

ارزیابی پتانسیل تولید زهاب اسیدی توسط باطله‌های معدن طزره، شمال شرق ایران

ابراهیم ربیعی^۱، گیتی فرقانی‌تهرانی^{۲*} و سمیه زارعی دودجی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد زمین‌شناسی، دانشکده علوم‌زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲- استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم‌زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۳- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم‌زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

نویسنده مسئول: * forghani@shahroodut.ac.ir

نوع مقاله: پژوهشی

پذیرش: ۱۴۰۳/۸/۱۴

دریافت: ۱۴۰۳/۶/۱۹

چکیده

معدن زغال‌سنگ طزره در زون ساختاری البرز شرقی، شمال شرق ایران، واقع شده است. هدف از این تحقیق، بررسی ویژگی‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی باطله‌های حاصل از استخراج معدن زغال‌سنگ طزره و ارزیابی قابلیت تشکیل زهاب اسیدی در اثر اکسیداسیون باطله‌های معدنی است. به این منظور ۸ نمونه معرف برداشت شد و نمونه‌ها توسط مطالعات میکروسکوپی، ژئوشیمیایی و آزمون‌های استاتیک پیش‌بینی پتانسیل تولید اسید، مورد بررسی قرار گرفت. مطالعات کانی‌شناسی نشان‌دهنده حضور پیریت، کالکوپیریت، آرسنوپیریت، کالکوزیت، مارکاسیت، آلپیت، کائولینیت و کوارتز در نمونه‌ها است. کانی پیریت به صورت ذرات بلوری گوشه‌دار، کروی، تجمعات فرامبوئیدی یا پرکننده درز و شکاف‌ها حضور دارد. نمونه‌ها نسبت به عناصر منگنز و آهن بدون غنی‌شدگی، نسبت به عناصر نیکل، کروم، مس و سرب دارای غنی‌شدگی قابل توجه و نسبت به عناصر آرسنیک و روی دارای غنی‌شدگی خیلی زیاد می‌باشند. بیشترین غلظت عناصر در نمونه شماره ۶ مشاهده می‌شود. بر اساس نتایج آزمایش‌های استاتیک پیش‌بینی تولید زهاب اسیدی معدن، pH گل اشباع نمونه‌ها بیشتر از ۴ و هدایت الکتریکی گل اشباع ۶ نمونه بیشتر از ۲۰۰۰ $\mu\text{S}/\text{cm}$ می‌باشد. نمونه شماره ۶ و نمونه شماره ۲ دارای پتانسیل تولید اسید بیشتری در مقایسه با سایر نمونه‌ها هستند، و مشاهدات صحرایی شامل اندازه‌گیری pH و هدایت الکتریکی آب‌های معدنی، مؤید این نتیجه‌گیری است. نتایج این پژوهش بیانگر ضرورت انجام اقدامات مدیریتی زیست‌محیطی باطله‌های حاصل از استخراج معدن زغال‌سنگ طزره است.

واژه‌های کلیدی: زهاب اسیدی معدن، آزمون استاتیک، باطله زغال‌سنگ، طزره، عناصر سمی

۱- پیشگفتار

زغال‌سنگ یکی از مهم‌ترین سوخت‌های فسیلی است که از دیرباز مورد استفاده بشر قرار گرفته است. کاربرد وسیع زغال‌سنگ به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد این منبع ارزشمند است؛ با این وجود، بهره‌برداری از معادن زغال‌سنگ با مشکلات زیست‌محیطی بسیار متعدد مانند تخریب زمین، فرونشست و ریزش معدن، آتش‌سوزی معدن، نشت گازهای سمی، انفجارات معدنی، انباشت حجم زیادی باطله ناشی از استخراج و فرآوری، افزایش خطر سیل، آلودگی صوتی، ایجاد گرد و غبار و آلودگی هوا، آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی، آلودگی خاک، تولید زهاب اسیدی معدن و انتشار عناصر بالقوه سمی همراه است (دونتالا و همکاران، ۲۰۱۵؛ سلبی و ربیریو، ۲۰۲۳). زهاب اسیدی معدن یکی از بزرگ‌ترین مشکلات زیست محیطی صنعت معدنکاری در دنیا محسوب می‌شود.

ویژگی‌های مهم زهاب اسیدی عبارتند از pH اسیدی، غنی بودن از یون‌های فلزی آهن، آلومینیم، منگنز، کادمیم، مس، سرب، روی و جیوه و سولفات، و مقدار زیاد هدایت الکتریکی (ماهانتا، ۲۰۲۴). در نتیجه، کیفیت محیط در مناطقی که زهاب اسیدی تشکیل می‌شود، به شکل جدی تحت تأثیر قرار می‌گیرد (لوترموزر، ۲۰۱۰)، اثرات مخرب زهاب اسیدی می‌تواند برای دهه‌ها و قرن‌ها پس از بسته شدن معدن باقی بماند (مک‌کارتی، ۲۰۱۱).

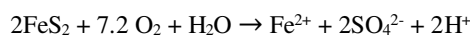
بیشتر باطله‌های معادن زغال‌سنگ حاوی مقادیر زیادی از کانی‌های سولفیدی، به ویژه پیریت، آرسنوپیریت و مارکازیت می‌باشند. انحلال و اکسیداسیون پیریت و مارکازیت، نقش اصلی را در تولید زهاب اسیدی معدن ایفا می‌کند (شارما آکاریا و کارل، ۲۰۲۰). اکسیداسیون پیریت را می‌توان با سه مرحله اصلی توصیف نمود (بانرجی، ۲۰۱۴):

تست‌های استاتیک نرخ تولید یا مصرف اسید محاسبه می‌شود و در این نوع آزمون‌ها، عامل زمان در نظر گرفته نمی‌شود. با توجه به نتایج آزمون‌های استاتیک می‌توان توازن بین فرآیندهای تولید اسید (اکسیداسیون کانی‌های سولفیدی) و فرآیندهای خنثی‌سازی اسید (انحلال کربنات‌ها و هوازدگی سیلیکات‌ها) را مورد ارزیابی قرار داد (بانرجی، ۲۰۱۴). بسیاری از آزمایش‌های استاتیک به سادگی در محل معدن قابل انجام بوده و به دلیل این که ارزان و سریع می‌باشند، رایج‌تر از آزمایش‌های سینتیک هستند. محدودیت اصلی این آزمایش‌ها این است که برآوردی از کیفیت زهاب به دست نمی‌دهند (دولد، ۲۰۱۷). محدودیت‌های انجام آزمایش‌های سینتیک عبارتند از هزینه زیاد، نیاز به تجهیزات و امکانات ویژه، و مدت زمان نسبتاً طولانی برای انجام این آزمایش‌ها (سویک و همکاران، ۱۹۷۸). بنابراین، برای ارزیابی اولیه پتانسیل تولید زهاب اسیدی معدن، استفاده از روش‌های استاتیک به رغم محدودیت‌های موجود، بسیار رایج است. معدن زغال‌سنگ طزره با استخراج سالانه ۱۷۰ تا ۱۸۰ هزار تن زغال‌سنگ، یکی از معادن بزرگ زغال‌سنگ البرز شرقی است. معدنکاری و استخراج زغال‌سنگ در محدوده طزره باعث تولید حجم زیادی از باطله‌های معدنی شده است که در اطراف معدن دورریزی شده‌اند. هدف اصلی انجام این پژوهش بررسی پتانسیل تولید زهاب اسیدی توسط باطله‌های دپو شده در اطراف معدن با استفاده از مطالعات کانی‌شناسی، ژئوشیمیایی و آزمون‌های استاتیک (اندازه‌گیری pH و EC گل اشباع، محاسبه اسید و باز، و تعیین میزان تولید و مصرف اسید خالص) می‌باشد.

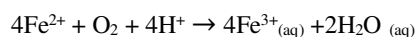
۲- موقعیت جغرافیایی و آب و هوای منطقه

معدن زغال‌سنگ طزره در فاصله حدود ۷۰ کیلومتری جنوب غربی شهر شاهرود و ۴۵ کیلومتری شمال‌شرقی شهر دامغان در مختصات جغرافیایی ۳۶ درجه و ۲۳ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی و ۵۴ درجه و ۱۸ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۳۰ دقیقه طول شرقی واقع شده است (شکل ۱). محدوده زغال‌سنگ شامل چهار معدن اصلی (مجموعه کلاریز، مجموعه مادر، مجموعه برناکی و مجموعه رزمجا) و تعدادی معدن شخصی می‌باشد.

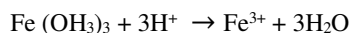
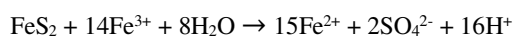
(۱) اکسیداسیون گوگرد



(۲) اکسیداسیون آهن دو ظرفیتی



(۳) هیدرولیز و رسوب‌گذاری کانی‌ها و کمپلکس‌های آهن سه ظرفیتی



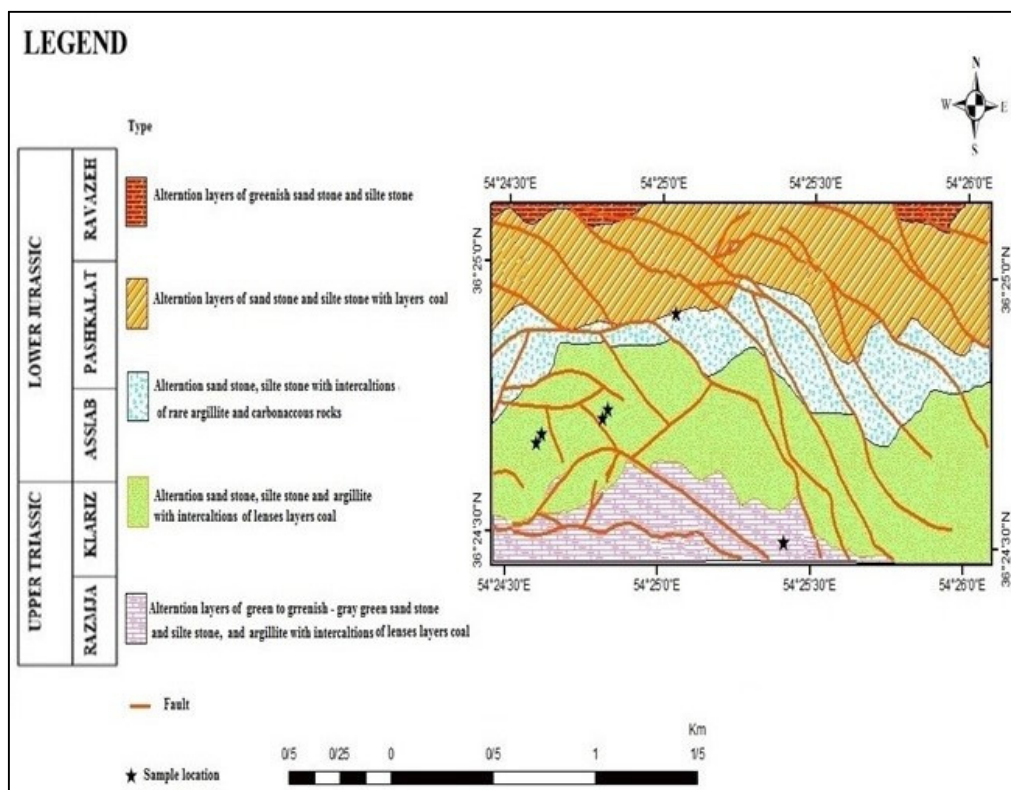
مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده تولید زهاب اسیدی عبارتند از: اندازه، مساحت سطحی و مقدار کانی‌های تولیدکننده اسید (به ویژه پیریت) و کانی‌های مصرف‌کننده اسید (به ویژه کلسیت)، حضور باکتری‌های تسریع‌کننده فرآیند اکسایش (مانند باکتری‌های اکسیدکننده سولفور و آهن به ویژه تیوباسیلوس فروکسیدانز)، درجه حرارت محیط و اکسیژن موجود در آب‌های سطحی و منفذی (شارما آکاربا و کارل، ۲۰۲۰). ذرات ریز پیریت نسبت به ذرات درشت‌تر، سطح وسیع‌تر و واکنش‌پذیری بیشتری دارند و اسید بیشتری تولید می‌کنند (ارگولر و همکاران، ۲۰۱۵). باکتری‌ها قابلیت سرعت بخشیدن اکسیداسیون Fe^{2+} به Fe^{3+} را در شرایط اسیدی داشته و انرژی لازم برای این واکنش‌ها را تأمین می‌کنند. فعالیت باکتری‌ها به pH و دمای محیط وابسته است، به گونه‌ای که این باکتری‌ها در pH حدود ۲ تا ۳ و دمای بین ۲۵ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد بسیار فعال هستند (افتخاری و همکاران، ۲۰۲۰). اکسیداسیون پیریت یک فرآیند گرمازا است که موجب انتقال گرما در دپوهای باطله و معادن زیرزمینی و تولید اسید می‌شود (بانرجی، ۲۰۱۴). با توجه به مشکلات زیست-محیطی ناشی از تشکیل زهاب اسیدی معدن، پیش‌بینی تولید زهاب به ویژه در معادن زغال‌سنگ که در آن‌ها حجم وسیعی از باطله‌های معدنی تولید می‌شود بسیار ضروری است (زوالن و همکاران، ۲۰۲۳). محققان بر این باورند که کنترل تولید زهاب اسیدی غیرممکن بوده، و خنثی کردن زهاب اسیدی نیز فرآیندی بسیار پرهزینه است. بنابراین پیش‌بینی تولید زهاب اسیدی، به عنوان اولین و مهم‌ترین گام در مدیریت تشکیل زهاب اسیدی، از اهمیت زیادی برخوردار است (آبروسیمووا و همکاران، ۲۰۱۵). روش‌های مختلفی برای ارزیابی و پیش‌بینی پتانسیل تولید زهاب اسیدی معدن وجود دارد که آزمون‌های استاتیک و آزمون‌های سینتیک از رایج‌ترین آن‌ها می‌باشند. در

تبخیر و تعرق ایستگاه دامغان به ترتیب ۱۰۶/۵ و ۱۳۰۶/۲ میلی‌متر است (سالنامه آماری هواشناسی، ۱۳۹۵). بر اساس داده‌های درجه حرارت و بارش، مقدار ضریب خشکی دمازن منطقه (رابطه ۱) برابر با ۱۹/۱ است:

$$I = \frac{P}{T} + 10 \quad (1)$$

در این رابطه، I برابر ضریب خشکی، P برابر مقدار بارش بر حسب میلی‌متر و T درجه حرارت بر حسب درجه سانتی‌گراد می‌باشد. بر اساس رده‌بندی دمازن، منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم نیمه‌خشک (ضریب خشکی بین ۱۰ تا ۱۹/۹) است.

منطقه طزره، از نظر اقلیمی تحت تأثیر جبهه‌های مدیترانه‌ای که از سمت غرب وارد می‌شوند و همچنین جبهه‌های سیبری که از سمت شمال نفوذ می‌کنند، قرار دارد. جهت باد غالب منطقه غرب به شرق است (سالنامه آماری هواشناسی، ۱۳۹۵). در فصل تابستان تغییرات دمایی بین ۱۰+ تا ۳۵+ درجه سانتی‌گراد در هر شبانه روز و در زمستان ۱۰+ تا ۲۰- درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین دمای سالانه ایستگاه هواشناسی دامغان ۸/۷، ۲۱/۸ و ۱۲/۷ درجه سانتی‌گراد، و حداقل، حداکثر و میانگین بارندگی سالانه به ترتیب ۳۴، ۳۰۸ و ۱۱۶/۶ میلی‌متر، و بارش برف در حدود ۱۵۰ میلی‌متر گزارش شده است. میانگین ماهانه و سالانه



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی معدن زغال‌سنگ طزره
Fig. 1. Geological map of the Tazare Coal Mine

۳- زمین‌شناسی منطقه

ناحیه مورد مطالعه از نظر زمین‌شناسی در قسمت جنوب شرقی رشته‌کوه‌های البرز (زون ساختاری البرز شرقی) واقع شده است. سنگ‌های رخنمون‌یافته در منطقه شامل ماسه‌سنگ و شیل‌های زغال‌دار سازند شمشک (تریاس بالایی تا ژوراسیک زیرین)، رسوبات آبرفتی عهد حاضر و

پادگانه‌های آبرفتی قدیمی حاوی گراول ماری و کوارتز است (شکل ۱). نبود چینه‌شناسی (لایه سرخ بوکسیتی که بر روی سازند الیکا قرار گرفته است)، سازندهای الیکا و شمشک را از یکدیگر جدا می‌کند. بر روی سازند شمشک نیز سنگ‌های آهکی سازند دلیچای قرار گرفته است. سازند شمشک در منطقه طزره به سه زیر بخش به نام‌های

باطله برداشت شد تا احتمال برداشت باطله‌های هوازده کاهش یابد. در جدول ۱ موقعیت جغرافیایی و توصیف نمونه‌های معرف برداشت شده از باطله‌های معدن طزره ارائه شده است. به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتدا هر نمونه در آزمایشگاه توسط دستگاه خردایش، خرد و همگن شد. سپس نمونه‌ها از الک ۲۰۰ مش (۷۵ میکرون) عبور داده شد، و بخش عبور داده شده از الک، به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در آون قرار گرفت. به منظور بررسی ویژگی‌های پتروگرافی و کانی‌شناسی نمونه‌های باطله‌های معدن طزره، از نمونه‌ها مقطع صیقلی تهیه شد. برای شناسایی کانی‌های موجود در نمونه‌های باطله، از دستگاه طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس (XRD) فیلیپس مدل PW1800 استفاده شد. غلظت اکسیدهای اصلی و عناصر جزئی بالقوه سمّی به وسیله دستگاه فلورسانس پرتو ایکس (XRF) مدل Shimadzu-1800، اندازه‌گیری شد.

پشکلات، آسیاب و کلاریز تقسیم می‌شود. از نظر چینه‌شناسی رسوبات زغال‌دار متعلق به زیربخش‌های کلاریز و پشکلات می‌باشند. منطقه پشکلات که جزئی از مناطق زغال‌خیز تریاس-ژوراسیک طزره است و امتداد لایه‌های آن شرقی-غربی می‌باشد، از غرب به منطقه کلاریز و از شرق به منطقه رزمجا منتهی می‌شود.

۴- روش انجام تحقیق

۴-۱- نمونه‌برداری، آماده‌سازی و تجزیه شیمیایی نمونه‌ها

نمونه‌برداری از چهار محدوده اصلی (حوضه‌های کلاریز، برناکی، مادر و رزمجا غربی) انجام شد (شکل ۲)، به این صورت که در مجموع ۸ نمونه معرف از باطله‌های قدیمی سینه‌کار و باطله‌های استخراج برداشت شد. هر نمونه معرف از ۱۵ تا ۲۰ جزء نمونه تشکیل می‌شود، جزء نمونه‌ها با یکدیگر ترکیب شدند و یک نمونه معرف بدست آمد. هر جزء نمونه از عمق ۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر از سطح توده‌های



شکل ۲. موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری باطله‌های زغال‌سنگ معدن طزره

Fig. 2. The location of the spoil samples of the Tazare Coal Mine

جدول ۱. توصیف نمونه‌های معرف برداشت شده از باطله‌های معدن زغال‌سنگ طزره

Table 1. Description of the representative spoil samples of the Tazare Coal Mine

نمونه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱ استخراج غربی (رزمجا)	۵۴° ۲۵' ۲۵"	۳۶° ۲۴' ۳۰"
۲ سینه‌کار برناکی	۵۴° ۲۴' ۵۰"	۳۶° ۲۴' ۴۴"
۳ استخراج مادر	۵۴° ۲۵' ۰۳"	۳۶° ۲۴' ۵۵"
۴ سینه‌کار مادر	۵۴° ۲۵' ۰۴"	۳۶° ۲۴' ۵۴"
۵ سینه‌کار کلاریز	۵۴° ۲۴' ۳۶"	۳۶° ۲۴' ۴۰"
۶ سینه‌کار غربی (رزمجا)	۵۴° ۲۵' ۲۵"	۳۶° ۲۴' ۳۰"
۷ استخراج برناکی	۵۴° ۲۴' ۴۹"	۳۶° ۲۴' ۴۳"
۸ استخراج کلاریز	۵۴° ۲۴' ۳۷"	۳۶° ۲۴' ۴۱"

۴-۲- محاسبه ضریب غنی‌شدگی عناصر بالقوه سمی در نمونه‌های باطله

برای بررسی میزان تجمع یک عنصر در رسوب، سنگ یا باطله از ضریب غنی‌شدگی^۱ (EF) استفاده می‌شود:

$$EF = (M_1 / C_1) / (M_2 / C_2) \quad (2)$$

در این رابطه، M_1 و C_1 به ترتیب نشانگر غلظت عنصر مورد بررسی و غلظت عنصر بهنجارکننده (Al) در نمونه مورد مطالعه و M_2 و C_2 به ترتیب نشانگر غلظت عنصر مورد بررسی و غلظت عنصر بهنجارکننده در نمونه (ترکیب میانگین پوسته زمین) می‌باشد. با استفاده از محاسبه این ضریب، می‌توان میزان غنی‌شدگی نمونه از عناصر مورد بررسی را ارزیابی نمود: $EF < 2$: بدون غنی‌شدگی؛ $2 \leq EF < 5$: غنی‌شدگی متوسط؛ $5 \leq EF < 20$: غنی‌شدگی قابل توجه؛ $20 \leq EF < 40$: غنی‌شدگی خیلی زیاد؛ و $EF \geq 40$: غنی‌شدگی شدید (ساترلند، ۲۰۰۰).

۴-۳- بررسی پتانسیل تولید زهاب اسیدی

در آزمایش‌های استاتیک توازن بین فرآیندهای تولید اسید (اکسیداسیون کانی‌های سولفیدی) و فرآیندهای خنثی‌سازی اسید (انحلال کربنات‌ها و هوازدهی سیلیکات‌ها) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (سوبک و همکاران، ۱۹۷۸). روش‌های استاتیکی مورد استفاده در این مطالعه عبارتند از:

۱- اندازه‌گیری pH و هدایت الکتریکی^۲ (EC) گل اشباع

۲- ارزیابی تولید یا مصرف اسید (روش آمریکای شمالی)

➤ محاسبه حداکثر پتانسیل تولید اسید^۳ (MPA)

➤ آزمایش ظرفیت خنثی‌سازی اسید^۴ (ANC)

➤ محاسبه پتانسیل تولید اسید خالص^۵ (NAPP)

۳- آزمایش‌های استاتیکی محاسبه اسید-باز^۶ (ABA) (روش استرالیا و اقیانوسیه)

➤ آزمایش پتانسیل اسید^۷ (AP)

➤ آزمایش پتانسیل خنثی‌سازی^۸ (NP)

➤ تعیین پتانسیل خنثی‌سازی خالص^۹ (NNP)

۴- آزمایش تشکیل اسید خالص^{۱۰} (NAG)

۵- آزمایش پتانسیل اسید خالص^{۱۱} (NAP).

آزمون‌های نامبرده بر اساس دستورالعمل مند (۲۰۰۱) به شرح زیر انجام شد.

۱- آزمایش اندازه‌گیری pH و هدایت الکتریکی (EC) گل اشباع

۲۰ گرم نمونه عبور کرده از الک ۶۰ مش با در نظر گرفتن نسبت جامد به آب ۱:۱ با ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر مخلوط شد تا گل اشباع تهیه شود. سپس نمونه توسط میله شیشه‌ای به مدت ۱۰ ثانیه هم زده شد. pH و EC گل اشباع توسط قرار دادن الکتروود pH و EC داخل گل اشباع بعد از گذشت ۱۲ تا ۱۴ ساعت تعیین شد.

۲- ارزیابی تولید یا مصرف اسید (بر اساس روش آمریکای شمالی)

محاسبه حداکثر پتانسیل تولید اسید (MPA)

برای محاسبه حداکثر پتانسیل تولید اسید (MPA) مقدار گوگرد موجود در نمونه (که از آزمایش XRF به دست آمده) در عدد $30.6 / \%S$ ضرب می‌شود (رابطه ۳). واحد (MPA) برابر با کیلوگرم اسیدسولفوریک به ازای یک تن باطله است.

$$MPA (Kg H_2SO_4 t^{-1}) = \%S \times 30.6 \quad (3)$$

در این تخمین، حداکثر مقدار اسیدی که در یک تن باطله می‌تواند ایجاد شود به دست می‌آید. در محاسبه MPA فرض می‌شود که کل گوگرد موجود به صورت پیریت حضور دارد.

آزمایش ظرفیت خنثی‌سازی اسید (ANC)

در این آزمایش بخشی از اسید حاصل از اکسیداسیون پیریت، با کانی‌های خنثی‌کننده اسید موجود در نمونه واکنش می‌دهد. با استفاده از نتایج آزمایش تعیین ظرفیت خنثی‌سازی اسید (ANC) می‌توان ظرفیت خنثی‌کنندگی نمونه را به دست آورد. به این منظور، ۱۰ گرم نمونه عبور داده شده از الک ۴۰۰ مش، در بشر ۲۵۰ میلی‌لیتری ریخته شد و به آن ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه شد. پس از قرار دادن نمونه به مدت ۱۵ دقیقه روی شیکر، pH ثبت شد. سپس نمونه با اسیدسولفوریک ۱ نرمال تیتر شد تا به pH ۳/۵ برسد. ظرفیت خنثی‌سازی نمونه از رابطه (۴) به

⁷ Acid Potential

⁸ Neutralization Potential

⁹ Net Neutralization Potential

¹⁰ Net Acid Generation

¹¹ Net Acid Production

¹ Enrichment Factor

² Electrical Conductivity

³ Maximum Potential Acidity

⁴ Acid Neutralizing Capacity

⁵ Net Acid Producing Potential

⁶ Acid-Base Accounting

آزمون پتانسیل خنثی‌سازی نمونه (NP)

قبل از انجام این آزمایش باید آزمایش فیز انجام گیرد تا حجم (V) و نرمالیتته (N) اسید و باز مورد استفاده در آزمایش مشخص شود. فیز صدایی است که در اثر اضافه کردن اسید به نمونه شنیده می‌شود. برای انجام این آزمایش ۰/۵ گرم نمونه عبور کرده از الک ۱۸ مش در بشر ۱۰۰ میلی‌لیتری ریخته شد و چند قطره اسید کلریدریک ۲۵ درصد به آن اضافه شد. بر اساس صدایی که شنیده شد، حجم و نرمالیتته اسید و نرمالیتته باز مورد استفاده در آزمایش مشخص شد. برای تعیین پتانسیل خنثی‌سازی نمونه (NP)، ۲ گرم نمونه عبور کرده از الک ۶۰ مش در یک ارلن مایر ۲۵۰ میلی‌لیتری ریخته شد و در ابتدا ۲۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۰/۱ نرمال به آن اضافه شد. سپس ارلن را روی هیتر گذاشته وقتی به نقطه جوش رسید آن را تکان داده تا واکنش کامل شود (هیچ حبابی از آن خارج نشود). سپس ۱۲۵ میلی لیتر آب مقطر به نمونه اضافه شد و به مدت یک دقیقه محلول جوشانده شد. پس از آن اجازه داده شد تا نمونه به اندازه دمای اتاق سرد شود. در این حالت درب نمونه‌ها باید بسته باشد. در مرحله بعد نمونه با هیدروکسید سدیم مطابق با نرمالیتته اسید مصرف شده تیترا شد تا pH به ۷ برسد و برای حداقل ۳۰ ثانیه ثابت بماند. اگر هیدروکسید سدیم استفاده شده برای رسیدن pH به ۷، کمتر از ۳ میلی لیتر باشد اسید اضافه شده در مرحله قبلی کافی نبوده و آزمایش با استفاده از آزمایش فیز تکرار می‌شود. پتانسیل خنثی‌سازی (NP) از رابطه (۷) به دست می‌آید و واحد آن کیلوگرم کربنات کلسیم به ازای یک تن باطله است.

$$NP (Kg CaCO_3 t^{-1}) = [(N \times V (ml) \text{ of } HCl) - (N \times V (ml) \text{ of } NaOH)] \times 50/W (g) \quad (7)$$

در این رابطه N برابر با نرمالیتته اسید یا باز، V برابر با حجم نمونه (بر حسب میلی‌لیتر) و W برابر با وزن نمونه (بر حسب گرم) است.

پتانسیل خنثی‌سازی خالص (NNP)

از اختلاف پتانسیل تولید اسید (AP) و پتانسیل خنثی‌سازی نمونه (NP)، پتانسیل خنثی‌سازی خالص نمونه (NNP) به دست می‌آید (رابطه ۸) و از این طریق، پتانسیل تولید زهاب اسیدی توسط نمونه مشخص می‌شود:

$$NNP (Kg CaCO_3 t^{-1}) = NP (Kg CaCO_3 t^{-1}) - AP (Kg CaCO_3 t^{-1}) \quad (8)$$

دست می‌آید و واحد آن کیلوگرم اسید سولفوریک به ازای یک تن باطله است. در این تخمین، مقدار اسیدی که توسط نمونه می‌تواند خنثی یا مصرف شود، به دست می‌آید (سوبک و همکاران، ۱۹۷۸).

$$ANC (Kg H_2SO_4 t^{-1}) = \frac{V(ml) \times 0.049 \times 1000}{W(g)} \quad (4)$$

در این رابطه V برابر با حجم اسید سولفوریک (بر حسب میلی لیتر) و W برابر با وزن نمونه (بر حسب گرم) می‌باشد.

محاسبه پتانسیل تولید اسید خالص (NAPP)

برای محاسبه پتانسیل تولید اسید خالص (NAPP) ابتدا حداکثر پتانسیل تولید اسید (MPA، حجم اسیدی که توسط کربنات کلسیم موجود در باطله خنثی می‌شود)، از ظرفیت خنثی‌سازی اسید (ANC، حجم اسیدی که توسط کانی‌های تولیدکننده اسید تولید می‌شود)، کم می‌شود (رابطه ۵). واحد پتانسیل تولید اسید خالص، کیلوگرم اسید سولفوریک به ازای یک تن باطله است (سوبک و همکاران، ۱۹۷۸).

$$NAPP (Kg H_2SO_4 t^{-1}) = MPA (Kg H_2SO_4 t^{-1}) - ANC (Kg H_2SO_4 t^{-1}) \quad (5)$$

۳-آزمون‌های استاتیکی ABA یا محاسبه اسید- باز

آزمایش‌های استاتیکی ABA، از معتبرترین آزمایش‌هایی هستند که برای ارزیابی پتانسیل تولید اسید نمونه‌های معدنی استفاده می‌شوند. این آزمایش‌ها کیفی بوده و در آن‌ها نرمالیتته و حجم اسید مورد نیاز برای انحلال کانی‌های کربناتی و حجم باز مورد نیاز برای خنثی کردن اسید از طریق تیتراسیون مشخص می‌شود. از میان این آزمایش‌ها، روش ABA مورد توجه بیش‌تری قرار دارد.

محاسبه پتانسیل تولید اسید (AP)

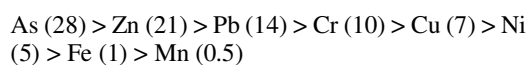
در این آزمون، میزان کربنات کلسیمی که برای خنثی کردن اسید لازم است، به دست می‌آید. پتانسیل تولید اسید (AP)، از ضرب کردن درصد گوگرد نمونه (که توسط آنالیز XRF تعیین شده) در عدد ۳۱/۲۵ (رابطه ۶) به دست می‌آید. واحد AP برابر با کیلوگرم کربنات کلسیم به ازای یک تن باطله است. در این روش، مقدار کربنات کلسیم مورد نیاز برای خنثی کردن، به دست می‌آید (لیوا و همکاران، ۲۰۲۱):

$$AP (Kg CaCO_3 t^{-1}) = \%S \times 31.25 \quad (6)$$

۵- نتایج و بحث

۵-۱- غلظت عناصر اصلی و جزئی در نمونه‌های باطله

بخشی از اثرات زیست‌محیطی زغال‌سنگ، ناشی از حضور مواد معدنی موجود در این سوخت فسیلی است. بنابراین بررسی ویژگی‌های ژئوشیمیایی زغال‌سنگ و اندازه‌گیری غلظت عناصر اصلی و جزئی در آن، اهمیت بسیار زیادی دارد. در جدول‌های ۲ و ۳ غلظت اکسیدهای اصلی و برخی از عناصر بالقوه سمی در باطله‌های معدن طزره در مقایسه با مقدار کلارک (فراوانی پوسته‌ای) این عناصر ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، اکسیدهای SiO_2 و Al_2O_3 به ترتیب با میانگین ۵۴/۷ و ۲۲/۱ درصد، بیشترین مقدار را دارند. نکته جالب توجه، تفاوت قابل توجه غلظت اکسیدهای آهن و گوگرد در نمونه‌های باطله معدن زغال‌سنگ طزره نسبت به مقادیر آن‌ها در ترکیب میانگین پوسته زمین است که می‌تواند نشانگر حضور مقادیر فراوان کانی‌هایی همچون پیریت در نمونه‌ها باشد. بر اساس نتایج به دست آمده، بیشترین درصد گوگرد و آهن در نمونه شماره ۶ و کمترین آن در نمونه شماره ۳ مشاهده می‌شود. غلظت اکسیدهای کلسیم در نمونه‌ها در مقایسه با ترکیب میانگین پوسته زمین تهی‌شدگی نشان می‌دهد. این شواهد بیانگر احتمال تشکیل زهاب اسیدی معدن توسط باطله‌های معدن زغال‌سنگ طزره است. غلظت عناصر مس، نیکل، آرسنیک، کروم، سرب و روی در همه نمونه‌ها و غلظت عنصر منگنز در دو نمونه ۴ و ۶، نسبت به مقادیر کلارک بیشتر است. زیاد بودن غلظت عناصر بالقوه سمی در نمونه‌ها، احتمالاً مربوط به حضور کانی‌های سولفیدی است. برای مثال غلظت بسیار زیاد آرسنیک احتمالاً با حضور این عنصر در کانی پیریت در ارتباط است. لازم به ذکر است که در مورد اکثر عناصر مورد مطالعه، حداکثر غلظت عناصر در نمونه شماره ۶ (سینه‌کار رزمجا غربی)، مشاهده می‌شود. در شکل ۳، مقادیر ضریب غنی‌شدگی عناصر بالقوه سمی در نمونه‌های باطله معدن طزره ارائه شده است. مقدار میانگین ضریب غنی‌شدگی عناصر مورد مطالعه در نمونه‌ها به ترتیب زیر کاهش می‌یابد:



حداکثر غنی‌شدگی عناصر مورد مطالعه، در نمونه ۶ و حداقل آن در نمونه‌های ۳ و ۷ مشاهده می‌شود. بر اساس رده‌بندی ساترلند (ساترلند، ۲۰۰۰) و با توجه به مقادیر

واحد AP، NP و NNP، کیلوگرم کربنات کلسیم به ازای هر تن باطله ($\text{KgCaCO}_3 \text{ t}^{-1}$) است.

۴- آزمایش تشکیل اسید خالص (NAG)

از آزمایش تشکیل اسید خالص (NAG) نیز برای ارزیابی پتانسیل تولید اسید یک نمونه استفاده می‌شود. در این آزمایش نمونه با پراکسید هیدروژن واکنش داده می‌شود. در زمان انجام آزمایش NAG، واکنش تولید اسید و خنثی‌سازی اسید می‌تواند به طور همزمان رخ دهد. بنابراین، نتیجه نهایی نشان‌دهنده مقدار اسید خالص تولید شده توسط نمونه است. برای انجام این آزمون، ابتدا نمونه‌ها از الک ۲۰۰ مش عبور داده شدند. سپس ۲/۵ گرم از نمونه داخل بشر ۵۰۰ میلی‌لیتری ریخته شد و ۲۵۰ میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن ۱۵ درصد به نمونه اضافه شد. یک شیشه روی بشر قرار داده شد، و پس از ۲۴ ساعت pH ثبت شد.

۵- آزمون تولید اسید خالص (NAP)

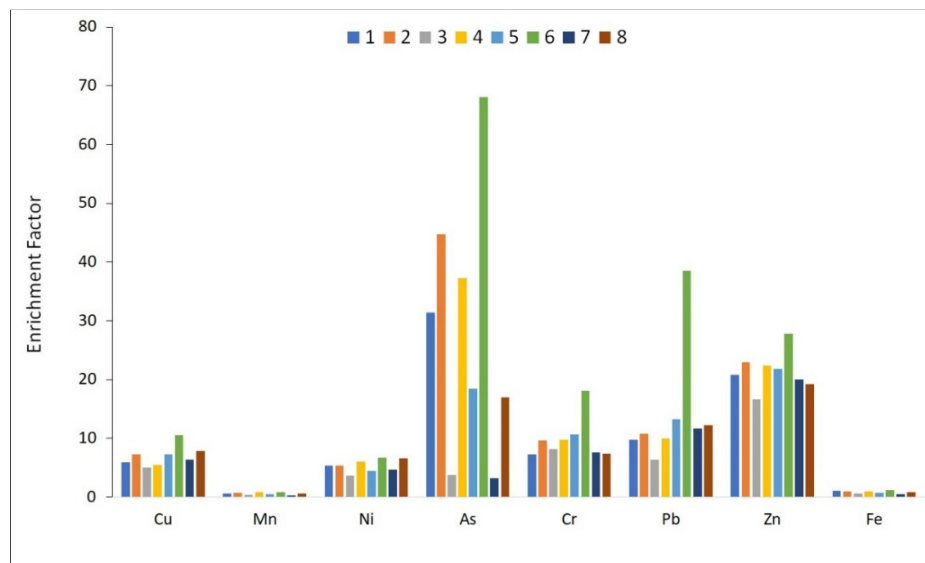
این آزمایش شبیه به آزمایش NAG می‌باشد، با این تفاوت که در این آزمایش، از پراکسید هیدروژن غلیظ استفاده می‌شود و سپس محلول تیترو می‌شود. برای انجام این آزمون، ابتدا نمونه‌ها از الک ۲۰۰ مش عبور داده شدند. سپس ۵ گرم نمونه داخل بشر ۲۵۰ میلی‌لیتری ریخته شد و به آن ۱۰۰ میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن ۳۵ درصد اضافه شد. نمونه به مدت یک ساعت روی همزن قرار گرفت. زمانی که حبابی از نمونه خارج نشود و جنب و جوشی نداشته باشد، واکنش کامل شده است (اگر درصد گوگرد زیاد باشد، ممکن است حالت انفجاری رخ دهد که در دو نمونه کارگاه استخراجی برناکی و کلاریز این اتفاق رخ داد). سپس pH اندازه‌گیری می‌شود و به حدی سدیم هیدروکسید ۰/۱ نرمال اضافه می‌شود که pH به ۷ برسد. سپس NAP از رابطه (۹) به دست می‌آید. واحد NAP بر حسب کیلوگرم اسید سولفوریک به ازای یک تن باطله است (نوگراها و همکاران، ۲۰۰۹):

$$\text{NAP (Kg CaCO}_3 \text{ t}^{-1}) = \frac{50ab}{c} \quad (9)$$

در این رابطه a برابر با نرمالیه سدیم هیدروکسید، b برابر با حجم سدیم هیدروکسید بر حسب میلی‌لیتر و c هم برابر وزن نمونه بر حسب گرم است.

زیاد می‌باشند. بنابراین در صورت تولید زهاب اسیدی توسط باطله‌های معدن طزره، احتمال آلودگی منابع آب سطحی، زیرزمینی و خاک به عناصر بالقوه سمی، به ویژه آرسنیک، روی، و سرب وجود دارد.

میانگین ضریب غنی‌شدگی، باطله‌های معدن طزره نسبت به عناصر منگنز و آهن بدون غنی‌شدگی، نسبت به عناصر نیکل، کروم، مس و سرب دارای غنی‌شدگی قابل توجه و نسبت به عناصر آرسنیک و روی دارای غنی‌شدگی خیلی



شکل ۳. مقادیر ضریب غنی‌شدگی عناصر بالقوه سمی در نمونه‌های باطله معدن زغال‌سنگ طزره

Fig. 3. Enrichment Factor values of potentially toxic elements in the spoil samples of the Tazare Coal Mine

جدول ۲. غلظت اکسیدهای اصلی در باطله‌های معدن زغال‌سنگ طزره (مقادیر بر حسب درصد) در مقایسه با متوسط غلظت اکسیدهای اصلی در پوسته زمین (میسون و مور، ۱۹۸۲).

Table 2. The concentration of major oxides in the spoil samples of the Tazare Coal Mine (in %) compared with the average values of major oxides in the Mean Crust (Mason and Moore, 1982)

	Na ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	K ₂ O
1	0.2	57.7	19	0.4	2.3	9.3	0.1	1.9	7.6
2	0.1	56.4	19.1	1	2.3	8.7	0.1	1.8	6.6
3	0.2	59.1	22.5	0.2	2.1	6.5	0.1	1.6	6.8
4	0.2	57.3	20.6	0.7	2.6	9.1	0.1	1.6	6.2
5	0.1	54.4	23.2	1.1	1.8	7.7	0.1	1.8	6.6
6	0.2	50.1	21.3	1.1	1.7	12.1	0.2	1.8	6.4
7	0.1	52.6	26.3	0.9	1.8	6.3	0.1	2.1	7.4
8	0.1	50.3	25.1	0.8	2.1	9.2	0.1	1.9	7.5
Mean crust	3.91	60.18	15.61	5.17	3.56	3.88	0.3	1.06	3.19

جدول ۳. غلظت عناصر بالقوه سمی (mg/kg) و گوگرد کل (%) در نمونه‌های باطله معدن زغال‌سنگ طزره در مقایسه با متوسط غلظت عناصر در پوسته زمین (میسون و مور، ۱۹۸۲).

Table 3. The concentration of potentially toxic elements (mg/kg) and total S (%) in the spoil samples of the Tazare Coal Mine (in %) compared with the average values of major oxides in the Mean Crust (Mason and Moore, 1982)

	Cu	Mn	Ni	As	Cr	Pb	Zn	Fe	S
1	400	697	500	70	900	180	1800	65123	0.7
2	500	774	500	100	1200	200	2000	60646	2.1
3	400	464	400	10	1200	140	1700	45257	0.3
4	400	1084	600	90	1300	200	2100	63024	0.9
5	600	697	500	50	1600	300	2300	49524	1.8
6	800	1084	700	170	2500	800	2700	83459	3.5
7	600	387	600	10	1300	300	2400	44418	1.5
8	700	851	800	50	1200	300	2200	64773	1.9
Mean crust	55	950	75	1.8	100	15	70	50000	0.026

۵-۲- مطالعات بافتی و کانی‌شناسی

بررسی میکروسکوپی نمونه‌ها نشان دهنده حضور پیریت به عنوان فراوان‌ترین کانی سولفیدی در معدن زغال‌سنگ طزره است. در نمونه‌های دستی، پیریت به صورت ذرات بلوری گوشه‌دار تا کروی یا بصورت پرکننده درز و شکاف‌ها دیده می‌شود (شکل ۴). همچنین در نمونه‌های دستی، کالکوپیریت و گالن قابل مشاهده است. کانی کوارتز مهمترین کانی غیرسولفیدی قابل مشاهده در نمونه‌ها است. با توجه به بررسی‌های کانه‌نگاری توسط میکروسکوپ نوری انعکاسی (شکل ۵)، کانی‌های سولفیدی موجود در نمونه‌ها، شامل پیریت، مارکازیت و آرسنوپیریت می‌باشد.

مارکازیت به صورت بلورهای سوزنی‌شکل مشاهده می‌شود. کانی پیریت به صورت توده‌ای، رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی، بی‌شکل، نیمه‌شکله‌دار، و تجمعات فرامبوئیدی حضور دارد. پیریت‌های مشاهده شده در مقاطع صیقلی (شکل ۵)، دارای شکستگی‌های فراوان هستند. مشاهداتی همچون حضور پیریت فرامبوئیدی و ریز دانه، و همچنین حضور شکستگی‌های فراوان در این کانی نشان می‌دهد که احتمال هوازدگی این کانی و تشکیل زهاب اسیدی وجود دارد، زیرا حداکثر اکسایش پیریت، در امتداد ترک‌ها و حفره‌ها رخ می‌دهد (لوترموزر، ۲۰۱۰).



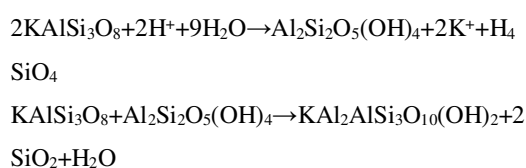
شکل ۴. پیریت در نمونه‌های باطله معدن زغال‌سنگ طزره
Fig. 4. Pyrite in the spoil samples of the Tazare Coal Mine

جدول ۴. ترکیب کانی‌شناسی نمونه‌های باطله معدن زغال‌سنگ طزره

Table 4. The mineralogical composition of the spoil samples of the Tazare Coal Mine

نمونه	کانی‌های تشخیصی داده شده
۱ استخراج غربی	کوارتز، کائولینیت، پیریت، کالکوپیریت، آرسنوپیریت، مارکازیت، آلبيت، کالکوزیت
۲ سینه‌کار برناکی	کوارتز، کائولینیت، پیریت، کالکوپیریت، آرسنوپیریت، آلبيت، و کالکوزیت
۳ استخراج مادر	کوارتز، کائولینیت، پیریت، کالکوپیریت، آرسنوپیریت، مارکازیت، آلبيت، کالکوزیت
۴ سینه‌کار مادر	کوارتز، کائولینیت، پیریت، کالکوپیریت، آرسنوپیریت، مارکازیت، آلبيت، کالکوزیت
۵ سینه‌کار کلاریز	کوارتز، کائولینیت، پیریت، کالکوپیریت، آرسنوپیریت، مارکازیت، آلبيت، کالکوزیت
۶ سینه‌کار غربی	کوارتز، کائولینیت، پیریت، کالکوپیریت، آرسنوپیریت، مارکازیت، آلبيت، کالکوزیت
۷ استخراج برناکی	کوارتز، کائولینیت، پیریت، کالکوپیریت، آرسنوپیریت، مارکازیت، آلبيت، کالکوزیت
۸ استخراج کلاریز	کوارتز، پیریت، کالکوپیریت، آرسنوپیریت، مارکازیت، آلبيت، کالکوزیت

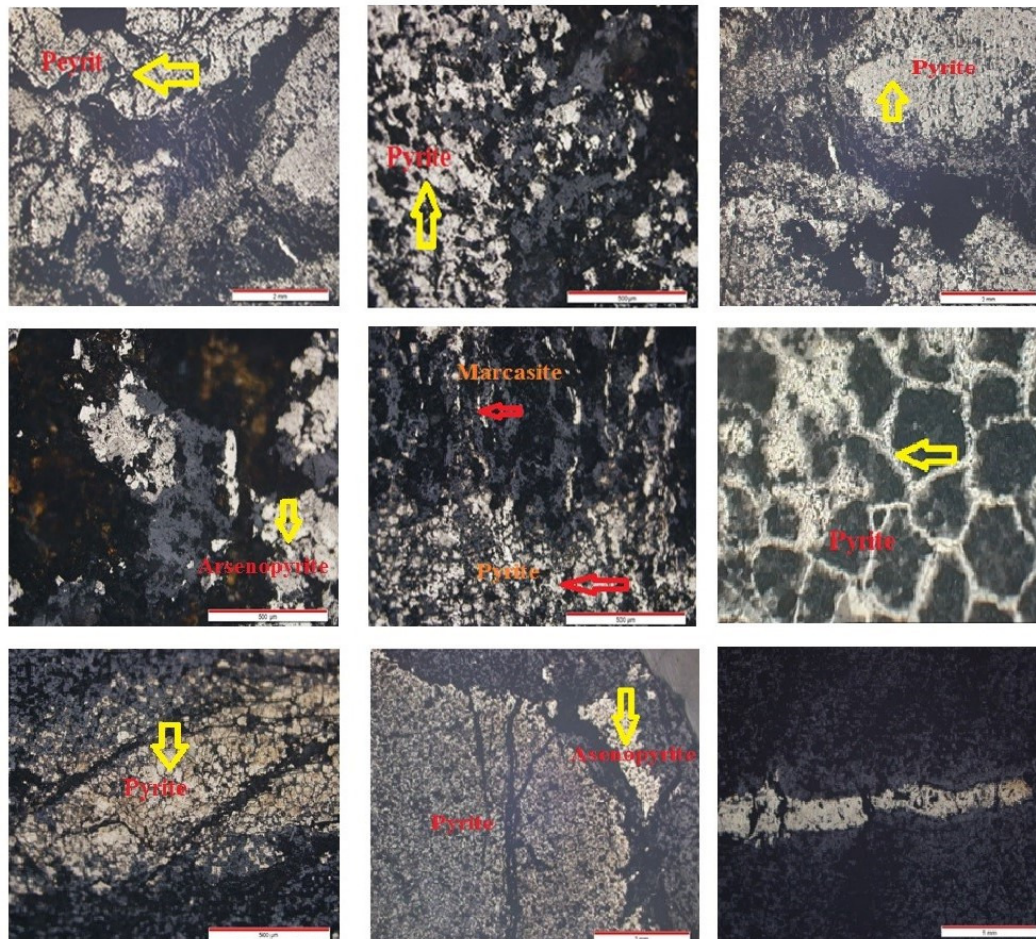
تشکیل می‌شود (تانگ و همکاران، ۲۰۲۱؛ ریندر و همکاران، ۲۰۲۰):



بر اساس نتایج آنالیز XRD (جدول ۴)، کانی‌های موجود در باطله‌های معدن طزره، شامل کانی‌های سیلیکاتی کوارتز (SiO_2)، کائولینیت ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)، آلبيت ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)، و کانی‌های سولفیدی پیریت و مارکازیت (FeS_2)، آرسنوپیریت (AsFeS_2)، و کالکوزیت (Cu_2S) است. کائولینیت در اثر انحلال نامتجانس فلدسپار پتاسیم

و همچنین عدم حضور کانی‌های کربناتی و حضور پیریت و مارکازیت در نمونه‌های مورد مطالعه، احتمال تشکیل زهاب اسیدی در اثر هوازدگی باطله‌های معدن زغال‌سنگ طزره وجود دارد.

با توجه به این که هوازدگی کانی‌های آلبیت و کانولینیت تنها در مدت زمان طولانی باعث مصرف یون‌های هیدروژن موجود در محلول و یا تولید یون‌های بی‌کربنات می‌شود که اسید تولید شده را خنثی می‌کنند (لوپز و وارد، ۲۰۰۸)،



شکل ۵. پیریت، مارکازیت، و آرسنوپیریت در نمونه‌های باطله معدن زغال‌سنگ طزره

Fig. 5. Pyrite, marcasite, and arsenopyrite in the spoil samples of the Tazare Coal Mine

اسید است، احتمال تشکیل زهاب توسط باطله‌های معدن زغال‌سنگ طزره با استفاده از این آزمون قابل بررسی نیست. در صورتی که NAPP مثبت باشد، نمونه دارای پتانسیل تولید اسید می‌باشد، ولی اگر NAPP منفی باشد، نمونه فاقد پتانسیل تولید اسید است. همچنین در صورتی که نسبت ANC/MPA کمتر از یک باشد، ظرفیت تولید اسید بیش‌تر از خنثی‌سازی اسید خواهد بود و باطله زهاب اسیدی تولید می‌کند و یا احتمال تولید زهاب اسیدی زیاد است، اما اگر نسبت ANC/MPA بیش‌تر از یک باشد، باطله هیچ‌گونه زهاب اسیدی تولید نمی‌کند (نوگراها و همکاران، ۲۰۰۹). NAPP صفر معادل با نسبت ANC/MPA نیز برابر

۳-۵- ارزیابی پتانسیل تولید زهاب اسیدی با استفاده از روش‌های استاتیک

در جدول ۵ نتایج آزمون‌های استاتیک انجام شده ارائه شده است. کمتر بودن pH گل اشباع از ۴ و بیشتر بودن هدایت الکتریکی گل اشباع از ۲۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، علامت اولیه‌ای برای احتمال تشکیل زهاب اسیدی است (لوترموزر، ۲۰۱۰). بر اساس نتایج به دست آمده، pH نمونه‌های مورد مطالعه بیشتر از ۴ و هدایت الکتریکی در نمونه‌های ۱ و ۳ کمتر از ۲۰۰۰ ($\mu\text{S}/\text{cm}$) و در سایر نمونه‌ها بیشتر از این مقدار می‌باشد. با توجه به این که نتایج حاصل از این آزمون گام اولیه‌ای در پیش‌بینی تولید

$$NPR = NP(Kg \text{ CaCO}_3 \text{ t}^{-1}) / AP(Kg \text{ CaCO}_3 \text{ t}^{-1})$$

این مقدار معمولاً طیف وسیعی از کمتر از ۱ تا ۴ را در بر می‌گیرد. $NPR < 1$ نشان می‌دهد که نمونه اسید تولید می‌کند. نمونه‌هایی که $NPR > 4$ دارند، اسید تولید نمی‌کنند (واماهوزا دوملا و سنگانی، ۲۰۲۱). جدول ۵ نشان می‌دهد که مقدار NNP نمونه‌های ۲، ۵، ۶ و ۸ کمتر از ۲۰- بوده بنابراین این باطله‌ها دارای پتانسیل تولید اسید هستند، در صورتی که NNP باطله‌های ۱، ۳، ۴ و ۷، بیش‌تر از ۲۰+ بوده، و در نتیجه این نمونه‌ها احتمالاً فاقد پتانسیل تولید اسید می‌باشند. نسبت NPR (NP/AP) باطله‌های شماره ۲، ۵، ۶، ۷ و ۸، کمتر از یک است، در نتیجه این باطله‌ها دارای پتانسیل تولید زهاب اسیدی می‌باشند، ولی در باطله‌های ۱ و ۳، این نسبت بیش‌تر از یک و کمتر از ۴ است، در نتیجه این باطله‌ها در محدوده نامعین (مشکوک) از نظر تولید زهاب اسیدی قرار دارند.

با یک است. با توجه به نتایج به دست آمده (جدول ۵)، باطله‌های شماره ۱، ۲، ۴، ۵، ۶ و ۷، ۸ دارای $NAPP$ مثبت هستند و نسبت ANC/MPA آن‌ها کمتر از ۱ است، که بیانگر احتمال تشکیل زهاب اسیدی معدن توسط این نمونه‌ها است. باطله شماره ۳ دارای $NAPP$ منفی و نسبت ANC/MPA بیش‌تر از ۱ است، بنابراین در این نمونه، ظرفیت خنثی‌سازی اسید بیش‌تر از ظرفیت تولید اسید است و در نتیجه، فاقد پتانسیل تولید زهاب اسیدی می‌باشد. در صورتی که NNP بیش‌تر از ۲۰+ باشد، نمونه هیچ‌گونه پتانسیلی برای تولید اسید ندارد، ولی اگر NNP کمتر از ۲۰- باشد، در این صورت نمونه دارای پتانسیل تولید اسید خواهد بود. اگر مقدار NNP بین ۲۰+ و ۲۰- باشد ($-20 < NNP < +20$)، نمونه از نظر تولید اسید مشکوک است (ویلر و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین از تقسیم NP به AP نسبت NPR بدست می‌آید:

جدول ۵. نتایج آزمون‌های استاتیک پیش‌بینی تولید زهاب اسیدی معدن توسط باطله‌های معدن زغال‌سنگ طزره (EC بر حسب $\mu\text{s/cm}$)
Table 5. The results of the static tests of AMD prediction in the spoil samples of the Tazare Coal Mine (EC values in $\mu\text{s/cm}$)

	pH	EC	MPA	ANC	NAPP	NP	AP
1	6.7	1580	21.4	11.8	9.7	28.3	21.9
2	5.3	4340	64.3	10.3	54	25.3	65.6
3	7.1	1950	9.2	14.2	-5	29.8	9.4
4	7.3	3295	27.5	16.7	10.9	31.8	28.1
5	5.5	2710	55.1	10.8	44.3	30.3	56.3
6	5.6	3985	107.1	8.8	98.3	30.8	109.4
7	6.4	2760	45.9	13.7	32.2	29.3	46.9
8	6.5	2745	58.1	13.2	44.9	28.5	59.4
	NNP	NAP	NAG	NPR (NP/AP)	ANC/MPA	NAG/NAPP	
1	6.4	19.5	1.1	1.3	0.55	0.17	
2	-40.4	15.2	1.6	0.4	0.16	0.03	
3	20.4	6.8	-2.8	3.2	1.55	0.63	
4	3.6	6.3	3.1	1.1	0.6	0.26	
5	-26	14.2	1.4	0.5	0.2	0.03	
6	-78.6	18.7	1	0.3	0.08	0.01	
7	-17.6	12.7	1	0.6	0.3	0.03	
8	-30.9	39	0.9	0.5	0.23	0.02	

کل گوگرد ترسیم شده است. با توجه به این شکل، نمونه‌های ۱، ۳، ۴ و ۷ در رده مشکوک و نمونه‌های ۲، ۵، ۶ و ۸ در رده دارای پتانسیل تولید اسید قرار می‌گیرند. با استفاده از نتایج آزمایش NAG می‌توان پتانسیل تولید اسید را مورد ارزیابی دقیق‌تر قرار داد. $NAG \text{ pH} \leq 4/5$ بیانگر احتمال تولید زهاب اسیدی است (مویو و همکاران، ۲۰۲۴). همچنین در صورتی که نسبت $NAG/NAPP$ کمتر

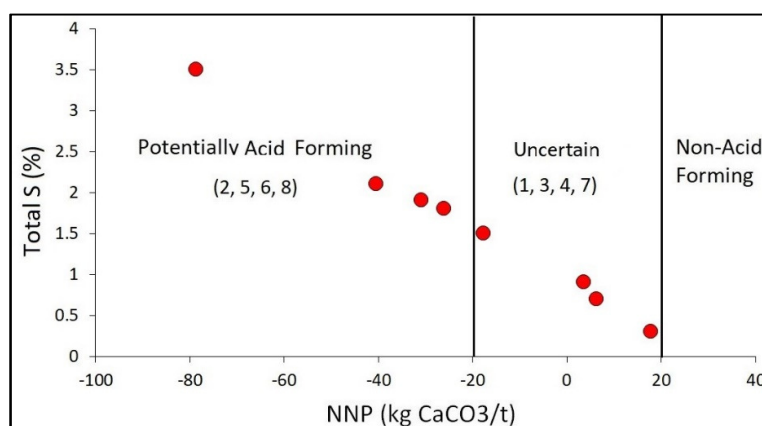
بر اساس نتایج آزمون NP و محاسبه AP ، نمونه‌های شماره ۲ و ۶، دارای بیشترین پتانسیل تولید اسید هستند. کمترین NP مربوط به نمونه شماره ۲ است، که نشان می‌دهد پتانسیل خنثی‌سازی اسید در این نمونه باطله از پتانسیل تولید اسید آن، در مقایسه با سایر نمونه‌ها، کمتر است و احتمال تشکیل زهاب توسط این نمونه‌ها را مورد تأیید قرار می‌دهد. در شکل ۶ مقادیر NNP در مقابل مقدار

✓ دارای پتانسیل تشکیل اسید^۲ (PAF): نمونه‌ای در رده PAF قرار می‌گیرد که پتانسیل تولید اسید بیشتری از پتانسیل خنثی‌سازی اسید داشته باشد. چنین موادی دارای خطر زیادی از نظر تولید زهاب اسیدی هستند.

✓ نامشخص^۳ (UC): هنگامی که NAPP مثبت و 4.5 NAG pH $\geq$ و یا وقتی که NAPP منفی و 4.5 NAG pH $<$ باشد، نمونه در رده نامشخص قرار می‌گیرد.

از ۰/۵ باشد، نشان‌دهنده این است که گوگرد غیرسولفیدی (سولفات‌های اولیه، گوگرد آلی، گوگرد عنصری) در نمونه حضور دارد و در نتیجه احتمال تولید زهاب اسیدی وجود دارد، و بیشتر بودن نسبت NAG/NAPP از ۰/۵ نشان‌دهنده عدم پتانسیل تولید اسید است (سونی آب‌فرتیوان و همکاران، ۲۰۲۰). بر اساس میزان NAG pH و مقادیر NAPP نمونه در یکی از رده‌های زیر قرار می‌گیرد:

✓ عدم تشکیل اسید^۱ (NAF): یک نمونه هنگامی در رده NAF قرار می‌گیرد و یا به عبارتی از هوازگی آن اسید تولید نمی‌شود که 4.5 NAG pH $\geq$ و NAPP آن منفی باشد.



شکل ۶. نمودار مقدار گوگرد کل در مقابل مقادیر NNP

Fig. 6. The total S vs. NNP values diagram

NAPP، NPR) ترسیم شده است. با توجه به این شکل، نمونه‌های ۱، ۳، ۴ و ۷ در رده نامعین یا عدم پتانسیل تولید زهاب اسیدی قرار می‌گیرند و نمونه‌های ۲، ۴، ۶ و ۸ دارای پتانسیل تولید اسید هستند. با توجه به نتایج آزمون‌های استاتیک و همچنین غلظت گوگرد و عناصر بالقوه سمی در نمونه‌ها، احتمالاً پتانسیل تولید اسید نمونه‌های ۲، ۵ و ۶ بیش‌تر از سایر نمونه‌ها است. با توجه به نمودار مقادیر NAG pH در برابر paste pH نیز این نتیجه‌گیری مورد تأیید است. مشاهدات صحرایی نیز این نتیجه‌گیری را تأیید می‌کند، زیرا pH زهاب تونل‌های برناکی (نمونه‌های ۲ و ۷) و رزمجا (نمونه‌های ۶ و ۱) در منطقه معدنی طزره اسیدی (۴/۵ تا ۵) و هدایت الکتریکی آن‌ها بسیار زیاد (۲۴ گرم در لیتر) است. بوی بسیار نامطبوع و زنده گوگرد در تونل‌های معدنی نیز مؤید این نتیجه‌گیری است.

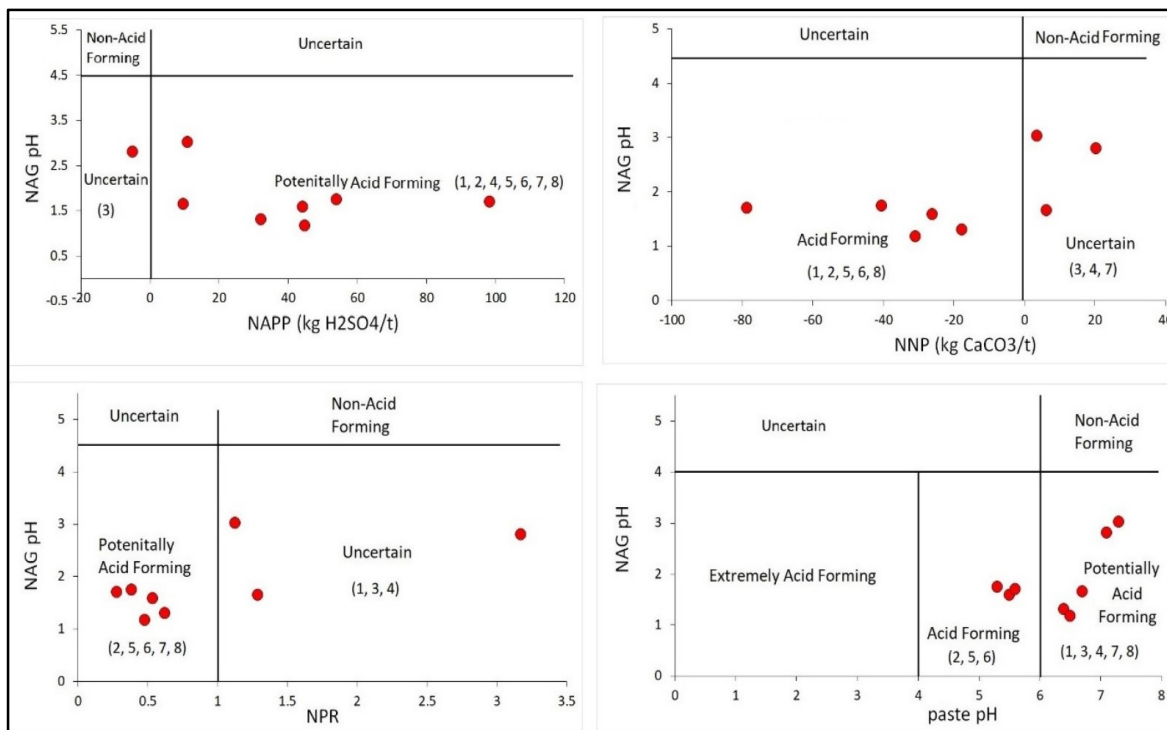
نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که در باطله‌های شماره ۱، ۲، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸، NAG pH کمتر از ۴/۵ و در باطله شماره ۳، مقدار این پارامتر بیشتر از ۴/۵ است. همچنین نسبت NAG/NAPP تنها در نمونه شماره ۳ از ۰/۵ بیشتر است. از سوی دیگر، با توجه به منفی بودن مقادیر NAPP نمونه ۳ و مثبت بودن NAPP سایر نمونه‌ها، بجز این نمونه، سایر نمونه‌های باطله معدن زغال‌سنگ طزره در رده PAF (دارای پتانسیل تشکیل اسید) قرار می‌گیرند، به عبارت دیگر ظرفیت تولید اسید این باطله‌ها بیش‌تر از خنثی‌سازی اسید آن‌هاست. باطله‌های شماره ۸، ۱ و ۶، به ترتیب دارای بیش‌ترین NAF می‌باشند و بنابراین دارای پتانسیل تولید زهاب اسیدی هستند.

در شکل ۷، مقدار NAG pH در مقابل پارامترهای به دست آمده از سایر آزمون‌های استاتیک انجام شده (NNP،

^۲ Uncertain

^۱ Non-acid forming

^۲ Potentially acid forming



شکل ۷. موقعیت نمونه‌های معدن زغال سنگ طزره بر روی نمودارهای ژئوشیمیایی

Fig. 7. The position of the spoil samples of the Tazare Coal Mine on the geochemical diagrams

رزمجا اسیدی (که نمونه‌های ۲ و ۶ از دپو باطله این تونل‌ها برداشت شده‌اند) کمتر از ۵ است و مقدار جامدات حل شده کل آب به ۲۴ گرم بر لیتر می‌رسد. این شواهد علاوه بر حضور پیریت‌های دارای شکستگی و درز و شکاف، احتمال تولید زهاب در باطله‌های منطقه را مورد تأیید قرار می‌دهد. پیشنهاد می‌شود به منظور کاهش اثرات زیست‌محیطی باطله‌های معدن طزره، اقدامات زیر انجام شود:

- در مناطق با خطر زیاد تولید زهاب اسیدی، اقدامات پاکسازی صورت پذیرد.
- انتخاب محل مناسب برای محل دپو باطله‌ها به نحوی که باطله‌ها دور از مسیر آب‌های سطحی و سیلاب دپو شوند.
- قبل از دپو کردن باطله‌ها از پوشش خاک رسی غیر قابل نفوذ در کف بستر محل دپو استفاده شود.
- در توده‌های باطله، کانال‌های زهکشی نصب شود و شیرابه‌ها به حوضچه‌های حاوی مواد جاذب یا آهکی منتقل شوند.
- افزودن خاک اره به باطله‌های قدیمی، باعث کاهش میزان اکسیژن می‌شود، و افزودن مواد آلی نیز باعث ایجاد شرایط احیایی می‌شود.

۶- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که باطله‌های شماره ۳ و ۴ احتمالاً زهاب اسیدی تولید نمی‌کنند یا پتانسیل کمتری برای تولید اسید دارند، زیرا علاوه بر این که pH گل اشباع آن‌ها بیشتر از ۴ است، در این باطله‌ها $NNP > +20$ و مقدار NAPP منفی است. در نمونه باطله شماره ۳، $NPR > 1$ ، و نسبت $ANC/MPA > 1$ می‌باشد. نمونه‌های ۳ و ۴ دارای بیشترین نسبت ANC/MPA به بقیه نمونه‌ها هستند. نتایج آنالیز XRF نشان می‌دهد که این باطله‌ها در مقایسه با سایر نمونه‌ها، کم‌ترین درصد گوگرد را دارند. در مطالعات میکروسکوپی نیز مشخص شد که مقدار پیریت این باطله‌ها بسیار کم است. ظرفیت خنثی‌سازی اسید در نمونه باطله شماره ۳، از سایر نمونه‌ها بیش‌تر است. غلظت عناصر بالقوه سمی آرسنیک و سرب در دو نمونه ۴ و ۳ بسیار کم است. در نمونه‌های باطله شماره ۶ و ۲، نسبت NPR از سایر نمونه‌ها کمتر است و این دو نمونه، MPA، AP، NAG و NAPP بیشتری دارند، بنابراین احتمال پتانسیل تولید زهاب اسیدی این دو نمونه از بقیه بیش‌تر است. همچنین در منطقه معدنی طزره، pH آب‌های خارج شده از تونل‌های حوضه برناکی و حوضه

- Erguler, Z. A., Erguler, G. K (2015) the effect of particle size on acid mine drainage generation: Kinetic column tests. *Minerals Engineering*, 76: 154-167.
- Leiva, E., Cayazzo, M., Torres, M (2021) Real-Time Electrical Conductivity Monitoring and Correlation with Sulfate Release and Acid Mine Drainage Potential from a Gold/Silver Paste Tailing Storage. *Minerals*, 11: 1436.
- Lopez, I. C., Ward, C. R (2008) Composition and mode of occurrence of mineral matter in some Colombian coals, *International Journal of Coal Geology*, 73: 3-18.
- Lottermoser, B. G (2010) *Mine Waste, Characterization, Treatment and environmental and impact*. Springer Berlin, Heidelberg, 404p.
- Mahanta, A., Sarmah, D., Bhuyan, N., Saikia, M., Phukan, S., Subramanyam, K. S. V., Singh, A., Saikia, M. K., Saikia, B. K (2024) Geochemical and petrological studies of high sulfur coal and overburden from Makum coalfield (Northeast India) towards understanding and mitigation of acid mine drainage *International Journal of Coal Science & Technology*, 11: 7.
- Mason, B., Moore, C. B (1982) *Principles of Geochemistry* (4th ed.), John Wiley and Sons, New York, 344 p.
- McCarthy, T. S (2011) the impact of acid mine drainage in South Africa. *South African Journal of Science*, 107: 1-7.
- Moyo, A., Amaral Filho, J. R. D., Harrison, S.T.L., Broadhursts, J (2024) Acid mine drainage and metal (loid) risk potential of South African coal processing wastes. *Minerals Engineering*, 215: 108825.
- Nugraha, C., Shimada, H., Sasaoka, T., Ichinose, M., Matsui, K (2009) Waste rock characteristics at tropical coal mine area: a case study of PT. Kaltim Prima Coal, Indonesia. *International Journal of JCRM*, 5: 77-82.
- Nwamahoza Mdemela, M., Sengani, F (2021) Analysis of the potential of acid mine drainage generation from the neutralized coal mining tailings. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 8: 2925-2930.
- Rinder, T. H., Dietzel, M., Stammeier, J. A., Leis, A., Bedoya-González, D., Hilberg, S (2020) Geochemistry of coal mine drainage, groundwater, and brines from the Ibbenbüren mine, Germany: A coupled elemental-isotopic approach. *Applied Geochemistry*, 121: 104693.

- افزودن موادقلیایی مانند آهک، می‌تواند تولید زهاب اسیدی را کنترل کند.

- همچنین می‌توان از باطله‌ها در مصارف گوناگون (مانند تولید آجر سبک) استفاده کرد و حجم باطله‌ها را کاهش داد. با توجه به میزان زیاد ترکیباتی از نظیر سیلیس و اکسید آلومینیم در این باطله‌ها تولید آجر سبک از نظر فنی توجیه‌پذیر می‌باشد.

۷- تشکر و سپاسگزاری

نویسندگان مقاله مراتب سپاس خود را از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه صنعتی شاهرود برای فراهم کردن امکانات انجام این پژوهش ابراز می‌دارند. همچنین از هیأت تحریریه محترم نشریه و داوران مقاله قدردانی می‌شود. نویسندگان از مسئولین محترم شرکت زغال‌سنگ البرز شرقی برای فراهم کردن شرایط نمونه‌برداری سپاسگزاری می‌نمایند.

References

- Abrosimova, N., Gaskova, O., Loshkareva, A., Edelev, A., Bornikova, S (2015) Assessment of the acid mine drainage potential of waste rocks at the Ak-Sug porphyry Cu-Mo deposit. *Journal of Geochemical Exploration*, 157: 1-14.
- Banerjee, D (2014) Acid drainage potential from coal mine wastes: environmental assessment through static and kinetic tests. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11: 1365-1378.
- Canadian Mine Environment Neutral Drainage (MEND) (2001) MEND manual, 2, Sampling and analysis. MEND 5.4.2b: 111.
- Çelebi, E. E., Riberio, J (2023) Prediction of acid production potential of self-combusted coal mining wastes from Douro Coalfield (Portugal) with integration of mineralogical and chemical data. *International Journal of Coal Geology*, 265: 104152.
- Dold, B (2017) Acid rock drainage prediction: A critical review. *Journal of Geochemical Exploration*, 172: 120-132.
- Dontala, S. P., Byragi Reddy, T., Vadde, R (2015) Environmental Aspects and Impacts its Mitigation Measures of Corporate Coal Mining. *Procedia Earth and Planetary Science*, 11: 2-7.
- Eftekhari, N., Kargar, M., Rokhbakhsh Zamin, F., Rastakhiz, N., Manafi, Z (2020) *Annales de Chimie - Science des Matériaux*, 44: 43-52.

- Sharma Acharya, B., Kharel, G (2020) Acid Mine Drainage from Coal Mining in the United States – An Overview, *Journal of Hydrology*, 588: 125061.
- Sobek, A. A (1978) Field and Laboratory Methods Applicable to Overburdens and Minesoils; Industrial Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA.
- Sonny Abfertiawan, M., Palinggi, Y., Handajani, M., Pranoto, K., Atmaj, A (2020) Evaluation of Non-Acid-Forming material layering for the prevention of acid mine drainage of pyrite and jarosite. *Helyon*, 6 (11): e05590.
- Sutherland, R. A (2000) Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Geology*, 39(6): 611-627.
- Tang, H., Luo, J. Z., Zheng, L. W., Liu, Ch. Y., Li, H., Wu, G., Zeng, M., Bai, X (2021) Characteristics of pores in coals exposed to acid mine drainage. *Energy Reports*, 7: 8772-8783.
- Weiler, J., Caponi da Silva, A., Firpo, B. A., Fernandes, E. Z., Homrich Schneider, I. A (2020) using static, kinetic and metal mobility procedures to evaluate possibilities of coal waste land disposal at Moatize Mine, Mozambique. *International Engineering Journal*, 73: 587-596.
- Zwahlen, C., Rehn, A., Aiglsperger, T. H., Dold, B (2023) Geochemical and mineralogical aspects of acid mine drainage associated with 100 years of coal mining in the arctic, Svalbard (78° N). *Journal of Geochemical Exploration*, 252: 107266.

Evaluation of the acid mine drainage potential from the spoils of the Tazare Coal Mine, NE Iran

E. Rabiee¹, G. Forghani Tehrani^{2*} and S. Zarei Doudeji³

1- M. Sc. student of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- Assist. Prof., Dept., of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

3- Assoc. Prof., Dept., of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

* forghani@shahroodut.ac.ir

Received: 2024.9.9 Accepted: 2024.11.4

Abstract

The Tazare Coal Mine is located in the Eastern Alborz structural zone, NE Iran. The present study aims to investigate the mineralogical and geochemical characteristics of spoils produced in Tazareh coal mine, and to evaluate the potential of the waste materials to produce acid mine drainage as a result of oxidation processes. For these purposes, 8 representative spoil samples were collected, and the mineralogy, geochemistry, and static geochemical tests were carried out. Mineralogical studies indicate the presence of pyrite, chalcopyrite, arsenopyrite, chalcocite, marcasite, albite, kaolinite and quartz in the studied samples. Pyrite presented as angular, spherical fragments and framboidal aggregates, or as filling the fissure. The studied samples were not enriched in Mn and Fe, whereas they were significantly enriched in Ni, Cr, Cu, Pb, highly enriched in As and Zn. The highest concentration of elements was recorded in sample no. 6. On the basis of the results of static tests of acid mine drainage prediction, the pH of saturated paste was higher than 4 and the electrical conductivity of saturated paste of 6 samples was higher than 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. According to static test results, the studied samples, especially samples no. 3 and 6, were of acid producing potential. This conclusion was confirmed by field observations. The obtained results in this study show the necessity of tackling the environmental management measures in the Tazare Coal Mine district.

Keywords: Acid Mine Drainage, Static Tests, Spoil, Tazare, Toxic Elements

Introduction

Exploitation of coal mines is associated with many environmental problems such as land degradation, subsidence and mine collapse, mine fires, toxic gas leaks, mining explosions, accumulation of large amounts of tailings due to mining and processing, increased flood risk, noise pollution, dust generation and air pollution, pollution of surface and groundwater resources, soil pollution, production of acid mine drainage and release of potentially toxic elements. Acid mine drainage (AMD) is one of the biggest environmental issues of the mining industry all over the world. The generation of AMD results in the release of major and minor toxic elements (e.g., Ba, Cd, Pb, Ni, Co, Mn, As, Cu, Zn and Hg) into the environment which may degrade the quality of the environment. Coal spoils typically contain large amounts of sulphide minerals, especially pyrite and marcasite. The dissolution and oxidation of these minerals plays the main role in the production of acidic mine drainage/

Considering the environmental issues caused by the AMD generation, the prediction of AMD production in coal mines in which large amounts of mineral tailings are produced is of crucial importance. There are several methods to evaluate and predict the production potential of AMD, the most common of which are static tests. In static tests, the rate of acid production or consumption is calculated, and the balance between acid production processes (oxidation of sulphide minerals) and acid neutralization processes (dissolution of carbonates and weathering of silicates) can be evaluated.

Tazare coal mine is located 45 km NE of Damghan city. Coal mining and extraction in the area has caused the production of a large amount of spoil materials to be dumped around the mine. The main objective of the present study is to investigate the potential of AMD production by the spoils dumped around the mine, using mineralogical and geochemical studies, as well as static tests of AMD prediction.

Materials and methods

8 representative spoil samples were collected in the mining area. Each representative sample consists of 15 to 20 subsamples, the subsamples were combined to obtain a representative sample in each sampling site. The samples were crushed and homogenized in and then they were passed through a 200 mesh (75 μ) sieve. Then, the sieved samples were oven-dried at 105°C for 2 h. X-ray Diffraction analysis (XRD; Model: a Phillips PW1800) and reflected light microscopy were applied to identify the minerals in the samples. The concentrations of major oxides and potentially toxic elements were measured by an X-ray fluorescence (XRF) instrument (Model: Shimadzu-1800). To assess the level of element's accumulation in the samples, enrichment factor (EF) was calculated:

$$EF = (M_1 / C_1) / (M_2 / C_2)$$

where M1 and C1 are respectively the concentration of the target element and the normalizing element (Al) in the studied sample, and M2 and C2 represent the concentration of the target element and the normalizing element (Al) element in the reference material (the mean Crust composition), respectively. The static methods used in this study included:

- 1- Measurement of pH and Electrical Conductivity (EC) of saturated paste
- 2- Evaluation of acid production or consumption (North American method)
 - ✓ Calculation of the Maximum Potential Acidity (MPA)
 - ✓ Acid Neutralizing Capacity (ANC) test
 - ✓ Calculation of Net Acid Producing Potential (NAPP)
- 3- Static tests of acid-base accounting (ABA)
 - Acid Potential (AP) test
 - Neutralization Potential (NP) test
 - Net Neutralization Potential (NNP)
- 4- Net Acid Generation (NAG) test
- 5- Net Acid Production (NAP) test.

The static tests of AMD production were carried out based on the MEND (2001) methods.

Results and discussion

The obtained results showed that the concentration of Fe oxides and S in the studied samples were much higher than their respective values in the mean Crust composition, which

pointed out to the presence of large amounts of pyrite, marcasite and arsenopyrite in the samples. The samples were depleted in CaO Compared with the mean Crust composition. These findings indicate the possibility of the formation of AMD by the tailings of the Tazare coal mine. The concentrations of Cu, Ni, As, Cr, Pb and Zn in all samples and the concentration of Mn in two samples were higher than their values in mean Crust composition. The high concentration of these potentially toxic elements in the studied samples is probably related to the presence of sulphide minerals. The average value of the enrichment factor of the studied elements decreased in the following order:

As (28) > Zn (21) > Pb (14) > Cr (10) > Cu (7) > Ni (5) > Fe (1) > Mn (0.5)

According to Sutherland's classification (Sutherland, 2000), the spoil samples of the Tazare mine were not not enriched in Mn and Fe. However, they were significantly enriched in Ni, Cr, Cu and Pb, and were highly enriched in as and Zn. Therefore, in case of production of AMD by the spoils of the Tazare mine, the pollution of surface and groundwater resources and the soil was possible. Microscopic investigations indicated that the samples contained pyrite, marcasite and arsenopyrite as cavity filling, fissure filling, amorphous, subhedral and framboidal aggregates. Based on the results of XRD analysis, the minerals present in the Tazare mine spoils included quartz (SiO_2), kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), pyrite and marcasite (FeS_2), arsenopyrite (AsFeS_2), and chalcocite (Cu_2S).

The pH and electrical conductivity (EC) of the saturated paste samples were more than 4 and 2000 ($\mu\text{S}/\text{cm}$) respectively, confirming the possibility of AMD production by the spoil samples. Positive values of NAPP was an indication of acid production potential. Moreover, the $\text{ANC}/\text{MPA} < 1$ shows the potential of acid generation by the samples. The obtained results in the present study showed that except in one sample, the NAPP values were positive the ANC/MPA ratios were less than 1, which indicates the possibility of AMD production by the spoil samples of the Tazare mine. $\text{NNP} > +20$, showed that the sample was of no potential to produce AMD, but $\text{NNP} < -20$ confirms the potential of AMD production. NNP value between +20 and -20 ($-20 < \text{NNP} < +20$) indicates that the

sample was uncertain for acid production. Also, by dividing NP by AP, the NPR ratio is obtained:

$$\text{NPR} = \text{NP}(\text{Kg CaCO}_3 \text{ t}^{-1}) / \text{AP}(\text{Kg CaCO}_3 \text{ t}^{-1})$$

NPR usually varies between <1 and >4 . $\text{NPR} < 1$ indicates that the sample is of acid production potential. Samples with $\text{NPR} > 4$ do not produce acid. The NNP value of samples 2, 5, 6 and 8 is < -20 , confirming their potential to produce AMD. The NPR ratio in samples 2, 5, 6, 7 and 8 was < 1 ; therefore, these spoils have the potential to produce AMD. This ratio was > 1 and < 4 for samples 1 and 3, respectively, thus were uncertain with respect to AMD production. Based on the results of NP test and AP calculation, samples no. 6 and 2 had the highest acid production potential. The lowest NP corresponded to sample no. 2, which showed the acid neutralization potential of this sample was lower than its acid production potential, confirming the possibility of AMD formation by this sample. $\text{NAG pH} \leq 4.5$ indicates the possibility of AMD production. Also, the $\text{NAG/NAPP} < 0.5$ indicates that non-sulfide sulfur (primary sulfates, organic sulfur, elemental sulfur) is present in the sample, and as a result, there is a possibility of producing AMD. the NAG/NAPP ratio greater than 0.5 indicates a lack of acid production potential. The results of this study showed that in samples

no. 1, 2, 4, 5, 6, 7 and 8, NAG pH values were less than 4.5. Sample no. 3 showed a NAG pH value > 4 . NAG/NAPP value was higher than 0.5 in sample no. 3. On the other hand, according to the negative NAPP values of sample 3 and the positive NAPP values of other samples, except for this sample, other samples of Tazareh coal mine tailings are classified as PAF (having the potential of AMD formation). In other words, the acid production capacity of these spoils was more than their acid neutralization potential. Spoils no. 8, 1 and 6 have the highest NAP, respectively, and therefore they are of the potential to produce AMD.

Conclusion

The results of this study show that spoils no. 3 and 4 probably do not produce AMD or they have a lower potential for acid production. These two samples showed the lowest percentage of sulfur. Moreover, the concentrations of as and Pb in these two samples were very low. On the other hand, in the spoil samples no. 6 and 2, the lower values of NPR and the higher values of MPA, AP, NAG and NAPP confirmed the potential of these elements to generate AMD. The obtained results show that environmental management of dumped spoils in the study area is necessary.