

بررسی زمین‌شیمی آرسنیک در محیط‌های آب، خاک و رسوب و ارتباط آن با تجمع زیستی در منطقه بردسیر، کمربند ارومیه-دختر

راحله هاتفی^(۱)، فرهاد اسدیان^(۲)، زهرا بوسلیک^(۳) و بتول جان‌جانه^(۳)

۱. استادیار، گروه مواد نوین، سازمان جهاد دانشگاهی خراسان رضوی، مشهد، ایران
۲. گروه زمین‌شناسی محیطی، پژوهشکده علوم پایه کاربردی، جهاد دانشگاهی، تهران، ایران
۳. دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۸

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 کمربند 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 گردید. نتایج نشان داد که میانگین غلظت آرسنیک در آب، خاک و رسوب به ترتیب ۶۶ میکروگرم در لیتر، ۷ و ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم است. در بخشی از آب‌های زیرزمینی، غلظت آرسنیک از حد مجاز جهانی (۱۰ میکروگرم در لیتر، WHO) تجاوز کرده و بیانگر آلودگی زمین‌زاد ناشی از حضور سنگ‌های دگرسان‌شده 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 مواجهه 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، که بیانگر نقش غالب آب زیرزمینی در انتقال آرسنیک به بدن انسان است. از نظر زمین‌شیمیایی، شرایط احیایی آبخوان (اغلب بین ۱۰۰- تا ۲۰۰-mV)، pH قلیایی (۹-۱۰)، و وجود گسل‌های نفوذپذیر در امتداد شمال‌غرب-جنوب‌شرق موجب افزایش تحرک آرسنیک به صورت As(III) شده است. نتایج این تحقیق تأیید می‌کند که منشأ اصلی آلودگی آرسنیک در منطقه بردسیر زمین‌زاد بوده و ارتباط تنگاتنگی میان ویژگی‌های زمین‌شناسی، هیدروژئوشیمیایی و تجمع زیستی این عنصر وجود دارد. این نتایج اهمیت پایش مداوم منابع آب زیرزمینی در نواحی دگرسان‌شده و آتشفشانی کشور را برجسته می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: آرسنیک، زمین‌شیمی محیطی، مو به‌عنوان شاخص زیستی، بردسیر.

مقدمه

(SH-) و سولفیدریل پروتئین‌ها، در بافت‌هایی مانند 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, 2001).

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 گرفته می‌شود (Nguyen et al., 2018). نتایج آزمایشگاهی همچنین نشان می‌دهد که بیش از ۹۰ درصد آرسنیک جذب‌شده از طریق بلع از نوع معدنی بوده و عمدتاً به صورت گونه‌های As(III) و As(V) وجود دارد، و تقریباً تمام آرسنیک قابل تشخیص در مو از نوع معدنی است (Cubadda et al., 2017).

میانگین غلظت آرسنیک در نمونه‌های سنگی کمربند

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؛ مدیری، ۲۰۰۴؛ شریفی و همکاران، ۲۰۱۶، پورخسروانی، ۱۴۰۲، نظری و رزم‌آرا، ۱۳۹۳، شاکری و همکاران، ۱۳۹۶). منشأ حضور آرسنیک در محیط‌های طبیعی می‌تواند زمین‌زاد (geogenic) یا انسان‌زاد (anthropogenic) باشد (Pekey, 2006). در مناطق آتشفشانی و دگرسان‌شده، حضور کانی‌های سولفیدی مانند آرسنوپیریت، رالگار، 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 که پس از انتقال به آب و خاک کشاورزی می‌تواند وارد چرخه غذایی انسان شود (Cubadda et al., 2017) و سلامت جامعه را با مشکل مواجه کند (Gundert-Remy et al., 2015). از دیدگاه زمین‌شیمیایی، رفتار آرسنیک تحت تأثیر عواملی چون pH، پتانسیل اکسایش-احیا (Eh)، ترکیب کانی‌شناسی و حضور اکسیدهای آهن و منگنز است (Hindmarsh, 2001). 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 ۶۰ برابر سمی‌تر از As(V) است (Nagy and Korom, 1983)، در حالی که ترکیبات آلی آرسنیک معمولاً سمیت قابل توجهی ندارند. آرسنیک سه‌ظرفیتی [As(III)] به دلیل تمایل شدید به گروه‌های تیول

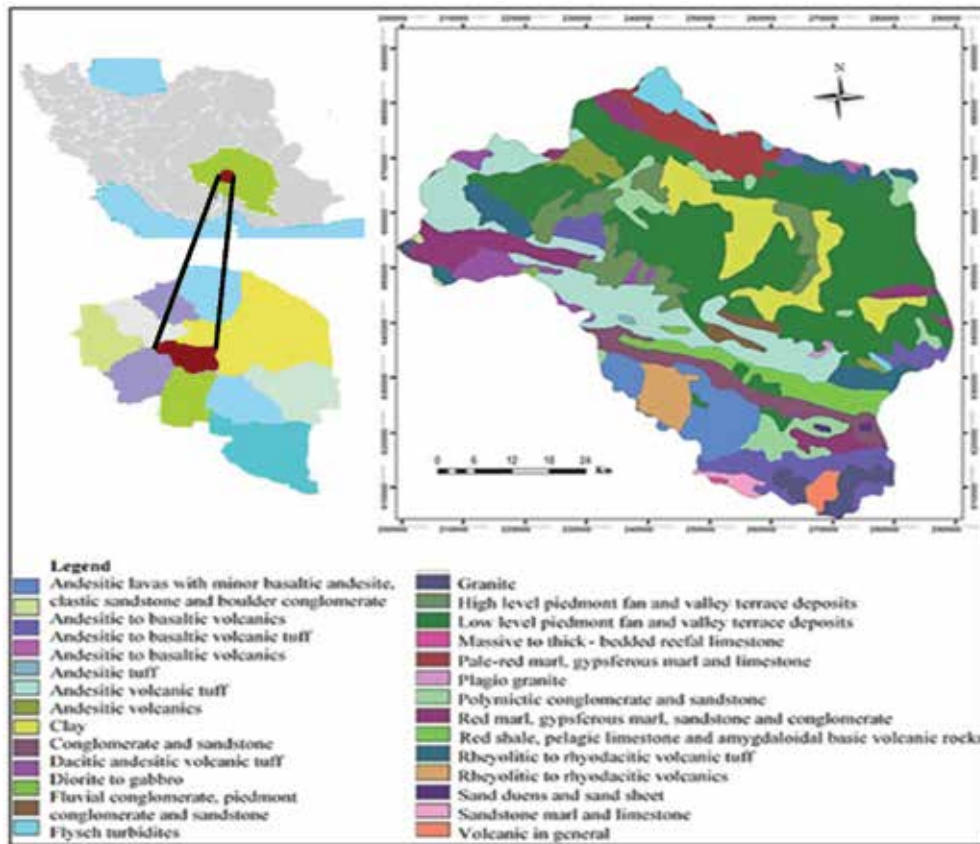
سنگ‌ها را افزایش داده و مسیر مهاجرت محلول‌های گرمایی را فراهم کرده‌اند (Eftekharijad, 1981). رخنمون آپوفیزها، استوک‌ها و دایک‌های نفوذی نیز بیانگر فعالیت ماگمایی مکرر و نقش مستقیم آن در دگرسانی و غنی‌سازی فلزات سنگین در منطقه است (شفیعی، ۱۳۸۷). از آنجاکه هیدروژئولوژی آبخوان و سیستم جریان آب زیرزمینی تأثیر زیادی بر تغییرات کیفی آبخوان‌ها و میزان انحلال کانی‌ها و شستشوی رسوبات دارد، بررسی‌های هیدروژئولوژیکی جزء لاینفک مطالعات کیفی آخوان‌ها هستند. در پژوهش حاضر به منظور بررسی سیستم جریان آب زیرزمینی نقشه تراز و جهت جریان آب زیرزمینی با استفاده از اطلاعات پیژومترهای موجود در منطقه ترسیم گردید. 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 نهایتاً به چرخه غذایی انسان را فراهم کند که بررسی آن در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است.

ارومیه-دختر در محدوده 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 بیومارکری 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.

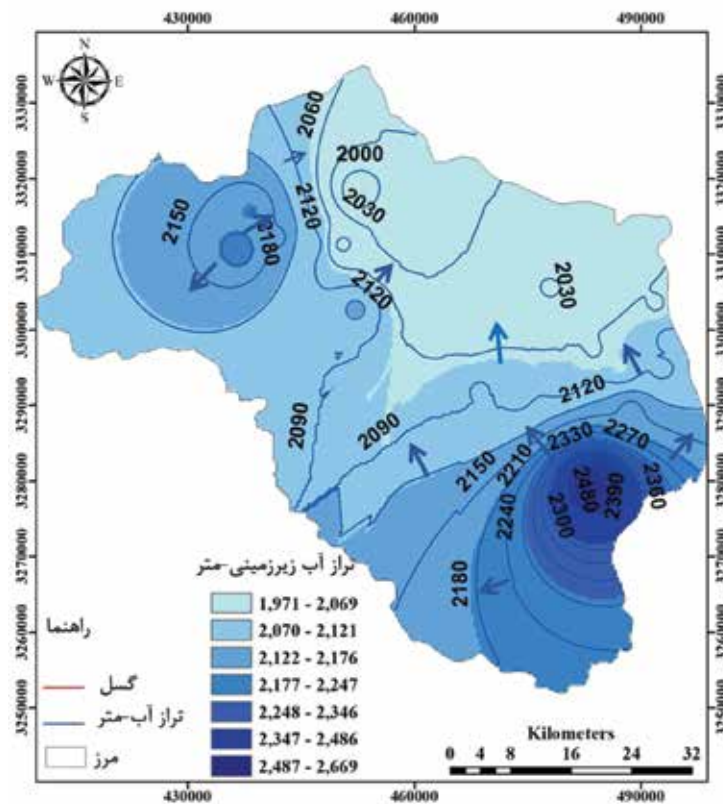
مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه

منطقه مورد مطالعه در شهرستان بردسیر، جنوب غرب استان کرمان و در زون 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 زمین‌شناسی 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 عمدتاً در امتداد گسل‌های فعال با روند شمال غرب-جنوب شرق تشکیل شده‌اند که نفوذپذیری



شکل ۱. موقعیت و زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی



شکل ۲. نقشه تراز و جهت جریان آب زیرزمینی

نمونه برداری

نتایج حاصل از آنالیزها در محیط نرم‌افزاری ArcGIS برای ترسیم نقشه‌های پراکندگی 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 گردید.

نتایج و 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 که 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 محدوده مطالعاتی

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

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

به منظور بررسی منشأ و مسیر انتقال آرسنیک در محیط، نمونه برداری از چهار مؤلفه 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 گردید تا ضمن پوشش مناسب محدوده مطالعاتی، ویژگی‌های زمین‌شناسی و هیدروژئوشیمیایی منطقه نیز نمایان شود. برای بررسی منابع آبی، ۱۰۰ نمونه آب از چاه‌ها، قنات، چشمه‌ها و آب سطحی برداشت گردید. 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 شستشو شده بود. نمونه‌ها در کمتر از یک ماه در آزمایشگاه به روش ICP-MS آنالیز شدند. نمونه برداری از خاک‌های کشاورزی با هدف بررسی توزیع سطحی آرسنیک در محدوده‌ای 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 کوچکتر از ۲۰۰ مش برای آنالیز آماده گردید. روش نمونه برداری 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. نمونه‌ها در آزمایشگاه پس از شستشو با محلول‌های استاندارد (Triton X-100، استون و آب دیونیزه) خشک و با اسید نیتریک 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.

آلودگی تا آلودگی کم قرار می‌گیرند. الگوی مکانی غلظت آرسنیک در خاک‌های کشاورزی (شکل ۴-ب) نشان می‌دهد که بیشترین مقادیر این عناصر در نواحی 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 مناطق می‌تواند نتیجه هم‌زمان چند فرآیند زمین‌شیمیایی و هیدرولوژیکی از جمله انتقال ذرات حاوی آرسنیک توسط سیلاب‌ها از مناطق بالادست (Münster et al., 2014; Ngoc et al., 2009) 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 گردد (Ahsan et al., 2020).

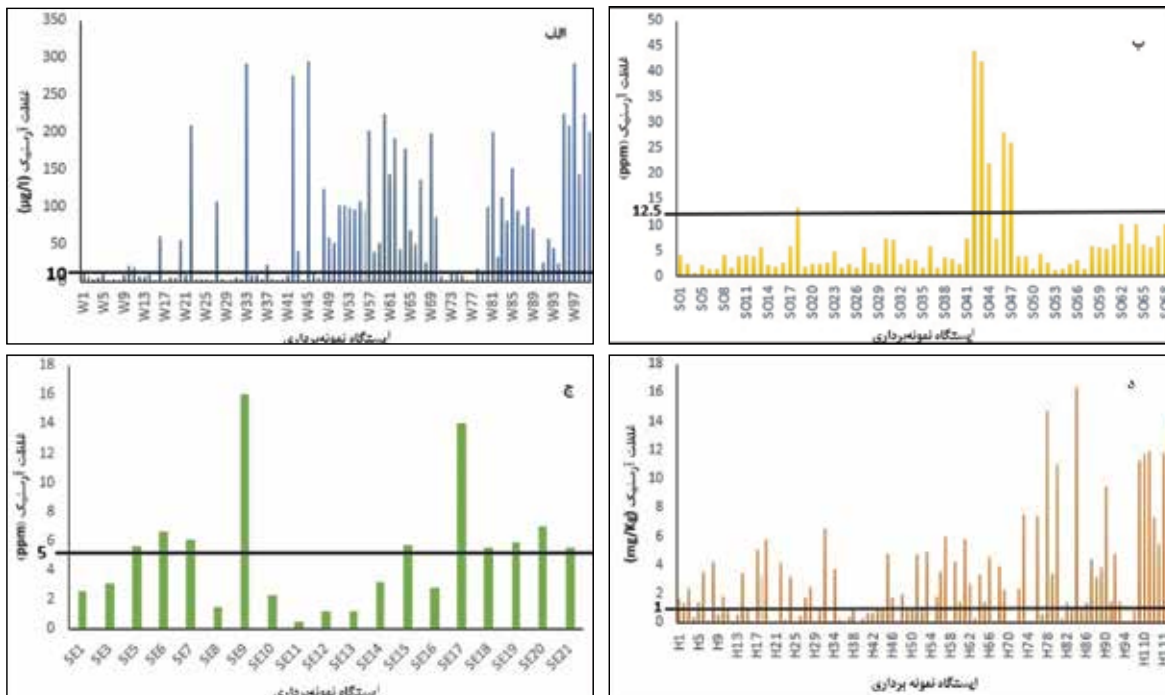
غلظت مجاز آرسنیک ۵ (ppm) در رسوب بستر است (Smedley and Kinniburgh, 2002) که با توجه به شکل ۳-ج می‌توان گفت که رسوب در تعدادی از ایستگاه‌های نمونه برداری آلوده می‌باشد. این نمونه‌ها در نزدیکی آتشفشان بیدخوان و جنوب غرب حوضه واقع شده‌اند و عمدتاً متأثر از زمین‌شناسی منطقه و تا حدودی ناشی فعالیت‌های انسانی و مصرف آفت کش است. نیمی دیگر از نمونه‌های رسوب بدون آلودگی هستند که احتمال دارد ناشی از ترقیق آرسنیک در آب و کاهش آلودگی باشد (شکل ۴-ج).

در مجموع ۱۰۲ نمونه موی انسان از مناطق مختلف محدوده بردسیر جمع‌آوری و از نظر غلظت آرسنیک آنالیز شدند. نتایج نشان داد که میزان آرسنیک در مو بین ۰/۰۲ تا ۱۶/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر است و حدود ۶۱ درصد از نمونه‌ها دارای مقادیر بالاتر از حد مجاز طبیعی

(WHO, 2011; mg/kg) هستند. این نتایج بیانگر آن است که بخش قابل توجهی از جمعیت منطقه در معرض مواجهه مزمن با آرسنیک قرار دارند (شکل ۳-د). همان‌طور که پیشتر اشاره شده، منشأ این آلودگی را می‌توان

آنالیز شیمیایی آب‌های زیرزمینی نشان داد که در بخشی از منطقه، غلظت آرسنیک از حد مجاز جهانی (WHO = ۰/۰۱ mg/L) بیشتر است و می‌توان گفت بخشی از منابع آبی منطقه دچار آلودگی زمین‌زاد هستند (شکل ۳-الف). ترکیب شیمیایی آب‌ها نشان می‌دهد که آرسنیک غالباً به صورت آرسنیت [As(III)] و گونه‌ی H_3AsO_3 حضور دارد (هاتفی و همکاران، ۱۳۹۷)، که گویای وجود محیط‌های در اعماق زیاد و تماس آبخوان با سنگ‌های سولفیددار است (Samanta and Clifford, 2006). نقشه پراکنش آرسنیک در آب نشان می‌دهد که بیشترین غلظت در بخش‌های مرکزی و شرقی تا شمال محدوده است که در پایین دست برون‌زدهای آتشفشانی و مسیرهای دگرسانی قرار دارند (شکل ۴-الف). مطالعه Abbasnejad و همکاران (۲۰۱۳) نشان می‌دهد که سنگ‌های آتشفشانی واقع در بخش بردسیر از کمر بند ارومیه-دختر به‌طور میانگین حاوی حدود ۱۲۵ ppm آرسنیک هستند که بیانگر غنای بالای این عنصر در ترکیب سنگ‌شناسی منطقه است و به‌نظر می‌رسد فرآیندهای هیدروترمال و دگرسانی در سنگ‌های آتشفشانی کمر بند 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 ۱۲/۵-۵ است (Siegel, 2002). شکل ۳-ب نتایج نشان می‌دهد که خاک محدوده مطالعاتی از نظر As، آلودگی کم تا شدید دارد و لب اغلب در محدوده بدون



شکل ۳. غلظت آرسنیک در نمونه‌های آب (ppb)، خاک کشاورزی و رسوب (ppm)، مو (mg/Kg) در محدوده مطالعاتی

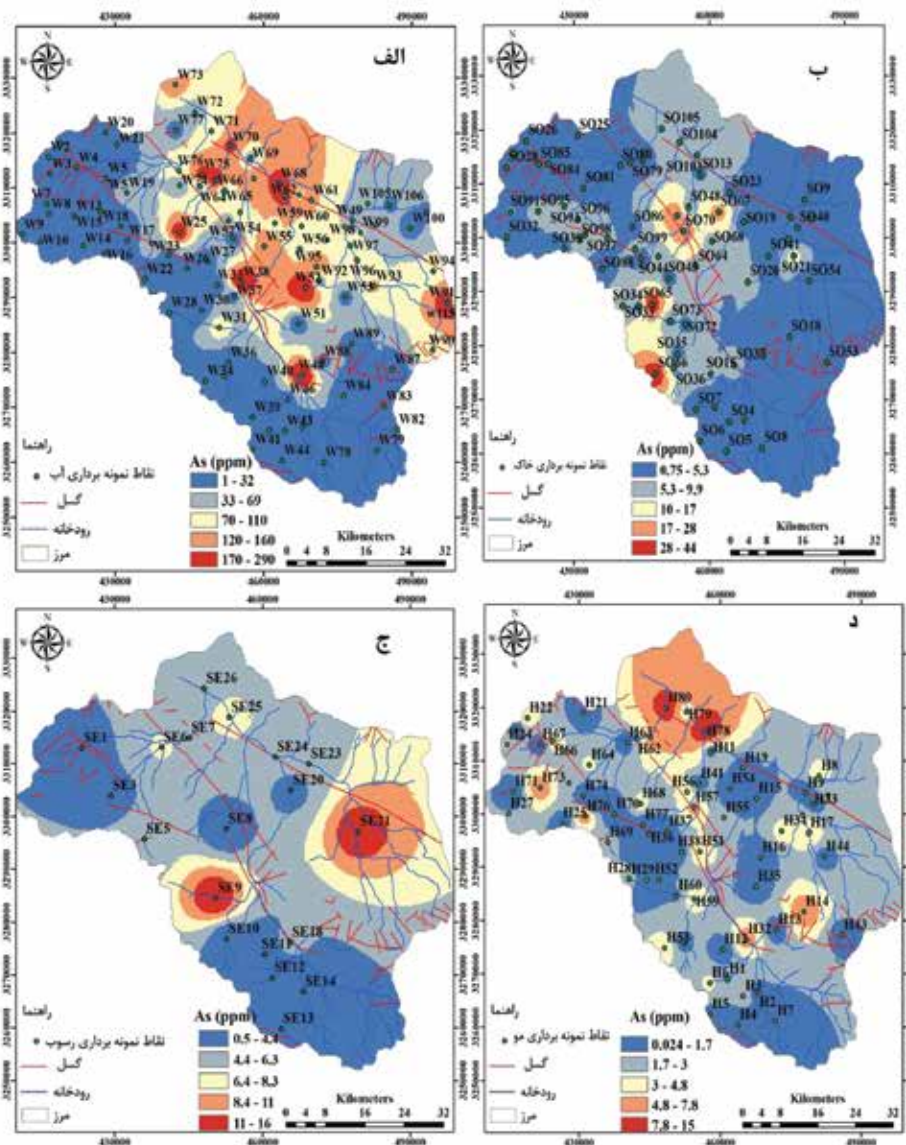
(حدود ۶ ماه تا یک سال) فرد محسوب می‌شود. نتایج این پژوهش از نظر دامنه غلظت و الگوی پراکنش، با مطالعات مشابه در مناطق پرخطر جهان مانند بنگلادش و بنگال غربی هند مشابهت دارد؛ در این مناطق نیز ارتباط مستقیم میان غلظت آرسنیک در آب آشامیدنی و میزان تجمع آن در مو و ناخن انسان گزارش شده است (Samanta et al., 2004; Uddin et al., 2006; Chojnacka et al., 2010). 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 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

در زمینه زمین‌زاد منطقه جست‌وجو کرد. بررسی نقشه پراکنش مکانی غلظت آرسنیک در مو (شکل ۴-۵) نشان می‌دهد که بیشترین مقادیر در بخش‌های مرکزی و شمالی منطقه مشاهده می‌شود؛ مناطقی که در پایین‌دست 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 نواحی جنوبی و ارتفاعات مشاهده می‌شود که با کمبود منابع آب آلوده و سنگ‌های کم‌آرسنیک مرتبط است. آرسنیک موجود در محیط عمدتاً از طریق مصرف آب آشامیدنی آلوده، استفاده از آب‌های زیرزمینی در آبیاری محصولات کشاورزی و ورود غیرمستقیم از طریق زنجیره غذایی وارد بدن انسان می‌شود. تماس پوستی و استنشاق گرد و غبار حاوی آرسنیک نیز مسیرهای فرعی محسوب می‌شوند. پس از ورود به بدن، آرسنیک در جریان خون توزیع شده و به دلیل تمایل بالای شیمیایی به گروه‌های سولفید هیدروژن (-SH) در پروتئین کراتین، در مو تجمع می‌یابد. از آنجا که مو دارای رشد پیوسته است، غلظت آرسنیک در آن بازتابی از مواجهه میان‌مدت تا بلندمدت

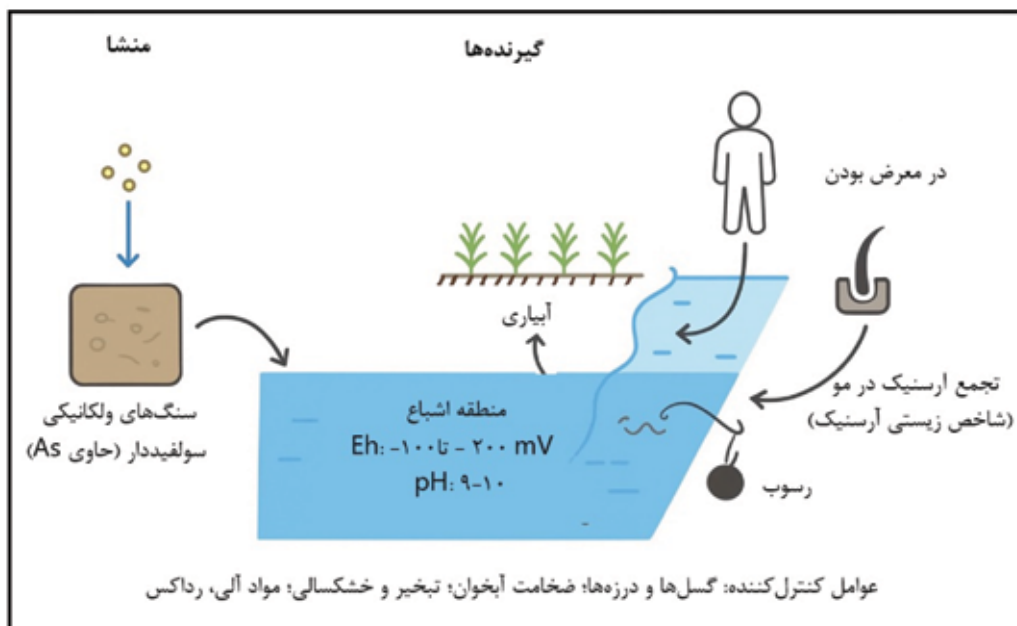
در مشارکت زیستی است. در حالیکه خاک اثر ضعیف دارد ($r=0/25$) و احتمالاً نقش مستقیمی ندارد و اگر هم اثری داشته باشد، خیلی کم و بیشتر از طریق تماس غیرمستقیم یا رژیم غذایی است. همبستگی آرسنیک مو-رسوب بسیار کم و عملاً بی‌اثر است و حدود ۲٪ واریانس مو را توضیح می‌دهد. در مقایسه درون‌محیطی، همبستگی بین آب و خاک ($r=0/45$) و بین آب و رسوب ($r=0/32$) در حد متوسط بود، 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.

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.

ماتریس همبستگی منابع محیطی با یکدیگر به عنوان 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 (تقریباً ۵٪) بود 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



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



شکل ۵. مدل مفهومی چرخه آرسنیک در محدوده مطالعاتی بردسیر

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 تحت تأثیر دگرسانی هیدروترمال، نفوذ توده‌های دیوریتی و گابروبی و اکسایش کانی‌های سولفیدی قرار باشد که 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 که 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 $As(III)$ با تحرک‌پذیری بالا شده و ضخامت زیاد آبخوان و وجود شکستگی‌ها و گسل‌های متعدد باعث افزایش

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

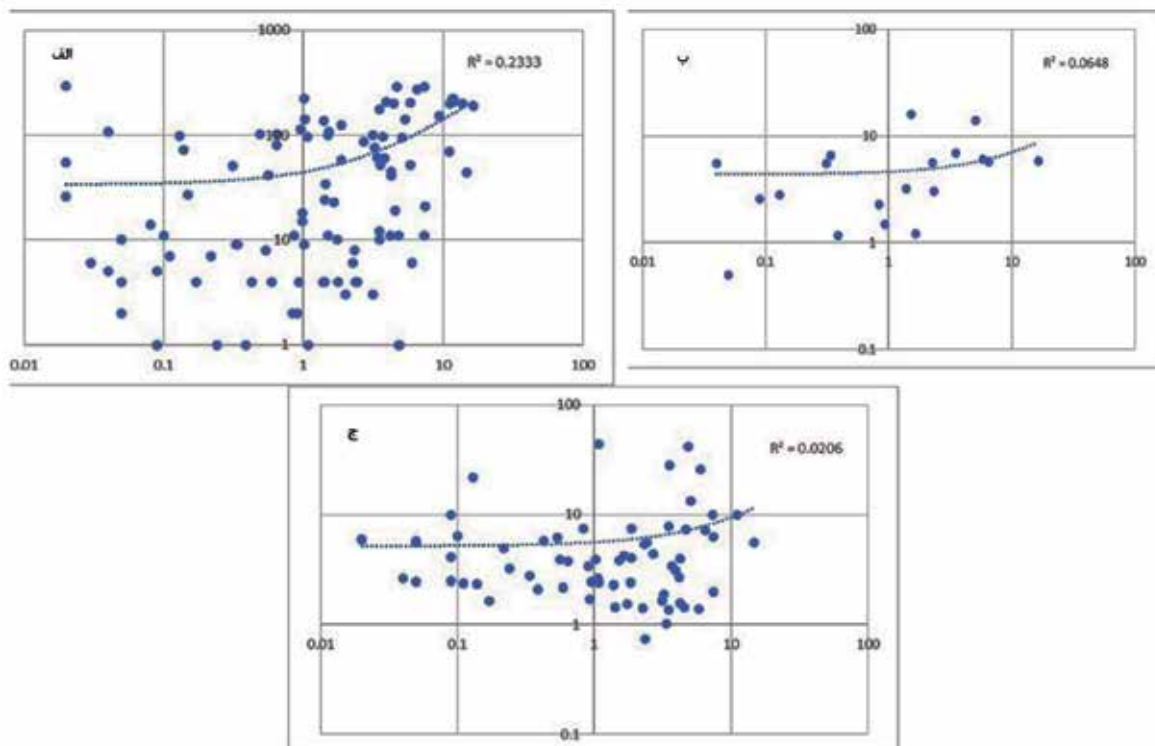
متغیر	مو	آب	خاک	رسوب
مو	۱۰۰			
آب	۰/۴۸	۱۰۰		
خاک	۰/۲۵	۰/۴۵	۱۰۰	
رسوب	۰/۱۴	۰/۳۲	۰/۳۱	۱۰۰

برای بررسی ارتباط میان آرسنیک تجمع‌یافته در موی انسان و غلظت آن در اجزای محیطی (آب، خاک و رسوب)، روابط رگرسیونی بین این متغیرها ترسیم گردید (شکل ۶). نتایج رگرسیون‌ها نشان می‌دهد که 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 $R^2 = ۰/۲۳۳۳$ نشان می‌دهد که حدود ۲۳ درصد از تغییرات آرسنیک موجود در مو توسط غلظت آن در آب قابل توضیح است. این مقدار نسبتاً متوسط اما معنادار بوده و با ضریب همبستگی پیرسون ($r = ۰/۴۸$) 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

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. به‌علاوه، شرایط اقلیمی خشک و کاهش تغذیه طبیعی آبخوان در سال‌های اخیر احتمال تمرکز بیشتر آرسنیک را افزایش داده است. با توجه به ماهیت عمدتاً کشاورزی منطقه و فقدان صنایع دارای پتانسیل انتشار آرسنیک در زمان نمونه‌برداری، می‌توان نتیجه گرفت که منشأ اصلی آرسنیک در محدوده مورد مطالعه نتیجه مستقیم فرآیندهای زمین‌زاد و دینامیک هیدروژئوشیمیایی کمربند ارومیه-دختر است و تنها در برخی نقاط، مقادیر جزئی ممکن است از مصرف طولانی‌مدت 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؛ مدیری، ۲۰۰۴؛ شریفی و همکاران، ۲۰۱۶ ...)، سیرجان (پورخسروانی، ۱۴۰۲)، تربت‌حیدریه (نظری و رزم‌آرا، ۱۳۹۳) و سبلان (شاکری و همکاران، ۱۳۹۶)، نشان می‌دهد که 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 که 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 عمدتاً بازتاب‌دهنده آلودگی‌های ثانویه بوده و سهم کمتری در چرخه زیستی دارند.

با این حال، هماهنگی و انطباق کاملی در مورد میزان آلودگی آرسنیک در آب وجود ندارد که می‌تواند به دلیل برخی احتمالات مانند ارائه آب آشامیدنی سالم توسط دولت یا دستگاه‌های تصفیه، عدم سکونت دائم در بردسیر، سم‌زدایی بسته به تفاوت‌های ژنتیکی و فیزیولوژیکی فردی، جنسیت، عادات زندگی و قومیت باشد (Chen et al., 2024).

نفوذپذیری سنگ‌ها و تسهیل مهاجرت آرسنیک به آبخوان‌ها و انتقال عمقی آن و ورود به چرخه زیستی شده است. در شکل ۶-ب، رگرسیون بین آرسنیک مو و خاک، مقدار $R^2 = 0.648$ به دست 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 به دلیل 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 حل شده و آرسنیک آزاد می‌شود. بنابراین در خاک‌های منطقه بردسیر با pH قلیایی و شرایط نسبتاً خشک، پایداری آرسنیک بالا و زیست‌فراهمی (bioavailability) آن پایین است. شکل ۶-ج (رگرسیون بین آرسنیک مو و رسوب)، ضریب تعیین (R^2) ۰/۰۲۰۶ محاسبه شد که بیانگر ارتباط بسیار ضعیف بین این دو متغیر است. این امر نشان می‌دهد که رسوبات بستر، علی‌رغم دارا بودن غلظت‌هایی از آرسنیک، به دلیل 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 عمدتاً در فازهای معدنی نظیر فریت‌ها و اکسیدهای آهن تثبیت شده و تحرک آن محدود است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که منابع آب، به‌ویژه آب‌های زیرزمینی، مسیر اصلی انتقال آرسنیک از منشأهای زمین‌زاد به چرخه زیستی در منطقه مورد مطالعه هستند. این یافته‌ها با مطالعات مشابه در مناطق آتشفشانی جنوب شرق آسیا، آمریکای لاتین (Bundschuh et al., 2021; Nguyen et al., 2018; Samanta et al., 2004; Li et al., 2022; Singh et al., 2015) و ایران (سیاره و همکاران، ۱۳۸۶؛ Rezazadeh et al., 2014) هم‌راستا است، جایی که منابع زمین‌زاد آرسنیک عامل غالب آلودگی معرفی شده‌اند. بر این



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

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که رفتار و پراکندگی آرسنیک در منطقه بردسیر به‌طور مستقیم تحت تأثیر ویژگی‌های زمین‌شناسی و فرایندهای ژئوشیمیایی کمربند 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 بوده و نقش خاک و رسوب عمدتاً ثانویه است. وجود واحدهای آتشفشانی دگرسان‌شده، توده‌های نفوذی و گسل‌های فعال مهم‌ترین عوامل زمین‌زاد آزادسازی آرسنیک در منطقه‌اند. 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 کمربند ارومیه-دختر توصیه می‌شود.

منابع

- احمدی مقدم، پ. و احمدی پور، ح.، ۱۳۹۳. بررسی رخساره شناسی 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 فیلیش در شرق ایران و توجیه آن با تئوری تکتونیک صفحه‌ای، ضمیمه گزارش شماره ۲۲، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- بیات، ا.، فرپور، م. ه. و جعفری، ا.، ۱۳۹۵. خصوصیات فیزیکوشیمیایی، میکرومورفولوژیکی و 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.، سیاری، ن.، ۱۴۰۲. ارزیابی تغییرات مکانی عنصر آرسنیک در منابع آب زیرزمینی حوضه سیرجان. مجله سلامت و محیط زیست، وره شانزدهم، شماره دوم، تابستان، ۱۴۰۲، صفحات ۲۸۷ تا ۳۰۲.
- رزم‌ار، م. و نظری، ا.، ۱۳۹۳. ارزیابی غلظت

- of Iran, Canadian Journal of Earth Sciences., 18, 210-265
- Bundschuh, J., Armienta, M.A., Morales-Simfors, N., Alam, M.R., López D.L., et al., 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.
 - 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.
 - De Temmerman, L., Vanongeval, L., Boon, W., and Hoenig, G., 2003. Heavy metal content of arable soils in northern Belgium. *Water, Air and Soil Pollution*, 148, 61-73.
 - 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*
- فلزات سنگین در آب‌های آلوده به آرسنیک منطقه کته‌تلخ (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.، 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*.
 - سیاره، ع.ر.، فنودی، م.، دادستان، ا.، ۱۳۸۶. بررسی‌های زمین‌شناسی زیست‌محیطی در منطقه قروه-بیجار. *گزارش سازمان زمین‌شناسی کشور*.
 - 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 سیلان، شمال غرب ایران. *نشریه زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته*، ۲۶.
 - شفیعی، ب.، ۱۳۸۷. الگوی فلززایی کمربند مس پورفیری کرمان و رهیافتهای اکتشافی آن، رساله دکتری، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۲۵۷ ص.
 - فاتحی‌چنار، ح.، احمدی‌پور، ح. و مرادیان شهربابکی، ع.، ۱۳۹۰. ژئوشیمی و جایگاه زمین‌ساختی توده‌های نفوذی دره زارچوئیه (جنوب شرق بردسیر، کرمان)، *پترولوژی*، ۸، ۶۹-۸۴.
 - هاتفی، ر.، اسدیان، ف.، خدایی، ک.، شهسواری، ع.ا.، ۱۳۹۵. پهنه بندی اثرات زیست‌محیطی آلودگی‌های زمین‌زاد در محدوده شهرستان تکاب. *طرح پژوهشی جهاد دانشگاهی*.
 - هاتفی، ر.، اسدیان، ف.، خدایی، ک.، شهسواری، ع.ا.، ۱۳۹۷. توسعه روش‌های تصمیم‌گیری در پهنه بندی مخاطرات بهداشتی ناشی از آلودگی‌های زمین‌زاد (تاکید بر آرسنیک)-مطالعه موردی بردسیر با استفاده از مدل ارزیابی چندمتغیره مکانی (SMCE). *طرح پژوهشی جهاد دانشگاهی*.
 - 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*, v. 69, p. 2549-2557
 - Berberian, M., and King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution

- 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.
 - 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. 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, et al., 2021. Concentration of cadmium, 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.
 - Samanta, G., Sharma, R., and Roychowdhury, T., et al. 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
 - 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 Sarouj River catchment, Takab geothermal field, north-west Iran. Journal of Environmental Management, 170, 136-144.
 - 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., Hudson, L.G., 2023. Arsenic and cancer: Evidence and mechanisms. Advances in Pharmacology.
 - WHO, 2013. Progress on sanitation and drinking-water: Fast facts. http://www.who.int/water_sanitation_health/en/index.html.