Archive of SID

نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن"

دوره یازدهم، شماره۳۲، پاییز ۱۳۹۵، صفحه ۱۰۹ تا ۱۱۷

Vol.11, No. 32, 2016, pp109-117

Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME)

بررسی تأثیر مشخصات بار ورودی بر عملکرد آسیای خودشکن خط سه کارخانه منیتیت شرکت گل گهر سیرجان

کیانوش بارانی بیرانوند[1*] ، میثم قربانی مقدم[2]

۱- استادیار فرآوری مواد معدنی؛ دانشگاه لرستان؛ barani.k@lu.ac.ir

۲- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی؛ دانشگاه لرستان msm.iut@gmail.com

چکیده

در این تحقیق تأثیر مشخصات بار ورودی بر عملکرد آسیای خودشکن خط ۳ کارخانه فرآوری سنگ آهن گل‌گهر مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور ۱۱ پیمایش در مقیاس صنعتی از مدار آسیای خودشکن انجام و در هر پیمایش به مدت ۲ ساعت از خوراک و محصول آسیا، نمونه‌گیری و همچنین اطلاعات آسیا شامل نرخ خوراک و توان مصرفی آسیا ثبت شده است. همچنین به منظور بررسی تأثیر دانه‌بندی در سه پیمایش نوار نقاله خوراک متوقف و کل مواد روی نوار به طول تقریبی ۲۵ متر به عنوان نمونه برداشته شده است. در این تحقیق از شاخص SPI به عنوان شاخص سختی آسیای کنی خود شکن و نیمه خودشکن استفاده شده است. نتایج نشان داده که با افزایش شاخص SPI خوراک محصول آسیا دانه ریزتر شده است. افزایش سختی بار ورودی موجب ایجاد ذرات با ابعاد بحرانی در آسیا شده و در نتیجه حجم بار داخل آسیا افزایش یافته است. افزایش حجم بار داخل آسیا منجر به غالب شدن مکانیزم‌های سایش و فرسایش شده و در نتیجه محصول خردایش دانه‌ریز شده است. بررسی تاثیر توزیع دانه‌بندی خوراک نشان داده که نسبت ذرات با ابعاد درشت (۱۰۰+ میلی‌متر) به ذرات با ابعاد متوسط (۴۰+۱۰۰- میلی‌متر) رابطه معکوسی با شاخص SPI دارد. مشاهده شده است که با کاهش نسبت ذرات درشت به متوسط، شاخص SPI افزایش یافته و محصول تولیدی ریزتر شده است.

کلمات کلیدی:

آسیای خودشکن، SPI، سختی کانسنگ، مشخصات خوراک، گل گهر

* نویسنده مسئول مکاتبات

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

در مقایسه با آسیاهای گردان رایج، مثل آسیای میله‌ای و گلوله‌ای، در آسیای خودشکن واسطه خردایش از خوراک اولیه تأمین می‌شود. به همین علت هر گونه تغییر در خواص سنگ بر روی بار در حال خردایش و بنابراین بر مکانیسم شکست داخل آسیا اثر گذار است. آسیاهای خودشکن نسبت به آسیاهای نیمه‌خودشکن که در آنها بخشی از بار خردکننده از گلوله‌های فولادی تأمین می‌شود، حساسیت بیشتری به نوسان بار ورودی دارند[۱،۲،۴،۳].

از نقطه نظر توزیع ابعادی، در خوراک یک آسیای خودشکن بایستی تعداد کافی ذرات درشت وجود داشته باشد تا بتوانند ذرات کوچک‌تر را خرد کنند. در صورتیکه ذرات درشت به اندازه کافی در خوراک وجود نداشته باشند، ذرات با ابعاد بحرانی در آسیا تجمع پیدا می‌کنند و در نتیجه ظرفیت آسیا کاهش می‌یابد. از طرفی اگر در خوراک ذرات درشت بیش از اندازه افزایش یابند، باعث اشغال فضای داخلی آسیا شده ظرفیت آسیا را کاهش و وزن آسیا را افزایش می‌دهند. به این ترتیب انرژی مصرفی نیز افزایش می‌یابد[۳، ۵].

اما توزیع ابعادی خوراک تنها فاکتور تأثیرگذار بر بار آسیا نیست. سختی سنگ نیز از پارامترهای موثر بر عملکرد آسیای خودشکن و نیمه‌خودشکن است[۶]. بطور ساده می‌توان گفت سختی میزان مقاومتی است که مواد در مقابل خردایش از خود نشان می دهند. استارکی[۱] و همکاران (۱۹۹۴) روش آزمایشگاهی را برای تعیین سختی سنگ در فرآیند آسیای خودشکن و نیمه خودشکن معرفی کرده‌اند. در این روش مقدار ۲ کیلوگرم ماده معدنی مورد بررسی در یک آسیای استاندارد به قطر ۱۰ سانتی‌متر و طول ۳۰ سانتی‌متر خرد می‌شود، زمان مورد نیاز (بر حسب دقیقه) برای خرد کردن نمونه از ابعاد ۸۰ درصد عبوری از ۱۲/۵ میلی‌متر تا ۱/۷ میلی‌متر را به عنوان شاخص توان آسیاکنی نیمه خودشکن (SPI[۲]) که به نوعی معرف سختی سنگ است در نظر گرفته می‌شود[۷]. بررسی‌های شرکت مینووکس[۳] در کانادا نشان داده است با داشتن مقدار SPI می‌توان مقدار توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن صنعتی را طبق معادله زیر پیش‌بینی کرد:

$$\text{Power}\left(\frac{Kwh}{t}\right) = \left(\frac{2.2+(0.1\times SPI)}{P_{80}^{0.35}}\right) \qquad (۱)$$

که در اینجا P_{80} عبارت است از اندازه محصول آسیای نیمه‌خودشکن صنعتی (بر حسب میکرون). از مزایای این روش، سرعت، نیاز به مقدار نمونه کم و هزینه کمتر است [۹،۸].

البته تحقیقاتی دیگری در زمینه تعیین رابطه شاخص SPI با انرژی مصرفی انجام شده است. در تحقیق انجام شده توسط آقای اکبری نسب و همکاران (۱۳۸۲) رابطه زیر پیشنهاد شده است[۱]:

$$Power\left(\frac{kwh}{t}\right) = 0.0025 \times SPI^2 - 0.0663 \times SPI + 5.6358 \qquad (۲)$$

همچنین تحقیقات انجام شده توسط عظیمی و همکاران (۱۳۸۵) در مجتمع مس سرچشمه نشان می‌دهد که رابطه پیشنهادی مینووکس دقت و کارایی لازم برای استفاده در مدار این مجتمع را ندارد. لذا با نمونه‌گیری از مدار و انجام آزمایش‌های مربوط و با در نظر گرفتن عوامل موثر عملیاتی، رابطه تجربی جدیدی برای استفاده در مجتمع مس سرچشمه پیشنهاد شده است[۱۰]:

$$P(kwh/t) = a.SPI^b + c.(p_{80})^d + f.\left(\frac{t}{1000}\right) + g.\left(\frac{\pi}{1000}\right) \qquad (۳)$$

در این رابطه a ، b ، c ، d ، f و g ضرایب ثابت اند، SPI مقدار میانگین به دست آمده از سه تکرار برای یک نمونه بر حسب دقیقه، p_{80} اندازه محصول نهایی آسیای نیمه

---

[۱] Starkey

[۲] Sag mill Power Index, SPI

[۳] Minovex

www.SID.ir

Archive of SID

خودشکن بر حسب میلی متر، t مدت زمان کارکرد آسترهای جداره بر حسب ساعت و p فشار یاتاقان آزاد آسیای نیمه خودشکن بر حسب کیلوپاسکال است.

آمیلانکسن [۱] و همکاران (۲۰۱۴) با انجام تغییراتی در تجهیزات و روش انجام، اصلاحاتی را در روش استارکی اعمال‌کرده‌اند. در این روش پیشنهادی صرفنظر از زمان لازم برای رسیدن ابعاد محصول تا $P_{۸۰}$ =۱/۷ mm، مدت زمان خردایش ۱۲۰ دقیقه است، آزمایش در فواصل زمانی ۱۵، ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه انجام می‌شود. همچنین رابطه زیر برای تخمین توان مصرفی پیشنهاد شده است[۱۱]:

$$POWER\left(\frac{kwh}{t}\right) = 5.9 * \left(\frac{SGI}{\sqrt{P_{80}}}\right)^{0.55} * f_{SAG} \qquad (۴)$$

f_{SAG} یک ضریب کالیبراسیون است که برای خوراک ریزدانه برابر ۰/۹ و برای زمانی که آسیا به صورت مدار بسته با سنگ‌شکن کا ر می‌کند برابر ۰/۸۵ است.

معمولاً ماده معدنی سخت‌تر، خوراکی با ابعاد درشت‌تر را تولید می‌کند. از این رو جدا نمودن تأثیر دو پارامتر سختی و توزیع دانه بندی مشکل است. خوراک نرم‌تر نسبت به مواد معدنی سخت‌تر به سهولت خرد شده و بنابراین مقادیر کمتری واسطه خردایش تولید می کند. از طرف دیگر، در صورتیکه خوراک بیش از حد سخت باشد، حتی در صورت وجود مقادیر کافی واسطه خردایش، آسیا توانایی و انرژی کافی برای خرد نمودن ذرات با ابعاد بحرانی را دارا نبوده و در نتیجه ظرفیت آسیا کاهش می‌یابد[۱۲]. به این ترتیب تغییر سختی سنگ معدن در آسیاهای نوع خودشکن نیز باعث نوسان چشمگیر در ظرفیت و نهایتاً تولید کارخانه می شود. از آنجاییکه با تغییر خواص خوراک عملکرد آسیا در حال تغییر است، محصول تولید شده نیز تغییر می‌کند[۶]. بنابراین بدست آوردن رابطه بین مشخصات خوراک و عملکرد آسیا، ضروری است. چنانچه مشخصات خوراک به خوبی کنترل نشود، ممکن است مشکلات قابل توجهی در پایداری آسیا بوجود آید.

بررسی تأثیر دانه‌بندی خوراک بر عملکرد آسیای خودشکن و نیمه‌خودشکن معادن طلای کالگورلی [۲] در استرالیا نشان می‌دهد افزایش مقدار $F_{۸۰}$ از ۷۰ به ۱۱۰ میلی‌متر موجب افزایش ۳۰ درصدی انرژی و کاهش ۳۰ درصدی ظرفیت شده است. همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد هرچه درصد وزنی فراکسیون درشت دانه افزایش یابد، وزن آسیا کاهش می‌یابد. زیرا خوراک با چنین توزیع ابعادی راحت‌تر خرد می‌شود [۲].

در بررسی تاثیر توزیع دانه بندی خوراک بر روی آسیای خودشکن کارخانه‌ای QCMC در کانادا، با توجه به اینکه $D_{۸۰}$ نمی‌تواند شاخص مناسبی برای توزیع دانه بندی باشد، تاثیر شاخصهای $D_{۱۰}$ ، $D_{۲۵}$ ، $D_{۲۰}$ ، $D_{۷۵}$ و $D_{۹۰}$ به صورت جداگانه بر عملکرد آسیا مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین نسبت دامنه ابعاد محدوده درشت به ابعاد محدوده متوسط $\left(\frac{d_{90}-d_{10}}{d_{50}-d_{10}}\right)$ به عنوان یک شاخص کیفی در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داده است که در یک توان کشی ثابت خوراک درشت‌تر، ظرفیت آسیا را کاهش می‌دهد. اما به هر حال ذرات درشت‌تر در خوراک، بایستی به اندازه کافی وجود داشته باشند تا ذرات کوچکتر را به همان سرعتی که خودشان (ذرات درشت‌تر) در آسیا شکسته می‌شوند، خرد کنند[۱۳].

نتایج بررسی تاثیر مشخصات خوراک بر روی آسیای خودشکن معدن الکب کرونا [۳] سوئد نیز نشان می‌دهد زمانی که یک خوراک سخت و درشت وارد مدار می‌شود، ظرفیت آسیا حدود ۱۰ درصد بیشتر از زمانی است که خوراک ورودی حاوی مواد نرم و دانه ریزتر باشد. خوراک ایده آل برای آسیای خودشکن، بایستی حاوی ۱۰ تا ۱۵ درصد وزنی ذرات درشت‌تر از ۱۰۰ میلی‌متر باشد. و نبودن ذرات درشت دانه در خوراک باعث کاهش عملکرد عملیات خردایش در داخل آسیا می‌شود[۳].

در معدن سونگون در ایران نیز تأثیر مشخصات خوراک ورودی برروی شکل محصول و مکانیزم شکست در آسیای نیمه‌خودشکن مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد افزایش سختی بار ورودی متناسب است با افزایش اندیس بار نقطه‌ای و اندیس کار باند و همچنین کاهش پارامتر شکست ضربه ای(A×b). همچنین افزایش سختی با افزایش ابعاد خوراک رابطه مستقیم دارد.

---

[۱] Amelunxen

[۲] Calgary

[۳] LKAB Kiruna

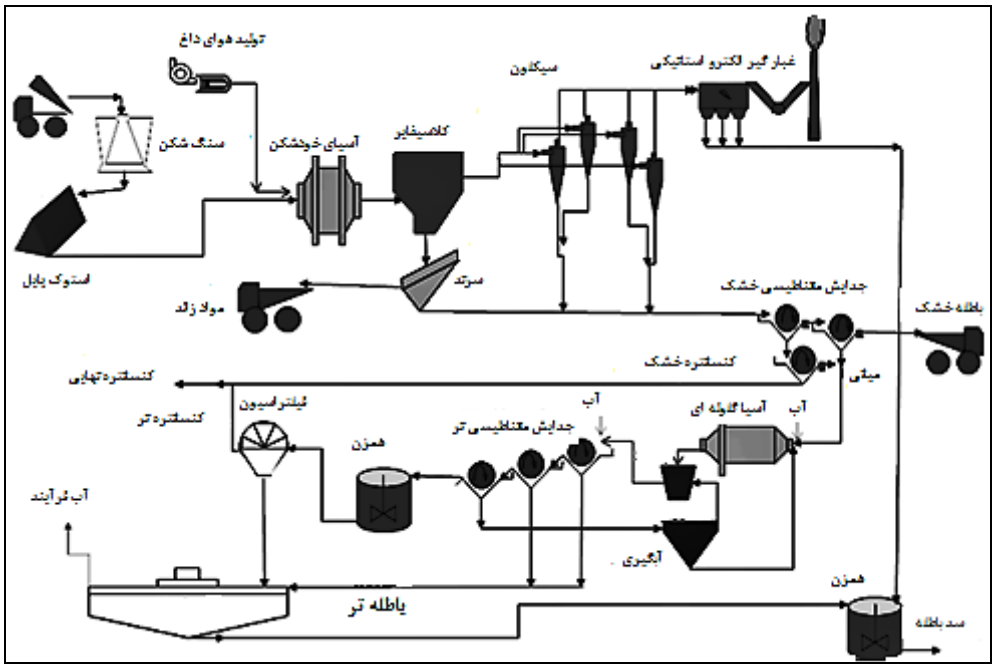
www.SID.ir

Archive of SID

در این تحقیق نتیجه گیری شده است که خردایش کانسنگ سخت و درشت در آسیای نیمه‌خودشکن باعث تولید محصول دانه ریزتری، نسبت به خردایش کانسنگ نرم و ریز می‌شود. به علاوه محصول خردایش کانسنگ نرم، دارای کشیدگی و زاویه‌داری بیشتر و گردشدگی کمتری نسبت به خردایش کانسنگ سخت است. همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد با تغییر سختی و مقاومت سنگ، مکانیزم شکست تغییر یافته است. و نتیجه گیری شده است که کانسنگ ضعیف تر اساساً تحت مکانیزم ضربه شکسته می‌شود در حالیکه در خردایش کانسنگ مقاوم‌تر مکانیزم‌های سایش (Abrasion) و فرسایش (Attrition) سهم بیشتری دارند [۱۴].

در تحقیق حاضر، تأثیر مشخصات بار ورودی بر روی عملکرد آسیای خودشکن خط ۳ کارخانه فرآوری سنگ آهن گل‌گهر مورد بررسی قرار گرفته است. ما در این تحقیق سعی کرده ایم با تعیین شاخص SPI و توزیع دانه بندی خوراک و ارتباط آنها با توزیع دانه بندی محصول و توان مصرفی آسیا، رابطه عملکرد مدار خردایش را با مشخصات بار ورودی دریابیم.

در مدار کارخانه فرآوری سنگ آهن گل‌گهر سنگ معدن استخراج شده با ابعاد کوچک‌تر از ۱۵۰۰ میلی‌متر پس از خردایش در سنگ‌شکن ژیراتوری و کاهش ابعاد تا کوچک‌تر از ۲۰۰ میلی‌متر برای خردایش بیشتر وارد مدار آسیاکنی می‌شود. مدار آسیاکنی شامل سه خط مشابه است. که در این تحقیق مدار خط شماره ۳ مورد بررسی قرار گرفته است. مدار خردایش خط ۳ کارخانه تغلیظ شرکت گل‌گهر شامل یک آسیای خودشکن به قطر ۹ متر و طول ۲/۱۰ متر است که بصورت مدار باز با یک کلاسیفایر کار می‌کند. ته‌ریز کلاسیفایر بر روی یک سرند دو طبقه با اندازه دهانه ۲۰ و ۳ میلی‌متر ریخته و سرریز آن وارد چهار سیکلون هوایی یکسان به قطر ۳/۶ متر و ارتفاع ۱۲متر می‌شود. در نهایت ته‌ریز سرند و سیکلون‌ها برای عملیات پرعیار سازی جداسازی به جداکننده‌های خشک منتقل می‌شود. جداکننده‌های مغناطیسی خشک یک باطله نهایی، یک کنسانتره نهایی و یک محصول میانی تولید می‌کنند. محصول نهایی برای خردایش بیشتر وارد یک آسیای گلوله‌ای تر می‌شود. محصول آسیای گلوله‌ای برای پرعیار سازی بیشتر وارد جدا کننده‌های مغناطیسی تر می‌شود. کنسانتره جداکننده‌های تر به بخش کنسانتره نهایی و باطله آن پس از آبگیری به سد باطله ارسال می‌شوند(شکل ۱).



شکل ۱: فلوشیت کارخانه فرآوری مجتمع سنگ آهن گل گهر

www.SID.ir

Archive of SID

۲- روش تحقیق

در این تحقیق یازده مرحله پیمایش بر روی مدار خردایش آسیای خودشکن انجام شد. زمان هر پیمایش ۲ ساعت (در شرایط پایا) و در هر پیمایش هر دو دقیقه توسط یک بیلچه، سه تکه سنگ به صورت تصادفی از قسمت نوار نقاله خوراک آسیای خودشکن برداشته و هر تکه سنگ درون سطل‌های جداگانه‌ای ریخته شد (سه نمونه کلی به منظور تکرار پذیری آزمایش‌ها). تقریباً در هر پیمایش سه نمونه هریک به میزان تقریبا ۴۰ تا ۵۰ کیلوگرم تهیه شده و مقدار ۲ کیلوگرم از آن به روش تقسیم نمونه آماده‌سازی شد. برای هر یک از نمونه‌های ۲ کیلوگرمی با استفاده از تجهیزات و روش استاندارد استارکی مقدار شاخص SPI تعیین شد. علاوه بر نمونه گیری از خوراک ورودی، ۳۰ دقیقه پس از شروع پیمایش (به مدت ۲ ساعت)، هر ۳۰ دقیقه از جریان‌های ته‌ریز سرند و سیکلون‌های هوایی، نوار برگشتی و ته‌ریز غبارگیر الکترواستاتیکی نمونه برداری شد. همچنین در این فواصل اطلاعات مربوط به انرژی مصرفی آسیای خودشکن و فن تخلیه (اگزوزفن) و نرخ خوراک آسیای خودشکن یادداشت شده است. به منظور تعیین تاثیر دانه بندی خوراک بر عملکرد مدار تنها در سه پیمایش از یازده پیمایش انجام شده (بخاطر مشکلات مربوط به متوقف کردن خط تولید) نوار نقاله خوراک آسیا متوقف و تمام مواد روی ۲۵ متر از نوار بطور کامل برداشت شد. به این ترتیب در هر پیمایش، نمونه‌هایی به وزن تقریبی ۲ تن از خوراک آسیا تهیه شد. همه نمونه های برداشت شده از جریانها به آزمایشگاه منتقل و آنالیز سرندی روی آنها انجام شده **است**.

۲- نتایج و بحث

۲-۱- رابطه شاخص SPI خوراک، با توان مصرفی و پرشدگی آسیا

مقادیر شاخص **SPI** برای یازده پیمایش در

جدول ۱ آمده است. برای هر پیمایش نتایج هر سه نمونه برداشت شده (SPI_1، SPI_2 و SPI_3) و همچنین میانگین نتایج (SPI_m) در

جدول ۱ گزارش شده است. **شکل ۲** رابطه شاخص **SPI** را با توان مصرفی (بر حسب کیلو وات) آسیای خودشکن نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش شاخص **SPI** توان مصرفی افزایش یافته است.

افزایش توان مصرفی آسیا می تواند به دلیل افزایش پرشدگی آسیا باشد. با افزایش پر شدگی آسیا، وزن بار آسیا زیادتر و مرکز ثقل بار آسیا به محور چرخشی آسیا نزدیک می شود. با افزایش پرشدگی آسیا تا کمتر از ۵۰ درصد، مقدار افزایش وزن آسیا نسبت به کاهش فاصله مرکز ثقل تا محور آسیا بیشتر بوده و در نتیجه گشتاور وارده توسط بار داخل آسیا افزایش می یابد. ولی به ازای پرشدگی بیشتر از٪۵۰، تاثیر نزدیکی مرکز ثقل بار به محورآسیا نسبت به افزایش وزن بار بیشتر می باشد و در نتیجه گشتاور بار کاهش می یابد (**شکل ۳**). در آسیای خودشکن معمولاً درصد پرشدگی بین ۱۵ تا ۳۰ درصد است و بندرت ممکن است به بیش از ۵۰ درصد برسد. همچنین در در آسیا گل گهر یک الگوریتم کنترلی جود دارد که با کاهش نرخ خوراک اجازه نمی دهد توان آسیا از **kW** ۲۰۰۰ تجاوز کند. بنابراین با توجه به شکل ۲ و شکل ۳ و می توان نتیجه گرفت که با افزایش شاخص **SPI**، توان مصرفی و درنتیجه درصد پرشدگی آسیا افزایش یافته است.

شکل ۴ رابطه شاخص **SPI** با توان مصرفی اگزوزفن را نشان می‌دهد. وظیفه اگزوزفن تخلیه ذرات خرد شده از درون آسیا است. مشاهده می‌شود با افزایش شاخص **SPI** توان مصرفی اگزوزفن افزایش یافته است. هر چه آسیا انباشتگی بیشتری داشته باشد اگزوزفن توان بیشتری می‌کشد تا ذرات را از لایه های مواد تخلیه کند. لذا افزایش توان اگزوزفن نیز می تواند تایید کننده افزایش پرشدگی آسیا با افزایش شاخص **SPI** باشد.

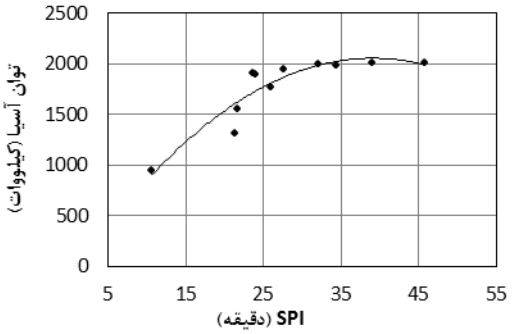
جدول ۱: نتایج آزمایش تعیین شاخص SPI خوراک (SPI)

پیمایش	SPI۱	SPI۲	SPI۳	SPIm	انحراف معیار	انحراف معیار نسبی
۱	۲۴	۲۸	۲۶	۲۶	۱/۶	۶/۳
۲	۳۶	۴۲	۳۹	۳۹	۳	۷/۶۹
۳	۳۴	۳۲	۳۷	۳۴/۳۳	۲/۵۲	۷/۳۳
۴	۲۱	۲۰	۲۴	۲۱/۶۷	۲/۰۸	۹/۶۱
۵	۲۳	۲۶	۲۳	۲۴	۱/۷۳	۷/۲۲
۶	۲۹	۲۹	۲۵	۲۷/۶۷	۲/۳۱	۸/۳۵
۷	۲۳	۲۳	۲۵	۲۳/۶۷	۰/۹۴	۳/۹۸
۸	۳۵	۳۰	۳۱	۳۲	۲/۱۶	۶/۷۵
۹	۴۷	۴۵/۵	۴۵	۴۵/۸۳	۰/۸۵	۱/۸۵
۱۰	۱۰	۱۰	۱۲	۱۰/۶۷	۱/۱۶	۱۰/۸۳

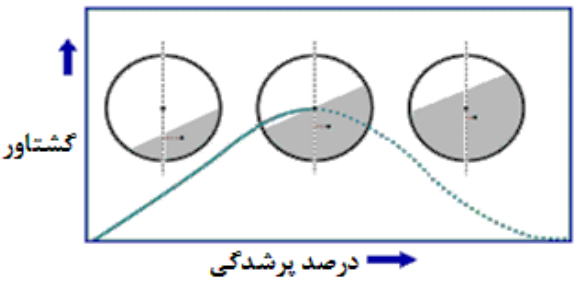
www.SID.ir

Archive of SID

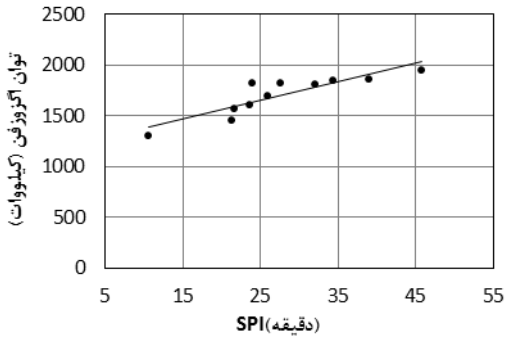
۱۱	۲۰	۲۲	۲۲	۲۱/۳۳	۱/۱۶	۵/۴۱



شکل ۲: رابطه بین شاخص SPI و توان مصرفی آسیای خودشکن



شکل ۳: رابطه پرشدگی وگشتاور ایجاد شده با توان مصرفی

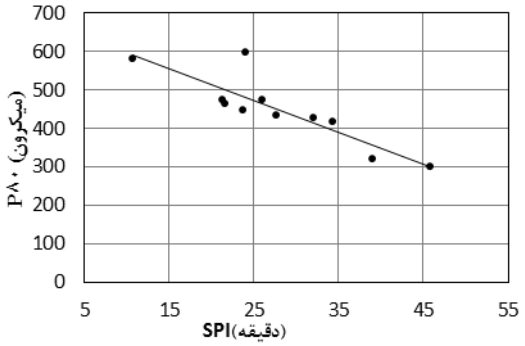


شکل ۴: رابطه بین شاخص SPI و توان اگزوزفن

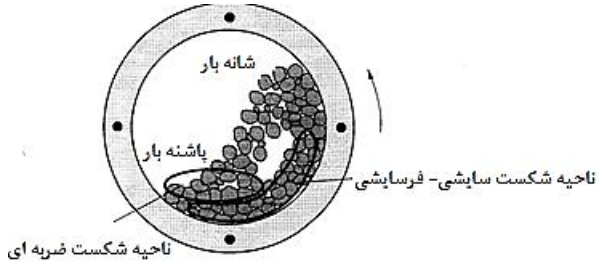
۲-۲- رابطه شاخص SPI خوراک، با مکانیزم خردایش و دانه بندی محصول آسیا

شکل ۵ رابطه بین شاخص **SPI** و P_{80} محصول خروجی آسیای را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش شاخص **SPI**، محصول آسیا دانه ریزتر شده است. با بررسی رابطه شاخص **SPI** و توان مصرفی آسیا و اگزوزفن به این نتیجه رسیدیم که با افزایش شاخص **SPI**، توان مصرفی آسیا و اگزوزفن و پرشدگی آسیا افزایش می یابد.

شکل ۶ نواحی از بار آسیا خودشکن که مکانیزم شکست ضربه‌ای(**impact**) و سایشی-فرسایشی (**abrasion-attrition**) رخ می را نشان می‌دهد. شکست ضربه‌ای در ناحیه پاشنه بار (**toe**) اتفاق می‌افتد. مقدار شکستی که در این ناحیه رخ می دهد متاثر از فرکانس برگشت بار و انرژی تولید شده در اثر ضربه است. با افزایش پرشدگی آسیا تاثیر این دو عامل کم می شود. در ناحیه شکست سایشی-فرسایشی بار یک توده جامد نیست بلکه ترکیبی از یکسری لایه هاست که بر روی یکدیگر خوابیده‌اند. با حرکت بار به سمت بالا این لایه ها بر روی هم می لغزند و مکانیزم سایش- فرسایش رخ می دهد. با پرشدگی آسیا ناحیه شکست سایشی-فرسایشی افزایش می یابد. در مکانیزم شکست سایشی-فرسایشی، میزان قابل توجهی از ذرات تولیدی بسیار کوچکتر از ذرات اولیه هستند لذا محصول دانه ریزتری تولید می شود. نتایج تحقیق انجام شده توسط پورقهرمانی و همکاران (۲۰۱۲) در معدن سونگون نیز نشان می‌دهد که خردایش کانسنگ سخت در آسیای نیمه‌خودشکن باعث تولید محصول دانه ریزتری، نسبت به خردایش کانسنگ نرم می‌شود. [۱۴].



شکل ۵: رابطه بین شاخص SPI و P۸۰ محصول خروجی آسیای خودشکن



شکل ۶: حرکت بار و مکانیزم‌های شکست در آسیای خودشکن

www.SID.ir

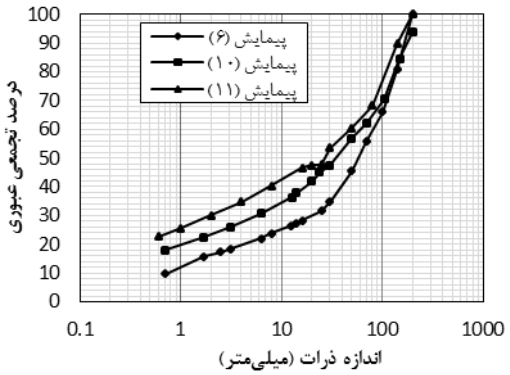
Archive of SID

۲-۳- رابطه دانه بندی خوراک با توان مصرفی و پرشدگی آسیا

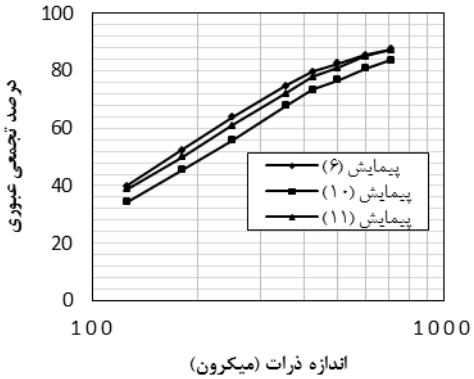
در پیمایش های ۶، ۱۰ و ۱۱ نوار نقاله خوراک متوقف و کل بار روی ۲۵ متر از نوار برداشت و مورد آنالیز دانه بندی قرار گرفت. در جدول ۲ اطلاعات مربوط به دانه بندی خوراک و محصول، شاخص **SPI**، نرخ خوراک و همچنین توان مصرفی آسیا و اگزوزفن در این سه پیمایش گزارش شده است. شکل ۷ و شکل ۸ نیز به ترتیب منحنی توزیع دانه بندی خوراک و محصول آسیای خودشکن را برای سه پیمایش ۶، ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهند.

جدول ۲: مشخصات خوراک، محصول و شرایط عملیاتی پیمایش‌های ۶،۱۰ و ۱۱

محدوده دانه‌بندی	پیمایش ۶	پیمایش ۱۰	پیمایش ۱۱
+۱۰۰ mm (درشت)	٪۳۳/۸۹	٪۳۰	٪۲۴/۶۵
-۱۰۰+۴۰ mm (متوسط)	٪۲۵/۹۹	٪۱۷/۹	٪۱۸/۳۶
-۴۰+۲۰ mm (نسبتا ریز)	٪۱۰/۳۵	٪۱۰/۱۸	٪۹/۴۲
-۲۰ mm (ریز)	٪۲۹/۷۸	٪۴۱/۹۲	٪۴۷/۵۷
F_{80} (میلی‌متر)	۱۳۷/۶۱	۱۳۵/۵۳	۱۱۳/۰۵
P_{80} (میکرون)	۴۳۲/۲	۵۸۰/۴	۴۷۴/۷
نسبت ذرات درشت به متوسط (ردیف ۲ به ۳)	۱/۳	۱/۶۷	۱/۳۴
SPI (دقیقه)	۲۷/۶۷	۱۰/۶۷	۲۱/۳۳
توان مصرفی آسیا (کیلو وات)	۱۹۵۳	۹۴۵	۱۳۱۰
توان اگزوزفن(کیلو وات)	۱۸۲۲	۱۳۰۵	۱۴۵۸



شکل ۷: توزیع دانه بندی خوراک آسیای خودشکن در پیمایش‌های ۶، ۱۰ و ۱۱



شکل ۸: توزیع توزیع دانه بندی محصول آسیای خودشکن در پیمایش‌های ۶، ۱۰ و ۱۱

تغییر در توزیع دانه بندی خوراک بر روی وزن آسیا و مرکز ثقل بار در آسیا اثرگذاشته و درنتیجه بر روی توان مصرفی آسیا تاثیر می گذارد. در اثر دوران وگردش آسیا ذرات سنگین و درشت تر تا ارتفاع بالاتری بالا برده می شوند ولی ذرات ریز مانند پالپ عمل نموده و زیاد بالا برده نمی شوند. برای یک آسیا با بار ریز، سهم حرکت آبشاری بزرگ کاهش می یابد. به ازای وزن مشخصی، حرکت آبشاری بزرگ نسبت به حرکت آبشاری کوچک به دلیل دورشدن بیشتر مرکز ثقل بار از محور میانی آسیا توان زیادی مصرف می کند و نتیجه کلی باعث کاهش توان مصرفی آسیا می شود (**شکل ۹**).

شکل ۹: توان آسیا برای بار درشت وریز

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۷ نشان می‌دهد که خوراک پیمایش ۶ درشت‌تر از پیمایش ۱۰ و پیمایش ۱۰ درشت‌تر از پیمایش ۱۱ است. اطلاعات جدول ۲ نشان می‌دهد در پیمایش ۶ که دارای درشت‌ترین خوراک است توان مصرفی آسیا نیز نسبت به دو پیمایش دیگر بیشتر است.(۱۹۵۳ در برابر ۹۴۵ و ۱۳۱۰ کیلو وات). اما در پیمایش ۱۰ که خوراک درشت‌تر از پیمایش ۱۱ است، توان مصرفی کمتر است (۹۴۵ در برابر ۱۳۱۰ کیلو وات). همچنین با وجود اینکه دو پیمایش ۶ و ۱۰ دارای F_{80} تقریباً یکسان هستند (۱۳۷ و ۱۳۵ میلی‌متر) اما توان مصرفی پیمایش ۶ به مراتب بیشتر از پیمایش ۱۰ است (۱۹۵۳ در برابر ۹۴۵ کیلو وات). با توجه به این نتایج نمی توان ملاک درشتی را فقط F_{80} در نظر گرفت. این که چه بخشی از خوراک شامل ذرات متوسط با قابلیت بحرانی شدن است و همچنین نسبت ذرات درشت به ذرات متوسط، اهمیت دارد. چون این ذرات درشت هستند که باعث خردایش ذرات متوسط می شوند. همانطور که اطلاعات جدول ۲ نشان می‌دهد درصد ذرات متوسط (**۴۰mm**+۱۰۰-) که قابلیت بحرانی شدن دارند در خوراک پیمایش‌های ۶، ۱۰ و ۱۱ به ترتیب برابر با ۲۶، ۱۸ و ۱۸/۳۶ درصد است. مشاهده می‌شود که در پیمایش ۶ که دارای بیشترین درصد ذرات متوسط است توان مصرفی و شاخص **SPI** و بیشتر از دو پیمایش دیگر است. اما در مقایسه پیمایش‌های ۱۰ و ۱۱ با وجود اینکه درصد ذرات متوسط در پیمایش ۱۰ و ۱۱ تقریباً برابر است اما شاخص **SPI** و توان مصرفی پیمایش ۱۱ خیلی بیشتر از پیمایش ۱۰ است. مطابق جدول ۲ نسبت ذرات درشت (**۱۰۰mm**+) به متوسط (**۴۰mm**+۱۰۰-) برای پیمایش های ۶، ۱۰ و ۱۱ به ترتیب برابر است با ۱/۳، ۱/۶۷ و ۱/۳۴ است. با کاهش نسبت ذرات درشت به متوسط، شاخص **SPI** و توان مصرفی افزایش یافته است. در واقع می توان گفت با کاهش نسبت ذرات درشت به متوسط، ذرات متوسط کمتر خرد می شوند و در نتیجه بار داخل آسیا سختی بیشتری در برابر خرد شدن از خود نشان می دهد و همچنان درشت می ماند و در نتیجه توان مصرفی افزایش می یابد.

۲-۴- رابطه دانه بندی خوراک با پرشدگی و دانه بندی محصول آسیا

با افزایش درصد ذرات متوسط با قابلیت بحرانی شدن (**۴۰mm**+۱۰۰-) و کاهش نسبت ذرات درشت به متوسط، تجمع ذارت بحرانی در آسیا اتفاق می افتد و در نتیجه پرشدگی آسیا افزایش می‌یابد. با افزایش پر شدگی توان مصرفی آسیا و اگزوزفن افزایش می‌یابد. همانطور که اطلاعات جدول ۲ نشان می‌دهد در بین سه پیمایش ۶،۱۰ و ۱۱ بیشترین توان مصرفی آسیا و اگزوزفن و بیشترین **SPI** مربوط به پیمایش ۶ است که دارای کمترین نسبت ذرات درشت به متوسط است. همانطور که در بخش‌های قبلی اشاره شد با افزایش پرشدگی آسیا مکانیزم سایش-فرسایش غالب شده و در نتیجه محصول آسیا دانه‌ریزتر می‌شود. اطلاعات جدول ۲ و شکل ۸ نشان می‌دهد که محصول پیمایش شماره ۶ نسبت به دو پیمایش دیگر دانه‌ریزتر است.

۳- نتیجه گیری و پیشنهادات

شاخص **SPI** پارامتری است که تا حدودی می‌تواند بیانگر قابلیت خردایش یک کانسنگ در آسیای خودشکن-نیمه خودشکن باشد. با افزایش شاخص **SPI** سختی کانسنگ افزایش می‌یابد. افزایش سختی کانسنگ موجب افزایش ذرات بحرانی در آسیا می‌شود در نتیجه حجم بار داخل آسیا افزایش و مکانیزم‌های سایش و فرسایش غالب می‌شوند. غالب شدن این مکانیزم‌ها در فرآیند خردایش موجب ریزتر شدن محصول آسیا می‌شوند.

درصد ذرات درشت و نسبت ذرات درشت به متوسط بر عملکرد آسیای خودشکن موثر است. نسبت ذرات درشت به متوسط با شاخص **SPI** کانسنگ رابطه معکوس دارد. با کاهش این نسبت شاخص **SPI** کانسنگ کاهش و محصول ریزتر می‌شود. به عبارتی وجود ذرات درشت برای خرد کردن ذرات متوسط که قابلیت بحرانی شدن دارند نیاز است. البته قطعاً اگر این نسبت نیز خیلی زیاد شود نیز تاثیر منفی خواهد داشت.

میانگین شاخص **SPI** در یازده پیمایش انجام شده حدوداً ۲۷/۸۳ است. و در این شرایط بر اساس منحنی شکل توان مصرفی حدود ۱۹۰۰ کیلو وات و بر اساس منحنی شکل نرخ خوراک ۵۰۰ تن بر ساعت است. برای افزایش نرخ خوراک و در نتیجه ظرفیت آسیا کنی پیشنهاد می‌شود که برنامه استخراج از بلوکهای معدنی، الگوی انفجار و شرایط عملیاتی سنگ شکنی به گونه ای طراحی شود که شاخص **SPI** از ۲۷ کمتر و همچنین از لحاظ توزیع دانه

www.SID.ir

Archive of SID

بندی درصد ذرات درشت‌تر از ۱۰۰ میلی‌متر بیش از ۱/۵ برابر درصد ذرات متوسط (۴۰+۱۰۰- میلی‌متر) باشد.

قطعاً شاخص **SPI** به تنهایی نمی تواند بیانگر ویژگیهای خوراک ورودی باشد. انجام آزمایشهای سقوط وزنه (**drop weight test**) و شکست سایشی که در آن تاثیر مکانیزهای شکست سایشی و ضربه تفکیک شده است و همچنین آزمایش**media competency** که تعیین کننده قابلیت خردایش کانسنگ به روش خودشکنی است و همچنین پتانسیل بار ورودی برای تولید قطعات بحرانی را تعیین می کند، می تواند اطلاعات جامع تری در مورد خصوصیات خوراک ورودی بدست دهد. به همین دلیل پیشنهاد می شود در تحقیقات بعدی آزمونهای یاد شده انجام و نتایج با اطلاعات بدست آمده با شاخص **SPI** مقایسه و مورد بررسی قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از مدیران و مهندسان کارخانه معدن سنگ آهن گل‌گهر و پژوهشکده سنگ‌آهن و فولاد این شرکت برای در اختیار گذاشتن اطلاعات، فراهم آوردن امکان پیمایش مدار کارخانه و همچنین انجام آزمایشها کمال تشکر و امتنان را دارند.

مراجع

[۱] احمد اکبری‌نسب؛ ، ۱۳۸۲؛ *"بررسی تأثیر سختی خوراک بر عملکرد آسیاهای خودشکن در مدار خردایش سنگ آهن گل گهر "*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

[2] S. Morrell ; W.Valery; 2001 "*Influence of feed size on AG/SAG mill performance*", International Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology.

[3] R. Hahne; B.I. Palsson; P.O. Samskog; 2002 "*Ore characterisation for and simulation of primary autogenous grinding*", Research and Development, LKAB, S-981 86 Kiruna, Sweden, Department of Chemical and Metallurgical Engineering, Division of Mineral Processing, Lulelaa University of Technology, S-971 87 Lulelaa, Sweden**.**

[4] J. Rowland, C.A. Kjos; 1978 "*Rod and ball mills*", Mineral Processing Plant Design. SME, AIME, New York, NY, USA, pp. 239–278.

[5] S. Morrell; W.M. Finch; T. Kojovic; H, Delboni; 1994 "*Modelling and simulation of large diameter autogenous and semiautogenous mills*", Proceedings of the Eighth European Symposium on Comminution, Stockholm, Sweden, pp. 289–300.

[6] W. Stange; 1996 "*The Modelling of Binary Ore Behaviour in FAG/SAG Milling*", In: Mular, A.L., Barrat, D.J., Knight, D.A. (Eds.), SAG 96, Vancouver, Canada. Dept. of Mining and Mineral Process Engineering, Univ. of British Columbia, Vancouver, BC, Canada, pp. 1063–1080.

[7] J. Starkey; G. Dobby; G. Kosick; 1994 "*A New Tool For SAG Hardness Testing*", Proc. Canadian Mineral Processor's Conference, Ottawa.

[8] J. Starkey; G. Dobby; 1996 "*Application of the Minnovex SAG Power Index at Five Canadian SAG Plants*"; International Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology, pp. 345-360.

[9] G. Kosick; C. Bennet; 1999 "*The Value of Orebody Power Requirement Profile for SAG Circuit Design*", 31 st Annual General Meeting of the Canadian Mineral Processors,Ottawa, pp.241-253.

[۱۰] ابراهیم عظیمی؛ ۱۳۸۵؛ *"طراحی وساخت آسیایی جهت تعیین شاخص توان آسیای نیمه خودشکن (SPI) مطالعه موردی: آسیای نیمه خودشکن (SAG MIL) مجتمع مس سرچشمه "*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

[11] P. Amelunxen; P. Berrios; E. Rodriguez; 2014 "*The SAG grindability index test*", Minerals Engineering, vol. 55, pp. 42–51.

[۱۲] م.ر لورک‌آقا؛ ۱۳۹۲؛ *" برنامه ریزی تولید معدن شماره یک گل‌گهر با در نظر گرفتن شاخص توان آسیای نیمه خودشکن (SPI)"*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب.

[13] A. Bouajila; G. Bartolacci; C. Coté; 2001 "*The impact of feed size analysis on the autogenous grinding mill*", International Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology, Mining and Mineral process engineering university of british Columbia.

[14] P. Pourghahramani; 2012 "*Effects of ore characteristics on product shape properties and breakage mechanisms in industrial SAG mills*",

www.SID.ir