

نقش زهاب اسیدی معدن در تشکیل کانی‌های زیست محیطی در معادن زغال‌سنگ کارمزد، البرز مرکزی، استان مازندران

محسن قلی پور^۱، سید احمد مظاهری^۲، مصطفی رقیمی^۳، غلامحسین شمعانیان^۳

۱- باشگاه پژوهشگران جوان، دانشگاه آزاد اسلامی گرگان

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان

(دریافت مقاله: ۸۸/۷/۲۳، نسخه نهایی: ۸۹/۲/۳)

چکیده: امروزه تشکیل زهاب اسیدی معدن یکی از مهمترین عوامل آلودگی معادن زغال‌سنگ به شمار می‌آید، معادن زغال‌سنگ کارمزد در استان مازندران به‌عنوان یکی از بزرگترین و قدیمی‌ترین مناطق تولید کننده‌ی زغال‌سنگ در حوضه‌ی زغالی البرز مرکزی مطرح است. نمونه‌برداری از زغال‌سنگ، سنگ میزبان، زهاب‌های معدنی و کانی‌های ثانویه سطحی در تابستان ۸۴ انجام شد. بر اساس بررسی‌های هیدروژئوشیمی دو نوع زهاب در معادن زغال‌سنگ کارمزد وجود دارند که شامل زهاب‌های اسیدی ($\text{pH} = 4.59$) از نوع Mg-SO_4 و زهاب‌های خنثی تا قلیایی از نوع $\text{Na-HCO}_3\text{-SO}_4$ است. مهم‌ترین عامل در تشکیل زهاب‌های اسیدی عدم تخلیه زهاب معدنی از تونل غیر فعال ۱۳ و تماس طولانی مدت آب با کانی‌های سولفیدی است، در نتیجه غلظت SO_4^{2-} همزمان با اکسایش پیریت افزایش می‌یابد. بررسی نمودارهای پراکنش بیانگر آن است که با افزایش سولفات میزان pH و غلظت HCO_3^- کاهش و EC ، TDS ، PO_4^{3-} و غالب کاتیون‌ها و فلزات سنگین افزایش می‌یابد. مدل‌سازی هیدروژئوشیمیایی نشان می‌دهد، در زهاب‌های اسیدی کانی‌های ژاروسیت، آلونیت، هیدروکسیدها و اکسیدهای آهن و آلومینیوم به صورت غالب ابر اشباع است، در صورتی که کانی‌های کربناتی نظیر کلسیت، دولومیت، آراگونیت و رودوکروزیت به صورت اشباع است. نتایج پراش پرتو ایکس (XRD)، حضور کانی‌های ناتروژاروسیت، پیکرینیت، هالوتریکیت، ژپس و اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن را در نهشته‌های ناشی از زهاب اسیدی اثبات کرد. بنابر نمودارهای ژیبس لیتولوژی پدیده‌ی غالب و مهم‌ترین عامل افزایش غلظت یونی در زهاب‌های معدنی اسیدی و خنثی تا قلیایی است.

واژه‌های کلیدی: زهاب اسیدی معدن، زغال‌سنگ، معادن کارمزد، البرز مرکزی، استان مازندران.

مقدمه

بی‌درنگ تأثیر زیان آوری بر سیستم بوم‌شناختی دارد، این اثرها به طور غیر مستقیم به‌عنوان اثرهای فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و بوم‌شناختی رده‌بندی می‌شوند [۲]. در صورت نبود یک مدیریت درست، این زهاب‌ها می‌تواند منجر به تخریب

تشکیل زهاب اسیدی معدن (AMD Acid mine drainage) در معادن سولفیدی فلزی و زغال‌سنگ یکی از مهم‌ترین عوامل آلودگی محیط زیست بشمار می‌آید [۱]. اسیدی شدن آب‌ها

*نویسنده مسئول، تلفن: ، نامبر: ۳۲۹۷۸۵۹ (۰۱۱۱)، پست الکترونیکی: Gholipour_mohsen@yahoo.com

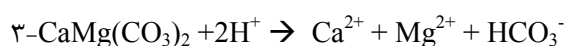
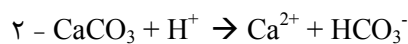
عنوان آلاینده‌های زیست محیطی و چگونگی تشکیل کانی‌های ثانویه از زهاب اسیدی معدن است.

مشخصات منطقه

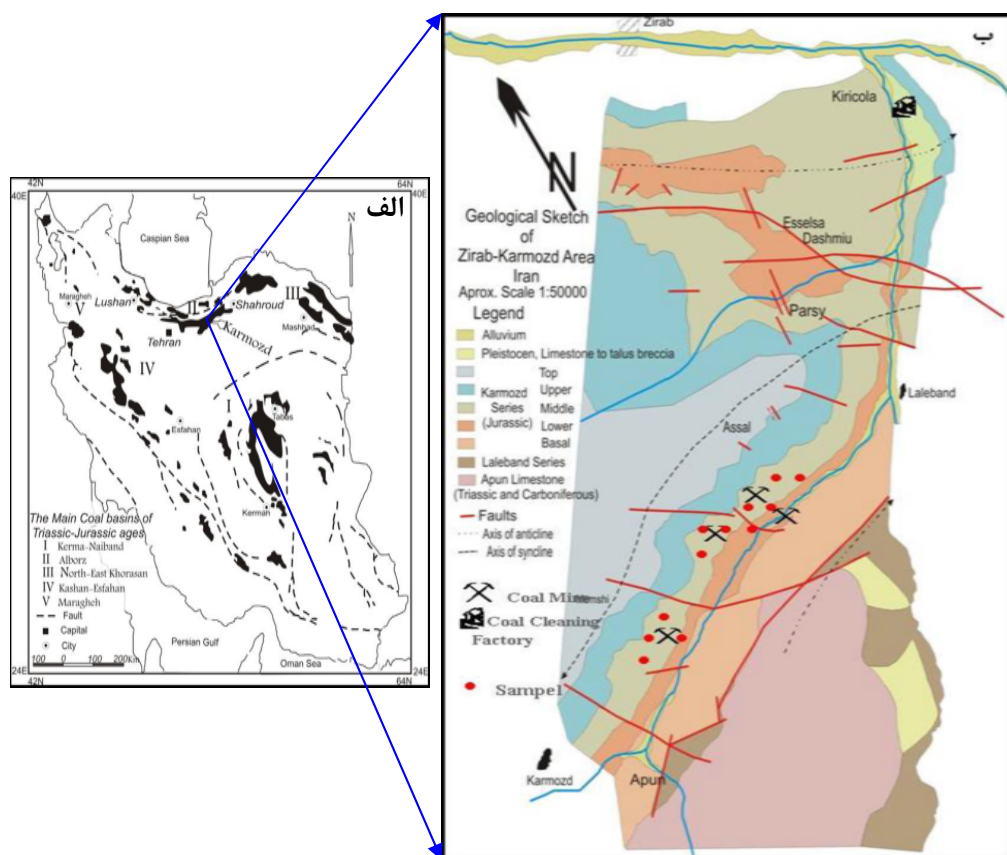
معادن کارمزد یکی از بزرگترین و قدیمی‌ترین مناطق تولید کننده‌ی زغالسنگ در حوضه‌ی زغالی البرز مرکزی است (شکل ۱ الف). منطقه‌ی مورد بررسی بین طول‌های جغرافیایی $53^{\circ} 52'$ تا $53^{\circ} 57'$ و عرض‌های جغرافیایی $36^{\circ} 10'$ تا 36° در استان مازندران و زیرحوضه‌ی چرات واقع شده است. حوضه‌ی آبریز چرات با مساحت $56647/6$ هکتار و جریان شمال شرقی یکی از شاخه‌های رودخانه تالار بوده و در شهرستان سوادکوه قرار دارد (شکل ۱ ب). ناحیه‌ی کانسار زیرآب-کارمزد با یال شمالی رشته کوه البرز (چین خوردگی بزرگ در فاز آلپین) منطبق است [۱۳]. ساختار منطقه‌ی مورد بررسی با چین‌خوردگی‌های ساده مشخص می‌شود [۱۳]. در دره‌ی تالار و منطقه‌ی مورد بررسی مجموعه زغالدار تریاس فوقانی و ژوراسیک تحتانی (سری کارمزد) گسترش زیادی دارد که از نظر چینه‌شناسی مشابه سازند شمشک است که توسط آسرتو (۱۹۶۶) در البرز مرکزی تشریح شده است [۱۲] مقطع چینه‌شناسی منطقه زیرآب-کارمزد توسط زمین‌شناسان شرکت دماغ [۱۴] تهیه شد. ضخامت کلی سری کارمزد در منطقه‌ی زیرآب-کارمزد به 1500 متر می‌رسد قشر زغال‌دار بر اساس سنگ‌شناسی به پنج بخش تقسیم می‌شود که شامل تناوبی از ماسه سنگ، شیل، آرژیلیت و گنگلومرا همراه با لایه‌های زغالی و لایه‌های نازک زغالدار است [۱۴]. تمام لایه‌های قابل کار در سری میانی کارمزد واقع شده است که در منطقه‌ی مورد بررسی شامل لایه‌های ۴، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ است [۱۳]. از نظر شرایط تشکیل زغالسنگ، منطقه‌ی کارمزد از نوع درجازا و به محیط‌های آب شیرین (مردابی) وابسته است [۱۵، ۱۲]. این زغالسنگ‌ها در گروه کم گوگرد و کم خاکستر رده بندی می‌شوند [۱۲]. ذخیره‌ی اولیه معادن کارمزد 34 میلیون تن بوده که تا سال 1383 به میزان $4/1$ میلیون تن از این ذخیره برداشت و یا تلف شده است و مقدار ذخیره‌ی موجود $29/9$ میلیون تن است [۱۶]. کنسانتره [پرعیاری] نهایی زغالسنگ کارمزد پس از فراوری، در کارخانه‌ی ذوب آهن اصفهان مصرف می‌شود.

منطقه و گسترده‌ای شود که برای چندین دهه پایدار باشد [۴، ۳]. در آمریکا بیشتر از 48000 منطقه‌ی معدنی فعال با قابلیت تولید زهاب اسیدی وجود دارند [۵]. در برخی از مناطق معدنی این مسئله پس از بسته شدن معدن به شدیدترین حالت خود می‌رسد. به‌عنوان مثال انگلستان میراثی از آلودگی فاضلاب‌های معادن زغالسنگ متروک با قابلیت آلودگی بیشتر آب‌های زیرزمینی به شمار می‌آید [۱]. با وجود 3800 کانی-شناخته شده در طبیعت تنها دو کانی پیریت و پیرویت عامل اصلی تولید زهاب اسیدی در اکثر تقاطع دنیا هستند [۷، ۶]. پیریت به دو صورت بیولوژیکی و الکتروشیمیایی اکسید می‌شود، سرعت واکنش تابع، pH، فشار بخشی گاز اکسیژن (fO_2)، سطح ویژه، شکل و اندازه‌ی ذرات، وجود سولفیدهای متفاوت در تماس با یکدیگر، فعالیت باکتری‌ها، وجود کانی‌های کربناتی و رسی و شرایط هیدروشیمی محیط است [۸]. براساس تعریف [۹] آب‌های اسیدی معدن عموماً دارای گستره-ی pH از ۲ تا ۴ و حاوی غلظت بالای سولفات و فلزاتند. اکسایش پیریت منجر به تشکیل محیط اسیدی می‌شود (واکنش ۱). به‌طور کلی افزایش شرایط اسیدی از نظر ژئوشیمیایی افزایش سرعت از هم پاشی کانی‌های سولفیدی، کربناتی، رسی و فلدسپارها را به دنبال خواهد داشت [۱۰].

در بسیاری از موارد، اسید تولید شده با کانی‌های کربناتی موجود در باطله‌ها واکنش داده و خنثی می‌شود (واکنش‌های ۳ و ۲). از مهم‌ترین کانی‌های خنثی کننده می‌توان به کلسیت، دولومیت، منیزیت و آنکريت اشاره کرد [۱۱].



معادن کارمزد واقع در البرز مرکزی یکی از قدیمی‌ترین معادن زغال‌سنگ ایران است که از سال 1350 تاکنون فعال بوده و همچنان در حال گسترش است [۱۲]. علیرغم بررسی‌های زمین‌شناسی و معدنی انجام شده در این معدن تا کنون بسیاری از جنبه‌های زیست محیطی آن مورد ارزیابی قرار نگرفته است. لذا هدف از انجام این پژوهش بررسی ویژگی‌های کانی‌های سولفیدی لایه‌های زغالدار و سنگ میزبان از نظر قابلیت تولید زهاب اسیدی معدن، بررسی ویژگی‌های هیدرو ژئوشیمیایی زهاب اسیدی معدن، نقش عناصر سنگین فلزی به



شکل ۱ الف-حوضه‌های اصلی زغالسنگ‌های ایران با سن تریاس- ژوراسیک [۱۲]، ب-نقشه زمین شناسی منطقه‌ی زیرآب- کارمزد [۱۴].

روش بررسی

بر اساس بررسی‌های صحرایی در تابستان ۸۴ از لایه‌های زغالی، سنگ میزبان، زهکش‌های معدنی نمونه‌برداری صورت گرفت. ۱۵ مقطع صیقلی از نمونه‌های زغالی و سنگ میزبان برای بررسی کانی‌های سولفیدی از نظر قابلیت تولید زهاب اسیدی معدن در آزمایشگاه زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد به روش معمول تهیه شدند. به منظور بررسی کانی‌های ثانویه زیست محیطی نمونه‌برداری از ۱۵ نهشته‌ی حاصل از زهاب‌های معدنی صورت گرفت. همچنین با استفاده از پالایه‌های $0.7\mu m$ نهشته‌های معلق موجود در زهکش‌های معدنی جداسازی و مورد بررسی کانی‌شناسی قرار گرفتند. تعداد ۸ نمونه از کانی‌های ثانویه زیست محیطی به شرکت بینالود مشهد برای شناسایی با پراش سنج پرتو ایکس (XRD) فیلیپس مدل PW 1800 ارسال شدند. برای بررسی احتمال تشکیل زهاب اسیدی و ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی، نمونه برداری از ۸ نمونه‌ی آب با هدف بررسی‌های آنالیز شیمیایی از زهاب‌های معدنی و آب-های زهکشی از انبارهای باطله در تابستان ۸۴ صورت گرفت. برای جلوگیری از آلوده شدن نمونه‌ها آب، نمونه‌های آنیون و

کاتیون پس از عبور از پالایه‌ی $0.7\mu m$ جدا از هم در ظرف پلی اتیلن یک لیتری در دمای کمتر از ۴ درجه ی سانتیگراد نگهداری شدند برای اندازه گیری کاتیون‌ها و به منظور اسیدی کردن نمونه‌ها از اسید نیتریک (HNO_3) با درجه‌ی خلوص ۶۵ درصد استفاده شد و pH آب به کمتر از ۲ تغییر یافت [۱۷]. مقادیر مواد جامد محلول (TDS)، اکسیژن محلول (DO)، رسانندگی الکتریکی (EC)، pH و دما همزمان در محل با نمونه برداری، اندازه‌گیری شد. نمونه‌های آب به منظور آنالیز شیمیایی به آزمایشگاه تجزیه‌ی شیمی دانشگاه فردوسی مشهد ارسال شدند. تجزیه‌ی عناصر Fe, Mg, Mn, Sr, Sb, Bi, Na, Se, As, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Ag به ترتیب با دستگاه جذب اتمی (مدل Shimadzu. AA-670)، Flame Emission (مدل Shimadzu. FE-۶۷۰) و طیف سنجی (مدل Agilent-۸۴۵۳) انجام شد. آنیون‌های HCO_3^- ، CL^- و SO_4^{2-} به ترتیب به روش‌های عیارسنجی نقره، عیارسنجی اسید و باز و گرانی سنجی با رسوب باریم اندازه‌گیری شد. (خطای اندازه گیری در این آزمایشگاه ۲/۱۷ درصد بوده است).

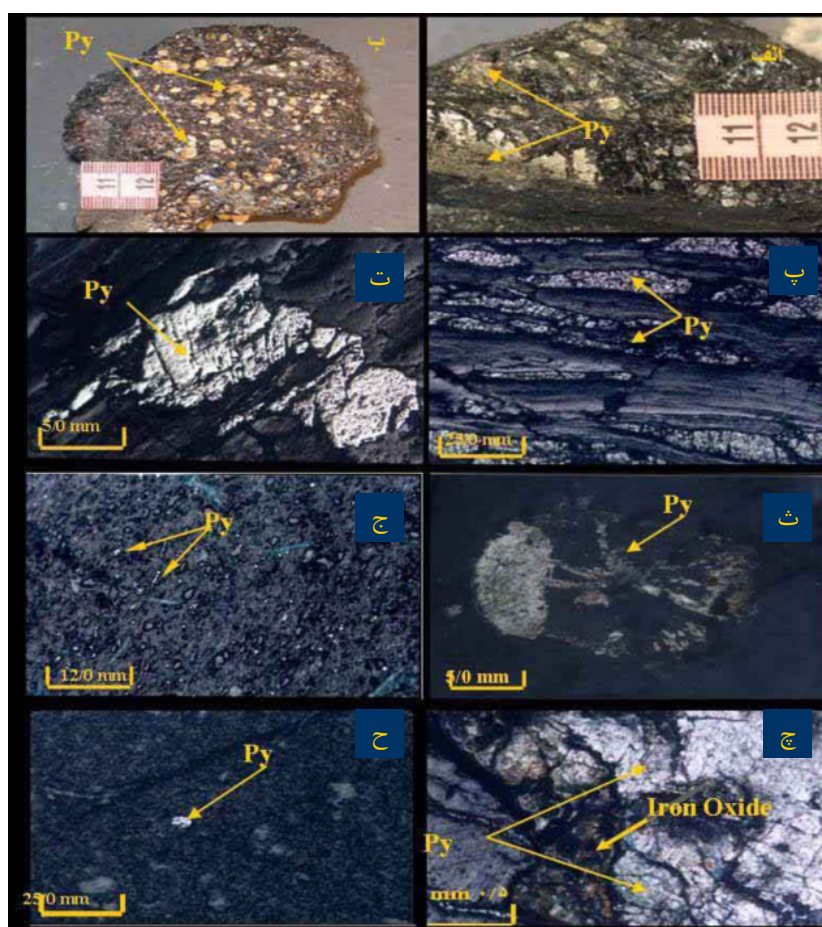
از کد کامپیوتری PHREEQC I و Aquacham (Version 4) (Version 2.6) برای تجزیه و تحلیل داده‌های هیدروشیمیایی استفاده شد. موقعیت تمام نمونه‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است.

نتایج

کانی شناسی

بررسی‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی در زغالسنگ‌های کارمزد بیانگر آن است که بخش بزرگ گوگرد به صورت پیریت و بندرت کالکوپیریت حضور دارد. پیریت‌های ماکروسکوپی بیشتر پولکی و رگه‌ای با طول کمتر از ۱ سانتی متر و ضخامت کمتر از ۱ میلی متر است (شکل ۲-الف و ب). در زون‌های اکسیدی، بخشی از پیریت‌های موجود در زغالسنگ طی فرایندهای هوازدگی به اکسیدهای آهن ثانویه تبدیل شده است (شکل ۲-پ و ت). علاوه بر پیریت مقادیر بسیار اندکی کالکوپیریت نیز طی فرایند هوازدگی به کولیت تبدیل شد. پیریت‌های میکروسکوپی غالباً به صورت رگچه، شکل‌دار، نیمه

شکل‌دار و بی شکل در ماسرال‌های زغالی حضور دارند. رگچه‌های پیریت بخش بزرگی از پیریت‌های موجود در زغالسنگ را به خود اختصاص می‌دهد. رگچه‌ها غالباً با طول کمتر از ۵ میلی متر و ضخامت ۰/۰۱ تا ۰/۰۰۱ میلی متر در درز و شکستگی‌های موجود در ماسرال‌های زغال دیده می‌شوند (شکل ۲-ث). در مجاورت رگچه‌ها، دانه‌های نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل پیریت با طول کمتر از ۱ سانتی متر حضور دارند (شکل ۲-ج). در متن ماسرال‌های زغال، دانه‌های بی‌شکل پیریت به صورت افشان با طول کمتر از ۰/۰۱ میلی متر پراکنده‌اند، در برخی موارد طول این دانه‌ها به بیش از ۱ میلی متر نیز می‌رسد (شکل ۲-چ). همچنین پیریت با طول کمتر از ۰/۰۵ میلی متر به صورت پراکنده در متن آرزلیت‌های فوقانی دیده می‌شود (شکل ۲-ح). اکسیدهای آهن ثانویه در حاشیه‌ی لبه‌های پیریت‌های نیمه‌شکل‌دار و رگچه‌ای خصوصاً در مناطقی با شکستگی‌های فراوان، به چشم می‌خورد که بیانگر فرایند اکسایش پیریت است (شکل ۳-خ و د).



شکل ۲ انواع پیریت‌های ماکروسکوپی در زغالسنگ‌های کارمزد (الف) رگچه‌ای، (ب) پولکی، پیریت‌های میکروسکوپی در ماسرال‌های زغال (پ) رگچه‌ای، (ت) نیمه شکل‌دار، (ث) شکل‌دار، (ج) افشان، (چ) اکسیدهای آهن ثانویه در لبه‌های پیریت و (ح) پیریت افشان در آرزلیت‌های فوقانی.

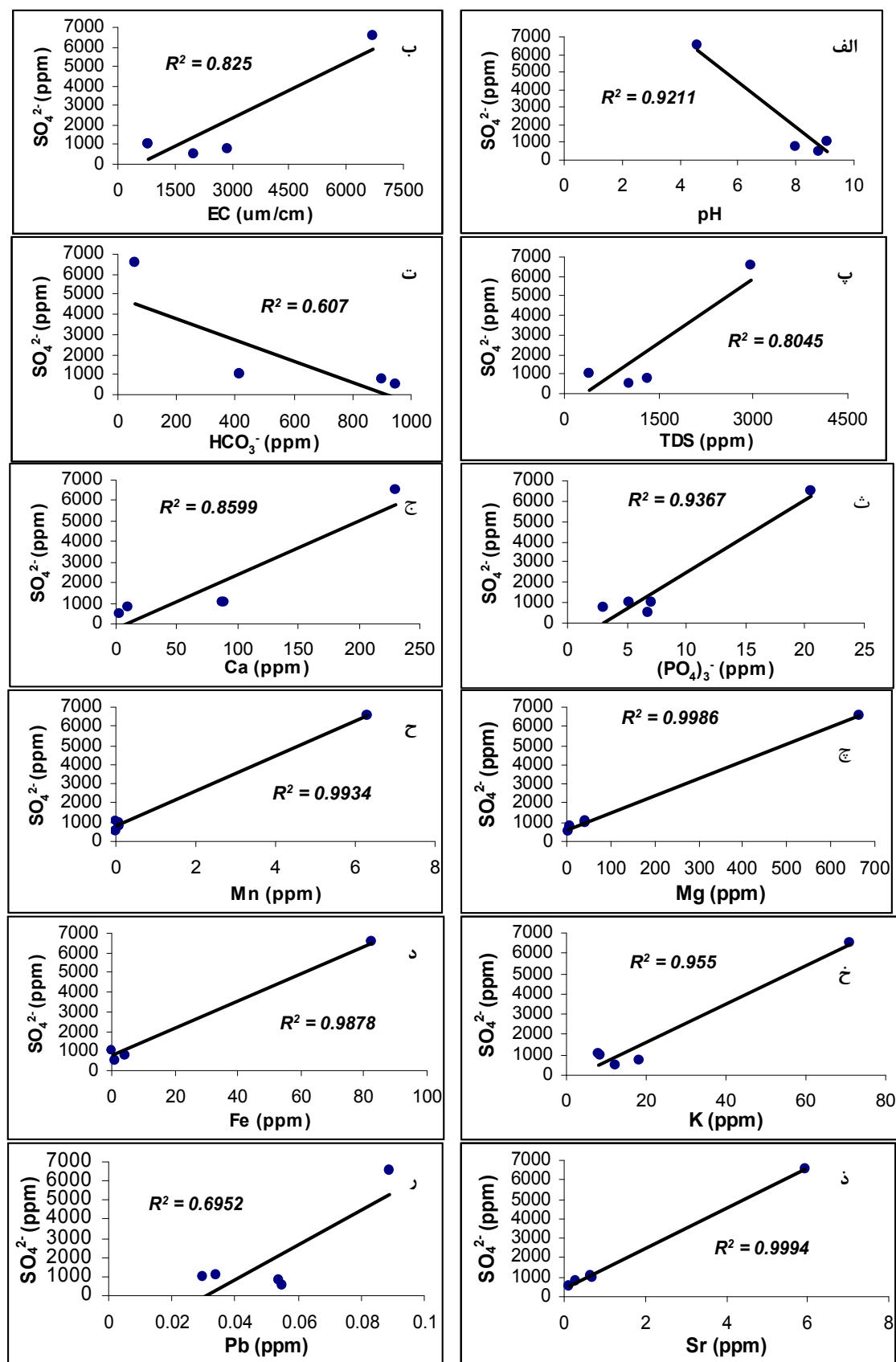
هیدروژئوشیمی

نتایج تجزیه‌ی شیمیایی و پارامترهای هیدرووشیمی آب در جدول‌های ۱ ارائه شده‌اند. بر اساس نتایج به دست آمده، زهاب معدنی در تونل ۱۳ (KA-W3) با $\text{pH} = 4.59$ اسیدی است. این زهاب بیشترین میزان رسانندگی الکتریکی (EC) مجموع مواد جامد محلول (TDS)، غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌ها، و فلزات سنگین و کمترین غلظت HCO_3^- را به خود اختصاص می‌دهد. زهاب‌های معدنی تونل ۷ و ۱۴ (KA-W1 و KA-W2) و آب‌های زهکشی از باطله‌های تونل متروک (KA-W4, KA-W5)

(W5) دارای pH خنثی تا قلیایی است، این زهاب‌ها کمترین میزان رسانندگی الکتریکی، مجموع مواد جامد محلول، غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی و فلزات سنگین و بیشترین غلظت HCO_3^- را نشان می‌دهد. بررسی نمودارهای پراکنش pH، EC، TDS، SO_4^{2-} ، کاتیون‌ها و فلزات سنگین نشان داد که با افزایش SO_4^{2-} میزان pH و غلظت HCO_3^- کاهش و EC، TDS، PO_4^{3-} افزایش می‌یابد، غالب کاتیون‌ها، فلزات سنگین و PO_4^{3-} (شکل ۳).

جدول ۱ نتایج تجزیه‌ی شیمیایی (بر حسب ppm) و پارامترهای هیدرووشیمی زهاب‌های معدنی اسیدی و خنثی تا قلیایی.

	KA-W1	KA-W2	KA-W3	KA-W4	KA-W5
T C°	۱۸٫۲	۱۸	۱۸	۱۹٫۵	۱۹٫۵
pH	۸٫۸	۸	۴٫۵۹	۹٫۱	۹٫۱
TDSmg/l	۱۰۲۲	۱۳۲۶	۲۹۵۶	۴۷	۴۷
ECμm/cm	۲۰۰۰	۲۸۸۰	۶۶۸۰	۸۱۰	۸۱۰
DOmg/l	۲٫۵	۲٫۶	۲٫۲	۳	۳
SRA	۴۸٫۸۶	۴٫۳۷	۴٫۰۹	۳٫۷۶	۳٫۴۹
HCO_3^-	۹۵۰	۹۰۲	۶۱	۲۱۳	۲۱۳٫۴
Cl^-	۱۰۶٫۵	۱۷۰٫۴	۲۸۴	۱۰٫۷	۱۴٫۲
SO_4^{2-}	۴۹۷٫۱	۷۶۸٫۷	۶۵۳۱٫۱	۱۰۴۲٫۷	۱۰۱۴٫۸
NO_3^-	۳۱٫۸۳	۱۲٫۵۸	۲۲	۹٫۵۸	۹٫۸۳
PO_4^{3-}	۶٫۸۲	۳٫۰۱	۲۰٫۵۹	۵٫۱۸	۷٫۰۶
Ca^{2+}	۲٫۳۵۲	۹٫۸۴۸	۲۳۰٫۹	۸۶٫۹۴	۸۸٫۷۳
Mg^{2+}	۴٫۹	۷٫۴	۶۶۵	۴۱٫۸۸	۴۱٫۵
Na^+	۵۷۳	۸۰۳	۷۸۸	۱۹۸	۱۸۶
K^+	۱۲٫۳۳	۱۸٫۵	۷۱۰٫۵	۸٫۲	۸٫۶۱
Fe	۰٫۹۰۸	۴٫۳۴	۸۲٫۵۲	۰٫۲۴۳	۰٫۲۳
Al	۱٫۲۲۱	۱٫۱۶۲	۳٫۴۶۶	۰٫۶۸۶	۰٫۶۹۲
Sr	۰٫۱۲۶	۰٫۲۸۸	۵٫۹۳۷	۰٫۶۷۶	۰٫۶۸۶
Ba	۰٫۰۵۶	۰٫۰۵۲	۰٫۱۶۳	۰٫۰۳۲	۰٫۰۳۱
As	۰٫۱۱	۰٫۱۷	۰٫۱۹۴	-	-
Sb	۰٫۰۹۹	۰٫۴۳	۰٫۸۵۴	۰٫۱۴۷	۰٫۱۲۱
Bi	۰٫۶۱۴	۰٫۱۲۴	۰٫۳۴۲	۰٫۱۶۲	۰٫۱۴
Cr	۰٫۱۰۹	۰٫۰۹۷	۰٫۱۲۳	۰٫۰۶۴	۰٫۰۶۲
Mn	-	۰٫۱۰۶	۶٫۳	۰٫۰۱۷	۰٫۱
Co	-	-	۰٫۱۴۵	-	-
Ni	۰٫۰۲۶	-	۰٫۲۱۶	-	-
Cu	۰٫۱۲۶	۰٫۰۴۱	۰٫۱۴	-	-
Zn	-	-	۰٫۰۹	-	-
Pb	۰٫۰۵۵	۰٫۰۵۴	۰٫۰۸۹	۰٫۰۳۸	۰٫۰۳
Se	۰٫۰۸۹	۰٫۰۹۲	۰٫۱۳۷	۰٫۰۱۹	۰٫۰۱۹
Cd	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱۷	۰٫۰۳۴	۰٫۰۳۱
Ag	۰٫۰۱۲	۰٫۰۰۸	۰٫۰۲	-	-

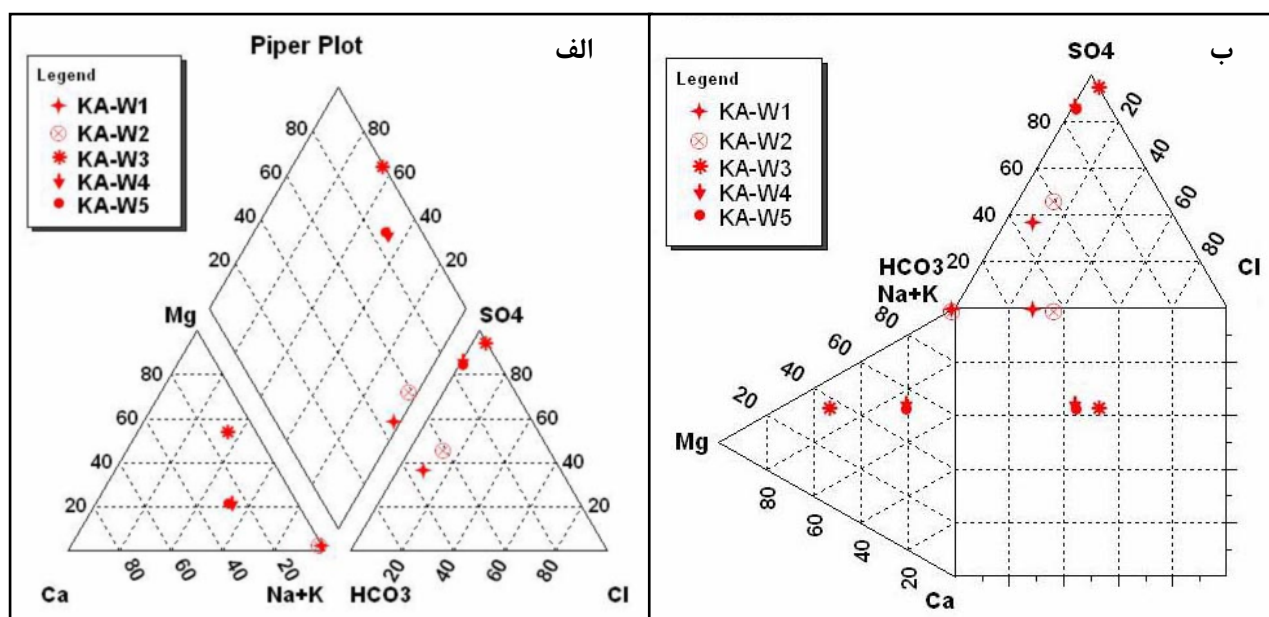


شکل ۳ نمودار پراکنش SO_4^{2-} در مقابل الف pH، ب EC، پ TDS، ت HCO_3^- ، ث $(\text{PO}_4)_3^-$ ، ج Ca، چ Mg، ح Mn، د Fe، ز Sr، ر Pb.

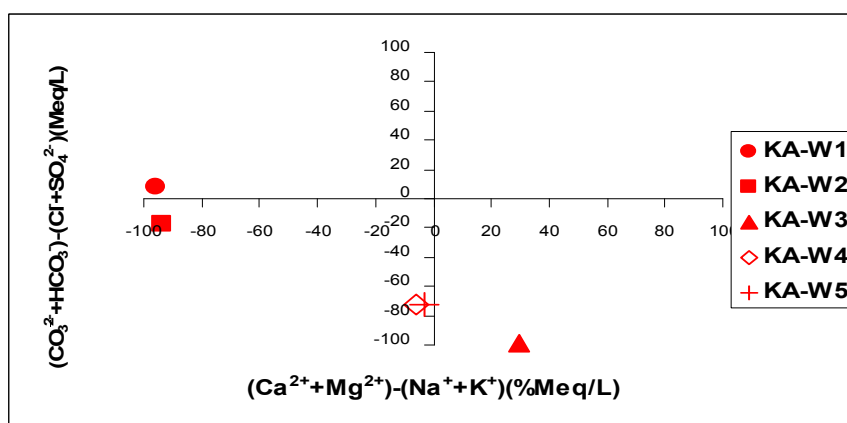
قلیایی غیر کربناتی و نمونه‌های KA-W4 و KA-W از نوع سولفاتی همراه با کاتیون‌های غیر غالب است. از نمودار هیدروشیمی چادها [۱۸] برای رده بندی زهاب‌های معدنی و آب‌های زهکشی از انبارهای باطله استفاده شد (شکل ۵). با توجه به این نمودار در زهاب معدنی اسیدی (KA-W3) آنیون-های اسیدی قوی ($\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-$) و فلزات قلیایی خاکی ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) خیلی بیش از آنیون‌های اسیدی ضعیف ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$) و فلزات قلیایی ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) است. همچنین زهاب‌های خنثی تا قلیایی به دو بخش مجزا تفکیک می‌شوند به طوری که در زهاب‌های معدنی خنثی تا قلیایی (KA-W1 و KA-W2) دارای فلزات قلیایی بیشتر از قلیایی خاکی است این در حالی است که در آب‌های زهکشی شده از باطله‌ها (KA-W4 و KA-W5) این نسبت برابر می‌شود و کمی بر میزان آنیون‌های اسیدی قوی نیز افزوده می‌شود.

با استفاده از مدل گیبس [۱۹] می‌توان بر اساس تغییرات نسبت Na^+ به $(\text{Ca}^{2+} + \text{Na}^+)$ و Cl^- به $(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ به‌عنوان عملکرد TDS خاستگاه یون‌های محلول را ارزیابی کرد. چنانکه در شکل ۶ مشاهده می‌شود ویژگی‌های سنگ-شناسی پدیده‌ی غالب و مهم‌ترین عامل افزایش غلظت یونی‌ها در زهاب معدنی اسیدی و خنثی تا قلیایی است

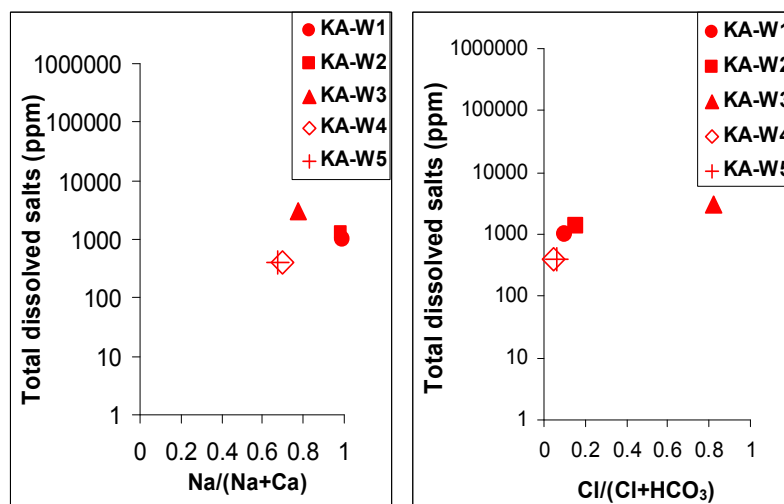
نوع آب نشان دهنده‌ی غلظت نسبی آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی در آب است. برای تعیین نوع و وضع شیمیایی آب از نمودار پایپر استفاده شد. بر این اساس چنانکه در شکل ۴-الف مشاهده می‌شود نمونه‌های آب دارای دو نوع اصلی با روندی متفاوتند. زهاب معدنی اسیدی (KA-W3) در منطقه‌ای با سختی غیر کربناتی بیش از ۵۰ درصد قرار می‌گیرد و از نوع نوع $\text{Mg}-\text{SO}_4$ است و زهاب‌های معدنی خنثی تا قلیایی در بخش قلیایی غیر کربناتی با بیش از ۵۰ درصد حضور دارند. با این تفاوت که زهاب‌های معدنی (KA-W1, KA-W2) دارای نوع $\text{Na}-\text{HCO}_3-\text{SO}_4$ و آب‌های زهکشی از باطله-ها (KA-W4, KA-W5) با کاتیون‌های غیر غالب است. برای تفسیر بهتر نوع و تکامل ژئوشیمیایی آب از نمودار دورو استفاده شده (۴-ب). این نمودار را می‌توان صورت تکامل یافته‌تری از نمودار پایپر به حساب آورد. چنانکه در شکل ۴-ب نشان داده شد، چرخه‌ی تکامل آنیونی پیروی بیشتری نسبت به چرخه‌ی تکامل کاتیونی زهاب‌های معدنی دارد. در نمونه‌ی KA-W3 منیزیم به عنوان کاتیون غالب از کاتیون‌های دیگر متمایز می‌شود. از طرفی نمونه‌های آب‌های معدنی و آب‌های زهکشی و تراوش شده از باطله‌ها به دو بخش کاملاً مجزا تقسیم می‌شوند. نمونه‌های KA-W و KA-W2 از نوع



شکل ۴ الف- نمودار پایپر، ب- نمودار دورو برای زهاب‌های معدنی اسیدی و خنثی تا قلیایی در معادن کارمزد.



شکل ۵ نمودار چادها [۱۸] برای زهاب‌های معدنی اسیدی و خنثی تا قلیایی در معادن کارمزد.



شکل ۶ نمودارهای گیبس [۱۹] برای زهاب‌های معدنی اسیدی و خنثی تا قلیایی در معادن کارمزد.

در حالی است که برای نمونه‌ی زهاب اسیدی KA-W3 کانی-های سولفات زاروسیت و آلونیت فوق اشباع و برای نمونه‌های خنثی تا قلیایی تحت اشباع است. هیدروکسیدها و اکسیدهای آهن، گیبسیت و باریت به صورت غالب در تمام نمونه‌ها ابر اشباعند.

کانی‌شناسی سطحی زیست محیطی

کانی‌شناسی پراش پرتو ایکس، حضور کانی‌های ناتروژاروسیت، پیکرینگیت، هالوتریکیت، ژیپس و کانی‌های ثانویه آهن در مجاورت زهاب معدنی اسیدی را نشان داد. کانی ناتروژاروسیت به صورت نهشته‌های ثانویه زرد مایل به قهوه‌ای همراه با نهشته‌های قهوه‌ای مایل به زرد گونه‌های آمورف آهن تشکیل شده است (شکل ۷-الف). کانی‌های ناتروژاروسیت در ترک‌های موجود در سنگ‌های دیواره‌ی مجاور زهاب‌های مدنی اسیدی

مدلسازی هیدروژئوشیمیایی

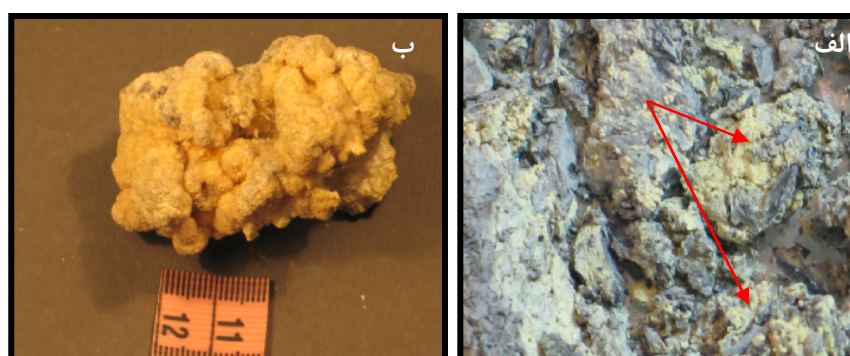
از مدل هیدروژئوشیمیایی PHREEQC I 2.6 [۲۰] برای شناسایی حالت شیمیایی زهاب‌های معدنی و آب‌های زهکشی شده از باطله‌ی عناصر اصلی و کانی‌های اشباع شده از ترکیبات محلول استفاده شد. با این برنامه شاخص درجه‌ی اشباع شدگی (SI) در هر یک از نمونه‌های اب برای کانی‌های متفاوت محاسبه و در جدول‌های ۲ ارائه شده‌اند. نتایج مدلسازی هیدروژئوشیمیایی نشان داد که در زهاب‌های معدنی اسیدی و خنثی تا قلیایی دو روند متفاوت از شاخص اشباع شدگی (SI) مشاهده می‌شود، به طوری که کانی‌های کربناتی (کلسیت، دولومیت، آراگونیت، رودوکروزیت و اتاویت) و هیدروکسیدهای منگنز و هیدروکسیدآپاتیت برای زهاب‌های خنثی تا قلیایی ابر اشباع و برای زهاب اسیدی KA-W3 تحت اشباع هستند. این

درد و شکستگی سنگ‌های دیواره‌ی تونل ۱۳ تشکیل شده است (شکل ۷-ب).

حضور دارند و به صورت نهشته‌هایی با ضخامت کمتر از ۱ سانتی‌متر در بستر زهاب‌ها یافت می‌شود. کانی‌های ثانویه پیکرینگیت، هالوتریکیت و ژپس به رنگ سفید مایل به زرد در

جدول ۲ شاخص درجه‌ی اشباع شدگی زهاب‌های معدنی اسیدی و خنثی تاقلیایی در معادن کارمزد.

فاز	فرمول شیمیایی	KA-W1	KA-W2	KA-W3	KA-W4	KA-W5
هیدروکسید آلومینیوم	Al(OH) ₃	-۱٫۰۸	-۰٫۸۳	-۲٫۷۳	-۱٫۶۹	-۱٫۵۶
آلونیت	KAl ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₂	-۴٫۱۹	-۳٫۵	۴٫۶۸	-۶٫۵۷	-۵٫۸۵
انگلزیت	PbSO ₄	-۵٫۵۸	-۵٫۶۵	-۱٫۶۹	-۴٫۶۹	-۴٫۸
انیدریت	CaSO ₄	-۳٫۰۳	-۲٫۲۹	-۰٫۴۸	-۱٫۱۴	-۱٫۱۳
آراگونیت	CaCO ₃	۰٫۱۱	۰٫۸۱	-۳٫۲۱	۱٫۲۵	۱٫۱۸
باریت	BaSO ₄	۰٫۵۶	۰٫۶۵	۱٫۳۴	۰٫۴۳	۰٫۴۴
کلسیت	CaCO ₃	۰٫۲۵	۰٫۹۶	-۲٫۰۶	۱٫۴۰	۱٫۳۳
هیدروکسید کادمیوم	Cd(OH) ₂	-۳٫۷۵	-۳٫۴۶	-۱٫۷۹	-۲٫۶۱	-۲٫۷۹
سولفات کادمیم	CdSO ₄	-۱۰٫۴۸	-۱۰٫۴۳	-۱۰٫۰۳	-۹٫۵۸	-۹٫۶
سلستیت	SrSO ₄	-۲٫۲۸	-۱٫۸۱	-۰٫۱۲	-۱٫۲۷	-۱٫۲۷
سروسیت	PbCO ₃	-۱٫۰۲	-۱٫۱۲	-۲٫۹۹	-۰٫۸۸	-۱٫۰۶
دولومیت	CaMg(CO ₃) ₂	۱٫۱۱	۲٫۰۹	-۵٫۴۰	۲٫۷۷	۲٫۵۹
هیدروکسید آهن	Fe(OH) ₂	۳٫۱۲	۳٫۷۴	-۰٫۶۰	۲٫۳۳	۲٫۳۹
گیبسیت	Al(OH) ₃	۱٫۶۷	۱٫۹۳	۰٫۰۲	۱٫۰۵	۱٫۱۹
گئوتیت	FeOOH	۸٫۷۷	۹٫۳۷	۵٫۰۴	۸٫۰۲	۸٫۰۶
ژپس	CaSO ₄ ·2H ₂ O	-۲٫۷۹	-۲٫۰۵	-۰٫۲۴	-۰٫۹	-۰٫۸۹
هالیت	NaCl	-۵٫۷۲	-۵٫۴۸	-۵٫۰۷	-۶٫۹۷	-۶٫۸۶
هوسمانیت	Mn ₂ O ₄	-	۱٫۲۳	-۲۴٫۷۶	-۳٫۹۱	۵٫۵۰
هماتیت	Fe ₂ O ₃	۱۹٫۵۱	۲۰٫۷۲	۱۲٫۰۵	۱۸٫۰۳	۱۸٫۱۱
هیدروکسی آپاتیت	Ca ₅ (PO ₄) ₃ OH	۲٫۲۳	۴٫۶۶	-۹٫۴۳	۱۰٫۱۰	۱۰٫۲۶
زاروسیت	KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₃	-۲٫۵۳	-۰٫۸۰	۰٫۱۰	-۵٫۲۸	-۴٫۸۳
منگنات	MnOOH	-	۱٫۳۴	-۸٫۹۴	۲٫۵۴	۳٫۰۷
ملانتیت	FeSO ₄ ·7H ₂ O	-۱۲٫۷۳	-۱۲٫۳۵	-۳٫۱۱	-۱۵٫۱۷	-۱۴٫۸
اتاویت	CdCO ₃	۰٫۹۵	۰٫۹۷	-۴٫۴۶	۱٫۰۵	۰٫۹۷
هیدروکسید سرب	Pb(OH) ₂	-۱٫۵۷	-۱٫۴۲	-۶٫۱۸	-۰٫۳۳	-۰٫۶۴
پیروکرنیت	Mn(OH) ₂	-	-۴٫۵۲	-۹٫۹۵	-۴٫۶۲	-۳٫۹۹
پیرولوزیت	MnO ₂	-	۰٫۱۵	-۱۴٫۹۸	۲٫۹۰	۳٫۲۵
رودوکروزیت	MnCO ₃	-	۰٫۴۷	-۲٫۰۷	-۰٫۴۱	۰٫۳۴
سیدریت	FeCO ₃	-۵٫۰۰	-۴٫۶۵	-۱٫۲۴	-۸٫۱۶	-۷٫۸۸
استرونسیانیت	SrCO ₃	-۰٫۴۵	-۰٫۰۱	-۴٫۱۵	-۰٫۱۹	-۰٫۲۷
ویانیت	Fe ₃ (PO ₄) ₂ ·8H ₂ O	-۱۶٫۴۶	-۱۶٫۲۲	-۱٫۰۲	-۲۴٫۹۳	-۲۳٫۶۶
ویزیت	BaCO ₃	-۱٫۷۷	-۱٫۷۱	-۶٫۸۵	-۲٫۶۲	-۲٫۷۰



شکل ۷ الف نهشته‌های ثانویه زرد مایل به قهوه‌ای ناتروژاروسیت ب- کانی‌های سفید مایل به زرد پیکرینگیت، هالوتریکیت، ژپس.

بحث و برداشت

از نظر شرایط تشکیل زغالسنگ منطقه‌ی کارمزد از نوع درج‌ازا و به محیط‌های آب شیرین (مردابی) وابسته است [۱۲]. میزان خاکستر زغالسنگ‌های کارمزد بین ۱/۳ تا ۸/۳ درصد در نوسان است و در گروه کم خاکستر قرار می‌گیرد [۱۵، ۱۲]. شرایط تشکیل زغالسنگ‌های نوع درجا را بیانگر محیط‌هایی با زهکشی بسیار ضعیف است، که منجر به کاهش شدید درصد خاکستر می‌شود [۲۱]. میزان گوگرد بیشتر زغالسنگ‌های کارمزد کمتر از یک درصد است و در گروه زغالسنگ‌های با گوگرد کم رده بندی می‌شود [۱۲]. تمرکز پایین گوگرد نشان دهنده‌ی محیط‌های آب شیرین به عنوان محل تشکیل زغالسنگ است، زیرا زغالسنگ‌ها با خاستگاه دریایی دارای تمرکز بالایی از کانی‌های سولفیدی و سولفاتی نظیر پیریت و ژئپس هستند [۲۲، ۲۳]. مثلاً میزان پیریت موجود در زغالسنگ‌های جلبکی ایالت شانکسی به دلیل تشکیل در محیط دریایی بیش از ۴/۸ درصد گزارش شده است [۲۴]. در معادن البرز بیش از ۷۵ درصد از گوگرد کلی را کانی‌های سولفیدی به خود اختصاص می‌دهند [۲۵]. بررسی‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی زغالسنگ‌های کارمزد بیانگر آن است که بخش بزرگ گوگرد به صورت پیریت و به ندرت کالکوپیریت حضور دارد. پیریت بیشتر به صورت پولکی، رگه‌ای، رگچه‌ای، نیمه‌شکل‌دار و افشان در لایه‌های زغالی و به صورت افشان در آرژیلیت‌های فوقانی حضور دارند. بر اساس بررسی‌های صحرایی لایه‌های زغالی با ضخامت کمتر از یک متر و به طور یکنواخت در سرتاسر حوضه‌ی کارمزد گسترده‌ی دارد. لایه‌های زغالی اغلب با لایه‌های آرژیلیت به رنگ خاکستری تیره در بخش‌های فوقانی و تحتانی همراه است که بیشتر توده‌ای هستند. آب‌های زیرزمینی در حوضه‌ی زغالی کارمزد غالباً در سری‌های بالایی و میانی کارمزد جریان دارند. خاستگاه این آب‌ها از طریق بارش‌های جوی است. میزان آبدی لایه‌های زغالی در هر تونل بستگی به مقدار بارش‌های سالیانه و شرایط زمین‌شناسی و ساختاری تونل دارد. ولی به طور کلی جریان آن از حداکثر ۱/۶۱ لیتر بر ثانیه تجاوز نمی‌کند. آب‌های زیرزمینی گسترده‌ی کانسار دارای pH خنثی تا قلیایی هستند و ترکیب شیمیایی آن غالباً بیکربناتی همراه با فلزات قلیایی و قلیایی خاکی است [۱۳]. بر اساس بررسی‌های

هیدروژئوشیمی دو نوع زهاب در معادن زغال‌سنگ کارمزد وجود دارند که شامل زهاب‌های اسیدی ($\text{pH}=4.59$) از نوع Na-HCO_3 و Mg-SO_4 و زهاب‌های خنثی تا قلیایی از نوع SO_4 است. در شکل ۸ مدل شبیه‌سازی شده از روند تشکیل زهاب اسیدی در زهاب‌های معدنی اسیدی (AMD) و خنثی تا قلیایی (NAMD) نشان داده شده است. بر این اساس آب‌های قلیایی به درون لایه‌های زغالی و آرژیلیتی نفوذ می‌کند و در درز و شکستگی‌های آن جریان می‌یابد، پیریت که بیشترین کانی سولفیدی موجود در لایه‌های زغالی است طی تماس با این آب‌ها واکنش داده و منجر به تولید اسید می‌شود (واکنش ۱) به‌طوری که اکسایشی ثانویه آهن و کولیت در زون-های اکسیدان کاملاً قابل مشاهده است. همچنین اکسیدهای آهن ثانویه در حاشیه‌ی لبه‌های پیریت‌های نیمه شکل‌دار و رگچه‌ای خصوصاً در مناطقی با شکستگی‌های فراوان، به چشم می‌خورد که بیانگر فرایند اکسایش پیریت و تشکیل محیط اسیدی است. با توجه به اینکه حرکت آب در زیر زمین منحصر به سطوح درز و شکاف است، بنابراین تحرک آب زیاد بوده و زمان تماس آن با کانی‌های سولفیدی کم است. با توجه به درصد پایین گوگرد در زغال‌سنگ‌های کارمزد، اکسایش در توده‌ی کانسار که زیر عملیات معدنکاری قرار نگرفته است بسیار کند بوده و در نتیجه تولید اسید حاصل نیز آهسته است. در اغلب موارد اسید تولید شده با کانی‌های کربناتی واکنش داده و خنثی می‌شود (واکنش ۲ و ۳). از مهم‌ترین کانی‌های کربناتی می‌توان به کلسیت و دولومیت اشاره کرد که در درز و شکستگی‌های لایه‌های زغالی حضور دارد [۱۲]. به طور متوسط ۶۰ درصد از مواد معدنی خاکستر زغال‌سنگ‌های کارمزد را اکسیدهای SiO_2 , Al_2O_3 , $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ به خود اختصاص می‌دهد [۱۲]. این اکسیدها مهمترین اجزای ترکیب‌های معدنی خاکستر را شامل می‌شود و به کانی‌های رسی و کوارتزهای آواری وابسته‌اند [۱۲] حضور کانی‌های رسی در لایه‌های زغالی و میان لایه‌های آرژیلیتی خاستگاه اصلی فلزات قلیایی در این آب‌ها هستند، لذا منجر به افزایش Na و K در این زهاب‌ها شده است. در عین حال هنگام استخراج به علت مرتفع بودن منطقه، برخی از تونل‌ها دارای شیب مناسب بوده و زهاب یاد

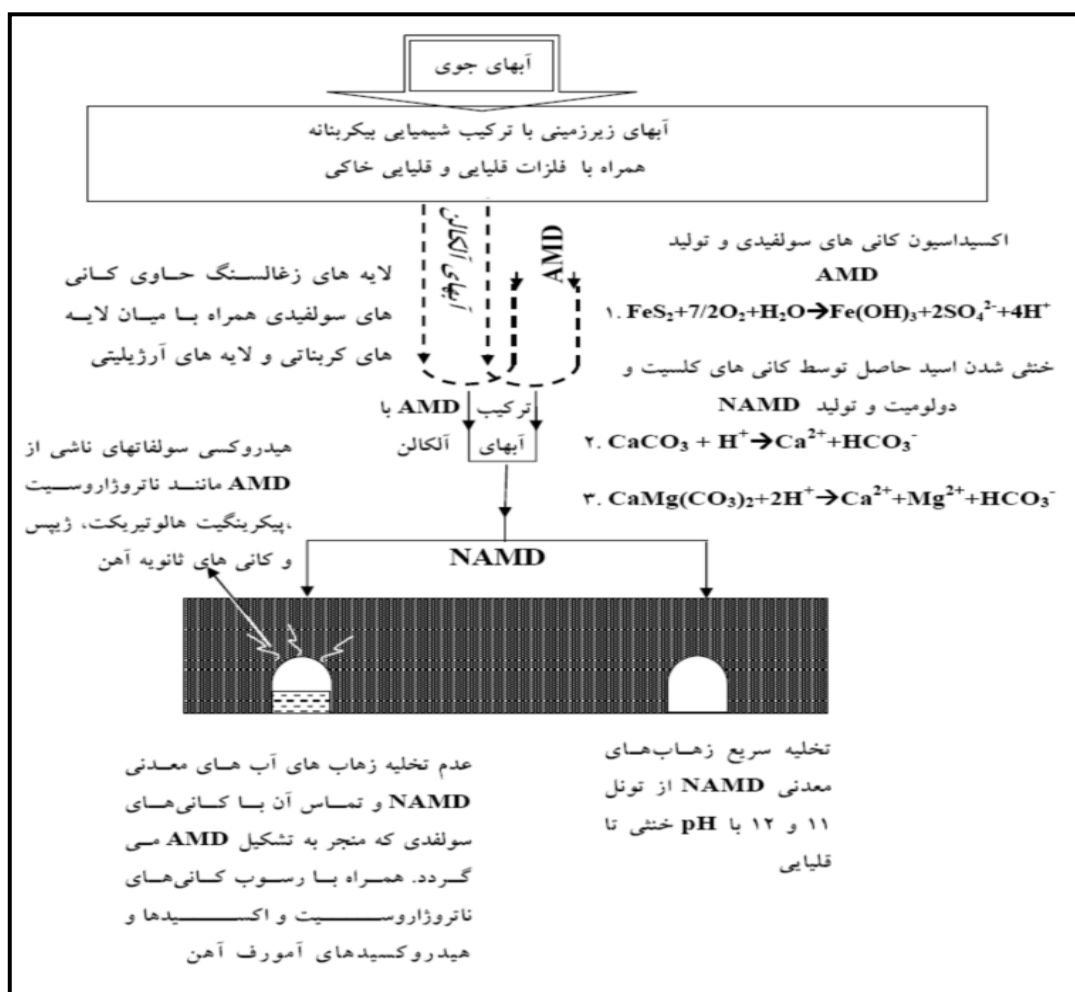
شده به راحتی از تونل‌ها خارج می‌شود. همچنین تونل‌هایی که زهکش طبیعی ندارد به دلیل پمپاژ مداوم آب از آن‌ها، طول زمان تماس آب با پیریت ناچیز است. در نتیجه زهاب‌های یادشده همچنان با pH خنثی تا قلیایی از تونل‌های استخراجی خارج می‌شود (شکل ۸). آب‌های زیرزمینی اولیه از نوع (Na-HCO₃-K-Ca-Mg) است [۱۳]. نمودار پایپر، دورو و چادها بیانگر این است که نوع اولیه آب‌های زیرزمینی طی فرایندهای یاد شده تغییر می‌کند. به طوری که ترکیب شیمیایی زهاب-های خنثی تا قلیایی به نوع قلیایی غیر کربناته (Na-HCO₃-SO₄) تبدیل می‌شود. همچنین مدل‌سازی هیدروژئوشیمی زهاب‌های خنثی تا قلیایی نشان می‌دهد که شاخص درجه‌ی اشباع شدگی برای کانی‌های ژاروسیت و آلونیت غیر اشباعی است، در حالی که کلسیت، دولومیت، آراگونیت، رودوکروزیت، هیدروکسیدهای منگنز، گیبست و اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن ابر اشباعی است. این امر به دلیل عدم تشکیل زهاب‌های اسیدی است. در برخی از تونل‌های معادن زغال‌سنگ و انبار-های باطله زغالی زهاب‌های معدنی و زهکش‌های ناشی از باطله‌های زغالی دارای pH خنثی تا قلیایی است این امر به علت عدم تماس طولانی آب با کانی‌های سولفیدی، تخلیه زهاب‌ها از تونل‌های معدنی، پایین بودن مقدار کانی‌های سولفیدی در رگه‌های زغالی و حضور میان لایه‌های کربناتی است [۱، ۲۶-۲۹]. به نظر می‌رسد عاملی که تونل ۱۳ معدن کارمزد را از تونل‌ها دیگر متمایز ساخته و در اسیدی شدن آن نقش موثری داشته است، عدم تحرک کافی آب در آن است. به طوری که هنگام نمونه برداری آب در داخل تونل تجمع یافته بود، لذا تماس این آب‌ها با کانی‌های سولفیدی منجر به گسترش زهاب اسیدی می‌شود (شکل ۸). در مرحله‌ی آغازین اکسایش پیریت، گستره‌ی pH برای واکنش‌های ژئوشیمیایی اهمیت کمتری دارد بنابراین لایه‌های نازک اسیدی در مقیاس نانومتری در سطوح کانی‌های سولفیدی رشد می‌کند، ولی در این حالت در pH کلی آب هیچ گونه تأثیری ایجاد نمی‌شود. به علت طولانی شدن زمان تماس آب‌های موجود با کانی‌های سولفیدی، فرایند اکسایشی گسترش می‌یابد و در نتیجه محیط‌های نانومتری به محیط‌هایی با مقیاس میکرومتری گسترش خواهد یافت. تشکیل کانی‌های ناتروژاروسیت در

سطوح میکرومتری در داخل افق‌های خاک ویا درزه‌ها و شکستگی‌های زغال‌سنگ و آریلیت‌ها، حضور اکسیدهای ثانویه آهن و کولیت در زون‌های اکسایشی و اکسیدهای ثانویه آهن در لبه‌های پیریت‌های نیمه شکل‌دار و رگچه‌ای خصوصاً در مناطقی با شکستگی‌های فراوان و نیز حضور کانی‌های پیکرینیت، هالوتریکیت و ژپس در شکستگی‌های سنگ‌ها دلیل این مدعا است. تجمع تدریجی این آب‌های اسیدی در داخل تونل منجر به کاهش pH و تشکیل زهاب اسیدی شده است. در بررسی دیگری [۳۰، ۳۱ و ۳۶] مهم‌ترین عامل در تشکیل زهاب‌های اسیدی در تونل‌های غیرفعال، عدم تحرک آب و تماس طولانی آن با کانی‌های سولفیدی تفسیر شده است. همچنین [۱۷، ۳۱-۳۳] گزارش کردند که در زهاب‌های اسیدی کانی ژاروسیت در حال تشکیل است. بنا بر ادعای [۹] با کاهش pH، غلظت سولفات و فلزات افزایش می‌یابد و منجر به تشکیل هیدروسولفات‌ها با تنوع بالایی از فلزات نظیر ملانتریت، هالوتریکیت، پیکرینیت، ژپس، کالکانتیت، بروکانتیت و گوسلاریت می‌شود. حضور آب با اسیدیته بالا از نظر ژئوشیمیایی افزایش سرعت واپاشی کانی‌های سولفیدی را به دنبال خواهد داشت [۱۰]. بررسی نمودار پراکنش نشان می‌دهد که با کاهش pH و افزایش SO₄²⁻ فلزات سنگین و فلزات قلیایی و قلیایی خاکی افزایش و غلظت HCO₃⁻ کاهش می‌یابد. در بررسی مشابه دیگری [۱۷، ۳۴، ۳۵] نتایج مطابق نتایج این پژوهش بدست آوردند. همبستگی شدید SO₄²⁻ با فلزات سنگین بیانگر همزمانی اکسایش پیریت و کانی‌های سولفیدی دیگر کانسار و انحلال فلزات سنگین آن‌ها است، که منجر به کاهش pH و افزایش غلظت سولفات و فلزات سنگین شده است. همچنین کاهش شدید HCO₃⁻ و افزایش غلظت Ca²⁺، Mg²⁺ و Mn²⁺ به قابلیت خنثی‌سازی سنگ میزبان وابسته است. در pH کمتر از ۶٫۳، بیکربنات‌های حاصل از انحلال کلسیت و دولومیت (واکنش‌های ۲ و ۳) بنابر واکنش ۴ به اسید کربنیک تبدیل می‌شود، لذا منجر به کاهش شدید HCO₃⁻ و افزایش Ca²⁺، Mg²⁺ و Mn²⁺ در زهاب‌های اسیدی معدن می‌شود [۷].



کربناتی نظیر کلسیت، دولومیت، آراگونیت و رودوکروزیت تحت اشباع است، دلیل آن تشکیل زهاب‌های اسیدی همراه با افزایش غلظت سولفات و فلزات است. همچنین بررسی‌های پراش پرتوی ایکس حضور کانی‌های ناتروژاروسیت و اکسیدها و هیدروکسیدهای آمورف آهن را اثبات کرد. در بررسی مشابه دیگری مشخص شد که ترکیب شیمیایی زهاب‌های اسیدی معادن متروک سرب و روی سنگون از نوع Ca-Mg-SO_4 است [۳۴]. همچنین در بررسی‌های دیگری مدل‌سازی هیدروژئوشیمیایی زهاب‌های اسیدی {۲۴، ۲۹، ۳۱ و ۳۳} نشان داد، شاخص درجه‌ی اشباع شدگی برای کانی‌های هیدروکسی سولفات‌ها و اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و آلومینیوم ابر اشباع است، در حالی که کانی‌های کربناتی کلسیت، دولومیت، آراگونیت و رودوکروزیت تحت اشباع‌اند [۲۶، ۳۲، ۳۴ و ۳۶] که مشابه با دستاوردهای این پژوهش است.

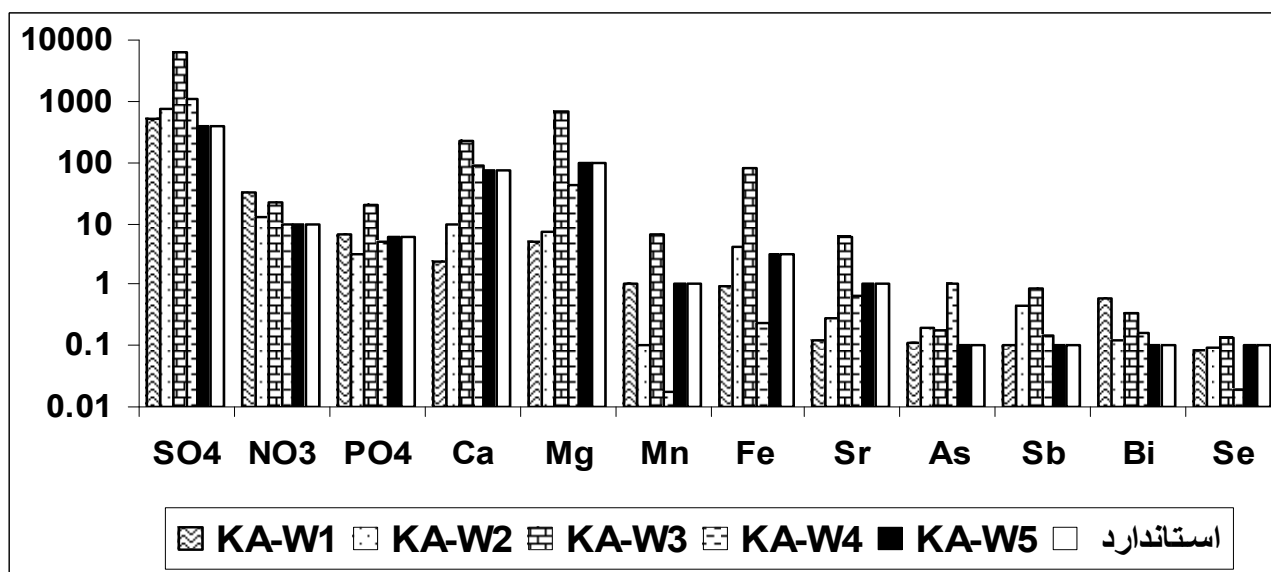
تشکیل زهاب اسیدی در تونل ۱۳ معدن کارمزد بیانگر آن است که مقدار اسید تولید شده بیشتر از قابلیت خنثی سازی سنگ میزبان است به طوری که منجر به کاهش pH تا ۴٫۵۹ شده است. ویژگی‌های شیمیایی آب‌های تخلیه شده از ۳۰ معدن متروک زغالسنگ در انگلستان و اسکاتلند مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱]. در این بررسی معلوم شد که در جایی که پتانسیل اسیدی با کانی‌های کربناتی خنثی نمی‌شود فاضلاب‌ها ماهیت اسیدی پیدا کرده و با pH کمتر از ۵٫۵ منجر به انحلال فلزات به ویژه آلومینیوم شده است. نمودارهای پایپر، دورو و چادها بیانگر آن است که ترکیب شیمیایی زهاب اسیدی در معادن کارمزد از نوع تیپ سولفاتی با کاتیون غالب منیزیم (Mg-SO_4) است. مدل سازی هیدروژئوشیمیایی نشان داد که کانی‌های ژاروسیت، آلونیت، هیدروکسیدها و اکسیدهای آهن و آلومینیوم به طور غالب ابر اشباع است، در حالی که کانی‌های



شکل ۸ مدل شبیه سازی شده از روند تشکیل زهاب‌های معدنی اسیدی و خنثی تا قلیایی در معادن کارمزد.

کیفیت شیمیایی آب‌های زیرزمینی می‌تواند تحت تاثیر عوامل مختلفی قرار گیرد، مهم‌ترین این عوامل عبارتند از سنگ-شناسی منطقه، بارندگی، تبخیر از سطح آبخوان، نفوذ آب‌های شور، ولی در هر منطقه عموماً یکی از عوامل مهم‌تر و موثرتر است [۳۷]. چنانکه در نمودارهای گیپس مشاهده می‌شود، هر دو نمودار روند یکسانی را نشان می‌دهند، و بیانگر این است که سنگ‌شناسی مهم‌ترین عامل افزایش غلظت یونی در زهاب‌های معدنی اسیدی و خنثی تا قلیایی است. بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد، کانی‌های پیریت، کلسیت، دولومیت و کانی‌های رسی خاستگاه اصلی ترکیب‌های شیمیایی در آب‌های یادشده است و منجر به افزایش غلظت یون‌های سولفات، بیکربنات و فلزات قلیایی و قلیایی خاکی می‌شود در آب‌های زهکش شده خنثی تا قلیایی از انباره‌های باطله زغالی کارخانه زغال‌شویی زیراب سنگ‌شناسی مهم‌ترین عامل افزایش غلظت یونی گزارش شده است. همچنین خاستگاه اصلی ترکیب‌های شیمیایی در آب‌های یاد شده کانی‌های پیریت، کلسیت، دولومیت و کانی‌های رسی تفسیر شده‌اند [۲۹]. بررسی پتانسیل آلودگی آب‌های یاد شده بنابر استانداردهای زیست محیطی کشور [۳۸] بیانگر آن است که در زهاب‌های اسیدی معدن میزان SO_4 , PO_4 , NO_3 , Ca, Mg, Fe, Sr, As, Mn, و Bi و Sb , Se بیشتر از حد استاندارد بوده و می‌تواند منجر به آلودگی آب‌های زیرزمینی شود (شکل ۹). با توجه به اینکه زهاب اسیدی معدن در عمق ۱۵۰۰ متری از تونل ۱۳ در حال تشکیل است، لذا بر اساس روش‌های مدیریت زهاب اسیدی، روش حوضچه آهکی برای کنترل آن پیشنهاد می‌شود. این روش سبب می‌شود تا، زهاب اسیدی معدن در محل تولید، خنثی شود و به بخش‌های دیگر سرایت نکند. در این روش بایستی در برکه‌های تشکیل شده در کف تونل ۱۳ قشر آهک ریخته شود. همچنین برای جلوگیری از ته نشینی اکسیدها و هیدروکسیدها آهن و آلومینیم، روی آهک و توقف واکنش‌های خنثی سازی، بایستی با مشاهده تشکیل اکسیدها و هیدروکسیدها آهن و آلومینیم با کمک چنگک آهک را زیرورو

کرد. زهاب‌های معدنی خنثی تا قلیایی به واسطه‌ی مرتفع بودن منطقه و شیب مناسب و یا پمپاژ مداوم وارد بستر خشک خاک‌های منطقه می‌شود. بنابراین به جریان آب‌های سطحی نظیر رودخانه چرات ملحق نمی‌شود که باعث مشکلات زیست محیطی شود. بدیهی ست که حرکت آن در زیر زمین با توجه به بیش از حد مجاز بودن میزان SO_4 , PO_4 , As, Sr, Ca, Sb و Bi می‌تواند منجر به آلودگی آب زیرزمینی منطقه شود. بدیهی ست هرگاه پمپاژ آب از این تونل‌ها متوقف شود pH آب به شدت کاهش می‌یابد که می‌تواند منجر به تشدید آلودگی‌ها شود (شکل ۹). چنانکه قبلاً یادآور شدیم، یکی از مهم‌ترین عوامل تشکیل زهاب اسیدی حضور آب در گارگاه‌های غیر فعال و تماس طولانی آن با کانی‌های سولفیدی است، بنابراین پیشنهاد می‌شود، تونل‌های متروک در معادن حوضه‌ی زغالی کارمزد که به دلیل نبود تهویه و خطر سقوط امکان دسترسی به آن میسر نبوده است، با فراهم کردن امکانات لازم مورد بررسی قرار گیرد. تا در صورت امکان از آلودگی آب‌های زیرزمینی جلوگیری شود. با توجه به اینکه در زغال‌سنگ‌های کارمزد تمرکز TiO_2 و عناصر Sr, Ba, Nb, Ce, Zr, Rb, V, و Y , Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Mo, W, Th, U, به مراتب بیشتر از غالب زغال‌سنگ‌های جهان است [۱۲] لذا این امر با توجه به خطرهای زیست محیطی زهاب اسیدی معدن که همواره افزایش تمرکز فلزات سنگین و عناصر فرعی و نادر را به دنبال دارد و نیز موقعیت حوضه زغالی کارمزد که در البرز مرکزی و ناحیه رویشی جنگل‌های خزری واقع شده است اهمیت آن را بسیار پیچیده می‌کند. به عنوان مثال در معادن زغالسنگ ولز انگلستان پس از تعطیل شدن معادن در سال ۱۹۹۲ و عدم کنترل فاضلاب‌های معدن، ورود زهاب‌های اسیدی با $\text{pH} = 4.2$ به درون کانال نیت منجر به نابودی کامل حیات آبی تا شعاع ۱۲ کیلومتری شده است [۳۹]. همچنین بنابر گزارش [۲، ۱۷، ۲۶، ۳۱-۳۶، ۴۰-۴۳] تمرکز بالای سولفات و فلزات در زهاب‌های اسیدی منجر به آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی شده است.



شکل ۹ پتانسیل آلودگی زهاب‌های معدنی اسیدی و خنثی تاقلیایی در معادن کارمزد نسبت به استاندارد تخلیه فاضلاب در آب‌های سطحی بر طبق استاندارد های زیست محیطی ایران.

مراجع

L.J. and Vaughan, D.J. (eds) Modern Approaches to Ore and Environmental Mineralogy, Mineralogical Association of Canada, Nepean, vol 27 (1998) 367-401.

[8] Dold B., "Basic concepts in environmental geochemistry of sulfide mine- waste", UNESCOY Society of Economic Geology (SEG) (2000) 58

[9] Nordstorm D.K. Alpers CN., "Negative PH, efflorescent mineralogy and consquences for environmenain Superfund site", California. Proc Natl Acad Sci USA 96(1999) 3455-3462.

[10] Wisotzky F., "Chemical Reactions in Aquifers Influenced by sulfide oxidation and in sulfide oxidation zone", Walter, G. Helmut, K. Wim, S. In Acidic Mining Lakes. Springer, (1998) 223-236.

[11] Thomas L., "coal geology", John Wiley 8 Sons Ltd (2002) 285-311.

[۱۲] قلی‌پور م.، مظاهری الف.، رقیمی م.، شمعانیان غ.م.،

"بررسی ویژگی‌های ژئوشیمیایی و کانی‌شناسی زغال‌سنگ‌های حوزه زغالی کارمزد، البرز مرکزی، استان مازندران"، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، سال هفدهم، شماره ۴، (۱۳۸۸) ۶۷۰-۶۵۵ ص.

[۱۳] شرکت زغال‌سنگ البرز مرکزی، "گزارش مربوط به عملیات اکتشاف زمین‌شناسی در محدوده زیرآب- کارمزد"

[1] Banks S.B., Banks D., "Abandoned mines drainage: Impact assessment and mitigation of discharges from coal mines in the UK", Engineering Geology. 60 (2001). 31-37.

[2] Gary N.F., "Environmental impact and remediation of acid mine drainage: A management problem", Environmental. Geology. 30(1997) 62-71.

[3] Kambole M.S., "Managing the water quality of the Kafue River", Physical Chemistry Earth 28 (2003) 1105-1109.

[4] Lupankwa K., Love D., Mapani B.S., Mseka S., "Impact of a base metal slimes dam on water systems, Madziwa Mine, Zimbabwe", Physical Chemistry Earth 29(2004) 1145-1151.

[5] Ferderer D.A., "U.S.Geological Survey Open-File Report 95-569", (1996) 42.

[6] Jambor J.L., "Mineralogy of sulfide- rich tailing and their oxidation products", In: Jambor, J.L. and Blowes, D.W. (eds). Short Course Handbook on Environmental Geochemistry of Sulfide Mine Waste, Mineralogical Association of Canada, Nepean, v 22 (1994) 56-102.

[7] Jambor J.L., Blowes D.W., "Theory and Applications of mineralogy in Environmental studies of sulfide- Bearing mine waste", In: Cabri,

Mining and Technology, in Chinese with English abstract, (1994) 88.

[۲۵] احسانی م.، "گوگردزدایی زغال سنگ به روش استخراج محلول آبی سدیم هیدروکسید (MCL)"، نشریه شیمی و مهندسی شیمی، سال ۲۰، شماره ۱ (۱۳۸۰) ۳۸-۳۱ ص.

[26] Foos A., "Geochemical modeling of coal mine drainage, summit county", Ohio Environmental Geology, vol 31(1998) 205-210.

[۲۷] دوراندیش م.، "بررسی اثرات زیست محیطی زهاب اسیدی در معدن مس سرچشمه"، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده علوم شهید باهنر کرمان (۱۳۸۱) ۵۸۰ ص.

[28] Shahbpour J., Doorandish M., Abbasnejad A., "Mine drainage water from coal mine of Kerman regin, Iran", Environmental Geology, vol 47(2005) 915-925.

[۲۹] قلی‌پور م.، مظاهری الف.، رقیمی م.، شمعیان غ.م.، "بررسی اثرات زیست محیطی زهاب اسیدی معدن در باطله‌های کارخانه زغال‌شویی زیرآب، استان مازندران"، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، سال هفدهم، شماره ۲، (۱۳۸۸) ۱۷۳-۱۸۶ ص.

[30] Geldenhuis S., bell F.G., "Acid mine drainage at a coal mine in the eastern trans vall, south Africa", Environmental Geology vol 34(1998) 235-242.

[31] Swayze G.A., etal., "Using imaging spectroscopy to map acidic mine waste", Environmental Science and Technology, vol. 34(2000) 47-54.

[32] Williams T.M., Smith B., "Hydrochemihcal characterization of acute and mine drainage at Iran Duke mine, Mazowe, Zimbabwe", Environmental Geology, vol 39(2000) 272-278.

[33] Haubrich F., Tichomivowa M., "Sulfur and oxygen isotope geochemistry of acid mine drainage – The polymetallic sulfide deposit", (Himmelfahrt Fundgrube). Freiberg (Germany) Isotopes Environ, Health stud. Vol 38(2)(2002) 121-138

[34] Lee C.H. Lee, H.K. Lee, J.S. Zoo, I., "Hydro geochemistry of mine, surface and ground waters from the sanggok mine creek in the upper Chungju Lake, Republic of Korea", Environmental Geology vol 40(2001) 482-495.

وزارت معادن فلزات، شرکت ملی فولاد ایران (۱۹۶۹-۱۹۷۰) ۱۹۳ ص.

[14] Damage Aktiongesellschaft., "The coal Deposits of Zirab- Karmozd Iran. Part 1", Geology and Coal Reserves.(1962) 181.

[۱۵] قلی‌پور م.، مظاهری الف.، رقیمی م.، شمعیان غ.م.، "بررسی نحوه پراکندگی اکسیدهای اصلی و عناصر جزئی و نادر در زغال سنگ‌های کارمزد-استان مازندران"، مجموعه مقالات چهاردهمین همایش بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، جلد ۱ (۱۳۸۵) ۲۶۲-۲۵۳ ص.

[۱۶] شرکت زغالسنگ سامان.، "گزارش مرتبط به میزان استخراج زغال سنگ از معدن کارمزد"، (۱۳۸۳) ۷ ص.

[17] Kim J.J., Kim S.J., Tazaki K., "mineralogical characterization of microbial ferrihydrite and schwertmannite, and mon- biogenic AL- sulfate precipitates from acid mine drainge in the Donghae mine area, Korea", Environmental Geology, vol 42(2002.) 19-31.

[18] Chadha D.K., "Proposed new diagram for geochemical classification of natural waters and interpretation of chemical data", Hydrogeology Journal, 7(1999) 431-439.

[19] Gibbs R.J., "Mechanisms controlling world water chemistry", science 17(1970)1088-1090.

[20] Parkhurst D.L., Thorstenson D.C., Plummer L.N., "PHREEQE a computer program"

[21] Merritt R.D., "Thermal alteration and rank variation of coals in the Matanuska field, south-centpal Alaska", International Journal of Coal Geology, 14 (1990) 255-276.

[22] Sullivan M., Gray N.F., Oneill C., "Synoptic overview of the Avoca- Avon more Catchment and the Avoca mines", Technical Report: 26, Water Technology Research, Trinity College. University of Dublin, (1995) 43.

[23] Alexandra N.G., Paul F.C., "Changes in geochemistry and mineralogy of thermally altered coal, Upper Hunter Vally", Australia Coal Geology. 51(2004) 197-210.

[24] Wang Y.Q., "Study on occurrence and distributions of minor and trace element in coal and its combustion products", Ph.D. Thesis, Beijing Graduate School, China University of

- [40] Cidu R., Caboi R., Fanfani L., Frau F., "Acid drainage from sulfides hosting gold mineralization (Furtei, Sardinia)", Environmental Geology 30(3/4), (1997) 231- 234.
- [41] Benvenuti M., Mascaro I., Corsini F., Lattanzi P., Parini P., Tanelli G., "Mine Waste dumps and heavy metal pollution in abandoned mining district of Boccheggiano (Southern Tuscany, Italy)", Environmental Geology, 30, (3/4), (1997)238-243.
- [42] Williams M., "Arsenic in mine Waters: an international Study", Environmental Geology, 40(3), (2001)267-278.
- [43] Zilberchmidt M., Shpirt M., Kominitsas K., Paspaliaris I., "Feasibility of thermal Treatment of high sulfur coal wastes", Minerals Engineering, vol. 17(2004)175-182.
- [35] Ravengai D., Love D., Love I., Gratwicke B., Mandingaisa O., Owen R.J.S., "Impact of iron Duke pyrite mine on water chemistry aquatic Life-Mazowe Vally, Zimbabwe", (2005) 219-228.
- [36] Chon H.T., Hwang J.H., "Geochemical characteristics of the acid mine drainage in the water system the vicinity of the Dogye coal mine of Korea", Environmental Geology and Health, 22(2000) 155-172.
- [۳۷] ناصری ح.ل.، "بررسی هیدروشیمیایی/یخوان حوضه قره سو در دشت گرگان"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده علوم (۱۳۸۰) ۱۱۹ ص.
- [۳۸] سازمان حفاظت محیط زیست، "ضوابط و استانداردهای زیست محیطی"، انتشارات دایره سبز (۱۳۸۲) ۱۵۰ ص.
- [39] Butter D., Mills M., Davise G., Bourn G., Foolchand D., "A survey of ferruginous mine water impacts in the welsh coal filds, Welsh office contract no", WEP 138/11, NRA. Welsh Region Report, (1994) 41.