



بررسی فرآیندهای انتقال اکسیژن به داخل کومه‌های سنگ باطله معدن مس سرچشمه

سعید یوسفی^{1*}، فرامرز دولتی ارده‌جانی²، آرزو عابدی³، منصور ضیایی³ و عصمت اسماعیل‌زاده⁴

(1) آموزشکده معدن نهبندان، دانشگاه بیرجند، نهبندان، ایران

(2) دانشکده معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(3) گروه اکتشاف، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود، ایران

(4) واحد آب و محیط زیست، امور تحقیقات و مطالعات، مجتمع مس سرچشمه، شرکت ملی صنایع مس، رفسنجان، ایران

دریافت: 1392/12/21، پذیرش: 1393/3/21

چکیده

اکسایش پیریت و تولید زهاب اسیدی یکی از مشکلات زیست‌محیطی معادن سولفید فلزی است. میزان حضور اکسیژن در مجاورت کانیهای سولفیدی، مهمترین عامل کنترل‌کننده میزان اکسایش این کانیهاست. بنابراین شناسایی فرآیندهای مؤثر در انتقال اکسیژن به داخل کومه‌های سنگ باطله در ارزیابی زیست محیطی بسیار اهمیت دارد. در این پژوهش، 30 نمونه از 6 ترانسه حفر شده در کومه‌های باطله 19 و 31 معدن مس سرچشمه برداشت و با استفاده از تجزیه XRD، آزمایش ASTM-D2492، آزمایش pH خمیری، تحلیل دانه‌بندی و همچنین مشاهدات صحرایی، فرآیندهای انتقال اکسیژن به مواد باطله، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج XRD نشان داد کانیهای کوارتز، آلپیت، مسکویت، کلریت، پیریت و ارتوز کانیهای غالب در نمونه‌ها هستند. با توجه به حضور پیریت در اکثر نمونه‌ها و نبود کانیهای کربناته، تولید زهاب اسیدی در کومه‌های سنگ باطله معدن مس سرچشمه قابل انتظار بود. بر اساس مشاهدات صحرایی، مجراهایی با شارش قوی هوای گرم و مرطوب در اعماق 3 تا 5 متری شناسایی شد که در نمونه‌های مرتبط با آن، میزان رطوبت (8/25 و 13/43 درصد) و سولفات (4/5 و 7/02 درصد) بالا و در مقابل میزان پیریت (1/5 و 6/23 درصد) و pH (3/13 و 2/88) پایین است. نتایج به‌دست آمده همچنین نشان داد، دو عامل ناهمگنی اندازه ذرات و حضور لایه هاردپن، کنترل‌کننده شدت فرآیندهای انتقال اکسیژن می‌باشند. این عوامل باعث شده‌اند همرفت هوا از مواد درشت‌دانه کف و اطراف کومه، فرآیند مسلط در رساندن اکسیژن به پیریت باشد. تسلط این فرآیند باعث وفور اکسیژن، دمای بالا و ایجاد شرایط مناسب برای فعالیت باکتری‌های اکسیدکننده پیریت شده که اکسایش پیریت با شدت بیشتر و تا اعماق پایین‌تر کومه سنگ باطله را به دنبال دارد.

واژه‌های کلیدی: کومه سنگ باطله، اکسایش کانیهای سولفیدی، نفوذ اکسیژن، همرفت هوا، ناهمگنی مواد باطله، هاردپن، معدن مس سرچشمه

مقدمه

فلزی به‌خصوص پیریت در مجاورت اکسیژن در باطله‌های معدنی اتفاق می‌افتد (Borden, 2003). زهاب اسیدی از طریق اسیدی‌کردن محیط ژئوشیمیایی آب و رسوب سبب حمل غلظتهای بالایی از عناصر بالقوه سمی شده و تعادل ژئوشیمیایی عناصر را در مناطق تحت تأثیر معدن‌کاری برهم می‌زند به گونه‌ای که اثرات جبران‌ناپذیری برای زیست بوم

زهاب اسیدی معدن¹ (AMD) یکی از بزرگترین مشکلات زیست‌محیطی در معادن مس پورفیری است. این مشکل با توجه به وضعیت زمین‌شناسی، آب‌شناختی، روش استخراج و فرآوری، میزان خطر متفاوتی را برای محیط زیست ایجاد می‌کند. تولید زهاب اسیدی در اثر قرارگیری کانیهای سولفید

محیط باطله‌های فرآوری انجام شده در حالی که پژوهش‌های اندکی به کومه‌های باطله اختصاص یافته است (Smuda et al., 2007). مهمترین علت این موضوع، ناهمگنی کومه‌های سنگ باطله از نظر فیزیکی، کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی است (Morin et al., 1994; Nichol et al., 2000; Lefebvre et al., 2001; Molson et al., 2005; Azam et al., 2007). در باطله‌های فرآوری به سبب دانه ریز بودن و تراکم مواد باطله، اکسیژن تنها از طریق فرآیند نفوذ به درون باطله‌ها راه می‌یابد (Elberling et al., 1994; et al., 2014). بنابراین پژوهشگران زیادی با تعیین میزان نفوذ اکسیژن، میزان پیریت و تعیین سطح مؤثر آن با استفاده از مدل‌های عددی به پیش‌بینی میزان اکسایش پیریت پرداخته‌اند (Morin et al., 1988; Wunderly et al., 1986; Blowes et al., 1991; Elberling et al., 1994; Jannesar Malakooti et al., 2014). در مقابل در کومه‌های باطله به‌علت حضور مواد باطله درشت‌دانه، هر دو فرآیند نفوذ و همرفت در انتقال اکسیژن به پیریت، می‌توانند دخیل باشند. امکان وجود همزمان این دو فرآیند در کنار ناهمگنی‌های همراه با کومه‌های سنگ باطله، باعث پیچیدگی بررسی‌های ژئوشیمیایی در آنها می‌شود. به‌منظور غلبه بر این مشکل، در مدل‌سازی‌های عددی، نقش فرآیندهای نفوذ و همرفت در اکسایش پیریت به‌صورت جداگانه، بررسی شده است (Cathles and Apps, 1975; Jaynes et al., 1984; Davis and Ritchie, 1986; Doulati Ardejani, 2003; Lefebvre et al., 2001a; Lefebvre et al., 2001b; Molson et al., 2005; Doulati Ardejani et al., 2010; Silva et al., 2009; Brown et al., 1999). پژوهش‌ها با فرض همگن بودن کومه باطله از نظر مقدار پیریت، میزان نفوذ و میزان جریان همرفت، مدل‌سازی انجام و سپس با تغییر مقدار هر یک از این مؤلفه‌ها در ورودی مدل، میزان اکسایش پیریت و تولید زهاب اسیدی برای شرایط مختلف پیش‌بینی شده است.

تاکنون پژوهش‌های جامعی در مورد توصیف ریاضی فرآیندهای انتقال اکسیژن با استفاده از مدل‌سازی عددی انجام شده است ولی اثرات متقابل این فرآیندها و خصوصیات ژئوشیمی و کانی‌شناسی کومه سنگ باطله مورد بررسی قرار نگرفته است.

محلی به دنبال خواهد داشت. زهاب اسیدی معمولاً حاوی تعداد زیادی از یون‌های فلزی و شبه فلزی همچون آهن، مس، روی، آرسنیک و ... است که به‌طور بالقوه پتانسیل آلودگی منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی را دارند.

تعیین میزان اکسایش پیریت به‌عنوان منبع اصلی تولید زهاب اسیدی، نقش مهمی در ارزیابی توانایی تولید آلودگی در باطله‌های سولفیدی دارد (Sracek et al., 2006). تاکنون پژوهش‌های زیادی روی فرآیندهای کنترل‌کننده میزان اکسایش پیریت انجام شده است (Cathles and Apps, 1975; Jaynes et al., 1984; Davis and Ritchie, 1986). بر اساس این پژوهش‌ها، میزان انتقال اکسیژن در باطله‌های معدنی، نحوه اکسایش پیریت را کنترل می‌کند. انتقال اکسیژن در مواد باطله از طریق دو فرآیند زیر صورت می‌گیرد:

1- نفوذ¹: این فرآیند به‌علت گرادیان غلظت اکسیژن خارج و داخل مواد باطله به‌وجود می‌آید. بر این اساس، اکسیژن با نرخ مشخص با توجه به خصوصیات فیزیکی مواد باطله منتشر می‌شود (Doulati Ardejani, 2003).

2- همرفت هوا²: همرفت هوا به‌علت تفاوت چگالی هوای نقاط مختلف مواد باطله و خارج آن، رخ می‌دهد. تفاوت چگالی هوا به علت گرمای تولید شده در واکنش اکسایش پیریت است (Lefebvre et al., 2001a). فرآیندهای انتقال اکسیژن در باطله‌های مختلف معدنی متفاوت است. به‌طور کلی باطله‌های معدنی را می‌توان به پنج گروه زیر تقسیم کرد: 1) روباره‌های معدنی³، 2) سنگهای باطله⁴، 3) باطله‌های فرآوری⁵، 4) باطله‌های باقی‌مانده از فرآیند فرآوری⁶ و 5) باطله‌های کارخانه ذوب⁷ (Khorasanipour, 2011).

از این باطله‌ها، سنگهای باطله و باطله‌های فرآوری به‌علت حضور مقادیر بالای کانیهای سولفیدی از جمله پیریت برای بررسی فرآیندهای انتقال اکسیژن، اهمیت دارند. باطله‌های فرآوری اندازه‌ای در حدود ماسه و رس داشته و به سد باطله منتقل می‌شوند.

در مقابل، سنگهای باطله شامل مواد کم عیار معدنی هستند که به لحاظ اقتصادی ارزش فرآوری و استحصال کانه ندارند. این باطله‌ها حاوی طیف وسیعی از اندازه دانه‌ها، از رس تا قطعات بزرگ سنگی هستند و در کومه‌های سنگ باطله انباشته می‌شوند. تاکنون پژوهش‌های زیست محیطی زیادی در

1. Diffusion

2. Convection

3. Overburden

4. Waste rock

5. Tailing wastes

6. Heap and dump leach wastes

7. Slag wastes

بنابراین هدف این پژوهش شناسایی شواهد حضور فرآیندهای نفوذ و همرفت هوا در کومه باطله و همچنین نقش آنها روی میزان اکسایش پیریت خواهد بود که در نهایت فرآیند غالب در انتقال اکسیژن به کومه سنگ باطله معرفی خواهد شد. انتظار می‌رود این‌گونه پژوهش‌های ساختاری کومه باطله در فهم بهتر و واقعی‌تر فرآیندهای دخیل در مدل‌های عددی و همچنین برای ارائه راهکارهای مدیریت زیست‌محیطی در منطقه مورد مطالعه و معادن مشابه مفید باشند.

در بیش از یک دهه فعالیت واحد آب و محیط‌زیست، پژوهش‌های زیادی توسط امور تحقیق و توسعه مجتمع سرچشمه در محیط‌های مختلف تحت تأثیر معدن‌کاری، در منطقه انجام شده است. این پژوهش‌ها شامل بررسی آلودگی‌های زهاب و رسوبات مجتمع (Komeizi, 2000; Khorasanipour, 2011) ، بررسی آلودگی زهاب خروجی از کومه‌های سنگ باطله (Orandi, 2002; Doorandish, 2006)، بررسی زیست‌محیطی خاک و گیاهان اطراف مجتمع (Khorasanipour, 2011; Ghotbi Ravandi, 2007; Rastmanesh et al., 2011)، بررسی گونه‌پذیری عناصر سمی در محیط‌های خاک، رسوب، روباره‌های کارخانه ذوب و باطله‌های فرآوری (Esmailzadeh, 2012; Abbasnejad, 2013; Sharifi et al., 2013)، تعیین خصوصیات کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی باطله‌های فرآوری (Jannesar Malakooti et al., 2014)، بررسی میزان اسیدزایی کومه‌های سنگ باطله (Modabberi et al., 2013) و بررسی وضعیت گوسان‌های سرچشمه و تأیید گوسان‌های در حال تشکیل¹ و خطر تولید زهاب اسیدی سنگ² (ARD) (Atapour and Aftabi, 2007) می‌باشند.

منطقه مورد مطالعه

معدن مس سرچشمه در 160 کیلومتری جنوب غربی کرمان و 50 کیلومتری جنوب غرب رفسنجان واقع گردیده است. شکل A موقعیت جغرافیایی معدن مس سرچشمه را نشان می‌دهد. معدن مس سرچشمه به‌علت قرار گرفتن در مناطق کوهستانی، دارای زمستانهای سرد، برف‌گیر و بادخیز و تابستانهای ملایم و معتدل است. میزان ریزش جوی در این منطقه بین 300 تا 550 میلی‌متر در سال گزارش شده است. این ریزشها غالباً در فواصل زمانی آذر تا فروردین مشاهده می‌شود که یکی از پر باران‌ترین زیر حوضه‌های غرب تا جنوب غرب کرمان محسوب می‌گردد (Orandi, 2006).

کانسار مس سرچشمه یکی از بزرگترین ذخایر مس پورفیری الیگومیوسن واقع در کمانهای قاره‌ای است که زون سولفیدی سوپرژن در آن، به‌خوبی تشکیل شده و توسط گوسان هماتیته پوشیده شده است. این گوسان‌ها می‌توانند با اکسایش کانیهای سولفید فلزی خود به‌عنوان منبع تولید زهاب اسیدی سنگ مطرح باشند. مهمترین کانی‌سازها در کانسار سرچشمه عبارتند از: هماتیت، گوتیت، ژاروسیت و دیگر سولفات‌های آهن در زون گوسان؛ کالکوسیت و دیجنیت در زون سوپرژن؛ کولیت، پیریت، کالکوپیریت، مولیبدنیت، کالکوسیت اولیه و بورنیت به‌همراه رگه‌های کوارتز در منطقه هیپوژن (Modabberi et al., 2013).

در حال حاضر سالانه 22 میلیون تن ماده معدنی از معدن مس سرچشمه استخراج می‌شود که این فرآیند تاکنون باعث تولید بیش از 300 میلیون تن سنگ باطله شده است. باطله‌های تولید شده در 31 محل، اطراف پیت معدن انباشته شده‌اند که بر اساس کاهش مسافت انتقال باطله‌ها و جلوگیری

در بیش از یک دهه فعالیت واحد آب و محیط‌زیست، پژوهش‌های زیادی توسط امور تحقیق و توسعه مجتمع سرچشمه در محیط‌های مختلف تحت تأثیر معدن‌کاری، در منطقه انجام شده است. این پژوهش‌ها شامل بررسی آلودگی‌های زهاب و رسوبات مجتمع (Komeizi, 2000; Khorasanipour, 2011) ، بررسی آلودگی زهاب خروجی از کومه‌های سنگ باطله (Orandi, 2002; Doorandish, 2006)، بررسی زیست‌محیطی خاک و گیاهان اطراف مجتمع (Khorasanipour, 2011; Ghotbi Ravandi, 2007; Rastmanesh et al., 2011)، بررسی گونه‌پذیری عناصر سمی در محیط‌های خاک، رسوب، روباره‌های کارخانه ذوب و باطله‌های فرآوری (Esmailzadeh, 2012; Abbasnejad, 2013; Sharifi et al., 2013)، تعیین خصوصیات کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی باطله‌های فرآوری (Jannesar Malakooti et al., 2014)، بررسی میزان اسیدزایی کومه‌های سنگ باطله (Modabberi et al., 2013) و بررسی وضعیت گوسان‌های سرچشمه و تأیید گوسان‌های در حال تشکیل¹ و خطر تولید زهاب اسیدی سنگ² (ARD) (Atapour and Aftabi, 2007) می‌باشند.

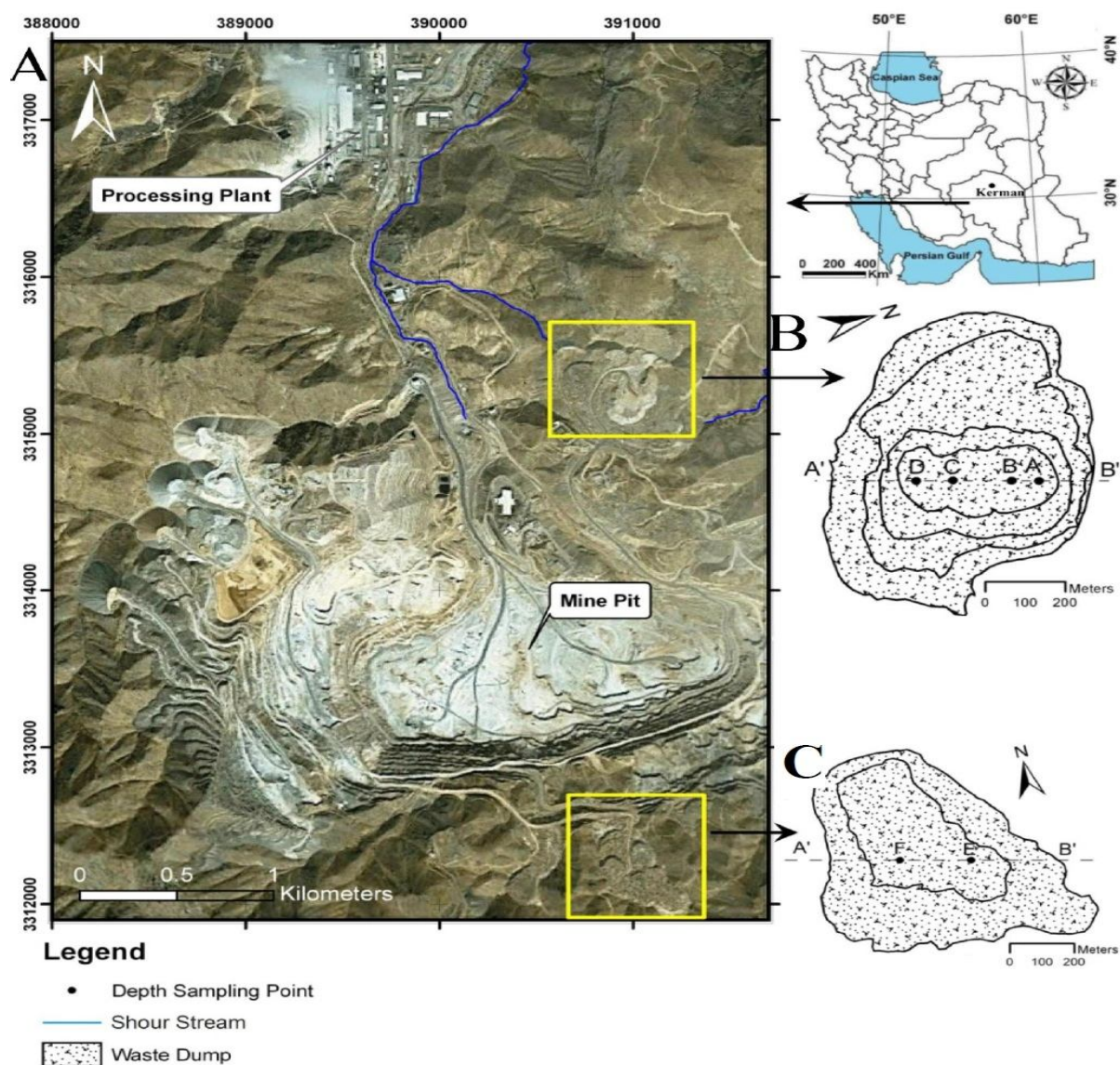
بر اساس پژوهش‌های انجام شده کومه‌های سنگ باطله، مهمترین جایگاه رخداد زهاب اسیدی در مجتمع مس سرچشمه هستند (Orandi, 2006). وجود شواهدی مانند جلبک‌های رشته‌ای سبز اولوتریکس گیگاس³ که خاص زهاب‌های با غلظت بالای عناصر سنگین می‌باشند (Ourandi et al., 2009) و همچنین کانیهای تبخیری هیدروکسی سولفات‌ها فراوان در اطراف زهکش‌های خروجی از کومه‌های سنگ باطله، نشان‌دهنده اسیدزا بودن کومه‌هاست. بر اساس پژوهش‌های اورندی (Orandi, 2006) زهاب کومه‌های 11، 19 و 31 معدن سرچشمه بالاترین غلظت عناصر سمی As، Cd،

انجام شد. در تمامی ترانشه‌ها به جز ترانشه B، نمونه‌برداری از اعماق مشخص تا عمق حداکثر 3 متری ادامه یافت. در ترانشه B به سبب تغییرات سیمای ظاهری مواد باطله، نمونه‌برداری از دو عمق 3 و 5 متری انجام گرفت. در طول عملیات نمونه‌برداری مجموعاً 30 نمونه 8 کیلوگرمی از ترانشه‌های مختلف برداشت شد.

از جریان آبهای سطحی به درون پیت معدن، مکان‌یابی شده‌اند (Orandi, 2006).

مواد و روشها

برای دستیابی به اهداف پژوهش، نمونه‌برداری از 6 ترانشه A، B، C، D، E و F (شکل 1-B و C) حفر شده در کومه‌های سنگ باطله 19 و 31 معدن مس سرچشمه، به صورت عمقی



شکل 1. موقعیت جغرافیایی معدن مس سرچشمه A: مجموعه معدن در تصویر ماهواره‌ای B: موقعیت کومه 31 و ترانشه‌های حفر شده A، B، C و D. C: موقعیت کومه 19 و ترانشه‌های حفر شده E و F.

Fig. 1. The geographical position of Sarcheshmeh copper mine A: mine complex in satellite image B: dump 31 position accompanied by the location of trenches A, B, C and D. C: dump 19 position accompanied by the location of trenches E and F.

- | | |
|---------------|-------------------------------|
| 1. Diffusion | 5. Tailing wastes |
| 2. Convection | 6. Heap and dump leach wastes |
| 3. Overburden | 7. Slag wastes |
| 4. Waste rock | |

خمیری به دست آید. میزان pH نمونه پس از به تعادل رسیدن خمیر (12 تا 24 ساعت) با استفاده از دستگاه pH متر پرتابل دیجیتال ساخت کمپانی متلر تولدو⁵ سوییچ با دقت 2 رقم اعشار اندازه‌گیری شد. بر اساس این آزمایش، نمونه‌های با pH کمتر از 4، اسیدزا محسوب می‌شوند (Islam and Lotse, 1986).

آزمایش ASTM-D2492

پیریت به عنوان منبع اصلی تولید اسید، کانی‌های هیدروکسی سولفات و کانی‌های اکسی هیدروکسید آهن به عنوان محصول اولیه اکسایش پیریت، مهمترین کانی‌های مورد مطالعه در بررسی‌های زیست‌محیطی زهاب اسیدی هستند. امکان تعیین دقیق این کانی‌ها به علت بی‌شکل بودن⁶، انحراف از ترکیب شیمیایی ایده‌آل، تغییر درجه بلوری شدن و غلظت‌های پایین، در روش XRD وجود ندارد (Islam and Lotse, 1986). بنابراین برای تعیین دقیق این کانی‌ها از روش ASTM-D2492 (ASTM, 1986) استفاده شد. این آزمایش برای تعیین انواع سولفور موجود در باطله‌های زغال کاربرد دارد (Doulati Ardejani et al., 2010) که توسط یوسفی و همکاران (Yousefi et al., 2014) برای تعیین میزان سولفات، پیریت و آهن موجود در کانی‌های اکسی هیدروکسیدی آهن (Fe_{0.11}) در باطله‌های مس پورفیری، اصلاح و استفاده شده است. روش کار در آزمایش استاندارد ASTM-D2492، شامل دو مرحله زیر می‌شود:

مرحله 1) به میزان 0/2 گرم نمونه معرف زیر 200 مش (75 میکرون) در محلول 25 میلی‌لیتر اسید کلریدریک رقیق ریخته و مخلوط می‌شود. مخلوط حاصل تا زمان رسیدن به حجم 10 میلی‌لیتر حرارت داده شده و سپس رسوبات حل نشده با استفاده از یک کاغذ صافی جدا می‌گردد. محلول عبور کرده از صافی برای تعیین میزان یون سولفات با روش اسپکترومتری نشری و برای تعیین میزان آهن موجود در کانی‌های اکسی هیدروکسیدی با روش جذب اتمی تجزیه می‌شود.

مرحله 2) رسوب باقی‌مانده از مرحله قبل به 50 میلی‌لیتر اسید نیتریک رقیق اضافه و حرارت داده می‌شود. در ادامه مواد غیر محلول که شامل کانی‌های سیلیکاته هستند با کاغذ صافی جدا شده و محلول حاصل پس از به حجم رسیدن برای تعیین

پس از نمونه‌برداری و اندازه‌گیری میزان رطوبت، هر نمونه با استفاده از ریفیل به دو زیرنمونه تقسیم شد که یکی از زیرنمونه‌ها برای تحلیل دانه‌بندی و زیرنمونه دیگر با جدا کردن ذرات ریزتر از 4 مش (4750 میکرون) برای تجزیه XRD، آزمایش استاندارد ASTM-D2492¹ و آزمایش pH خمیری² آماده‌سازی شد. انتخاب ذرات ریزتر از 4 مش برای تجزیه کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی به دلیل تسلط فعل و انفعالات مربوط به اکسایش پیریت در موارد دانه‌ریز کومه باطله و همچنین رعایت جامع³ بودن نمونه با توجه به وزن آن می‌باشد.

به منظور بررسی کنترل کیفی داده‌های روشهای XRD و آزمایش استاندارد ASTM-D2492، در هر سری از نمونه‌های ارسال شده به آزمایشگاه‌های مختلف، چندین نمونه تکراری ارسال شد. دقت مقادیر گزارش شده با استفاده از شاخص انحراف معیار نسبی⁴ (RSD) به صورت درصد مورد ارزیابی قرار گرفت. این شاخص بر طبق رابطه 1 محاسبه می‌گردد:

$$RSD = \frac{\delta}{\bar{X}} \times 100 \quad (1)$$

که در آن:

δ : انحراف معیار و \bar{X} : میانگین دو داده تکرار شده است. مقدار RSD کمتر از 10 درصد، تضمین کننده کیفیت مناسب داده هاست که تمامی نمونه‌های تکراری حایز این شرط بوده و به لحاظ دقت، قابل قبول هستند.

تجزیه XRD

شناسایی انواع ترکیبات کانی‌شناختی مرتبط به نمونه‌های کومه سنگ باطله از طریق تجزیه پراش پرتو X (XRD) انجام شد. آنالیز XRD برای نمونه‌های مذکور در مرکز فرآوری مواد معدنی ایران در کرج صورت گرفت که در آن علاوه بر شناسایی کیفی کانی‌ها، با استفاده از نتایج ICP و روش کمی‌سازی ریتولد (Dercz et al., 2008) میزان کمی کانی‌ها نیز تعیین شد.

آزمایش pH خمیری

آزمایش pH خمیری روشی بسیار ساده و ارزان برای تعیین pH نمونه‌های جامد پودر شده و نشان دادن اسیدزا بودن نمونه است. برای تعیین pH خمیری نمونه‌ها، 50 گرم نمونه آسیا شده با 50 میلی‌لیتر آب مقطر، اشباع شد تا نمونه

1. American Society for Testing and Material, 1986

2. Paste pH

3. Representative

4. Relative Standard Deviation

5. Mettler Toledo

6. Amorph

که D_{60} متناظر قطری است که 60 درصد مواد در منحنی دانه‌بندی از آن ریزترند.

3- ضریب دانه‌بندی یا خمیدگی (C_c): این مؤلفه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (3)$$

که در آن D_{30} متناظر با قطری از ذرات است که 30 درصد مواد در منحنی دانه‌بندی از آن ریزترند. ضریب یکنواختی و دانه‌بندی برای مشخص کردن خوب دانه‌بندی شدن یا نشدن نمونه‌ها استفاده می‌شود. خاکهای خوب دانه‌بندی شده به خاکهایی گفته می‌شود که فاصله خالی¹ در اندازه دانه‌های مختلف خود نداشته باشد. بر این اساس، برای خاکهای شنی، داشتن معیارهای $1 \leq C_c \leq 4$ و $C_u \geq 4$ و برای خاکهای ماسه‌ای $1 \leq C_c \leq 4$ و $C_u \geq 6$ نشان‌دهنده خوب دانه‌بندی شدن است. در شرایط زیر خاک بد دانه‌بندی شده محسوب می‌شود:

الف) درصد قابل توجهی از دانه‌های خاک به یک اندازه باشند یا به عبارت دیگر دانه‌بندی یکنواخت باشد.

ب) خاک به اندازه کافی دانه‌های بزرگ و کوچک داشته باشد، ولی دانه‌های حد متوسط در آن کم باشد. به این حالت دانه‌بندی منقطع یا میان تهی گفته می‌شود (Das and Sobhan, 2013).

میزان پیریت باقی‌مانده تجزیه می‌شود. برای سهولت تعیین میزان پیریت به جای اندازه‌گیری مقدار سولفور، میزان آهن با روش جذب اتمی تعیین می‌گردد (Yousefi et al., 2014).

تحلیل دانه‌بندی

تحلیل دانه‌بندی عبارت است از تعیین محدوده اندازه ذرات موجود در خاک که به‌صورت درصدی از وزن خشک بیان می‌شود (Das and Sobhan, 2013). در این پژوهش به‌منظور بررسی ناهمگنی مواد از نظر تغییرات اندازه ذرات با استفاده از سری الکهای استاندارد ASTM تحلیل دانه‌بندی انجام شد. مشخصات الکهای استفاده شده در جدول 1 آمده است. تحلیل دانه‌بندی را می‌توان برای استخراج سه ویژگی مهم دانه‌بندی به شرح زیر استفاده کرد:

1- اندازه مؤثر (D_{10}): این ویژگی، قطر متناظری از منحنی دانه‌بندی است که 10 درصد ذرات ریزتر از آن هستند. اندازه مؤثر برای تخمین ضریب نفوذپذیری معیاری مناسب محسوب می‌شود (Das and Sobhan, 2013).

2- ضریب یکنواختی (C_u): این ویژگی به صورت زیر تعریف می‌شود (Das and Sobhan, 2013):

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2)$$

جدول 1. مشخصات الکهای استفاده شده سری ASTM برای تحلیل دانه‌بندی

Table 1. Characterization of ASTM sieves used for particle-size analysis

Row	Inch & Mesh	Micron	Row	Mesh	Micron
1	4.25 Inch	107600	11	10 Mesh	2000
2	3 Inch	76100	12	14 Mesh	1410
3	2 Inch	50800	13	18 Mesh	1000
4	1 Inch	25400	14	25 Mesh	707
5	0.75 Inch	19000	15	35 Mesh	500
6	0.5 Inch	12700	16	45 Mesh	354
7	0.375 Inch	9510	17	60 Mesh	250
8	0.25 Inch	6350	18	80 Mesh	177
9	4 Mesh	4760	19	120 Mesh	125
10	7 Mesh	2830	20	200 Mesh	74

- فراوانترین کانیهای موجود در کومه‌های 19 و 31 سرچشمه عبارتند از: کوارتز، آلبیت، مسکویت، کلریت، پیریت، ارتوز.

- در این نمونه‌ها، پیریت تنها کانی سولفیدی شناسایی شده است که پتانسیل تولید اسید دارد.

نتایج

نتایج تجزیه XRD

نتایج به‌دست آمده از تجزیه XRD در جدول 2 آمده است. از این جدول اطلاعات زیر استنباط می‌شود:

دارند.

- کانیهای کربناته به‌عنوان بهترین خنثی‌کننده اسید تولیدی، سهمی در نمونه‌های مورد بررسی نداشتند.
- در هیچ یک از نمونه‌های تجزیه شده، کانیهای اکسی هیدروکسید آهن آشکار نشد. این نتیجه می‌تواند به‌علت عدم تکامل بلوری و غلظت پایین این کانیها در نمونه‌های مورد بررسی باشد.

- در نمونه‌های تجزیه شده سه کانی هیدروکسی سولفات شامل باتلریت¹ $(\text{Fe}(\text{SO}_4)(\text{OH})\cdot 2\text{H}_2\text{O})$ ، ژاروسیت² $(\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6)$ و ژیس³ $(\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O})$ مشاهده شد. این کانیها محصولات هوازدگی و پیشرفت اکسایش پیریت در pHهای کمتر از 4 هستند (Hammarstrom et al., 2005) که عناصر قرار گرفته در شبکه این کانیها به‌علت حلالیت بالا در آبهای جاری، خطرپذیری زیست‌محیطی زیادی

جدول 2. نتایج تجزیه XRD نمونه‌های کومه‌های مورد مطالعه (همه مقادیر بر حسب درصد هستند)

Table 2. XRD result in waste dumps samples (all data in %)

Trenches	Sample	Depth (m)	Qz	Py	Ms	Ill	Kln	Or	Ab	Chl	Mnt	Ep	But	Jar	Gp
A	A1	0.2	36	12	14	9	-	-	-	12	-	-	9	8	-
	A2	0.5	44	19	13	7	-	-	-	7	5	-	5	-	-
	A3	0.8	50	13	12	7	-	-	-	8	5	-	7	-	-
	A4	1.1	43	10	9	6	5	8	-	-	4	-	-	9	6
	A5	1.5	49	10	10	7	-	8	9	7	-	-	-	-	-
	A6	2	31	-	5	-	-	9	40	-	-	-	-	8	7
	A7	2.5	33	4	7	5	-	-	40	-	5	-	-	6	-
	A8	3	33	2	8	6	-	-	46	5	-	-	-	-	-
B	B1	3	52	6	13	6	5	6	7	-	-	-	-	5	-
	B2	5	38	-	7	5	6	7	15	8	-	-	-	14	-
C	C1	0.2	46	4	11	6	6	6	14	7	-	-	-	-	-
	C2	0.5	48	4	11	7	-	6	18	0	-	-	6	-	-
	C3	0.8	43	3	7	5	-	7	25	10	-	-	-	-	-
	C4	1.1	50	4	17	8	6	8	-	-	-	-	7	-	-
	C5	1.5	49	4	16	8	5	6	6	-	-	-	-	6	-
D	D1	0.2	37	4	11	8	-	9	24	7	-	-	-	6	-
	D2	0.5	42	5	10	6	-	7	23	7	-	-	-	-	-
	D3	0.8	36	5	9	5	-	8	30	7	-	-	-	-	-
	D4	1.1	45	4	10	7	-	7	18	9	-	-	-	-	-
	D5	1.5	33	-	9	6	-	7	25	9	5	-	-	-	-
E	E1	0.2	34	11	10	8	9	-	-	12	-	8	-	8	-
	E2	0.5	49	5	13	-	-	-	14	15	-	4	-	-	-
	E3	0.8	47	4	11	5	-	-	19	14	-	-	-	-	-
	E4	1.1	50	-	14	8	-	7	10	11	-	-	-	-	-
	E5	1.5	59	2	9	7	-	-	10	7	6	-	-	-	-
F	F1	0.2	41	13	12	8	-	-	-	18	-	-	-	8	-
	F2	0.5	30	13	15	6	8	-	-	28	-	-	-	-	-
	F3	0.8	25	14	15	8	7	5	6	20	-	-	-	-	-
	F4	1.1	42	-	20	9	7	7	-	9	-	-	-	-	6
	F5	1.5	57	-	23	-	-	-	-	9	-	-	-	5	6

*: The English capital letter in the beginning of sample name represents the trench name

Qz: Quartz, Py: Pyrite, Ms: Muscovite (Sericite), Ill: Illite, Kln: Kaolanite, Or: Orthose, Ab: Albite, Chl: Chlorite, Mnt: Montmorillonite, Ep: Epidote, But: Butlerite, Jar: Jarosite, Gp: Gypsum.

نتایج به‌دست آمده، پیریت، سولفات و آهن موجود در فاز اکسی‌هیدروکسیدی به‌عنوان کانیهای منشأ و محصول هوازدگی پیریت در همه نمونه‌ها حضور دارند و حتی مقادیر کم آنها نیز آشکار شده است. این در حالی است که بر اساس

نتایج روش ASTM-D2492 و pHخمیری

نتایج به‌دست آمده از آزمایش ASTM-D2492 برای تعیین غلظت سولفات، پیریت و آهن موجود در کانیهای اکسی‌هیدروکسیدی در جدول 3 آورده شده است. بر پایه

2 دمای هوای خروجی یکی از مجراهای هوا در عمق 3 متری ترانشه B را نشان می‌دهد. به طوری‌که در دمای 8 درجه‌ای آذرماه سال 1390، هوای مرطوب خروجی از فضای خالی بین سنگهای کومه، حدود 26 درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. همان‌طور که قبلاً بحث شد حضور این فرآیند در انتقال اکسیژن به‌علت اختلاف چگالی و دمای هوای نقاط مختلف کومه با هوای خارج آن است. این اختلاف از گرمای اکسایش پیریت ناشی می‌شود (Sracek et al., 2006). به‌ازای اکسایش هر مول پیریت (119/98 گرم) برابر با 1409 کیلو ژول گرما تولید می‌شود. به‌واسطه افزایش دما در کومه که می‌تواند به دمای 70 درجه سانتی‌گراد هم برسد، انتقال اکسیژن سریع‌تر انجام می‌شود، شرایط برای رشد و فعالیت باکتری‌های هوازی تسریع‌کننده اکسایش پیریت، مناسب شده و در نتیجه اکسایش پیریت به‌صورت مضاعف ادامه پیدا می‌کند (Lefebvre et al., 2001a). شکل 3 یک مدل مفهومی برای فرآیندهای حاکم بر کومه سنگ باطله در تأمین اکسیژن شامل فرآیندهای نفوذ اکسیژن، هم‌رفت هوا، تولید و انتقال گرما را نشان می‌دهد. در شکل 4 ارتباط متقابل فرآیندهای نفوذ اکسیژن، هم‌رفت هوا و تولید گرما روی تأمین اکسیژن مصرفی در اکسایش پیریت، نشان داده شده است.

نتایج XRD، پیریت در 24 نمونه و کانیهای هیدروکسی سولفاته در 14 نمونه (جدول 2) آشکارسازی شدند و کانیهای اکسی‌هیدروکسید آهن در هیچ نمونه‌ای یافت نشد. بنابراین استفاده از این روش در بررسیهای زیست‌محیطی باعث بالا رفتن دقت، به‌ویژه برای نمونه‌های با غلظتهای پایین این کانیها می‌شود.

نتایج آزمایش pHخمیری و میزان رطوبت نمونه‌ها نیز در جدول 3 آورده شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده تعداد 15 نمونه با داشتن pHخمیری کمتر از 4، اسیدزا هستند. همچنین در این جدول، مقادیر بالایی برای رطوبت نمونه‌های A6، A7، B1 و B2 مشاهده می‌شود که می‌تواند نشانه‌ای از وضعیت خاص این نمونه‌ها در ترانشه‌های A و B باشد.

بحث و بررسی

با فرض حضور فرآیند نفوذ در کومه سنگ باطله به‌علت گرادیان غلظت اکسیژن بین خارج و داخل کومه، پی‌جویی‌هایی برای شناسایی شواهدی دال بر حضور پدیده هم‌رفت هوا در کومه‌های مورد مطالعه انجام شد.

در پی‌جویی‌های انجام شده در ترانشه‌ها، در اعماق بین 3 تا 5 متری ترانشه‌های A و B، مجراهایی با شارش بالای هوای گرم و مرطوب در ارتباط با فرآیند هم‌رفتی هوا مشاهده شد. شکل



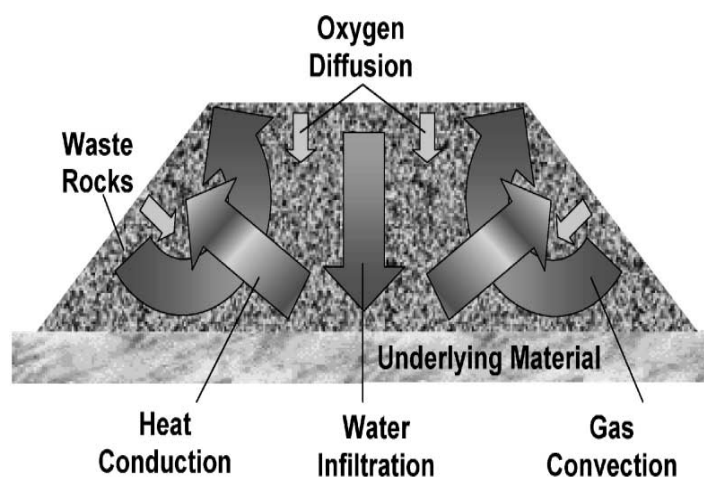
شکل 2. شارش هوای گرم و مرطوب از میان سنگهای ترانشه B در عمق 3 متری (دمای محیط 8 درجه سانتی‌گراد)

Fig. 2. Hot and humid air flow through the trench B rock in 3 meters depth (room temperature 8 °C)

جدول 3. نتایج آزمایش ASTM-D2492 و pH خمیری

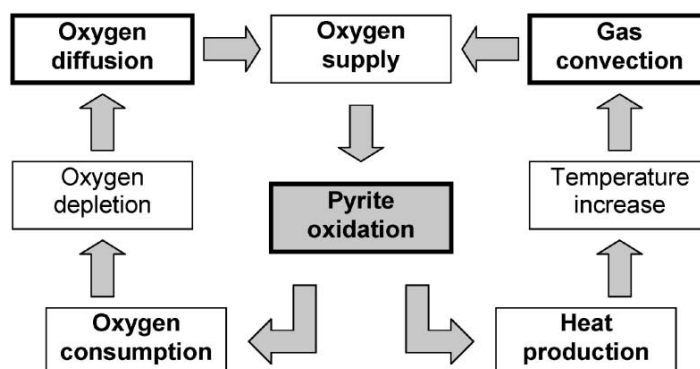
Table 3. ASTM-D2492 and paste pH experiment results

Trenches	Sample	Depth (m)	Moisture (%)	Paste pH	Pyrite(%)	SO ₄ (%)	Fe _{o-h} (%)
A	A1	0.2	4.73	2.43	11.79	4.41	3.86
	A2	0.5	3.07	3.92	18.21	2.31	3.72
	A3	0.8	4.33	3.16	12.86	4.11	3.40
	A4	1.1	3.17	3.3	6.94	3.66	4.43
	A5	1.5	1.24	4.36	15.77	2.13	2.38
	A6	2	13.23	3.79	0.64	2.55	2.71
	A7	2.5	9.88	3.86	2.79	2.25	2.55
	A8	3	6.40	4.04	0.38	1.5	1.70
B	B1	3	8.25	3.13	6.23	4.5	3.23
	B2	5	13.43	2.88	1.50	7.02	4.84
C	C1	0.2	3.58	6	2.74	0.78	4.31
	C2	0.5	4.50	6.34	2.49	0.6	4.30
	C3	0.8	3.67	5.97	2.12	0.63	3.83
	C4	1.1	4.56	6	3.19	0.69	5.36
	C5	1.5	6.74	5.99	2.91	0.72	5.33
D	D1	0.2	3.51	4.4	2.68	1.56	4.78
	D2	0.5	2.14	5.4	3.51	1.53	4.38
	D3	0.8	3.17	5.68	2.94	1.41	4.21
	D4	1.1	2.96	6.3	2.96	0.99	4.09
	D5	1.5	2.29	3.99	1.41	1.24	4.17
E	E1	0.2	4.88	3.84	5.72	4.41	6.01
	E2	0.5	4.63	5.97	2.31	1.65	7.93
	E3	0.8	3.02	4.57	2.78	1.47	4.87
	E4	1.1	3.68	6.01	1.46	1.47	6.46
	E5	1.5	6.48	6.68	1.29	1.44	6.73
F	F1	0.2	5.31	2.94	10.88	4.98	3.00
	F2	0.5	5.33	3.75	13.71	1.08	1.90
	F3	0.8	6.63	3.72	12.51	1.98	2.13
	F4	1.1	5.80	3.84	0.28	1.35	2.19
	F5	1.5	5.19	3.88	0.43	1.35	2.96



شکل 3. مدل مفهومی فرآیندهای اصلی حاکم بر کومه سنگ باطله (Lefebvre et al., 2001a)

Fig. 3. Conceptual model of the main physical processes acting within waste rock piles (Lefebvre et al., 2001a)

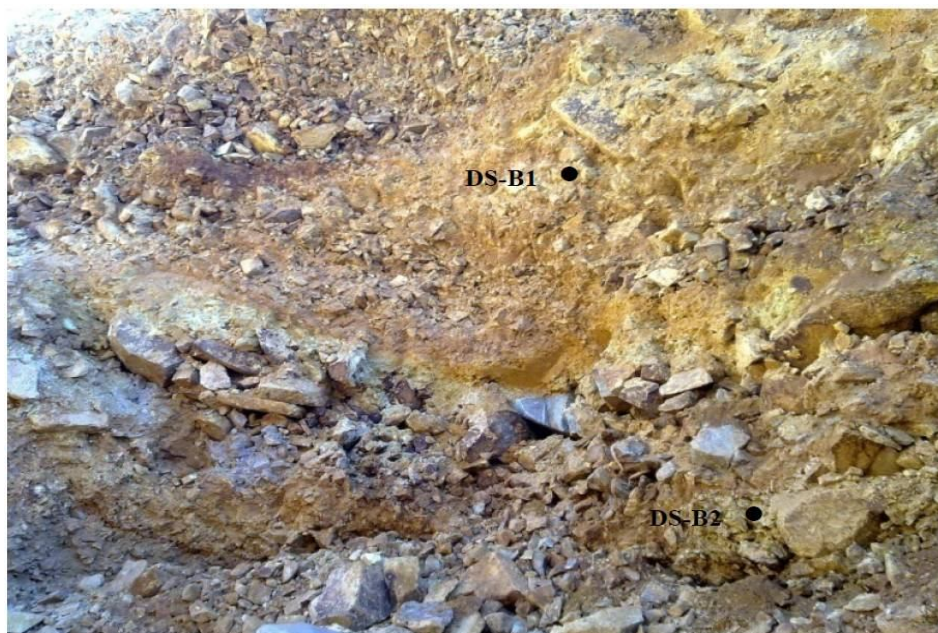


شکل 4. تأثیر متقابل دما و فرآیندهای تامین اکسیژن روی اکسایش پیریت (Lefebvre et al., 2001a)

Fig. 4. Interaction of temperature and oxygen supply processes linking pyrite oxidation (Lefebvre et al., 2001a)

مهم در این جدول، ناهماهنگی کامل نتایج میزان پیریت و کانیهای هیدروکسی سولفات در دو روش مورد استفاده است که به علت دقت بالاتر آزمایش ASTM-D2492 در تعیین میزان پیریت و سولفات به عنوان بخش اصلی تشکیل دهنده کانیهای هیدروکسی سولفات است (Yousefi et al., 2014). جدول 4 همچنین نشان می‌دهد که در نمونه B2 که در مجاورت جریان همرفت هوا وجود دارد نمونه کاملاً فقیر از پیریت و غنی از کانیهای هیدروکسی سولفات (درصد $SO_4=7/02$) به خصوص ژاروسیت (14 درصد) است.

پی‌آمد وجود هوای گرم و مرطوب، تسریع اکسایش پیریت و تشکیل کانیهای ثانویه اسیدزاست که این موضوع در اعماق 3 تا 5 متری ترانشه B به صورت شاخص (شکل 5) قابل رؤیت است. در حد فاصل این دو عمق، دو نمونه برداشت شد که یکی از نمونه‌ها (B1) در فاصله 1 متری از بالای لایه حاوی جریان همرفت هوا (عمق 3 متری از سطح) و نمونه دیگر (B2) در مجاورت مرز پایینی این لایه (عمق 5 متری از سطح) قرار می‌گرفت. نتایج تجزیه XRD، ASTM-D2492، و pHخمیری این دو نمونه در جدول 4 آورده شده است. نکته



شکل 5. کانی‌های تشکیل شده ثانویه (ژاروسیت و کائولینیت) در ارتباط با مجراهای هوای گرم و مرطوب و مکان نمونه‌های برداشت شده در ترانشه B

Fig. 5. Secondary minerals (jarosite and kaolinite) related to the warm and humid air channels and sample points in trench B

جدول 4. خصوصیات نمونه‌های مرتبط با مجاری هوای گرم و مرطوب ترانشه B

Table 4. Sample characteristics associated with warm and humid air channels in trench B

Sample	Depth (m)	XRD Analysis			ASTM-D2492 experiment		Paste pH	Moisture (%)
		Total of clay minerals (%)	Jarosite (%)	Pyrite(%)	Pyrite(%)	SO ₄ (%)		
B1	3	24	5	6	6.23	4.5	3.13	8.25
B2	5	26	14	-	1.5	7.02	2.88	13.43

عامل ناهمگنی مواد از نظر اندازه ذرات و وجود یک لایه هاردپن در افقهای سطحی، بر شدت این فرآیندها دخیل باشند.

ناهمگنی مواد از نظر اندازه ذرات

در اولین نگاه در ترانشه‌های حفر شده، ناهمگنی مواد از نظر اندازه ذرات جلب توجه می‌کند. به‌عنوان نمونه شکل 6 ناهمگنی اندازه ذرات را در ترانشه F نشان می‌دهد. چنان‌که در این شکل مشاهده می‌شود، در اعماق کم این ترانشه، مواد دانه ریز دیده می‌شوند و در اعماق بیشتر، توالی از مواد درشت‌دانه و ریزدانه حضور دارند. ناهمگنی از نظر اندازه ذرات با بررسی داده‌های دانه‌بندی به‌راحتی قابل اثبات است. برای روشن شدن ناهمگنی اندازه ذرات مواد باطله، به‌عنوان نمونه، نتایج مربوط به دانه‌بندی ترانشه A شامل 8 نمونه A1 تا A8 در جدول 5 نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول مشخص است، اندازه مؤثر (D₁₀) از 175 میکرون تا 3250 میکرون در ترانشه A تغییر می‌کند. اندازه مؤثر برای تخمین ضریب نفوذپذیری معیار مناسبی محسوب می‌شود. بنابراین با توجه به وابستگی میزان نفوذ اکسیژن و نفوذپذیری، مقدار اکسیژن منتقل شده با این فرآیند، از سطح یا مجراهای هوای گرم و مرطوب، در سراسر کومه، متفاوت است. علاوه‌بر اندازه مؤثر، میزان عوامل C_U و C_C نشان می‌دهد که تنها نمونه‌های A1، A3 و A7 شرایط خاک شنی خوب دانه‌بندی شده را دارند و سایر نمونه‌ها همه بخشهای اندازه دانه‌ها را شامل نمی‌شوند یا اصطلاحاً "بد دانه‌بندی" شده‌اند. یعنی بین سنگها، فضاهای خالی با اندازه‌های متفاوت وجود دارد که می‌تواند جایگاهی برای انتشار فرآیند هم‌رفت هوا باشد. وجود این ناهمگنی در فضای خالی بین مواد کومه باطله، باعث انتقال هوا با شدت و دمای متفاوت می‌شود. به‌عنوان نمونه، هوای هم‌رفتی راه یافته به سطح کومه 19، دمایی برابر با 32/6 درجه دارد (شکل 7) که در مقایسه با مجرای مشاهده

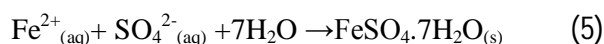
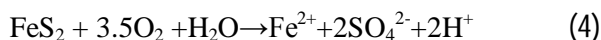
کانی ژاروسیت به‌عنوان یکی از کانیه‌های شاخص فرآیند اکسایش پیریت مربوط به محیطی با مشخصات $3 < \text{pH} < 1/5$ و غلظت یون سولفات بیشتر از 3000 میلی‌گرم بر لیتر است (Hammarstrom et al., 2005) که این شرایط، نابه‌هنجارترین شرایط زیست‌محیطی در اکسایش پیریت محسوب می‌شود. نکته مهم در رابطه با نمونه B2 حضور بالای کانیه‌های رسی در این نمونه است. حضور کانیه‌های رسی در این نمونه می‌تواند منشأ اولیه یا ثانویه داشته باشد. منشأ ثانویه این کانیه‌ها مربوط به واکنش اسید حاصل از اکسایش پیریت با کانیه‌های سیلیکاته مثل کلریت، فلدسپات آلکالن و پلاژیوکلاز می‌شود که تشکیل کانیه‌های رسی ثانویه را به دنبال دارد (Lottermoser et al., 2007).

نمونه B1 که در فاصله بیشتری از مجرای هوای گرم و مرطوب قرار گرفته است محتوای پیریت بالاتر (6 درصد) و کانی هیدروکسی سولفات (SO₄=4/5) پایین‌تری نسبت به نمونه B2 دارد. مقایسه دو نمونه B1 و B2 در دو فاصله متفاوت از مجراهای هم‌رفت هوای گرم و مرطوب نشان‌دهنده اکسایش شدید پیریت در مجاورت این مجراهاست. مقایسه میزان pH خمیری و رطوبت دو نمونه هم شرایط اسیدی‌تر و مرطوب‌تری را برای نمونه B2 نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان نمونه‌های با pH خمیری پایین و محتوای رطوبت بالا را در ارتباط با مجراهای شارش هوای گرم و مرطوب در کومه باطله دانست. به این ترتیب نمونه‌های A6 و A7 که به‌ترتیب در عمق‌های 2 و 2/5 متری ترانشه A قرار می‌گیرند می‌توانند در ارتباط با این مجراهای هوای گرم و مرطوب باشند.

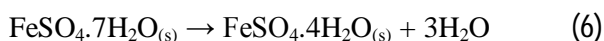
عوامل مؤثر در شدت فرآیندهای انتقال اکسیژن در کومه باطله

در کومه‌های مورد مطالعه معدن مس سرچشمه دو فرآیند نفوذ و هم‌رفت هوا، اکسیژن را به درون کومه منتقل می‌کنند. با مشاهدات صحرائی انجام شده در منطقه به نظر می‌رسد و

رنگ تبدیل می‌شود. ساز و کار تشکیل این دو کانی در رابطه‌های 4 تا 6 (Hammarstrom et al., 2005) آمده است.



(ملانتریت)



(رزونیت)

تفاوت موجود در عوامل دانه‌بندی، دلالت بر ناهمگنی باطله‌ها از لحاظ دانه‌بندی و خصوصیات هیدرولیکی دارد. این ناهمگنی در شرایط فیزیکی کومه، باعث وجود سهم مختلف فرآیندهای انتقال اکسیژن در مناطق مختلف کومه می‌شود. به‌عنوان مثال در مناطقی میزان شارش هم‌رفت هوا، بالا و در مناطقی کم و یا وجود ندارد.

شده در عمق 3 متری ترانشه B (شکل 2) دمای بالاتری را نشان می‌دهد.

بالاتر بودن دما شرایط مناسب‌تری را برای رشد باکتری‌های اکسیدکننده پیریت فراهم کرده و در نتیجه اکسایش پیریت با سرعت بیشتری انجام می‌شود (Doulati Ardejani, 2003). شدت بالای اکسیدشدگی را می‌توان با حضور کانیهای هیدروکسی سولفات تشکیل شده در اطراف مجرای موجود در سطح کومه 19 (شکل 7) اثبات کرد. این کانیها با وجود وفور اکسیژن در سطح کومه تنها در اطراف مجرا به‌علت فعالیت باکتری‌ها و وجود دمای بالاتر از هوای آزاد، تشکیل شده‌اند. کانیهای ثانویه تشکیل شده شامل، رزونیت¹ ($\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)، ملانتریت² ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) و اکسیدهای آهن هستند. ملانتریت مشخص‌کننده اکسایش پیریت و تشکیل یون سولفات و ترکیب با یون آهن دو ظرفیتی موجود در محیط است که با از دست دادن آب به کانی رزونیت سفید

جدول 5. پارامترهای دانه‌بندی نمونه‌های مربوط به ترانشه A

Table 5. Particle size distribution parameters of samples for trench A

Sample	Depth (m)	D ₁₀ (micron)	D ₃₀ (micron)	D ₆₀ (micron)	C _U	C _C
A1	0.2	1250	4750	12500	10	1.44
A2	0.5	2100	8000	1520	0.72	20.05
A3	0.8	2500	8000	15100	6.04	1.69
A4	1.1	3250	1850	33000	10.15	0.03
A5	1.5	1600	30000	46000	28.75	12.22
A6	2	175	540	2550	14.58	0.65
A7	2.5	500	1950	6000	12	1.26
A8	3	185	700	6000	32.43	0.44



شکل 6. ناهمگنی اندازه ذرات مواد باطله در ترانشه F

Fig. 6. Particle size heterogeneity of waste material in trench F



شکل 7. مجرای هوای گرم و مرطوب مشاهده شده در سطح کومه 19 که با تشکیل کانیهای ثانویه ملانتریت (کانیهای آبی رنگ) و رزونیت (کانیهای سفید رنگ) و اکسیدهای آهن (کانیهای نارنجی رنگ) همراه شده است

Fig. 7. Evidence of warm and humid air channels in the surface of dump 19 which was accompanied by forming secondary minerals such as melanterite (blue), rozenite (white) and iron oxide (orange)

به نظر می‌رسد در کومه‌های سنگ باطله معدن مس سرچشمه علاوه بر عوامل فوق، خنثی‌شدگی اسید با کانیهای کلریت، آلپیت و ارتوز و تشکیل کانیهای رسی ثانویه نیز در تشکیل لایه هاردپن نقش داشته دارد. نتایج کانی‌شناسی مربوط به نمونه‌های سطحی ترانشه‌های A، C، D، E و F (از ترانشه B نمونه سطحی گرفته نشد) در جدول 6 آمده است. در این جدول علاوه بر نتایج XRD برای فراوانی کانیهای رسی و هیدروکسی سولفات، نتایج غلظت سولفات (SO_4) و آهن موجود در کانیهای اکسی هیدروکسید (Fe_{o-h}) به دست آمده از مرحله اول آزمایش ASTM-D2492 و مقدار pH خمیری، جهت تأیید نتایج XRD ارائه شده است. برای درک بهتر شدت اکسایش در قسمتهای سطحی ترانشه‌های حفر شده و تشکیل هاردپن، در جدول 6 نتایج سطحی‌ترین نمونه با میانگین نتایج 4 نمونه مربوط به اعماق بیشتر (عمق 0/5 تا 1/5 متر) نیز مقایسه شده است. همان‌طور که در این جدول مشخص است، بالا بودن میزان کانیهای هیدروکسی سولفات، SO_4 ، Fe_{o-h} و پایین بودن میزان pH خمیری، اکسایش شدیدتر پیریت موجود در نمونه‌های سطحی نسبت

وجود لایه هاردپن در افقهای سطحی

هاردپن¹ را می‌توان به عنوان توسعه یک سد طبیعی در مواد باطله تعریف کرد که قادر است با کاهش نرخ نفوذ عمودی آب و همچنین اکسیژن، به بالا رفتن کیفیت زهاب خروجی کمک کند (Rafael et al., 2005). میزان انتقال اکسیژن در فرآیند نفوذ به میزان نفوذپذیری مواد باطله بستگی دارد (Blowes et al., 2003). عمق انتقال اکسیژن در این فرآیند کم است به طوری که بر اساس پژوهشهای دولتی ارده‌جانی (Doulati et al., 2010) در باطله‌های زغال، پس از گذشت 20 سال انتقال اکسیژن با فرآیند نفوذ، حداکثر تا عمق 3 متر ادامه می‌یابد. بنابراین حضور هاردپن می‌تواند از عوامل محدود کننده فرآیند نفوذ باشد.

تشکیل هاردپن در افقهای سطحی مربوط به تشکیل کانیهای ثانویه تولیدی در اثر پیشرفت فرآیند اکسایش پیریت مثل ژاروسیت، آلونیت²، شرتمانیت³، فری‌هیدریت⁴، گوئیتیت⁵، ملانتریت، رزونیت، کوپاپیت⁶ و هالوتریکیت⁷ است. این کانیها در درز و شکاف سنگها و تخلخل خاک جای‌گزين شده و نفوذپذیری را کاهش می‌دهند (Sidenko et al., 2006).

- | | |
|-------------------|-----------------|
| 1. Hardpan | 5. Goetite |
| 2. Alunite | 6. Copiapite |
| 3. Schwertmannite | 7. Halotrichite |
| 4. Ferrihydrite | |

ترانشه میزان SO_4 و Fe_{o-h} در نمونه سطحی C1 از میانگین نمونه‌های عمیق‌تر، بیشتر است. بنابراین با توجه به دقت بالاتر آزمایش ASTM-D2492 (ASTM, 1986) می‌توان برای این نمونه سطحی هم اکسایش پیریت را بیش از نمونه‌های عمیق‌تر ارزیابی کرد.

به نمونه‌های عمیق‌تر را نشان می‌دهد. مجموع کانیهای رسی هم می‌تواند توجیه کننده خنثی شدگی اسیدیته توسط کانیهای سیلیکاته باشد. تنها در نمونه C1 کانیهای هیدروکسی سولفات مقدار کمتری نسبت به میانگین نمونه‌های عمیق‌تر داشتند. این در حالی است که در این

جدول 6. نتایج تجزیه سطحی‌ترین نمونه‌های عمقی و مقایسه آن با میانگین نمونه‌های پایین‌تر در ترانشه‌های حفر شده

Table 6. Result of superficial samples in comparison with the average of deeper samples in the trenches

Sample	Depth (m)	XRD Analysis (%)		ASTM-D2492 experiment (%)		Paste pH	Moisture (%)
		Total of hydroxy sulphate minerals	Total of clay minerals	Fe_{o-h}	SO_4		
A1	0.2	17 (12.5)*	35 (30.75)	3.86 (3.84)	4.41 (3.05)	2.43 (3.2)	4.73
C1	0.2	0 (4)	30 (25)	4.3 (4.1)	0.72 (0.66)	6 (6.1)	3.58
D1	0.2	6 (0)	8 (6)	4.78 (4.21)	1.56 (1.29)	4.34 (5.34)	3.51
E1	0.2	8 (2)	39 (32.5)	6 (6.3)	1.47 (0.5)	3.84 (5.1)	4.88
F1	0.2	8 (3.5)	38 (48)	3 (2.3)	1.66 (0.48)	2.94 (3.6)	5.31

*: Amount in parentheses represents the average of four deeper samples than the first one (depth from 0.5 to 1.5)

نتیجه‌گیری

شناسایی فرآیند غالب در انتقال اکسیژن به پیریت یکی از مهمترین مسائل در مدل‌سازیهای عددی به‌منظور پیش‌بینی میزان اکسایش پیریت و تولید زهاب اسیدی است. در این پژوهش با استفاده از خصوصیات شیمیایی، فیزیکی، کانی‌شناسی و مشاهدات صحرایی نحوه تأثیر هر یک از فرآیندهای انتقال اکسیژن به کومه‌های سنگ باطله بررسی و فرآیند غالب در اکسیژن‌رسانی شناسایی شد. مهمترین نتایج به‌دست آمده از این تحقیق را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- 1- در پیمایشهای صحرایی مجراهایی با جریان‌های شدید هوای گرم و مرطوب در اعماق 3 تا 5 متری ترانشه‌های A و B و همچنین سطح کومه باطله 19 مشاهده شد.
- 2- وجود جریان‌های هوای گرم و مرطوب باعث اکسایش شدید پیریت و در نتیجه افزایش میزان کانیهای هیدروکسی سولفات و رسی، کاهش میزان pH خمیری و افزایش محتوای رطوبت نمونه‌ها شده است.
- 3- لایه هاردپن در افق‌های سطحی کومه سنگ باطله به ضخامت تقریبی 30 سانتی‌متر تشکیل شده است. این لایه دارای میزان بالاتری از کانیهای هیدروکسی سولفات، اکسی هیدروکسید آهن و رسی و میزان pH خمیری کمتری نسبت به نمونه‌های عمیق‌تر است.

جدول 6 همچنین نشان می‌دهد، نمونه‌های مرتبط با لایه هاردپن محتوای رطوبت پایینی دارند (کمتر از 6 درصد). نکته مهم، پایین بودن قابل توجه رطوبت این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های مرتبط با مجراهای هوای گرم و مرطوب (جدول 4) است. بنابراین با توجه به تشابه خصوصیات نمونه‌های این دو محیط از نظر میزان بالای کانیهای هیدروکسی سولفات و رسی و میزان پایین pH خمیری، تفاوت در میزان رطوبت را می‌توان به‌عنوان وجه تمایز آنها، در نظر گرفت.

در تأیید خصوصیات مطرح شده برای لایه هاردپن می‌توان به شکلهای 8 و 9 استناد کرد. شکل 8 لایه هاردپن مربوط به ترانشه A به ضخامت تقریبی 30 سانتی‌متر را نشان می‌دهد. رنگ قهوه‌ای مایل به قرمز این لایه و اثرات جریان مایع قهوه‌ای رنگ روی سنگ، بیان‌گر تولید زهاب اسیدی غنی از یون آهن و سولفات و تشکیل کانیهای ثانویه هیدروکسی سولفات و اکسی‌هیدروکسید است. شکل 9 کاهش نفوذپذیری کومه سنگ باطله به سبب تشکیل هاردپن را نشان می‌دهد که باعث ماندن آب بارندگی پس از گذشت یک روز از اتمام بارندگی در آذرماه سال 1390 در سطح کومه 31 شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که حضور هاردپن در افق‌های سطحی کومه باعث کم شدن ضریب نفوذ اکسیژن در مواد باطله شده و سهم فرآیند نفوذ اکسیژن را در اکسایش پیریت‌های عمیق‌تر را کاهش می‌دهد.



شکل 8. لایه هاردپن و اثر جریان مایعات غنی از یون آهن و سولفات در ترانشه A

Fig. 8. The hardpan layer and the flow effect of ferric and sulphate ion-rich fluid in trench A



شکل 9. باقی ماندن آب باران پس از گذشت 24 ساعت از پایان بارندگی روی کومه 31 معدن سرچشمه، آذر 1390

Fig. 9. Remaining rainwater after 24 hours of the end of rainfall on the dump 31, in December 2011

نفوذ، ضرورت کنترل اکسیژن نفوذی از مواد درشت‌دانه قسمتهای تحتانی و جانبی کومه سنگ باطله را روشن می‌کند. به این ترتیب استفاده از راهکاری مرسوم مانند ایجاد لایه نفوذناپذیر در سطح کومه جهت کنترل اکسایش پیریت، غیر اصولی خواهد بود.

قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از واحد آب و محیط زیست امور تحقیق و توسعه معدن مس سرچشمه به سبب حمایت‌های مالی و مجوز انجام نمونه‌برداری و تحقیقات آزمایشگاهی قدردانی و تشکر نمایند.

References

- Abbasnejad, A., 2012. Determination the trend of heavy metal variations in tailing dam of Sarcheshmeh copper mine. Research project, Research and Development Center, Sarcheshmeh copper complex. Rafsanjan, Iran, 238 pp. (in Persian)
- American Society for Testing and Materials (ASTM), 1986. Annual book of ASTM standards: gaseous fuels; coal and coke. ASTM International West Conshohocken, United States, 546 pp.
- Atapour, H. and Aftabi, A., 2007. The geochemistry of gossans associated with Sarcheshmeh porphyry copper deposit, Rafsanjan, Kerman, Iran: implications for exploration and the environment. *Journal of Geochemical Exploration*, 93(1): 47-65.
- Azam, S., Wilson, G., Herasymuik, G., Nichol, C. and Lee, S.B., 2007. Hydrogeological behaviour of an unsaturated waste rock pile: a case study at the Golden Sunlight Mine, Montana, USA. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66(3): 259-268.
- Blowes, D.W., Ptacek, C.J., Jambor, J.L. and Weisener, C.G., 2003. The geochemistry of acid mine drainage. *Treatise on geochemistry*, 9:149-204.
- Blowes, D.W., Reardon, E.J., Jambor, J.L. and Cherry, J.A., 1991. The formation and potential importance of cemented layers in inactive sulfide mine tailings. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(4): 965-978.

4- وجه تمایز مشخصات نمونه‌های مرتبط با مجراهای هوای گرم و مرطوب و لایه هاردپن در محتوای بالاتر رطوبت نمونه‌های مرتبط با مجراهای هوای گرم و مرطوب می‌باشد.

5- با توجه به حضور مواد درشت‌دانه و بد دانه‌بندی شده و همچنین وجود لایه هاردپن که محدود کننده نفوذ اکسیژن است می‌توان نقش همرفت هوا را به عنوان فرآیند مسلط در انتقال اکسیژن به کومه‌های سنگ باطله معدن مس سرچشمه معرفی کرد.

6- نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای ارائه راهکارهای پیشنهادی کنترل زهاب اسیدی نیز مورد اهمیت باشد. به طوری که اطلاع از تسلط فرآیند همرفت هوا در انتقال اکسیژن و حضور لایه هاردپن به‌عنوان محدود کننده فرآیند

- Borden, R.K., 2003. Environmental geochemistry of the Bingham Canyon porphyry copper deposit, Utah. *Environmental Geology*, 43(7): 752-758.
- Brown, P., Luo, X.L., Mooney, J. and Pantelis, G., 1999. The modelling of flow and chemical reactions in waste piles. Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, CSIRO, Melbourne, Australia.
- Cathles, L.M. and Apps, J.A., 1975. A model of the dump leaching process that incorporates oxygen balance, heat balance, and air convection. *Metallurgical Transactions B*, 6(4): 617-624.
- Das, B. and Sobhan, K., 2013. Principles of geotechnical engineering. Cengage Learning, Stamford, 356 pp.
- Davis, G.B. and Ritchie A.I.M., 1986. A model of oxidation in pyretic mine wastes: part 1: Equations and approximate solution. *Applied Mathematical Modeling*, 10(5): 314-322.
- Dercz, G., Oleszak, D., Prusik, K. and Pajak, L., 2008. Rietveld-based quantitative analysis of multiphase powders with nanocrystalline NiAl and FeAl phases. *Review Advance Master Science* 18:764-768.
- Doorandish, M., 2002. The role of weathering in acid mine drainage production in active mine at Kerman province. M.Sc. Thesis, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran, 220 pp. (in Persian with English abstract)

- Doulati Ardejani, F., 2003. Hydrogeological investigations of backfilled surface coal mine site. Ph.D. Thesis, University of Wollongong, Wollongong, Australia, 437 pp.
- Doulati Ardejani, F., Jodeiri Shokri, B., Bagheri, M. and Soleimani, E., 2010. Investigation of pyrite oxidation and acid mine drainage characterization associated with Razi active coal mine and coal washing waste dumps in the Azad shahr–Ramian region, northeast Iran. *Environmental Earth Sciences*, 61(8): 1547-1560.
- Elberling, B., Nicholson, R.V., Reardon, E.J. and Tibble, R., 1994. Evaluation of sulphide oxidation rates: a laboratory study comparing oxygen fluxes and rates of oxidation product release. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(3): 375-383.
- Esmailzadeh, E., 2012. Environmental assessment of furnace slag in Sarcheshmeh copper complex. Research project, Research and Development Center, Sarcheshmeh copper complex, Rafsanjan, Iran, 312 pp. (in Persian)
- Ghotbi Ravandi, A., 2007. Evaluation of heavy metal content in plant around The Sarcheshmeh region. M.Sc. Thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran, 234 pp. (in Persian with English abstract)
- Hammarstrom, J.M., Seal, R.R., Meier, A.L. and Kornfeld, J.M., 2005. Secondary sulfate minerals associated with acid drainage in the eastern US: recycling of metals and acidity in surficial environments. *Chemical Geology*, 215(1): 407-431.
- Islam, A.K.M.E. and Lotse, E.G., 1986. Quantitative mineralogical analysis of some Bangladesh soils with X-ray, ion exchange and selective dissolution techniques. *Clay Mineralogy*, 21:31-42.
- Jannesar Malakooti, S., Shafaei Tonkaboni, S.Z., Noaparast, M., Ardejani, F.D. and Naseh, R., 2014. Characterisation of the Sarcheshmeh copper mine tailings, Kerman province, southeast of Iran. *Environmental earth sciences*, 71(5): 2267-2291.
- Jaynes, D.B., Rogowski, A.S. and Pionke, H.B., 1984. Acid mine drainage from reclaimed coal strip mines 1. Model description. *Water Resources Research*, 20(2): 233-242.
- Keshavarzi, B., Moore, F. and Sharifi, R., 2013. Evaluation of dispersion and chemical partitioning patterns of heavy metals in the Sar Cheshmeh porphyry copper deposit: geochemical data from mine waste, water and stream sediments. *International Journal of Environmental Studies*, 70(1): 73-93.
- Khorasanipour, M., 2011. Identification of trace element speciation in soil and sediments around Sarcheshmeh Copper Complex, an approach to the environmental monitoring. Ph.D. Thesis, Shiraz University, Shiraz, Iran, 367 pp. (in Persian with English abstract)
- Komeizi, A., 2000. Evaluation of Shoor river pollution in Sarchemeh copper complex. M.Sc. Thesis, Sistan and Baluchestan University, Zahedan, Iran, 245 pp. (in Persian with English abstract)
- Lefebvre, R., Hockley, D., Smolensky, J. and Gélinas, P., 2001a. Multiphase transfer processes in waste rock piles producing acid mine drainage: 1: Conceptual model and system characterization. *Journal of Contaminant Hydrology*, 52(1): 137-164.
- Lefebvre, R., Hockley, D., Smolensky, J. and Lamontagne, A., 2001b. Multiphase transfer processes in waste rock piles producing acid mine drainage: 2. Applications of numerical simulation. *Journal of Contaminant Hydrology*, 52(1): 165-186.
- Lottermoser, B.G., 2007. Mine waste characterization, treatment, environment impacts. second edition. Springer –Verlag Berlin Heidelberg, New York, 303 pp.
- Modabberi, S., Alizadegan, A., Mirnejad, H. and Esmailzadeh, E., 2013. Prediction of AMD generation potential in mining waste piles, in the sarcheshmeh porphyry copper deposit, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(11): 9077-9087.
- Molson, J.W., Fala, O., Aubertin, M. and Bussière, B., 2005. Numerical simulations of pyrite oxidation and acid mine drainage in unsaturated waste rock piles. *Journal of Contaminant Hydrology*, 78(4): 343-371.
- Morin, K.A., Cherry, J.A., Dave, N.K., Lim, T.P. and Vivyurka, A.J., 1988. Migration of acidic groundwater seepage from uranium-tailings impoundments, 1. Field study and conceptual hydrogeochemical model. *Journal of Morin, K.A., Jones, C.E. and van Dyk, R.P., 1994. Internal hydrogeologic monitoring of an acidic waste-rock dump at Westmin Resources Myra Falls Operations. 3rd International Conference on the Abatement of Acid Drainage, University of Pittsburgh, Pennsylvania, USA.*

- Nichol, C., Smith, L. and Beckie, R., 2000. Hydrogeologic behaviour of unsaturated mine waste rock: An experimental study. 5th International Conference on Acid Rock Drainage, Society for Mining Metallurgy, and Exploration, Colorado, USA.
- Orandi, S., 2006. The effect of waste mining dumps on acid mine drainage production. M.Sc. Thesis, Kharazmi University, Tehran, Iran, 243 pp. (in Persian with English abstract)
- Ourandi, S., Yaghoubpour, A., Nakhaei, M., Mehrabi, B., Sahraei, H. and Behrouz, M., 2009. Distribution and role of green algae in acid mine drainage at Sarcheshmeh copper mine. *Geosciences*, 18(72): 173-180. (in Persian with English abstract)
- Rafael, P.L., Miguel, N.J., Gabriel, R.A., 2005. Geochemistry and mineralogy of hardpan formation processes at the interface between sulphide-rich sludge and fly ash. 9th International Mine Water Congress, University of Oviedo, Oviedo, Spain.
- Rastmanesh, F., Moore, F., Kopaei, M.K., Keshavarzi, B. and Behrouz, M., 2011. Heavy metal enrichment of soil in Sarcheshmeh copper complex, Kerman, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 62(2): 329-336.
- Sharifi, R., Moore, F. and Keshavarzi, B., 2013. Geochemical behavior and speciation modeling of rare earth elements in acid drainages at Sarcheshmeh porphyry copper deposit, Kerman Province, Iran. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 73(4): 509-517.
- Sidenko, N.V., Sherriff, B.L. and VanGulck, J., 2006. Mineralogical and geochemical characterization of Ni-Cu sulfide tailings, Thompson, Manitoba, Canada. 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), American Society of Mining and Reclamation (ASMR), Lexington Kentucky, USA.
- Silva, J.C., Vargas, E.A. and Sracek, O., 2009. Modeling multi phase reactive transport in a waste rock pile with convective oxygen supply. *Vadose Zone Journal*, 8(4): 23-34.
- Smuda, J., Dold, B., Friese, K., Morgenstern, P. and Glaesser, W., 2007. Mineralogical and geochemical study of element mobility at the sulfide-rich Excelsior waste rock dump from the polymetallic Zn-Pb-(Ag-Bi-Cu) deposit, Cerro de Pasco, Peru. *Journal of Geochemical Exploration*, 92(2): 97-110.
- Sracek, O., Gélinas, P., Lefebvre, R. and Nicholson, R.V., 2006. Comparison of methods for the estimation of pyrite oxidation rate in a waste rock pile at Mine Doyon site, Quebec, Canada. *Journal of Geochemical Exploration*, 91(1): 99-109.
- Wunderly, M.D., Blowes, D.W., Frind, E.O. and Ptacek, C.J., 1986. Sulfide mineral oxidation and subsequent reactive transport of oxidation products in mine tailings impoundments: A numerical model. *Water Resources Research*, 32(10): 3173-3187.
- Yousefi, S., Doulati Ardejani, F., Ziiai, M. and Karamoozian, M. and Esmail zadeh, E., 2014. Modification of ASTM-D2492 standard test method for determining sulfur forms in environmental monitoring of porphyry copper waste dump, Case study: Sarcheshmeh copper mine. *Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME)*, 8(21): 53-65. (in Persian with English abstract)



Investigation on the oxygen transport mechanisms in the Sarcheshmeh waste rock dumps

Saeed Yousefi^{1*}, Faramarz Doulati Ardejani², Arezoo Abedi³, Mansour Ziaii³, Esmat Esmail Zadeh⁴

1) Nehbandan Faculty of Mining, University of Birjand, Nehbandan, Iran

2) School of Mining Engineering, Engineering College, University of Tehran, Tehran, Iran

3) School of Mining, Petroleum and Geophysics, University of Shahrood, Shahrood, Iran

4) Sarcheshmeh Copper Complex, Research and Development Center, Rafsanjan, Iran

Submitted: Mar. 12, 2014

Accepted: June 11, 2014

Keywords: Waste Rock dump; Sulphide minerals oxidation; Diffusion; Convection; Heterogeneity; Hardpan; Sarcheshmeh copper mine

Introduction

Pyrite oxidation and acid mine drainage (AMD) are the serious environmental problems associated with the mining activities in sulphide ores. The rate of pyrite oxidation is governed by the availability of oxygen (Borden, 2003). Therefore, the identifying oxygen supplying mechanism is one of the most important issues related to the environmental assessment of waste rock dumps (Cathles and Apps, 1975; Jaynes et al., 1984; Davis and Ritchie, 1986). Although comprehensive researches were performed on the mathematical description of oxygen transport processes using the numerical modeling (Morin et al., 1988; Blowes et al., 1991; Wunderly et al., 1986; Elberling et al., 1994; Jannesar Malakooti et al., 2014), so far, the interactions between these processes and geochemical and mineralogical characteristics has not been studied especially in waste rock dumps. Therefore the main objective of this study is to identify the evidences for knowing the oxygen transport mechanisms in the waste dumps and also, its role in intensity of pyrite oxidation. It is expected that such these structural studies could be useful for better understanding of dominant processes in numerical modeling and also providing environmental management strategies in the study area and other sites by similar characteristics.

Materials and Methods

In this study, thirty solid samples were collected from six excavated trenches in the waste rock dumps No. 19 and 31 of the Sarcheshmeh porphyry copper mine. Collected samples were

studied using several methods such as XRD, ASTM-D2492, paste pH and grain size distribution. The results obtained from these methods were used with the field observations in order to characterize some detail information about oxygen supplying mechanisms for oxidation reactions in the waste rock dumps.

Result

The main minerals found by the XRD analysis were quartz and muscovite which were present in all samples. Pyrite, orthose, albite, and chlorite were also present in some samples. The carbonate content as the major neutralizing agent was zero in all samples. Due to the presence of sulfide minerals, mainly as pyrite, and also lack of any carbonate minerals, the AMD generation from the Sarcheshmeh waste rocks during the weathering reactions is predictable. At the Sarcheshmeh mine waste, several secondary minerals such as butlerite, jarosite and gypsum were detected by XRD at some depths. Moreover, amorphous iron oxyhydroxide minerals visually observed in waste dumps were not detected by XRD due to being negligible and low level of crystallinity. Hence, they were measured in terms of (Fe_{o-h}) by ASTM standard test method. The ASTM-D2492 standard test showed that pyrite, sulphate and iron oxyhydroxide minerals (Fe_{o-h}) are present in all samples. Against the XRD method, the test even detected the negligible content of the minerals. The paste pH showed that 15 samples were acid-producing because they had pH lower than 4. On the basis of moisture content results, the samples by name A6, A7, B1 and B2 showed high

*Corresponding authors Email: s.yousefi@birjand.ac.ir

level of moisture which can be sign of the particular status in them.

Discussion

According to the field observations, channels with a strong flow of warm and humid air were detected in the depth of 3 to 5 meters of the investigated waste rock dumps. High content of humidity (8.25 and 13.43 percent) and sulfate (4.5 and 7.02 percent) were observed together with low content of pyrite (1.5 and 6.23 percent) and acidic paste pH values (3.13 and 2.88) around these channels. Therefore, from the relation of these occurrences, it can be inferred that the air convection is important for supply oxygen to pyrite oxidation in the waste dumps of Sarcheshmeh.

The results also indicate that, two main factors including grain size distribution and formation of hardpan layer on top of old weathered rocks are responsible for the decreasing of oxygen transformation rate via the molecular diffusion mechanism through the waste rock dumps.

Considering the presence of coarse grain and poorly graded material as a proper media for air convection and also hardpan layer as a confining factor in molecular diffusion of oxygen, it can be deduced that the air convection is the main important mechanism to supply oxygen for weathering and oxidation reactions in the waste rock dumps. The abundance of oxygen and high temperatures in such conditions are also favorable for bacterial activities, which can then accelerate the pyrite oxidation in lower depth of dump.

It is expected that the results of this study could be useful as a basis for providing the remediation strategies to control acidic drainage. So that knowing the domination of air convection and presence of hardpan justify controlling the flux of oxygen from the coarse material in bottom of waste dump. Therefore, it would be wrong to construct the impermeable layer on the surface of waste dump for arresting the oxygen diffusion as a traditional method in the remediation.

Acknowledgement

The authors appreciate the cooperation of the Research and Development Division of the Sarcheshmeh Copper Complex for financial

support and access to sampling and analysis facilities.

Reference

- Blowes, D.W., Reardon, E.J., Jambor, J.L. and Cherry, J.A., 1991. The formation and potential importance of cemented layers in inactive sulfide mine tailings. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(4): 965-978.
- Borden, R.K., 2003. Environmental geochemistry of the Bingham Canyon porphyry copper deposit, Utah. *Environmental Geology*, 43(7): 752-758.
- Cathles, L.M. and Apps, J.A., 1975. A model of the dump leaching process that incorporates oxygen balance, heat balance, and air convection. *Metallurgical Transactions B*, 6(4): 617-624.
- Davis, G.B. and Ritchie A.I.M., 1986. A model of oxidation in pyritic mine wastes: part 1: Equations and approximate solution. *Applied Mathematical Modeling*, 10(5): 314-322.
- Elberling, B., Nicholson, R.V., Reardon, E.J. and Tibble, R., 1994. Evaluation of sulphide oxidation rates: a laboratory study comparing oxygen fluxes and rates of oxidation product release. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(3): 375-383.
- Jannesar Malakooti, S., Shafaei Tonkaboni, S.Z., Noaparast, M., Ardejani, F.D. and Naseh, R., 2014. Characterisation of the Sarcheshmeh copper mine tailings, Kerman province, southeast of Iran. *Environmental Earth Sciences*, 71(5): 2267-2291.
- Jaynes, D.B., Rogowski, A.S. and Pionke, H.B., 1984. Acid mine drainage from reclaimed coal strip mines 1. Model description. *Water Resources Research*, 20(2): 233-242.
- Morin, K.A., Cherry, J.A., Dave, N.K., Lim, T.P. and Vivyurka, A.J., 1988. Migration of acidic groundwater seepage from uranium-tailings impoundments, 1. Field study and conceptual hydrogeochemical model. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2(4): 271-303.
- Wunderly, M.D., Blowes, D.W., Frind, E.O. and Ptacek, C.J., 1986. Sulfide mineral oxidation and subsequent reactive transport of oxidation products in mine tailings impoundments: A numerical model. *Water Resources Research*, 32(10): 3173-3187.