



منشأ آلاینده‌گی فلزات سنگین و شبه فلزات سمی محدوده کوه زرنیخ ریوش

فاطمه عبداللهی، دکتر مرتضی رزم‌آرا فرزقی

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

عضو هیئت علمی دانشگاه فردوسی مشهد، razmaramorteza@gmail.com

چکیده

منطقه مورد مطالعه در ۳۵ کیلومتری شمال کاشمر، ۱۵ کیلومتری ریوش و ۲۲۰ کیلومتری جنوب غربی مشهد قرار دارد. مطالعات بر روی آب، خاک، سنگ و رسوبات منطقه نشان داده است که این منابع آلودگی شدید به فلزات سنگین (Cr) و شبه فلزات سمی به‌ویژه آرسنیک و آنتیموان را دارا می‌باشند. غلظت آرسنیک و آنتیموان در منابع آب‌و خاک منطقه بسیار بیشتر از حد مجاز استاندارد (برای آرسنیک $10 \mu\text{g/L}$ و آنتیموان $20 \mu\text{g/L}$) است.

نتایج مطالعات نشان داد که سنگ‌های اولترامافیک (پریدوتیت، هارزبورگیت و لرزولیت) به‌شدت سرپتینی شده، از منابع اصلی آلودگی کروم در منطقه هستند. فرآیندهای دگرسانی و تکتونیکی بر روی این سنگ‌ها، منجر به آزاد شدن کروم در محیط‌زیست شده‌اند. منشأ آلاینده‌گی کروم، کانی‌های کرومیت و گروه اسپینل هستند که در طی فرآیندهای دگرسانی، کروم آزاد می‌کنند.

منشأ شبه فلزات سمی در محدوده مورد مطالعه محلول‌های گرمابی هستند. محلول‌های گرمابی مرتبط با توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی، باعث دگرسانی و ایجاد شرایط مناسب برای کانی‌سازی آرسنیک و آنتیموان شده‌اند. منشأ آرسنیک در محدوده کوه زرنیخ ریوش مرتبط با کانی‌های سولفیدی مانند رآلگار (As_4S_4) و ارپیمنت (As_2S_3) می‌باشد. که موجب آلودگی آرسنیک در خاک‌ها و آب‌های منطقه شده‌اند.

آلودگی کادمیوم در خاک‌ها و آب‌های منطقه کوهسرخ ناشی از کانی‌های سولفیدی مانند گالن، اسفالریت و پیریت اما آلودگی آنتیموان مرتبط با کانی‌های سولفیدی مانند استیبینیت (Sb_2S_3)، می‌باشد.

واژه‌های کلیدی

آرسنیک، زرنیخ، کوهسرخ، ICP-OES، آنتیموان

مقدمه

آرسنیک، به‌عنوان یکی از آلاینده‌های عمده محیط‌زیست، یک چالشی جهانی و جدی به شمار می‌رود. قرار گرفتن در معرض این ماده، پیامدهای زیان‌بار شدیدی بر سلامت انسان و دیگر موجودات زنده در اکوسیستم دارد. حدود ۱۰۶ کشور در سراسر جهان با مشکل آلودگی منابع آب زیرزمینی به آرسنیک مواجه هستند. برآورد می‌شود که ۲۳۰ میلیون نفر در جهان در معرض عوارض نامطلوب آن بر سلامتی قرار دارند. این عوارض شامل افزایش احتمال ابتلا به سرطان، بیماری‌های قلبی-عروقی، دیابت، مشکلات پوستی، اختلالات عصبی، آسیب به کلیه‌ها و اثرات منفی بر رشد جنین و توانایی‌های شناختی می‌شود (Bhat et al., 2024). تاکنون ۷۶۳ گونه کانی حاوی آرسنیک شناسایی شده‌اند. این عنصر به‌طور معمول در کانی‌هایی مانند آرسنوپیریت، اریپمنت و رآلگار وجود دارد (Thomas, et al 2007). عنصر آرسنیک وضعیت‌های اکسایش متفاوتی نظیر $As(0)$, $As(-III)$, $As(V)$ و $As(III)$ دارد (Yadav et al., 2021)، که شایع‌ترین آن آرسنیت $As(III)$ و آرسنات $As(V)$ است که در آب‌های طبیعی معمول است (Ungureanu et al., 2015). اغلب در آب‌های اکسایشی آرسنیک به‌صورت آرسنات و در آب‌های احیایی به‌صورت آرسنیت می‌باشد آرسنیت ۷۰ برابر بیشتر از انواع دیگر آرسنیک و ۱۰ برابر بیشتر از آرسنات سمی می‌باشد (Larios et al., 2012).

کروم، به‌عنوان بیست و یکمین عنصر در پوسته زمین یکی از فلزات سنگین، محسوب می‌شود (Shekhawat et al. 2015). کروم در محیط در وضعیت‌های اکسایش مختلفی مانند $Cr(III)$, $Cr(0)$ و $Cr(VI)$ یافت شده است. در میان آن‌ها، کروم سه‌ظرفیتی و شش ظرفیتی پایدارترین اشکال هستند. به‌طور قابل‌توجهی، $Cr(VI)$ به دلیل حلالیت و تحرک بالای خود اغلب سمی‌تر از $Cr(III)$ است (Hossini et al., 2022).

کادمیوم، یک فلز سنگین طبیعی است که با خواص شیمیایی منحصربه‌فرد و ماهیت دوگانه آن به‌عنوان یک ماده صنعتی مهم و یک ماده سمی قوی محیطی است. عدد اتمی کادمیوم ۴۸ است و عمدتاً در حالت اکسیداسیون ۲+ است و مقاومت در برابر خوردگی، شکل‌پذیری و هدایت الکتریکی عالی را نشان می‌دهد (Vijiyakumar et al., 2024).

سمیت آنتیموان به میزان زیادی به نوع شیمیایی آن بستگی دارد؛ به‌طوری‌که گونه‌های معدنی آنتیموان نسبت به گونه‌های آلی آن سمی‌تر هستند (Tisarum et al., 2015). گونه‌های کانی می‌توانند وضعیت‌های اکسایشی مختلفی (V , III , 0 , $-III$) داشته باشند، اما در محیط‌زیست و نمونه‌های بیولوژیکی و ژئوشیمیایی عمدتاً با دو وضعیت اکسایشی (V , III) یافت می‌شوند (Filella et al., 2002). فراوانی آنتیموان در پوسته زمین بین 0.2 تا 0.3 mg/kg است و غلظت آن در خاک‌ها بیشتر از مواد مادری می‌باشد. در خاک‌های غیر آلوده، غلظت آن بین 0.3 تا $8/4$ mg/kg است (Alloway, 2012). کلسیت، ژپس، مارکاسیت، استینیت، رآلگار، طلا، اکسیدهای آهن، کوارتز و اریپمنت کانی‌هایی هستند که در منطقه شناسایی شده است همچنین مگنتیت، سروزیت، سینابار، شلیت، استفانیت و پیرارژیریت کانی‌هایی هستند که توسط آنالیز XRD شناسایی شدند (خاکراه و همکاران، ۱۳۸۹).

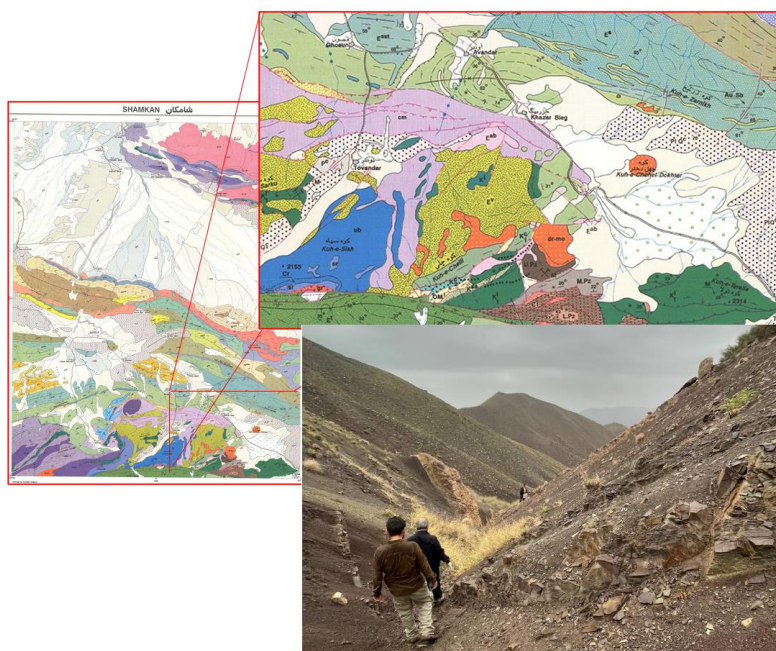
تحقیقات متعددی به علت اهمیت آلودگی فلزات سنگین به‌ویژه آرسنیک در منطقه کوهسرخ انجام گردیده است. بابایی و همکاران (۱۳۸۷)، آلودگی آب‌های سطحی منطقه کوهسرخ را مورد بررسی قرار دادند که به این نتیجه رسیدند که لایه‌های آرسنیک دار در قسمت بالایی پوسته زمین بوده است و آب با عبور از این مناطق آرسنیک، را در خود حل می‌کند و هرچه از منبع دورتر می‌شویم به علت تغییر شرایط مقداری از آرسنیک محلول به شکل نامحلول تبدیل شده و رسوب می‌کند. خاکراه و همکاران (۱۳۸۹)، تشکیل کانسار آنتیموان را در منطقه چلپو-کلاته چوبک بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که گسل‌های منطقه، سنگ‌شناسی منطقه مانند توده‌های نفوذی نیمه عمیق، کانی‌شناسی و پاراژنز و انواع دگرسانی باعث تشکیل کانسار آنتیموان گردیده است. تحقیقات گازرانی و همکاران (۱۳۹۰)، بر روی منابع آب روستای خضریگ، میزان شدید آرسنیک به رگه‌های

هیدروترمال موجود در منطقه نسبت داده شد. سلیمانی و همکاران (۱۳۹۱)، در پژوهشی از منطقه غرب کوهسرخ نشان دادند که ۷۰٪ منابع آب روستاهای این منطقه غیرقابل شرب است.

باوجود تحقیقات متعددی که تاکنون بر روی منابع آلاینده منطقه صورت گرفته است، منشأ آلاینده‌های فلزات سنگین و شبه فلزات سمناک، همچنان در ابهام باقی‌مانده است. این پژوهش در راستای، مشخص نمودن منشأ آلاینده‌های فلزات سنگین شبه فلزات آرسنیک، آنتیموان و کادمیوم صورت گرفته است.

زمین‌شناسی و موقعیت منطقه

منطقه مورد مطالعه در ۳۵ کیلومتری شمال کاشمر، ۹۵ کیلومتری جنوب نیشابور و ۲۲۰ کیلومتری جنوب غربی مشهد قرار دارد. طبق تقسیم‌بندی اشتوکلین و روتنر و نبوی منطقه مورد مطالعه در زون ایران مرکزی قرار گرفته است (نبوی، ۱۳۵۵). منطقه کوهسرخ به شدت تکتونیزه بوده و عملکرد گسل‌های متعدد معکوس و نرمال باعث به وجود آمدن ارتفاعات بلند و آبراهه‌هایی که شیب زیادی دارند شده است. ویژگی‌های بارز این پهنه، دگرگونی، چین‌خوردگی، پلوتونیسم شدید مزوزوئیک و فعالیت زیاد آتش‌فشانی در دوره سونوزوئیک است. علت نام‌گذاری کوهسرخ وجود واحدهای اولیگوسن سرخ‌رنگ می‌باشد (شکل ۱). ارتفاعات منطقه روند شرقی-غربی و شمال شرقی-جنوب غربی دارند. از شرق به غرب این ارتفاعات کاهش می‌یابند. بلندترین ارتفاعات منطقه مورد مطالعه را کوه تولا تشکیل داده است که سن آن کرتاسه زیرین نیز می‌باشد. کوه چهل دختر با ابعاد ۰/۵ کیلومترمربع که در جنوب کوه زرنیخ قرار دارد یک توده نفوذی نیمه عمیق، دیوریتی است که در خاک‌های کشاورزی عهد حاضر قرار دارد.



شکل ۱. بالا) نقشه زمین‌شناسی محدوده کوه زرنیخ (نادری، ۱۳۷۷)، پایین) سازندهای تشکیل‌دهنده منطقه

توالی‌های افیولیتی موجود در منطقه روند یکسانی ندارد به‌طوری‌که در قسمت‌های غربی تنوع و ارتفاع افیولیت‌ها بیشتر و هرچه به سمت شرق حرکت کنیم تنوع و ارتفاع واحدها کمتر می‌شود. در شرق و شمال منطقه بیشتر سرپانتینیت‌ها برون‌زد دارند. در این توالی‌ها، پس از بسته شدن اقیانوس، توده‌های نیمه عمیق حد واسط در آن نفوذ کرده که قله‌های نسبتاً مرتفعی را به وجود آورده است که از دیگر واحدهای منطقه قابل تشخیص و تفکیک است (مانند کوه چهل دختر با جنس دیوریت در پایین‌تر از کوه زرنیخ). منطقه مورد مطالعه در حاشیه زون فرورانش و محل برخورد دو زون ساختاری بلوک لوت و سبزوار و در بین دو گسل تکنار (ریوش) و درونه قرار گرفته است به عبارتی گسل ریوش زون سبزوار را از بلوک تکنار جدا کرده است. گسل ریوش مهم‌ترین گسل این

منطقه می‌باشد. واحدهای رسوبی در جنوب منطقه با فعالیت گسل ریوش در کنار کمپلکس‌های افیولیتی جای گرفته‌اند (اسدی-۱۳۹۰).

در منطقه عناصر آنتیموان و آرسنیک بالاترین مقدار و عناصر روی، سرب، طلا و نقره مقادیر پایین‌تر را در بردارند (مطلومی-۱۳۷۱). کانی سازی در این منطقه بیشتر به شکل رگه و رگچه‌های کوچک و استوک ورک می‌باشد. مهم‌ترین کانی‌ها در این منطقه رالگار (As_4S_4)، استینیت (Sb_2S_3)، اریمنت (As_2S_3)، ژپیس، پیریت (FeS_2) و کوارتز می‌باشند علاوه بر این کانی‌ها، دو کانی آلونیت و ژاروسیت به همراه مونت موریونیت و کائولینیت که کانی رسی می‌باشند شاخص دگرسانی گرمایی و کانی سازی اپی ترمال هستند.

مواد و روش‌ها

در بهار و تابستان سال ۱۴۰۳، عملیات نمونه‌برداری از چندین چشمه و آبراهه در محدوده مورد مطالعه صورت پذیرفت. جمع‌آوری نمونه‌ها در ظروف پلاستیکی با ظرفیت ۱ لیتر انجام گرفت، به‌طوری‌که هر نمونه در یک ظرف جداگانه قرار داده شد. پیش از پر کردن نهایی، هر ظرف سه مرتبه با آب همان منبع شستشو داده شد. برای نمونه‌هایی که جهت آنالیز ICP در نظر گرفته شده بودند، از سرنگ گاواژ استفاده شد تا نمونه‌ها به فالكون‌های ۵۰ سی‌سی منتقل شوند. به ازای هر ۵۰ سی‌سی نمونه، ۱ سی‌سی اسید نیتریک خالص اضافه گردید. این نمونه‌ها تا زمان انجام آنالیز در دمای $4^{\circ}C$ نگهداری شدند. پارامترهای دما و هدایت الکتریکی (EC) با استفاده از دستگاه هدایت سنج اندازه‌گیری شدند. همچنین، میزان اسیدیته (pH) نمونه‌ها توسط دستگاه pH متر (شکل ۴) سنجش گردید. با استفاده از روش طیف‌سنج انتشاری (ICP-OES)، شناسایی عناصر، تعیین درصد و نوع عناصر موجود در محلول انجام گردید.

نتایج و بحث

از مهم‌ترین عواملی که در تحرک آرسنیک در آب و رسوبات نقش دارد pH محیط می‌باشد (Smedley and Kinniburgh, 2002). به‌طور کلی، با توجه به داده‌های به‌دست‌آمده، pH آب‌های منطقه قلیایی می‌باشد که بر این اساس، آب‌های منطقه در مناطق کانی سازی شده، سولفات و در باقی مناطق، کربناته می‌باشند (پرورش، ۱۳۸۶). EC آب منطقه نوسان بسیار بالایی دارد به‌طوری‌که مقدار 450 در نمونه W_3 تا 1100 در نمونه W_4 تغییر می‌کند (جدول ۱). گرچه، هدایت الکتریکی نمی‌تواند نوع آلایند را مشخص نماید اما مقدار بالای هدایت الکتریکی می‌تواند نشانه خوبی از حضور آلاینده‌هایی مانند پتاسیم، کلر، سولفات و سدیم باشد (Orebiyi et al., 2010). میزان هدایت الکتریکی بیشتر از $500 \mu S/cm$ نشان‌دهنده آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌باشد.

جدول ۱. میزان pH, T, EC (برحسب $\mu S/cm$) در نمونه‌های آب

نمونه	اسیدیته (pH)	هدایت الکتریکی (EC)	دما (T)
W_1	7.8	1141	14.4
W_2	8.5	745	13
W_3	8	450	10.4

عامل اصلی منشأ As در منطقه مورد مطالعه، وجود دو کانی، اریمنت (As_2S_3) و رالگار (As_4S_4) می‌باشد. از عوامل دیگر می‌توان به همراهی کانی‌های سولفیدی آرسنیک دار آرسنوپیریت ($FeAsS$) و پیریت‌های غنی از آرسنیک (FeS_2)، در منطقه می‌باشند که می‌توانند مقادیر زیادی As را در هنگام تغییرات شرایط محیطی (شرایط اکسیدان)، آزاد کنند.

جدول ۲. غلظت عناصر در نمونه‌های کانی‌های منطقه به روش ICP-OES (مقادیر برحسب PPM می‌باشد)

Pb	As	Sb	Mn	Ni	Zn	Cu	Co	Cr	Cd	B
2/88	16278	31/14	560/78	100/13	16/64	11/36	2/38	14/99	-	-

R₁



5/96	16855	-	437/82	326/23	29/89	22/59	16/77	96/43	-	-	R ₂
4/00	131774	30/43	1212/2	225/35	20/62	26/42	13/24	68/78	-	-	R ₃
-	6/39	0/91	741	60/84	90/72	28/78	15/87	122	0/22	6/05	*R ₄
494	6/8	0/67	922	120	86/48	64/43	29/72	210	0/58	7/91	*R ₅
2/49	139	0/56	1110	151	88/41	73/03	33/67	181	0/61	26/4	*R ₆
-	27/72	0/93	1114	64/7	54/98	22/38	14/53	48/22	0/54	9/28	*R ₇
5/67	2184	0/58	1062	449	58/51	36/48	41/35	217	19/99	14/04	*R ₈
-	2899	0/67	1061	588	58/74	33/94	41/51	395	25/52	10/01	*R ₉
2/34	254	-	902	593	63/25	42/89	50/19	345	2/79	20/62	*R ₁₀
-	12020	0/68	1046	538	47/41	43/35	39/75	617	107	15/52	*R ₁₁
-	12064	-	1202	367	37/66	66/52	23/5	183	111	9/7	*R ₁₂
6/93	4675	0/57	2273	137	63/25	28/8	29/01	51/6	42/28	28/24	*R ₁₃
-	3369	0/54	441	445	50/13	13/05	38/79	286	28/87	45/27	*R ₁₄
-	10578	0/64	974	682	35/81	21/33	52/05	119	92/08	42/15	*R ₁₅

* (گازرانی-۱۳۹۱)

جدول ۳. غلظت عناصر در نمونه‌های رسوب منطقه به روش ICP-MS (مقادیر برحسب PPM می‌باشد)

Pb	As	Sb	Mn	Ni	Zn	Cu	Co	Cr	Cd	Fe*	
7/08	129	0/61	787	233/1	58/2	50/35	24/1	124/9	0/16	3/04	**Sd ₁
7/53	187/8	0/76	753	200/5	56/5	49/48	22	102/3	0/16	2/86	**Sd ₂
10/05	268/2	1/13	798	181	55	52/95	21/6	94/8	0/15	2/89	**Sd ₃
14/92	12/4	0/19	1036	326/2	73/8	57/2	36/8	119/8	0/18	3/8	**Sd ₄
10/69	9/3	0/12	917	85/7	67/7	75/43	23/2	69	0/23	3/81	**Sd ₅
7/36	8/2	0/13	1251	126/3	45/2	43/7	20	85/8	0/13	2/78	**Sd ₆
8/67	11/7	0/23	607	127	46	29/26	15/9	77/2	0/08	2/53	**Sd ₇
10/19	10/9	0/22	589	175/8	42/3	31/37	18/4	137/8	0/13	2/97	**Sd ₈
10/03	11/2	0/21	755	147/2	52/6	33/58	20/9	89/6	0/11	3/37	**Sd ₉
8/38	9/3	0/19	749	159/7	45/3	27/06	21/6	100/6	0/13	3/49	**Sd ₁₀
6/08	10	0/14	716	203/6	39/4	37/06	24	110/2	0/12	3/06	**Sd ₁₁
7/79	8/9	0/19	755	156/9	48/6	37/03	23/6	93/2	0/14	3/62	**Sd ₁₂
9/45	13/4	0/23	415	87/4	33/5	22/89	12/7	69/4	0/22	2/01	**Sd ₁₃
14/64	14/2	0/3	615	131/8	64/5	38/85	18/3	181/2	0/15	3/63	**Sd ₁₄

* مقدار Fe برحسب درصد می‌باشد.

** (طیسی-۱۳۸۹)

به‌طور کلی، برهمکنش‌های جذب سطحی بین As و سطوح کانی‌ها، در خاک و رسوب به‌عنوان مهم‌ترین کنترل‌کننده مقدار آرسنیک در آب در نظر گرفته می‌شود (Welch and Stollenwerk, 2003). در منطقه مورد مطالعه، وجود خاک‌های رسی، اکسیدهای آهن (همچون هماتیت)، (اکسی-هیدروکسیدهای آهن (گویتیت)، وجود شیل فراوان و منگنز، کربنات کلسیم و نیز مواد آلی، موجب جذب آرسنیک و مشاهده مقادیر بالای آرسنیک (بیش از ۱۳۰ ppm) در خاک‌های منطقه شده است. البته جذب As

به خواص سطح ویژه کانی، مقادیر As در محیط آب، pH، نوع گونه آرسنیک و رقابت یونها و همچنین فعالیت میکروارگانیزمها نیز بستگی دارد (BGS and DFID, 2001).

جدول ۴. غلظت عناصر در نمونه های خاک به روش ICP-MS (مقادیر برحسب ppm می باشد)

Pb	As	Sb	Mn	Ni	Zn	Cu	Co	Cr	Cd	
32/8	18/2	1/6	918	260/8	77/6	68	28/7	243/7	0/3	*S ₁
27/6	15/9	1/2	1276/8	149/9	95/1	110	33/4	109/5	0/4	*S ₂
19/9	130/9	1/3	971/7	450/3	63/5	72/5	34/1	540	0/3	*S ₃
32/9	92/2	1/1	991	281/3	71/6	98	29/8	321/4	0/4	*S ₄
21/3	-	1/1	900/6	1271/1	29/6	21/4	57/9	927/3	0/3	*S ₅
37	1/8	1/2	954/4	267/7	73/7	74/6	26/5	346/8	0/3	*S ₆
33/5	2	0/7	930/5	239/5	80/9	85	27/8	350/2	0/3	*S ₇
33/2	9/4	0/5	850/1	214/1	69/2	58/1	25/8	335/6	0/2	*S ₈
34/8	114/3	1	929/2	334/8	69/8	83/5	29/5	253	0/2	*S ₉
39/2	1	1	640	178/2	53/9	62/4	21/6	209/7	0/3	*S ₁₀
31/6	1/9	0/7	886/8	192/3	83/8	68/2	27/6	406/8	0/2	*S ₁₁
39/5	8/5	1/1	831/6	204	61	76/2	25/5	283/9	0/2	*S ₁₂
36/4	-	1/5	856/4	354/9	69/6	87/9	31/5	381/3	0/3	*S ₁₃
27/3	-	1/4	1032/4	273/9	71/7	80/2	28/1	313/9	0/3	*S ₁₄
34/3	11/5	1/2	1357/3	248/2	104/4	142/2	35/3	242/9	0/3	*S ₁₅
33/5	2/1	0/8	911/6	248/5	71/4	64/2	28/7	236/2	0/3	*S ₁₆
42/6	11	1/2	965/4	342/1	73/1	80/9	30/1	245/7	0/3	*S ₁₇

*(گازرانی-۱۳۹۱)

با توجه به نتایج آنالیز به دست آماده از آنالیز ICP مشاهده می گردد که نمونه های W₃ و W₅ در منطقه دارای بیشترین میزان آرسنیک، آهن و منگنز نسبت به نمونه های دیگر در منطقه می باشند. حد مجاز آرسنیک توسط WHO، ۱۰ mg/L تعیین شده است. در صورتی که در بعضی از مکان ها در منطقه مورد مطالعه، بیش از ۸۶ mg/L مشاهده شده است (جدول ۵).

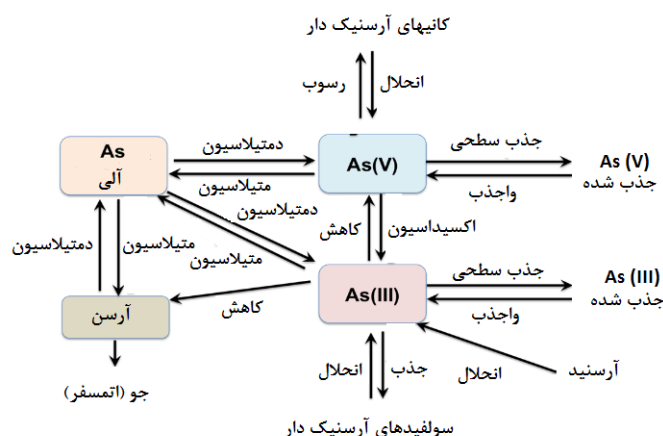
جدول ۵. غلظت عناصر موجود در آب منطقه با روش ICP-OES (مقادیر برحسب mg/L می باشد)

As	Fe	Sb	Mn	Ni	Zn	Cu	Co	Cr	
0/009	0/234	-	0/013	-	-	-	-	-	W ₁
-	0/057	-	0/005	-	0/004	-	-	-	W ₂
78/637	0/507	-	0/204	-	-	-	-	-	W ₃
-	0/027	-	-	-	-	-	-	-	W ₄
86/574	4/368	0/093	0/494	0/191	0/167	0/021	0/021	0/012	W ₅
1/012	0/137	-	0/018	-	0/014	0/005	-	-	W ₆
0/313	0/014	-	0/014	-	0/014	0/011	0/004	-	W ₇

سازوکار (مکانیسم) آزاد شدن آرسنیک

فهم فرایندها و سازوکارهای آزادسازی آرسنیک می تواند راهبرد مهمی جهت پیشگیری و حذف آلاینده های As در آبها و خاک های منطقه مورد مطالعه باشد. آزاد شدن As در آب، رسوبات و خاک، فرآیندی بسیار پیچیده است (شکل ۳). به این دلیل، فرضیه های مختلف زیادی برای توضیح غلظت بالای As در آب های زیرزمینی و سطحی از جمله برهمکنش های متقابل انحلال/رسوب، جذب/وا جذب، متیلاسیون/دمتیلاسیون و اکسیداسیون/کاهش As در سیستم های طبیعی عنوان شده اند (Zhang & Selim, 2008). یکی دیگر از عوامل مهم، وجود کانی های حاوی آرسنیک (از جمله اریمنیت، آلگار، آرسوپیریت و پیریت های غنی از آرسنیک)، در منطقه می باشند که می توانند مقادیر زیادی As را در هنگام تغییرات محیط شیمیایی (شرایط اکسیدان)، آزاد کنند. این کانی های آرسنیک دار، با قرار گرفتن در معرض هوا، به سرعت اکسید می شوند و سپس در اثر انحلال، As(III) توسط

روان آب‌ها و آب زیرزمینی‌های حمل می‌شود. در روند اکسیداسیون، نیز تمامی Fe^{2+} در اثر اکسیداسیون کانی‌های سولفیدی حاوی آرسنیک و حضور اکسیدهای آهن به Fe^{3+} تبدیل و به‌صورت فازهای کم محلول، مانند گوتیت ($\alpha-FeOOH$) رسوب نموده‌اند. وجود آهن زیاد در آب‌ها و خاکه‌ای محدوده کوه زرنیخ به دلیل وجود کانی‌هایی مانند هماتیت، مگنتیت (طیسی و همکاران، ۱۳۹۷)، پیریت، گوتیت، لیمونیت و سیدریت می‌باشد (خاکراه و همکاران، ۱۳۸۹). انحلال اکسیداتیو رآلگار یکی از عوامل مهم آلودگی آرسنیک (As) در آب‌و خاک محسوب می‌شود (Liu et al., 2022). به‌طور کلی، عوامل زیست‌محیطی از جمله اکسیژن محلول (DO) و تابش خورشید نیز می‌توانند منجر به تشکیل گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) بر روی کانی‌های سولفیدی شوند که به‌طور قابل توجهی اکسیداسیون کانی و آزادسازی As را افزایش می‌دهند (Liu et al., 2022).



شکل ۳) چرخه بیوژئوشیمیایی آرسنیک (Zhang & Selim, 2008).

نتیجه‌گیری

نتایج مطالعات نشان داد که کمپلکس افیولیتی منطقه می‌تواند منشأ فلزات سنگینی همانند کروم باشد. سنگ‌های اولترامافیک (پریدوتیت، هارزبورگیت و لرزولیت)، تحت تأثیر فرآیندهای دگرسانی و تکتونیک بر روی این سنگ‌ها، به‌شدت سرپتینی شده و منجر به آزاد شدن کروم در محیط‌زیست شده‌اند. سنگ‌ها و کانی‌هایی که می‌توانند منشأ آلاینده‌گی کروم باشند شامل کرومیت و کانی‌های گروه اسپینل هستند. این کانی‌ها در فرآیندهای هوازدگی و دگرسانی تجزیه می‌شوند و کروم آزاد می‌کنند.

منشأ شبه فلزات سمی در محدوده مورد مطالعه محلول‌های گرمابی هستند. توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی و فعالیت‌های ماگماتیک مرتبط با آن‌ها، منجر به افزایش غلظت آرسنیک در آب‌و خاک منطقه شده است. نفوذ محلول‌های گرمابی باعث دگرسانی و ایجاد شرایط مناسب برای کانی‌سازی آرسنیک و آنتیموان شده‌اند. آلودگی آرسنیک در محدوده کوه زرنیخ ریوش می‌تواند مرتبط با کانی‌های سولفیدی مانند رآلگار (As_4S_4) و اریپمنت (As_2S_3) باشد. این کانی‌ها، حاصل فرآیندهای گرمابی مرتبط با توده‌های نفوذی همچون گرانیت، دیوریت و مونزودیوریت در منطقه می‌باشند که می‌توانند منشأ آلودگی آرسنیک در خاک‌ها و آب‌های منطقه باشند. آلودگی کادمیوم در خاک‌ها و آب‌های منطقه کوهسرخ می‌تواند ناشی از کانی‌های سولفیدی مانند گالن، اسفالریت و پیریت باشد اما آلودگی آنتیموان می‌تواند مرتبط با کانی‌های سولفیدی مانند استینیت (Sb_2S_3)، باشد.

منابع

- اسدی، م.، (۱۳۹۰) پترولوژی، ژئوشیمی، پتانسیل معدنی افیولیت کوهسرخ (کاشمر)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی بایابی، ی. علوی مقدم، م. قاسم‌زاده، ف. ارباب زوار، م. (۱۳۸۷) بررسی آلودگی آب‌های سطحی منطقه کوهسرخ کاشمر به آرسنیک، علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، دوره دهم، شماره ۳
- پرورش م.، (۱۳۸۶)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: پترولوژی و ژئوشیمی ولکانیسم سنوزوئیک کوهسرخ (کاشمر) با نگرشی بر ژئوشیمی و آلودگی منابع آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود
- خاکراه، ف.، لطفی، م.، مقدسی، س. ج.، (۱۳۸۹) ویژگی‌های زمین‌شناسی، پتروگرافی و دگرسانی کانسار آنتیموان چلبو-کلاته چوبک کاشمر، فصلنامه علمی پژوهشی زمین‌شناسی و محیط‌زیست

دولتی اردهجانی، ف.، شفایی تنکابنی، س. ض.، میرحبیبی، ع.، بدیعی، خ.، (۱۳۸۴). بیوتکنولوژی، ژئوشیمی زیست‌محیطی و مدیریت پساب‌ها: پساب‌های معدنی. جلد اول، شاهرود: دانشگاه صنعتی شاهرود

سلیمانی، س.، محمودی قرائی، م. ح.، قاسم‌زاده، ف.، سیاره، ع.، (۱۳۹۱) ارزیابی شاخص‌های آلودگی آب در منطقه‌ی افیولیتی غرب کوهسرخ، چهارمین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران

طیسی، س.، طیسی، س.، عابدی، آ.، (۱۳۹۷) ارزیابی ژئوشیمیایی و زیست‌محیطی رسوبات آبراهه‌های منطقه کوهسرخ، شمال شرق ایران، دهمین همایش ملی انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران

طیسی، س.، (۱۳۸۹) مطالعات کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی رسوبات مناطق آلوده به آرسنیک کوهسرخ کاشمر: با نگرشی بر زمین‌شناسی پزشکی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود

گازرانی، ش.، (۱۳۹۱) بررسی آلودگی و اثرات زیست‌محیطی ناشی از آرسنیک در آب‌رفت‌های منطقه کلاته چوبک واقع در شمال کاشمر، زمینه‌ای برای پژوهش‌های ایمنی‌شناسی سلولی-مولکولی در گوسفندان منطقه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی

گازرانی، ش.، قرائی، م.، مهرزاد، ج.، دادستان، ا.، (۱۳۹۰) مطالعه آلودگی آرسنیک در منابع آب روستای خضربیگ و بررسی اثرات زیست‌محیطی آن. هفتمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست ایران

مظلومی، ع.، (۱۳۷۱)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: مطالعات زمین‌شناسی و ژئوشیمی نواحی طالدار علی‌آباد و آلترشده گردنه کوهسرخ در شمال کاشمر (استان خراسان)، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

نادرین، ۱۳۷۷، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، شامکان، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

نبوی، م. ح. (۱۳۵۵)، دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران، تهران: سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور

- Alloway, B. J. 2012. Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability (Vol. 22). Netherlands: Springer Science and Business Media.
- BGS and DFID, 2001. Arsenic contamination of groundwater in Bangladesh. BGS Technical Report.
- Bhat, A., Ravi, K., Tian, F., Singh, B. M., 2024. Arsenic Contamination Needs Serious Attention: An Opinion and Global Scenario. *Polluted* 4, 196-211
- Filella, M., Belzile, N. and Chen, Y.-W. 2002. Antimony in the environment: a review focused on natural waters: I. Occurrence. *Earth-Science Reviews*, 57(1-2), 125-176.
- Homas S.Y. Choong a , T.G. Chuah a , Y. Robiah a , F.L. Gregory Koay a , I. Azni .2007. Arsenic toxicity, health hazards and removal techniques from water: an overview. *Journal ScienceDirect Desalination* 217, 139-166
- Hossini, H., Shafie, B., Dehghan Niri, A., Nazari, M., Jahanban Esfahan, A., Ahmadpour, M., Nazmara, Z., Ahmadimanesh, M., Makhdoumi, P., Mirzaei, N., Hoseinzadeh, E., 2022. A comprehensive review on human health effects of chromium insights on induced toxicity, *Environmental Science and Pollution Research* 2022. 29:70686-70705
- Jiangxi Company., 1996. Report No.19:P Explanatory Text Of Geochemical Mao of Shamkan(7661), Stream Sediment Survey Scale 1:100000.
- Larios, R., Fernández-Martínez, 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.
- Lihu, L., Zhang, Z., Zhang, M., Yang, X., Liu, Ch., Qiu, G., 2022. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Volume 339, p. 58-69.
- Orebiyi, E.O., Awomeso, J.A., Idowu, O. A., Martins, O., Oguntoké, A., Taiwo, A. M., 2010. Assessment of pollution hazards of shallow well water in Abeokuta and environs, southwest, Nigeria. *American Journal of Environmental Science*, 6(1):50-56.
- Shekhawat K, Chatterjee S, Joshi B., 2015. Chromium toxicity and its health hazards. *Int J Adv Res* 3:167-172
- Smedley, P. L., and Kinniburgh, D. G., 2002. A review of the sources, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Appl. Geochem.* 17:517-568.
- Tisarum, R., Ren, J. H., Dong, X., Chen, H., Lessl, J. T. and Ma, L. Q., 2015. A new method for antimony speciation in plant biomass and nutrient media using anion exchange cartridge. *Talanta*, 144, 1171-1175.
- Ungureanu, G., Santa, 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
- Mandal, B. K. and Suzuki, K. T., 2002. Arsenic round the world: A review. *Talanta* 58.201-235
- Vijiyakumar, N., Prince, S. N., 2024. A comprehensive review of cadmium-induced toxicity, signalling pathways, and potential mitigation strategies, *Toxicology and Environmental Health Sciences*.
- Welch, A. H., & Stollenwerk, K. G., 2003. Arsenic thermodynamic data and environmental geochemistry. Kluwer Academic Publishers. Kluwer Academic.



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
Zhang, H., and Selim, H. M., 2008. Reaction and transport of arsenic in soils: Equilibrium and kinetic modeling. Advances in Agronomy.

مرتضی رزم آرا فرزقی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد. ۰۵۱۳۸۸۰۵۴۹۵

Morteza Razmara Farzaghi, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad (FUM)
razmaramorteza@gmail.com