

الحمد لله رب العالمين



شرکت سهامی آب منطقه‌ای سیستان و بلوچستان

خلاصه گزارش

بررسی آلودگی و منشأ عناصر سنگین و آرسنیک در منابع آب
زیرزمینی کمر بند آتشفشانی تفتان - بزمان و ارائه شبکه پایش

مجری: معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه خوارزمی

پژوهشگران:

دکتر عطا شاکری

دکتر میثم رستگاری مهر

دکتر محمد نخعی

اسفندماه ۱۴۰۱

پیشگفتار و سیاست‌گذاری

پیرو تصویب پروپوزال طرح پژوهشی " بررسی آلودگی و منشأ عناصر سنگین و آرسنیک در منابع آب زیرزمینی کمر بند آتشفشانی تفتان- بزمان و ارائه شبکه پایش " و ابلاغ قرارداد آن در تاریخ ۱۴۰۱/۳/۲۵، اطلاعات اولیه از محدوده مطالعاتی جمع‌آوری و نقشه تعیین نقاط نمونه‌برداری طراحی شد. سپس با هماهنگی صورت گرفته با کارفرمای محترم (شرکت آب منطقه‌ای استان سیستان و بلوچستان)، نمونه‌برداری از آب زیرزمینی (چشمه، چاه و قنات) دو محدوده بزمان و تفتان بر اساس روش‌های استاندارد صورت گرفت. با توجه به اهمیت کیفیت آب آبیاری بر آلودگی گیاهان کشت‌شده، در محدوده تفتان تعدادی نمونه خاک و گیاه نیز مازاد بر موضوع طرح جمع‌آوری و آنالیز شد.

در گزارش نهایی حاضر که تقدیم کارفرمای محترم شده است تلاش شده است که بر اساس نقطه نظرات مشاور و ناظر محترم طرح تمام موارد خواسته‌شده، لحاظ شود. نتایج به‌صورت کاربردی همراه با نقشه پایش و پیشنهادات نیز در انتهای گزارش ارائه شده است.

چکیده

با توجه به اهمیت مناطق زمین گرمایی از نظر زمین شناسی زیست محیطی، زمین شناسی پزشکی و انرژی، مطالعه هیدروژئوشیمی و ژئوشیمی چشمه های گرمابی و منابع آب سطحی و زیرزمینی محدوده مناطق آتشفشانی در سال های اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است. آتشفشان های فعال و نیمه فعال در مناطق زمین گرمایی قادر به انتشار آلاینده های خطرناک متعدد در فازهای جامد، گاز و مایع هستند. کمربند آتشفشانی تفتان و بزمان، یکی از ۵ منطقه مهم زمین گرمایی ایران است که در استان سیستان و بلوچستان واقع شده است. با توجه به وسعت قابل توجه کمربند آتشفشانی تفتان- بزمان در استان سیستان و بلوچستان و قرار داشتن چندین آبخوان مهم و مراکز مهم جمعیتی در طول این کمربند و نیاز به تأمین آب شرب و کشاورزی از آب زیرزمینی و چشمه های مهم، بررسی آلودگی و منشأ عناصر بالقوه سمناک و ارائه شبکه پایش برای عناصر بالقوه سمناک و ارزیابی ریسک سلامت استفاده از آب در شرب و کشاورزی در دستور کار قرار گرفت. برای این منظور در مجموع ۵۶ نمونه آب زیرزمینی (۳۶ چاه یا قنات در محدوده آتشفشان تفتان و ۲۰ چاه یا قنات در محدوده آتشفشان بزمان) و ۱۷ چشمه سرد و گرم (۵ چشمه در محدوده تفتان و ۱۲ چشمه در محدوده بزمان) جمع آوری شد. همچنین ۱۳ نمونه خاک و ۱۴ نمونه از محصولات زراعی در منطقه خاش نیز نمونه بردار شد. آنالیز نمونه های آب برای بررسی یون های اصلی، عناصر بالقوه سمناک و ایزوتوپ های گوگرد، اکسیژن و دوتریم، و آنالیز نمونه های خاک و گیاه برای ارزیابی فلزات سنگین انجام شد.

بر اساس نتایج بررسی هیدروژیمنی نمونه های آب در نمودار پایپر، نمودارهای گیبس، نمودار دومتغیره Ca/Na در مقابل Mg/Na ، Ca/Na در مقابل HCO_3^-/Na ، نمودار کلسیم در مقابل استرانسیم، دیاگرام عناصر پایستار (conservative) B/Cl در مقابل Br/Cl و بررسی شاخص اشباع یونی با استفاده از نرم افزار PHREEQC ۴۷۹۹. ۲/۱۷ Interactive تأثیرپذیری آب های زیرزمینی در هر دو محدوده، از چشمه های هیدروترمال علاوه بر نقش هوازدگی و انحلال سنگ ها اثبات می شود. چشمه های گوگردی موجود در منطقه تفتان و اثرگذاری آن ها بر آبخوان خاش، علاوه بر کاهش pH در بسیاری از نمونه های آب موجب غالب بودن تیپ سولفات-کلروره در این محدوده شده است در حالی که در محدوده آتشفشان بزمان سولفات به مراتب غلظت کمتری دارد.

آرسنیک مهم ترین آلاینده عنصری آب در هر دو منطقه تعیین گردید. وجود دو گونه آرسنیت و آرسنات در آب های زیرزمینی آبخوان خاش تداخل این آب ها را با آب های هیدروترمالی عمیق منطقه تفتان، تأیید می کند. از طرفی تبادل یونی نیز می تواند باعث افزایش غلظت این عنصر در آبخوان شود زیرا در محیط های آبی، As تبادل پذیر رسوب با محلول رویی که حاوی غلظت بالایی از کاتیون های K^+ ، Na^+ ، Ca^{2+} و Mg^{2+} است تبادل یونی برقرار

می‌کند و وارد محلول می‌شود و در آب‌هایی که مقدار HCO_3^- بالا است آرسنیک متصل به فازهای مختلف به راحتی وارد آب می‌شود. برخلاف منطقه تفتان، گونه غالب آرسنیک در آب زیرزمینی منطقه بزمان آرسنات است. همچنین همبستگی بالای آرسنیک با بیکربنات در چشمه‌های هیدروترمال منطقه بزمان نشان داد که حمل این عنصر از عمق به سطح بیشتر تحت تأثیر تشکیل کمپلکس با کربنات‌ها است. بررسی شاخص‌های کیفی آب زیرزمینی بیانگر کیفیت بسیار پایین‌تر آب زیرزمینی منطقه در محدوده تفتان نسبت به بزمان است. در حقیقت در بزمان عمده مشکل کیفی آب مربوط به غلظت آرسنیک بوده و آب زیرزمینی این منطقه از نظر پارامترهای یونی مشکل کمتری نسبت به تفتان دارد. باین حال شاخص خطر سلامت در هر دو محدوده برای آرسنیک مقادیر بالایی نشان داده و مصرف شرب آب چاه‌ها برای مصرف‌کنندگان مشکلاتی را ایجاد خواهد کرد.

به‌طور کلی غلظت یون‌های اصلی و عناصر جزئی آبخوان‌های مجاور آتشفشان تفتان، به‌ویژه خاش تحت تأثیر اضافه شدن یون‌ها و عناصر از منابع هیدروترمال است که در عمق این چرخش اتفاق می‌افتد و از طریق گسل‌ها و شکستگی‌های عمیق وارد آبخوان می‌شوند و در ادامه خاک و گیاهان تحت تأثیر قرار می‌گیرند. در بزمان نیز عدم همبستگی آرسنیک و آهن در نمونه‌های آب بیانگر نقش اندک اکسیدهای آهن در جذب سطحی و خارج کردن آرسنیک محلول در منطقه است. باین وجود، اختلاط آب‌های هیدروترمال با آب زیرزمینی یک منشأ مهم آرسنیک در منطقه محسوب می‌شود. تغییرات غلظت پایین چشمه‌های بزمان نشان می‌دهد که در طی صعود آب به سطح زمین با گذر از سنگ‌های با جنس مختلف، فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی مانند اختلاط با آب‌های زیرزمینی یا تبخیر و انحلال باعث این تغییرات کم در ترکیب آب چشمه‌های گرمایی شده است. در چشمه‌های آب گرم منطقه بزمان برخلاف تفتان، هوازدگی سیلیکات‌ها اهمیت زیادی در شیمی آب دارد.

شاخص‌های زمین‌شیمیایی شامل شاخص زمین‌انباشت (Igeo)، ضریب غنی‌شدگی (EF)، فاکتور آلودگی (CF) و شاخص پتانسیل خطر بوم‌شناختی (RI) برای تعیین میزان آلودگی خاک استفاده گردید. همچنین از روش تحلیل مؤلفه اصلی جهت منشأ یابی آلودگی آب‌های زیرزمینی و خاک، و از ضریب انتقال (TF) جهت اندازه‌گیری میزان انتقال آلودگی فلزات از خاک به گیاه استفاده گردید. از بررسی نتایج تحلیل آماری در کلیه شاخص‌ها در نمونه‌های خاک و گیاه می‌توان گفت آرسنیک بیشترین حجم آلودگی را در منطقه دارد. ارزیابی شاخص ریسک سلامت در گیاه نیز نشان داد که بیشترین مقدار خطر در انسان‌ها و دام مربوط به عنصر آرسنیک است و خطر ریسک سلامت در کودکان برای تمامی عناصر بیشتر از بزرگسالان است و در گوسفند این شاخص بیشتر از مقادیر آن در گاو می‌باشد.

با توجه به شرایط موجود و نتایج حاصل از این مطالعه، از جمله اقدامات مدیریتی مؤثر در منطقه می‌توان به لزوم مدیریت صحیح کف شکنی چاه‌ها و اضافه برداشت از آب زیرزمینی به‌منظور جلوگیری یا کاهش رهاسازی عناصر بالقوه سمناک در آبخوان اشاره نمود. همچنین به نظر می‌رسد تأمین منابع آب (به‌ویژه آب شرب) مردم منطقه از منابع برون حوضه‌ای از نظر اجتماعی و سلامت مقرون به‌صرفه‌تر است. هم‌زمان پاکسازی آلودگی عناصر بالقوه سمناک به‌ویژه آرسنیک در منابع آب زیرزمینی هر دو منطقه تفتان و بزمان می‌تواند به‌منظور رساندن غلظت این عنصر به محدوده استاندارد در دستور کار قرار گیرد. با توجه به هزینه‌های لازم برای پاکسازی، پیشنهاد می‌شود روش‌های برون‌چاهی برای این منظور مورد استفاده قرار گیرد. همچنین می‌توان با شناسایی گیاهان بومی دارای قابلیت انباشت زیاد برای آرسنیک، برنامه پاکسازی این عنصر از خاک را نیز اجرا کرد. درنهایت بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، تعداد ۱۰ ایستگاه نمونه‌برداری آب در محدوده تفتان و تعداد ۶ ایستگاه در منطقه بزمان به‌عنوان ایستگاه‌های ثابت پایش ماهیانه غلظت آرسنیک و یون‌های اصلی تعیین گردید.

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، بسیاری از کشورها تحقیقات گسترده‌ای بر روی مناطق زمین‌گرمایی انجام داده‌اند. آتشفشان‌های فعال و نیمه فعال در مناطق زمین‌گرمایی قادر به انتشار آلاینده‌های خطرناک متعدد در فازهای جامد (خاکسترهای دودخانی)، مایع (سیالات گرم و سرد غنی از عناصر سمناک) و گاز (گازهای دودخانی مانند دی‌اکسید کربن و دی‌اکسید گوگرد و گازهای رادیواکتیو مانند رادون) هستند. قرار گرفتن در معرض طولانی مدت غلظت‌های پایین این مواد دارای عوارض قابل توجهی در سیستم‌های زیست‌شناختی است (Amaral and Radrigues, ۲۰۱۱). سیستم‌های زمین‌گرمایی که میزبان منابع بالقوه (برای تأمین انرژی از حرارت درون زمین) هستند، میادین زمین‌گرمایی نیز نامیده می‌شوند. این میادین در سراسر جهان در مناطقی با گرادیان زمین‌گرمایی نرمال و یا بیشتر، و به‌ویژه در مناطق اطراف حواشی صفحات تکتونیکی که در آن گرادیان زمین‌گرمایی ممکن است به‌طور قابل توجهی بالاتر از مقدار متوسط باشد، دیده می‌شوند (Kühn ۲۰۰۴). در صورت وجود شرایط زمین‌شناسی مناسب، سیستم‌های زمین‌گرمایی متنوعی می‌توانند تشکیل شوند. در نتیجه، تمامی مناطق زمین‌گرمایی با یکدیگر متفاوت هستند (Gupta and Roy ۲۰۰۶). سیستم‌های زمین‌گرمایی پویا^۱ از گرمای درونی زمین (گرمای ماگمایی) معمولاً در عمق چند کیلومتری، جایی که آب‌های زیرزمینی عمیق در حرکت هستند منشأ می‌گیرند. این آب‌ها بیشتر منشأ جوی دارند، اما در برخی سیستم‌های دریایی عمیق، آب فسیلی یا سایر آب‌های شور ممکن است، حضور داشته باشند. سیستم‌های نزدیک ساحل ممکن است با هردو آب جوی و آب دریا تغذیه شوند.

سه نوع طبقه‌بندی برای سیستم‌های زمین‌گرمایی ارائه می‌شود:

الف) طبقه‌بندی Rybach & Muffler

ب) طبقه‌بندی Kuhn

ج) تقسیم‌بندی Gupta & Roy

Rybach & Muffler در سال ۱۹۸۱ با توجه به ویژگی‌هایی مانند رژیم‌های انتقال حرارت، ماهیت زمین‌شناسی و ... این سیستم‌ها را به دو گروه عمده تقسیم‌بندی کرده‌اند که شامل سیستم‌های همرفتی^۲ و

^۱ Dynamic Geothermal Systems

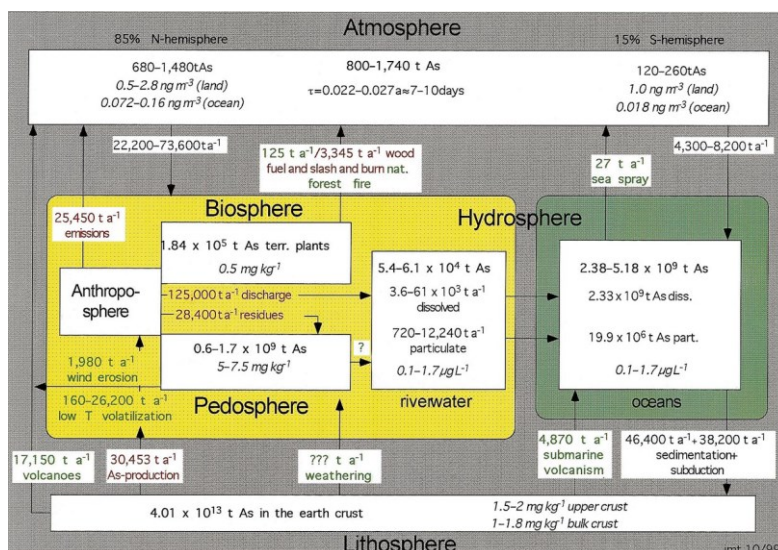
^۲ Convective

سیستم‌های انتقالی^۳ است (Rybach and Muffler ۱۹۸۱). طبقه‌بندی سیستم‌های زمین‌گرمایی توسط Kuhn در سال ۲۰۰۴ ارائه شده است. این طبقه‌بندی بر اساس نوع سیال (بخار یا مایع غالب)، دما (بالا یا پایین)، نوع سنگ میزبان (رسوبی یا آتشفشانی) و ... انجام شده است (Kühn ۲۰۰۴).

Gupta & Roy در سال ۲۰۰۶ سیستم‌های زمین‌گرمایی را به ۵ گروه تقسیم‌بندی کرده‌اند که شامل: منابع آب غالب، منابع بخار غالب، مناطق زمین‌گرمایی تحت فشار زمین، ۴- سیستم سنگ داغ خشک و ماگما می‌شود که در نسخه کامل گزارش نهایی این پروژه به تفصیل هر کدام بیان شده‌اند (Gupta and Roy ۲۰۰۶).

مناطق زمین‌گرمایی به‌ویژه به دلیل وجود موتور حرارتی قوی (اتاق ماگمایی) و فعالیت‌های گرمایی مناطقی به میزان بیشتری عناصر فرار و بالقوه سمناک به آب‌های منطقه رهاسازی می‌کنند (López, Bundschuh et al. ۲۰۱۲). افزایش دمای آب‌های جوی در عمق باعث افزایش قدرت انحلال این آب‌ها می‌شود، و اختلاط آب‌های زمین‌گرمایی با آبخوان‌ها و آب‌های زیرزمینی کم‌عمق باعث آلودگی منابع آب (از جمله آرسنیک و فلزات سنگین) مناطق آتشفشانی می‌شود (Birkle and Bundschuh ۲۰۰۷). آن دسته از عناصر شیمیایی که وزن مخصوص بالاتر از 4g/cm^3 و به لحاظ خواص شیمیایی رفتار ژئوشیمیایی لیتوفیل و کالکوفیل از خود نشان می‌دهند فلز سنگین شناخته شده و می‌توانند برای حیوانات و انسان و فرایندهای هوازی و بی‌هوازی سمی باشند. در این تحقیق عنصر آرسنیک با توجه به اثر سمیت خود در گروه فلزات سنگین در نظر گرفته شده است. آرسنیک به‌طور وسیعی در طبیعت گسترده شده و مقدار آن در پوسته زمین بین ۵/ تا ۲/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌رسد. پیریت غنی از آرسنیک به‌طور معمول در سازندهای رسوبی غنی از مواد آلی خصوصاً شیل، زغال‌سنگ و تورب نهشته شده است. شکل ۱ چرخه جهانی آرسنیک در طبیعت را نشان می‌دهد.

^۳ Conductive



شکل (۱) چرخه جهانی آرسنیک در طبیعت

ترکیبات مختلف آرسنیک در آب‌های طبیعی به صورت سه ظرفیتی، پنج ظرفیتی و ترکیبات متیله یافت می‌شود. به طور کلی آرسنیک در تمامی محیط‌های آبگین تحت شرایط اکسیداسیون به صورت آرسنات ($\text{H}_2\text{AsO}_4^{2-}$) و تحت شرایط احیایی به صورت آرسنیت ($\text{H}_2\text{AsO}_3^{2-}$) یافت می‌شود. بر طبق مطالعات انجام شده مشخص شده که As^{3+} در محیط‌های آبگین تحرک و سمیت بیشتری نسبت به As^{5+} برای موجودات زنده دارد (Kabata-Pendias and Mukherjee ۲۰۰۷).

Eh و pH دو عمل مهم کنترل کننده گونه آرسنیک در آب‌های زیرزمینی می‌باشند. در pH پایین و Eh کم تحرک آرسنیک به شدت تحت شرایط احیایی کاهش می‌یابد. چندین روش پاکسازی برای خروج آرسنیک از آب‌ها پیشنهاد شده است که عبارت‌اند از: ۱. انعقاد (coagulation) ۲. آلومینیوم اکسید یا اکسیدهای آهن ۳. تبادل یونی (ion exchange) ۴. روش اسمزی معکوس (Reverse Osmosis) ۵. اکسایش زیستی و نازیستی (biotic-abiotic oxidation) ۶. سدهای واکنشی توده‌ای و خاک‌های اکسیدی (Kabata-Pendias and Mukherjee ۲۰۰۷).

سمیت آرسنیک در غذا و آب آشامیدنی باعث چندین خطر سلامتی می‌شود که عبارت‌اند از: جهش‌زایی، سرطان‌زایی و ناقص‌الخلقه زایی و چندین اثر دیگر مثل بیماری‌های عصبی، بیماری‌های قلبی عروقی، بی‌نظمی‌های تنفسی، افزایش فشارخون، دیابت شیرین و شاخی شدن پوست یا افزایش لایه شاخی پوست (Keratoses) می‌شود (Kabata-Pendias and Mukherjee ۲۰۰۷). سمیت آرسنیک معمولاً در یک دوره ۲-۶ ساله قابل ملاحظه است و بستگی به غلظت آن در آب‌های آشامیدنی و رژیم غذایی دارد. همچنین آرسنیک باعث مسمومیت مزمن، سبب

بروز ضعف عمومی در عضلات، کاهش اشتها، تهوع، التهاب غشاهای مخاطی چشم و بینی و حنجره و ضایعات پوستی می‌گردد (اسماعیلی ساری، ۱۳۸۱). مسمومیت شدید با آرسنیک، سیستم اعصاب مرکزی را در برمی‌گیرد و باعث حالت اغما می‌شود. مصرف حدود ۷۰ تا ۱۸۰ میلی‌گرم آرسنیک باعث مرگ می‌شود (WHO ۲۰۰۲). سازمان‌های EPA و WHO حداکثر غلظت مجاز آرسنیک را 10 ppb تعیین کرده‌اند. آتشفشان‌ها یکی از مهم‌ترین عوامل زمین‌زاد آلودگی آرسنیک در منابع آب به شمار می‌روند. کوه آتشفشان تفتان در ۴۵ کیلومتری شمال-شمال غرب شهر خاش و در زون ساختاری نه‌بندان-خاش قرار دارد. ارتفاع آن از سطح دریا ۴۰۵۰ متر و نسبت به زمین‌های اطراف ۲۰۰۰ متر است. این کمان آتشفشانی کلسیمی-قلیایی به‌وسیله فروانش پوسته اقیانوسی عمان به زیر بلوک لوت و هلمند در طول حاشیه جنوبی زون مکران تشکیل شده است. تفتان آتشفشانی چین‌های است که از سنگ‌های آذرآواری، گدازه‌های داسیتی، ریولیتی و آندزیتی تشکیل شده است. همچنین از دیدگاه کانی‌شناختی، کانی‌های تشکیل‌دهنده اصلی شامل پلاژیوکلاز، هورنبلند، بیوتیت، کوارتز و پیروکسن می‌باشد. منطقه زمین‌گرمایی بزمان در جنوب شرق ایران دارای حدوداً ۱۱ چشمه گرمابی با دمای حداکثر ۴۴ درجه سانتی‌گراد در ارتفاع کم است. این چشمه‌ها علاوه بر جنبه توریستی و درمانی، مورد استفاده کشاورزی نیز قرار دارند. علاوه بر این، سفره آب زیرزمینی منطقه بزمان نیز می‌تواند با توجه به ماهیت منطقه در معرض آلاینده‌های عنصری و طبیعی مختلف قرار داشته و چاه‌های بهره‌برداری در دشت بزمان به آلاینده‌هایی مانند آرسنیک آلوده باشد.

۲. هدف از انجام طرح

هدف از این مطالعه، ارزیابی شدت آلودگی فلزات سنگین در منابع آب زیرزمینی (دشت‌های خاش و بزمان) و چشمه‌های مهم دماپاین و گرمابی، بررسی اختلاط آب‌های هیدروترمالی با آبخوان‌های واقع در کمربند آتشفشانی تفتان-بزمان و تأثیر بر کیفیت آن، تعیین منشأ و عوامل مؤثر در تحرک فلزات سنگین، هیدروژئوشیمی و چرخه عناصر بالقوه سمناک در آبخوان‌های تحت تأثیر سیستم زمین‌گرمایی با استفاده از داده‌های ایزوتوپی، تعیین مناطق بحرانی آلودگی و ارزیابی ریسک سلامت، ارائه مدل مفهومی و تعیین شبکه پایش است.

۳. روش انجام پروژه

پس از مطالعه کتابخانه‌ای و ارزیابی نقشه‌ها، بررسی میدانی از منطقه مورد مطالعه به منظور نمونه‌برداری انجام شد. در کلیه ایستگاه‌ها، نمونه‌برداری آب بر اساس استانداردهای تعریف‌شده در مراجع معتبر بین‌المللی (مقاله‌های پژوهشی چاپ‌شده در ژورنال‌ها، دستورالعمل National Field Manual منتشرشده توسط USGS و

EPA و کتاب‌های مرجع مانند Standard Methods) با توجه به آزمایش‌ها مورد نیاز صورت گرفت. در این پژوهش ۷۴ نمونه آب زیرزمینی (شامل ۲۰ حلقه چاه و ۱۲ چشمه در محدوده بزمان، و ۳۶ حلقه چاه و ۵ چشمه در محدوده تفتان) و ۱۳ نمونه خاک و ۱۴ نمونه محصول کشاورزی به دلیل آبیاری توسط آب‌های زیرزمینی منطقه برداشت شد. پارامترهای صحرایی مانند EC، pH و TDS در محل اندازه‌گیری شد (شکل ۲). همچنین نمونه‌برداری از نمونه‌های رسوب انجام شد. کلیه دستگاه‌ها قبل از نمونه‌برداری کالیبره شده و در انتخاب مواد و ظروف دقت کافی به عمل آمد.

نمونه‌های آب برای اندازه‌گیری غلظت یون‌های اصلی پس از آماده‌سازی به روش کروماتوگرافی یونی در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه خوارزمی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برای اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین نیز، نمونه‌های آماده‌سازی شده با روش ICP-MS اندازه‌گیری شدند. آنالیز شیمیایی ترکیبات ایزوتوپی آب (اکسیژن و دوتریم) در دانشگاه اوتاوا (Ottawa) کانادا و آزمایشگاه تحقیقاتی ایزوتوپ‌های پایدار اراک با استفاده از روش (Finnigan MAT Delta plus XP and Gas Bench) انجام شد.



شکل ۲) نمونه‌برداری از منابع آب منطقه مطالعاتی

از برنامه‌های کنترل و تضمین کیفیت (QA، QC)، می‌توان به درخواست انجام آزمایش‌های تکراری توسط آزمایشگاه (معادل درصد نمونه‌ها)، ارسال نمونه‌های تکراری و Spike اشاره کرد.

پس از دریافت نتایج و تجزیه و تحلیل اولیه نمونه‌ها پارامترهای زیر مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت:

- الف) تحلیل آماری کلیه داده‌های به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری‌ها، با استفاده از نرم‌افزار SPSS
- ب) ارزیابی شدت آلودگی فلزات سنگین در منابع آب زیرزمینی (دشت‌های خاش و بزمان) و چشمه‌های مهم دماپاین و گرمابی
- پ) بررسی هیدروشیمی و هیدروژئوشیمی نمونه‌های آب زیرزمینی و چشمه‌ها، تعیین ترکیب ایزوتوپ‌ها و ارزیابی کیفیت آب منطقه توسط شاخص‌های CCME-WQI
- ت) ارزیابی خطر سلامتی فلزات سنگین در نمونه‌های آب
- ث) مطالعه پارامترهای فیزیکوشیمیایی و غلظت عنصری فلزات سنگین در نمونه خاک و گیاه، تعیین ضریب غنی‌شدگی، فاکتور آلودگی و ارزیابی پتانسیل خطر بوم‌شناختی آن‌ها
- ج) تعیین موقعیت مکانی پیشنهادی برای شبکه پایش آب در منطقه‌های آتشفشانی و ارائه مدل مفهومی برای آبخوان‌های محدوده تفتان و چشمه‌های هیدروترمال محدوده بزمان

۴. نتیجه‌گیری

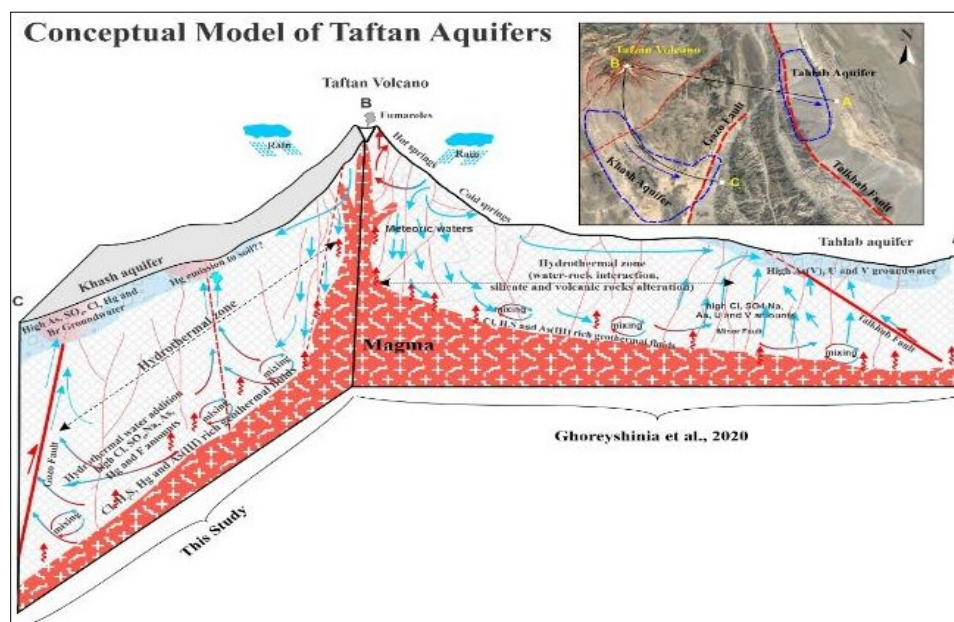
بررسی نتایج پارامترهای فیزیکوشیمیایی نشان داد که چاه‌های نزدیک به آتشفشان تفتان و در مجاورت شکستگی‌های عمیق اسیدپتیه بالاتری دارند و مقادیر هدایت الکتریکی در چاه‌های واقع در محل خروجی دشت خاش (آبخوان پشتکوه) بالاتر است.

نمودارهای هیدروژئوشیمیایی نشان دادند که بیشتر نوع و رخساره آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه سولفات-کلروره و تحت تأثیر آتشفشان تفتان هستند. تلفیق نتایج نمودارهای دومتغیره و نمودار گیبس نشان داد که تمامی نمونه‌های آب در داخل محدوده هوازگی سنگ‌های سیلیکاتی و واکنش آب-سنگ قرار دارند. همچنین تبادل کاتیونی بین آبخوان و سنگ کف و جدار تأثیر بسیار کمتری در شیمی آب زیرزمینی داشته است و نمودارهای عناصر پایستار در تائید دیگر نتایج نشان‌دهنده تأثیر منشأ هیدروترمالی بر افزایش غلظت یون‌های اصلی و عناصر جزئی مورد مطالعه در آب زیرزمینی دشت خاش است. بررسی ایزوتوپ‌های گوگرد و اکسیژن-دوتریم نیز در آب چاه‌ها و چشمه‌های سرد و گرم منطقه، نتایج فوق را تائید نمود. نمونه‌های آب نیز محاسبه ارزیابی ریسک عناصر بالقوه سمناک انتخابی نمونه‌های آب در دشت خاش نشان داد عناصر کادمیم، سرب و بخصوص آرسنیک بیشترین ریسک مصرف برای آب شرب را دارند.

با توجه به اهمیت دشت خاش در تولید محصولات کشاورزی منطقه، شدت آلودگی خاک، ارتباط آن با آبیاری و ارزیابی ریسک محصولات کشاورزی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شاخص‌های غنی‌شدگی، زمین‌انباشت و ارزیابی ریسک اکولوژیک نشان داد که آرسنیک و سرب بیشترین آلودگی و ریسک خطر و عناصر کادمیم، نیکل، وانادیم و منگنز آلودگی و ریسک متوسط را در خاک‌های کشاورزی داشت خاش دارند. شاخص پتانسیل خطر بوم‌شناختی کل (RI) نشان داد که برای مجموع عناصر انتخابی، ریسک متوسط وجود دارد. تلفیق نتایج به‌دست‌آمده از آب و خاک نشان داد که افزایش غلظت عنصر آرسنیک و گوگرد در خاک بشدت تحت تأثیر آبیاری با آب زیرزمینی (به‌ویژه اراضی نزدیک‌تر به آتشفشان تفتان) است. در این میان بیشترین شاخص خطر ریسک خطر سرطان‌زایی (HI) در کودکان و بزرگسالان مربوط به عنصر آرسنیک است. بررسی نتایج نمونه‌های گیاه (یونجه و جو) در تأیید نتایج آب و خاک نشان داد که غلظت عناصر بشدت تحت تأثیر کیفیت خاک و آب زیرزمینی دشت خاش است و عناصر آرسنیک و سرب بیشترین ریسک خطر را در این دو محصول برای مصرف دام دارند و همچنین مصرف جو برای کودکان در ارتباط با این دو عنصر محدودیت دارد. از این‌رو با توجه به اینکه علاوه بر گوشت دام، محصولات لبنیاتی حاصل از دام‌ها تقریباً تماماً در منطقه مورد استفاده ساکنان محلی قرار می‌گیرد، افزایش ریسک خطر برای بزرگسالان نیز علاوه بر کودکان در درازمدت می‌تواند به وجود آید.

برای درک بهتر چرخه عناصر بالقوه سمناک از منشأ آن تا ورود به آبخوان، خاک و گیاه از مدل مفهومی (شکل ۳) استفاده شده است. این مدل مفهومی، مدل توسعه‌یافته از نتایج به‌دست‌آمده این تحقیق و یافته‌های حاصل از تحقیقات صورت گرفته توسط قریشی نیا و همکاران در سال ۲۰۲۰ در خصوص آبخوان تهلاب در شرق منطقه زمین‌گرمایی تفتان است (Ghoreyshinia, Shakeri et al. ۲۰۲۰). همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود آبخوان خاش واقع در قسمت جنوب غربی و جنوب آتشفشان تفتان در قسمت خروجی حوزه و از طریق رودخانه گزو و حتی گسل گزو می‌تواند داری ارتباط نزدیکی با آبخوان تهلاب باشد و از طرفی تغذیه اصلی هر دو آبخوان از طریق حوزه آبریز تفتان صورت می‌گیرد. از این‌رو تلفیق نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق و نتایج قریشی نیا و همکاران (۲۰۲۰) نشان می‌دهد که غلظت یون‌های اصلی و عناصر جزئی آبخوان‌های مجاور آتشفشان تفتان، به‌ویژه خاش تحت تأثیر اضافه شدن یون‌ها و عناصر از منابع هیدروترمال است که در عمق این چرخش اتفاق می‌افتد و از طریق گسل‌ها و شکستگی‌های عمیق وارد آبخوان می‌شوند و در ادامه خاک و گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌گیرند. در خصوص منشأ عنصر جیوه به نظر می‌رسد که علاوه بر آب‌های هیدروترمال، با توجه به ویژگی‌های آن و نتایج مشابه در دیگر مناطق جهان، این عنصر می‌تواند احتمالاً همراه با گازهای زمین‌گرمایی و از طریق شکستگی‌ها وارد خاک‌های کشاورزی دشت خاش شود. به‌طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که کیفیت آب،

خاک و گیاهان منطقه تفتان بشدت تحت تأثیر منشأ زمین زاد عناصر بالقوه سمناک با منشأ دائمی زمین گرمایی تفتان قرار دارند.



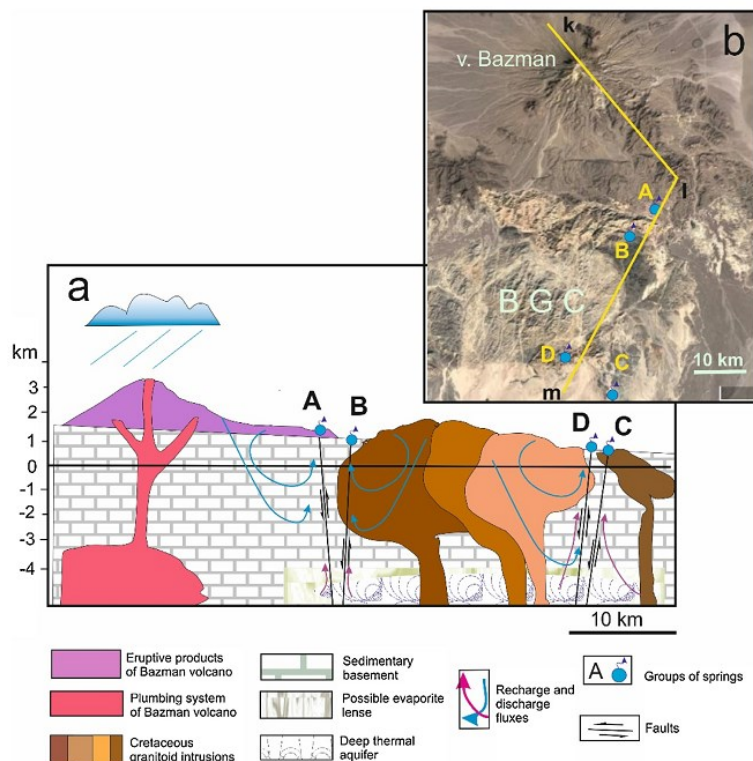
شکل ۳ مدل مفهومی برای آبخوان‌های محدوده تفتان

در محدوده آتشفشان بزمان به‌طور کلی کیفیت آب از نظر یون‌های اصلی شرایط بهتری دارد. دو تیپ عمده آب در منابع آب زیرزمینی منطقه بزمان شامل سدیک-کلروره و سدیم بی‌کربنات مشاهده می‌شود که با توجه به برخی واحدهای رسوبی-تخریبی در منطقه، نشان‌دهنده تأثیر این واحدها (مارن، ژئپس، آهک، کنگلومرا و ...) در کنار آتشفشان بزمان بر آبخوان بزمان است. بررسی‌ها نشان می‌دهد در این منطقه مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده شیمی آب تبخیر و به میزان کمتر واکنش آب-سنگ است، اگرچه فرایندهای تبادل یونی نیز شیمی آب منطقه را تحت تأثیر قرار داده است. مقایسه نمونه‌های مربوط به چشمه‌های گرمایی با نمونه‌های آب چاه و قنات تفاوت اندکی را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده این است که علاوه بر فرایندهای هیدروشیمیایی مانند تبادل یونی، انحلال نمک و انیدریت و سیلیکات‌ها، آب زیرزمینی منطقه تحت تأثیر فرایندهای هیدروترمال نیز قرار گرفته و متأثر از منابع مشابه با چشمه‌های گرمایی هستند. از آنجایی که در منطقه مورد مطالعه علاوه بر سنگ‌های آتشفشانی، سنگ‌های رسوبی، تبخیری و تخریبی نیز وجود دارد در نتیجه نشان‌دهنده منشأ متنوع برای این یون‌ها است. علاوه بر این بالا بودن ضریب همبستگی کلر با یون‌های مختلف نشان‌دهنده اختلاط آب زیرزمینی با سیالات سیستم هیدروترمالی منطقه بزمان است.

از میان عناصر بالقوه سمناک مورد مطالعه، آرسنیک مهم‌ترین عنصر آلاینده در آب منطقه بزمان است که در تمام ایستگاه‌های نمونه‌برداری غیر از دو نمونه غلظت‌های بالاتر از حد استاندارد آب شرب دارند. عدم همبستگی آرسنیک و آهن در نمونه‌های آب بیانگر نقش اندک اکسیدهای آهن در جذب سطحی و خارج کردن آرسنیک محلول در منطقه است. با این وجود، اختلاط آب‌های هیدروترمال با آب زیرزمینی یک منشأ مهم آرسنیک در منطقه بزمان محسوب می‌شود. علیرغم غلظت بالای آرسنیک در آب زیرزمینی بزمان، کمتر بودن غلظت یون‌های اصلی در این منطقه نسبت به بزمان موجب شده است که در مجموع شاخص‌های کیفیت آب برای شرب و کشاورزی شرایط مناسب‌تری را در این منطقه داشته باشند. با این حال شاخص خطر سلامت آرسنیک در این منطقه برای هر دو گروه سنی بزرگسالان کودکان خطر بالایی را نشان می‌دهد.

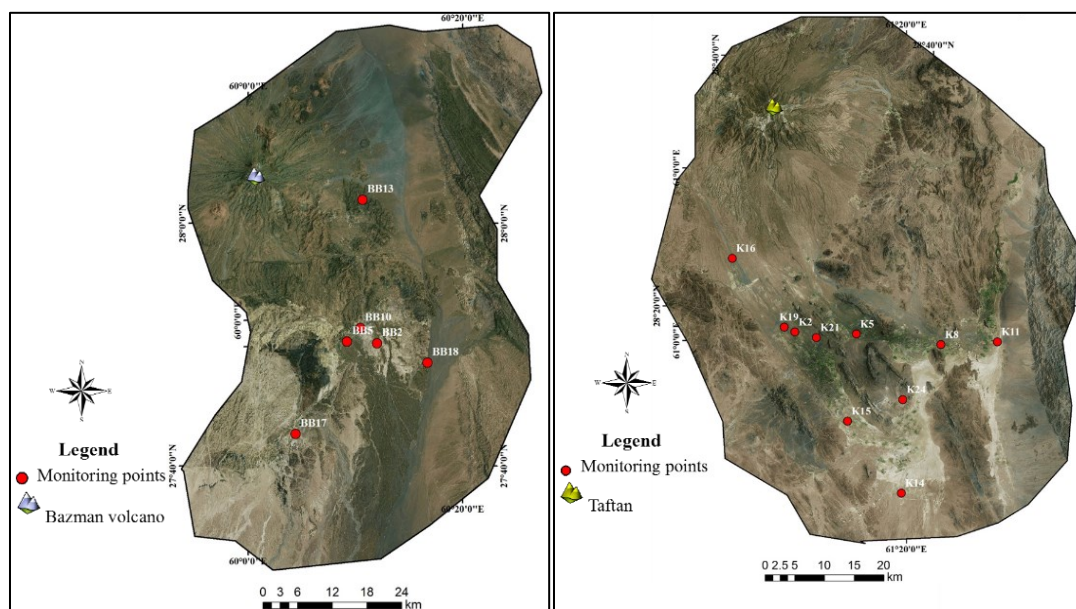
تیپ آب در چشمه‌های منطقه بزمان نیز عمدتاً سدیم-کلروره است و عمدتاً غلظت بسیار بالایی نیز از آنیون بیکربنات در آن‌ها مشاهده می‌شود. تغییرات غلظت پایین در این چشمه‌ها نشان می‌دهد که در طی صعود آب به سطح زمین با گذر از سنگ‌های با جنس مختلف، فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی مانند اختلاط با آب‌های زیرزمینی یا تبخیر و انحلال باعث این تغییرات کم در ترکیب آب چشمه‌های گرمایی شده است. در چشمه‌های آب گرم منطقه بزمان برخلاف تفتان، هوازدگی سیلیکات‌ها اهمیت زیادی در شیمی آب دارد. به‌طور کلی تخلیه آب‌های هیدروترمال در جنوب آتشفشان بزمان مشابه با آنچه در مناطق با تکتونیک فعال "آب‌های نیتروژن‌دار" نامیده می‌شود شباهت دارد. این آب‌ها به‌واسطه نفوذ عمیق آب جوی، داغ شدن در عمق‌های زیاد (تا حدود ۵ کیلومتر) و بالا آمدن از طریق سیستم‌های گسلی تشکیل می‌شوند. دمای این آب‌ها به گرادیان دمایی محلی هر منطقه و درجه خنک‌سازی هدایتی در مسیر بالا آمدن بستگی دارد. از طرف دیگر ترکیب آب‌ها نیز با نوع سنگ میزبان و ترکیب با آب زیرزمینی در عمق کم در ارتباط است. لازم به ذکر است که تمام چشمه‌های اطراف حاشیه شرقی کمپلکس گرانیتوئید بزمان در حدود ۳۰ کیلومتری جنوب کوه بزمان واقع شده‌اند. این کمپلکس شامل توده‌های پلوتونیک متعددی است و محدوده‌ای در حدود ۹۰۰ کیلومترمربع را می‌پوشاند. این کمپلکس گرانیتوئیدی در طی کرتاسه پسین (۷۲ تا ۸۳ میلیون سال پیش) جابجا شده و سنگ‌های رسوبی قدیمی‌تر (پالئوزوئیک) را قطع کرده است. چشمه‌های گروه C در این مطالعه در کمترین ارتفاع با منطقه‌ای گرانیتی (گرانیت‌های بیوتیت-هورنبلند با سن ۸۳ تا ۸۴ میلیون سال) تخلیه می‌شوند (Ghodsi et al., ۲۰۱۶). چنین گرانیت‌هایی مقدار هلیم کمتر از ۰/۱ آزاد می‌کنند بنابراین مقدار نسبت R/Ra حدود ۰/۵ در گازهای خروجی از چشمه‌ها (Deshaee et al., ۲۰۲۲) بدون شک به معنی حضور مقادیر اندک هلیم گوشته‌ای است. ترکیب شیمیایی متفاوت، کانی‌زایی نسبتاً بالا در چشمه‌های گروه C و حضور هلیم گوشته احتمالاً نشانه‌هایی از وجود یک آبخوان

عمیق مرتبط با لنزهای تبخیری یا سایر کمپلکس‌های حاوی سدیم-کلسیم-کلر و سولفات در تماس با یک توده پلوتونی سرد شونده جوان‌تر است. این نفوذ ممکن است متعلق به سیستم ماگمایی بزمان مرتبط با فرورانش مدرن مکران باشد. تمام چشمه‌های دیگر از طریق یک سیستم گسلی به سطح می‌رسند که انواع مختلف سنگ‌ها را قطع کرده (آهک، دولومیت، ماسه‌سنگ و ...)، با آب‌های زیرزمینی ترکیب‌شده و نشانه‌هایی از واکنش آب-سنگ را در درجه‌های مختلف نشان می‌دهند. یک مدل مفهومی ساده برای چنین فعالیت هیدروترمالی در این منطقه در شکل ۴ ارائه شده است. اگر هیچ منبع گرمایش دیگری وجود نداشته باشد، با در نظر گرفتن تنها حضور یک توده نفوذی سرد شونده، عمق آبخوان اصلی چشمه‌ها، با در نظر گرفتن نمای تعادلی عمق ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد و گرادیان حرارتی میانگین ۳۰ درجه در هر ۱۰۰ کیلومتر، می‌تواند حدود ۴ تا ۵ کیلومتر باشد.



شکل ۴ مدل مفهومی برای چشمه‌های هیدروترمال محدوده بزمان

به منظور نمونه‌برداری و پایش درازمدت منابع آب منطقه، با در نظر گرفتن تمام شرایط از جمله موقعیت، شباهت نقاط (با استفاده از روش‌هایی مانند تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی) و کاربری چاه‌ها، شبکه پایش کیفی برای آب طراحی شده و پیشنهاد می‌شود نمونه‌برداری از آنها به صورت دوره‌ای صورت گیرد (شکل ۵).



شکل ۵) تصویر سمت راست و چپ به ترتیب شبکه پایش چاه‌های بهره‌برداری در دو محدوده تفتان و بزمان را نشان می‌دهند.

- Amaral, A.F.S., Radrigues, A.S., ۲۰۱۱. Volcanogenic contamination: chronic exposure. Earth systems and environmental sciences. pp. ۶۸۱-۶۸۹.
- Birkle, P. and J. Bundschuh (۲۰۰۷). "Hydrogeochemical and isotopic composition of geothermal fluids." Central America—geology, resources and hazards. Leiden, The Netherlands: Balkema: ۷۷۷-۸۳۸.
- Ghoreyshinia, S. K., A. Shakeri, B. Mehrabi, F. Tassi, M. R. Mehr and A. Deshaee (۲۰۲۰). "Hydrogeochemistry, circulation path and arsenic distribution in Tahlab aquifer, East of Taftan Volcano, SE Iran." Applied Geochemistry ۱۱۹: ۱۰۴۶۲۹.
- Gupta, H. K. and S. Roy (۲۰۰۶). Geothermal energy: an alternative resource for the ۲۱st century, Elsevier.
- Kabata-Pendias, A. and A. B. Mukherjee (۲۰۰۷). "Trace elements of group ۱۲ (Previously group IIb)." Trace elements from soil to human: ۲۸۳-۳۱۹.
- Kühn, M. (۲۰۰۴). Reactive flow modeling of hydrothermal systems, Springer Science & Business Media.
- López, D. L., J. Bundschuh, P. Birkle, M. A. Armienta, L. Cumbal, O. Sracek, L. Cornejo and M. Ormachea (۲۰۱۲). "Arsenic in volcanic geothermal fluids of Latin America." Science of the total Environment ۴۲۹: ۵۷-۷۵.
- Rybach, L. and L. J. P. Muffler (۱۹۸۱). "Geothermal systems: principles and case histories." Chichester.
- WHO (۲۰۰۲). Guidelines for drinking-water quality, World Health Organization.