



چهارمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک و محیط زیست

بررسی آلاینده‌گی شبه فلز سمی (As) در محدوده کوه زرنیخ ریوش

فاطمه عبداللهی^{۱*}، مرتضی رزم‌آرا^۲

^۱ کارشناسی ارشد زمین‌شناسی زیست‌محیطی دانشگاه فردوسی مشهد، ftmeabdollahii@yahoo.com

^۲ عضو هیئت‌علمی دانشگاه فردوسی مشهد، razmaramorteza@gmail.com

چکیده: محدوده مورد مطالعه (کوهسرخ)، در ۳۵ کیلومتری شمال کاشمر و ۱۵ کیلومتری ریوش قرار دارد. این پژوهش نشان داد که آب و خاک منطقه، آلودگی شدید به فلزات سنگین و شبه فلزات سمی را دارا می‌باشند. میزان آلاینده‌گی در منطقه با استفاده از آنالیز ICP-OES بررسی گردید. غلظت آرسنیک در مناطق تحت تاثیر قرار گرفته، چندین برابر بیشتر از بیشینه سطح آلودگی (۱۰ میکروگرم در لیتر) در مناطق غیرآلوده است. این مطالعه نشان داد که آلودگی آرسنیک در منطقه مورد مطالعه، نتیجه فرآیندهای زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی حاکم بر محیط می‌باشند و منشأ زمین زاد (Geogenic sources) دارند. عوامل کلیدی در فرآیندهای زمین زاد در منطقه، شامل تنوع زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی، عوامل هیدروژئولوژیکی، ژئومورفولوژی خاص منطقه، کانسازسازی و فعالیت‌های گرمایی، عوامل تکتونیکی و فرآیندهای ژئوشیمیایی حاکم بر منطقه می‌باشند.

کلید واژه‌ها: آرسنیک، زرنیخ، زیست‌محیطی، فلزات سنگین، کوهسرخ

۱- مقدمه:

فهرست اولویت‌های ATSDR (آژانس ثبت مواد سمی و بیماری‌ها، ۲۰۲۲) و در بین ۱۰ ماده شیمیایی مهم بهداشت عمومی در لیست سازمان بهداشت جهانی (WHO)، رتبه اول را دارد. بیشینه میزان مجاز آرسنیک در آب آشامیدنی توسط WHO و همچنین توسط آژانس حفاظت از محیط زیست (EPA) و اتحادیه اروپا 10 میکروگرم در لیتر تعیین شده است. قرار گرفتن انسان در معرض آرسنیک، منجر به تغییرات مخرب در تولید مثل، التهاب و آسیب‌های پوستی، سیستم تنفسی، خون، سیستم لنفاوی، سیستم عصبی و دستگاه تناسلی می‌شود. هیچگونه اقدامات درمانی خاص، برای مسمومیت مزمن با آرسنیک وجود ندارد. آرسنیک با عدد اتمی ۳۳، متعلق به گروه ۱۵ جدول تناوبی است. عنصر آرسنیک می‌تواند به صورت‌های متفاوت اکسیداسیون و نوع‌های گوناگون همانند $As(0)$, $As(III)$, $As(V)$, $As(-III)$ دیده شود [۲]. رایج‌ترین حالت‌های اکسیداسیون ظرفیت -3 و $+3$ می‌باشد. در آب‌های طبیعی اصولاً آرسنیک به دو شکل غیر آلی $As(V)$ و $As(III)$ دیده می‌شود [۳]. در شرایط احیایی، عموماً آرسنیک به صورت $As(III)$ وجود دارد اما در آب‌های اکسایشی به شکل $As(V)$ می‌باشد [۴].

وجود دیگرگونه‌های آرسنیک در آب بستگی به فعالیت‌های بیولوژیکی، pH آب و شرایط اکسیداسیون-احیای محیط دارد [۵].

آرسنیک به عنوان یک آلاینده اصلی زیست‌محیطی، یک مشکل جدی جهانی است و در معرض قرارگیری آن، تاثیرات مخرب بسیار شدیدی بر سلامتی انسان و سایر موجودات زنده در محیط زیست دارد. نزدیک به ۱۰۶ کشور جهان تحت تاثیر آلودگی آب‌های زیرزمینی آرسنیک قرار دارند و تخمین زده می‌شود که ۲۳۰ میلیون نفر در سراسر جهان در معرض اثرات نامطلوب آن بر سلامتی، از جمله افزایش خطرات سرطان، بیماری‌های قلبی عروقی و دیابت، ضایعات پوستی، اثرات عصبی، آسیب کلیوی و رشد جنین یا شناختی قرار دارند [۱].

آب آشامیدنی آلوده، منبع اصلی در معرض قرار گرفتن آرسنیک است. آرسنیک در آب‌های زیرزمینی چندین کشور وجود دارد و از این آب آلوده برای آبیاری، آشامیدن و تهیه غذا استفاده می‌شود که بزرگترین تهدید برای سلامت عمومی است. کشورهای بنگلادش، هند (بنگال غربی)، چین، تایوان، تایلند، شیلی، آرژانتین و رومانی از مناطقی هستند که بیشترین تاثیر را از آلاینده‌گی آرسنیک داشته‌اند (شکل ۱). کشور ایران نیز با توجه به منابع آلاینده فراوان طبیعی بشرزاد تاثیرات بسیار قابل توجهی را از آلاینده‌گی آرسنیک داشته است. آرسنیک بسیار سمی است و در



چهارمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک و محیط زیست

است که سن آن کرتاسه زیرین می‌باشد. کوه چهل دختر که در جنوب کوه زرنیخ قرار دارد یک توده نفوذی دیوریتی است. منطقه مورد مطالعه در حاشیه زون فرورانش و محل برخورد دو زون ساختاری بلوک لوت و سبزواری و در بین دو گسل ریوش و درونه قرار گرفته است به عبارتی گسل ریوش زون سبزواری را از بلوک تکنار جدا کرده است. گسل ریوش مهم‌ترین گسل این منطقه می‌باشد. به صورت کلی منطقه مورد بررسی بخشی از توالی‌های افیولیتی می‌باشد که مربوط به اواخر کرتاسه است و همچنین این توالی‌های افیولیتی از دیگر بخش‌ها قابل تفکیک است. کوه زرنیخ از لیتیک آرکوز ریزدانه قرمز خاکستری تا تیره بامیان لایه‌های توف شیشه‌ای، مقدار کمی مارن و سیلستون ریزدانه قرمز تشکیل شده است و به شکل ناپیوستگی دگرشیبی دارای ماسه‌سنگ توفی نازک لایه تا متوسط لایه خاکستری سبزرنگ بامیان لایه‌هایی از سیلستون سبز روشن که دارای دانه‌بندی یکنواخت با فرسایش شیلی مدادی شکل، تشکیل شده است.

در کوه زرنیخ، کانی‌سازی آنتیموان و زرنیخ هم‌روند با راستای گسل‌ها مشاهده می‌شود که تحت تأثیر سیال‌های گرمابی بوجود آمده اند. کانی‌سازی در این منطقه بیشتر به شکل رگه و رگچه‌های کوچک و استوک ورک می‌باشد. مهم‌ترین کانی‌ها در این منطقه رالگار (As_4S_4)، استیبنیت (Sb_2S_3)، اریپمنت (As_2S_3)، ژپیس، پیریت (FeS_2) و کوارتز می‌باشند. علاوه بر این کانی‌ها، دو کانی آلونیت و ژاروسیت به همراه مونتموریلونیت و کائولینیت که کانی‌های رسی می‌باشند شاخص دگرسانی گرمابی و کانی‌سازی اپی‌ترمال هستند.

شکل‌های غیر آلی آرسنیک به‌طور عمده به شکل آرسنیت و آرسنات وجود دارد که فراوانی آن به پتانسیل ردوکس، آهن، اکسید منگنز و pH بستگی دارد [۶]. در pH های بین ۶/۵ تا ۸/۵ بیشترین فراوانی آرسنیک مشاهده می‌شود. دو فرم غالب آرسنیت ($As(III)$) و آرسنات ($As(V)$) که گونه‌های غیرآلی آرسنیک هستند، سمی‌تر و متحرک‌تر از گونه‌های آلی آرسنیک می‌باشند [۷]. سمیت آرسنیک با ظرفیت $3+$ ، ۷۰ برابر بیشتر از شکل‌های دیگر آرسنیک آلی و ۱۰ برابر بیشتر از $As(V)$ می‌باشد [۸].

با توجه به منابع آلاینده فراوان طبیعی زمین زاد و بشرزاد در کشور ایران، آلاینده‌های آرسنیک به عنوان یک مشکل جدی ملی محسوب می‌شود. در منطقه مورد مطالعه (کوهسرخ)، با وجود منابع طبیعی، آلاینده‌های آرسنیک یک مشکل منطقه‌ای است که منابع طبیعی منطقه از جمله آب و خاک منطقه را آلوده و برای محیط زیست و سلامت عمومی ساکنین، وضعیت خطرناکی ایجاد نموده است. از آنجا که تشخیص آلاینده‌های مناطق آلوده، راه‌های پیشگیری مؤثر، استراتژی‌های کاهش و حذف آرسنیک در منطقه کوهسرخ، ضروری است، در این مطالعه، راه‌های چگونگی کنترل و پیشگیری از آلودگی منطقه، مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱) رخدادهای جهانی آرسنیک در کشورهای با مناطق عمده با غلظت آرسنیک بالاتر از $10 \mu g/L$ [۹]

۲) زمین‌شناسی و موقعیت منطقه:

منطقه مورد مطالعه در ۳۵ کیلومتری شمال کاشمر و ۱۵ کیلومتری شمال ریوش قرار دارد. منطقه مورد مطالعه چندین روستا در دهستان کوهسرخ شهرستان کاشمر را پوشش می‌دهد. بلندترین ارتفاعات منطقه مورد مطالعه را کوه تولا تشکیل داده



چهارمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک و محیط زیست

قابل اعتماد برای تشخیص آرسنیک وجود دارد. از روش‌های متعدد تشخیص آرسنیک، روش‌های دستگاه طیف‌سنجی جذب اتمی (AAS)، طیف‌سنجی جذب اتمی با کوره گرافیتی و روش پلاسمای جفت شده القایی- اسپکترومتری (ICP- OES)، مورد استفاده قرار گرفتند که قادر به تشخیص آرسنیک در غلظت‌های کمتر از حد توصیه‌شده سازمان بهداشت جهانی (۱۰ میکروگرم در لیتر) هستند.

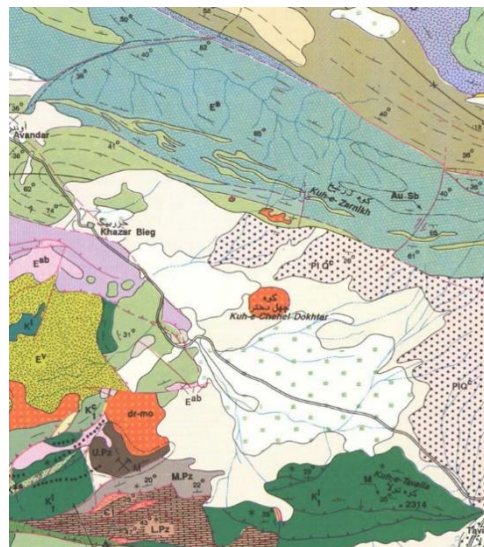
۳-۱-۱) روش طیف‌سنجی جذب اتمی (AAS) و طیف‌سنجی جذب اتمی با کوره گرافیتی (GF):

طیف‌سنجی جذب اتمی روشی اسپکتروسکوپی است که با استفاده از جذب پرتو نوری توسط اتم در حالت گازی میزان کمی عنصرهای شیمیایی را اندازه‌گیری می‌کند. طیف‌سنج جذب اتمی برای تعیین مقادیر بیشتر عناصر جدول تناوبی استفاده می‌گردد که البته حد تشخیص این دستگاه برای تمام عناصر یکسان نیست. این دستگاه بیشتر برای ۳۰ عنصر با حد تشخیص مناسب استفاده می‌گردد. از دستگاه جذب اتمی مجهز به کوره گرافیتی نیز برای تشخیص غلظت‌هایی در حد ppb استفاده می‌گردد. روش جذب اتمی با کوره گرافیتی از قدیمی‌ترین روش‌های شناسایی آرسنیک می‌باشد که بر اساس جذب تشعشع الکترومغناطیس در طول موج‌های بالا، اتم آرسنیک تولیدشده از نمونه، در یک لوله گرافیتی می‌باشد.

۳-۱-۲) روش پلاسمای جفت شده القایی- اسپکترومتری نوری (ICP-OES):

یکی از روش‌های طیف‌سنجی اتمی محسوب می‌شود که در آن اتمی شدن عناصر در محیط گرم پلاسمای انجام می‌گیرد و پس از آن توسط طیف‌سنج جرمی (MS) و یا طیف‌سنج انتشاری (OES) قابل کمی سازی و آشکارسازی می‌باشد. کاربردهای طیف‌سنج انتشاری (OES) شامل: ۱) تعیین درصد و نوع عناصر موجود در محلول، ۲) شناسایی بیش از ۶۰ عنصر، ۳) سرعت بالاتر و هزینه کمتر نسبت به ICP-MS، ۴) دارای سیستم تغییر اتوماتیک پارامترها برای نتیجه بهتر.

۴) نتایج:



شکل ۲) زمین شناسی محدوده کوه زرنیک [۱۰]

۳) مواد و روش‌ها:

نمونه‌های آب در بطری‌های پلاستیکی ۱ لیتری (هر نمونه یک بطری) برداشت شد، بطری‌ها ۳ بار با همان آب برداشت‌شده، شستشو داده شدند. نمونه‌هایی را که برای آنالیز ICP مورد نیاز بود با استفاده از سرنگ گاواژ در فالكون‌های 50 cc ریخته شد و به هر نمونه به ازای هر 50cc، 1cc اسید نیتریک خالص افزوده شد و تا زمان آنالیز در دمای ۴ °C نگهداری شد. هدایت الکتریکی (Ec) با استفاده از دستگاه هدایت الکتریکی سنج، اسیدیته (pH) با پی‌اچ متر و درجه حرارت (T) نیز در محل اندازه‌گیری شدند. نمونه برداری به روش تصادفی (random)، از سنگ‌ها و خاک‌های منطقه انجام گردید. نمونه‌های سنگی پس از خردایش، نرمایش و الک، برای انجام آنالیزها آماده گردیدند.

۳-۱) روش‌های تشخیص آرسنیک:

حصول اطمینان از شناسایی دقیق نوع آلاینده، تعیین مقادیر و گونه آرسنیک در ایجاد استانداردهای ایمنی برای آب آشامیدنی و انتخاب فن‌آوری‌های مناسب حذف آرسنیک، در کنار اجرای اقدامات کاهش موثر آرسنیک در آب‌های منطقه، اهمیت بالایی دارند؛ بنابراین، برای نیل به این اهداف، نیاز روزافزونی به روش‌های



چهارمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک و محیط زیست

جدول (۱) میزان pH و Ec در نمونه‌های آب (برحسب میکروزیمنس بر سانتی‌متر)

نمونه	میزان هدایت الکتریکی (Ec)	دما (T)	اسیدیته (pH)
W ₁	۱۱۴۱	۱۴/۴	۷/۸
W ₂	۷۴۵	۱۳	۸/۵
W ₃	۴۵۰	۱۰/۴	۸
*W ₄	۴۱۰۰	۲۱	۸
*W ₅	۷۲۰	۱۹	۹/۱
*W ₆	۳۶۰۰	۱۶	۷/۲
*W ₇	۳۴۰۰	۱۸	۶/۳
*W ₈	۳۴۰۰	۱۹	۸/۲

گرچه pH نمونه‌ها، عمدتاً در محدوده خنثی می‌باشند اما گاهی بالاتر از حد خنثی و در محدوده قلیایی هستند (جدول ۱). pH آب‌های منطقه، از حالت تقریباً اسیدی (۶/۳) در نمونه W₈ تا خنثی (نمونه W₄) و حتی قلیایی (۹/۱) در نمونه W₆، تغییر می‌کند. Ec منطقه هم‌نوسان بسیار بالایی دارد به گونه‌ای که از مقدار ۴۵۰ در نمونه W₃ تا ۳۶۰۰ در نمونه W₇، تغییر می‌کند. نتایج بدست آمده از آنالیزهای ICP آب نشان داد که در نمونه W₃ میزان آرسنیک، آهن و منگنز نسبت به نمونه‌های دیگر بالاتر می‌باشند. حد مجاز برای آرسنیک در آب ۱۰)10ppb میکروگرم برلیتر (WHO) است و در ایران حد مجاز 50ppb (۵۰ میکروگرم بر لیتر) که در نمونه‌های منطقه بسیار بالاتر از حد مجاز است (جدول‌های ۲ و ۳). نتایج آنالیزهای آب و خاک و نیز لیتولوژی منطقه مورد مطالعه نشان داد که آلودگی آرسنیک در منطقه، نتیجه فرایندهای زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی حاکم بر محیط می‌باشند. به عبارت دیگر، منشأ زمین زاد (Geogenic sources) دارند و در این منطقه، آرسنیک بدون دخالت مستقیم انسان، در محیط آزاد می‌شود.

جدول (۲) غلظت عناصر موجود در آب (مقادیر برحسب میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد (PPM)).

این مطالعه												عنصر
W ₁₂	W ₁₁	W ₁₀	W ₉	*W ₈	*W ₇	*W ₆	*W ₅	*W ₄	W ₃	W ₂	W ₁	
0/313	1/012	86/574	-	0/108	0/01	0/308	0/005	0/002	78/63	-	0/009	As
0/435	0/137	4/368	0/027	0/065	-	-	0/762	-	0/507	0/057	0/234	Fe
-	-	0/093	-	0/177	0/355	0/549	0/0005	0/15	-	-	-	Sb
-	-	-	-	0/0007	-	-	-	-	-	-	-	Pb
0/048	0/018	0/494	-	0/004	-	-	-	-	0/204	0/005	0/013	Mn
-	-	0/191	-	0/0019	-	0/017	0/002	-	-	-	-	Ni
0/014	0/014	0/167	-	0/0021	-	-	-	0/001	-	0/004	-	Zn
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Hg
0/011	0/005	0/021	0/004	0/005	-	-	-	0/002	-	-	-	Cu
-	-	-	-	-	0/417	0/308	0/3293	-	-	-	-	Cd
0/004	-	0/021	-	0/0029	-	-	-	0/002	-	-	-	Co
-	-	0/012	-	0/0005	-	0/018	-	-	-	-	-	Cr

*[۱۱]



چهارمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک و محیط زیست

جدول ۳) غلظت عناصر موجود در سنگ و رسوبات آب (مقادیر برحسب میلی گرم بر لیتر می باشد). مقدار آهن برحسب درصد ولی مقدار بقیه عناصر برحسب PPM می باشد.

این مطالعه							عنصر
**R ₇	**R ₆	**R ₅	*R ₄	*R ₃	*R ₂	*R ₁	
268/2	187/8	129	12020	254	2889	27/74	As
2/89	2/86	3/04	-	-	-	-	Fe%
1/13	0/76	0/61	47/41	-	0/67	0/93	Sb
10/05	7/53	7/08	-	2/34	-	-	Pb
798	753	787	1046	902	1061	1114	Mn
181	200/5	233/1	538	593	588	64/70	Ni
55	56/5	58/2	47/41	63/25	58/74	54/98	Zn
0/035	0/052	0/048	-	-	-	-	Hg
52/95	49/48	50/35	43/35	42/89	33/94	22/38	Cu
0/15	0/16	0/16	107	2/79	25/52	0/54	Cd
21/6	200/5	24/1	39/75	50/19	41/51	15/53	Co
94/8	102/3	124/9	617	345	395	48/22	Cr

* [۱۱]

** [۱۲]

۵) منشأ آلاینده‌گی آرسنیک منطقه مورد مطالعه:

آلودگی آرسنیک زمین زاد (ژئوژنیک) چالش مهمی در منطقه است، زیرا جهت دستیابی به آب آشامیدنی، به شدت به آب‌های زیرزمینی متکی هستند. چند مؤلفه اصلی که در منطقه مورد مطالعه، با منشأ زمین زاد ارتباط مستقیم دارند، عبارتند از:

۵-۱) تنوع زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی منطقه

مقادیر متفاوت آرسنیک در آب‌های زیرزمینی، تنوع زمین‌شناسی منطقه را نشان می‌دهد، به‌طوری‌که مناطق خاصی، بیشتر در معرض آلودگی طبیعی آرسنیک هستند. عمده رخنمون‌های سنگی محدوده اکتشافی، سنگ‌های آذرین مرتبط با رخدادهای ماگمایی مختلف و ترکیبات گوناگون می‌باشند. با این وجود، مشخصه بارز منطقه، فعالیت‌های ماگمایی ترسیر می‌باشند. توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی، رخنمون‌های قابل توجهی در منطقه دارند که تشکیلات قدیمی‌تر را قطع نموده‌اند؛ اما

گسترده‌ترین رخنمون‌های سنگی مرتبط با فعالیت‌های آتش‌فشانی ترسیر می‌باشد که از ائوسن زیرین آغاز و تا ائوسن بالایی ادامه داشته است. این فعالیت‌ها با خروج گدازه‌های آندزیت بازالتی آغاز و تا حد لایتیت و داسیت نیز تغییر ترکیب نشان می‌دهند.

در منطقه رخنمون‌های زیادی از توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی وجود دارند که تشکیلات قدیمی‌تر را قطع و در آن‌ها هاله‌های دگرگونی ایجاد کرده‌اند. چند فازی بودن سنگ‌های آذرین منطقه، ترکیبی از گرانودیوریت تا دیوریت را نشان می‌دهند. رشته‌کوه‌های اصلی منطقه توسط مجموعه‌ای از سنگ‌های پیروکلاستیک تشکیل شده‌اند. این کمپلکس میزبان کانی‌سازی در منطقه نیز می‌باشد. دگرسانی‌های حاصل از محلول‌های گرمایی (هیدروترمال) را در گستره سنگ‌های منطقه می‌توان مشاهده کرد [۱۳]. از آثار این دگرسانی، دگرسانی‌های متداول پروپیلیتی، کلریتی، سریسیتی و کربناتی شدن می‌باشند. در بیشتر نمونه‌های



چهارمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک و محیط زیست

تشکیل می‌دهند. ۲) دشت: دشت مهم منطقه، دشت ریوش می- باشد: این دشت توسط مناطق کوهستانی اطراف، احاطه شده است.

۴-۵) کانسارسازی و فعالیت‌های گرمابی در منطقه:

تکاپوهای شدید ماگمایی که به صورت سنگ آتشفشانی آندزیتی - داسیتی و سنگ پیروکلاستیک (به طور عمده توف) و سنگ گرانیتوئیدی رخمون یافته از یک طرف و وجود درزه‌ها و گسل پرشمار از سوی دیگر، شرایطی مناسب برای عملکرد محلول‌های گرمابی و کانه‌سازی پدید آورده است. اکتشافات ژئوشیمیائی منجر به کشف آنومالی‌های فراوان، از عناصر فلزی، به ویژه فلزات گران‌بهای طلا و نقره در این ناحیه شده است [۱۴]. سنگ‌های آتشفشانی ائوسن (به ویژه آندزیت‌ها و داسیت‌ها) میزبان رگه‌ها و رگچه‌های سیلیسی و برش‌های گرمابی مس‌دار و طلا‌دار می‌باشند. کانی‌های اولیه شامل پیریت، کالکوپریت، کالکوسیت، اولیژیست و کانی‌های ثانویه شامل کالکوسیت، کوولیت، مالاکیت، گوتیت، همتیت و لیمونیت می‌باشند [۱۵].

کانسارسازی و فعالیت‌های گرمابی در منطقه موجب تشکیل برخی کانی‌ها از جمله رالگار (AsS) و اریپمنت (As_2S_3) در منطقه کوه زرنیخ شده است. در ترکیب شیمیایی اریپمنت، ۶۰/۹۰٪ و در ترکیب شیمیایی رالگار، ۷۰/۰۳٪ آرسنیک وجود دارد. مقادیر بسیار بالای آرسنیک، در این کانی‌ها می‌تواند منبع اصلی تأمین آرسنیک در منطقه محسوب شود.

آتشفشانی و نفوذی آلتزه شده، کانی‌های ثانویه، سریسیت، کلریت، اپیدوت و کانی‌های رسی، معمول می‌باشند.

لیتولوژی منطقه شامل سنگ‌های آذرآواری با سن ائوسن پایین می‌باشد و شامل لاتیت آندزیت، تراکی آندزیت، تراکی بازالت، ریولیت، آگلومرا، توف با میان لایه‌هایی از شیل می‌باشند. همچنین آثار دگرسانی نسبتاً گسترده در سنگ‌های منطقه دیده می‌شود که دگرسانی‌ها غالب در منطقه از نوع پروپیلیتی و آرژیلیتی و سریسیتی‌شدن می‌باشند.

۲-۵) عوامل هیدروژئولوژیکی:

شرایط هیدروژئولوژیکی (pH, Ec) و نوع سفره‌های زیرزمینی، نقش مهمی در انحلال و آزادشدن آرسنیک در آب‌های زیرزمینی منطقه ایفا می‌کنند. pH آب‌های منطقه، از حالت تقریباً اسیدی ($6/3$) در نمونه W_8 ، تا خنثی (نمونه W_4) و حتی قلیایی ($9/1$) در نمونه W_6 ، تغییر می‌کند. Ec منطقه هم، نوسان بسیار بالایی دارد به گونه‌ای که از مقدار 450 در نمونه W_3 ، تا 3600 در نمونه W_7 ، تغییر می‌کند.

۳-۵) ژئومورفولوژی خاص منطقه:

توپوگرافی منطقه بسیار متغیر است به گونه‌ای که مناطق کوهستانی مرتفع، دشت‌ها و دره‌های فراوانی در منطقه وجود دارند. علاوه بر این، زمین‌ریخت‌شناسی (ژئومورفولوژی) خاص منطقه، موجب توپوگرافی متفاوت در بسیاری از مناطق شده است که همگی نقش مهمی در حرکت آرسنیک آزاد شده و ورود آن، در آب‌های زیرزمینی منطقه به طرف منابع تأمین سفره‌های آب‌های زیرزمینی، ایفا می‌کنند.

به طور کلی شهرستان کوهسرخ به لحاظ پستی بلندی به دو منطقه متمایز قابل تقسیم است: ۱) منطقه‌ی کوهستانی یا ارتفاعات کوه سرخ: این کوه‌ها از شمال شرق خلیل‌آباد شروع و ادامه این ارتفاعات از شمال تربت‌حیدریه می‌گذرد. بلندترین قله در کوه سرخ «باغ دشت» به ارتفاع 2484 متر است. در ناحیه مذکور سنگ‌های گرانیتوئیدی و آتشفشانی، واحدهای مرتفع‌تری را



چهارمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک و محیط زیست

پر شمار، شرایط مناسبی برای عملکرد محلول‌های گرمایی و کانه-سازی رالگار (AsS) و اریپمنت (As₂S₃) در منطقه، پدید آورده است.

۶) روش‌های حذف آرسنیک در منطقه:

روش‌های مختلف حذف آرسنیک، برای مبارزه با آلودگی آرسنیک در منابع آبی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. روش‌های مرسوم مانند انعقاد-لخته‌سازی (coagulation-flocculation) و فیلتراسیون به‌طور مؤثر می‌توانند آرسنیک را حذف می‌کنند [۱۷]. در حوزه نوآوری، از فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOP) از برهمکنش‌های شیمیایی برای تجزیه ترکیبات آرسنیک استفاده می‌کنند، درحالی‌که روش‌های مبتنی بر فناوری نانو از نانوساختارها برای جذب کارآمد آرسنیک استفاده می‌کنند. سیستم‌های هیبریدی، که تکنیک‌های متعدد را با هم ترکیب می‌کنند، برای افزایش راندمان حذف آرسنیک در حال افزایش هستند. اگرچه روش‌های جدید مزایای بالقوه‌ای دارند، تحقیقات مداوم و کاربرد عملی آن‌ها برای تأیید مقیاس عمل، مقرون‌به‌صرفه بودن و قابلیت اطمینان طولانی‌مدت، در تضمین دسترسی به آب آشامیدنی سالم، برای جوامع آسیب‌دیده ضروری است [۱۸].

برای حذف آرسنیک در منطقه کوهسرخ، نیاز روزافزونی به روش‌های سریع، قابل اعتماد، قابل حمل و مقرون‌به‌صرفه، برای حذف کارآمد آرسنیک ضروری است؛ بنابراین، رویکردهای نوآورانه، مانند استفاده از نانومواد یا فیلترهای جاذب آرسنیک در این مطالعه طراحی و پیشنهاد شده‌اند. از مزایای این طرح این است که برای اولین بار، از سازندهای زمین‌شناسی موجود در منطقه، جهت حذف آرسنیک استفاده شده است. استفاده از مخلوطی از شیل‌های قرمز موجود در منطقه (کوهسرخ) با پلاسماهای آهن (Zero-valent iron) منطقه ده میان - عطائیه و رس‌های جاذب موجود در منطقه، برای حذف کارآمد آرسنیک از آب‌های آشامیدنی منطقه، علاوه بر مقرون‌به‌صرفه بودن، قابلیت اطمینان طولانی‌مدت



شکل ۳) مورفولوژی عمومی منطقه مورد مطالعه. بالا، موقعیت کوه زرنیک در منطقه، پایین) مورفولوژی کوه زرنیک.

۵-۵) نقش عوامل تکتونیکی و ساختاری منطقه:

منطقه اکتشافی از لحاظ تکتونیکی، تحت تأثیر دو گسل درونه در جنوب و ریوش در شمال قرار دارد که مهم‌ترین عوامل مؤثر در شکل‌گیری ساختارها، گسل‌ها و نیز بالا بودن معدنی منطقه می‌باشند. با توجه به کانه‌زایی اپی‌ترمال و دگرسانی‌های وابسته، به‌ویژه از نوع آرژلیک پیشرفته و آلونیت‌زایی و وجود آغشتگی‌های آلونیتی - ژاروسیتی در منطقه، می‌توان زایش طلا در منطقه را توجیه کرد [۱۶]. بررسی سیستم‌های گسلی و عملکرد آن‌ها در منطقه نشان داده است که وجود گسل‌های فراوان و درزه‌های



چهارمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک و محیط زیست

Y.S., Rinklebe, J. (2016). Exploring the arsenic removal potential of various biosorbents from water. *Enviroment International* 123, 567-579
[9] Larios, R., Fernandez-Martinez, R., LeHecho, I. and Rucandio, I. (2012). A methodological approach to evaluate arsenic speciation and bioaccumulation in different plant species from two highly polluted mining areas. *Science of the Total Environment*, 414, 600-607

[۱۰] نادری میقان، ن. (۱۳۷۷) نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شامکان، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

[۱۱] گازرانی، ش. (۱۳۹۱) بررسی آلودگی و اثرات زیست محیطی ناشی از آرسنیک در آبرفت های منطقه کلاته چوبک واقع در شمال کاشمر، زمینه ای برای پژوهش های ایمنی شناسی سلولی-مولکولی در گوسفندان منطقه، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی

[۱۲] طبسی، س. (۱۳۸۹) مطالعات کانی شناسی و ژئوشیمیایی رسوبات مناطق آلوده به آرسنیک کوهسرخ کاشمر: با نگرشی بر زمین شناسی پزشکی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود

[۱۳] طاهری و شمانیان (۲۰۰۱) نقشه زمین‌شناسی 1:100000 کاشمر، سازمان زمین‌شناسی کشور. فهرست خدمات مراحل چهارگانه اکتشاف آهن و مس، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور.

[۱۴] افتخارنژاد، حمزه پور، آقابیاتی (۱۳۵۵) نقشه زمین‌شناسی 1:250,000 کاشمر سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

[۱۵] امینی، ا؛ و علی پور اصل، م. (۱۳۹۴)، کنگره بین‌المللی تخصصی علوم زمین، پرتال سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (ایمیدرو).

[۱۶] کمیجانی، ل.، لطفی، م؛ و رسا، ا. (۱۳۹۰) بررسی زمین‌شناسی و کانه زایی طلا و مس و عناصر وابسته در منطقه چشمه نقره - غرب ریوش، کاشمر، استان خراسان رضوی. دوره ۶، شماره ۲۲، صفحات ۱۹۳-۲۰۲.

[17] Rahidul Hassan, H. (2023) A review on different arsenic removal techniques used for decontamination of drinking water. *Environ. Pollut. Bioavailab.* 35

[18] Rajakovic, L.; Rajakovic-Ognjanovic, V. (2018) Arsenic in water: Determination and removal. In *Arsenic: Analytical Toxicological* IntechOpen: Rijeka, Croatia, pp. 9-24. Studies;

مردم در تضمین دسترسی به آب آشامیدنی سالم، برای منطقه کوهسرخ به‌ویژه نواحی آسیب‌دیده، را ضروری ساخته است.
نتیجه‌گیری:

آلاینده‌های فلزات سنگین و شبه فلزات سمی به خصوص آرسنیک به جهت دستیابی به آب آشامیدنی از مشکلات مهم منطقه کوهسرخ واقع در ۳۵ کیلومتری شهرستان کاشمر می‌باشد. آلودگی در این منطقه زمین زاد می‌باشد که به علت‌های فراوانی نظیر عوامل هیدروژئولوژیکی، ژئومورفولوژی، کانسارسازی و فعالیت گرمایی، عوامل تکتونیکی و تنوع سنگ‌شناسی میزان آن در نقاط مختلف منطقه تغییر پیدا می‌کند. کانی‌های اورپیمنت و رالگار می‌تواند منبع اصلی آرسنیک باشد. برای حذف آرسنیک می‌توان از منابع قرضه منطقه مانند پلاسره‌های واقع در منطقه ده‌میان-عطائیه و رس‌های جاذب استفاده کرد.

مراجع

[1] Bhat, A., Ravi, K., Tian, F., Singh, B. M. (2024) Arsenic Contamination Needs Serious Attention: An Opinion and Global Scenario. *Polluted* 4, 196-211

[2] Yadav, M. K.; Saidulu, D.; Gupta, A. K.; Ghosal, P. S.; Mukherjee, A. (2021) Status and management of arsenic pollution in groundwater: A comprehensive appraisal of recent global scenario, human health impacts, sustainable field-scale treatment technologies. *J. Environ. Chem. Eng.* 9, 105203

[3] Ungureanu, G., Santoa, S., Boaventura, R. and Botelho, C. (2015) Arsenic and antimony in water and wastewater: Overview of removal techniques with special reference to latest advances in adsorption. *Journal of Environmental Management*, 151, 326-234

[4] Mandal, B. K. and Suzuki, K. T. (2002) Arsenic round the world: A review. *Talanta* 58, 201-235

[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, 517-568

[6] Shih, M. C., (2005), An overview of arsenic removal by pressure-driven membrane processes In: *Arsenic: environmental chemistry, health threats, and waste treatment*, (Henke, K. R., Ed.), Wiley, United Kingdom, 85-97.

[7] Wang, Y., Li, P., Jang, Z., Liu, H., Wei, D., Wang, H., Wang, Y. (2018) Diversity and abundance of arsenic methylating microorganisms in high arsenic groundwater from Hetao Plain of Inner Mongolia, China. In *Ecotoxicology* 27: 1047-1057

[8] Shakoor, M. B., Niazi, N. K., Bibi, I., Shahid, M., Saqib, Z. A., Nawaz, M. F., Shaheen, S. M., Wang, H., Tsang, D. C. W., Bundschuh, J., Ok,