

مقایسه تاثیر مکانیزم‌های شکست بر درجه آزادی و شکل ذرات در فلوتاسیون کانسنگ مس سولفیدی

کیانوش بارانی بیرانوند^۱، عزیز عمرزهی^۲

۱- دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه لرستان، لرستان

۲- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه لرستان، لرستان

(دریافت ۱۳۹۸/۰۶/۰۱، پذیرش ۱۳۹۸/۰۹/۱۸)

چکیده

در این تحقیق یک نمونه سنگ معدن مس پس از سنگ‌شکنی تا صد درصد زیر ۳/۳۶ میلی‌متر، با آسیای گلوله‌ای یا مکانیسم شکست لایه‌ای تا صد درصد زیر ۲۵۰ میکرون خرد شد. نتایج آنالیز دانه‌بندی محصولات نشان می‌دهد شکست لایه‌ای در مقایسه با آسیای گلوله‌ای محصول دانه ریزتری تولید می‌کند. آنالیز آزادی کانی کالکوپیریت در محصولات شکست در هشت محدوده دانه‌بندی مختلف نشان می‌دهد، درصد آزادی کانی کالکوپیریت در محصول آسیای گلوله‌ای در همه محدوده‌ها بیشتر از محصول شکست لایه‌ای است و به طور کلی درصد آزادی کانی کالکوپیریت در محصول آسیای گلوله‌ای حدوداً ۱/۸۲ درصد بیشتر از محصول شکست لایه‌ای است. با استفاده از آنالیز تصاویر میکروسکوپ الکترونی، فاکتورهای هندسی مختلف شکل ذرات در محصولات شکست مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد ذرات موجود در محصول شکست لایه‌ای در مقایسه با محصول آسیای گلوله‌ای کرویت و گردشدگی بیشتری (حدود ۵ درصد) دارند و ذرات موجود در محصول آسیای گلوله‌ای کشیده‌تر هستند. نتایج آزمایش‌های میکروفلوتاسیون نیز نشان می‌دهد بازیابی وزنی و کارایی جدایش در محصول آسیای گلوله در مقایسه با محصول شکست لایه‌ای به ترتیب ۱۱ درصد و ۱۵ درصد بیشتر است. این عملکرد متالورژیکی بهتر به دلیل وجود ذرات دانه‌ریز بیشتر در محصول شکست لایه‌ای، درجه آزادی بیشتر کانی کالکوپیریت در محصول آسیای گلوله‌ای و کرویت و گردشدگی کمتر ذرات موجود در محصول آسیای گلوله‌ای است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد بر خلاف نتایج بسیاری از تحقیقات قبلی، شکست لایه‌ای موجب افزایش آزادی کانی‌ها و بهبود عملکرد فرآیند فلوتاسیون نشده است.

کلمات کلیدی

شکست لایه‌ای، آسیای گلوله‌ای، درجه آزادی، شکل ذرات، فلوتاسیون.

۱- مقدمه

تحقیقات نشان داده است که شکست لایه‌ای ذرات یک کانه کرومیتی در مقایسه با شکست در آسیای میله‌ای، به بهبود ۳-۱۶ درصدی درجه آزادی ذرات کرومیت منجر شده و با افزایش فشار پیستون درجه آزادی بهبود یافته است [۴]. محققان آفریقای جنوبی نیز نشان داده‌اند که شکست لایه‌ای کانه کیمبرلیت در مقایسه با روش‌های معمول سنگ شکنی ممکن است حتی با خردایش کمتر به بهبود آزادی ذرات الماس منجر شود [۵].

مقایسه تاثیر شکست ضربه‌ای و شکست لایه‌ای بر روی دو نمونه کانه مس نیز نشان داده است که مکانیسم شکست لایه‌ای محصول دانه‌ریزتری تولید می‌کند و درجه آزادی کانی‌ها را نیز در مقایسه با مکانیسم شکست ضربه‌ای بهبود می‌بخشد [۳]. البته همه تحقیقات بیانگر عملکرد بهتر مکانیسم شکست لایه‌ای نیست. برای مثال تاثیر مکانیسم خردایش بر روی درجه آزادی کانی‌ها برای دو نوع کانه سولفیدی مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق کانه‌های سولفیدی با مکانیسم شکست لایه‌ای (در یک پیستون سیلندر) و یا مکانیسم ضربه (در یک آسیای چکشی) خرد شده‌اند. محصول خردایش به طبقات سرنندی تقسیم و درجه آزادی کانی‌های با ارزش و باطله مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که بر خلاف گزارش‌های قبلی شکست لایه‌ای موجب بهبود درجه آزادی کانی‌ها نشده است [۶].

مکانیزم‌های مختلف در خردایش مواد علاوه بر تغییر در توزیع ابعادی محصول خردایش، می‌تواند خصوصیات هندسی و مورفولوژیکی محصول را تغییر دهد. شکل ذرات یکی از پارامترهای مهم است که بر روی خواص شیمیایی، فیزیکی و سطحی ذرات تاثیر می‌گذارد. مکانیسم شکست نقش موثری در شکل ذرات تولیدی ناشی از شکست دارد. اختلاف در مکانیسم خردایش، محصولی با هندسه و شکل‌های مختلف تولید می‌کند [۷].

خصوصیات هندسی ذرات در ترشوندگی ذرات در فرآیند تاثیرگذار است. تاثیر هندسه ذرات بر ترشوندگی و قابلیت شناورسازی آنها در فرآیند فلوتاسیون مورد توجه و بررسی قرار گرفته است. کورسان^۹ و همکاران تاثیر خردایش یک نمونه تالک را در یک آسیای گلوله‌ای و یک آسیای میله‌ای را بر شناورسازی آنها در یک سلول فلوتاسیون ستونی مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد آسیای میله‌ای در مقایسه با آسیای گلوله‌ای محصولی با ذرات کشیده‌تر تولید می‌کند و به

مکانیسم شکست در آسیاهای گردان ترکیبی از ضربه^۱، سایش^۲ و فرسایش^۳ است. با توجه به اینکه نوع تنش‌های وارده بر ذرات در هر مکانیسم متفاوت است، هر مکانیسم شکست محصولی با توزیع دانه‌بندی و شکل ذرات متفاوت تولید می‌کند. زمانی که آسیا با سرعت کم دوران می‌کند حرکت بار به صورت یک آبشار کوچک^۴ است و بار خردکننده بر روی هم می‌غلند و در نتیجه مکانیسم غالب فرسایش و محصول خردایش دانه‌ریز است. زمانی که سرعت دوران آسیا افزایش می‌یابد حرکت بار به صورت یک آبشار بزرگ^۵ است و در ناحیه پاشنه بار شکست ضربه‌ای اتفاق می‌افتد. البته با توجه به نوع آسیا بعضی مکانیسم‌ها غالب‌تر هستند. در آسیای میله‌ای ذرات بیشتر به واسطه‌ی ضربه خرد می‌شوند و مکانیزم سایش کمتر در کاهش ابعاد ذرات تاثیرگذار است، اما در آسیای گلوله‌ای علاوه بر ضربه، فرسایش نیز یک مکانیسم موثر است. در تجهیزاتی مانند آسیای غلتکی فشار بالا^۶ (HPGR) و آسیای غلتکی عمودی^۷ (VRM) ذرات به وسیله فشرده شدن در بستری از ذرات که در بین غلتک‌ها (یا غلتک و میز در آسیای غلتکی عمودی) تشکیل می‌شوند خرد می‌شوند. به این نوع شکست، شکست لایه‌ای^۸ می‌گویند. این مکانیزم شکست باعث ایجاد ریز ترک‌هایی در امتداد مرز دانه‌ها شده که در ادامه عمل خردایش را بهتر می‌سازد [۱].

کالالا و همکاران استفاده از آزمایش‌های شکست لایه‌ای به وسیله پیستون-سیلندر را برای پیش‌بینی رفتار خردایش آسیای غلتکی فشار بالا مورد بررسی قرار داده‌اند. در این آزمایش‌ها کانه‌های طلا، پلاتین و آهن استفاده و نمونه‌ها در پیستون سیلندرهایی با قطر پیستون ۱۰۰، ۲۰۰، ۷۵ و ۵۰ میلی‌متر خرد شده‌اند. برای شبیه شدن شرایط شکست به آسیای غلتکی فشار بالا در انتهای هر یک از پیستون‌ها یک پخ ایجاد شده است. نتایج نشان داد توزیع دانه‌بندی محصول آزمایش‌های شکست لایه‌ای شبیه محصول آسیای غلتکی فشار بالا است و عملکرد یک آسیای غلتکی فشار بالا با قطر ۲۵۰ میلی‌متر با آزمایش‌های شکست لایه‌ای به وسیله پیستون-سیلندر قابل پیش‌بینی است [۲].

شواهدی وجود دارد که نشان می‌دهد شکست لایه‌ای ذرات که در فضای بین غلتک‌ها در آسیای غلتکی فشار بالا رخ می‌دهد ممکن است در نتیجه شکست ترجیحی که در مرز بین دانه‌ها اتفاق می‌افتد باعث افزایش آزادی کانی‌ها شود [۳].

از غالب شدن مکانیسم ساییش و فرسایش با افزایش زمان آسیاکنی است [۱۳].

در آسیای خودشکن، در کانه‌های نرم در مقایسه با کانه‌های سخت، ذرات تولیدی گوشه‌دار و کشیده‌تر هستند. به این دلیل که کانه‌های نرم غالباً به وسیله مکانیسم ضربه خرد می‌شوند اما مکانیسم ضربه قادر به خرد کردن کامل ذرات سخت نیست و مکانیسم‌های ساییش و فرسایش نیز در خردایش این ذرات نقش ایفا می‌کنند [۱۴].

در این تحقیق تاثیر خردایش یک کانه سولفیدی مس در یک آسیای گلوله‌ای آزمایشگاهی و شکست لایه‌ای بر روی آزادی کانی‌ها، شکل و رفتار ذرات در فرآیند فلوتاسیون با هم مقایسه شد. محصول تولیدی ناشی از خردایش در هر یک از این دستگاه‌ها به چند محدوده سرندي تقسیم و درجه آزادی، مشخصات هندسی و بازبایی فلوتاسیون برای هر یک از محدوده‌های سرندي تعیین شد.

۲- آزمایش‌ها

۲-۱- تهیه و آماده‌سازی نمونه

نمونه مورد استفاده در این تحقیق از معدن قلعه زری واقع در خراسان جنوبی تهیه شد. قلعه زری یک معدن مس رگه‌ای است که کالکوپیریت و گالن کانی‌های اصلی موجود در کانه هستند [۱۵]. نمونه مورد نیاز به صورت سنگ‌جوری دستی از محصول سنگ‌شکن فکی کارخانه فرآوری معدن مس قلعه زری برداشت و در ادامه به وسیله سنگ‌شکن‌های فکی و مخروطی تا ۱۰۰ درصد کمتر از ۳/۳۶ میلی‌متر خرد شد. شکل ۱ توزیع دانه‌بندی نمونه اولیه را نشان می‌دهد. محصول سنگ‌شکنی به وسیله ریفل به دو بخش برای انجام خردایش با شکست لایه‌ای و آسیای گلوله‌ای تقسیم شد. هر دو نمونه محصول شکست لایه‌ای و گلوله‌ای با هفت سرندي استاندارد ASTM (۱۷۷، ۱۵۰، ۱۰۶، ۷۵، ۶۳، ۴۴ و ۳۷ میکرون) تجزیه سرندي شده‌اند. شکل ۲ توزیع دانه‌بندی هر دو نمونه را نشان می‌دهد.

۲-۲- آزمایش‌های شکست

آزمایش‌های شکست لایه‌ای در یک پیستون- سیلندر انجام شد. این آزمایش در تحقیقات زیادی برای شبیه‌سازی شکست لایه‌ای در آسیای غلتکی فشار بالا و آسیای غلتکی عمودی مورد استفاده قرار گرفته است [۲، ۳، ۴، ۱۶، ۱۷].

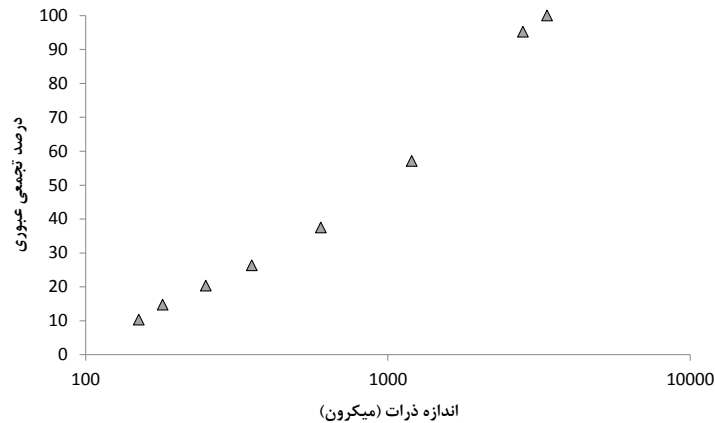
طور میانگین بازبایی محصول آسیای میله‌ای ۱۸ درصد بیشتر از محصول آسیای گلوله‌ای است [۸].

اولسوی^{۱۰} و همکاران نمونه‌های کلسیت و باریت را در آسیاهای گلوله‌ای، میله‌ای و خودشکن خرد کرده و سپس با بررسی تصاویر تهیه شده به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی، پارامترهای هندسی ذرات محصول مانند نسبت طول به عرض، پهن‌شدگی و گردشدگی و همچنین ترشوندگی (زاویه تماس) محصولات را اندازه‌گیری کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد فارغ از نوع آسیا ذرات پهن و با نسبت طول به عرض بزرگتر خاصیت آبرانی بیشتری دارند [۹]. تحقیقات مشابهی توسط هشیلماز^{۱۱} و همکاران بر روی نمونه‌های تالک و کواتز انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که ذرات تولید شده به وسیله آسیای میله‌ای در مقایسه با آسیای گلوله‌ای و خودشکن درازتر و پهن‌تر هستند و آبرانی آنها بیشتر است [۱۰].

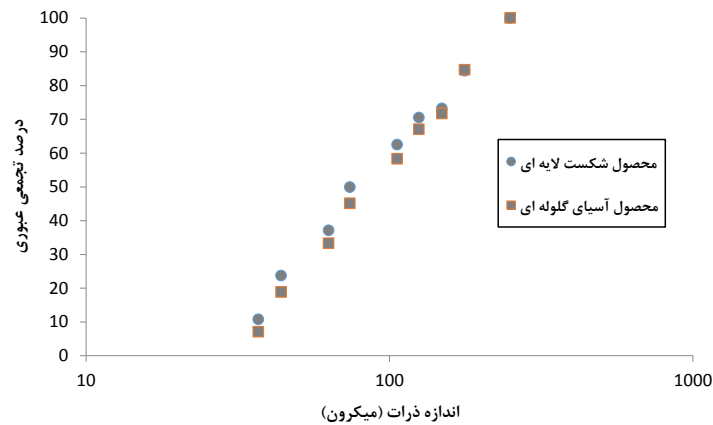
گادین^{۱۲} شکل ذرات را در محصول خروجی آسیاهای مختلف مورد بررسی قرار داده است. نتایج نشان داده است که ذرات تولید شده با مکانیسم ضربه در همه محدوده‌های دانه‌بندی گوشه‌دار هستند. ذرات تولیدی با مکانیسم ساییش که در نتیجه ساییده شدن لبه‌های ذرات بزرگ ایجاد می‌شوند نیز دانه‌ریز و گوشه‌دار هستند. به طور کلی در آسیاهایی که در آنها مکانیسم ضربه غالب است بیشتر ذرات تولیدی شکل‌های نامنظم دارند اما آسیاهایی که در آنها مکانیسم فرسایش غالب است (مانند آسیاهای همزن‌دار) بیشتر ذراتی با شکل نزدیک به کره تولید می‌کنند، بنابراین بررسی شکل ذرات ممکن است روش مناسبی برای شناخت مکانیسم شکست در آسیاها باشد [۱۱].

تحقیقات نشان داده است که ذرات محصول آسیای خودشکن در مقایسه با محصول آسیای گلوله‌ای و میله‌ای، به علت تاثیر مکانیسم ساییش گردتر هستند. ویزکارا^{۱۳} و همکاران شکل ذرات تولیدی در یک آسیای چکشی (مکانیزم شکست ضربه‌ای) را با یک پیستون- سیلندر (مکانیزم شکست لایه‌ای) مقایسه کرده‌اند. نتایج نشان داده است که آسیای چکشی ذراتی با گوشه‌های کمتر تولید می‌کند که این در نتیجه ساییش سطوح ذرات است. اما مکانیسم شکست لایه‌ای این اجازه را به ذرات می‌دهد که شکل خود را حفظ کنند [۱۲].

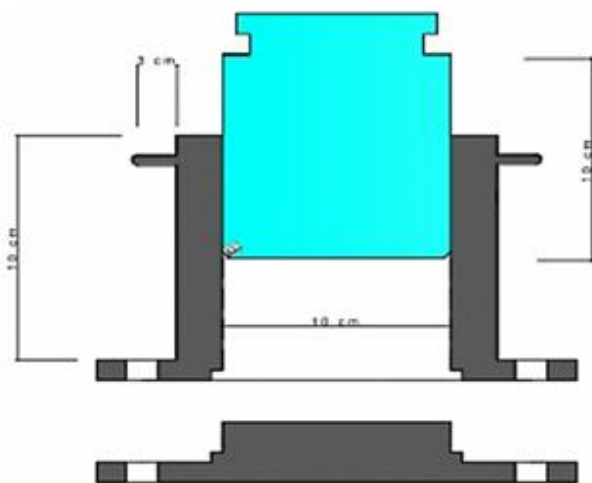
زمان خردایش نیز از عوامل موثر بر مکانیسم شکست و شکل ذرات است. افزایش زمان خردایش در آسیاهای گردان موجب گردشدگی بیشتر ذرات تولیدی می‌شود که ناشی



شکل ۱: توزیع دانه‌بندی نمونه اولیه بعد از سنگ‌شکنی



شکل ۲: توزیع دانه‌بندی محصول آزمایش‌های شکست لایه‌ای و آسیای گلوله‌ای



شکل ۳: طرح شماتیک پیستون- سیلندر ساخته شده

برای انجام آزمایش‌های شکست لایه‌ای یک پیستون- سیلندر به قطر سیلندر ۱۰۰ و قطر پیستون ۹۵ میلی‌متر ساخته شد. برای اینکه اثر لبه در HPGR در مقیاس صنعتی شبیه‌سازی شود، یک پخ ۳۰ درجه در انتهای سیلندر به عمق نیم سانت تعبیه شد. شکل ۳ پیستون- سیلندر ساخته شده را نشان می‌دهد. برای اعمال فشار از یک دستگاه پرس هیدرولیکی استفاده شد. این دستگاه ساخت شرکت BESMAK و دارای ظرفیت بارگذاری ۲۰۰۰ کیلو نیوتن است. در هر مرحله مقدار ۳۵۰ گرم از نمونه را داخل سیلندر ریخته و تا ۱۹۵۰ کیلو نیوتن به آن فشار وارد شد. کیک حاصل از کف سیلندر جمع‌آوری و از الک ۲۵۰ میکرون عبور داده شد. مقداری از نمونه که بر روی الک باقی مانده بود را دوباره داخل سیلندر ریخته و تحت فشار ۱۹۵۰ کیلو نیوتن قرار گرفته و این کار آنقدر تکرار شد تا تمام نمونه از الک ۲۵۰ میکرون عبور کند.

نتایج XRD (شکل ۴) نشان می‌دهد کالکوپیریت گالن و کوارتز اصلی‌ترین فازهای موجود در نمونه‌اند. جدول ۱ نیز نتایج آنالیز عنصری نمونه را نشان می‌دهد.

جدول ۱: نتایج آنالیز عنصری نمونه کانه مس مورد بررسی

عنصر	Pb	Cu	Fe	S	Si
درصد	۵٫۹۲	۷٫۷۱	۱۰٫۸۳	۲۵٫۵۰	۵۰٫۰۴

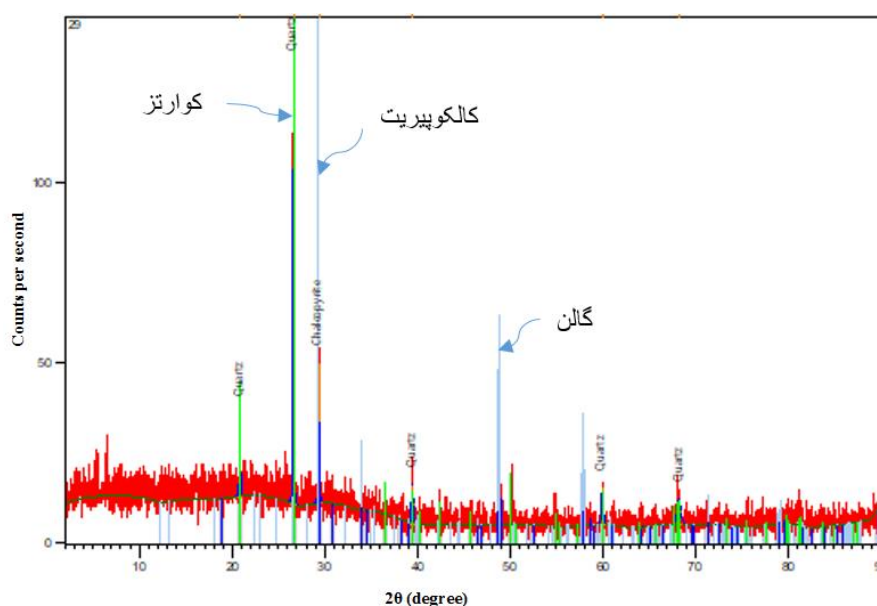
۲-۴- مطالعات درجه آزادی

بعد از انجام آزمایش‌های شکست لایه‌ای و آسیای گلوله‌ای، محصول خردایش در ۸ طبقه سرندي (۱۷۰+۲۵۰-)، (۱۵۰+۱۷۷-)، (۱۰۶+۱۵۰-)، (۱۰۶+۷۵-)، (۶۳+۷۵-)، (۴۴+۶۳-)، (۳۷+۴۴-) و ۳۷- میکرون دانه‌بندی و مقاطع صیقلی از آنها تهیه شد. مطالعات درجه آزادی کانی کالکوپیریت بر روی هر یک از محدوده‌های یاد شده به وسیله میکروسکوپ نوری پلاریزان ZEISS مدل Axioplan2 با نور انعکاسی انجام شد. برای تعیین درجه آزادی از روش شمارش میکروسکوپی کانی‌های آزاد و کانی‌های درگیر استفاده شده است. در این روش دانه‌های آزاد و درگیر کانی شمارش و درجه آزادی از رابطه ۱ محاسبه شد:

آزمایش‌های شکست در آسیای گلوله‌ای در یک آسیای آزمایشگاهی به ابعاد (قطر×طول) ۳۰۵×۲۰۵ میلی‌متر و سرعت دوران ۱۰۵ دور در دقیقه است. بار خردکننده آن شامل ۱۵۸ عدد گلوله فولادی با قطرهای بین ۱۶-۴۲ میلی‌متر است. مجموع وزن بار خردکننده ۸٫۷۹ کیلوگرم است که با در نظر گرفتن فضای خالی بین گلوله‌ها ۲۵ درصد حجم آسیا را پر کرده‌اند. مقدار ۷۵۰ گرم از نمونه را داخل آسیای گلوله‌ای ریخته و به مدت ۲۰ دقیقه تحت خردایش قرار گرفت و سپس از الک ۲۵۰ میکرون عبور داده شد. مقداری از نمونه که بر روی الک باقی مانده بود را دوباره داخل آسیای گلوله‌ای ریخته و تحت خردایش قرار گرفت، این کار آنقدر تکرار شد تا تمام نمونه از الک ۲۵۰ میکرون عبور کند. شکل ۲ محصول شکست لایه‌ای و آسیای گلوله‌ای را نشان می‌دهد.

۲-۳- شناسایی نمونه

شناسایی فازهای موجود در نمونه با آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD مدل STADIP ساخت شرکت Stoe آلمان در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه لرستان) و همچنین شناسایی و اندازه‌گیری عناصر موجود در نمونه با آزمایش آنالیز عنصری به وسیله دستگاه فلورسانس بازتابش کلی اشعه ایکس^{۱۴} (TXRF مدل TX2000 ساخت شرکت ایتالیایی GNR در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه لرستان) انجام شد.

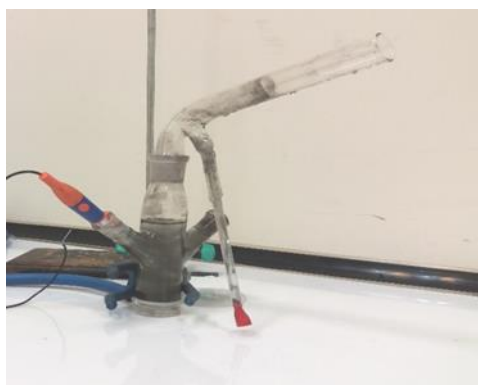


شکل ۴: طیف XRD نمونه کانه مس مورد بررسی

یا مربعی است، زیرا دو ذره با شکل‌های مربع و دایره‌ای ممکن است ضریب کشیدگی یکسان داشته باشند. یک کره ضریب کشیدگی برابر ۱ دارد و ضرایب بیشتر و کمتر از ۱ بیانگر گوشه‌دار بودن ذرات است. کرویت (circularity) هم نشان‌دهنده شکل هندسی یک ذره و هم صاف بودن سطح آن است. یک ذره دایره‌ای با زبری سطح کم ضریب کرویت برابر ۱ دارد. یک ذره دایره‌ای با سطوح زبر یا ذرات با شکل‌های دیگر ضریب کرویت بیشتر از ۱ دارند. ذرات با شکل یکسان اما زبری سطح متفاوت ضریب کرویت متفاوت دارند. همچنین ذرات با زبری سطح یکسان اما شکل متفاوت نیز ضریب کرویت متفاوت دارند، بنابراین ضریب کرویت نمی‌تواند بین یک ذره دایره‌ای با سطح زبر و یک ذره با شکل نامنظم تمایز ایجاد کند [۱۸].

۲-۶- آزمایش‌های میکروفلوتاسیون

آزمایش‌های میکروفلوتاسیون در یک سلول هالیموند اصلاح شده که حجم ۱۵۰ میلی‌لیتر دارد و به اسپارجر شیشه‌ای و شیر تنظیم هوا مجهز است، انجام شده است (شکل ۵). آزمایش‌های فلوتاسیون بر روی هر یک از محدوده‌های دانه‌بندی جداگانه انجام شده است. در هر آزمایش میکروفلوتاسیون ابتدا سلول با آب مقطر پر و مقدار ۳ گرم نمونه داخل لوله ریخته و به مدت ۵ دقیقه آماده‌سازی شد. برای آماده‌سازی و همزدن پالپ و جلوگیری از ترسیب ذرات حین فلوتاسیون یک مگنت به درون لوله اضافه و لوله بر روی پلیت قرار گرفت. در ادامه pH با آب آهک در حدود ۱۰ تنظیم و سپس ۷۰ گرم بر تن (۷۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) کلکتور آمیل گرنات پتاسیم اضافه و



شکل ۵: سلول هالیموند استفاده شده برای آزمایش‌های میکروفلوتاسیون

$$df = \frac{n_1}{n_1 + n_2} \times 100 \quad (1)$$

که در آن:

df: درجه آزادی کانی

n_1 : تعداد دانه‌های آزاد کانی

n_2 : تعداد دانه‌های درگیر کانی است.

۲-۵- بررسی شکل ذرات محصول شکست

از محصول دانه‌بندی نشده آسیای گلوله‌ای و شکست لایه‌ای مقاطع صیقلی تهیه و به وسیله میکروسکوپ الکترونی (TESCAN, model FESEM) در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه لرستان) تصاویری از مقاطع تهیه شد. ذرات کالکوپیریت در تصاویر میکروسکوپ الکترونی بر اساس آنالیز شیمیایی سطح (EDS) و مقایسه آن با ترکیب شیمیایی نمونه استاندارد کالکوپیریت شناسایی شده‌اند. در هر مقطع تقریباً ۸۰ ذره کالکوپیریت به صورت دستی انتخاب و سپس تصاویر تهیه شده با نرم‌افزار آنالیز تصاویر میکروسکوپی^{۱۵} (MIP4) ساخت شرکت نهمین پردازان آسیا) مورد بررسی قرار گرفته است.

در توصیف شکل ذرات خرد شده، روش و همچنین فاکتورهای توصیف‌کننده مناسب اهمیت دارند. فاکتورهای توصیف‌گر شکل ذرات در واقع بیانگر مقدار انحراف شکل ذره از شکل‌های مرجع مانند کره است.

کرویت (circularity)، گردش‌دگی (roundness) و کشیدگی (aspect ratio) مهم‌ترین فاکتورهای توصیف‌کننده شکل ذرات اند [۱۸]. اگر طول L، عرض W، قطر D، محیط P و مساحت ذره S باشد، فاکتورهای یاد شده طبق روابط ۲ تا ۴ تعیین می‌شوند:

$$Circularity = \frac{4\pi S}{P^2} \quad (2)$$

$$Roundness = \frac{4S}{\pi D^2} \quad (3)$$

$$Aspect Ratio = \frac{L}{W} \quad (4)$$

کرویت عبارت از اینکه شکل دانه تا چه حدی به یک دایره نزدیکتر باشد است. گردش‌دگی عبارت از تیزی گوشه‌ها و لبه‌های دانه است که از نسبت شعاع متوسط دایره‌ای که در گوشه‌های دانه وجود دارد، به شعاع بزرگترین دایره محاط در دانه به دست می‌آید. ضریب کشیدگی نسبت طول (بزرگترین بعد) به عرض (کوچکترین بعد) یک ذره است و نمی‌تواند نشان‌دهنده این باشد که یک ذره دایره‌ای

شکل ۶ تصاویر تهیه شده از مقاطع میکروسکوپی در زیر میکروسکوپ نوری را نشان می‌دهد. بررسی مقاطع، تفاوت آشکاری در درگیری بین کانی‌ها برای دو نمونه خرد شده با آسیای گلوله‌ای و شکست لایه‌ای را نشان نمی‌دهد. در محدوده‌های دانه‌بندی درشت، درگیری کانی‌ها با یکدیگر بیشتر است و درگیری‌ها بیشتر از نوع تماسی و ادخال هستند و کانی‌ها به صورت سه‌تایی و دوتایی با یکدیگر درگیری نشان می‌دهند. به عنوان مثال درگیری‌های سه تایی شامل کالکوپیریت-اسفالریت-گالن، کالکوپیریت-کوولیت-باطله و کالکوپیریت-پیریت-هماتیت در نمونه‌ها مشاهده شده است. با کاهش ابعاد دانه‌ها درگیری‌ها بیشتر از نوع دوتایی هستند، که به عنوان مثال درگیری‌های هماتیت-کالکوپیریت، کالکوپیریت-اسفالریت و کالکوپیریت-گالن را می‌توان نام برد. همچنین در محدوده‌های دانه‌بندی ریز دانه کالکوپیریت معمولاً به شکل آزاد یافت می‌شود.

۳-۲- شکل ذرات

شکل ۷ نمونه‌ای از تصاویر تهیه شده به وسیله میکروسکوپ الکترونی از محصول آسیای گلوله‌ای و محصول شکست لایه‌ای را نشان می‌دهد. لازم به یادآوری است که در هر مقطع صیقلی مربوط به هر نمونه، تصاویر متعددی از بخش‌های مختلف مقطع تهیه شد به طوری که مجموع ذرات کالکوپیریت بررسی شده در هر مقطع بیش از ۸۰ ذره بوده است (در مقاطع نمایش داده شده در شکل فقط چند ذره کالکوپیریت وجود دارد). جدول ۳ میانگین فاکتورهای شکل ذرات محصول آسیای گلوله‌ای و محصول شکست لایه‌ای را نشان می‌دهد. اطلاعات جدول ۳ نشان می‌دهد ذرات موجود در محصول شکست لایه‌ای در مقایسه با محصول آسیای گلوله‌ای تقریباً ۵ درصد، کرویت و گردشگی بیشتر و تقریباً ۲٫۵ درصد کشیدگی کمتری دارند.

جدول ۳: مقایسه فاکتورهای شکل ذرات در محصول آسیای گلوله‌ای و محصول شکست لایه‌ای

کشیدگی	گردشگی	کرویت	پارامتر هندسی
			محصول شکست
۱٫۶۱۳۲	۰٫۶۲۵۷	۰٫۶۹۵۱	محصول آسیای گلوله‌ای
۱٫۵۷۳۵	۰٫۶۵۸۱	۰٫۷۳۲۱	محصول شکست لایه‌ای
-۲٫۴۶	۵٫۱۷	۵٫۳۲	اختلاف نسبی (%)

بعد از یک دقیقه ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر کف‌ساز MIBC اضافه شد. بعد از ۲ دقیقه هوادهی به سلول شروع شده و به مدت ۴ دقیقه کف‌گیری انجام و هر آزمایش ۳ مرتبه تکرار شد. در انتها کنسانتره و باطله مجموع سه آزمایش هر محدوده دانه‌بندی جمع‌آوری و خشک شده و مقدار عنصر مس با دستگاه طیف‌سنجی جذب اتمی (مدل Agilent AA240FS در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه لرستان) اندازه‌گیری شد. بر اساس موازنه جرم و عبارها، بازیابی فلز در کنسانتره و کارآیی جدایش فرآیند فلوتاسیون محاسبه شد.

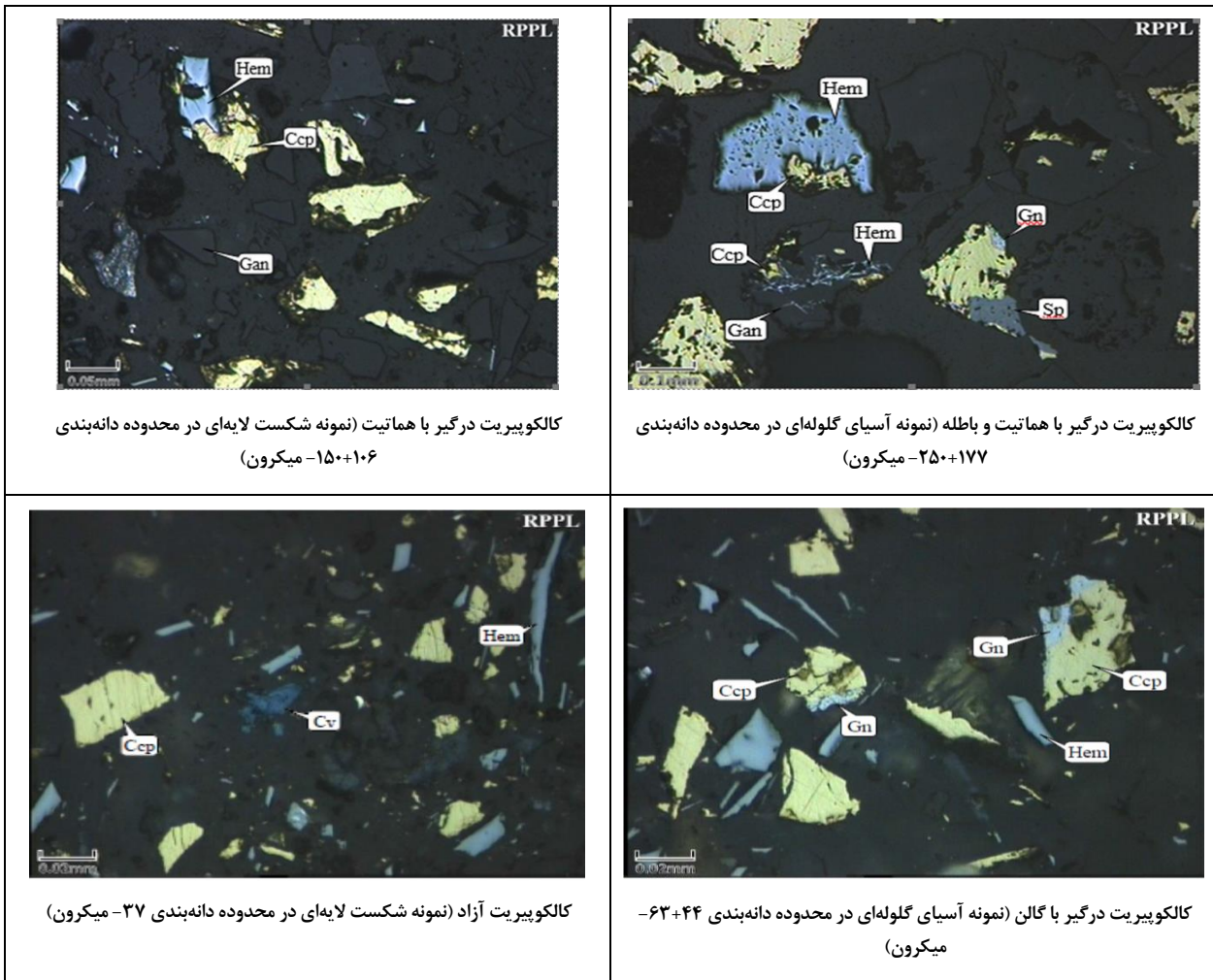
۳- نتایج و بحث

۳-۱- مطالعات درجه آزادی کانی کالکوپیریت

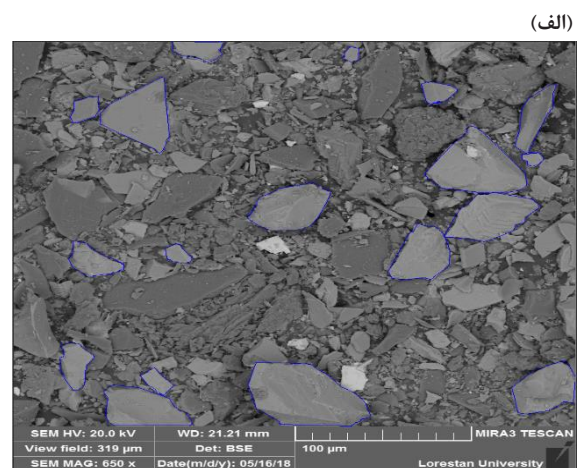
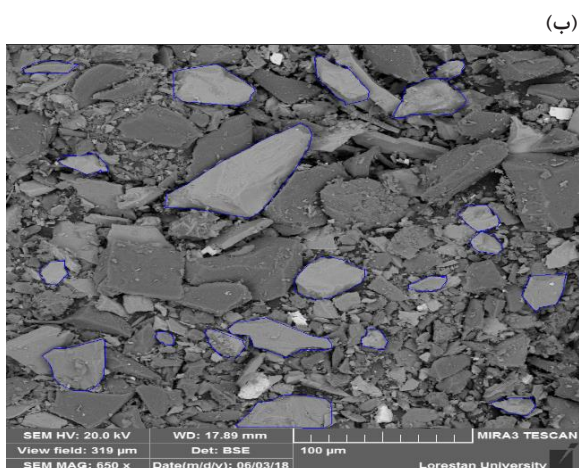
جدول ۲، درصد آزادی ذرات کانی کالکوپیریت را در محدوده‌های دانه‌بندی مختلف برای محصول آسیای گلوله‌ای و محصول شکست لایه‌ای نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در تمام محدوده‌های دانه‌بندی درصد آزادی ذرات کالکوپیریت در محصول آسیای گلوله‌ای بیشتر از محصول شکست لایه‌ای است. با در نظر گرفتن درصد وزنی باقیمانده ذرات در هر محدوده دانه‌بندی (شکل ۲) متوسط درصد آزادی ذرات کالکوپیریت در محصول آسیای گلوله‌ای و شکست لایه‌ای به ترتیب برابر ۹۰٫۸۸ و ۸۹٫۰۷ درصد (۱٫۸۲ درصد اختلاف) است. البته همان‌طور که اطلاعات جدول ۲ نشان می‌دهد این اختلاف در محدوده‌های درشت ۱۷۰+۲۵۰-، ۱۷۰+۱۵۰- و ۱۰۶+۱۵۰- میکرون حدود ۴ درصد و در محدوده‌های ریزتر بین ۱ تا ۲ درصد است.

جدول ۲: درصد آزادی ذرات کالکوپیریت در محدوده‌های دانه‌بندی مختلف برای محصول آسیای گلوله‌ای و شکست لایه‌ای

محدوده دانه‌بندی	درصد آزادی ذرات کالکوپیریت (%)	
	آسیای گلوله‌ای	شکست لایه‌ای
-۲۵۰+۱۷۷ μm	۷۸	۷۵
-۱۷۷+۱۵۰ μm	۸۸	۸۴
-۱۵۰+۱۰۶ μm	۹۰	۸۶
+۱۰۶-۷۵ μm	۹۳	۹۱
-۷۵+۶۳ μm	۹۴	۹۲
-۶۳+۴۴ μm	۹۵	۹۴
-۴۴+۳۷ μm	۹۷	۹۶
-۳۷ μm	۹۸	۹۷



شکل ۶: تصاویر مقاطع میکروسکوپی در زیر میکروسکوپ نوری، هماتیت (Hem)، کالکوپیریت (Ccp)، گانگ (Gan)، گالن (Gn)، اسفالریت (Sp)، کوولیت (Cv)



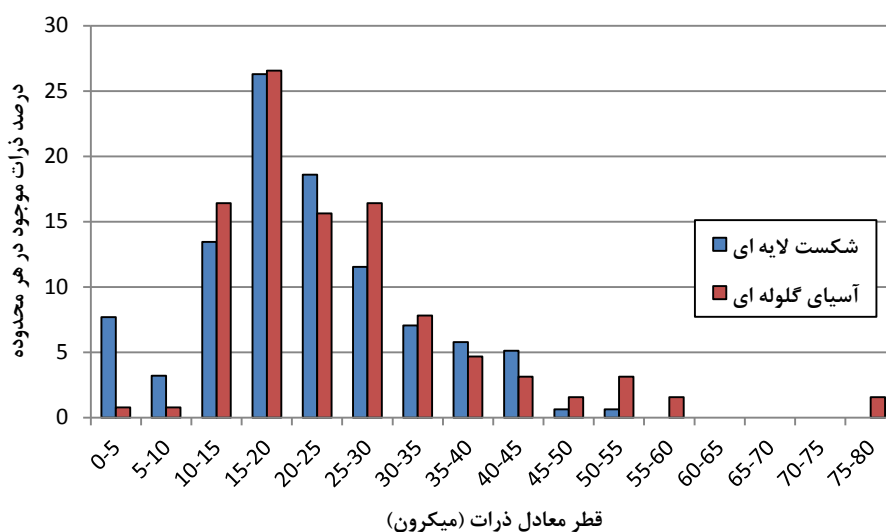
شکل ۷: تصاویر تهیه شده به وسیله میکروسکوپ الکترونی از محصول آسیای گلوله‌ای؛ (الف) محصول شکست لایه‌ای، (ب) ذرات کالکوپیریت (در هر دو تصویر ذرات کالکوپیریت با مرز آبی رنگ مشخص شده‌اند.)

نتیجه تولید ذرات دانه‌ریز کمتر است [۱۹].

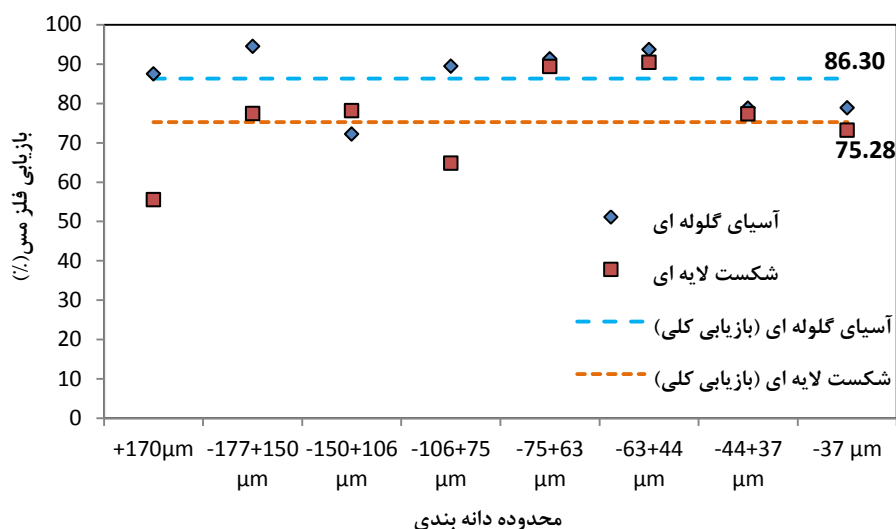
۳-۳- نتایج میکروفلوتاسیون

شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان می‌دهند که بازیابی فلز مس و کارایی جدایش برای نمونه شکسته شده در آسیای گلوله‌ای نسبت به نمونه شکست لایه‌ای در همه محدوده‌های دانه‌بندی بجز محدوده ۱۰۶+۱۵۰- میکرون بیشتر است. بازیابی کلی مس در نمونه آسیای گلوله‌ای ۸۶ درصد و در نمونه شکست لایه‌ای ۷۵ درصد است. کارایی کلی جدایش نمونه آسیای گلوله‌ای ۷۵٫۲۱ درصد و در نمونه شکست لایه‌ای ۵۹٫۹ درصد است. عملکرد متالورژیکی بهتر نمونه آسیای گلوله‌ای در مقایسه با نمونه شکست لایه‌ای ممکن است دلایل مختلفی داشته باشد. اول اینکه مطابق اطلاعات جدول ۲، درصد آزادی کانی کالکوپیریت در نمونه آسیای گلوله‌ای در همه محدوده‌های دانه‌بندی بیشتر است. البته درصد آزادی کلی فقط ۱٫۸۲ درصد نسبت به نمونه شکست لایه‌ای بیشتر است. دلیل دوم ممکن است به دانه‌ریزتر بودن نمونه شکست لایه‌ای برگردد. همان‌طور که در بالا بحث شد و اطلاعات شکل‌های ۲ و ۸ نشان می‌دهد، درصد ذرات کمتر از ۳۷ میکرون و حتی ذرات کمتر از ۲۰ میکرون (شکل ۸) در نمونه شکست لایه‌ای بیشتر است. فلوته کردن ذرات ریز مشکل است. دلیل سوم ممکن است به علت شکل ذرات نمونه شکست لایه‌ای باشد. همان‌طور که اطلاعات جدول ۳ نشان داد ذرات خرد شده در

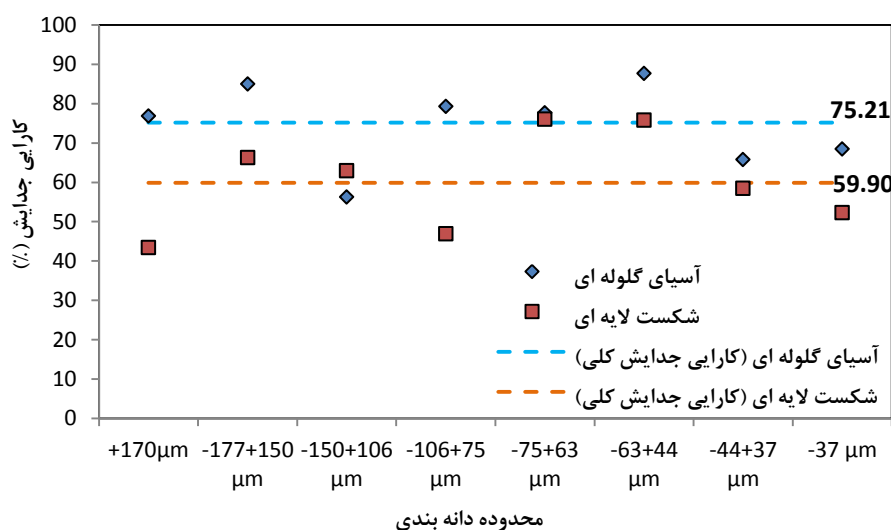
قطر معادل ذرات کالکوپیریت در تصاویر میکروسکوپ الکترونی تعیین و تعداد ذرات در هر محدوده ابعادی شمارش شد. برای نمونه شکست لایه‌ای مجموعاً ۱۵۶ ذره و برای نمونه شکست در آسیای گلوله‌ای ۱۲۶ ذره شمارش شد. شکل ۸ مقایسه نتایج را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود به طور کلی ذرات کالکوپیریت در شکست لایه‌ای اندازه‌ای بین ۵۵-۰ میکرون و برای شکست در آسیای گلوله‌ای اندازه‌ای بین ۸۰-۰ میکرون دارند. برای نمونه شکست لایه‌ای بیش از ۱۰ درصد ذرات شمارش شده در محدوده ۱۰-۰ میکرون قرار دارند، در صورتی که برای نمونه آسیای گلوله‌ای فقط نزدیک به ۱٫۵ درصد در این محدوده قرار دارند. توزیع دانه‌بندی محصول شکست لایه‌ای و شکست در آسیای گلوله‌ای (شکل ۲) نیز نشان می‌دهد با وجود اینکه در هر دو مکانیزم شکست، ذرات تا زیر ۲۵۰ میکرون خرد شده‌اند و حتی d_{80} برابر دارند، اما d_{50} در نمونه شکست لایه‌ای ۷۴ میکرون و در نمونه شکست در آسیای گلوله‌ای ۸۵٫۸ میکرون است. همچنین درصد ذرات کمتر از ۳۷ میکرون در نمونه شکست لایه‌ای ۱۰٫۷۴ درصد و در نمونه شکست در آسیای گلوله‌ای ۷٫۰۸ درصد است. همه این شواهد نشان می‌دهد که درصد ذرات دانه‌ریز در محصول شکست لایه‌ای بیشتر از محصول شکست در آسیای گلوله‌ای است. این در حالی است که تحقیقات قبلی نشان داده است در شکست لایه‌ای به دلیل اینکه ذرات بزرگتر به عنوان سپر برای ذرات کوچکتر عمل می‌کنند احتمال شکست مجدد ذرات و در



شکل ۸: مقایسه درصد ذرات (از نظر تعداد) موجود در هر محدوده دانه‌بندی برای شکست لایه‌ای و شکست در آسیای گلوله‌ای



شکل ۹: مقایسه بازیابی فلز مس در آزمایش‌های فلوتاسیون بین نمونه شکست شده در آسیای گلوله‌ای و نمونه شکست لایه‌ای در محدوده‌های دانه‌بندی مختلف



شکل ۱۰: مقایسه کارآیی جدایش در آزمایش‌های فلوتاسیون بین نمونه شکست شده در آسیای گلوله‌ای و نمونه شکست لایه‌ای در محدوده‌های دانه‌بندی مختلف

بهتری با حباب برقرار می‌کنند به این دلیل که لایه نازک آب اطراف آنها راحت‌تر از هم گسیخته می‌شود [۲۱]. تحقیقات بر روی کانه تالک نشان داده است که ذرات کروی که به وسیله آسیای گلوله‌ای خرد شده‌اند، [۲۲] در مقایسه با ذرات دراز (کشیده) که با آسیای میله‌ای خرد شده‌اند، سخت‌تر فلوته می‌شوند [۸]. همچنین تحقیقات نشان داده است که ذرات منشوری زیرکن در مقایسه با ذرات کروی بهتر فلوته می‌شوند.

شکست لایه‌ای کروی و گردشگری بیشتری نسبت به نمونه آسیای گلوله‌ای و ذرات آسیای گلوله‌ای کشیدگی بیشتری دارند. شکل ذرات تاثیر زیادی در قابلیت فلوتاسیون آنها دارد. در دیدگاه اولیه تصور بر این است که ذرات گوشه‌دار نسبت به ذرات کروی راحت‌تر فلوته می‌شوند. با این وجود مشخص نیست چه زیر فرآیندهای از فلوتاسیون بیشتر تحت تاثیر شکل ذرات هستند [۲۰]. ذرات گوشه‌دار نسبت به ذرات کروی اتصال

لایه‌ای از نظر بازیابی وزنی و کارایی جدایش به مراتب بهتر است. این عملکرد بهتر ممکن است به دلیل وجود ذرات دانه‌ریز بیشتر در محصول شکست لایه‌ای، درجه آزادی بیشتر کانی کالکوپیریت در محصول آسیای گلوله‌ای و کرویت و گردش‌دگی کمتر ذرات موجود در محصول آسیای گلوله‌ای باشد.

نتایج این تحقیق با بسیاری از نتایج تحقیقات قبلی که افزایش درجه آزادی و بهبود فرآیند جدایش ذرات را در شکست لایه‌ای گزارش کرده‌اند، تناقض دارد. البته تحقیقاتی دیگری نیز وجود دارد که همانند تحقیق پیش رو نشان داده‌اند که شکست لایه‌ای موجب بهبود آزادی ذرات نمی‌شود [۶].

نکته دیگری که در این تحقیق وجود دارد این است که مقدار انرژی مصرف شده برای خرد کردن ماده معدنی از ۱۰۰ درصد زیر ۳۳۶ میلی‌متر تا ۱۰۰ درصد زیر ۲۵۰ میکرون با آسیای گلوله‌ای به مراتب بیشتر از شکست لایه‌ای است. زیرا در شکست لایه‌ای فقط با ۳ تا ۴ بار اعمال فشار هیدرولیک ۱۹۵۰ کیلونیوتن نمونه خرد شد اما در آسیای گلوله‌ای نمونه در یک آسیا به مدت بیست دقیقه خرد شد. هرچند مقدار دقیق این انرژی‌ها محاسبه نشده اما برآوردهای اولیه عملکرد بسیار بهتر انرژی شکست لایه‌ای را نشان می‌دهد و از این امر نمی‌توان غافل شد. شاید اگر نمونه شکست لایه‌ای تا ابعاد کمتری خرد می‌شد، نتایج آزمایش‌های فلوتاسیون نیز بهبود پیدا می‌کرد. با این وجود بررسی‌های بیشتر در این مورد باید انجام گیرد.

۵- مراجع

- [1] Barani, K., and Balochi, H. (2016). "A comparative study on the effect of using conventional and high pressure grinding rolls crushing on the ball mill grinding kinetics of an iron ore". *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 52(2): 920-931.
- [2] Kalala, J. T. (2011). "Using piston die tests to predict the breakage behavior of HPGR". In 5th International Conference Autogenous and Semi- Autogenous Grinding, September, 60-75.
- [3] Ozcan, O., and Benzer, H. (2013). "Comparison of different breakage mechanisms in terms of product particle size distribution and mineral liberation". *Minerals Engineering*, 49: 103-108.
- [4] Hosten, Ç., and Özbay, C. (1998). "A comparison of particle bed breakage and rod mill grinding with regard to mineral liberation and particle shape effects". *Minerals Engineering*, 11(9): 871-874.
- [5] Kellerwessel, H. A. M. (1996). "High pressure particle

ذرات منشوری معمولاً سطوح صاف و گوشه‌های تیز دارند. حتی بعد از زبر کردن سطوح آنها و گرد کردن گوشه‌ها، بهتر از ذرات کرویت فلوته شده‌اند. نتایج نشان داده است ذرات منشوری با حباب‌ها تماس صفحه‌ای (flat-attached) دارند ولی ذرات کرویت تماس نقطه‌ای (end-attached) دارند، بنابراین انرژی مورد نیاز برای جدا کردن ذرات منشوری بیشتر از ذرات کرویت است [۲۳]. البته برخی تحقیقات دیگر نیز نتایج متفاوتی را ارائه کرده است و نشان داده‌اند که بازیابی فلوتاسیون و مقاومت در برابر رهاسازی حباب با افزایش کرویت ذرات افزایش پیدا کرده است [۲۴].

۴- نتیجه‌گیری

یک نمونه سنگ معدن مس پس از سنگ شکنی تا صد درصد زیر ۳۳۶ میلی‌متر، با آسیای گلوله‌ای یا مکانیزم شکست لایه‌ای تا صد درصد زیر ۲۵۰ میکرون خرد شد. بررسی محصولات شکست از نظر اندازه ذرات، درجه آزادی کانی کالکوپیریت، شکل و رفتار ذرات در فرآیند فلوتاسیون نشان می‌دهد:

نمونه خرد شده با مکانیزم شکست لایه‌ای در مقایسه با شکست در آسیای گلوله‌ای دانه‌ریزتر است. درصد ذرات کمتر از ۳۷ میکرون و کمتر از ۲۰ میکرون در نمونه شکست لایه‌ای بیشتر است.

درصد آزادی کانی کالکوپیریت در محدوده‌های دانه‌بندی مختلف در محصول آسیای گلوله‌ای بیشتر از محصول شکست لایه‌ای است. به طور کلی درصد آزادی کانی کالکوپیریت در محصول آسیای گلوله‌ای حدوداً ۱۸۲ درصد بیشتر از محصول شکست لایه‌ای است.

ذرات موجود در محصول شکست لایه‌ای در مقایسه با محصول آسیای گلوله‌ای کرویت و گردش‌دگی بیشتری (حدود ۵ درصد) دارند و ذرات موجود در محصول آسیای گلوله‌ای کشیده‌تراند. طبق تحقیقات قبلی ذرات در شکست لایه‌ای شکل اولیه‌ای که در زمینه سنگ قبل از خردایش دارند را بهتر حفظ می‌کنند [۱۲] و ممکن است دلیل اینکه در این تحقیق نیز در شکست لایه‌ای ذرات گردش‌دگی و کرویت بیشتری دارند همین امر باشد. با این وجود تحقیقات بیشتر برای بررسی این موضوع ضروری است.

عملکرد متالورژیکی محصول آسیای گلوله‌ای در آزمایش‌های میکروفلوتاسیون در مقایسه با محصول شکست

- "New population balance model for predicting particle size evolution in compression grinding". *Minerals Engineering*, 73: 7-15.
- [18] Pourghahramani, P., and Forsberg, E. (2005). "Review of applied particle shape descriptors and produced particle shapes in grinding environments. Part I: Particle shape descriptors". *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 26(2): 145-166.
- [19] Viljoen, R. M., Smit, J. T., Du Plessis, I., and Ser, V. (2001). "The development and application of in-bed compression breakage principles". *Minerals Engineering*, 14(5): 465-471.
- [20] Verrelli, D. I., Bruckard, W. J., Koh, P. T. L., Schwarz, M. P., and Follink, B. (2014). "Particle shape effects in flotation. Part 1: Microscale experimental observations q". *Minerals Engineering*, 58: 80-89.
- [21] Anfruns, J. F. (1977). "Rate of capture of small particles in flotation, Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy". Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 86: 9-15.
- [22] Yekeler, M., Ulusoy, U., and Hiçyılmaz, C. (2004). "Effect of particle shape and roughness of talc mineral ground by different mills on the wettability and floatability". *Powder Technology*, 140(1-2): 68-78.
- [23] Wotruba, H., Hoberg, H., and Schneider, F. U. (1991). "Investigation on the separation of microlithe and zircon. The influence of particle shape on floatability". *Proceedings of the 17th XVII International Mineral Processing Congress*, 4: pp. 83.
- [24] Ahmed, M. M. (2010). "Effect of comminution on particle shape and surface roughness and their relation to flotation process". *International Journal of Mineral Processing*, 94(3-4): 180-191.
- bed comminution-State of the art, application, recent developments". *Engineering And Mining Journal*, 197(2): pp. 45.
- [6] Johnson, N. , Vizcarra, T. G., Wightman, E. M., Johnson, N. W., and Manlapig, E. V. (2018). "The effect of breakage mechanism on the mineral liberation properties of sulphide ores". *Minerals Engineering*, 23(5): 374-382.
- [7] Gupta, A., and Yan, D. S. (2006). "Introduction to mineral processing design and operation". Perth, Australia, 564-570.
- [8] Kursun, H., and Ulusoy, U. (2006). "Influence of shape characteristics of talc mineral on the column flotation behavior". *International Journal of Mineral Processing*, 78(4): 262-268.
- [9] Ulusoy, U., Hiçyılmaz, C., and Yekeler, M. (2004). "Role of shape properties of calcite and barite particles on apparent hydrophobicity". *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 43: 1047-1053.
- [10] Hicyilmaz, C., Ulusoy, U., and Yekeler, M. (2004). "Effects of the shape properties of talc and quartz particles on the wettability based separation processes". *Applied Surface Science*, 233(1-4): 204-212.
- [11] Gaudin, A. M. (1926). "An investigation of crushing phenomena". *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, 73: 253-316.
- [12] Vizcarra, T. G., Wightman, E. M., Johnson, N. W., and Manlapig, E. V. (2011). "The effect of breakage method on the shape properties of an iron-oxide hosted copper – gold ore". *Minerals Engineering*, 24(13): 1454-1458.
- [13] Austin, L. G., Yekeler, M., Dumm, T. F., and Hogg, R. (1990). "The kinetics and shape factors of ultrafine dry grinding in a laboratory tumbling ball mill". *Particle & Particle Systems Characterization*, 7(1-4): 242-247.
- [14] Pourghahramani, P. (2012). "Effects of ore characteristics on product shape properties and breakage mechanisms in industrial SAG mills". *Minerals Engineering*, 32: 30-37.
- [15] Karimpour, M. H., Zaw, K., and Huston, D. L. (2005). "SCO isotopes, fluid inclusion microthermometry, and the genesis of ore bearing fluids at Qaleh-Zari Fe-oxide Cu-Au-Ag mine, Iran". *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 16(2): 153-168.
- [16] Shahgholi, H., Barani, K., and Yaghobi, M. (2017). "Application of perfect mixing model for simulation of vertical roller mills". *Journal of Mining and Environment*, 8(4): 545-553.
- [17] Esnault, V. P. B., Zhou, H., and Heitzmann, D. (2015).

¹ Impact

² Abrasion

³ Attrition

⁴ Cascading motion

⁵ Cataracting motion

⁶ High pressure grinding roll

⁷ Vertical roller mill

⁸ Bed breakage

⁹ Kursun

¹⁰ Ulusoy

¹¹ Hicyilmaz

¹² Gaudin

¹³ Vizcarra

¹⁴ Total X-Ray Reflection Fluorescence

¹⁵ Microstructural Image Processing



Comparative Study of the Breakage Mechanisms on Minerals Liberations and Particles Shape in the Flotation of Copper Sulfide Ore

Barani K.^{1*}, Omarzahi A.²

1- Associate Professor, Dept. of Mining Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran
barani.k@lu.ac.ir

2- M.Sc, Dept. of Mining Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran
azizhanafy1983@gmail.com

(Received: 23 Aug. 2019, Accepted: 09 Dec. 2019)

Abstract: A sulfide copper ore was crushed to 100% passing 3.36mm followed by grinding the crushed product through bed breakage process in a piston- die cell or ball mill into to 100% passing 250 μ m. Revealed by the results of particle size analysis made on the ground products, the bed breakage method provides a finer product compared to the ball mill approach. The liberation analysis of the products in eight size-fractions showed that the chalcopyrite in the ball mill product was more liberated compared to the bed breakage product. The overall percentage of chalcopyrite liberation in the ball mill product was higher than the bed breakage product by 1.82%. The shape properties of particles in the breakage products were examined by analysis of scanning electron (SEM) images. Accordingly, it was found that the circularity and roundness of particles broken by the bed breakage method are higher than the particles broken by the ball mill method, while the ball-milled particles are more elongated. The results of micro-flotation tests indicated the efficiency rate of Cu recovery and separation in the ball mill product were respectively 11% and 15% higher than the bed breakage product. This better metallurgical performance can be attributed to the fact that the bed breakage product was finer, the chalcopyrite was more liberated in the ball milling product, and particles in the ball milling product had less circularity and roundness. Contrary to many previous studies, the results of this study indicated that the bed breakage method did not increase the mineral liberation and improved the performance of the flotation process.

Keywords: Bed breakage, Ball milling, Liberation degree, Particles shape, Flotation.

INTRODUCTION

The mechanism of breakage in the tumbling mills is a combination of impact, abrasion, and attrition. Each breakage mechanism produces a product with a different particle size distribution and shape. In equipment such as High-Pressure Grinding Roller mills (HPGR) and Vertical Roller mills (VRM), particles are ground by compression in a bed of particles. This type of breakage is called bed breakage [1-3]. Kalala et al. (2011) investigated the use of piston die tests to predict the breakage behavior in HPGR. The results showed that the performance of a 250 mm diameter HPGR can be predicted by the piston die tests [4]. There is



evidence to suggest that the bed breakage can increase the liberation of minerals as a result of the preferred fracture occurring at the grain boundary [5-7]. Unlike previous reports, some studies have shown that the bed breakage method does not improve the liberation degree of minerals compared to the impact breakage approach [8]. Different breakage mechanisms can change the geometric and morphological characteristics of the product particles as well [9]. The geometrical properties of particles affect their wettability and floatability in the flotation process. Kursun et al. (2006) investigated the effect of grinding on a talc sample. The results demonstrated that the rod mill grinding produced more elongated particles compared to the ball mill grinding method and the flotation recovery for the rod mill product was approximately 18% more than that of the ball mill product [10]. Generally, when the impact mechanism is predominant, most of the produced particles have irregular shapes; but when the attrition mechanism is predominant, most of the particles show a nearly spherical shape [11-16]. In this paper, a copper sulfide ore was ground by bed breakage method in a piston- die cell or ball mill followed by studying the effect of grinding type on mineral liberation, particle shape, and the floatability of particles.

MATERIALS AND METHODS

The sample was taken from the Ghale-Zari copper ore mine, located in the southern Khorasan province, Iran [17]. The main sample was crushed to 100% passing 3.36mm; the crushed product was then ground using the bed breakage method in a piston- die cell or ball mill to 100% passing 250 μ m. The products of bed breakage and ball mill were dry sieved into eight size fractions (-250+177 μ m, -177+150 μ m, -150+106 μ m, -106+75 μ m, -75+63 μ m, -63+44 μ m, -44+37 μ m, -37 μ m). The XRD analysis indicated that chalcopyrite, galena, and quartz are the main minerals found in the sample. The chemical composition analysis demonstrated that the sample contains 5.92% Pb, 7.71% Cu, 10.83% Fe, 25.50% S, and 50.04% Si.

The mineralogical investigation was carried out on the eight size fraction by Zeiss Axioplan2 research optical microscope and the liberation degree of chalcopyrite was determined. Polished sections were prepared from the breakage products to take SEM backscatter images. The shape properties of particles such as circularity, roundness, and aspect ratio were determined using the analysis of scanning electron microscopy (SEM) images made by the Microscopic Image Analysis Software. The micro-flotation tests were conducted in a 150-cm³ Hallimond tube. In each test, 3 g of each size fraction was used. Each experiment was repeated three times. The concentrate and tailings were collected and dried at the end of the experiment. Finally, the amount of copper was measured by atomic absorption spectrometry.

RESULTS AND DISCUSSION

Table 1 shows the percentage of liberated chalcopyrite. As can be seen, the percentage of liberated chalcopyrite in the ball mill product is higher than the bed breakage product in all size fractions. The average rates of liberated chalcopyrite for the ball mill product and the bed breakage product were 90.88 and 89.07, respectively. The mean values of particle shape factors are shown in Table 2. According to the data in Table 2, the particles of the bed breakage product have higher circularity and roundness by approximately 5% and

Table 1. The fraction of liberated chalcopyrite for different breakage

Size fraction	Fraction of liberated chalcopyrite	
	Bed breakage	Ball mill
-250+177 μ m	75	78
177+150 μ m	84	88
150+106 μ m	86	90
-106+75 μ m	91	93
-75+63 μ m	92	94
-63+44 μ m	94	95
-44+37 μ m	96	97
-37 μ m	97	98

Table 1. Comparison of the shape properties of chalcopyrite particles for different breakage

	Circularity	Roundness	Aspect ratio
Ball mill	0.6951	0.6257	1.6132
Bed breakage	0.7321	0.6581	1.5735
Relative difference (%)	5.32	5.17	-2.46

a 2.5% less aspect ratio compared to the ball mill product. Circular diameters of chalcopyrite particles were determined in the SEM images and the particles were counted (Figure 1).

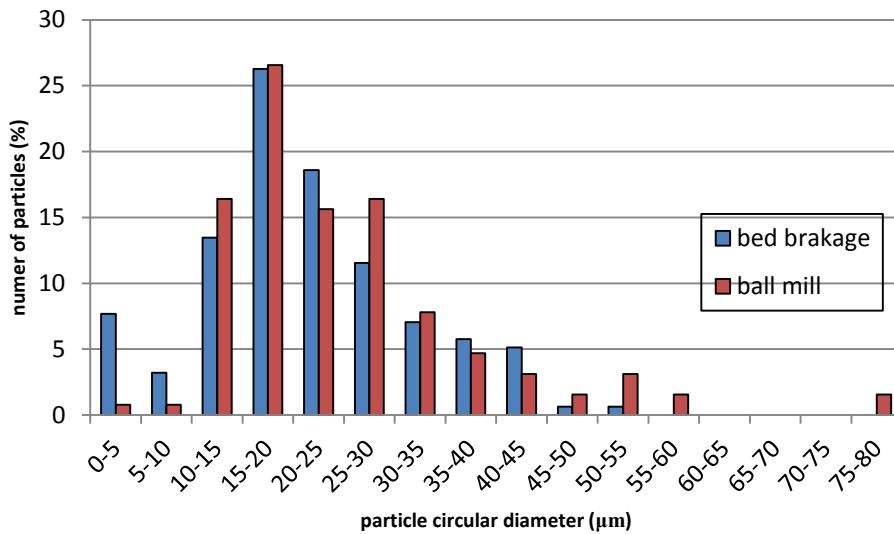


Figure 1. Percentage of chalcopyrite particle number in bed breakage and ball mill product

Figure 2 shows that the copper recovery rates of micro-flotation tests for the ball mill product were higher than the bed breakage product in all size fractions except the fraction of (-155+106 μm). The better metallurgical performance of the ball mill product in comparison with the bed breakage product can be due to three reasons. First of all, chalcopyrite particles were more liberated in the ball mill product compared

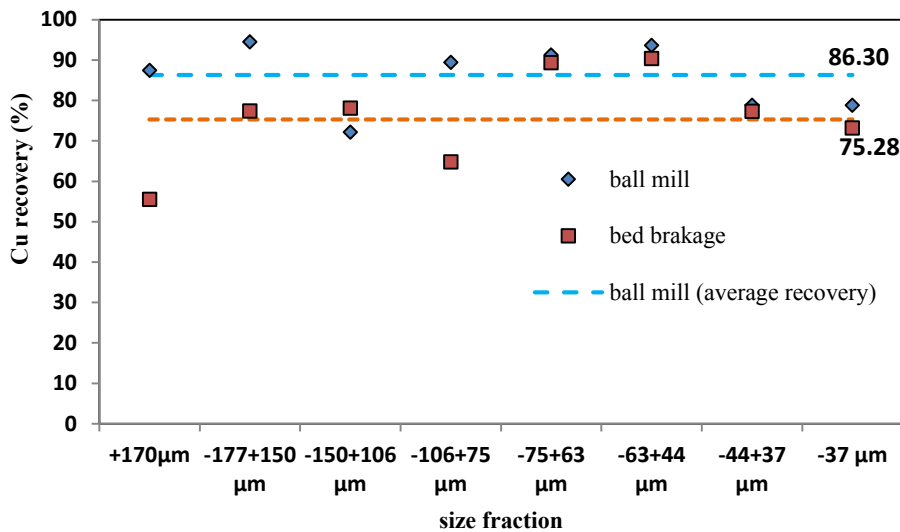


Figure 2. Cu micro-flotation recovery for bed breakage and ball mill product

to the bed breakage product. Secondly, the bed breakage product was finer than the ball mill product. The particles' percentages of $-37\ \mu\text{m}$ and $-20\ \mu\text{m}$ in the bed breakage product were higher than the ball mill product. The third reason could be due to the particle shape of the bed breakage product. The particles of the bed breakage product have higher circularity and roundness and less aspect ratio compared to the ball mill product. Angular particle shapes have much higher bubble attachment efficiencies than spheres, which may be attributed to the easier rupture of the "wetting film" [18-24].

CONCLUSION

The fraction of liberated particles in the ball mill product was higher than the bed breakage product by 1.82%. The particles produced by the bed breakage method have higher circularity and roundness than the particles resulted from the ball mill approach, while the ball mill particles are more elongated. Revealed by micro-flotation tests' results, the Cu recovery and separation efficiency rates for the ball mill product were respectively 11% and 15% higher than the bed breakage product. This better metallurgical performance was attributed to the fact that the bed breakage product was finer, chalcopyrite was more liberated in the ball milling product, and particles in the ball mill product had less circularity and roundness.

REFERENCES

- [1] Barani, K., and Balochi, H. (2016). "A comparative study on the effect of using conventional and high pressure grinding rolls crushing on the ball mill grinding kinetics of an iron ore". *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 52(2): 920-931.
- [2] Shahgholi, H., Barani, K., and Yaghoobi, M. (2017). "Application of perfect mixing model for simulation of vertical roller mills". *Journal of Mining and Environment*, 8(4): 545-553.
- [3] Esnault, V. P. B., Zhou, H., and Heitzmann, D. (2015). "New population balance model for predicting particle size evolution in compression grinding". *Minerals Engineering*, 73: 7-15.
- [4] Kalala, J. T. (2011). "Using piston die tests to predict the breakage behavior of HPGR". In 5th International Conference Autogenous and Semi- Autogenous Grinding, September, 60-75.
- [5] Ozcan, O., and Benzer, H. (2013). "Comparison of different breakage mechanisms in terms of product particle size distribution and mineral liberation". *Minerals Engineering*, 49: 103-108.
- [6] Hosten, Ç., and Özbay, C. (1998). "A comparison of particle bed breakage and rod mill grinding with regard to mineral liberation and particle shape effects". *Minerals Engineering*, 11(9): 871-874.
- [7] Kellerwessel, H. A. M. (1996). "High pressure particle bed comminution-State of the art, application, recent developments". *Engineering And Mining Journal*, 197(2): pp. 45.
- [8] Johnson, N. , Vizcarra, T. G., Wightman, E. M., Johnson, N. W., and Manlapig, E. V. (2018). "The effect of breakage mechanism on the mineral liberation properties of sulphide ores". *Minerals Engineering*, 23(5): 374-382.
- [9] Gupta, A., and Yan, D. S. (2006). "Introduction to mineral processing design and operation". Perth, Australia, 564-570.
- [10] Kursun, H., and Ulusoy, U. (2006). "Influence of shape characteristics of talc mineral on the column flotation behavior". *International Journal of Mineral Processing*, 78(4): 262-268.
- [11] Ulusoy, U., Hiçyılmaz, C., and Yekeler, M. (2004). "Role of shape properties of calcite and barite particles on apparent hydrophobicity". *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 43: 1047-1053.
- [12] Hicyilmaz, C., Ulusoy, U., and Yekeler, M. (2004). "Effects of the shape properties of talc and quartz particles on the wettability based separation processes". *Applied Surface Science*, 233(1-4): 204-212.
- [13] Gaudin, A. M. (1926). "An investigation of crushing phenomena". *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, 73: 253-316.

- [14] Vizcarra, T. G., Wightman, E. M., Johnson, N. W., and Manlapig, E. V. (2011). "The effect of breakage method on the shape properties of an iron-oxide hosted copper – gold ore". *Minerals Engineering*, 24(13): 1454-1458.
- [15] Austin, L. G., Yekeler, M., Dumm, T. F., and Hogg, R. (1990). "The kinetics and shape factors of ultrafine dry grinding in a laboratory tumbling ball mill". *Particle & Particle Systems Characterization*, 7(1-4): 242-247.
- [16] Pourghahramani, P. (2012). "Effects of ore characteristics on product shape properties and breakage mechanisms in industrial SAG mills". *Minerals Engineering*, 32: 30-37.
- [17] Karimpour, M. H., Zaw, K., and Huston, D. L. (2005). "SCO isotopes, fluid inclusion microthermometry, and the genesis of ore bearing fluids at Qaleh-Zari Fe-oxide Cu-Au-Ag mine, Iran". *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 16(2): 153-168.
- [18] Viljoen, R. M., Smit, J. T., Du Plessis, I., and Ser, V. (2001). "The development and application of in-bed compression breakage principles". *Minerals Engineering*, 14(5): 465-471.
- [19] Verrelli, D. I., Bruckard, W. J., Koh, P. T. L., Schwarz, M. P., and Follink, B. (2014). "Particle shape effects in flotation . Part I : Microscale experimental observations q". *Minerals Engineering*, 58: 80-89.
- [20] Anfruns, J. F. (1977). "Rate of capture of small particles in flotation, *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*". Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 86: 9-15.
- [21] Yekeler, M., Ulusoy, U., and Hiçyilmaz, C. (2004). "Effect of particle shape and roughness of talc mineral ground by different mills on the wettability and floatability". *Powder Technology*, 140(1-2): 68-78.
- [22] Wotruba, H., Hoberg, H., and Schneider, F. U. (1991). "Investigation on the separation of microlithe and zircon. The influence of particle shape on floatability". *Proceedings of the 17th XVII International Mineral Processing Congress*, 4: pp. 83.
- [23] Ahmed, M. M. (2010). "Effect of comminution on particle shape and surface roughness and their relation to flotation process". *International Journal of Mineral Processing*, 94(3-4): 180-191.
- [24] Pourghahramani, P., and Forsberg, E. (2005). "Review of applied particle shape descriptors and produced particle shapes in grinding environments. Part I: Particle shape descriptors". *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 26(2): 145-166.