موجب افزایش تحرک آرسنیک به صورت As(III) شده است. نتایج این پژوهش تأیید می‌کند منشأ اصلی آلودگی آرسنیک در منطقه بردسیر زمین‌زاد است و ارتباط تنگاتنگی میان ویژگی‌های زمین‌شناسی، هیدروژئوشیمیایی و تجمع زیستی این عنصر وجود دارد. این نتایج اهمیت پایش مداوم منابع آب زیرزمینی در نواحی دگرسان شده و آتشفشانی کشور را برجسته می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: آرسنیک، بردسیر، زمین‌شناسی محیطی، مو به عنوان شاخص زیستی

## مقدمه

کبد، کلیه، طحال، ریه‌ها، دستگاه گوارش و بافت‌های غنی از کراتین (پوست، مو و ناخن) تجمع می‌یابد (Ratnaik, 2003).

شدت اثرات سمی آرسنیک وابسته به دوز و مدت زمان مواجهه است (Schoolmeester and White, 1980). مواجهه طولانی‌مدت با مقادیر پایین آرسنیک می‌تواند سبب بروز اختلالات چندسیستمی از جمله آسیب‌های پوستی (کراتوز و هایپرپیگمانتاسیون)، ناراحتی‌های گوارشی، قلبی-عروقی، عصبی، تناسلی و ادراری (مثانه، پروستات، پستان)، غدد درون‌ریز و سیستم خونی شود (Demissie et al., 2024). مهم‌ترین پیامد این مواجهه، افزایش خطر بروز تومورهای بدخیم در ریه، کبد، کلیه و مثانه است (Speer et al., 2023). حدود دو تا چهار هفته پس از قرارگیری در معرض آرسنیک، بخش عمده‌ای از این عنصر در بافت‌های کراتینی بدن (مو، ناخن و پوست) و تا حدی کمتر در استخوان‌ها و دندان‌ها تجمع می‌یابد (Ganie et al., 2023).

مطالعات جدید نشان داده‌اند که بزاق، ادرار، ناخن و مو می‌توانند شاخص‌های زیستی مؤثر و قابل اعتمادی برای ارزیابی مواجهه با آرسنیک باشند (Liu et al., 2017). ناخن و مو نقش نشانگرهای زیستی را برای تعیین میزان مواجهه محیطی و خطر آرسنیک برای سلامت انسان ایفا می‌کنند (Katz, 2019; Solgi and Mahmoudi, 2022). بافت‌های غیرفعال هستند و در فعالیت متابولیکی شرکت نمی‌کنند (Rezaei et al., 2021). از میان این موارد، مو به دلیل غنی بودن از کراتین، قابلیت بازتاب‌دهندگی مواجهه بلندمدت و پایداری ترکیبات، شاخص قابل اعتمادتری برای بررسی تماس مزمن با آرسنیک در نظر دارند (Nguyen et al., 2018). نتایج آزمایشگاهی همچنین نشان می‌دهد بیش از ۹۰ درصد آرسنیک جذب‌شده از طریق بلع از نوع معدنی است و بیشتر به صورت گونه‌های  $As(III)$  و  $As(V)$  وجود دارد و کما بیش تمام آرسنیک قابل تشخیص

آرسنیک از عناصر نیمه‌فلزی سمی و متحرک در محیط‌های زمین‌شیمیایی است که حضور آن در سیستم‌های آبی و خاکی می‌تواند تهدیدی جدی برای سلامت انسان باشد. غلظت بالای آرسنیک در آب‌های زیرزمینی و خاک در بسیاری از مناطق جهان، به‌ویژه در بنگلادش، هند، کامبوج و چین، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین معضلات زیست‌محیطی جهانی شناخته می‌شود (Naujokas et al., 2013). در برخی مناطق ایران نیز مانند آذربایجان، کرمان، خراسان و یزد، وجود غلظت‌های غیرمجاز آرسنیک در آب‌های زیرزمینی گزارش شده است (هاتفی و همکاران، ۱۳۹۵؛ Sharifi, 2004; Modabberi, 2016 ...، پورخسروانی، ۱۴۰۲ (رزم آرا و نظری، ۱۳۹۳) و (شاکری و همکاران، ۱۳۹۶)، منشأ حضور آرسنیک در محیط‌های طبیعی می‌تواند زمین‌زاد یا انسان‌زاد باشد (Pekey, 2006). در مناطق آتشفشانی و دگرسان‌شده، حضور کانی‌های سولفیدی مانند آرسنوپیریت، رآلگار، اورپمنت و پیریت، از مهم‌ترین منابع زمین‌زاد آلودگی آرسنیک است. اکسایش و انحلال این کانی‌ها در تماس با آب‌های سطحی یا زیرزمینی موجب آزادسازی گونه‌های محلول آرسنیک و انتقال آن به آبخوان‌ها می‌شود و پس از انتقال به آب و خاک کشاورزی می‌تواند وارد چرخه غذایی انسان شود (Cubadda et al., 2017) و سلامت جامعه را با مشکل مواجهه کند (Gundert-Remy et al., 2015). از دیدگاه زمین‌شیمیایی، رفتار آرسنیک در اثر عواملی چون pH، پتانسیل اکسایش-احیا (Eh)، ترکیب کانی‌شناسی و حضور اکسیدهای آهن و منگنز است (Shazzadur Rahman et al., 2023). آرسنیک در محیط‌های طبیعی به دو فرم اصلی معدنی و آلی وجود دارد و ترکیبات معدنی آن در دو حالت اکسایش سه‌ظرفیتی  $As(III)$  و پنج‌ظرفیتی  $As(V)$  مشاهده می‌شود (Chaudhary et al., 2024). گونه  $As(III)$  از نظر زیست‌سمی حدود ۱۰۰ برابر سمی‌تر از  $As(V)$  است (Yamauchi and Fowler, 1994)، در حالی که ترکیبات آلی آرسنیک به‌طور معمول سمیت قابل‌توجهی ندارند. آرسنیک سه‌ظرفیتی به دلیل تمایل شدید به گروه‌های تیول (-SH) و سولفیدریل پروتئین‌ها، در بافت‌هایی مانند

1. geogenic  
2. anthropogenic

شمال غرب-جنوب شرق تشکیل شده‌اند، نفوذپذیری سنگ‌ها را افزایش داده و مسیر مهاجرت محلول‌های گرمایی را فراهم کرده‌اند (افتخارنژاد، ۱۳۵۲). رخنمون آپوفیزها، استوک‌ها و دایک‌های نفوذی نیز بیانگر فعالیت ماگمایی مکرر و نقش مستقیم آن در دگرسانی و غنی‌سازی فلزات سنگین در منطقه است (شفیعی، ۱۳۸۷). از آنجاکه هیدروژئولوژی آبخوان و سیستم جریان آب زیرزمینی تأثیر زیادی بر تغییرات کیفی آبخوان‌ها و میزان انحلال کانی‌ها و شستشوی رسوبات دارد، بررسی‌های هیدروژئولوژیکی جزء جدانشدنی مطالعات کیفی آبخوان‌ها هستند. در پژوهش حاضر به منظور بررسی سیستم جریان آب زیرزمینی نقشه تراز و جهت جریان آب زیرزمینی با استفاده از اطلاعات پیرومترهای موجود در منطقه رسم شد (شکل ۲). بر اساس این نقشه، تراز آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه از ۲۳۹۰ متر در بخش جنوب شرقی تا کمتر از ۲۰۰۰ متر در بخش شمال شرقی متغیر است. دوری و نزدیکی خطوط تراز نشان‌دهنده شیب هیدولیکی در منطقه مورد مطالعه است. بر اساس نقشه خطوط تراز، نزدیکی خطوط تراز در بخش جنوب شرقی نشان‌دهنده شیب بیشتر جریان و به تبع آن سرعت بیشتر جریان آب در این بخش است. فواصل بیشتر خطوط تراز در بخش مرکزی نشان‌دهنده شیب و سرعت کمتر جریان آب و به عبارتی زمان تماس طولانی‌تر آب با رسوبات آبخوان است.

از دیدگاه زمین‌ریخت‌شناسی، منطقه شامل ارتفاعات آتشفشانی با شیب‌های تند در شمال و شرق و دشت‌های آبرفتی جوان در جنوب است. جهت جریان عمومی آب‌های سطحی و زیرزمینی از شمال شرق به جنوب و جنوب غرب بوده که موجب تمرکز محلول‌های غنی از آرسنیک در دشت بردسیر می‌شود (زمزم و همکاران، ۱۳۹۰). این شهرستان با جمعیتی حدود ۸۱۹۸۳ نفر (سرشماری ۱۳۹۵) و اقتصاد مبتنی بر کشاورزی و دامداری، وابستگی زیادی به منابع آب زیرزمینی دارد. استفاده مداوم از این منابع برای آبیاری و شرب در کنار حضور سنگ‌های سولفیددار و دگرسانی گسترده، می‌تواند زمینه انتقال آرسنیک از سنگ به خاک، آب و در انت‌ها به چرخه غذایی انسان را فراهم کند که بررسی آن در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است.

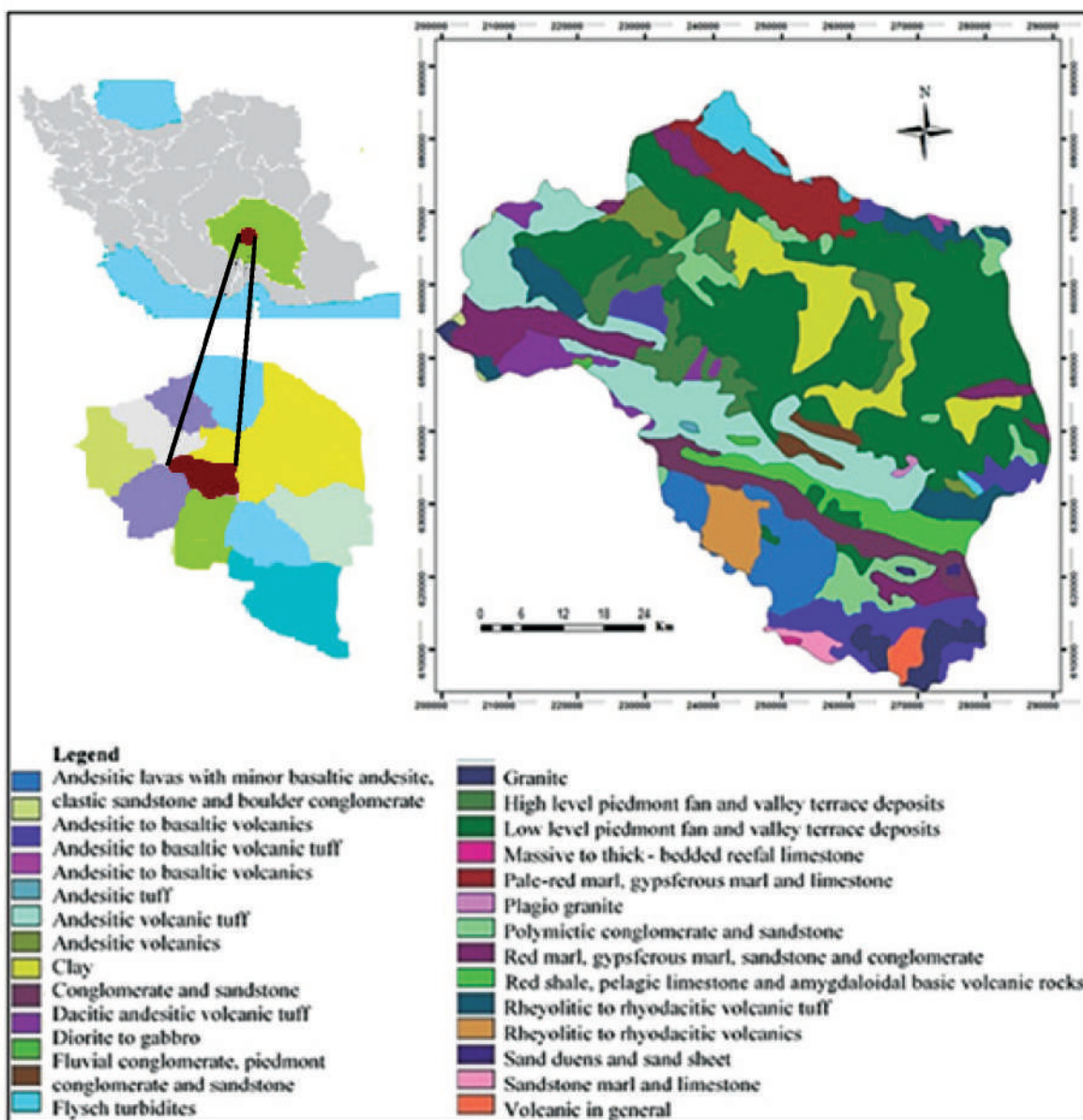
در مو از نوع معدنی است (Cubadda et al., 2017). میانگین غلظت آرسنیک در نمونه‌های سنگی کمربند ارومیه‌دختر در گستره بردسیر حدود ۱۲۵ ppm گزارش شده است (Abbasnejad et al., 2013)، که نشان‌دهنده پتانسیل بالای زمین‌زاد منطقه برای آزادسازی آرسنیک است. بنابراین، شناخت ارتباط میان غلظت آرسنیک در محیط‌های مختلف و تجمع زیستی آن در بدن انسان از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به اینکه، مو به‌عنوان نمایانگر زیستی طبیعی می‌تواند مواجهه طولانی‌مدت با آرسنیک را ثبت کند و ابزار مؤثری در مطالعات زمین‌محیطی محسوب می‌شود، پژوهش حاضر با تلفیق داده‌های زمین‌شیمیایی آب، خاک و رسوب با شاخص زیستی موی انسان، مسیر انتقال آرسنیک از منابع زمین‌زاد به بدن انسان را در منطقه بردسیر به‌صورت کمی با بهره‌گیری از روش‌های آماری رگرسیون و همبستگی تحلیل کرده است و نقش غالب آب زیرزمینی را در تجمع زیستی آرسنیک مشخص و یک مدل مفهومی از چرخه ژئوشیمیایی-زیستی آن ارائه می‌دهد. نتایج این پژوهش رویکردی سلامت‌محور داشته و می‌تواند مبنایی برای ارزیابی ریسک و پایش محیطی در مناطق آتشفشانی مشابه کشور باشد.

## روش مطالعه

### منطقه مطالعه

منطقه مورد مطالعه در شهرستان بردسیر، جنوب غرب استان کرمان و در پهنه ساختاری ایران مرکزی واقع شده (شکل ۱) و بخشی از کمربند آتشفشانی-پلوتونیک ارومیه-دختر به‌شمار می‌آید (Berberian and King, 1981). سنگ‌های غالب منطقه شامل گدازه‌های آندزیتی، آندزیت بازالتی، بازالتی و برش‌های آتشفشانی هستند که به‌دنبال نفوذ توده‌های گابرویی، دیوریتی و تونالیتی دچار دگرسانی شدید شده‌اند (نقشه‌های بردسیر، باغین، چهارگنبد، رفسنجان و بافت سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۸۶). حضور رگه‌های سیلیسی، کلسیتی و اپیدوتی، شواهد روشنی از فعالیت سیالات گرمایی غنی از فلزات سنگین، از جمله آرسنیک است (احمدی‌مقدم و احمدی‌پور، ۱۳۹۳؛ Abbasnejad et al., 2013). این رگه‌ها بیشتر در امتداد گسل‌های فعال با روند

زمین شیمی آرسنیک در محیط‌های آب، خاک و رسوب و ارتباط آن با تجمع زیستی در منطقه ...

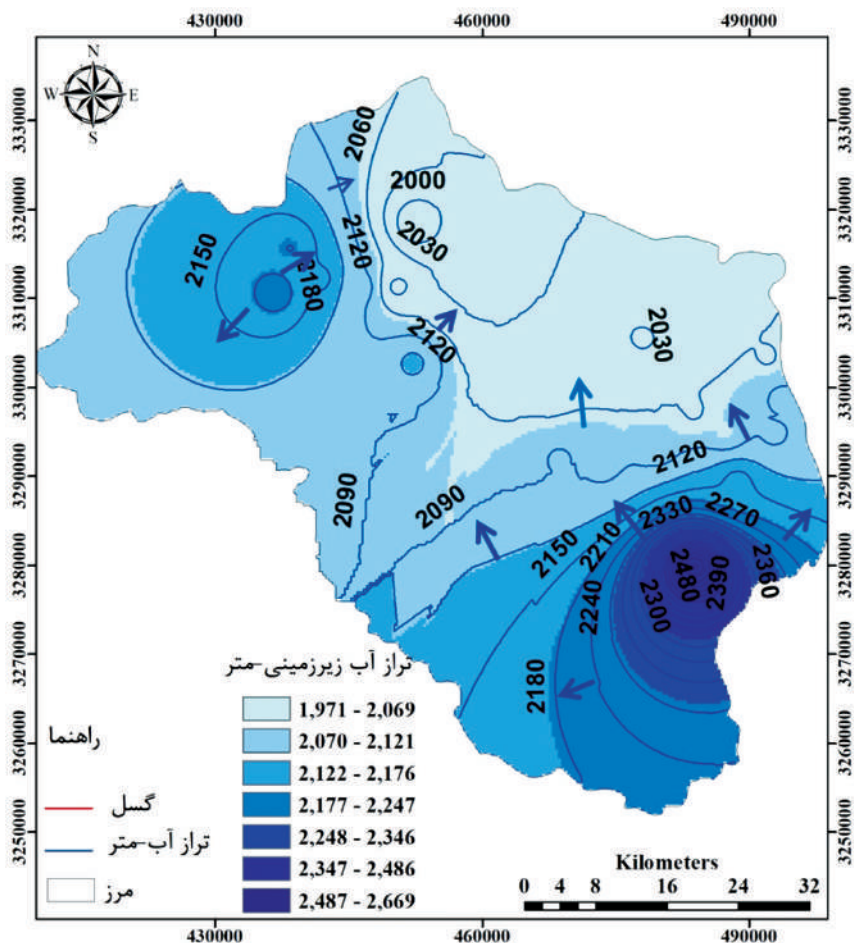


شکل ۱. موقعیت و زمین‌شناسی منطقه مطالعاتی

## نمونه‌برداری

آبی، ۱۰۰ نمونه آب از چاه‌ها، قنات، چشمه‌ها و آب سطحی برداشت شد. پارامترهای فیزیکوشیمیایی شامل دما، pH و Eh توسط دستگاه مولتی‌متر ۹۹۷۲۰ ساخت کمپانی MIC تایوان در محل اندازه‌گیری شد و نمونه‌ها پس از اسیدی‌سازی با اسید نیتریک در ظروف پلی‌اتیلنی جمع‌آوری شدند که ۳ بار با آب ایستگاه شسته شده بود. نمونه‌ها در کمتر از یک ماه در آزمایشگاه به روش ICP-MS آنالیز شدند. نمونه‌برداری از

به‌منظور بررسی منشأ و مسیر انتقال آرسنیک در محیط، نمونه‌برداری از چهار پارامتر اصلی شامل آب، خاک، رسوب و موی انسان انجام شد. موقعیت و پراکندگی ایستگاه‌ها بر اساس بررسی نقشه‌های زمین‌شناسی، توپوگرافی، تصاویر ماهواره‌ای و بازدیدهای میدانی تعیین شد تا ضمن پوشش مناسب منطقه مطالعاتی، ویژگی‌های زمین‌شناسی و هیدروژئوشیمیایی منطقه نیز نمایان شود. برای بررسی منابع



شكل ۲. نقشه هم‌تراز و جهت جريان آب زيرزميني در منطقه مطالعاتي فروردين ماه سال ۱۳۹۶

نمونه‌ها در آزمایشگاه پس از شستشو با محلول‌های استاندارد (Triton X-100، استون و آب دیونیزه) خشک و با اسید نیتريك غلیظ هضم شدند. محلول‌های حاصل به روش ICP-MS مورد تجزیه قرار گرفتند. کنترل کیفیت با استفاده از نمونه‌های مرجع، بلانک و نمونه‌های تکراری انجام گرفت. نتایج حاصل از آنالیزها در محیط نرم‌افزاری ArcGIS برای رسم نقشه‌های پراکنده‌گی و تحلیل‌های آماری و فضایی مورد استفاده قرار گرفت. داده‌ها از نظر نرمال بودن توزیع بررسی و در صورت لزوم تبدیل لگاریتمی شدند. برای بررسی رابطه بین آرسنیک مو و اجزای محیطی، از آزمون همبستگی پیرسون و رگرسیون خطی ساده استفاده شد. همچنین روابط بین آب، خاک و رسوب به صورت جداگانه تحلیل شد.

خاک‌های کشاورزی با هدف بررسی توزیع سطحی آرسنیک در گستره‌ای به وسعت حدود ۶۱۰۰ کیلومتر مربع انجام شد. در مجموع ۶۸ نمونه خاک از عمق ۱۰-۲۰ سانتی‌متری برداشت و پس از الک از مش ۲ میلی‌متر و خردایش، بخش کوچکتري از ۲۰۰ مش برای آنالیز آماده شد. روش نمونه‌برداری به صورت ترکیبی از پنج نقطه (چهار رأس و مرکز مربع ده‌متری) برای هر ایستگاه بود تا میانگینی از غلظت عناصر در سطح مشخص حاصل شود. به منظور بررسی نقش رسوبات رودخانه‌ای در انتقال آرسنیک، ۲۱ نمونه رسوب سطحی از بستر رودخانه‌ها برداشت شد. نمونه‌ها از لایه ۵ سانتی‌متری فوقانی بستر با ابزار پلاستیکی غیر فلزی جمع‌آوری، در دمای اتاق خشک و پس از الک از مش‌های ۲ میلی‌متر و ۲۰۰ مش به روش ICP-MS تجزیه شدند. در مجموع ۱۰۲ نمونه مو با همکاری ساکنین محلی از مردان ۴۵-۴۰ سال برداشت شد.

## بحث

با توجه به اینکه محیط زیست خاستگاه اثرات متقابل زمین‌شناسی و زیست‌شناسی است، غلظت آرسنیک در منابع محیطی و مو (به عنوان یک شاخص زیستی) مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا ۱۰۰ نمونه آب (چاه، چشمه، قنات و رودخانه)، ۶۸ نمونه خاک کشاورزی، ۲۱ نمونه رسوب و ۱۰۲ نمونه مو با پراکندگی مناسب در کل منطقه برای بررسی غلظت و توزیع آرسنیک و تاثیر این منابع بر مسیر و سرنوشت آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. خلاصه آماری نتایج آنالیز آرسنیک به روش ICP-MS در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. خلاصه آماری نتایج آنالیز آرسنیک در نمونه‌های آب (ppb)، خاک کشاورزی (ppm)، رسوب (ppm) و مو (mg/Kg) در منطقه مطالعاتی

انحراف معیار	میانگین	حداکثر	حداقل	
۳/۵۷	۲/۹۹	۱۶/۰۰	۰/۰۰	مو
۸۰/۱۰	۶۵/۹۱	۲۹۶/۰۰	۱/۰۰	آب
۸/۷۶	۷/۰۲	۴۴/۰۰	۰/۷۴	خاک
۴/۰۹	۵/۰۷	۱۶/۰۰	۰/۵۰	رسوب
۱/۲۳	۹/۲۵	۱۱/۱۱	۲/۶۲	pH آب
۷۱/۵۸	-۱۵۵/۶۱	۱۵۵	-۳۳۶	Eh آب

غلظت آرسنیک در نمونه‌ها، دامنه‌ای از مقادیر کم تا زیاد را نشان می‌دهد (شکل ۳). میانگین غلظت آن در آب، خاک و رسوب به ترتیب ۶۶ (ppb)، ۷ و ۵ (ppm) است (جدول ۱).

آنالیز شیمیایی آب‌های زیرزمینی نشان داد در بخشی از منطقه، غلظت آرسنیک از حد مجاز جهانی (WHO= 0.01 mg/L) بیشتر است و می‌توان گفت بخشی از منابع آبی منطقه دچار آلودگی زمین‌زاد هستند (شکل ۳-الف). ترکیب شیمیایی آب‌ها نشان می‌دهد آرسنیک اغلب به صورت آرسنیت [As(III)] و گونه‌ی  $H_3AsO_3$  حضور دارد (هاتفی و همکاران، ۱۳۹۷)، که گویای وجود محیط‌احیایی در اعماق زیاد و تماس آبخوان با سنگ‌های سولفیددار است (Samanta and Clifford, 2006). نقشه پراکنش آرسنیک در آب نشان می‌دهد بیشترین غلظت در

بخش‌های مرکزی و شرقی تا شمال گستره است که در پایین دست برون‌زدهای آتشفشانی و مسیره‌های دگرسانی قرار دارند (شکل ۴-الف). مطالعه عباس‌نژاد و همکاران (Abbasnejad et al., 2013) نشان می‌دهد سنگ‌های آتشفشانی واقع در بخش بردسیر از کمربند ارومیه-دختر به‌طور میانگین حاوی حدود ۱۲۵ ppm آرسنیک هستند که بیانگر غنای بالای این عنصر در ترکیب سنگ‌شناسی منطقه است. به نظر می‌رسد فرآیندهای هیدروترمال و دگرسانی در سنگ‌های آتشفشانی کمربند ارومیه-دختر و سپس هوازدگی و فرسایش آن‌ها، منبع اصلی آزادسازی آرسنیک به محیط باشند. علاوه بر منشأ زمین‌زاد، عوامل اقلیمی نیز در تشدید آلودگی نقش دارند. خشکسالی و کاهش بارندگی موجب می‌شود که رقیق‌سازی طبیعی آبخوان کاهش یابد و در نتیجه غلظت آرسنیک افزایش یابد (Marghade et al., 2023). همچنین، در چاه‌های عمیق که شرایط کاهش بر آبخوان حاکم است، تجزیه ترکیبات سولفیدی و آزاد شدن آرسنیک شدت می‌گیرد. در مقابل، در محیط‌های اکسایشی‌تر، تحرک آرسنیک کاهش می‌یابد (Shih, 2005). بدین ترتیب، غلظت بالای آرسنیک در چاه‌های مرکزی دشت بردسیر را می‌توان نتیجه‌ی ترکیب شرایط زمین‌زاد، اقلیمی و هیدروژئوشیمیایی منطقه دانست.

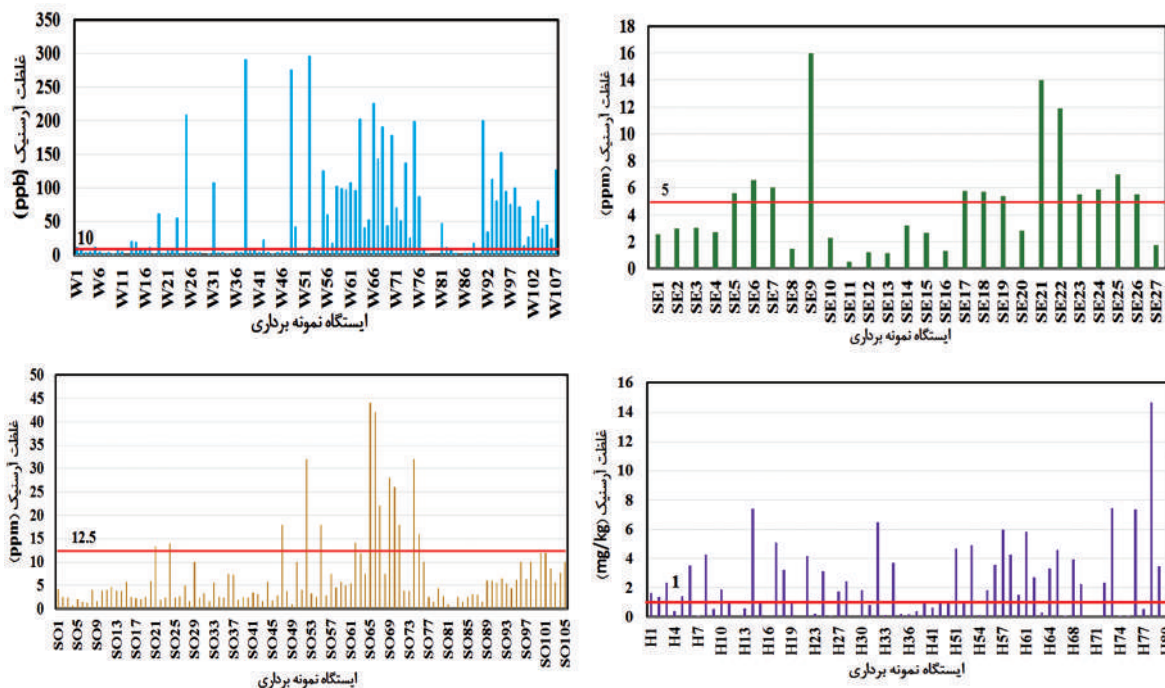
دامنه تغییرات مجاز غلظت آرسنیک در خاک‌های زراعی ppm ۵-۱۲/۵ است (Siegel, 2002). شکل ۳-ب نتایج نشان می‌دهد که خاک گستره مطالعاتی از نظر As، آلودگی کم تا شدید دارد ولی اغلب در گستره بدون آلودگی تا آلودگی کم قرار می‌گیرند. الگوی مکانی غلظت آرسنیک در خاک‌های کشاورزی (شکل ۴-ب) نشان می‌دهد که بیشترین مقادیر این عناصر در بخش‌های میانی و شمالی منطقه تجمع یافته‌اند. این بخش‌ها غالباً در پایین دست حوضه و در مجاورت رخنمون‌های آتشفشانی قرار دارند و تحت تأثیر جریان‌های سطحی و آبیاری با منابع آب آلوده قرار می‌گیرند. تجمع بالاتر آرسنیک در این بخش‌ها می‌تواند نتیجه هم‌زمان چند فرآیند زمین‌شیمیایی و هیدرولوژیکی از جمله انتقال ذرات حاوی آرسنیک توسط سیلاب‌ها از بخش‌های بالادست (Münster et al., 2014; Ngoc et al., 2009)

۰/۰۲ تا ۱۶/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر است و حدود ۶۱ درصد از نمونه‌ها دارای مقادیر بالاتر از حد مجاز طبیعی (WHO, 2013; 1 mg/kg) هستند. این نتایج بیانگر آن است که بخش قابل توجهی از جمعیت منطقه مواجهه مزمن با آرسنیک قرار دارند (شکل ۳-د). همانطور که پیشتر اشاره شده، منشأ این آلودگی را می‌توان در زمینه زمین‌زاد منطقه جست‌وجو کرد. بررسی نقشه پراکنش مکانی غلظت آرسنیک در مو (شکل ۴-د) نشان می‌دهد که بیشترین مقادیر در بخش‌های مرکزی و شمالی منطقه مشاهده می‌شود؛ بخش‌های که در پایین دست حوضه، در امتداد مسیر گسل‌های فعال و در مجاورت واحدهای آتشفشانی واقع شده‌اند. این الگو با توزیع مکانی آرسنیک در آب زیرزمینی (شکل ۴) همخوانی دارد و بیانگر نقش غالب آب در انتقال آرسنیک به بدن انسان است. در مقابل، غلظت‌های پایین‌تر در بخش‌های جنوبی و ارتفاعات مشاهده می‌شود که با کمبود منابع آب آلوده و سنگ‌های کم‌آرسنیک مرتبط است. آرسنیک موجود در محیط بیشتر از طریق مصرف آب آشامیدنی آلوده، استفاده از آب‌های زیرزمینی در آبیاری محصولات کشاورزی و ورود غیرمستقیم

و نیز آزادسازی آرسنیک محلول در اثر اکسیداسیون طبیعی آب‌های زیرزمینی هنگام تماس با سطح زمین به دلیل اکسایش آرسنیک سه‌ظرفیتی و افزایش تحرک آن (Missimer et al., 2018) باشد. در نتیجه، استفاده از چنین آب‌هایی در آبیاری اراضی کشاورزی می‌تواند منجر به افزایش غلظت آرسنیک در خاک و در نهایت در محصولات زراعی شود (Ahsan et al., 2020).

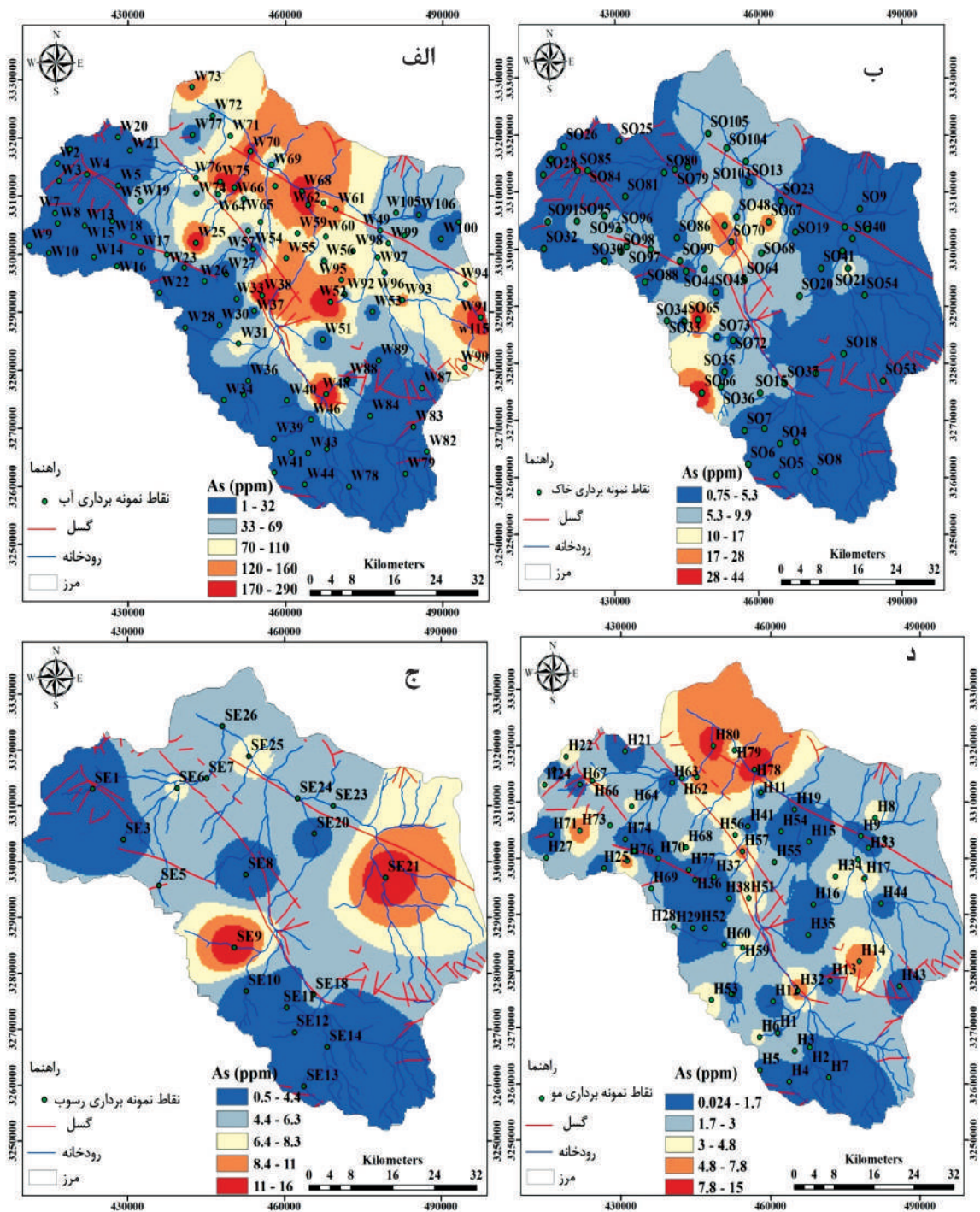
غلظت مجاز آرسنیک در رسوب بستر رودخانه ۵ (ppm) است (Smedley and Kinniburgh, 2002) که با توجه به شکل ۳-ج می‌توان گفت که آلودگی آرسنیک در تعدادی از نمونه‌های برداشت شده مشخص است. این نمونه‌ها در نزدیکی آتشفشان بیدخوان و جنوب غرب حوضه واقع شده‌اند و بیشتر در اثر زمین‌شناسی منطقه و تا حدودی ناشی از فعالیت‌های انسانی و مصرف آفت کش است. نیمی دیگر از نمونه‌های رسوب بدون آلودگی هستند که احتمال دارد ناشی از رقیق شدن آرسنیک در آب و کاهش آلودگی باشد (شکل ۴-ج).

در مجموع ۱۰۲ نمونه موی انسان از بخش‌های مختلف منطقه بردسیر جمع‌آوری و از نظر غلظت آرسنیک آنالیز شدند. نتایج نشان داد که میزان آرسنیک در مو بین



شکل ۳. غلظت آرسنیک در نمونه‌های (الف) آب (ppb)، (ب) خاک کشاورزی، (ج) رسوب (ppm)، (د) مو (mg/Kg)، در منطقه مورد مطالعاتی

زمین شیمی آرسنیک در محیط‌های آب، خاک و رسوب و ارتباط آن با تجمع زیستی در منطقه ...



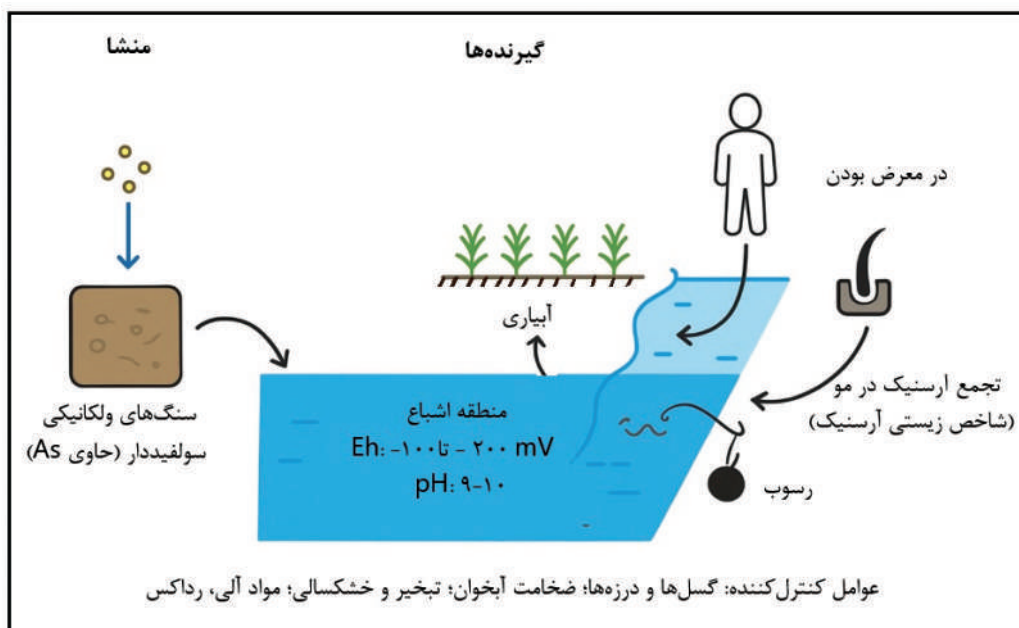
شکل ۴. نقشه توزیع مکانی آرسنیک در آب، خاک، رسوب و مو

در مو تجمع می‌یابد. از آنجا که مو دارای رشد پیوسته است، غلظت آرسنیک در آن بازتابی از مواجهه میان مدت تا بلندمدت (حدود ۶ ماه تا یک سال) فرد محسوب می‌شود. نتایج این پژوهش از نظر دامنه غلظت و الگوی پراکنش، با مطالعات مشابه در مناطق پرخطر جهان مانند

از طریق زنجیره غذایی وارد بدن انسان می‌شود. تماس پوستی و استنشاق گرد و غبار حاوی آرسنیک نیز مسیره‌های فرعی محسوب می‌شوند. پس از ورود به بدن، آرسنیک در جریان خون توزیع می‌شود و به دلیل تمایل بالای شیمیایی به گروه‌های سولفید هیدروژن ( $-SH$ ) در پروتئین کراتین،

کافی برای انحلال کانی‌های حاوی آرسنیک و نفوذ به آب می‌باشد. این روند در نقشه پراکندگی آرسنیک در نمونه‌های مو نیز دیده می‌شود. در انتهای جریان به دلیل انباشت آرسنیک و فرصت بیشتر انحلال غلظت این عنصر در آب افزایش یافته است. آنومالی‌های دیده شده در نقشه‌های رسوب و خاک می‌تواند به دلیل زخمون محلی کانی‌های حاوی آرسنیک در این بخش‌ها باشد. سپس آرسنیک از این محیط‌ها وارد زنجیره زیستی (گیاه، حیوان و انسان) شده و در نهایت در بافت‌های کراتینی تجمع می‌یابد. شکل ۵ چارچوبی برای درک مسیرهای انتقال و ارزیابی خطرات بهداشتی مرتبط با آلودگی آرسنیک ارائه می‌دهد.

بنگلادش و بنگال غربی هند مشابهت دارد؛ در آن مناطق نیز ارتباط مستقیم میان غلظت آرسنیک در آب آشامیدنی و میزان تجمع آن در مو و ناخن انسان گزارش شده است (Samanta et al., 2004; Uddin et al., 2006). هرچند غلظت آرسنیک در موهای افراد منطقه بردسیر نسبت به مناطق مذکور پایین‌تر است، اما گستردگی آلودگی (بیش از ۶۰ درصد نمونه‌ها) و همبستگی آن با منابع زمین‌زاد، بیانگر خطر بالقوه مواجهه مزمن با آرسنیک در این منطقه است. بیشتر بودن غلظت آرسنیک آب زیرزمینی در بخش شرق و شمال شرق (در جهت کاهش سرعت جریان) نشان‌دهنده فرصت



شکل ۵. مدل مفهومی چرخه آرسنیک در منطقه مورد مطالعاتی

باشد، خیلی کم و بیشتر از طریق تماس غیرمستقیم یا رژیم غذایی است. همبستگی آرسنیک-موسوب بسیار کم و در عمل بی‌اثر است و حدود دو درصد واریانس مو را توضیح می‌دهد. در مقایسه درون محیطی، همبستگی بین آب و خاک ( $r=0.45$ ) و بین آب و رسوب ( $r=0.32$ ) در حد متوسط است، در حالی که بین خاک و رسوب همبستگی پایین‌تری مشاهده شد ( $r=0.31$ ). این نتایج نشان می‌دهد که اگرچه اجزای محیطی با هم ارتباط دارند، اما پیچیدگی فرآیندهای ژئوشیمیایی مانع از ایجاد همبستگی‌های بالا می‌شود.

ماتریس همبستگی منابع محیطی با یکدیگر به‌عنوان فاکتورهای آلاینده و مو به عنوان مقصد نهایی انتقال آلاینده بررسی شد (جدول ۲). نتایج نشان داد که همبستگی بین آرسنیک مو و منابع آبی متوسط (نزدیک به ۵٪) است و حدود ۲۳ درصد تغییرات آرسنیک مو توسط غلظت آرسنیک آب توضیح داده می‌شود که مبین رابطه مستقیم آرسنیک در آب و مو است و آب بویژه آب آشامیدنی مسیر اصلی و مهم‌ترین منبع در مشارکت زیستی است. در حالی که خاک اثر ضعیف دارد ( $r=0.25$ ) و شاید نقش مستقیمی ندارد و اگر هم اثری داشته

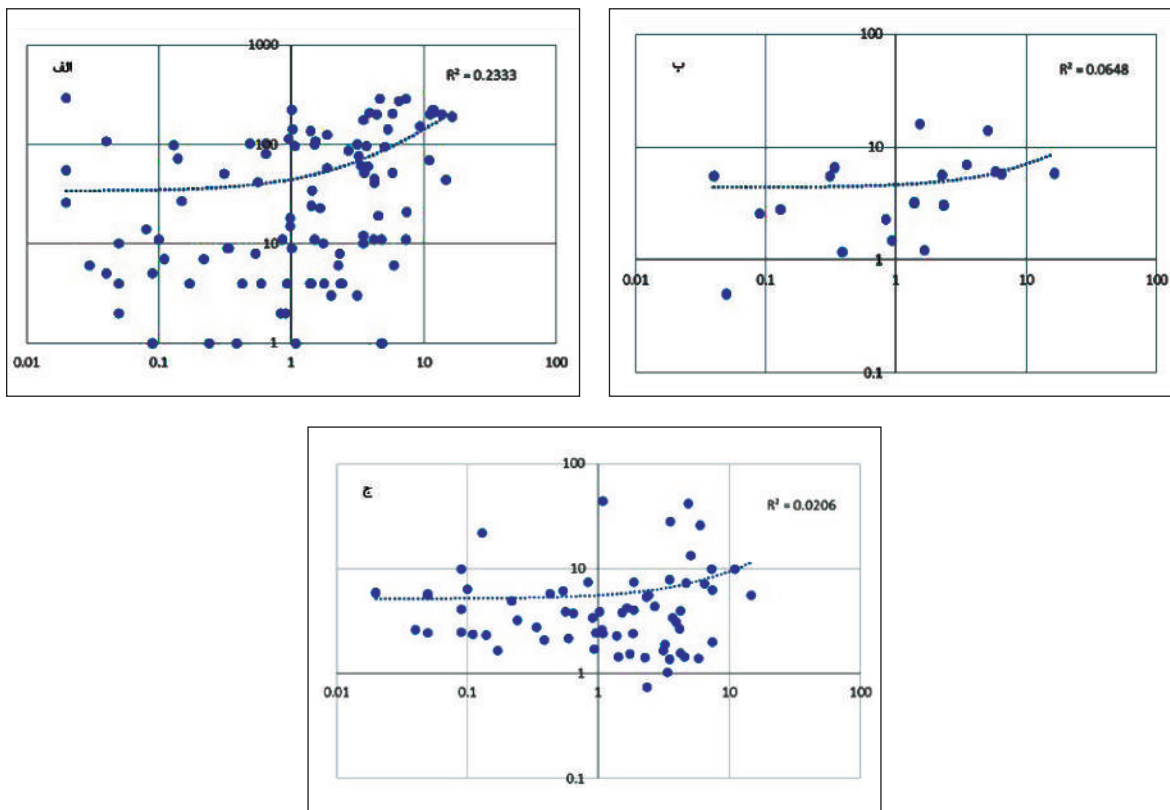
جدول ۲. ماتریس ضریب همبستگی پیرسون آرسنیک آب (ppb)، خاک کشاورزی و رسوب (ppm)، مو (mg/Kg) منطقه مورد مطالعاتی

متغیر	رسوب	خاک	آب	مو
مو				۱۰۰
آب			۱۰۰	۰/۴۸
خاک		۱۰۰	۰/۴۵	۰/۲۵
رسوب	۱۰۰	۰/۳۱	۰/۳۲	۰/۱۴

برای بررسی ارتباط میان آرسنیک تجمع‌یافته در موی انسان و غلظت آن در اجزای محیطی (آب، خاک و رسوب)، نمودار رگرسیون بین این متغیرها رسم شد (شکل ۶). نتایج رگرسیون‌ها نشان می‌دهد رفتار آرسنیک در محیط‌های مختلف از الگوی متفاوتی پیروی می‌کند و سهم هر محیط در انتقال آن به بدن انسان متغیر است. شکل ۶-الف (رگرسیون بین آرسنیک مو و آب)، ضریب تعیین  $R^2 = 0.2333$  نشان می‌دهد که حدود ۲۳ درصد از تغییرات آرسنیک موجود در مو توسط غلظت آن در آب قابل توضیح است. این مقدار به نسبت متوسط اما معنادار می‌باشد و با ضریب همبستگی پیرسون ( $r = 0.48$ ) نیز سازگار است. شیب مثبت منحنی رگرسیون نشان می‌دهد که با افزایش آرسنیک محلول در آب، میزان تجمع آن در مو نیز افزایش می‌یابد. این یافته بیانگر آن است که آب‌های زیرزمینی مسیر غالب انتقال آرسنیک از محیط زمین‌زاد به بدن انسان هستند. به‌علاوه، مقادیر بالاتر  $R^2$  در مقایسه با خاک و رسوب نشان‌دهنده کنترل ژئوشیمیایی فرآیندهای محلول‌سازی در آبخوان منطقه بردسیر است. از دیدگاه زمین‌شیمیایی، چنین الگویی ناشی از تحرک‌پذیری بالای آرسنیک در آبخوان‌های آتشفشانی و دگرسان شده است. رفتار آرسنیک در منطقه بردسیر، می‌تواند به‌شدت در اثر دگرسانی هیدروترمال، نفوذ توده‌های دیوریتی و گابرویی و اکسایش کانی‌های سولفیدی قرار باشد و سبب رهاسازی آرسنیک و انتقال از فازهای جامد به فاز محلول شود. در این راستا، الگوی ساختاری منطقه، شامل گسل‌های شمال‌غرب-جنوب‌شرق و شمالی-جنوبی، نقش کلیدی در تمرکز سیالات گرمایی و مهاجرت آرسنیک داشته است. این گسل‌ها مسیرهای اصلی برای صعود محلول‌های هیدروترمال

و ورود آرسنیک به سامانه‌های آبی فعلی را فراهم کرده‌اند. همچنین بررسی داده‌های فیزیکوشیمیایی آب نشان داد، مقادیر اکسیداسیون-احیا (Eh) و pH بیشتر نمونه‌ها بین ۱۰۰- تا ۲۵۰- میلی‌ولت و ۹-۱۰ است. چنین شرایط احیایی و pH خنثی تا قلیایی آب، منجر به تشکیل گونه‌های (III) As با تحرک‌پذیری بالا شده و ضخامت زیاد آبخوان و وجود شکستگی‌ها و گسل‌های متعدد باعث افزایش نفوذپذیری سنگ‌ها و تسهیل مهاجرت آرسنیک به آبخوان‌ها و انتقال عمقی آن و ورود به چرخه زیستی شده‌است. در شکل ۶-ب، رگرسیون بین آرسنیک مو و خاک، مقدار  $R^2 = 0.0648$  به‌دست آمد که بیانگر ارتباط ضعیف میان این دو متغیر است. این نتیجه حاکی از آن است که اگرچه در خاک‌های منطقه غلظت قابل توجهی از آرسنیک وجود دارد، ولی به‌دلیل حضور کانی‌های رسی گروه اسمکتیت-ایلیت و میزان بالای CEC (بیات و همکاران، ۱۳۹۵)، آرسنیک در فاز جامد بر روی اکسیدهای آهن و منگنز و کانی‌های رسی مانند اسمکتیت و ایلیت تثبیت می‌شود. این جذب سطحی بیشتر از نوع جذب لایه‌ای و تبادل یونی است، در حالی که در شرایط احیایی، اکسیدهای Fe/Mn حل‌شده و آرسنیک آزاد می‌شود. بنابراین در خاک‌های منطقه بردسیر با pH قلیایی و شرایط نسبتاً خشک، پایداری آرسنیک بالا و زیست‌فراهمی آن پایین است. شکل ۶-ج (رگرسیون بین آرسنیک مو و رسوب)، ضریب تعیین ( $R^2 = 0.206$ ) محاسبه شد و بیانگر ارتباط بسیار ضعیف بین این دو متغیر است که نشان می‌دهد، رسوبات بستر، علی‌رغم دارا بودن غلظت‌هایی از آرسنیک، به‌دلیل ماهیت معدنی پایدار خود و شرایط اکسیداسیونی حاکم بر سطح، نقش چندانی در آزادسازی یا انتقال آرسنیک به بدن انسان ندارند. در محیط‌های آبی بردسیر، آرسنیک در رسوبات بیشتر در فازهای معدنی مانند فریت‌ها و اکسیدهای آهن تثبیت شده و تحرک آن محدود است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد منابع آب، به‌ویژه آب‌های زیرزمینی، مسیر اصلی انتقال آرسنیک از منشأهای زمین‌زاد به چرخه زیستی در منطقه مورد مطالعه هستند. این یافته‌ها با مطالعات

1. bioavailability



شکل ۶. نمودارهای رگرسیون بین غلظت آرسنیک در موی انسان و اجزای محیطی شامل الف) آب، ب) خاک و ج) رسوب در منطقه بردسیر.

جزئی ممکن است از مصرف طولانی مدت سموم و کودهای شیمیایی کشاورزی ناشی شده باشد. مقایسه این نتایج با مطالعات پیشین در مناطق آتشفشانی دیگر ایران، مانند تکاب (هاتفی و همکاران، ۱۳۹۵؛ Modabberri, 2004; Sharifi et al., 2016)، سیرجان (پورخسروانی، ۱۴۰۲)، تربت حیدریه (نظری و رزم آرا، ۱۳۹۳) و سبلان (شاکری و همکاران، ۱۳۹۶)، نشان می‌دهد، در همه این مناطق نیز منشأ زمین‌زاد و کانی‌های سولفیدی عامل اصلی آزادسازی آرسنیک محسوب می‌شوند. در این مطالعات، همانند منطقه بردسیر، بیشترین غلظت آرسنیک در آب زیرزمینی و کمترین مقدار در رسوبات سطحی گزارش شده است و بازتاب تحرک‌پذیری بالا و پایداری نسبی آرسنیک در فاز محلول است. بدین ترتیب، منابع آب زیرزمینی نقش اصلی را در مواجهه انسانی با آرسنیک ایفا می‌کنند، در حالی که خاک و رسوب سطحی بیشتر بازتاب‌دهنده آلودگی‌های ثانویه است و سهم کمتری در چرخه زیستی دارند. با این حال، هماهنگی و انطباق کاملی در مورد میزان

مشابه در مناطق آتشفشانی جنوب شرق آسیا، آمریکای لاتین (Samanta et al., 2004; Singh et al., 2015; Nguyen et al., 2018; Bundschuh et al., 2021; Li et al., 2022) و ایران (سیاره و همکاران، ۱۳۸۶؛ Rezazadeh et al., 2014) هم‌راستا است، جایی که منابع زمین‌زاد آرسنیک عامل غالب آلودگی معرفی شده‌اند. بر این اساس، به نظر می‌رسد وجود آبخوان‌های عمیق و احیایی، رخنمون سنگ‌های دگرسان‌شده و ساختارهای گسلی نفوذپذیر، از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده تحرک و پراکنش آرسنیک در منطقه باشند. به علاوه، شرایط اقلیمی خشک و کاهش تغذیه طبیعی آبخوان در سال‌های اخیر احتمال تمرکز بیشتر آرسنیک را افزایش داده است. با توجه به ماهیت بیشتر کشاورزی منطقه و نبود صنایع دارای پتانسیل انتشار آرسنیک در زمان نمونه‌برداری، می‌توان نتیجه گرفت که منشأ اصلی آرسنیک در منطقه مورد مطالعه نتیجه مستقیم فرآیندهای زمین‌زاد و دینامیک هیدروژئوشیمیایی کمربند ارومیه-دختر است و تن‌ها در برخی نقاط، مقادیر

کانی‌شناسی رسی خاک‌های منطقه بردسیر متأثر از سازندهای زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی و اقلیم. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۳۰، ۱۵۱۵-۱۵۳۰.

- پورخسروانی، م.، جمشیدی گوهری، ف. و سیاری، ن.، ۱۴۰۲. ارزیابی تغییرات مکانی عنصر آرسنیک در منابع آب زیرزمینی حوضه سیرجان. مجله سلامت و محیط زیست، دوره شانزدهم، شماره دوم، ۲۸۷ تا ۳۰۲.

- نظری، ا. و رزم‌ارا، م.، ۱۳۹۳. ارزیابی غلظت فلزات سنگین در آب‌های آلوده به آرسنیک منطقه کته‌تلاخ (شمال غرب تربت‌حیدریه) و امکان‌سنجی جذب و حذف آرسنیک از منابع آبی توسط سازندهای زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد.

- زمزم، ع.، رهنما، م.ب. و کوچک‌علیزاده، س.، ۱۳۹۰. مدلسازی جریان آب زیرزمینی و بررسی ارتباط بین کاهش سطح آب زیرزمینی و خشکسالی‌ها در دشت بردسیر-کرمان. یازدهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، ۹.

- سیاره، ع.ر.، فنودی، م. و دادستان، ا.، ۱۳۸۶. بررسی‌های زمین‌شناسی زیست محیطی در منطقه قروه-بیجار. گزارش سازمان زمین‌شناسی کشور، ۲۳.

- شاکری، ع.، شریفی، م. و مهرابی، ب.، ۱۳۹۶. ارزیابی ریسک اکولوژیکی و منشاء فلزات سنگین و آرسنیک در رسوبات سطحی رودخانه خیاو در منطقه زمین‌گرمایی سبلان، شمال غرب ایران. نشریه زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، ۲۶.

- شفیع، ب.، ۱۳۸۷. الگوی فلزآبی کمر بند مس پورفیری کرمان و رهیافت‌های اکتشافی آن، رساله دکتری، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۲۵۷.

- هاتفی، ر.، اسدیان، ف.، خدایی و ک.، شهسواری، ع.ا.، ۱۳۹۵. پهنه‌بندی اثرات زیست محیطی آلودگی‌های زمین‌زاد در گستره شهرستان تکاب. طرح پژوهشی جهاد دانشگاهی، ۱۵۷.

- Abbasnejad, A., Mirzaie, A., Derakhshani, R. and Esmaeilzadeh, E., 2013. Arsenic in groundwaters of the alluvial aquifer of Bardsir plain, SE Iran. Environmental Earth Science, 69, 2549-2557

- Berberian, M., and King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolu-

آلودگی آرسنیک در آب وجود ندارد. این موضوع می‌تواند به دلیل برخی احتمالات مانند ارائه آب آشامیدنی سالم توسط دولت یا دستگاه‌های تصفیه، ساکن نبودن دائم در بردسیر، سم‌زدایی بسته به تفاوت‌های ژنتیکی و فیزیولوژیکی فردی، جنسیت، عادات زندگی و قومیت باشد (Wu et al., 2025).

## نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد، رفتار و پراکندگی آرسنیک در منطقه بردسیر به‌طور مستقیم تحت تأثیر ویژگی‌های زمین‌شناسی و فرآیندهای ژئوشیمیایی کمر بند ارومیه-دختر است. غلظت بالای آرسنیک در آب‌های زیرزمینی، همبستگی آن با آرسنیک موجود در مو و تمرکز آلودگی در نواحی مرکزی و شمالی، بیانگر منشأ غالب زمین‌زاد و انتقال محلول‌محور این عنصر است. نتایج رگرسیون نشان داد که آب، مسیر اصلی ورود آرسنیک به بدن انسان است و نقش خاک و رسوب بیشتر ثانویه است. وجود واحدهای آتشفشانی دگرسان‌شده، توده‌های نفوذی و گسل‌های فعال مهم‌ترین عوامل زمین‌زاد آزادسازی آرسنیک در منطقه هستند. مشاهده مقادیر بالاتر از حد مجاز آرسنیک در بیش از ۶۰ درصد از نمونه‌های مو نشان‌دهنده مواجهه مزمن جمعیت محلی است. بنابراین، پایش منظم منابع آب، ارزیابی تغییرات زمانی و بررسی اثرات بهداشتی آرسنیک برای مدیریت خطرات زمین‌زاد در منطقه بردسیر و سایر بخش‌های کمر بند ارومیه-دختر توصیه می‌شود.

## منابع

- احمدی مقدم، پ. و احمدی پور، ح.، ۱۳۹۳. بررسی رخساره‌شناسی و محیط تشکیل توالی‌های آتشفشانی کوه چهل تن، واقع در جنوب باختر بردسیر (استان کرمان)، فصلنامه علوم زمین، ۹۴، ۱۰۳-۱۱۲.

- افتخارنژاد، ج.، ۱۳۵۲. مطلبی چند درباره تشکیل حوضه فیلیس در شرق ایران و توجیه آن با تئوری تکتونیک صفحه‌ای، ضمیمه گزارش شماره ۲۲ ف، سازمان زمین‌شناسی کشور.

- بیات، ا.، فرپور، م.ه. و جعفری، ا.، ۱۳۹۵. خصوصیات فیزیکوشیمیایی، میکرومورفولوژیکی و

- tion of Iran, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18, 210–265.
- Bundschuh, J., Armienta, M.A., Morales-Simfors, N., Alam, M.R., López D.L. and Quezada, V.D., 2021. Arsenic in Latin America: New findings on source, mobilization and mobility in human environments in 20 countries based on decadal research 2010–2020. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51(16), 1727–1865.
  - Chaudhary, M.M., Hussain, S., Du, C., Conway, B.R. and Ghori, M.U., 2024. Arsenic in Water: Understanding the Chemistry, Health Implications, Quantification and Removal Strategies. *Chemical Engineering*, 8(4), 78.
  - Chen, X., Liu, S., Shi, M. and Luo, T., 2025. Arsenic levels in the hair of people exposed to arsenic and awareness of its risk factors. *Environmental Geochemistry and Health*, 47, 1–19.
  - Cubadda, F., Jackson, B.P., Cottingham, K.L., Horne, Y.O.V. and Kurzius-Spencer, M., 2017. Human exposure to dietary inorganic arsenic and other arsenic species: State of knowledge, gaps and uncertainties. *Science of The Total Environment*, 579, 1228–1239.
  - Demissie, S., Mekonen, S., Awoke, T., Teshome, B. and Mengistie, B., 2024. Examining carcinogenic and noncarcinogenic health risks related to arsenic exposure in Ethiopia: A longitudinal study. *Toxicology Reports*, 12, 100–110.
  - Ganie, S.Y., Javaid, D., Hajam, Y.A. and Reshi, M.S., 2023. Arsenic toxicity: sources, pathophysiology and mechanism. *Toxicological Research*, 8, 13(1).
  - Gundert-Remy, U., Damm, G., Foth, H., Freyberger, A., Gebel, T., Golka, K., Röhl, C., Schupp, T., Wollin, K.M. and Hengstler, J.G., 2015. High exposure to inorganic arsenic by food: the need for risk reduction. *Archives of Toxicology*, 89(12), 2219–2227.
  - Katz, S.A., 2019. On the use of hair analysis for assessing arsenic intoxication. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(6), 977.
  - Li, B., Xu, W., Luo, R., Zhuo, S., Guo, X., Cheng, K., Yun, K. and Ma, D., 2022. Estimation of the Frequency and Time of Human Exposure to Arsenic by Single Hair Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(18), 11429.
  - Marghade, D., Mehta, G., Shelare, S., Jadhav, G. and Nikam, C.K., 2023. Arsenic Contamination in Indian Groundwater: From Origin to Mitigation Approaches for a Sustainable Future. *Water*, 15(23), 4125.
  - Modabberi, S., 2004. Environmental geochemistry and trace element anomaly in the Takab area, and their impact on the Zarrineh roud reservoir dam, with special reference to Zarshuran deposit. Ph.D thesis, Shiraz University-Iran, 200 p.
  - Naujokas, M., Anderson, B., Ahsan, H., Vasken, A., Graziano, J. and WA, S., 2013. The broad scope of health effects from chronic arsenic exposure: update on a worldwide public health problem. *Environmental Health Perspectives*, 121, 295–302.
  - Nguyen, T.P.M., Nguyen, T.P.T., Bui, T.H. and Nguyen, T.H., 2018. Concentration of arsenic in groundwater, vegetables, human hair and nails in mining site in the Northern Thai Nguyen province, Vietnam: human exposure and risks assessment[J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 25(3), 602–613.
  - Pekey, H., 2006. Heavy Metal Pollution Assessment in Sediments of the Izmit Bay, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 123, 219–231.
  - Ratnaike, R.N., 2003. Acute and chronic arsenic toxicity. *Journal of Medicine*, 79, 391–396.
  - Rezaei, L., Alipour, V., Sharafi, P., Ghaffari, H., Nematollahi, A., Pesarakloo, V. and Falhri, Y., 2021. Concentration of cadmi-

- um, arsenic, and lead in rice (*Oryza sativa*) and probabilistic health risk assessment: a case study in Hormozgan province, Iran. *Environmental Health Engineering Management*, 8(2), 67-75.
- Rezazadeh F., Jafari R., Sheikhzadeh F. and Paktinat S., 2014. A study on wool arsenic concentration and some blood parameters in sheep flocks grazing around tailing dams of gold mines in Takab, Iran. *Research Opinions in Animal and Veterinary Sciences*, 4(5who) 233-236.
  - Samanta, G., Sharma, R., Roychowdhury, T. and Chakraborti, D., 2004. Arsenic and other elements in hair, nails, and skin-scales of arsenic victims in West Bengal, India. *Science of The Total Environment*, 326(1-3): 33-47.
  - Samanta, G. and Clifford, D.A., 2006. Influence of sulfide (S<sup>2-</sup>) on preservation and speciation of inorganic arsenic in drinking water. *Chemosphere*, 65 (5), 847-853.
  - Schoolmeester, W.L. and White, D.R., 1980. Arsenic poisoning. *Southern Medical Journal*, 73(2), 198-208.
  - Sharifi, R., Moore, F. and Keshavarzi, B., 2016. Mobility and chemical fate of arsenic and antimony in water and sediments of Sarouq River catchment, Takab geothermal field, north-west Iran. *Journal of Environmental Management*, 170, 136-144.
  - Shazzadur Rahman, Md., Selim Reza, A.H.M., Aminul Ahsan, Md. and Abu Bakar Siddique, Md., 2023. Arsenic in groundwater from Southwest Bangladesh: Sources, water quality, and potential health concern. *HydroResearch*, 6, 1-15.
  - Shih, M.C., 2005. An overview of arsenic removal by pressure-driven membrane processes. *Desalination*, 172 (1), 85-97.
  - Siegel, F.R., 2002. *Environmental geochemistry of potentially toxic metals*. Springer, Berlin, 218.
  - Singh, R., Singh, S., Parihar, P., Singh, V.P., and Prasad, S.M., 2015. Arsenic contamination, consequences and remediation techniques: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 112, 247-270.
  - Smedley, P.L. and Kinniburgh, D.G., 2002. A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters. *Apply of Geochemistry*, 17, 517-568.
  - Solgi, E., and Mahmoudi, S., 2022. Arsenic and heavy metal concentrations in human hair from urban areas. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 9(3), 247-253
  - Speer, R.M., Zhou, X., Volk, L.B., Liu, K.J. and Hudson, L.G., 2023. Arsenic and cancer: Evidence and mechanisms. *Advances in Pharmacology*, 96, 151-202.
  - Uddin, M.M., Harun-Ar-Rashid, A.K.M., Hossain, S.M., Hafiz, M.A., Nahar, K. and Mubin, S. H., 2006. Slow arsenic poisoning of the contaminated groundwater users. *Internatinal Journal of Environmental Science and Tecnology*, 3 (4), 447-453
  - WHO, 2013. Progress on sanitation and drinking-water: Fast facts. [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/en/index.html](http://www.who.int/water_sanitation_health/en/index.html).
  - Wu, F., van Geen, A., Graziano, J., Ahmed, K. M., Liu, M., Argos, M., Parvez, F., Choudhury, I., Slavkovich, V. N., Ellis, T., Islam, T., Ahmed, A., Kibriya, M. G., Jasmine, F., Shahriar, M. H., Hasan, R., Shima, S. A., Sarwar, G., Navas-Acien, A., Ahsan, H., & Chen, Y. (2025). Arsenic exposure reduction and chronic disease mortality. *JAMA*. <https://doi.org/10.1001/jama.2025.19161>
  - Yamauchi, H. and Fowler, B.A., 1994. Toxicity and metabolism of inorganic and methylated arsenicals. In: Nriagu, J.O. (Ed.), *Arsenic in the Environment, Part II: Human Health and Ecosystem Effects*. John Wiley & Sons, New York, pp. 35-53.