

ارسنیک در منابع آب زیرزمینی ایران

احمد عباس نژاد^{۱*}، بهنام عباس نژاد^۱

بخش زمین شناسی دانشگاه شهید باهنر کرمان

aabbas@uk.ac.ir

نامه علوم پایه شماره ۱۶، پاییز و زمستان ۱۴۰۴

چکیده

ارسنیک یکی از عناصر سمناک مهم است که اگرچه در تمام اجزای محیط زیست وجود دارد ولی معمولاً بالاترین غلظت‌های آن در منابع آب زیرزمینی یافت می‌شوند. با توجه به طیف وسیع بیماری‌هایی که این عنصر می‌تواند عارض شود که شامل چند نوع سرطان هم می‌باشند، سنجش غلظت و منشاء آن در منابع آب زیرزمینی ایران اهمیت زیادی دارد. هدف از این مطالعه مرور منابع فارسی و انگلیسی منتشر شده در مورد غلظت ارسنیک در منابع آب زیرزمینی ایران و منشاء آن است. براساس آن، بسیاری از آب‌های زیرزمینی ایران که غلظت ارسنیک در آن‌ها مورد سنجش قرار گرفته دارای مقادیر بالاتر از حد مجاز شرب (۱۰ میکروگرم در لیتر) می‌باشند. منشاء این ارسنیک متنوع است و شامل موارد متعددی نظیر ژئوترمال، تجزیه سولفیدها، واجذب، انحلال احیایی، تبخیر و آلودگی انسان‌زاد (به ویژه از نوع کشاورزی و معدنکاری) می‌باشند. توصیه می‌شود غلظت این عنصر در همه منابع آب زیرزمینی ایران مورد سنجش قرار گیرد و در صورتیکه در آب شرب بالاتر از حد مجاز بود، با استفاده از تکنیک‌های موجود تحت ارسنیک زدایی قرار گیرند.

کلیدواژگان: ارسنیک، آب زیرزمینی، واجذب، ژئوترمال، تجزیه سولفیدها.

مقدمه

میلیگرم بر کیلوگرم)، چهاردهمین عنصر در آب دریا و دوازدهمین در بدن انسان است. ارسنیک شدیداً کالکوفیل است و به همین دلیل اغلب همراه با کانی‌های سولفیدی، به ویژه در رالگار و اریپمنت، دیده می‌شود. رایج‌ترین کانی ارسنیک ارسنوپیریت است که همراه با نهشته‌های معدنی طلا، مس، قلع، تنگستن، نقره، روی و سرب یافت می‌شود. ارسنیک به طور گسترده به عنوان عنصر فرعی در کانی‌های سولفیدی گالن، پیریت و اسفالریت هم دیده می‌شود.

ارسنیک خصلتاً یک عنصر فراگیر (همه جایی) است و به مقدار قابل سنجش در تمام خاک‌ها و تمام اجزاء محیط زیست وجود دارد. شیمی ارسنیک شباهت زیادی با گوگرد دارد و به همین دلیل در ساختمان بلورین بسیاری از مواد معدنی سولفیدی به صورت جانشین دیده می‌شود. اکسیدهای آهن حاصل از تجزیه پیریت به شدت جاذب ارسنیک می‌باشند. در هر حال، پیریت یک کانی معمول حاوی ارسنیک است و تا ۵۶۰۰ میلی گرم در کیلوگرم ارسنیک دارد. در خاک‌های حاصل از شیل پیریتی مقدار ارسنیک تا ۱۰ برابر بیش از زمینه طبیعی است.

اهمیت ارسنیک

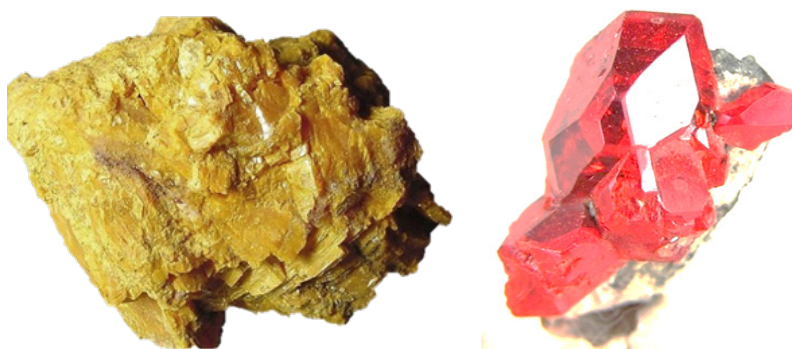
ارسنیک عادی‌ترین ماده سمی محیط زیست است و در گروه ۱ عوامل سرطان‌زا قرار دارد. مهم‌ترین جنبه‌های سمناکی ارسنیک

ارسنیک که یک ماده سمی معروف است امروزه یکی از بزرگ‌ترین خطرهای زیست محیطی است و جان حداقل چند صد میلیون نفر در جهان را تهدید می‌کند. این ماده که به عنوان «زهر پادشاهان» و «پادشاه زهرها» هم معروف است چند هزار سال پیش شناسایی شده و در خاورمیانه در حدود ۳۰۰۰ سال قبل از میلاد برای سخت کردن برنز و در مصر، یونان و روم باستان به عنوان رنگ استفاده می‌شده است. در قرن‌های اول و دوم میلادی، در امپراطوری روم از ارسنیک برای کشتن دشمنان استفاده می‌کردند. مرگ و میر ناشی از آب‌های زیرزمینی غنی از ارسنیک در بعضی از کشورها (نظیر بنگلادش) در چند دهه گذشته بیش از تمام مرگ و میرهای قبلی ناشی از مسمومیت به آن بوده است و این لزوم توجه به آن را نشان می‌دهد. مسمومیت مزمن به ارسنیک بسیار رایج‌تر از نوع حاد آن است. این نوع مسمومیت معمولاً ناشی از مصرف آب غنی از ارسنیک است. اثرات آن را می‌توان به انواع تنفسی، معدی-روده‌ای، قلبی-عروقی، عروق محیطی، مغزی-عروقی، تصلب شرایین، فشارخون، اختلال در عملکرد غدد درون ریز، کبدی، عصبی، پوستی، خونی، ژنتیکی، کلیوی، سرطانی و غیره تقسیم کرد (۱).

ارسنیک معمولاً به صورت ترکیب در طبیعت یافت می‌شود و سی و نهمین عنصر در کیهان (با میانگین غلظت ۰/۰۰۸ میلی گرم بر کیلوگرم)، بیستمین عنصر فراوان پوسته زمین (با میانگین ۱/۸

آن عبارتند از جانشینی در ساختمان پیریت، کالکوپیریت، گالن و اسفالریت. این کانی‌ها معمولاً در مناطق با فعالیت هیدروترمال تشکیل می‌شوند و اغلب با کانسارهای فلزی همراه می‌باشند. البته، پیریت که فراوان‌ترین سولفید است در باتلاق‌ها، حوضه‌های توری، در رسوبات بستر دریاچه‌ها و دریاها و در بعضی از آبخوان‌ها هم تشکیل می‌شود. نکته مهم این است که تا مادام که اکسیژن وجود نداشته باشد سولفیدها پایدار خواهند بود، ولی در اثر تماس با اکسیژن به راحتی اکسید می‌شوند. کانی‌های اکسیدی حاصله، ارسنیک را به خوبی در داخل ساختمان خود قرار نمی‌دهند ولی توانایی آن‌ها در جذب ارسنیک در سطح خود زیاد است.

ارسنیک جزء اصلی بیش از ۲۴۵ کانی است و به مقدار زیاد در نهشته‌های سولفیدی دیده می‌شود و در ۲۷ کانی ارسنیدی، ۱۲ کانی سولفیدی و ۶۵ کانی سولفوسالت وجود دارد (جدول ۱). ارسنیک یک عنصر جزئی در پوسته زمین است. لذا، وجود آب‌های غنی از آن یک امر غیر متعارف است. اگرچه ارسنیک در ساختمان بعضی از کانی‌های سیلیکاتی (نظیر بیوتیت) دیده می‌شود، ولی غلظت‌های بالای آن در دو گروه از کانی‌ها که عبارتند از سولفیدها و اکسیدها یافت می‌شوند (جدول ۲). ارسنیک می‌تواند کانی‌های سولفیدی نظیر اریپمنت، رآلگار (شکل ۳) و ارسنوپیریت را بسازد و، همچنین، در ساختمان سولفیدها جانشین گوگرد شود. نمونه‌های



شکل ۲. تصویر دو مورد از معروف‌ترین کانی‌های ارسنیک: اریپمنت (سمت چپ) و رآلگار (سمت راست)

شدن از آب‌های ژئوترمال و تمرکز (غلظت) ناشی از تبخیر در مناطق خشک می‌باشد. میکروپها نیز می‌توانند باعث افزایش انحلال احیایی اکسیدهای فریک ارسنیک‌دار شوند. اکسایش سولفیدهای ارسنیک‌دار یکی از فرآیندهای ژئوشیمیایی برای آزاد شدن ارسنیک است (جدول ۳).

اکسیژن محلول مهم‌ترین اکسیدکننده ترکیبات احیایی در زون غیراشباع و در آب زیرزمینی کم عمق می‌باشد. واجذب شدن ارسنیک از اکسیدهای آهن و منگنز در pH بالای ۸/۵ صورت می‌گیرد. حضور آنیون رقیب؛ مثل فسفات، بی‌کربنات یا سیلیکات می‌تواند واجذب ارسنیک را افزایش دهد. ممکن است توسعه شرایط انحلال احیایی در pH نزدیک به خنثی باعث واجذب ارسنیک از این اکسیدها و یا انحلال احیایی ارسنیک از اکسیدهای آهن و منگنز ارسنیک‌دار شود. ایجاد شرایط احیا باعث افزایش غلظت ارسنیک و آهن می‌شود، ولی سولفات افزایش نمی‌یابد (۶).

تبخیر زیاد در مناطق خشک منجر به افزایش تمرکز املاح در آب زیرزمینی می‌شود. ارسنیک در چنین آبخوان‌هایی متحرک می‌شود. علت آن pH بالا (> ۸.۵) است که توسط غلظت فلزات قلیایی و قلیایی خاکی در محلول ایجاد می‌گردد (۷ و ۸).

ارسنیک در آب زیرزمینی

احتمال بالا بودن غلظت ارسنیک در آب‌های زیرزمینی بیش از سایر انواع منابع آب است، زیرا که منابع ورود ارسنیک معمولاً در خاک، رسوب و سنگ قرار داشته و آن را وارد آب زیرزمینی می‌کنند. در ایران نیز بسیاری از موارد گزارش شده مبنی بر غلظت بالای ارسنیک به آب زیرزمینی مربوط می‌شوند. در موارد نادری که آب‌های سطحی (مثل رودخانه‌های کوچک) آلوده بوده‌اند، به‌دلیل تخلیه آب‌های زیرزمینی آلوده به داخل آن‌ها بوده است.

غلظت ارسنیک در آب‌های زیرزمینی اغلب کمتر از ۱۰ میکروگرم در لیتر است. ولی، بعضی از آب‌های زیرزمینی طبیعی غنی از ارسنیک در نقاطی از دنیا دیده می‌شوند که غلظت ارسنیک در آن‌ها می‌تواند در حد میلی‌گرم در لیتر هم باشد. آب‌های زیرزمینی که به‌طور صنعتی از ارسنیک آلوده شده باشند معمولاً در وسعت‌های موضعی و محلی دیده می‌شوند.

آلودگی ارسنیک در آب زیرزمینی سراسر جهان به چند فرآیند ژئوشیمیایی نسبت داده می‌شود که شامل اکسایش سولفیدهای ارسنیک‌دار، واجذب ارسنیک از اکسیدها و هیدرواکسیدهای آهن و منگنز، انحلال احیایی ارسنیک از اکسید و هیدرواکسیدها، آزاد

جدول ۱. رایج‌ترین کانی‌های ارسنیک‌دار (۴).

کانی	فرمول	گروه کانی	شرایط تشکیل
آدامیت Adamite	$Zn_2(OH)(AsO_4)$	ارسنات	محصول هوازدگی
آنابرژیت Annabergite	$(Ni,Co)_3(AsO_4)_2 \cdot 8H_2O$	ارسنات	محصول هوازدگی
Arsenic (rhombohedral)	As(0)	عنصری	نهشته‌های هیدروترمال
ارسنولیت Arsenolite	As_2O_3	ارسنیت	هوازدگی، آتش سوزی در معادن یا رگه‌های زغال سنگ
Arsenolamprite	As(0)	عنصری	نهشته‌های هیدروترمال
ارسنوپیریت Arsenopyrite	FeAsS	ارسنوسولفید	نهشته‌های هیدروترمال، سنگ‌های مختلف
کلوانتیت Chloanthite	$(Ni,Co)As_{3-x}$	ارسنید	نهشته‌های هیدروترمال
کلودتیت Claudetite	As_2O_3	ارسنیت	محصول هوازدگی
کبالتیت Cobaltite	$(Co,Fe)AsS$	ارسنوسولفید	سنگ‌های دگرگونی، نهشته‌های هیدروترمال
کانچالسیت Conichalcite	$CaCu(AsO_4)(OH)$	ارسنات	محصول هوازدگی
انارژیت Enargite	Cu_3AsS_4	ارسنوسولفید	نهشته‌های هیدروترمال
اریتریت Erythrite	$Co_3(AsO_4)_2 \cdot 8H_2O$	ارسنات	محصول هوازدگی
ژرسدورفیت Gersdorffite	NiAsS	ارسنوسولفید	سنگ‌های دگرگونی، نهشته‌های هیدروترمال
گلوکودوت Glaucodot	$(Co,Fe)AsS$	ارسنوسولفید	نهشته‌های هیدروترمال
هماتولیت Haematolite	$(Mn,Mg)_4Al(AsO_4)(OH)_8$	ارسنات	محصول هوازدگی
هورنسیت Hoernesite	$Mg_3(AsO_4)_2 \cdot 8H_2O$	ارسنات	محصول هوازدگی
جانبومیت Johnbaumite	$Ca_5(AsO_4)_3(OH)$	ارسنات	سنگ‌های دگرگونی
لولینژیت Loellingite	$FeAs_2$	ارسنید	نهشته‌های هیدروترمال
لوزونیت Luzonite	Cu_3AsS_4	ارسنوسولفید	نهشته‌های هیدروترمال
منسفیلدیت Mansfieldite	$AlAsO_4 \cdot 2H_2O$	ارسنات	محصول هوازدگی
میمتیت Mimetite	$Pb_3(AsO_4)_3Cl$	ارسنات	محصول هوازدگی
نیکولیت Niccolite	NiAs	ارسنید	نهشته‌های هیدروترمال، سنگ‌های آذرین نفوذی میفیک
اسکوترودیت skutterudite	$(Ni,Co)As_3$	ارسنید	نهشته‌های هیدروترمال
الونیت Olivenite	Cu_2OHAsO_4	ارسنات	محصول هوازدگی
ارپیمنت Orpiment	As_2S_3	ارسنوسولفید	نهشته‌های هیدروترمال، سنگ‌های آذرین، آتشفشانی
پارالگار Pararealgar	AsS (As_4S_4)	ارسنوسولفید	در معرض نور آفتاب قرار گرفتن رالگار
Pararsenolamprite	As(0)	عنصری	نهشته‌های هیدروترمال
Pharmacosiderite	$Fe_3(AsO_4)_2(OH)_3 \cdot 5H_2O$	ارسنات	محصول هوازدگی
پروستیت Proustite	Ag_3AsS_3	ارسنوسولفید	نهشته‌های هیدروترمال
راملسبرژیت ammelsbergite	$NiAs_2$	ارسنید	نهشته‌های هیدروترمال
رالگار Realgar	AsS (As_4S_4)	ارسنوسولفید	هیدروترمال، سنگ‌های آذرین، آتشفشان‌ها
سافلوریت Safflorite	$(Co,Fe)As_2$	ارسنید	نهشته‌های هیدروترمال
اسکرویدت Scorodite	$FeAsO_4 \cdot 2H_2O$	ارسنات	محصول هوازدگی
سلیگمانیت Seligmannite	$PbCuAsS_3$	ارسنوسولفید	نهشته‌های هیدروترمال
اسکوترودیت Skutterudite	$(Co,Ni)As_3$	ارسنید	نهشته‌های هیدروترمال
اسمالتیت Smaltite	$(Co,Ni)As_{3-x}$	ارسنید	نهشته‌های هیدروترمال
اسپرلیت Sperrylite	$PtAs_2$	ارسنید	سنگ‌های آذرین نفوذی میفیک و اولترامیفیک
تنانتیت Tennantite	$(Cu,Fe)_{12}As_4S_{13}$	ارسنوسولفید	نهشته‌های هیدروترمال
وسترولدیت Westerveldite	FeAs	ارسنید	نهشته‌های هیدروترمال

جدول ۲. غلظت آرسنیک در بعضی از کانی‌ها (۵)

نام کانی	غلظت آرسنیک (mg/kg)
کانی‌های سولفیدی	
آرسنوپیریت	۴۶٪ وزنی
پیریت	۷۷۰۰ تا ۱۰۰
پروتیت	۱۰۰ تا ۵
مارکاسیت	۱۲۶۰۰ تا ۲۰
گالن	۱۰۰۰۰ تا ۵
اسفالریت	۱۷۰۰۰ تا ۵
کالکوپیریت	۵۰۰۰ تا ۱۰
کانی‌های اکسیدی	
هماتیت	۱۶۰ تا
اکسیدهای تفکیک نشده آهن	۲۰۰۰ تا
اکسی هیدروکسیدهای فریک	۷۶۰۰۰ تا
مگنتیت	۴۱ تا ۷/۲
ایلمنیت	کمتر از ۱
کانی‌های سیلیکاتی	
کوارتز	۳/۱ تا ۴/۰
فلدسپات	کمتر از ۱/۰ تا ۱/۲
پیروکسن	۱۷/۱ تا ۰۸/۰
کربنات‌ها	
کلسیت	۸ تا ۱
دلومیت	کمتر از ۳
سیدریت	کمتر از ۳
سایر کانی‌ها	
آپاتیت	کمتر از ۱ تا ۱۰۰۰
فلوریت	کمتر از ۲

جدول ۳. مشخصات شیمیایی کلی آب‌های زیرزمینی غنی از آرسنیک (۳)

پارامتر	نوع آب			
	احیاء نزدیک به خنثی	قلیایی-اکسیک	اسید-سولفات	ژئوترمال
نحوه متحرک شدن	انحلال احیایی	وا جذب قلیایی	اکسید شدن سولفید	ژئوترمال
مثال‌ها	حوضه بنگال، آبخوان‌های آبرفتی- یخچالی در آمریکا	دشت‌های برامیایی آرژانتین، جنوب آمریکا	ویسکانسین (آمریکا)، پرت (استرالیا)	شیلی، تبت و نیوزیلند
غلظت آرسنیک آب	تا چند ppm	تا حدود ۱۰ ppm	تا چند ده ppm	تا ۱۲۰ ppm
گونه آرسنیک	As (III)	As (V)	As (V)	بیشتر As (III)
دمای آب	هر عددی	هر عددی	هر عددی	تا ۸۵C
pH	حدود ۰/۷	≥ ۰/۸	اسیدی	متغیر (معمولاً کمتر از ۶)
اکسیژن محلول	فاقد	زیاد (چند ppm)	متغیر	کم
کلرید	کم	متغیر	متغیر	همبستگی مثبت با آرسنیک
HCO ₃	زیاد	متوسط	کم تا متوسط	کم تا متوسط
SO ₄	خیلی کم (< ۵ ppm)	متوسط تا زیاد (> ۵ ppm)	زیاد تا خیلی زیاد	متغیر
PO ₄	زیاد (> ۱ ppm)	متغیر	متغیر	کم
NO ₃	خیلی کم (< ۱ ppm)	کم تا متوسط	متغیر	کم
NH ₄	زیاد (۵-۵۰ ppm)	فاقد	فاقد	کم
مواد آلی محلول	زیاد (> ۲ ppm)	متغیر	خیلی کم	کم
آهن	زیاد (۱-۱۰ ppm)	کم تا متوسط (< ۱ ppm)	کم تا زیاد	متغیر
منگنز	زیاد تا کم	کم تا متوسط	متغیر	متغیر
فلوراید	کم تا متوسط	متوسط تا زیاد (> ۵/۱ ppm)	کم تا متوسط	کم تا متوسط

بالای ارسنیک با آهن و مس را ناشی از جذب ارسنیک توسط اکسیدها و هیدروکسیدهای آن‌ها دانسته‌اند. با افزایش pH، غلظت ارسنیک هم زیاد شده است. منشاء ارسنیک زمین‌زاد اعلام شده و انحلال کانی‌های موجود در سازندهای میوسن (مارن، شیل، ماسه و کنگلومرای قرمز رنگ) و پلیوسن (کنگلومرا با میان لایه‌های مارن و ماسه) بر ارسنیک تاثیر داشته است.

نوروزی و همکاران (۱۲) اقدام به مطالعه ارسنیک در آب زیرزمینی دشت ملکان کرده‌اند. همبستگی مثبت بین نیترات و ارسنیک به عنوان منشاء انسان‌زاد در نظر گرفته شده، ولی آلودگی قسمت جنوب شرقی آبخوان را از نوع زمین‌زاد (ناشی از سولفیدهای ارسنیک درون شکستگی‌های داخل مارن‌های میوسن) اعلام کرده‌اند.

توزندجانی و همکاران (۱۳) اقدام به سنجش غلظت ارسنیک در ۹۴ نمونه آب زیرزمینی دشت بهار همدان نموده‌اند و با استفاده از مدل‌های نشانگر کریجینگ نقشه احتمال آلودگی را تهیه کرده‌اند. میانگین غلظت ارسنیک بالاتر از حد مجاز گزارش شده است. در حدود ۱۱٪ از محدوده مورد مطالعه احتمال آلودگی بالا است. بالاترین غلظت ارسنیک در محیط‌های کشاورزی مشاهده شده و براساس آن نتیجه گیری شده که منشاء ارسنیک فعالیت‌های کشاورزی است.

پازند و سروستانی (۱۴) مطالعات هیدروژئوشیمیایی منطقه طبس را انجام داده‌اند. در این منطقه، غلظت کاتیون و آنیون‌های اصلی و ارسنیک هم تعیین شده است. آن‌ها منشاء ارسنیک آب زیرزمینی را هوازدگی کانی‌های سولفیدی، نظیر ارسنوپریت، در نظر گرفته‌اند. همبستگی بین ارسنیک با Fe و Mn دیده نشده است، ولی همبستگی خوبی با سولفات و بی‌کربنات مشاهده شده است که براساس آن نتیجه گرفته‌اند ارسنیک محصول هوازدگی سولفیدها است.

پازند (۱۵) ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی آب زیرزمینی منطقه فردوس در استان خراسان جنوبی را مطالعه کرده است. در این منطقه، مقدار ارسنیک در محدوده ۰/۳۸ تا ۲۶ میکروگرم در لیتر متفاوت بوده است. در آن، آب زیرزمینی حاوی مقدار Fe بالا (نسبت به Mn) دارای مقادیر ارسنیک بالا است. همچنین، پیشنهاد شده که ارسنیک از طریق انحلال احیایی اکسی/هیدروکسیدهای آهن وارد آب زیرزمینی شده است.

پازند (۱۶) غلظت ارسنیک در آب‌های زیرزمینی دشت بافق را در محدوده ۰/۹ تا ۷۴/۷ میکروگرم در لیتر اعلام کرده است. در ۳۵ درصد از نمونه‌های برداشت شده غلظت ارسنیک بالاتر از حد مجاز بوده است. نامبرده، منشاء ارسنیک را انحلال احیایی دانسته

شرایط احیا مناسب برای متحرک شدن ارسنیک، اغلب در رسوبات جوان از نوع آبرفت دلتایی دیده می‌شود که در آنجا رسوبات به سرعت همراه با مواد آلی تازه دفن شده‌اند. توالی‌های ضخیم رسوبات جوان حاوی مواد آلی، اغلب مهم‌ترین مکان‌های حاوی غلظت بالای ارسنیک می‌باشند. نمونه‌های بارز آن در بنگلادش و بنگال غربی دیده می‌شوند. نمونه‌های دیگر در دشت وسیع مجارستان و رومانی، در دلتای رود قرمز در ویتنام و در بخش‌هایی از غرب ایالات متحده وجود دارند. استخراج آب زیرزمینی از این مناطق با مشکل بالا بودن غلظت ارسنیک مواجه است.

ارسنیک در منابع آب زیرزمینی ایران

گزارش‌های زیادی در منابع داخلی و خارجی در مورد حضور ارسنیک به میزان بالاتر از حد مجاز در منابع آب زیرزمینی ایران منتشر شده است. در اینجا، این گزارش‌ها مرور می‌شوند تا بر اساس آن‌ها جمع بندی کلی در مورد مقادیر و راه‌های ورود ارسنیک به منابع آب ایران صورت گیرد.

در دشت تبریز دو آبخوان (سطحی و عمقی) وجود دارد. میانگین غلظت ارسنیک در آبخوان‌های سطحی و عمقی به ترتیب ۲۵/۸ و ۱۲۲/۵ میکروگرم در لیتر بوده است. در اینجا، غلظت ارسنیک در ۱۶ نمونه‌ی برداشت شده، در حد ۳ تا ۱۵۰ میکروگرم در لیتر بوده است. در آبخوان عمقی، واکنش‌های اکسید-احیا باعث آزادسازی ارسنیک از سطح اکسی‌هیدروکسیدهای آهن شده‌اند. سازندهایی نظیر توف‌های سهند به عنوان منشاء اصلی آن معرفی شده‌اند (۹). غلظت ارسنیک در آبخوان دشت تبریز توسط برزگر و همکاران (۱۰) هم مورد مطالعه قرار گرفته است. در اینجا ۱۲ نمونه آب از چاه‌های با عمق ۸ تا ۱۵۰ متر تهیه گردیده و غلظت ارسنیک تا به ۱۵۰ میکروگرم در لیتر رسیده است. کمترین مقدار آن در چاه‌های با عمق کم و بالاترین مقدار در چاه با عمق ۱۲۰ متر به دست آمده است. براساس آن، ارسنیک در منابع آب زیرزمینی این محل از سازندهای زمین‌شناختی، نظیر توف‌های کوه سهند منشاء گرفته است. غلظت آن وابستگی شدیدی با شرایط هیدروژئولوژیکی و عوامل احیاکننده، زمان اقامت آب و عمق چاه نشان می‌دهد (۱۰). با توجه به مجاورت با آتشفشان سهند، ممکن است منشاء ارسنیک در این دشت ژئوترمال باشد.

اصغری مقدم و جلالی (۱۱) غلظت ارسنیک در منابع آب زیرزمینی دشت خوی را مطالعه کرده‌اند. در این مطالعه، غلظت یون‌های اصلی، فلورید، نیترات و مقدار EC و pH مورد سنجش قرار گرفته است. مطالعه آن‌ها نشان داده که غلظت ارسنیک در آب‌های زیرزمینی قسمت‌های شرقی این دشت بالاتر است. همچنین، بین غلظت ارسنیک با مقدار آهن، مس، سدیم، کلرید، سولفات و pH آب همبستگی مثبت دیده شده است. نامبردگان، همبستگی

بالا بودن غلظت آرسنیک دانسته‌اند. در مطالعه آن‌ها، همبستگی مثبت بین آرسنیک و pH دیده شده است.

صفری و همکاران (۲۳) اقدام به مطالعه آرسنیک در منابع آب زیرزمینی دشت چهار دولی استان کردستان کرده‌اند. براساس آن، غلظت آرسنیک تا به ۲۷۰ میکروگرم در لیتر رسیده است. همچنین، این عنصر با سدیم، پتاسیم و سیلیس همبستگی مثبت داشته و منشاء آن زمین‌زاد (از سنگ‌های آتشفشانی منطقه) اعلام شده است. نحوه آزادسازی آن را به رقابت سیلیس محلول با آرسنیک برای جذب شدن در مکان‌های جذب (اکسیدهای آهن، آلومینیوم و منگنز) دانسته‌اند.

دهبندی و همکاران (۲۴) آرسنیک در آب‌های زیرزمینی دشت سیرجان را مورد مطالعه قرار داده‌اند. دامنه مقدار آرسنیک ۲/۴ تا ۵۴۵/۸ (با مقدار متوسط ۸۶/۶) میکروگرم در لیتر به دست آمده است و در نیمی از نمونه‌ها مقدار آرسنیک بیش از حد مجاز (۱۰ میکروگرم در لیتر) بوده است. آب زیرزمینی از نوع Na-Cl و قلیایی (ناشی از هوازدگی سیلیکات‌ها، تبادل یونی و تبخیر) گزارش شده است. مقادیر بالای آرسنیک در آب‌های با pH بالاتر از ۷/۵ دیده شده‌اند. آرسنیک با pH و بی‌کربنات در یک گروه قرار گرفته است. در عین حال، تبخیر و نفوذ آب‌های شور غنی از آرسنیک عامل مهم معرفی شده‌اند.

رهنما راد و همکاران (۲۵) داده‌های مربوط به غلظت آرسنیک در آب‌های زیرزمینی دشت رفسنجان را منتشر ساخته‌اند. براساس آن، غلظت آرسنیک در حد ۴ تا ۲۷۸ (با میانگین ۵۹) میکروگرم در لیتر بوده است. غلظت در ۸۵/۳ درصد نمونه‌ها بیش از حد مجاز بوده است.

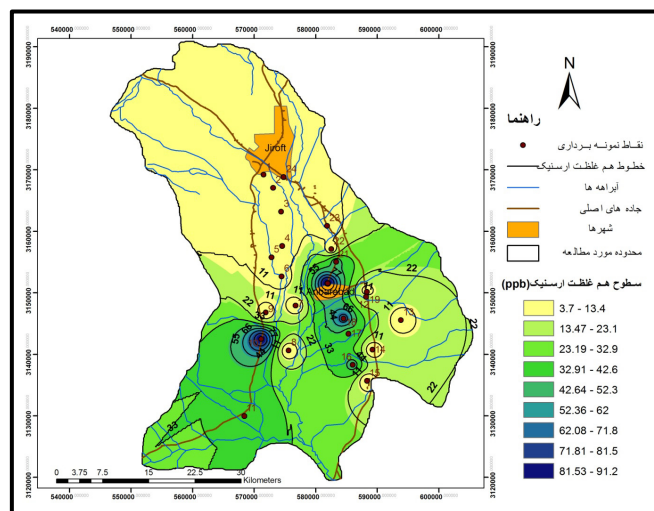
ابوالپور و همکاران (۲۶) تغییرات غلظت آرسنیک در منطقه جیرفت را مورد سنجش قرار داده و تاثیر عمق چاه، آبدهی، بارش و کاربری زمین را روی غلظت آرسنیک تعیین کرده‌اند. بر اساس این مطالعه، محل‌های با خاک اینسپتیسول آلودگی بالاتری داشته‌اند. مقدار غلظت آرسنیک در محدوده ۰/۵ تا ۱۵۳ میکروگرم در لیتر متغیر بوده است و بسیاری از چاه‌های با آب آلوده به آرسنیک نزدیک زمین‌های کشاورزی قرار داشته‌اند. در این مطالعه ارتباط معنی‌داری بین آرسنیک با عمق چاه، آبدهی چاه و میزان بارش دیده نشده است. عباس نژاد (۲۷) هم غلظت آرسنیک در دشت جیرفت را تعیین کرده است (شکل ۴). با توجه به این شکل، مقدار غلظت این عنصر به سمت قسمت‌های مرکزی و جنوبی دشت جیرفت افزایش یافته است. حداقل مقدار آرسنیک در دشت ۳/۷ میکروگرم در لیتر، میانگین آن ۲۰/۹ میکروگرم در لیتر و حداکثر آن ۹۱/۲۵ میکروگرم در لیتر ثبت شده است.

و رابطه معکوس بین غلظت آرسنیک با بی‌کربنات وجود داشته است که علت آن را جذب و هم‌رسوبی آرسنیک با کلسیت دانسته است. نامبرده، یکی از منابع آرسنیک آب را معدن سنگ آهن بافق دانسته است.

در یک مطالعه توسط عباس نژاد و همکاران (۱۷)، تعداد ۶۳ نمونه از آب‌های زیرزمینی دشت بردسیر کرمان برداشت شد. میانگین غلظت آرسنیک در آن‌ها ۱۳۴/۲ میکروگرم در لیتر بوده است. در این منطقه، شرایط اکسیدان و pH در حد خنثی تا بازیکی باعث رها شدن آرسنیک جذب شده از سطح اکسیدهای آهن موجود در رسوبات شده‌اند. بنابراین، هرچه غلظت آرسنیک در رسوبات زیادتر باشد مقدار آن در آب زیرزمینی موجود در آن رسوبات هم بالاتر خواهد بود. مقایسه نقشه pH با نقشه تغییرات غلظت آرسنیک معرف هماهنگی خوب بین این دو است و به ویژه غلظت آرسنیک هر جا که pH بالای ۸ باشد خیلی زیاد است. ولی همبستگی بین نقشه TDS و غلظت آهن با آرسنیک دیده نمی‌شود. چشمه‌های آبگرم در بردسیر کرمان ۱۵۹۰۰ تا ۳۰۵۰۰ میکروگرم در لیتر آرسنیک دارند (۱۸). این منطقه در زون آتشفشانی ارومیه-دختر قرار دارد.

دهقانی و عباس نژاد (۱۹) و عباس نژاد (۲۰) غلظت نیترات، سرب و آرسنیک در آب‌های زیرزمینی دشت انار کرمان را تعیین کرده‌اند. غلظت آرسنیک در نمونه آب‌های جنوب شرق این دشت (مجاور معادن مس) و حوالی بیاض بیش از مقدار مجاز برای شرب بوده است. به عقیده نامبردگان، منشاء احتمالی کادمیوم، آرسنیک و سرب در نمونه‌های جنوب شرق این دشت اکسید شدن سولفیدهای معادن مس منطقه است.

پازند و جوانشیر (۲۱) غلظت آرسنیک در آب زیرزمینی دشت راین کرمان را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این دشت غلظت آرسنیک بین کمتر از ۰/۵ تا ۲۵۰۰۰ میکروگرم در لیتر متغیر است. در این محل، همبستگی مثبت بین غلظت آرسنیک با بی‌کربنات و pH دیده شده است. لذا، نامبردگان نتیجه گرفته‌اند که آرسنیک از دو طریق اصلی وارد منابع آب شده است که اولی احیا اکسید/هیدروکسیدهای آهن حاوی آرسنیک است. در این حالت، ممکن است آهن به صورت سولفید رسوب کرده باشد. عامل دوم انتقال آرسنیک به داخل سیستم آب در اثر تماس با سنگ‌های آتشفشانی اسیدی در نظر گرفته شده است (۲۱). نظری و عباس نژاد (۲۲) هم غلظت آرسنیک در منابع آب زیرزمینی دشت راین کرمان را مورد مطالعه قرار داده‌اند. آن‌ها ۲۹ نمونه آب از چشمه‌ها، قنات‌ها و چاه‌ها گرفته‌اند و غلظت آرسنیک را در حد ۰/۱ تا ۲۰۴/۸ میکروگرم در لیتر به دست آورده‌اند. نامبردگان، واجذب آرسنیک از سطح اکسید و هیدروکسیدهای آهن و نفوذ آب‌های هیدروترمال را عامل اصلی



شکل ۴. تغییرات غلظت آرسنیک در آب‌های زیرزمینی دشت جیرفت (۲۷)

هیدروترمال بر سنگ‌ها در حین عبور از سنگ می‌باشند.

میانگین غلظت آرسنیک در چشمه‌های آبگرم میدان آتشفشانی سبلان ۱۶۰۰ میکروگرم در لیتر بوده است (۳۱). فعالیت‌های آتشفشانی و ژئوترمالی عامل مهم بالا بودن غلظت آرسنیک در منابع آب شهر اردبیل معرفی شده‌اند (۳۲ و ۳۳).

در یک مطالعه دیگر، ژئوشیمی زیست‌محیطی و منابع آرسنیک طبیعی در چشمه‌های آبگرم خرقان قزوین توسط یزدی و همکاران (۳۴) مورد مطالعه قرار گرفته است. نامبردگان غلظت آرسنیک در چشمه‌های آبگرم خرقان قزوین را ۱۴۰ تا ۹۵۰ میکروگرم در لیتر گزارش کرده‌اند. غلظت آرسنیک در این چشمه‌های آبگرم هم بالا است. انتشار آرسنیک موجود در آب این چشمه‌ها به داخل آب‌های زیرزمینی کم عمق محل که برای شرب استفاده می‌شوند می‌تواند باعث آلودگی آن‌ها شود. منشأ آرسنیک ژئوترمال و معدن کاری اعلام شده است.

کشاورزی و همکاران (۳۵) غلظت آرسنیک در چاه‌ها و چشمه‌های سه روستای کردستان و آذربایجان غربی را مطالعه کرده‌اند. براساس این مطالعه، آب چشمه‌های تراورتن‌ساز از آرسنیک غنی است. بالاترین مقدار آرسنیک در نزدیکی محلی ثبت شده که چشمه تراورتن‌ساز به یک سیستم هیدروترمال وابسته به فعالیت آتشفشانی در منطقه متعلق بوده است.

تغییرات ناحیه‌ای ریسک کمی و خطر آرسنیک در قروه کردستان توسط نصرآبادی و بیدآبادی (۳۶) مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور، ۱۳ نمونه آب برداشت و آنالیز شده است. غلظت آرسنیک در آن‌ها ۷۶ تا ۴۲۰ میکروگرم در لیتر بوده است. فعالیت آتشفشانی در محدوده زمانی میوسن بالایی و پلیستوسن به عنوان منبع زمین‌شناختی اصلی آلودگی آرسنیک معرفی شده است.

چیت سازان و همکاران (۲۸) پیدایش، توزیع و منشأ آرسنیک در چاه‌های آب عمیق در منطقه میداوود خوزستان را مطالعه کرده‌اند. غلظت آرسنیک در ۸۱٪ از چاه‌های عمیق بیش از مقدار مجاز بوده است. آن‌ها پیشنهاد کرده‌اند که کانی‌های سازند آسماری منبع اصلی آرسنیک بوده‌اند و مکانیسم اصلی تحرک آرسنیک در آبخوان، تجزیه بیولوژیکی موادالی مرتبط با نفت و انحلال احیایی اکسید و هیدروکسیدهای آهن بوده است. در این مطالعه، همبستگی مثبت بالایی بین غلظت کل آرسنیک با مقدار کل آهن، مقدار کل منگنز، نیکل و وانادیوم و همبستگی منفی نسبتاً قوی بین آرسنیک و نیترات و نیز، همبستگی منفی بین آرسنیک و Eh دیده شده است.

شیخی و همکاران (۲۹) اقدام به مطالعه مقدار آرسنیک در آب‌های زیرزمینی هشت‌رود کرده‌اند. براساس آن، در ۶۰ درصد موارد مقدار آرسنیک کمتر از ۱۰ میکروگرم در لیتر بوده است. بالاترین مقدار آرسنیک در این منطقه ۲۴۵ میکروگرم در لیتر اعلام شده است.

نوروزی و اصغری مقدم (۳۰) مقدار آرسنیک در آب‌های آبخوان میاندوآب را مورد مطالعه قرار داده‌اند. مقادیر میانگین، حداقل و حداکثر آرسنیک در ۳۶ نمونه آبی که در این مطالعه برداشت شده به ترتیب ۰/۰۱۱۷، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۹۳۶ میلی‌گرم در لیتر بوده است. در این آبخوان، منشأ اصلی آرسنیک زمین‌زاد اعلام شده است.

مدبری و یکتا (۳۱) تغییرات فصلی در پارامترهای صحرایی و شیمیایی (pH، EC، کاتیون‌ها و آنیون‌ها) و غلظت عناصر نادر در فصل‌های خشک و مرطوب در چشمه‌های آبگرم نیر و مشکین شهر واقع در استان اردبیل را مطالعه کرده‌اند. غلظت اکثر عناصر نادر به مراتب بیش از استاندارد بوده است. چنین تصور شده که As^+ ، B^+ ، Ba^+ ، Br^- ، Li^+ ، Na^+ ، Rb^+ ، Sr^+ ، EC ، K^+ ، Cl^- ، HCO_3^- و V منشأ ماگمایی-هیدروترمالی داشته و محصول تأثیر سیالات

غنی بوده‌اند (با میانگین حدود ۱۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم). ظرفیت رهاسازی آرسنیک این تراورتن‌ها می‌تواند بالا باشد.

مقدار آرسنیک در دشت نوق در حد ۰/۵ تا ۱۳۵/۹ با متوسط ۲۰/۱ میکروگرم در لیتر گزارش شده است (۴۲). همبستگی مثبت آن با pH آب به عنوان نقش واجذب در رهاسازی آن بیان شده است. در عین حال، رهاسازی از کنگلومراهای میوسن و شیل‌های ژوراسیک هم به عنوان عوامل دیگر بیان شده است.

بر اساس مطالعات غلامی گودیزی (۴۳)، مقدار آرسنیک در منابع آب دشت شهداد در محدوده ۰/۷۵ تا ۲۶ میکروگرم در لیتر (با میانگین ۸/۵) متغیر بوده است. همبستگی خوب آن با مقدار املاح محلول مبین تاثیر شدید تبخیر در افزایش غلظت آرسنیک در نظر گرفته شده است.

سلطانی نژاد (۴۴) دامنه غلظت آرسنیک در دشت شهرابک را در حد ۰/۵ تا ۶۲۱ میکروگرم در لیتر (با میانگین ۱۵۲/۲) اعلام کرده است. در این دشت نیز همبستگی مثبت آرسنیک با املاح محلول اصلی به عنوان تاثیر شدید تبخیر در افزایش غلظت آرسنیک بیان شده است. ولی، نامبرده معتقد است آرسنیک در اصل از طریق تجزیه سولفیدهای موجود در سنگ‌های آتشفشانی منطقه و فعالیت ژئوترمالی منتسب به گسل فعال دهشیر- بافت وارد منابع آب شده است. جهت اطلاع در مورد مقدار آرسنیک در منابع آب سطحی و غذای ایران به عباس نژاد و عباس نژاد (۴۵) مراجعه شود.

خلاصه و نتیجه‌گیری

در جدول ۴ خلاصه گزارش‌های مربوط به منشاء آرسنیک در آب‌های زیرزمینی ایران درج شده است. با توجه به آن، طیف نسبتاً وسیعی از عوامل؛ نظیر انحلال احیایی، فعالیت‌های آتشفشانی و ژئوترمالی، تجزیه سولفیدها، واجذب قلیایی، معدن‌کاری، کشاورزی و تبخیر در افزایش مقدار آرسنیک در منابع آب ایران نقش دارند که تابع موقعیت زمین‌شناختی محل، شرایط هیدروژئولوژیکی، آب و هوا و نوع فعالیت‌های بشر است. به نظر می‌رسد که نقش فعالیت‌های ژئوترمال، واجذب و تجزیه سولفیدها بیش از سایرین است و به همین دلیل غلظت آرسنیک در آب‌های زیرزمینی دشت‌های داخل و حاشیه کمربند ارومیه- دختر ایران بیش از سایر نقاط است. در مجموع، پراکندگی عوامل موثر موید این نکته است که آب‌های زیرزمینی هر محل از ایران می‌تواند دارای آرسنیک به مقدار بیش از مقدار مجاز باشند. پس، لازم است سنجش غلظت این عنصر در تمام منابع آب زیرزمینی ایران مورد توجه قرار گیرد. در صورتیکه غلظت آرسنیک در آب شرب بیش از حد مجاز باشد راه‌های مختلفی برای آرسنیک زدایی از آب وجود دارد که در منابع مختلف توضیح داده شده‌اند.

غلظت آرسنیک در چشمه‌های تراورتن‌ساز منطقه قروه- تکاب و بیجار (نظیر باباگرگر- امامزاده پیرصالح و تخت سلیمان) در حد ۲۱۲ تا ۹۸۶ میلی‌گرم در لیتر است (۳۷). این چشمه‌ها را عامل اصلی آلودگی آب‌های زیرزمینی منطقه به آرسنیک در نظر گرفته‌اند (۳۷). در این منطقه، همبستگی مثبت و قوی بین آرسنیک و سزیم، لیتیم، روبیدیوم و پتاسیم دیده شده است و از آنجا که این عناصر در سیالات مراحل نهایی تفریق ماگمایی غنی می‌شوند و این منطقه دارای شرایط پسین فعالیت آتشفشانی است که با وجود چشمه‌های تراورتن‌ساز هم تأیید می‌شود منشاء آرسنیک سیالات ماگمایی ذکر شده است. براساس نسبت Br/Cl و B/Cl، گرمایی بودن آب چشمه‌ها تأیید شده است (۳۷).

طاهری و همکاران (۳۸) غلظت آرسنیک در منابع آب چلیو واقع در استان خراسان رضوی را در حد ۱۶ تا ۶۰۶ میکروگرم در لیتر اعلام کرده‌اند. مطالعات نامبردگان حاکی از لیچینگ جزئی به صورت تبادل یونی در زون‌های گرمایی است و منبع اصلی آرسنیک را اکسیدشدن کانی‌های سولفیدی آرسنیک؛ نظیر اریپمنت، رآلگار و ارسنوپیریت در زون دگرسانی آرژلیک- پیریتی دانسته‌اند. در اینجا، pH بالای ۸ قلیابیت مورد نیاز برای تشدید اکسیدشدن سولفید و رها شدن آرسنیک را فراهم کرده است.

شاکری (۳۹) کیفیت آب سطحی و زیرزمینی در میدان ژئوترمالی تقتان را مورد مطالعه قرار داده است. مطالعه در دو فصل متفاوت صورت گرفته است. آرسنیک در ۳۰٪ نمونه آب‌های زیرزمینی بیش از استاندارد WHO بوده است. مقدار آن در چشمه‌های آبگرم خیلی بالا بوده است (تا ۳۷۸۸ میکروگرم در لیتر). غلظت‌های بالای عناصر نادر و یون‌ها در آب چاه‌ها و چشمه‌های آبگرم معرف واکنش بین آب و سنگ است.

شریفی و همکاران (۴۰) مقدار آرسنیک در آب و رسوبات میدان ژئوترمالی تکاب را که در آن کانیسازی طلا هم صورت گرفته مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این مطالعه، بین غلظت آرسنیک در آب و رسوب همبستگی دیده شده است. غلظت آرسنیک در رسوب ۲۰/۲ تا ۲۱۰/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم بوده و در آب ۵/۲۲ تا ۱۹۴/۲۵ میکروگرم در لیتر به دست آمده است.

محمدی و همکاران (۴۱) غلظت آرسنیک در تراورتن‌های چشمه‌های تراورتنی قروه را مطالعه کرده‌اند. غلظت آرسنیک در تراورتن‌ها تا ۱۰ گرم در کیلوگرم به دست آمده است. در این منطقه دو نوع تراورتن تشخیص داد شده است. تراورتن‌های با منشا شکافی با سنگ بستر کربناته، آرسنیک کمی داشته‌اند و آب آنها بیش از ۱۵۰ میکروگرم در لیتر آرسنیک دارد. تراورتن‌های تپه‌ای غنی از ناخالصی غیر کربناته با بستر آتشفشانی از آرسنیک

جدول ۳. خلاصه گزارش‌های مربوط به آرسنیک در آب‌های زیرزمینی ایران در مورد منشاء آرسنیک

نام محل	گزارش کننده	منشاء آرسنیک
تبریز	برزگر و همکاران، ۲۰۱۵	اصغری مقدم و همکاران، ۲۰۱۵
خوی	اصغری مقدم و جلالی (۲۰۱۵)	واجدب قلیایی
ملکان	نوروزی و همکاران (۲۰۱۶)	انسانزا و تجزیه سولفید
بهار	توزندجانی و همکاران، ۲۰۱۷	کشاورزی
دشت طبس	پازند و سروستانی، ۲۰۱۳	تجزیه سولفید
دشت فردوس	پازند، ۲۰۱۴	انحلال احیایی
دشت بافق	پازند، ۲۰۱۸	انحلال احیایی
دشت بردسیر کرمان	عباس نژاد و همکاران، ۲۰۱۳	واجدب قلیایی
دشت انار	دهقانی و عباس نژاد، ۲۰۱۱	عباس نژاد، ۱۳۸۸
راین	پازند و جوانشیر، ۲۰۱۳	انحلال احیایی و اکسید شدن سولفیدها
راین	نظری و عباس نژاد، ۲۰۱۵	واجدب و هیدروترمال
دشت چهاردولی	صفری و همکاران، ۱۳۹۵	واجدب
دشت سیرجان	دهبندی و همکاران، ۲۰۱۹	تبخیر و نفوذ آب شور غنی از آرسنیک
دشت جیرفت	ابولپور و همکاران، ۲۰۲۱	انسانزاد
منطقه میداوود	چیت سازان و همکاران، ۲۰۰۹	انحلال احیایی
میاندوآب	نوروزی و اصغری مقدم، ۲۰۲۲	زمین زاد
چشمه آبگرن نیر و مشکین شهر	مدبری و یکتا، ۲۰۱۴	ژئوترمال
چشمه های آب گرم سبلان	مسافری و همکاران، ۲۰۱۴	صادقی و همکاران، ۲۰۱۷
چشمه های آبگرم خرقان	یزدی و همکاران، ۲۰۱۵	ژئوترمال و معدنکاری
آذربایجان غربی	کشاورزی و همکاران، ۲۰۱۱	فعالیت هیدروترمال
قروه کردستان	نصرآبادی و بیدآبادی (۲۰۱۳)	ژئوترمال
قروه، تکاب و بیجار	کشاورزی، ۱۳۹۰	ژئوترمال
اردبیل	مسافری و همکاران، ۲۰۱۴	ژئوترمال و زمین زاد
منطقه چلیو	طاهری و همکاران، ۲۰۱۷	اکسید شدن سولفیدها
منطقه چلیو	طاهری و همکاران، ۲۰۱۶	ژئوترمال
تفتان	شاگری، ۲۰۱۵؛ قریشی و همکاران، ۲۰۲۰	ژئوترمال
بزمان	دشایی و همکاران، ۲۰۲۲	ژئوترمال
تکاب	شریفی و همکاران، ۲۰۱۶	ژئوترمال
نوق	حسن زاده و عباس نژاد، ۲۰۲۴	واجدب
شهداد	غلامی گودیزی، ۱۴۰۱	تبخیر
شهربابک	سلطانی نژاد، ۱۴۰۳	تبخیر، تجزیه سولفیدها و ژئوترمال

منابع

1. Hamza, M., Alam, S., Rizwan, M. and Naz, A., 2022. Health Risks Associated with Arsenic Contamination and Its Biotransformation Mechanisms in Environment: A Review. *Hazardous Environmental Micro-pollutants, Health Impacts and Allied Treatment Technologies*, pp.241-288.
2. Cullen, W.R. and Reimer, K.J., 2016. Arsenic is everywhere: cause for concern?. Royal Society of Chemistry.
3. Ravenscroft, P., Brammer, H. and Richards, K., 2009. Arsenic pollution: a global synthesis. John Wiley & Sons.
4. Henke, K. (2009). Arsenic: environmental chemistry, health threats and waste treatment. John Wiley & Sons.
5. Smedley, P.L. and Kinniburgh, D.G., 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied geochemistry*, 17(5), pp.517-568.

6. Garelick, H., Jones, H., Dybowska, A. and Valsami-Jones, E., 2008. Arsenic pollution sources. Reviews of environmental contamination volume 197: International perspectives on arsenic pollution and remediation, pp.17-60.
7. Garelick, H. and Jones, H. eds., 2008. Reviews of Environmental Contamination Volume 197: Arsenic Pollution and Remediation: An International Perspective (Vol. 197). Springer Science & Business Media.
8. Kuhlmeier, P.D., 1997. Partitioning of arsenic species in fine-grained soils. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 47(4), pp.481-490.
9. Asghari Moghaddam, A. and Barzegar, R., 2015. Considering factors affecting high Arsenic concentration in groundwater resources of Tabriz Plain aquifers. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 24(94), pp.177-190.
10. Barzegar, R., Asghari Moghaddam, A. and Kazemian, N., 2015. Assessment of heavy metals concentrations with emphasis on arsenic in the Tabriz plain aquifers, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 74, pp.297-313.
11. Asghari Moghaddam, A. and Jalali, L., 2015. Investigation of Arsenic Anomalies and Its Probable Origin in Groundwater of Khoy Plain. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 24(94), pp.147-154.
12. Norouzi, H., Nadiri, A., & Asghari Moghadam, A. (2016). Investigation of groundwater contamination in Malekan Plain due to Arsenic. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 13. 3(2), 151–166. Touzandejani, M., Soffianian, A., Mirghafari, N. and Soleimani, M., 2017. Assessment of arsenic contamination probability of groundwater in Hamedan-Bahar Basin using geostatistical methods. *Water and Soil*, 31(3), pp.۸۸۵-۸۷۴.
13. Pazand, K. and Sarvestani, J.F., 2013. Hydrogeochemical investigation in an arid region of Iran (Tabas, Central Iran). *Environmental earth sciences*, 70, pp.743-752.
14. Pazand, K., 2014. Geochemical and hydrogeochemical evolution of groundwater in Ferdows area, northeast of Iran. *Environmental earth sciences*, 71, pp.685-695.
15. Pazand, K., 2018. Controls on the distribution of arsenic and rare earth elements in groundwaters of the Bafgh city area, central Iran. *Water Science and Technology: Water Supply*, 18(5), pp.1590-1597.
16. Abbasnejad, A., Mirzaie, A., Derakhshani, R. and Esmaeilzadeh, E., 2013. Arsenic in groundwaters of the alluvial aquifer of Bardsir plain, SE Iran. *Environmental earth sciences*, 69, pp.2549-2557.
17. Khorasanipour, M. and Esmaeilzadeh, E., 2015. Geo-genic arsenic contamination in the Kerman Cenozoic Magmatic Arc, Kerman, Iran: Implications for the source identification and regional analysis. *Applied Geochemistry*, 63, pp.610-622.
18. Dehghani, M. and Abbasnejad, A., 2011. Cadmium, Arsenic, Lead and nitrate pollution in the groundwater of Anar Plain.
19. Abbasnejad, A., 2011. Pollution of Anar plain with respect to cadmium, arsenic, lead and nitrate. *Journal of Environmental Studies*, 36(56), pp.87-100.
20. Pazand, K. and Javanshir, A.R., 2013. Hydrogeochemistry and arsenic contamination of groundwater in the Rayen area, southeastern Iran. *Environmental earth sciences*, 70, pp.2633-2644.
21. Nazari, Y. and Abbasnejad, A., 2015. Determining the origin and distribution of arsenic in groundwater in the rayen plain (southeast of kerman) using statistical techniques. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 25(99), pp.261-270.
22. Safari, S.H., Asghari Moghaddam, A., Nadiri, A. and Siahcheshm, K., 2016. Arsenic source and mechanism of its releases into groundwater resources of Chahardoli plain, Kurdistan province. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 25(99), pp.261-270.
23. Dehbandi, R., Abbasnejad, A., Karimi, Z., Herath, I. and Bundschuh, J., 2019. Hydrogeochemical controls on arsenic mobility in an arid inland basin, Southeast of Iran: The role of alkaline conditions and salt water intrusion. *Environmental Pollution*, 249, pp.910-912.
24. Rahnamarad, J., Derakhshani, R. and Abbasnejad, A., 2020. Data on arsenic contamination in groundwater of Rafsanjan plain, Iran. *Data in brief*, 31, p.105772.
25. Abolpour, B., Najaf Tarqi, M., Askari Dolatabad, Y. and Salahi Sarbijan, F., 2021. Risk evaluation and distribution of arsenic concentration in groundwater resources of villages in Jiroft County, Kerman Province,

Iran. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 19(3), pp.559-573.

۲۶. عباس نژاد، ب. زمین‌شناسی زیست‌محیطی دشت جیرفت، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۹۱.

27. Chitsazan, M., Dorranejad, M.S., Zarasvandi, A. and Mirzaii, S.Y., 2009. Occurrence, distribution and source of arsenic in deep groundwater wells in Maydavood area, southwestern Iran. *Environmental geology*, 58, pp.727-737.
28. Sheikhi, S., Faraji, Z. and Aslani, H., 2021. Arsenic health risk assessment and the evaluation of groundwater quality using GWQI and multivariate statistical analysis in rural areas, Hashtroud, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, pp.3617-3631.
29. Norouzi, H. and Moghaddam, A.A., 2022. Determining the origin of arsenic anomalies in groundwater using multivariate statistical methods (case study: Miandoab plain aquifer, NW of Iran). *Environmental Earth Sciences*, 81(10), p.301.
30. Modabberi, S. and Jahromi Yekta, S.S., 2014. Environmental geochemistry and sources of potentially toxic elements in thermal springs in the Sabalan volcanic field, NW Iran. *Environmental earth sciences*, 71, pp.2821-2835.
31. Mosaferi, M., Shakerkhatibi, M., Dastgiri, S., Jafar-abadi, M.A., Khataee, A. and Sheykholeslami, S., 2014. Natural arsenic pollution and hydrochemistry of drinking water of an urban part of Iran. *Avicenna Journal of Environmental Health Engineering*, 1(1), pp.7-16.
32. Mosaferi, M., Sheykholeslami, S., Dastgiri, S. and Shakerkhatibi, M., 2017. Determination of arsenic in recreational hot water springs in sarein-ardabil region considering possible dermal exposure. *Medical Journal of Tabriz University of Medical Sciences*, 39(2), pp.70-76.
33. Yazdi, M., Taheri, M. and Navi, P., 2015. Environmental geochemistry and sources of natural arsenic in the Kharaqan hot springs, Qazvin, Iran. *Environmental earth sciences*, 73, pp.5395-5404.
34. Keshavarzi, B., Moore, F., Mosaferi, M. and Rahmani, F., 2011. The source of natural arsenic contamination in groundwater, west of Iran. *Water Quality, Exposure and Health*, 3, pp.135-147.
35. Nasrabadi, T. and Bidabadi, N.S., 2013. Evaluating the spatial distribution of quantitative risk and hazard level of arsenic exposure in groundwater, case study of Qorveh County, Kurdistan Iran. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 10, pp.1-8.
۳۶. کشاورزی، ب. زمین‌شناسی پزشکی و منشاء آرسنیک در کمر بند دگرگونی-ماگمایی سندنجان-سیرجان شمالی، پایان نامه دکترا، دانشگاه شیراز، ۱۳۹۰.
37. Taheri, M., Gharaie, M.H.M., Mehrzad, J., Afshari, R. and Datta, S., 2017. Hydrogeochemical and isotopic evaluation of arsenic contaminated waters in an argillic alteration zone. *Journal of geochemical exploration*, 175, pp.1-10.
38. Shakeri, A., Ghoreyshinia, S. and Mehrabi, B., 2015. Surface and groundwater quality in Taftan geothermal field, SE Iran. *Water Quality, Exposure and Health*, 7, pp.205-218.
39. 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, northwest Iran. *Journal of environmental management*, 170, pp.136-144.
40. Mohammadi Z., Claes H., Cappuyns V., Nematollahi MJ., Helser J., Amjadian K., and Swennen R. 2021, High geogenic arsenic concentrations in travertines and their spring waters: Assessment of the leachability and estimation of ecological and health risks. *Journal of hazardous materials*. 409:124429 ;5.
41. Hassanzadeh, B. and Abbasnejad, A., 2024. Arsenic Concentration in Groundwater Resources of the Noug Plain (Iran) and Evaluation of Influencing Factors, *Civil and Geoengineering Letters* 1(2), 1-11 .
۴۲. غلامی گودیزی، ف.، ۱۴۰۱، هیدروژئوشیمی زیست‌محیطی دشت شهداد، استان کرمان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
۴۳. سلطانی نژاد، ف.، ۱۴۰۳، بررسی هیدروژئوشیمی زیست‌محیطی آرسنیک در سفره آب زیرزمینی دشت شهر بابک، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
۴۴. عباس نژاد ا. و عباس نژاد ب.، ۱۴۰۳، آرسنیک در محیط زیست، انتشارات دانشگاه شهید باهنر کرمان.