

واکاوی ژئوشیمیایی رفتار باطله‌های سولفیدی در کانسارهای پورفیری مس ایران: مطالعه موردی معادن سونگون و میدوک

ونداد محسنی^۱، آیدا جلالی فرد^۲، شبنم حسنی^۳، آیدا میرحیدری^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران، Vandadmohseni@ut.ac.ir

۲- فارغ التحصیل کارشناسی، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران، Aida.jalalifard@ut.ac.ir

۳- فارغ التحصیل دکتری، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران،
Shabnamhasani@ut.ac.ir

۴- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران، Aida.mirheidari@ut.ac.ir

خلاصه

پدیده زهاب اسیدی معدن (AMD) از مهم‌ترین چالش‌های ژئومحیطی در استخراج ذخایر سولفیدی است و ارزیابی پتانسیل اسیدزایی باطله‌ها نقش کلیدی در مدیریت پایدار معادن دارد. در این پژوهش، رفتار ژئوشیمیایی باطله‌های دو معدن پورفیری مس سونگون و میدوک با رویکردی تطبیقی و بر پایه روش استاندارد Acid-Base Accounting (ABA) مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، ۲۰ نمونه نماینده (۸ نمونه از سونگون و ۱۲ نمونه از میدوک) مطابق با استاندارد ISO 18283 نمونه‌برداری شد. تعیین گوگرد کل به روش احتراق (LECO) و ظرفیت خنثی‌سازی (NP) به روش Modified Sobek انجام و شاخص‌های NNP و NPR مطابق دستورالعمل‌های MEND و GARD Guide محاسبه گردید. یافته‌ها نشان داد که معدن سونگون با غلبه فازهای کربناتی و مقادیر مثبت NNP در ۸۷٪ نمونه‌ها، عمدتاً دارای رفتار خنثی‌کننده است؛ در حالی که تمامی نمونه‌های معدن میدوک با مقادیر منفی NNP، نسبت NPR کمتر از یک و pH اسیدی، در گروه «کاملاً اسیدزا» (PAG) طبقه‌بندی شدند. اختلاف چشمگیر نتایج، ناشی از تضاد میان محتوای سولفیدی غلیظ در میدوک و پتانسیل خنثی‌سازی ذاتی در سونگون است. این مطالعه نشان می‌دهد که معدن میدوک نیازمند استراتژی‌های مدیریتی فعال و بلندمدت جهت مهار اسیدزایی است، در حالی که در سونگون اقدامات موضعی کفایت می‌کند. این پژوهش به‌عنوان نخستین مقایسه نظام‌مند این دو قطب مسی، مبنایی علمی برای کاهش ریسک‌های زیست‌محیطی معادن ایران فراهم می‌آورد.

کلمات کلیدی: زهاب اسیدی معدن (AMD)، روش ABA، پتانسیل اسیدزایی (AP)، ظرفیت خنثی‌سازی (NP)،

معدن مس سونگون، معدن مس میدوک، باطله‌های معدنی، دستورالعمل MEND

۱. مقدمه

پدیده‌ی زهاب اسیدی معدن (Acid Mine Drainage; AMD) و شکل گسترده‌تر آن، زهاب اسیدی سنگ (Acid Rock Drainage; ARD)، یکی از پیچیده‌ترین، پایدارترین و در عین حال چالش‌برانگیزترین مسائل ژئومحیطی مرتبط با معادن سولفیدی در مقیاس جهانی به شمار می‌رود [1],[2],[3]. تولید AMD اساساً حاصل برهم‌کنش هم‌زمان مجموعه‌ای از فرآیندهای ترمودینامیکی، کینتیکی و زیستی است که در یک چرخه‌ی خودتقویت‌شونده عمل می‌کنند [1],[2]. این پدیده عمدتاً در نتیجه‌ی اکسایش کانی‌های سولفیدی فلزات پایه به‌ویژه پیریت، کالکوپیریت و پیرویت در حضور اکسیژن و آب شکل می‌گیرد [1],[3],[4]. پیامد مستقیم این واکنش‌ها، تولید محلول‌هایی با pH بسیار پایین، غلظت بالای یون‌های فلزی محلول و بار آلودگی پایدار است؛ آلودگی‌ای که در بسیاری از موارد حتی دهه‌ها پس از توقف فعالیت‌های معدنکاری نیز تداوم می‌یابد [2],[5]. پایداری ذاتی این سامانه، به‌ویژه در حضور آهن سه‌ظرفیتی و فعالیت میکروارگانیسم‌های اکسیدکننده‌ی آهن و گوگرد، سبب شده است که AMD در ادبیات علمی به‌عنوان «میراث بلندمدت و اجتناب‌ناپذیر استخراج سولفیدی بدون مدیریت صحیح» توصیف شود [1],[5],[6].

از دیدگاه ژئومحیطی، AMD صرفاً به افت کیفیت آب‌های سطحی و زیرسطحی محدود نمی‌شود، بلکه با آلوده‌سازی خاک، تخریب زیستگاه‌های طبیعی، افزایش تحرک و حل‌پذیری عناصر بالقوه سمی و ایجاد تهدید برای سامانه‌های هیدرولوژیکی در مقیاس محلی و منطقه‌ای، پیامدهایی عمیق، چندبعدی و بلندمدت به همراه دارد [5],[7]. از این‌رو، ارزیابی پتانسیل تولید اسید و ظرفیت خنثی‌سازی مواد معدنی و باطله‌ها به‌عنوان یکی از ارکان اصلی مدیریت پایدار پسماندهای معدنی، جایگاهی محوری در برنامه‌ریزی معادن سولفیدی بزرگ جهان یافته است [8],[9]. در این چارچوب، روش‌های استاندارد نظیر Acid-Base Accounting (ABA)، که در قالب دستورالعمل‌های بین‌المللی MEND و GARD Guide توسعه یافته‌اند، یک چارچوب کمی، ایستا و نظام‌مند برای تفکیک واحدهای معدنی به سه گروه «غیر اسیدزا»، «مرزی» و «اسیدزا» فراهم می‌کنند [9],[10],[11]. با وجود آن‌که روش‌های ABA شالوده‌ی اصلی بسیاری از مطالعات ژئوشیمیایی در پروژه‌های معدنی را تشکیل می‌دهند، میزان اتکاپذیری نتایج آن‌ها به‌شدت وابسته به کیفیت نمونه‌برداری، رعایت استانداردهای آماده‌سازی و دقت آزمون‌های آزمایشگاهی است [10],[12]. کوچک‌ترین خطا در مراحل پیش‌تحلیلی—از جمله عدم رعایت دانه‌بندی کمتر از ۷۵ میکرون، همگن‌سازی نامناسب نمونه‌ها یا بروز آلودگی متقاطع—می‌تواند به تفسیرهای نادرست و در نهایت اتخاذ تصمیم‌های مدیریتی پرهزینه و ناکارآمد منجر شود [11],[13].

در ایران، بخش قابل‌توجهی از معادن سولفیدی، به‌ویژه معادن بزرگ پورفیری مس، در مناطق خشک و نیمه‌خشک واقع شده‌اند [14]؛ مناطقی که به‌طور هم‌زمان تحت تأثیر هوازگی شدید، تبخیر بالا و بارش‌های کوتاه‌مدت اما پرشدت قرار دارند [14],[15]. این شرایط اقلیمی ویژه سبب می‌شود فرآیندهای تولید و انتقال AMD در این مناطق رفتاری متفاوت و در بسیاری موارد تشدیدشده نسبت به مناطق مرطوب نشان دهند [2],[15]. در چنین بستری، AMD در ایران به پدیده‌ای با ریسک بالاتر، شدت بیشتر و پیچیدگی محیطی افزوده تبدیل می‌شود [5],[7]. در میان معادن سولفیدی کشور، معادن مس میدوک و سونگون به‌عنوان دو نمونه‌ی شاخص و راهبردی مطرح هستند که به دلیل تفاوت‌های قابل‌توجه ژئوشیمیایی، زمین‌شناختی و هیدروژئوشیمیایی، ظرفیت بالقوه‌ی بالایی برای تولید زهاب اسیدی دارند [16],[17]. با این حال، تاکنون مطالعه‌ای جامع، تطبیقی و مبتنی بر روش‌های استاندارد بین‌المللی که بتواند تفاوت‌ها و شباهت‌های ژئوشیمیایی این دو معدن را به‌طور نظام‌مند تحلیل کند، انجام نشده است [10],[11],[18]. این در حالی است که شناخت رفتار ژئوشیمیایی باطله‌های سولفیدی این معادن، برای برنامه‌ریزی مدیریت پسماندی، طراحی زیرساخت‌های مهندسی پایدار و توسعه‌ی

مدل‌های پیش‌بینی بلندمدت، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر محسوب می‌شود [8], [19].

معادن مس میدوک، به‌عنوان یکی از ذخایر مهم کمر بند مسی کرمان، از نظر ترکیب کانی‌شناسی دارای غنای سولفیدی بالاتری نسبت به بسیاری از معادن پورفیری ایران است [16], [17], [20]. ویژگی شاخص این معدن، حضور واحدهایی با پیریت فراوان، سولفیدهای مس فعال و دگرسانی‌های گسترده است که در کنار عمق هوازدگی مناسب و وجود رطوبت موسمی، شرایط مساعدی برای شکل‌گیری و تداوم AMD فراهم می‌کند [15], [16], [21]. مطالعات محدود انجام‌شده بر روی باطله‌های این معدن عمدتاً به‌صورت پراکنده، غیراستاندارد یا فاقد دقت کافی در نمونه‌برداری بوده‌اند و تاکنون پایگاه داده‌ی جامع و منسجمی از نتایج ABA برای معدن میدوک ارائه نشده است [22]. افزون بر این، هجوم دوره‌ای رواناب‌های سطحی به توده‌های باطله، ساختار دانه‌ریز سولفیدی و حضور فازهای ثانویه‌ی آهن—از جمله ژاروسیت و گوتیت‌های آبدار—رفتار ژئوشیمیایی محیط را به‌طور قابل‌توجهی پیچیده‌تر می‌سازد [15], [23]. مجموع این عوامل، معدن میدوک را به یکی از حساس‌ترین معادن کشور از منظر پتانسیل تولید AMD تبدیل کرده است [16], [24].

در مقابل، معدن مس سونگون در شمال‌غرب ایران و در پهنه‌ی ارسباران قرار گرفته است. اگرچه ساختار زمین‌شناختی کلی و الگوهای دگرسانی این معدن در برخی جنبه‌ها شباهت‌هایی با میدوک دارد، اما ناهمگنی لیتولوژیکی بالا، گستره‌ی وسیع سنگ‌های آندزیتی تا گرانودیوریتی و حضور واحدهای برشی و ساختاری، الگوی متفاوتی از توزیع کانی‌های سولفیدی و کانی‌های خنثی‌کننده در باطله‌های این معدن ایجاد کرده است [17], [25]. هرچند درصد سولفیدها در برخی واحدهای سونگون نسبت به میدوک کمتر است، اما تغییرپذیری ژئوشیمیایی شدید، نفوذپذیری بالاتر برخی توده‌ها و نوسانات اقلیمی مؤثر بر فرآیند هوازدگی می‌تواند خطر بروز AMD/ARD را در مقاطع زمانی مشخص تشدید کند [7], [26]. تفاوت در الگوی بارش، رژیم زهکشی سطحی و ترکیب کانی‌های کربناته در سونگون نسبت به میدوک، اهمیت بررسی این دو معدن را از منظر تطبیقی برجسته می‌سازد. در واقع، اقلیم مرطوب‌تر سونگون و پتانسیل بالاتر انتقال آلاینده‌ها در جریان‌های سطحی سبب می‌شود که حتی مقادیر مشابه سولفید، پیامدهای ژئوشیمیایی متفاوتی نسبت به میدوک ایجاد کند [15], [27].

در چارچوب مقایسه‌ی این دو معدن، مجموعه‌ای از پرسش‌ها و چالش‌های علمی اساسی مطرح می‌شود: تفاوت در میزان و نوع سولفیدهای موجود در باطله‌ها تا چه حد است و این تفاوت چه اثری بر پتانسیل اسیدزایی (AP) دارد؟ اختلاف در مقدار و توزیع کانی‌های خنثی‌کننده (NP) میان دو معدن چگونه است؟ آیا شاخص‌های NNP و NPR در میدوک و سونگون رفتار مشابهی نشان می‌دهند یا عوامل اقلیمی، دگرسانی و هیدروژئولوژیکی موجب واگرایی آن‌ها شده است؟ کدام معدن پتانسیل بالاتری برای تولید AMD در مقیاس بلندمدت دارد و دلایل این تفاوت چیست؟ و در نهایت این تفاوت‌ها چگونه می‌توانند در طراحی سامانه‌های کنترل AMD و مدیریت پایدار باطله‌های معدنی مورد استفاده قرار گیرند؟

پاسخ به این پرسش‌ها تنها در سایه‌ی داده‌های استاندارد، نمونه‌برداری دقیق و تحلیل‌های آزمایشگاهی منطبق با دستورالعمل‌های بین‌المللی امکان‌پذیر است [10], [11], [13], [18]. در شرایط کنونی، نبود یک مطالعه‌ی تطبیقی نظام‌مند که بتواند دو معدن راهبردی میدوک و سونگون را بر اساس روش‌های ABA با یکدیگر مقایسه کند، خلأیی جدی در ادبیات ژئوشیمی محیط‌زیست معدنی ایران به شمار می‌رود؛ خلأیی که با توجه به نقش این معادن در زنجیره‌ی تأمین ملی مس، پیامدهای مدیریتی و توسعه‌ای قابل‌توجهی به همراه دارد [8].

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف انجام یک مقایسه‌ی جامع، دقیق و استانداردسازی‌شده از رفتار ژئوشیمیایی

باطله‌های سولفیدی در دو معدن مس میدوک و سونگون طراحی شده است [29], [30]. در این مطالعه، فرآیند نمونه‌برداری و آماده‌سازی نمونه‌ها مطابق با استاندارد ISO 18283 انجام شده و تمامی تحلیل‌ها، شامل تعیین گوگرد کل (به روش LECO) [10]، محاسبه‌ی پتانسیل اسیدزایی (AP) [10]، ظرفیت خنثی‌سازی (NP به روش Modified Sobek) [10] و شاخص‌های مشتق‌شده‌ی NNP و NPR، بر اساس پروتکل‌های سخت‌گیرانه‌ی MEND و GARD Guide صورت گرفته است [10], [11]. این پژوهش نخستین مجموعه‌ی منسجم داده‌های ABA را برای مقایسه‌ی دو معدن بزرگ میدوک و سونگون در ایران ارائه می‌دهد و می‌تواند به‌عنوان مبنایی اولیه برای توسعه‌ی مدل‌های پیش‌بینی بلندمدت، طراحی برنامه‌های مدیریت پایدار باطله‌ها و کاهش ریسک تولید زهاب اسیدی در هر دو معدن مورد استفاده قرار گیرد [8], [10], [11], [32].

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. طرح نمونه‌برداری (Sampling Design and Program)

به‌منظور ارزیابی نظام‌مند و قابل‌اتکای پتانسیل تولید زهاب اسیدی در معادن پورفیری مس سونگون و میدوک، یک برنامه‌ی نمونه‌برداری ساختاریافته بر اساس استاندارد بین‌المللی ISO 18283:2006 و با بهره‌گیری از اصول ارائه‌شده در دستورالعمل‌های MEND و GARD Guide طراحی و اجرا شد [10], [11], [33], [34]. هدف اصلی این برنامه، دستیابی به مجموعه‌ای از نمونه‌های نماینده با قابلیت بازتاب دقیق شرایط واقعی باطله‌ها در هر معدن بود؛ به‌گونه‌ای که ناهمگنی لیتولوژیکی، تغییرات هوازدگی، تنوع فازهای سولفیدی و تفاوت‌های دگرسانی به‌طور کامل در طراحی لحاظ شود [16], [17], [35].

۲-۲. اصول حاکم بر طراحی برنامه نمونه‌برداری

به‌منظور افزایش دقت نتایج و کاهش خطاهای ناشی از ناهمگنی ذاتی مواد باطله، برنامه‌ی نمونه‌برداری بر اساس اصول زیر تدوین گردید:

۲-۲-۱. نمایندگی آماری (Representativity)

نقاط برداشت نمونه در هر معدن به‌گونه‌ای انتخاب شدند که تمامی واحدهای باطله با ویژگی‌های ژئوشیمیایی و فیزیکی متفاوت را پوشش دهند. این واحدها شامل باطله‌های تازه‌نباش، نواحی هوازده، واحدهای غنی از سولفید و بخش‌های مختلط متأثر از عملیات معدنکاری بودند [16], [35], [36]. این رویکرد امکان تحلیل رفتار ژئوشیمیایی نمونه‌ها را در دامنه‌ی واقعی تغییرات محیطی هر معدن فراهم می‌سازد [11], [37].

۲-۲-۲. تنوع محیط برداشت

نمونه‌ها از طیف گسترده‌ای از محیط‌های ژئومورفولوژیکی و ژئوشیمیایی برداشت شدند، از جمله:

- لایه‌های سطحی در تماس مستقیم با اکسیژن و بارش،
- بخش‌های عمقی‌تر با پتانسیل بالقوه‌ی بالاتر تولید اسید،

- واحدهای دگرسان‌شده شامل سیلیسی، آرژیلیک و واحدهای گذار،
- نواحی تازه‌انباشت و توده‌های فعال باطله [38],[11],[7].

۳-۲-۲. نمونه‌برداری مرکب (Composite Sampling)

به‌منظور کاهش اثر ناهمگنی موضعی و افزایش قابلیت اتکای آماری نتایج، هر نمونه نهایی از ادغام چند برداشت جزئی (Increment) از بخش‌های مختلف یک واحد باطله تهیه شد. این روش که با توصیه‌های استاندارد نمونه‌برداری مواد معدنی در مطالعات ژئوشیمیایی هم‌راستا است، نقش مؤثری در افزایش دقت و تکرارپذیری داده‌ها دارد [39],[37],[33].

۴-۲-۲. کنترل آلودگی و تضمین کیفیت

کلیه ابزار نمونه‌برداری پس از هر برداشت با استفاده از آب، برس و اتانول پاک‌سازی شدند تا از انتقال آلودگی بین نمونه‌ها جلوگیری شود [40]. این موضوع به‌ویژه با توجه به تفاوت قابل توجه ترکیب سولفیدی میان معادن، اهمیت ویژه‌ای داشت. برای هر نمونه، اطلاعات کامل شامل مختصات GPS، شرایط برداشت، مشخصات واحد نمونه‌برداری شده و فرم Chain of Custody ثبت و مستندسازی شد [41],[40],[33].

۳-۲. نمونه‌برداری در معدن سونگون

در معدن سونگون، با توجه به تنوع لیتولوژیکی سنگ میزبان و درصد متغیر فازهای سولفیدی، تعداد ۸ نمونه نماینده با کدهای VAD-01 تا VAD-08 برداشت شد [42],[12]. نمونه‌ها از واحدهای مختلف شامل بخش‌های سیلیسی، آرژیلیک و نواحی گذار انتخاب شدند تا طیف تغییرات ژئوشیمیایی موجود در باطله‌ها به‌خوبی پوشش داده شود. تمامی نمونه‌ها به‌صورت مرکب تهیه و پس از کدگذاری یکتا، در ظروف دربسته و عاری از آلودگی به آزمایشگاه منتقل شدند [33],[17].

۴-۲. نمونه‌برداری در معدن میدوک

با توجه به غنای بالاتر سولفیدی و پتانسیل بالای تولید زهاب اسیدی در معدن میدوک، برنامه‌ی نمونه‌برداری گسترده‌تری اجرا شد و در مجموع ۱۲ نمونه برداشت گردید [43],[5]. این نمونه‌ها شامل کدهای GD-1، GD-3، GD-4، GD-6، GD-7 و مجموعه نمونه‌های MSRT بودند. نقاط برداشت به‌گونه‌ای انتخاب شدند که تمامی واحدهای تازه‌انباشت، نواحی هوازده و بخش‌هایی با تفاوت‌های مشخص در ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی را دربرگیرند. کلیه مراحل برداشت، مستندسازی، بسته‌بندی و انتقال نمونه‌ها مطابق با پروتکل‌های استاندارد انجام شد [33],[16].

در مجموع، ۲۰ نمونه شامل ۸ نمونه از معدن سونگون و ۱۲ نمونه از معدن میدوک جمع‌آوری و برای مراحل آزمایشگاهی آماده شد.

۵-۲. آماده‌سازی نمونه‌ها و مراحل پیش‌تحلیلی (Sample Preparation and Pre-Analytical Procedures)

به‌منظور انجام آزمون‌های ژئوشیمیایی مرتبط با ارزیابی پتانسیل اسیدزایی و ظرفیت خنثی‌سازی، تمامی مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها با دقت بالا و مطابق با دستورالعمل‌های بین‌المللی اجرا شد. هدف اصلی این مرحله، تضمین یکنواختی، پایداری و تکرارپذیری نتایج و جلوگیری از هرگونه آلودگی یا تغییر ناخواسته در ترکیب معدنی نمونه‌ها بود [10], [37], [44].

۲-۶. خشک‌سازی اولیه و بررسی مقدماتی نمونه‌ها (Initial Drying and Inspection)

پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، خشک‌سازی اولیه در دمای محیط و بدون اعمال گرمایش مصنوعی انجام شد. حذف رطوبت سطحی در این مرحله ضروری بود، اما استفاده از حرارت به دلیل احتمال آغاز اکسایش زودهنگام فازهای سولفیدی، تغییر ساختار کانی‌ها و کاهش رطوبت ساختاری مواد ریزدانه، به‌طور کامل اجتناب شد [11], [45]. نمونه‌ها تنها در معرض جریان ملایم هوا قرار گرفتند تا فرآیند خشک‌سازی به‌صورت طبیعی انجام شود [46].

پس از خشک‌شدن، نمونه‌ها از نظر وجود مواد غیرمعدنی نظیر بقایای گیاهی، ریشه‌ها، قطعات درشت ناخواسته و ذرات خارجی بررسی و پاک‌سازی شدند. پیش از آغاز عملیات خردایش، کلیه تجهیزات با دقت تمیز شدند تا از هرگونه آلودگی احتمالی جلوگیری شود [40].

۲-۷. خردایش اولیه، همگن‌سازی و تقسیم زیرنمونه (Primary Crushing, Homogenization, and Splitting)

نمونه‌های خشک‌شده ابتدا با استفاده از سنگ‌شکن فکی تا اندازه‌ی چند میلی‌متر خرد شدند. پس از هر مرحله خردایش، فک‌های دستگاه با برس، هوای فشرده و الکل کاملاً پاک‌سازی شدند [40]. به‌منظور کاهش اثر ناهمگنی طبیعی مواد معدنی، نمونه‌ها چندین بار با استفاده از دو روش استاندارد Riffle Splitter و Coning and Quartering تقسیم و همگن شدند [35], [39], [47]. این مرحله به‌ویژه در مطالعات AMD اهمیت بالایی دارد، زیرا ناهمگنی جزئی می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر نتایج AP و NP داشته باشد [13], [48].

۲-۸. آسیاب نهایی و آماده‌سازی بخش تحلیلی (Final Grinding and Preparation of Analytical Fraction)

برای انجام آزمون‌های ژئوشیمیایی، بخشی از نمونه‌ها با آسیاب دیسکی تا اندازه‌ی کمتر از ۷۵ میکرون آسیاب شدند. انتخاب این دانه‌بندی مطابق با توصیه‌های روش Modified Sobek و دستورالعمل‌های MEND انجام شد، زیرا ذرات ریزتر واکنش‌پذیری یکنواخت‌تری در آزمون‌های اسیدی-خنثی‌سازی دارند و امکان مقایسه دقیق‌تر نتایج را فراهم می‌کنند [10], [49]. نمونه‌های آسیاب‌شده در ظروف دربسته و خشک نگهداری شدند تا از جذب رطوبت یا بروز واکنش‌های ناخواسته پیش از تحلیل جلوگیری شود [40], [50].

۲-۹. ملاحظات کنترل کیفیت در آماده‌سازی (QA/QC)

برای تضمین کیفیت فرآیند آماده‌سازی، مجموعه‌ای از اقدامات کنترل کیفیت شامل پاک‌سازی تجهیزات پس از هر نمونه، ثبت دقیق زنجیره انتقال، بررسی یکنواختی پودرها و استفاده از ظروف دربسته با برچسب‌گذاری یکتا اجرا شد [40], [51]. این اقدامات به‌ویژه با توجه به تفاوت چشمگیر مقدار سولفید میان نمونه‌های دو معدن، نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش خطاهای تحلیلی داشت [13].

۲-۱۰. اندازه‌گیری گوگرد کل (Total Sulfur Determination)

مقدار گوگرد کل (%S) نمونه‌ها با استفاده از روش احتراق در دمای بالا و به‌کارگیری دستگاه آنالیز گوگرد-کربن (LECO) مطابق با استاندارد ASTM E1915 اندازه‌گیری شد [31], [52]. در این روش، مقدار مشخصی از نمونه پودر شده در محفظه احتراق تحت جریان اکسیژن قرار گرفت و تمامی گونه‌های گوگردی به SO_2 تبدیل شدند. گاز حاصل پس از عبور از فیلترهای تثبیت‌کننده، توسط آشکارساز مادون قرمز اندازه‌گیری شد [53].

پیش از هر سری تحلیل، دستگاه با مواد مرجع گواهی‌شده (CRM) کالیبره گردید و کنترل بلانک و نمونه‌های تکراری به‌طور منظم انجام شد. نتایج این مرحله به‌عنوان مبنای اصلی محاسبه پتانسیل اسیدزایی (AP) مورد استفاده قرار گرفتند [10], [54].

۲-۱۱. محاسبه پتانسیل اسیدزایی (AP)

پتانسیل اسیدزایی بر اساس مقدار گوگرد کل و مطابق با رابطه استاندارد دستورالعمل‌های MEND محاسبه شد:

$$AP \left(\frac{kgCaCO_3}{t} \right) = (\%)S \times 31.25 \quad (1)$$

در این رابطه AP و S به ترتیب پتانسیل اسیدزایی و مقدار گوگرد کل می باشند.

این روش یک برآورد محافظه‌کارانه از توان بالقوه تولید اسید ارائه می‌دهد و در اغلب مطالعات AMD به‌عنوان مبنای استاندارد پذیرفته شده است [10], [55].

۲-۱۲. اندازه‌گیری پتانسیل خنثی‌سازی (NP)

پتانسیل خنثی‌سازی نمونه‌ها با استفاده از روش Modified Sobek تعیین شد. این روش یک آزمون تیتراسیون پس‌گرد (Back-Titration) است که در آن نمونه ی پودر شده (کمتر از ۷۵ میکرون) در محلول اسید کلریدریک (HCl) با نرمالیه معلوم هضم می‌شود تا تمامی فازهای خنثی‌کننده فعال (عمدتاً کربنات‌ها) واکنش دهند. پس از پایان واکنش، اسید باقیمانده با استفاده از محلول استاندارد سدیم هیدروکسید (NaOH) تا رسیدن به pH=7 تیتراژ گردید [10], [56]. ظرفیت خنثی‌سازی (NP) بر اساس اختلاف بین مقدار اسید مصرف‌شده و باز مصرفی محاسبه و به واحد معادل $CaCO_3$ گزارش شد [10]:

$$NP \left(\frac{kgCaCO_3}{t} \right) = \frac{(N_{HCl}V_{HCL} - N_{NaOH}V_{NaOH}) \times 50.043}{m(g)} \quad (2)$$

در این رابطه، N و Vol به ترتیب نرمالیت و حجم معرف های اسیدی و بازی (بر حسب میلی لیتر) و m جرم نمونه (بر حسب گرم) است.

۱۳-۲. محاسبه شاخص های ژئوشیمیایی و معیارهای طبقه بندی

۱-۱۳-۲. شاخص های NNP و NPR

پس از تعیین مقادیر AP و NP، شاخص های کلیدی پتانسیل خنثی سازی خالص (NNP) و نسبت خنثی سازی (NPR) که مبنای اصلی طبقه بندی ژئوشیمیایی نمونه ها را تشکیل می دهند، محاسبه شدند [10]:

$$NNP = NP - AP \quad (3)$$

$$NPR = \frac{NP}{AP} \quad (4)$$

که در این روابط NNP، NP، AP و NPR به ترتیب پتانسیل اسید سازی، پتانسیل خنثی سازی، پتانسیل خنثی

توضیح	دسته بندی	محدوده NNP (kg CaCO ₃ eq/t)
نمونه هایی که ظرفیت خنثی سازی بر پتانسیل تولید اسید غالب است	غیر اسیدی زا (Non-acid generating)	NNP > +20
نمونه هایی که رفتار اسیدی یا خنثی آنها نامشخص است	حالت مرزی (Uncertain)	-20 ≤ NNP ≤ +20
نمونه هایی که پتانسیل تولید اسید در آنها غالب است	پتانسیل اسیدی زایی (Potentially acid generating)	NNP < -20

سازی خالص و نسبت خنثی سازی هستند.

۲-۱۳-۲. معیارهای طبقه بندی و داده های تکمیلی

طبقه بندی نهایی پتانسیل اسیدزایی نمونه ها بر مبنای مقادیر NNP و مطابق دستورالعمل MEND انجام شد [10]:

(جدول ۱)

جدول ۱- معیارهای طبقه بندی پتانسیل اسیدزایی بر اساس شاخص NNP (دستورالعمل MEND)

۲-۱۳-۳ اندازه گیری pH خمیر (Paste pH)

آزمون pH خمیر مطابق با استاندارد ASTM D4972 انجام شد [57]. نمونه پودر شده با آب دی یونیزه مخلوط و پس از رسیدن به تعادل، pH خمیر با pH متر کالیبره اندازه گیری شد. این پارامتر به عنوان شاخص تکمیلی در تفسیر رفتار ژئوشیمیایی نمونه ها مورد استفاده قرار گرفت، به ویژه در مواردی که NNP در محدوده مرزی قرار داشت [57], [10].

۳. نتایج

در بخش نتایج، تحلیل جامعی از داده های مربوط به مقادیر AP، NP، NNP، NPR، pH، سولفور و همچنین پارامترهای محاسباتی مبتنی بر روش MEND برای هر دو معدن سونگون و میدوک ارائه شده است. این ارزیابی، تمام نمونه های برداشت شده از محیط معدنی را در بر می گیرد و به صورت تفصیلی ویژگی های ژئوشیمیایی و پتانسیل تولید زهاب اسیدی در این دو معدن را بررسی می کند.

در مجموع، در معدن سونگون هشت نمونه جامد با کدهای VAD-01 تا VAD-08 مورد سنجش قرار گرفته اند. در معدن میدوک نیز دوازده نمونه شامل شش نمونه جامد و شش نمونه مربوط به زهاب اسیدی معدنی (AMD) یا ترانشه ها تحلیل شده است. این مجموعه داده ها مبنای اصلی بررسی رفتار زمین شیمیایی و ارزیابی پتانسیل تولید یا خنثی سازی اسیدی در هر دو معدن بوده و چارچوب دقیق تری برای تحلیل های تکمیلی فراهم می کند.

۳-۱. نتایج معدن سونگون (VAD-01 تا VAD-08)

در ارزیابی داده های مربوط به زهاب و نمونه های جامد معدن سونگون، ابتدا درصد سولفور کل (%S) به عنوان یکی از مهم ترین شاخص های تعیین کننده پتانسیل تولید اسید مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می دهد که مقدار سولفور در نمونه های مختلف این معدن در بازه ای نسبتاً محدود و بین ۰.۱۴۴ تا ۲.۴۴۴ درصد نوسان دارد. (جدول ۲) کمترین مقدار سولفور مربوط به نمونه VAD-05 با ۰.۱۴۴ درصد و بیشترین مقدار در نمونه VAD-04 با ۲.۴۴۴ درصد ثبت شده است.

جدول ۲ - درصد گوگرد کل (%S) در نمونه های باطله معدن سونگون.

نمونه	S(%)
VAD-01	0.82
VAD-02	0.292
VAD-03	1.62
VAD-04	2.444
VAD-05	0.144
VAD-06	0.64
VAD-07	0.88

VAD-08	1.352
--------	-------

۳-۱-۲. پتانسیل تولید اسید (AP)

مقادیر پتانسیل تولید اسید (AP) در نمونه‌های مورد بررسی در بازه‌ای بین ۴.۵ تا ۷۶.۳۷۵ کیلوگرم معادل کربنات کلسیم بر تن تغییر می‌کند. بیشترین مقدار AP مربوط به نمونه VAD-04 با مقدار ۷۶.۳۷۵ $\text{kg CaCO}_3 \text{ eq/t}$ و کمترین مقدار آن مربوط به نمونه VAD-05 با مقدار ۴.۵ $\text{kg CaCO}_3 \text{ eq/t}$ است. مقایسه این نتایج با داده‌های مربوط به معدن میدوک نشان می‌دهد که مقادیر AP در این مجموعه نمونه‌ها به‌طور کلی پایین‌تر بوده و این موضوع بیانگر محتوای کمتر سولفیدها و در نتیجه پتانسیل محدودتر برای تولید زهاب اسیدی در این بخش می‌باشد. (جدول ۳)

۳-۱-۳. پتانسیل خنثی‌سازی (ANC و NP)

بررسی پتانسیل خنثی‌سازی نمونه‌ها نشان می‌دهد که مقادیر NP در بازه‌ای نسبتاً گسترده و بین ۱۱.۲۵ تا ۱۶۲.۵ کیلوگرم $\text{CaCO}_3 \text{ eq/t}$ تغییر می‌کند. بیشترین مقادیر NP در نمونه‌های VAD-03 با مقدار ۱۶۲.۵، VAD-01 با ۱۵۱.۲۵ و VAD-06 با ۱۳۱.۲۵ کیلوگرم $\text{CaCO}_3 \text{ eq/t}$ مشاهده شده است که بیانگر حضور قابل توجه فازهای خنثی‌کننده، به‌ویژه ترکیبات کربناتی، در این نمونه‌ها می‌باشد.

در مقابل، کمترین مقدار NP مربوط به نمونه VAD-04 با مقدار ۱۱.۲۵ کیلوگرم $\text{CaCO}_3 \text{ eq/t}$ است که نشان‌دهنده ظرفیت محدود خنثی‌سازی در این بخش می‌باشد. به‌طور کلی، در اغلب نمونه‌ها مقدار NP از AP بیشتر است که این موضوع حاکی از غلبه پتانسیل خنثی‌سازی بر پتانسیل تولید اسید و تمایل کلی سیستم به رفتار خنثی یا کم‌خطر از نظر اسیدزایی است. (جدول ۳)

۳-۱-۴. شاخص خالص تولید اسید (NNP)

شاخص خالص تولید اسید (NNP) که از اختلاف پتانسیل خنثی‌سازی (NP) و پتانسیل تولید اسید (AP) محاسبه می‌شود، معیار مناسبی برای ارزیابی نهایی رفتار اسیدی بازی نمونه‌ها فراهم می‌کند. نتایج محاسبه NNP نشان می‌دهد که اکثر نمونه‌ها دارای مقادیر مثبت هستند که بیانگر غلبه فرآیندهای خنثی‌سازی بر تولید اسید می‌باشد.

در میان نمونه‌های مورد بررسی، تنها نمونه VAD-04 دارای مقدار NNP منفی (۶۵.۱۲۵-) است که نشان‌دهنده غلبه پتانسیل تولید اسید بر ظرفیت خنثی‌سازی در این بخش می‌باشد. این نتیجه با مقادیر بالاتر سولفور (S%) در نمونه VAD-04 همخوانی داشته و آن را به‌عنوان محتمل‌ترین بخش با پتانسیل اسیدزایی در مجموعه نمونه‌های سونگون معرفی می‌کند. (جدول ۳)

جدول ۳ - پتانسیل اسیدزایی (AP)، پتانسیل خنثی‌سازی (NP)، ظرفیت خنثی‌سازی اسید (ANC) و شاخص خالص خنثی‌سازی (NNP) در نمونه‌های معدن سونگون.

نمونه	AP (kgCaCO ₃ /t)	NP (kgCaCO ₃ /t)	ANC	NNP
VAD_01	0.82	151.25	148.225	125.625
VAD-02	0.292	72.5	71.050	63.375
VAD-03	1.62	162.5	159.250	111.875
VAD-04	2.444	11.25	11.025	-65.125
VAD-05	0.144	125	122.500	120.5
VAD-06	0.64	131.25	128.625	111.25
VAD-07	0.88	150	147.000	122.5
VAD-08	1.352	68.75	67.375	26.5

۳-۱۸-۵. شاخص (NPR (NP / AP

NPR به‌عنوان مهم‌ترین معیار طبقه‌بندی در روش MEND برای ارزیابی رفتار اسیدی بازی نمونه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از نمونه‌های معدن سونگون در محدوده مواد کاملاً بی‌خطر از نظر تولید اسید قرار می‌گیرند. نمونه‌های VAD-01، VAD-02، VAD-03، VAD-05، VAD-06 و VAD-07 دارای مقادیر NPR بزرگ‌تر از ۲ هستند که بیانگر غلبه کامل ظرفیت خنثی‌سازی بر پتانسیل تولید اسید در این بخش‌ها می‌باشد. در این میان، نمونه VAD-08 با مقدار NPR برابر با ۱.۶۲۷ در محدوده گزار قرار گرفته و نشان‌دهنده تعادل نسبی میان فرآیندهای اسیدزایی و خنثی‌سازی است. تنها نمونه‌ای که در گروه مواد اسیدزا طبقه‌بندی می‌شود، نمونه VAD-04 با مقدار NPR برابر با ۰.۱۴۷۳ است که بیانگر خطر بالقوه تولید زهاب اسیدی در این بخش می‌باشد. بر این اساس، تنها ۱۲.۵ درصد از نمونه‌های

بررسی شده در معدن سونگون دارای رفتار اسیدزا بوده و بخش اعظم نمونه‌ها از نظر زیست‌محیطی کم‌خطر ارزیابی می‌شوند.
(جدول ۴)

۳-۱-۶ pH. اندازه‌گیری شده

بررسی مقادیر pH اندازه‌گیری شده نیز نتایج حاصل از شاخص‌های محاسباتی را به‌خوبی تأیید می‌کند. مقادیر pH در نمونه‌ها در بازه‌ای بین ۴.۳۵ تا ۷.۵۱ قرار دارد که کمترین مقدار آن مربوط به نمونه VAD-04 با pH برابر ۴.۳۵ و بیشترین مقدار آن مربوط به نمونه VAD-01 با مقدار ۷.۵۱ است. همخوانی بسیار خوبی میان مقادیر pH و شاخص‌های NNP و NPR مشاهده می‌شود، به‌طوری که تنها نمونه دارای رفتار اسیدزا، یعنی VAD-04، مقدار pH کمتر از ۵ را نشان می‌دهد. این تطابق، اعتبار نتایج ژئوشیمیایی به‌دست‌آمده از روش MEND را تقویت کرده و نشان می‌دهد که ارزیابی انجام‌شده به‌خوبی شرایط واقعی محیط را بازتاب می‌دهد. (جدول ۴)

جدول ۴- نسبت پتانسیل خنثی‌سازی (NPR) و pH خمیر در نمونه‌های معدن سونگون.

نمونه	NPR	pH
VAD-01	5.902	7.51
VAD-02	7.945	7.21
VAD-03	3.209	7.37
VAD-04	0.147	4.35
VAD-05	27.778	7.45
VAD-06	6.562	7.4
VAD-07	5.454	7.3
VAD-08	1.627	6.25

بررسی‌ها نشان می‌دهد که کانسار سونگون عمدتاً دارای رفتار خنثی‌کننده است. این نتیجه بر پایه داده‌های زیر استوار است:

تنها یک نمونه از مواد مورد مطالعه دارای خاصیت اسیدی بوده است، در حالی که هفت نمونه در دسته‌بندی مواد بی‌خطر (غیر اسیدی) قرار می‌گیرند.

علاوه بر این، پتانسیل خنثی‌سازی (NP) در اغلب موارد به میزان قابل توجهی بیشتر از پتانسیل تولید اسید (AP) اندازه‌گیری شده است. این نسبت بالا، نشان‌دهنده ظرفیت بالای مواد در مقابله با تولید اسید است.

مقادیر pH اندازه‌گیری شده نیز این یافته را تأیید می‌کنند، به‌طوری‌که محدوده pH عموماً در طیف خنثی تا قلیایی قرار دارد. در مجموع، شواهد حاکی از آن است که مواد موجود در محدوده مطالعاتی سونگون، به لحاظ ژئوشیمیایی پتانسیل پایینی برای ایجاد زهاب اسیدی از خود نشان می‌دهند.

۲-۳. نتایج معدن میدوک (۱۲ نمونه جامد/AMD + ترانسه)

نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده طیف وسیعی از مقادیر سولفور در نمونه‌ها است. حداقل مقدار اندازه‌گیری شده ۱.۹۴۴ درصد و حداکثر مقدار آن به ۱۱.۵۸ درصد می‌رسد. نکته قابل توجه، وجود نمونه‌هایی است که درصد سولفور آن‌ها از مرز ۶ درصد فراتر رفته است. این نمونه‌های با محتوای سولفور بالا عبارتند از:

نمونه GD 1 با ۶.۱۲۸ درصد

نمونه MSRT 1 با ۶.۲۲۸ درصد

نمونه MSRT 3 با ۱۱.۵۸ درصد

غلظت‌های بالای سولفور، به‌ویژه در نمونه‌های ذکرشده، پتانسیل قابل توجهی برای تولید اسید در کانسار میدوک ایجاد می‌کند. (جدول ۵)

جدول ۵ - درصد گوگرد کل (S%) در نمونه‌های باطله معدن میدوک

نمونه	S(%)
GD-1	6.128
GD-3	3.472
GD-4	2.120
GD-6	1.944
GD-7	2.116
MSRT-G	3.920
MSRT-1	6.228
MSRT-2	4.108
MSRT-3	11.580
MSRT-4	5.568
MSRT-5	4.452

MSRT-6

3.820

۳-۲-۲. پتانسیل تولید اسید (AP)

بررسی پتانسیل تولید اسید در نمونه‌های معدن میدوک نشان می‌دهد که مقادیر AP در این معدن به‌طور قابل توجهی بالا است. کمترین مقدار AP برابر با ۶۰.۷۵ کیلوگرم $\text{CaCO}_3 \text{ eq/t}$ و مربوط به نمونه GD-6 می‌باشد، در حالی که بیشترین مقدار AP در نمونه MSRT-3 با مقدار ۳۶۱.۸۷۵ کیلوگرم $\text{CaCO}_3 \text{ eq/t}$ ثبت شده است. این مقدار، بالاترین میزان AP در میان هر سه معدن مورد بررسی در این مطالعه محسوب می‌شود و بیانگر حضور گسترده و فعال فازهای سولفیدی با پتانسیل بالای تولید اسید در باطله‌های معدن میدوک است. چنین مقادیری نشان می‌دهد که از نظر پتانسیل اولیه اسیدزایی، معدن میدوک در شرایط بسیار بحرانی‌تری نسبت به معدن سونگون قرار دارد. (جدول ۶)

۳-۲-۳. پتانسیل خنثی‌سازی (NP)

نتایج حاصل از محاسبه پتانسیل خنثی‌سازی (NP) در نمونه‌های معدن میدوک حاکی از آن است که این پارامتر در اغلب نمونه‌ها بسیار پایین بوده و در بسیاری از موارد مقادیر نزدیک به صفر یا حتی منفی را نشان می‌دهد. این موضوع بیانگر فقدان یا کمبود شدید فازهای خنثی‌کننده، به‌ویژه کانی‌های کربناتی، در توده باطله این معدن است. اگرچه در برخی نمونه‌ها مقادیر اندکی NP مثبت مشاهده شده است، مانند نمونه GD-4 با مقدار ۱۴ کیلوگرم $\text{CaCO}_3 \text{ eq/t}$ ، اما این مقادیر در مقایسه با AP بسیار ناچیز بوده و عملاً توانایی مؤثری برای خنثی‌سازی اسید تولیدی ندارند. در نتیجه، توازن ژئوشیمیایی در باطله‌های میدوک به‌طور کامل به نفع فرآیندهای اسیدزایی تغییر یافته است. (جدول ۶)

۳-۲-۴. شاخص خالص تولید اسید (NNP)

محاسبه شاخص خالص تولید اسید (NNP) تصویر روشنی از وضعیت اسیدزایی در معدن میدوک ارائه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که تمام نمونه‌های مورد بررسی، بدون هیچ استثنایی، دارای مقادیر منفی NNP هستند. برای مثال، نمونه GD-1 با AP برابر ۱۹۱.۵ و NP برابر ۵.۵ دارای NNP معادل ۱۸۶- است، نمونه GD-3 با NP منفی ۶.۷۵- و AP برابر ۱۰۸.۵ مقدار ۱۱۵.۲۵- را نشان می‌دهد و نمونه MSRT-3 با بیشترین AP برابر ۳۶۱.۸۷۵ و NP تقریباً صفر (۰.۲۵-) دارای NNP بسیار منفی ۳۶۲.۱۲۵- کیلوگرم CaCO_3 eq/t می‌باشد. (جدول ۶)

جدول ۶- پتانسیل اسیدزایی (AP)، پتانسیل خنثی‌سازی (NP) و شاخص خالص خنثی‌سازی (NNP) در نمونه‌های معدن میدوک.

نمونه	AP(kgCaCO_3/t)	NP(kgCaCO_3/t)	NNP
GD-1	191.5	5.5	-186
GD-3	108.5	-6.75	-115.25
GD-4	66.25	14	-52.25
GD-6	60.75	7.25	-53.5
GD-7	66.125	4.75	-61.375
MSRT-G	122.5	-11.25	-133.75
MSRT-1	194.625	-11.25	-205.875
MSRT-2	128.375	-12	-140.375
MSRT-3	361.875	-0.25	-362.125
MSRT-4	174	3	-171
MSRT-5	139.125	-9.25	-148.375
MSRT-6	119.375	-1.25	-120.625

این نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که ۱۰۰ درصد نمونه‌های معدن میدوک دارای پتانسیل خالص تولید اسید هستند و هیچ‌یک از نمونه‌ها از ظرفیت خنثی‌سازی مؤثر برخوردار نمی‌باشند. چنین شرایطی معدن میدوک را از منظر تولید زهاب

اسیدی در وضعیت بسیار پرخطر قرار داده و ضرورت اتخاذ راهکارهای کنترلی و مدیریتی جدی و هدفمند را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

۳-۲-۵. شاخص NPR (NP/AP)

بررسی شاخص NPR در نمونه‌های معدن میدوک نشان می‌دهد که مقادیر این شاخص در تمامی نمونه‌ها کمتر از یک بوده و در اغلب موارد به مقادیر بسیار نزدیک به صفر میل می‌کند. به‌ویژه در نمونه‌های MSRT-3، MSRT-6 و MSRT-G مقدار NPR تقریباً صفر است که بیانگر فقدان عملی ظرفیت خنثی‌سازی در برابر پتانسیل بالای تولید اسید می‌باشد. در برخی نمونه‌ها حتی مقادیر منفی NPR مشاهده شده است که مستقیماً ناشی از مقادیر منفی NP بوده و نشان‌دهنده شرایط ژئوشیمیایی به‌شدت اسیدزا است. در میان سه معدن مورد بررسی در این مطالعه، معدن میدوک تنها معدنی است که در آن تمامی نمونه‌ها دارای NPR کمتر از یک هستند و این موضوع وضعیت بحرانی این معدن از نظر تولید زهاب اسیدی را به‌روشنی نشان می‌دهد. (جدول ۷)

۳-۲-۶. pH اندازه‌گیری شده

نتایج اندازه‌گیری pH در نمونه‌های معدن میدوک حاکی از غالب بودن شرایط اسیدی شدید در این معدن است. کمترین مقدار pH مربوط به نمونه MSRT-4 با مقدار ۲.۴۶ می‌باشد که نشان‌دهنده محیطی بسیار اسیدی است. بیشترین مقدار pH در نمونه GD-4 با مقدار ۶.۶۱ مشاهده شده است که تنها نمونه با شرایط نسبتاً خنثی در میان مجموعه نمونه‌های میدوک به‌شمار می‌رود. سایر نمونه‌ها عمدتاً در بازه ۲.۶ تا ۳.۹ قرار دارند که مؤید گسترده‌ی محیط‌های اسیدی در توده باطله این معدن است. این مقادیر پایین pH کاملاً با مقادیر شدیداً منفی NNP همخوانی داشته و وقوع فعال فرآیندهای اسیدزایی را تأیید می‌کند. (جدول ۷)

جدول ۷ - نسبت پتانسیل خنثی‌سازی (NPR) و pH خمیر در نمونه‌های معدن میدوک .

نمونه	NPR	pH
GD-1	0.028721	5.48
GD-3	-0.06221	2.82
GD-4	0.211321	6.61
GD-6	0.119342	3.66
GD-7	0.071834	3.89
MSRT-G	-0.09184	2.83

MSRT-1	-0.0578	2.83
MSRT-2	-0.09348	2.6
MSRT-3	-0.00069	3.35
MSRT-4	0.017241	2.46
MSRT-5	-0.06649	3.43
MSRT-6	-0.01047	3.45

جمع‌بندی نتایج نشان می‌دهد که معدن مس میدوک از منظر ژئوشیمیایی یک معدن کاملاً اسیدی محسوب می‌شود. تمامی ۱۲ نمونه مورد بررسی در این معدن دارای رفتار اسیدزا بوده و با مقادیر بالای سولفور، پتانسیل تولید اسید بسیار زیاد، ظرفیت خنثی‌سازی بسیار محدود یا منفی و مقادیر پایین pH مشخص می‌شوند. بر اساس معیارهای روش MEND، معدن میدوک در وضعیت پرخطر از نظر تولید زهاب اسیدی قرار دارد و نیازمند اقدامات مدیریتی فوری و هدفمند به‌ویژه در زمینه کنترل و مدیریت آب‌های اسیدی و باطله‌ها می‌باشد.

۳-۳. مقایسه مستقیم سونگون و میدوک

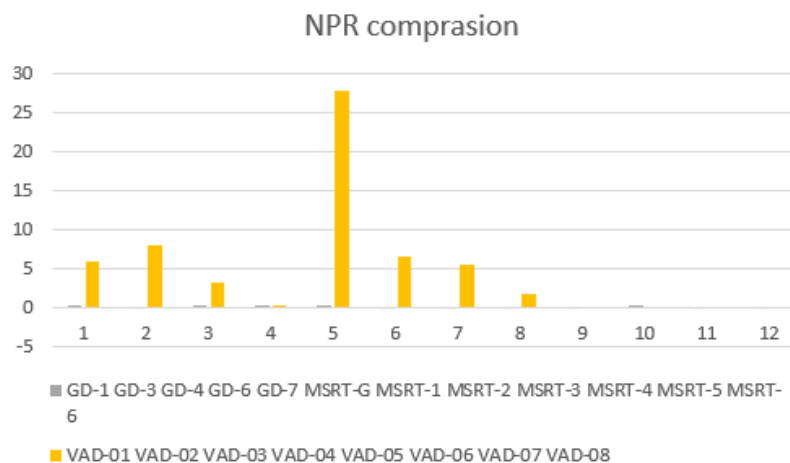
مقایسه مستقیم شاخص‌های ژئوشیمیایی معادن سونگون و میدوک تفاوت‌های بنیادین این دو معدن را از نظر پتانسیل تولید زهاب اسیدی به‌روشنی نشان می‌دهد. از نظر تعداد نمونه‌های مورد بررسی، معدن سونگون با ۸ نمونه و معدن میدوک با ۱۲ نمونه ارزیابی شده‌اند که هر دو مجموعه، نمای مناسبی از شرایط ژئوشیمیایی باطله‌ها و محیط معدنی را فراهم می‌کنند. بررسی درصد سولفور (%S) نشان می‌دهد که دامنه تغییرات سولفور در سونگون بین ۰.۱۴ تا ۲.۴۴ درصد است، در حالی که در معدن میدوک این مقدار به‌طور قابل توجهی بالاتر بوده و در بازه ۱.۹۴ تا ۱۱.۵۸ درصد قرار دارد. این اختلاف، نخستین نشانه از غلبه کانی‌های سولفیدی اسیدزا در میدوک در مقایسه با سونگون است.

مقایسه پتانسیل تولید اسید (AP) نیز این تفاوت را تقویت می‌کند. مقادیر AP در سونگون نسبتاً پایین بوده و بین ۴.۵ تا ۷۶ کیلوگرم CaCO_3 eq/t تغییر می‌کند، در حالی که در میدوک این مقادیر بسیار بالا بوده و در بازه ۶۰ تا ۳۶۲ کیلوگرم CaCO_3 eq/t قرار دارد. چنین اختلافی نشان می‌دهد که شدت و گستره واکنش‌های بالقوه تولید اسید در میدوک به‌مراتب بیشتر از سونگون است. در مقابل، پتانسیل خنثی‌سازی (NP) در سونگون مقادیر قابل توجهی را نشان می‌دهد و در بازه ۱۱ تا ۱۶۲ کیلوگرم CaCO_3 eq/t قرار دارد، که بیانگر حضور گسترده فازهای کربناتی و مواد بافری در توده باطله این معدن است. این در حالی است که NP در میدوک عمدتاً بسیار پایین یا منفی بوده و در محدوده ۱۲- تا ۱۴ کیلوگرم CaCO_3 eq/t تغییر می‌کند، که حاکی از کمبود شدید مواد خنثی‌کننده در این معدن می‌باشد.

شاخص خالص تولید اسید (NNP) تصویر نهایی و روشنی از تفاوت رفتار این دو معدن ارائه می‌دهد. در سونگون، دامنه NNP از +۱۲۵ تا -۶۵ متغیر است و تنها یک نمونه رفتار اسیدزا نشان می‌دهد، در حالی که در میدوک تمام نمونه‌ها دارای مقادیر منفی NNP هستند که بیانگر پتانسیل خالص تولید اسید در کل دامنه نمونه‌ها می‌باشد. این تفاوت در شاخص

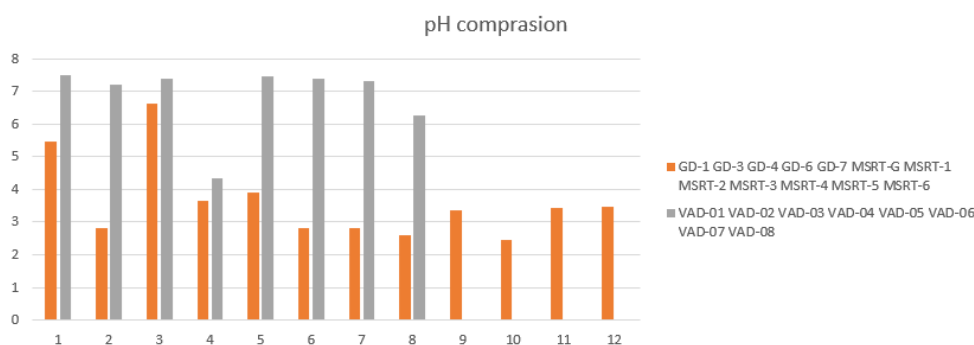
NPR نیز به‌وضوح مشاهده می‌شود؛ به‌طوری که مقادیر NPR در سونگون در بازه ۰.۱۵ تا ۲۷ قرار داشته و اغلب نمونه‌ها در محدوده مواد خنثی‌کننده قوی طبقه‌بندی می‌شوند، اما در معدن میدوک تمامی مقادیر NPR کمتر از ۰.۲۱ بوده و همگی در محدوده مواد اسیدزا قرار می‌گیرند. (شکل ۱)

شکل ۱ - توزیع شاخص‌های ژئوشیمیایی NNP و NPR در معادن سونگون و میدوک.



رفتار اسیدیته محیط نیز این الگو را تأیید می‌کند. مقادیر pH اندازه‌گیری‌شده در سونگون دامنه‌ای از ۴.۳ تا ۷.۵ را پوشش می‌دهد و غالباً شرایط خنثی تا کمی اسیدی را نشان می‌دهد، در حالی که pH در میدوک عمدتاً پایین‌تر بوده و در بازه ۲.۴ تا ۶.۶ قرار دارد، به‌طوری که اکثر نمونه‌ها محیطی به‌شدت اسیدی را منعکس می‌کنند. این همخوانی میان داده‌های pH و شاخص‌های محاسباتی MEND نشان می‌دهد که تفاوت رفتار ژئوشیمیایی این دو معدن نه‌تنها در مقیاس آزمایشگاهی، بلکه در شرایط واقعی محیط نیز کاملاً مشهود است. (شکل ۲)

شکل ۲ - همبستگی بین pH محیطی و شاخص خالص خنثی‌سازی (NNP) در دو کانسار مورد مطالعه.



در مجموع، نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که معدن سونگون از نظر ژئوشیمیایی یک معدن کم‌خطر با رفتار غالباً خنثی‌کننده و تنها نقاط محدود اسیدزا است، در حالی که معدن میدوک در کل دامنه نمونه‌ها دارای پتانسیل قوی و پایدار تولید زهاب اسیدی می‌باشد. این تفاوت اساسی بیانگر آن است که رویکردهای مدیریتی و زیست‌محیطی مورد نیاز برای این دو معدن باید کاملاً متفاوت بوده و به‌ویژه در معدن میدوک، کنترل فعال و بلندمدت زهاب‌های اسیدی یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر محسوب می‌شود. (جدول ۸)

جدول ۸ - خلاصه‌ای مقایسه‌ای از محدوده شاخص‌های ژئوشیمیایی در معادن سونگون و میدوک

میدوک	سونگون	شاخص
12	8	تعداد نمونه
1.94–11.58	0.14–2.44	%S
60–362	4.5–76	AP
14 تا -12	11–162	NP
همگی منفی	-65 تا +125	NNP
همگی کمتر از 0.21	0.15–27	NPR
2.4–6.6	4.3–7.5	pH

۴. بحث

۴-۱. تحلیل کلی رفتار اسیدی-بازی دو معدن

نتایج به‌دست‌آمده از ارزیابی ژئوشیمیایی معادن سونگون و میدوک نشان‌دهنده وجود دو الگوی کاملاً متفاوت در رفتار اسیدی-بازی و پتانسیل تولید زهاب اسیدی است. در معدن سونگون، از مجموع هشت نمونه مورد بررسی، تنها یک نمونه رفتار اسیدزا نشان داده است، در حالی که در معدن میدوک تمامی نمونه‌ها دارای مقادیر منفی NNP، نسبت NPR کمتر از یک و pH اسیدی هستند. این تفاوت بنیادین بیانگر آن است که فرآیندهای اسیدزایی در میدوک به‌صورت غالب و فراگیر عمل می‌کنند، در حالی که در سونگون این فرآیندها محدود و موضعی هستند.

اختلاف مشاهده‌شده میان این دو معدن را می‌توان به سه عامل اصلی نسبت داد. نخست، تفاوت در ترکیب و مقدار سولفیدها که به‌طور مستقیم بر پتانسیل تولید اسید تأثیر می‌گذارد. دوم، اختلاف شدید در ظرفیت خنثی‌سازی که از طریق شاخص‌های NP و ANC نمایان می‌شود و نقش تعیین‌کننده‌ای در مهار یا تشدید اسیدزایی دارد. سوم، نقش متفاوت کانی‌های

کربناتی و سیلیکاتی در هر یک از این دو معدن است؛ به‌گونه‌ای که حضور فازهای کربناتی در سونگون موجب تقویت توان بافری سیستم شده، در حالی که در میدوک این فازها یا بسیار محدود بوده یا عملاً غایب هستند.

۲-۴. نقش سولفور در شکل‌دهی رفتار اسیدی

مقایسه مقادیر سولفور کل در دو معدن نشان می‌دهد که این پارامتر نقش کلیدی در کنترل رفتار اسیدی-بازی ایفا می‌کند. معدن سونگون دارای مقادیر نسبتاً پایین سولفور در بازه ۰.۱۴۴ تا ۲.۴۴۴ درصد است که این موضوع موجب پایین بودن پتانسیل تولید اسید در اکثر نمونه‌ها شده و احتمال بروز فرآیندهای شدید اسیدزایی را به‌طور قابل توجهی محدود می‌کند. در نتیجه، تنها نواحی دارای سولفور بالاتر، مانند نمونه VAD-04، به‌عنوان بخش‌های پرریسک از نظر تولید زهاب اسیدی شناسایی می‌شوند، در حالی که بخش اعظم توده باطله رفتار خنثی یا کم‌خطر دارد.

در مقابل، معدن میدوک دارای مقادیر بالای سولفور در محدوده ۱.۹۴ تا بیش از ۱۱ درصد است که به‌طور مستقیم منجر به افزایش چشمگیر پتانسیل تولید اسید می‌شود. در این معدن، مقادیر AP تا حدود ۳۶۱ کیلوگرم $\text{CaCO}_3 \text{ eq/t}$ افزایش یافته و رفتار اسیدزایی به‌صورت غالب و پایدار در کل دامنه نمونه‌ها مشاهده می‌شود. چنین سطح بالایی از سولفور باعث می‌شود که تولید زهاب اسیدی در میدوک تقریباً قطعی بوده و نقش ظرفیت خنثی‌سازی محدود موجود نیز در مهار این فرآیند ناچیز باشد. این الگوی رفتاری شباهت زیادی به باطله‌های اسیدزای معادن بزرگ مس در کشورهایی مانند شیلی و کانادا دارد و نشان‌دهنده ترکیب کانی‌شناسی غنی از سولفیدهای فعال و واکنش‌پذیر در معدن میدوک است.

۳-۴. نوسان ظرفیت خنثی‌سازی در سونگون و فقدان آن در میدوک

بررسی شاخص‌های NP و ANC تفاوت اساسی میان ظرفیت خنثی‌سازی در معادن سونگون و میدوک را به‌وضوح نشان می‌دهد. در معدن سونگون، بخشی از نمونه‌ها دارای مقادیر بالای NP، در برخی موارد بیش از ۱۵۰ کیلوگرم $\text{CaCO}_3 \text{ eq/t}$ هستند که بیانگر حضور مؤثر فازهای کربناتی و کانی‌های بافری در توده باطله این معدن است. این ظرفیت خنثی‌سازی بالا موجب شده است که حتی در نمونه‌هایی با مقدار سولفور متوسط، اسید تولیدی به‌طور مؤثری خنثی شده و رفتار اسیدی سیستم مهار گردد. وجود این نواحی با توان بافری قابل توجه نشان‌دهنده توزیع ناهمگون مواد کربناتی در سونگون است و همین موضوع سبب شده است که حدود ۸۷ درصد نمونه‌های این معدن بر اساس معیارهای MEND در رده مواد کم‌خطر یا بی‌خطر از نظر تولید زهاب اسیدی قرار گیرند.

در مقابل، نتایج مربوط به معدن میدوک نشان می‌دهد که پتانسیل خنثی‌سازی در این معدن به‌طور کلی بسیار محدود بوده و مقادیر NP در اغلب نمونه‌ها نزدیک به صفر یا حتی منفی است. حتی در نمونه‌هایی که مقدار سولفور آن‌ها در محدوده متوسط قرار دارد، ظرفیت خنثی‌سازی موجود برای مقابله با اسید تولیدی کافی نبوده و نقش کانی‌های بافری بسیار ضعیف است. این فقدان مواد خنثی‌کننده باعث شده است که فرآیندهای اسیدزایی به‌عنوان پدیده غالب در توده باطله میدوک عمل کنند. چنین وضعیتی در معادن دارای ذخایر سولفیدی بالا پدیده‌ای شناخته‌شده و متداول است و معمولاً منجر به تولید پایدار زهاب اسیدی در بلندمدت می‌شود.

۴-۴. شاخص NPR به‌عنوان معیار تمایز دو معدن

شاخص NPR به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و دقیق‌ترین فاکتورهای روش MEND، نقش کلیدی در تمایز رفتار ژئوشیمیایی معادن سونگون و میدوک ایفا می‌کند. مقایسه مقادیر NPR نشان می‌دهد که در معدن سونگون این شاخص در دامنه‌ای گسترده، از حدود ۱.۶ تا بیش از ۲۷، تغییر می‌کند. این بازه وسیع بیانگر آن است که در بخش عمده‌ای از نمونه‌های سونگون، ظرفیت خنثی‌سازی به‌مراتب بر پتانسیل تولید اسید غلبه دارد و سیستم به‌طور کلی تمایل به رفتار خنثی یا کم‌خطر نشان می‌دهد.

در مقابل، در معدن میدوک تمامی مقادیر NPR کمتر از ۰.۲۱ بوده و بسیاری از آن‌ها به مقادیر بسیار نزدیک به صفر میل می‌کنند. نکته قابل توجه آن است که هیچ‌یک از نمونه‌های میدوک حتی به محدوده انتقالی (NPR بین ۱ تا ۲) نزدیک نشده‌اند، که این موضوع نشان‌دهنده غلبه کامل فرآیندهای اسیدزایی در این معدن است. از این رو، شاخص NPR را می‌توان دقیق‌ترین معیار برای نمایش تفاوت سیستماتیک میان این دو معدن دانست؛ به‌گونه‌ای که سونگون یک محیط با پتانسیل خنثی‌سازی غالب و میدوک یک محیط کاملاً اسیدزا ارزیابی می‌شود.

۴-۵. تطابق pH با شاخص‌های MEND

بررسی مقادیر pH اندازه‌گیری‌شده در هر دو معدن نشان می‌دهد که این پارامتر رفتار کاملاً سازگاری با شاخص‌های ژئوشیمیایی MEND، به‌ویژه NNP و NPR، دارد. در معدن سونگون، pH نمونه‌ها در بازه ۴.۳۵ تا ۷.۵۱ تغییر می‌کند که بیانگر تنوع رفتار اسیدی-بازی در توده باطله است. تنها نمونه اسیدزا این معدن، یعنی VAD-04، دارای pH کمتر از ۵ بوده که با مقدار NNP منفی و NPR کمتر از یک آن کاملاً هم‌خوان است. در مقابل، نمونه‌هایی که مقادیر بالای NP و NPR بزرگ‌تر از ۲ دارند، pH خنثی تا کمی قلیایی نشان می‌دهند که بیانگر غلبه ظرفیت خنثی‌سازی بر تولید اسید در این بخش‌هاست.

در معدن میدوک، وضعیت به‌مراتب یکنواخت‌تر و بحرانی‌تر است. مقادیر pH اغلب در محدوده ۲.۴ تا ۳.۹ قرار دارند و در بسیاری از نمونه‌ها pH کمتر از ۳ ثبت شده است که نشان‌دهنده اسیدزایی شدید و فعال است. این شرایط کاملاً با مقادیر NNP منفی شدید و NPR بسیار پایین در تمامی نمونه‌های میدوک مطابقت دارد. چنین هم‌خوانی میان pH و شاخص‌های MEND نشان می‌دهد که نتایج آزمایشگاهی از انسجام و دقت بالایی برخوردار بوده و تفسیرهای ارائه‌شده از رفتار اسیدی-بازی این معادن قابل اتکا هستند.

۴-۶. تفسیر محیط‌زیستی استخراج‌شده از نتایج

تحلیل یکپارچه شاخص‌های ژئوشیمیایی و داده‌های pH پیامدهای محیط‌زیستی متفاوتی را برای دو معدن سونگون و میدوک آشکار می‌سازد. در معدن سونگون، نواحی با پتانسیل بالای تولید اسید محدود و پراکنده هستند و عمدتاً به بخش‌هایی با سولفور بالاتر و ظرفیت خنثی‌سازی پایین‌تر مربوط می‌شوند. این ویژگی امکان مدیریت موضعی، منطقه‌بندی‌شده و هدفمند را فراهم می‌کند، به‌طوری که با تمرکز بر نقاط پرخطر می‌توان خطر تولید زهاب اسیدی را به‌طور مؤثری کنترل کرد. در نتیجه، بخش قابل توجهی از باطله‌های سونگون ذاتاً تهدید محیط‌زیستی جدی ایجاد نمی‌کنند.

در مقابل، معدن میدوک نمایانگر یک سیستم اسیدزای فراگیر است که تقریباً تمامی دامنه نمونه‌ها را در بر می‌گیرد. پتانسیل بالای تولید اسید، ظرفیت خنثی‌سازی بسیار محدود و pH به‌شدت اسیدی نشان می‌دهد که مدیریت این معدن نیازمند برنامه‌های بلندمدت، پایدار و ساختارمند برای کنترل زهاب اسیدی است. در این معدن، AMD یک پدیده فعال و جاری محسوب می‌شود و شرایط مشاهده‌شده شباهت زیادی به معادن بزرگ سولفیدی جهان دارد که با مشکل تولید مزمن زهاب اسیدی مواجه‌اند. این نتایج اهمیت توجه ویژه به راهکارهای مهندسی و مدیریتی پیشگیرانه در میدوک را برجسته می‌سازد.

۵. نتیجه‌گیری (Conclusion)

تحلیل‌های صورت گرفته بر روی دو کانسار سونگون و میدوک، نتایج و نیازهای مدیریتی کاملاً متضادی را آشکار می‌سازد. نتایج مربوط به معدن سونگون نشان می‌دهد که این کانسار عمدتاً کم‌خطر تلقی می‌شود. شواهد این امر، وجود مقادیر مثبت NNP، نسبت NPR بالاتر از یک، و pH نزدیک به خنثی در هفت نمونه از هشت نمونه بررسی‌شده است. تنها یک نمونه (VAD-04) رفتار اسیدی قابل‌توجهی نشان داد که علت آن به‌طور مستقیم به محتوای سولفور بالا و ظرفیت خنثی‌کنندگی (NP) پایین مرتبط بود. در مقابل، معدن میدوک دارای پتانسیل اسیدزایی بسیار بالایی ارزیابی شد. تمامی نمونه‌های این کانسار دارای NNP منفی، نسبت NPR بسیار کمتر از یک و pH اسیدی بودند. ترکیب سطح بالای سولفور با ظرفیت خنثی‌کنندگی تقریباً صفر، موجب شده است که این کانسار مطابق با طبقه‌بندی MEND، در گروه «کاملاً اسیدزا» قرار گیرد.

مقایسه مستقیم دو معدن نشان می‌دهد که این تفاوت بنیادین عمدتاً ناشی از ترکیب کانی‌شناسی باطله‌ها است. در سونگون، حضور کربنات‌ها (خنثی‌کننده) بیشتر از سولفیدها است، در حالی که در میدوک، ترکیب سولفیدی غالب است. این یافته‌ها پیامدهای مدیریتی واضحی دارند: کانسار میدوک به‌عنوان منطقه‌ای با خطر بالا، نیازمند اقدامات فوری برای مدیریت و پایش مداوم زهاب اسیدی است. در مقابل، سونگون را می‌توان با برنامه‌های مدیریتی محدود و هدفمند تحت کنترل نگه داشت.

در نهایت، این تحلیل مقایسه‌ای نه تنها یک ارزیابی خطر روشن ارائه می‌دهد، بلکه پایه‌ای علمی برای توسعه ابزارهای پیشرفته‌تر مدل‌سازی در مطالعات آتی (همچون مقاله‌های ISI) فراهم می‌کند. نتایج حاضر می‌تواند مستقیماً در فرآیندهای تصمیم‌گیری مرتبط با معدن‌کاری، روش‌های باطله‌ریزی و طراحی سیستم‌های کنترل زیست‌محیطی به کار گرفته شود.

مراجع

1. Nordstrom, D.K., & Alpers, C.N. (1999). Geochemistry of acid mine waters. *Reviews in Economic Geology*, 6A, 133–160.
2. Blowes, D.W., Ptacek, C.J., Jambor, J.L., & Weisener, C.G. (2003). The geochemistry of acid mine drainage. In H.D. Holland & K.K. Turekian (Eds.), *Treatise on Geochemistry* (Vol. 9, pp. 149–204). Elsevier.
3. Plumlee, G.S. (1999). The environmental geology of mineral deposits. *Reviews in Economic Geology*, 6A, 71–116.
4. Parbhakar-Fox, A., & Lottermoser, B.G. (2015). A critical review of acid rock drainage prediction methods and practices. *Minerals Engineering*, 82, 107–124.
5. Lottermoser, B.G. (2010). *Mine wastes: Characterization, treatment and environmental impacts* (3rd ed.). Springer.
6. Dold, B. (2017). Evolution of acid mine drainage formation in sulphidic mine tailings. *Minerals*, 7(9), 163.
7. Younger, P.L., Banwart, S.A., & Hedin, R.S. (2002). *Mine water: Hydrology, pollution, remediation*. Kluwer Academic Publishers.
8. Edraki, M., Baumgartl, T., Manlapig, E., Bradshaw, D., Franks, D.M., & Moran, C.J. (2014). Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: A review of alternative approaches. *Journal of Cleaner Production*, 84, 411–420.
9. INAP (The International Network for Acid Prevention). (2014). *Global Acid Rock Drainage Guide (GARD Guide)*.
10. MEND (Mine Environment Neutral Drainage Program). (2009). *Prediction manual for drainage chemistry from sulphidic geologic materials* (Report 1.20.1). Natural Resources Canada.
11. Price, W.A. (2009). *Prediction manual for drainage chemistry from sulphidic geologic materials* (MEND Report 1.20.1). Natural Resources Canada.
12. Smart, R., Skinner, B., Levay, G., Gerson, A., Thomas, J., Sobieraj, H., ... & Miller, S. (2002). *ARD Test Handbook: Project P387A, Prediction and Kinetic Control of Acid Mine Drainage*. AMIRA International.
13. Morin, K.A., & Hutt, N.M. (2001). *Environmental geochemistry of minesite drainage: Practical theory and case studies*. MDAG Publishing.
14. Modabberi, S., & Moore, F. (2004). Environmental geochemistry of Zarshuran gold deposit, NW Iran. *Environmental Geology*, 46(6-7), 796–807.
15. Ghasemzadeh, S., & Aftabi, A. (2015). Hydrogeochemical characteristics and seasonal variations of AMD in a semi-arid climate: Sungun porphyry copper deposit, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 74(4), 3171–3185.
- Hezarkhani, A. (2006). Hydrothermal evolution of the Miduk porphyry copper system, Kerman, Iran: Evidence from fluid inclusions. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28(4-6), 409–422.

16. Hezarkhani, A., & Williams-Jones, A.E. (1998). Controls of alteration and mineralization in the Sungun porphyry copper deposit, Iran: Evidence from fluid inclusions and stable isotopes. *Economic Geology*, 93(5), 651–670.
17. Parbhakar-Fox, A., Lottermoser, B.G., & Bradshaw, D. (2013). Evaluating waste rock mineralogy and microtexture during kinetic testing for improved acid rock drainage prediction. *Minerals Engineering*, 52, 111–124.
18. Kossoff, D., Dubbin, W.E., Alfredsson, M., Edwards, S.J., Macklin, M.G., & Hudson-Edwards, K.A. (2014). Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, 51, 229–245.
19. Shahabpour, J. (2007). Economic geology of Iran. *Journal of Economic Geology*, 1, 1–30.
20. Ghasemi, M., & Ghaderi, M. (2014). Geochemical and mineralogical characteristics of the Miduk porphyry copper deposit tailings, Kerman, Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 144, 1–14.
21. Mohammadi, A., Hezarkhani, A., & Maghsoudi, A. (2020). Geochemical characteristics and acid mine drainage potential of Miduk copper mine tailings, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 228.
22. Jambor, J.L., Blowes, D.W., & Ritchie, A.I.M. (2003). Environmental aspects of mine wastes. *Mineralogical Association of Canada Short Course Series*, 31, 1–47.
23. Ranjbar, H., & Hassanzadeh, J. (2012). Geology and geochemistry of the Miduk porphyry Cu deposit, Kerman, Iran. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 23(2), 139–152.
24. Asadi, H.H., Voncken, J.H.L., Hale, M., & Kühnel, R.A. (1999). Petrology, geochemistry and fluid inclusion investigation of the Sungun porphyry copper deposit, Iran. *Geologie en Mijnbouw*, 78(2), 123–134.
25. Modabberi, S., Alizadegan, A., & Mirnejad, H. (2013). Prediction of acid mine drainage generation potential of a copper mine waste pile using static and kinetic tests. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(11), 4187–4199.
26. Aftabi, A., & Atapour, H. (2009). Comparative study of mineralogy and geochemistry of two porphyry copper deposits in the Urumieh-Dokhtar magmatic arc, Iran. *Neues Jahrbuch für Mineralogie - Abhandlungen*, 186(3), 241–256.
27. Hosseini, S.M., & Aftabi, A. (2011). Environmental geochemistry of porphyry copper deposits: A case study from Miduk and Sarcheshmeh, Kerman, Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 108(1), 45–54.
28. Dold, B. (2014). Evolution of acid mine drainage formation in sulphidic mine tailings. In *Acid Mine Drainage: Current Approaches* (pp. 45–66). Nova Science Publishers.
29. Akcil, A., & Koldas, S. (2006). Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*, 14(12-13), 1139–1145.

30. ASTM International. (2015). *ASTM E1915-13: Standard test methods for analysis of metal bearing ores and related materials by combustion infrared absorption spectrometry*. West Conshohocken, PA.
31. Park, I., Tabelin, C.B., Jeon, S., Li, X., Seno, K., Ito, M., & Hiroyoshi, N. (2019). A review of recent strategies for acid mine drainage prevention and mine tailings recycling. *Chemosphere*, 219, 588–606.
32. ISO (International Organization for Standardization). (2006). *ISO 18283: Hard coal and coke — Manual sampling*.
33. USEPA (United States Environmental Protection Agency). (1994). *Acid mine drainage prediction* (EPA 530-R-94-036).
34. Pitard, F.F. (1993). *Pierre Gy's sampling theory and sampling practice* (2nd ed.). CRC Press.
35. Lottermoser, B.G. (2007). *Mine wastes: Characterization, treatment, environmental impacts* (2nd ed.). Springer.
36. Dold, B. (2008). Sustainability in metal mining: From exploration, over processing to mine waste management. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 7(4), 275–285.
37. Blowes, D.W., Ptacek, C.J., Jambor, J.L., & Weisener, C.G. (2014). The geochemistry of acid mine drainage. In *Treatise on Geochemistry* (2nd ed., Vol. 11, pp. 131–190). Elsevier.
38. Gy, P.M. (1992). *Sampling of heterogeneous and dynamic material systems: Theories of heterogeneity, sampling and homogenizing*. Elsevier.
39. USEPA. (2007). *Data quality assessment: Statistical methods for practitioners* (EPA QA/G-9S). Office of Environmental Information.
40. Smith, K.S. (2007). Strategies to predict metal mobility in surficial mining environments. In *Reviews in Economic Geology* (Vol. 16, pp. 25–45). Society of Economic Geologists.
41. Modabberi, S., & Moore, F. (2007). Environmental geochemistry of the Sungun porphyry copper deposit, East Azerbaijan, Iran. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 7(4), 363–372.
42. Ghaderi, M., & Ghasemi, M. (2016). Hydrogeochemical and mineralogical characteristics of acid mine drainage in the Miduk copper mine, Iran. *Mine Water and the Environment*, 35(3), 321–334.
43. ASTM International. (2014). *ASTM D421-85(2007): Standard practice for dry preparation of soil samples for particle-size analysis and determination of soil constants*. West Conshohocken, PA.
44. Jambor, J.L. (2003). Mine-waste mineralogy and mineralogical perspectives of acid-base accounting. In J.L. Jambor, D.W. Blowes, & A.I.M. Ritchie (Eds.), *Environmental Aspects of Mine Wastes* (pp. 117–146). Mineralogical Association of Canada.

45. Al, T.A., & Blowes, D.W. (1999). The pore-water geochemistry of two sulfide mine tailings impoundments in the Eastern Abitibi Greenstone Belt, Ontario. *Applied Geochemistry*, 14(1), 1–16.
46. François-Bongarçon, D. (2004). *Theory of sampling and geostatistics: An intimate link. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 74(1), 143–148.
47. Parbhakar-Fox, A., & Lottermoser, B.G. (2018). A new approach for identifying and evaluating waste rock weathering at mine sites. *Minerals Engineering*, 116, 153–164.
48. Sobek, A.A., Schuller, W.A., Freeman, J.R., & Smith, R.M. (1978). *Field and laboratory methods applicable to overburdens and mine soils* (EPA-600/2-78-054). US Environmental Protection Agency.
49. Lindsay, M.B.J., Condon, P.D., Jambor, J.L., Lear, K.G., Blowes, D.W., & Ptacek, C.J. (2009). Mineralogical, geochemical, and microbial characterization of a sulfide-bearing waste-rock dump at the Myra Falls Mine, British Columbia, Canada. *Applied Geochemistry*, 24(12), 2212–2221.
50. Maest, A.S., Kuipers, J.R., Travers, C.L., & Atkins, D.A. (2005). *Predicting water quality at hardrock mines: methods and models, uncertainties, and state-of-the-art*. Kuipers & Associates.
51. LECO Corporation. (2018). *Application Bulletin: Determination of Total Sulfur in Coal, Coke, and Solid Fuels*.
52. ASTM International. (2019). *ASTM D4239-18e1: Standard test method for sulfur in the analysis sample of coal and coke using high-temperature tube furnace combustion methods*. West Conshohocken, PA.
53. Lawrence, R.W., & Scheske, M. (1997). A method to calculate the neutralization potential of mining wastes. *Environmental Geology*, 32(2), 100–106.
54. Skousen, J., Rose, A., Geidel, G., Foreman, J., Evans, R., & Hellier, W. (1998). *Handbook of technologies for avoidance and remediation of acid mine drainage*. The National Mine Land Reclamation Center.
55. Miller, S.D., Jeffery, J.J., & Wong, J.W.C. (1991). Use and misuse of the acid-base account for "AMD" prediction. In *Proceedings of the Second International Conference on the Abatement of Acidic Drainage* (Vol. 3, pp. 83–129). MEND.
56. ASTM International. (2019). *ASTM D4972-19: Standard test method for pH of soils*. West Conshohocken, PA.