

شبیه‌سازی مدار آسیای خودشکن چغارت با استفاده از نرم‌افزار JKSImMet و بررسی تأثیر نیمه خودشکنی آن

محمد رنجبر بافقی^۱، علی دهقانی^{۲*}، محمد مهدی خسروی راد^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد و پژوهشکده فناوری های معدنکاری

۳- مربی، گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بافق

(دریافت: بهمن ۱۳۹۵، پذیرش: خرداد ۱۳۹۷)

چکیده

تغییر مشخصات بار اولیه مدار فرآوری چغارت موجب کاهش کارایی آسیای خودشکن این کارخانه شده است. افزودن گلوله جهت کمک به خردایش کانسنگ اکسیده به عنوان یکی از راه‌های بهبود راندمان خردایش بررسی شد. در این موارد معمولاً از نرم‌افزارهای قابل اعتماد جهت شبیه‌سازی و پیش‌بینی تأثیر نیمه خودشکنی استفاده می‌شود. به همین منظور شبیه‌سازی مدار آسیای خودشکن چغارت و بررسی امکان افزودن گلوله به این آسیا با استفاده از نرم‌افزار JKSImMet انجام شد. از جریان‌های ورودی و خروجی به آسیای خودشکن نمونه‌گیری شد و آزمایش‌های خردایش جهت خصوصیت‌سنجی بار اولیه انجام شد. سپس با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش‌ها و اطلاعات مربوط به بار اولیه و مشخصات آسیا، مدار آسیای خودشکن چغارت شبیه‌سازی شد. نتایج به دست آمده انطباق توزیع ابعادی محصول شبیه‌سازی شده و واقعی آسیا را نشان داد. با استفاده از نتایج این شبیه‌سازی، پیش‌بینی شده است که ظرفیت این مدار، با افزودن گلوله‌های ۱۰۰ میلی‌متری به میزان ۵ و ۱۰ درصد حجمی آسیا، به ترتیب حدود ۳ و ۷ درصد افزایش خواهد یافت. افزودن ۲/۵ درصد حجمی گلوله در شرایطی تقریباً مشابه منجر به افزایش ظرفیت به میزان حدود ۸ درصد و افزایش ابعاد محصول به میزان حدود ۹۰ میکرون گردید، در حالی که توان مصرفی نیز حالت پایداری داشت.

کلمات کلیدی

آسیای خودشکن چغارت، آزمایش‌های شکست، شبیه‌سازی، نرم‌افزار JKSImMet، افزودن گلوله

*عهده‌دار مکاتبات: a.dehghani@yazd.ac.ir

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، با توجه به تغییر ماهیت و اکسید شدن کانسنگ ورودی به مدار فرآوری چغارت، ظرفیت تولید کنسانتره سنگ آهن این مدار به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. از آنجا که مدار فرآوری چغارت فقط از آسیای خودشکن جهت آسیا کردن مواد استفاده می‌کند، این آسیا گلوگاه اصلی در فرایند افزایش ظرفیت این کارخانه به حساب می‌آید. در سال‌های گذشته با تغییر بعضی از پارامترهای قابل کنترل در کارخانه مانند درجه انباشتگی آسیا، درصد جامد و کاهش ابعاد سرنده، تأثیر آن‌ها بر ظرفیت و خردایش مدار بررسی شده است. همچنین شبیه‌سازی مدار با استفاده از نرم‌افزار MODSIM انجام شده و بعضی تغییرات به کمک آن پیش‌بینی شده است. در این پژوهش از نرم‌افزار JKSimMet برای شبیه‌سازی مدار خودشکن چغارت استفاده شده است. این نرم‌افزار در موارد متعددی به‌طور موفقیت‌آمیزی در طراحی، اصلاح مدار یا افزایش ظرفیت مدارهای خردایش مورد استفاده قرار گرفته است [۱]. در ادامه مدل‌های خردایش در آسیاهای خودشکن و آزمایش‌های خردایش برای تعیین توابع شکست و انتخاب توضیح داده شده‌اند. سپس نتایج آزمایش‌های خردایش روی نمونه کانسنگ چغارت و نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار JKSimMet ارائه شده است. در نهایت تأثیر افزودن گلوله به آسیای خودشکن چغارت بررسی شده است.

۲- مدل‌های فرآیند خردایش در آسیای خودشکن

خردایش در آسیاهای خودشکن و نیمه خودشکن تا حد زیادی در اثر ضربه ناشی از سقوط ذرات و بارهای خردکننده انجام می‌شود. ذرات در پاشنه آسیا بیشترین نیروی ضربه را از سقوط سنگ‌ها و دیگر بارهای خردکننده دریافت می‌کنند. انتهای آسیا با صفحات مشبکی (گریتینگ^۱) پوشیده شده که به‌عنوان دیافراگم عمل می‌کند و از خروج ذرات درشت‌تر به جریان محصول خودداری می‌کند.

خوراک متشکل از ذرات با ابعاد مختلف، به میزان مورد نظر به آسیا شارژ می‌شود. در اثر چرخش آسیا و به کمک بالابره‌های پالپ، سنگ‌ها برداشته شده و در نقطه شانه^۲ بارها و روی پاشنه^۳ فرود می‌آید. در حین این عملیات نیروهای ضربه و سایش موجب خرد شدن قطعات مختلف سنگ

می‌شود. سنگ‌های درشت که نرخ خردایش کم‌تری دارند در اثر لب پر شدن و سایش به قطعات شبه کرووی تبدیل می‌شوند. بسته به ماهیت بار اولیه، بخشی از این سنگ‌ها، که معمولاً ابعادی حدود ۲۵ تا ۵۰ میلی‌متر دارند (ابعاد بحرانی)، با نرخ کم‌تری نسبت به خوراک جدید خرد می‌شوند. در صورت تجمع این ذرات در آسیا، بخشی از حجم آن اشغال شده و ظرفیت آن کاهش می‌یابد. استفاده از بار خردکننده مناسب می‌تواند موجب کاهش حضور این ذرات داخل آسیا شود.

فرآیند خردایش در آسیای خودشکن با سه مؤلفه تعریف می‌شود:

- تابع انتخاب یا توزیع نرخ شکست^۴
- تابع شکست یا توزیع دانه‌بندی ذرات پس از شکست^۵
- نحوه انتقال مواد به خارج از آسیا^۶

۲-۱- فرآیندهای مرتبط با شکست در آسیای خودشکن

ساختار اصلی مدل‌های موازنه جمعیتی که در مدلسازی مدارهای آسیا کنی مورد استفاده قرار گرفته‌اند به دو دسته، فرآیندهای مرتبط با شکست و فرآیندهای مرتبط با انتقال جرم و خروج از آسیا، تقسیم می‌شوند [۲].

۲-۱-۱- نرخ شکست

نرخ شکست (تابع انتخاب) یکی از پارامترهای اصلی در مدل سازی آسیاهای گردان است. برخلاف تابع شکست که فقط به جنس کانه وابسته است، تابع انتخاب به محیط خردایش (خصوصیات کانه، قطر آسیا، سرعت گردش آسیا، اندازه و جنس گلوله‌ها) بستگی دارد. از این رو تابع انتخاب آزمایشگاهی برای آسیا در مقیاس صنعتی مناسب نمی‌باشد اما می‌توان با اطلاعات به دست آمده از کارهای آزمایشگاهی، تابع انتخاب صنعتی را محاسبه کرد. در نرم‌افزار JKSimMet با استفاده از توزیع ابعادی نمونه‌های گرفته شده از جریان‌های خوراک و محصول آسیای عملیاتی، تابع شکست خوراک و پارامترهای توزیع زمان ماند مواد در آسیا، تابع انتخاب صنعتی محاسبه می‌شود [۳].

۲-۱-۲- تابع توزیع شکست

فرآیند کاهش ابعاد یا شکست کانسنگ برای آسیاهای خودشکن/نیمه خودشکن با ارائه تابع ظهور یا تابع توزیع شکست، توصیف می‌شود و براساس آن شکست برحسب

روش مذکور نرخ خروج مواد شبکه از رابطه (۴) محاسبه می شود:

$$\begin{cases} D = 1 \rightarrow x_i < x_m \\ D = \frac{\ln(\frac{x_i}{x_g})}{\ln(\frac{x_m}{x_g})} \rightarrow x_m < x_i < x_g \\ D = 0 \rightarrow x_g < x_i \end{cases} \quad (4)$$

که در آن D نرخ خروج مواد، x_m ابعاد ذرات کوچکی که همیشه از شبکه عبور خواهند کرد یا رفتاری مانند آب خواهند داشت، x_g ابعاد شبکه ای که ذرات از آن عبور خواهند کرد و x_i ابعاد ذره i است.

در این روش نرخ خروج مواد از آسیا برای هر ابعاد ذره ای، حاصل ضرب بیشترین نرخ خروج از شبکه (برحسب زمان-ساعت) و نرخ خروج مواد برای هر ابعاد است و مطابق رابطه (۵) بیان می شود [۶-۷].

$$d_i = d_{max} \cdot D \quad (5)$$

۲-۳- پارامترهای مدل آسیای خودشکن "با نرخ های متغیر"

در نرم افزار JKSimMet با توجه به مدار آسیای چغارت و داده های موجود از مدل "نرخ متغیر" (مدل ۴۳۵ در نرم افزار) برای مدلسازی فرآیندهای موجود در آسیاهای خودشکن و نیمه خودشکن استفاده می شود. این مدل در سال ۱۹۹۰ برای بهبود همبستگی بین توابع نرخ های شکست و شرایط عملیاتی آسیاهای خودشکن و همچنین بین اندازه خوراک آسیا و خصوصیات شکست کانه، بر اساس داده های حاصل از آزمایش های آسیاکنی در مقیاس نیمه صنعتی و صنعتی توسعه داده شده است [۸].

برای پیش بینی محصول آسیا و تابع ظهور، نرخ های شکست فراکسیون های ابعادی بار آسیا یا تابع انتخاب لازم است. توزیع نرخ شکست در این مدل با استفاده از درون یابی^۹ تعیین می شود. در این مدل نرخ های شکست مطابق شکل ۱ در ابعاد ذرات خاصی (۰/۲۵، ۴، ۱۶، ۴۴/۸ و ۱۲۸ میلی متر) مشخص می شود که هر کدام از ابعاد مذکور به ترتیب، دارای نرخ های شکست R1 تا R5 هستند. نرخ های محاسباتی R5 و R4 بیانگر شکست سنگ های با ابعاد بزرگ و نرخ های کوچک تر R1 و R2 بیانگر شکست سنگ های کوچک تر موجود در بار هستند.

انرژی بالا (ضربه) و پایین (لغزش/سایش) توضیح داده می شود. تابع ظهور خوراک توسط آزمایش های آزمایشگاهی وزنه افتان و سایش تعیین می گردند که با ترکیب شدن آنها، یک تابع ظهور واحد را (رابطه (۱)) ارائه می دهند.

$$a = \frac{t_{le} \cdot a_{le} + t_{he} \cdot a_{he}}{t_{le} + t_{he}} \quad (1)$$

در رابطه (۱) پارامتر a تابع ظهور ترکیبی، t_{le} پارامتر t برای سایش، t_{he} پارامتر t برای سنگ شکنی، a_{le} تابع ظهور برای سایش و a_{he} تابع ظهور برای سنگ شکنی می باشد. در این مدل فرض بر این است که هر ذره یک سطح از انرژی (بالا یا پایین) را دریافت می کند [۴-۵].

۲-۲- فرآیند مربوط به نحوه انتقال جرم و خروج از آسیای خودشکن

۲-۲-۱- تابع انتقال جرم

انتقال پالپ در آسیا توسط تابعی مطابق رابطه (۲) که ماندگی پالپ، طرح شبکه، سطح شبکه و سرعت آسیا را، به آهنگ حجمی تخلیه از شبکه آسیا ارتباط می دهد، تعریف می شود.

$$J_p = kQ^{0.5} \gamma^{1.25} A^{-0.5} \phi^{0.67} d^{-0.25} \quad (2)$$

در رابطه (۲) پارامتر J_p ماندگی کسری پالپ، d قطر آسیا (m)، γ متوسط موقعیت شعاعی نسبی سوراخ های شبکه ($\gamma = \frac{\sum r_i a_i}{r_m \sum a_i}$)، a_i سطح کل سوراخ های شبکه در فاصله شعاعی r_i ، r_m شعاع داخلی آسیا، A کل مساحت سوراخ های شبکه (m^2)، ϕ سرعت نسبی آسیا (نسبت سرعت آسیا به سرعت بحرانی -/%) و Q دبی حجمی خروجی آسیا (m^3/h) است [۶].

۲-۲-۲- تابع طبقه بندی

برای توصیف طبقه بندی ذرات توسط شبکه نیز از روش لئونگ^۷ استفاده می شود [۶]. این مدل آسیا را به عنوان یک دستگاه طبقه بندی کننده ساده در نظر می گیرد. این روش که مدل اختلاط کامل ویتن و رابطه توسعه داده شده انتقال جرم آستین را توصیف می کند به صورت رابطه (۳) است [۷].

$$f - R \cdot s + A \cdot R \cdot s - D \cdot s = 0 \quad (3)$$

در رابطه (۳) پارامتر f ظرفیت خوراک، R نرخ شکست، s ثابت آسیا، D نرخ خروج مواد و A تابع ظهور است. در

انباشتگی، فاکتور تنظیم توان خالص است.

- پارامترهای مربوط به جریان بار در گردش: این پارامترها شامل تناژ خوراک تازه، درصد ابعاد بار در گردش در خوراک تازه (ابعاد +۴ تا -۲۰ میلی‌متر)، میزان بار برگشتی با ابعاد +۴ تا -۲۰، نسبت باربرگشتی و F_{80} خوراک بوده که F_{80} خوراک از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$F_{80} = 71.3 - 28.4 \times \ln(t_d) \quad (6)$$

- پارامترهای مربوط به بار گلوله شامل درصد حجمی بار گلوله، اندازه بزرگ‌ترین گلوله (mm)، توزیع اندازه‌های گلوله‌ها [۸] است.

۲-۴- مدل توان کشی آسیای خودشکن

توان مصرفی آسیا یکی از مهم‌ترین عوامل طراحی و همچنین بهینه‌سازی کارخانه‌های آسیاکنی است. آقایان مورل و موریسون^{۱۰} با اندازه‌گیری سرعت حرکت ذرات در لایه‌های مختلف بار نشان دادند که برخلاف فرض انجام شده در مدل‌های توان کشی قبلی، همه ذرات با سرعت یکسان و معادل با سرعت پوسته آسیا حرکت نمی‌کنند. لذا سرعت ذرات را در لایه‌های مختلف به موقعیت شعاعی آنها و میزان پرشدگی آسیا مطابق رابطه (۷) ارتباط دادند. [۷]

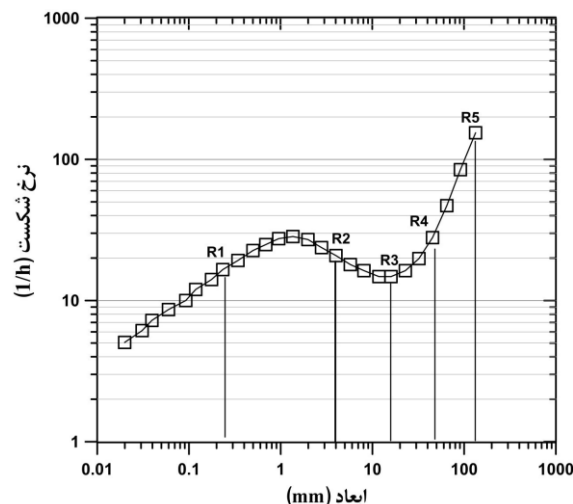
$$V_n = \left(1 - \frac{1}{J_t}\right) + \frac{1}{J_t} R_n \quad (7)$$

که در آن V_n سرعت نرمال شده، J_t پرشدگی کلی آسیا، R_n موقعیت شعاعی نرمال شده است.

آقایان مورل و موریسون رابطه‌های خود را برای پیش‌بینی توان مورد نیاز برای حرکت بار در داخل آسیا بر اساس رابطه‌های ارائه شده برای تعیین محدوده فیزیکی بار و حرکت لایه‌ها در داخل بار، با سه رویکرد بازو-گشتاور، موازنه انرژی و نیروی اصطکاک ارائه کردند. در هر سه رویکرد، فرض بر این است که انرژی مواد در حال سقوط آزاد به وسیله آسیا بازیابی نمی‌شود.

به طور کلی هر سه روش محاسبه از نظر توان مورد نیاز برای تامین انرژی پتانسیل تولید شده در بار، یکسان هستند و تنها روش موازنه انرژی توان مورد نیاز برای تامین انرژی جنبشی بار را در نظر می‌گیرد و در نتیجه به نظر می‌رسد که پیش‌بینی دقیق‌تری از توان خالص را به دست می‌دهد.

آقایان مورل و موریسون برای پیش‌بینی توان کشی در آسیاهای صنعتی، تاثیر مواردی مانند دو انتهای مخروطی در



شکل ۱: توزیع نرخ‌های شکست در ۵ ابعاد ذره خاص [۸]

نرخ شکست R_3 مربوط به ذرات با ابعاد بحرانی است که عموماً در محدوده ابعادی ۲۵ تا ۷۵ میلی‌متر قرار دارند و متناسب با ابعاد ترکیب‌های خوراک، خواص شکست و مقدار انرژی شکست تغییر می‌کند [۸-۹].

پارامترهای زیر در رابطه با مدل "نرخ متغیر" آسیای خودشکن در نرم‌افزار تعریف می‌شوند:

- پارامترهای مربوط به تابع شکست: این پارامترها شامل دو پارامتر A برحسب درصد و b برحسب (kwh/t) است که از آزمایش شکست ضربه‌ای با وزنه افتان به دست می‌آیند و پارامترهای t_a مربوط به مدل شکست سایشی است و از آزمایش با آسیای سایش به دست می‌آید.
- پارامترهای مربوط به تابع انتخاب: این پارامترها شامل پارامترهای مدل تابع انتخاب و تابع شکست هستند که توسط نرم‌افزار بر اساس نتایج آزمایش‌های شکست محاسبه می‌شود. مقدار این ضریب‌ها در قسمت برازش مدل با داشتن اطلاعات آسیا و دانه‌بندی ورودی و خروجی توسط نرم‌افزار تنظیم خواهد شد.
- پارامترهای هندسی: پارامترهای هندسی شامل قطر آسیا، طول قسمت استوانه‌ای آسیا، قطر ترانویون ورودی، زاویه مخروط ورودی و خروجی، اندازه روزنه‌های شبکه خروجی آسیا، ابعاد نرمه، کسری از مساحت باز روزنه خروجی آسیا، بزرگ‌ترین ابعاد محصول آسیا، متوسط شعاع تاثیر روزنه‌های خروجی آسیا (محاسباتی) است.
- پارامترهای مربوط به محاسبه توان آسیا: این پارامتر شامل کسری از سرعت بحرانی، وزن مخصوص گلوله، تخلخل بار گلوله و سنگ، توان اندازه‌گیری شده، درجه

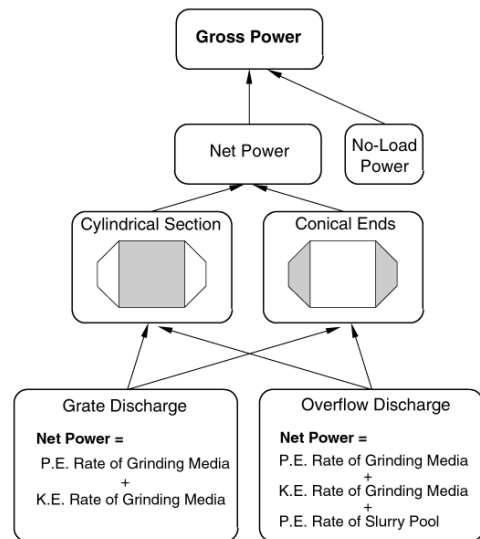
افزایش گلوله به آسیای خودشکن و تبدیل آن به آسیای نیمه خودشکن یکی از راهکارهای رایج در افزایش ظرفیت آسیا و حل مشکلات عملیاتی آن (جلوگیری از جمع شدن ذرات با ابعاد بحرانی در آسیا) است. البته افزودن گلوله باید به نحوی باشد که بین ابعاد و تعداد گلوله نسبت مطلوبی برقرار باشد زیرا هرچه جرم ذرات درشت تر نسبت به ذرات ریزتر بیشتر باشد، انرژی بیشتری (گلوله های بزرگ تر) جهت خرد کردن آنها مورد نیاز است هر چند که در حجم معین، تعداد گلوله بزرگ تر نسبت به گلوله های کوچک تر، کمتر است.

از طرفی فراوانی شکست نیز مهم است. هر گلوله در هر سیکل گردش آسیا فقط می تواند یک ضربه را وارد سازد. در واحد حجم آسیا نیز تعداد گلوله های بزرگ تر نسبت به گلوله های کوچک تر، کمتر است که در نتیجه تعادلی را بین انرژی خردایشی گلوله های بزرگ تر و تعداد ضربه ایجاد شده توسط آنها در هر دور گردش آسیا ایجاد می کند. انتخاب ابعاد گلوله ها در ارتباط مستقیم با سختی ماده معدنی و توزیع دانه بندی خوراک ورودی به آسیا است که در این میان مواد معدنی نرم تر و ریزتر نسبت به مواد معدنی سخت تر به گلوله های کوچکتری احتیاج دارند [۹].

چنانچه از گلوله هایی با ابعاد خیلی بزرگ که انرژی ضربه ای بیش از مقدار مورد نیاز شکست کانسنگ را فراهم می کند استفاده شود، مصرف گلوله بالا رفته و کاهش آهنگ شکست در ذرات ریز و در نهایت کاهش راندمان خردایش را به همراه خواهد داشت. کوچک بودن گلوله ها نیز باعث کاهش آهنگ شکست ذرات درشت و افزایش نرمه می شود. توزیع دانه بندی ذرات محصول نیز پراکنده تر می شود. به همین علت باید ابعاد بهینه گلوله جهت رسیدن به بالاترین راندمان کاری عملیات خردایش تعیین شود. از سوی دیگر، افزایش حجم گلوله باعث افزایش توان کشی می شود که باید میزان افزودن گلوله در آسیای خودشکن با در نظر گرفتن توانایی آسیا و فونداسیون آن صورت گیرد. همچنین افزودن گلوله به آسیا موجب افزایش هزینه های عملیاتی می شود. زیرا علاوه بر هزینه گلوله های فولادی مصرفی، هزینه فرسایش بالابرها و آسترهای آسیا نیز افزایش می یابد.

تبدیل آسیای خودشکن به نیمه خودشکن نیازمند بهینه سازی شرایط عملیاتی آسیا و مدار آسیاکنی نیز هست تا بتوان شرایط پایداری را برای آسیا ایجاد نمود. در

آسیاها، ساز و کار تخلیه ی مواد از آسیا، هدرروی انرژی به دلیل اصطکاک در اجزای محرکه آسیا و توان لازم برای حرکت دادن آسیای خالی را با در نظر گرفتن رابطه های تحلیلی و استفاده از ضرایب تصحیح تجربی، به رابطه توان کشی خالص اضافه کرد. آنها همچنین تاثیر تفاوت های عملیاتی بین آسیاهای گلوله ای با آسیاهای خودشکن و نیمه خودشکن را با ارائه رابطه هایی که برای چگالی بار در مدل توان کشی ارائه شده، در نظر گرفته اند. این پژوهشگران رابطه نهایی برای پیش بینی توان در آسیاهای صنعتی را بر اساس شکل ۲ و به صورت رابطه (۸) ارائه کرده اند.



شکل ۲: الگوریتم محاسبه توان کشی آسیا بر اساس مدل مورل [۸]

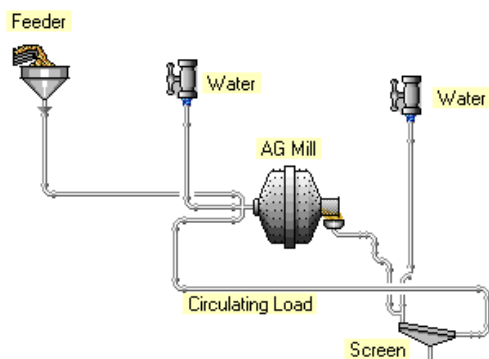
$$P_{Gross} = P_{No-Load} + k(P_{net} + P_c) \quad (8)$$

در رابطه (۸)، P_{Gross} توان ناخالص، $P_{No-Load}$ توان لازم برای چرخاندن آسیای خالی، k ضریب تصحیح برای هدرروی ها (۱/۲۱۵)، P_{net} توان خالص برای گرداندن بار در قسمت استوانه ای، P_c توان خالص برای گرداندن بار در دو انتهای استوانه ای آسیا است.

همچنین توان خالص برای بخش های استوانه ای و مخروطی و توان برای دوران آسیای خالی محاسبه می گردید. لذا مدل بالا حرکت بار خردکننده را بر اساس توان مصرفی برای بازه وسیعی از شرایط عملیاتی و طراحی پیش بینی می نماید. در نرم افزار مذکور برای محاسبه توان کلی، با ورود میزان سرعت بحرانی، وزن مخصوص گلوله و تخلخل سنگ و گلوله میزان توان کشی محاسبه می شود [۲].

۲-۵- نیمه خودشکنی کردن آسیاهای خودشکن

برای شبیه‌سازی آسیای خودشکن چغارت ابتدا یک نمونه معرف از جریان‌های ورودی و خروجی آسیای خودشکن، تهیه شد (شکل ۳).



شکل ۳: مدار آسیای خودشکن کارخانه فرآوری چغارت
برای تهیه نمونه از خوراک ورودی دانه درشت، بعد از باردهی توسط ریکلایمر و پایدار شدن شرایط باردهی، نوار ورودی به انبار خوراک قبل از آسیای خودشکن چغارت متوقف گردید. سپس نمونه دانه درشت از طول حدود ۳ متر نوار به طور کامل برداشت شد. همچنین حدود ۵۰ قطعه با ابعاد بزرگ‌تر از ۷۵ میلی‌متر از ۷ متر طول نوار برداشت شد [۱۰]. از ترکیب تجربه سرندي این دوبخش، توزیع ابعاد بار اولیه در واحد طول نوار نقاله مشخص شد.

در مراحل اولیه این پژوهش، نمونه‌برداری در یک دوره زمانی یک ساعته از نوار نقاله ورودی آسیای خودشکن انجام شد و داده‌های عملیاتی مربوط به هر دوره نمونه‌گیری (شامل: توان مصرفی آسیا و تناژ ورودی به آسیا، دانه‌بندی محصول آسیا، درجه حرارت و فشار قبل و بعد از آسیا) ثبت شدند. هم‌زمان از بخش عبوری از سرندي (بار برگشتی) و ته ریز سرندي (زیرسرندي)، در فواصل زمانی ۱۵ دقیقه نمونه‌برداری شد. از نتایج تجزیه سرندي نمونه‌های بخش عبوری از سرندي و بخش باقیمانده روی سرندي برای بازسازی محصول آسیا استفاده شد [۱۰].

۳-۲- خصوصیت‌سنجی خوراک آسیای خودشکن

آسیاهای خودشکن به تغییر در شرایط کیفی خوراک (ابعاد و سختی) بسیار حساس هستند. به گونه‌ای که با کاهش ابعاد سنگ ورودی یا افزایش سختی، کارایی آسیا کاهش می‌یابد [۲]. به همین جهت خصوصیت‌سنجی بار اولیه با استفاده از آزمایش‌های وزنه افتان و آسیای سایش، برای تعیین پارامترهای توابع شکست و انتخاب در نرم‌افزار مورد استفاده، ضروری بود.

بهینه‌سازی مدار آسیاکنی با آسیای نیمه خودشکن معمولاً سعی بر این است که با ثابت نگه داشتن توان آسیای نیمه خودشکن، ظرفیت آسیا را افزایش داد. برای افزایش کارایی آسیای گفته شده باید توان آسیا به بستر ذرات در داخل آسیا انتقال داده شود [۹].

۲-۶- مدل سرندي و پارامترهای آن

نظر به این که آسیای خودشکن چغارت در مدار بسته با سرندي ارتعاشی (موزی) می‌باشد (شکل ۳)، در نرم‌افزار JKSimMet با توجه به این مدار و داده‌های موجود، از مدل "منحنی راندمان"^{۱۱} مرتبط با سرندي استفاده شده است.

مدل منحنی راندمان (در نرم‌افزار 211 Efficiency Curve Model) که برای مدل‌سازی سرنديها به کار می‌رود، از منحنی‌های ساده کارایی جدایش برای توصیف شرایط عملیاتی هر وسیله طبقه‌بندی‌کننده‌ای استفاده می‌کند. این مدل از پارامترهای منحنی کارایی جدایش، d_{50c} ثابت (حد جدایش تصحیح شده) و مشخصات مواد جامد و آبی که به بخش ریز دانه راه یافته تشکیل شده و به صورت رابطه (۹) است.

$$E_o \left(\frac{d}{d_{50c}} \right) = \frac{C(1+\beta \cdot \frac{d}{d_{50c}})^{\alpha} (\exp(\alpha)-1)}{\exp(\alpha \cdot \beta \cdot \frac{d}{d_{50c}}) + \exp(\alpha)-2} \quad (9)$$

که در آن E_o میزان ذرات با ابعاد d در خوراک که به سرریز راه یافته‌اند (درصد)، d_{50c} میانگین ابعاد ذرات (میلی‌متر)، d_{50c} حد جدایش تصحیح شده (میلی‌متر)، C میزان آبی که به روسرندي راه یافته (درصد)، α پارامتر میزان شیب منحنی کارایی جدایش، β پارامتر میزان قلاب بودن منحنی کارایی جدایش، β^* پارامتر محاسباتی است [۸].

۳- مواد و آزمایش‌ها

۳-۱- تهیه و شناسایی نمونه کانسنگ چغارت

در جریان این پژوهش یک کپه ۲۰۰۰۰ تنی حاوی ترکیبی از کانسنگ مگنتیتی و اکسیده، در بستر همگن‌ساز آماده و به کارخانه خوراک‌دهی شد. در زمان انجام این پژوهش محدودیت‌هایی در معدن وجود داشت که امکان فراهم آوردن باری با نسبت بالای Fe به FeO (مثلاً نسبت بالاتر از ۵) وجود نداشت.

۳-۲-۱- آزمایش شکست ضربه ای با دستگاه وزنه افتان

آزمایش وزنه افتان از روش های مستقیم آزمایشگاهی برای شناخت رفتار سنگ و تعیین تابع شکست آن در سطوح انرژی متوسط تا بالا استفاده می شود. مقادیر A و b یا پارامترهای شکست ضربه ای، مرتبط با سختی کانسنگ در برابر شکست ضربه ای است که از طریق آزمایش وزنه افتان به دست می آیند [۹]. در این آزمایش ها مقدار t_{10} که بیان گر درجه خردایش و یا اندیس خردشدگی است، از نمودارهای دانه بندی حاصل از آزمایش به دست می آید [۱۱].

رابطه (۱۰) بیان گر ارتباط بین شدت شکست (t_{10}) و انرژی ویژه شکست E_{cs} است.

$$t_{10} = A(1 - e^{-bE_{cs}}) \quad (10)$$

با استفاده از t_{10} های حاصل از آزمایش ها در سطوح مختلف انرژی و رابطه (۱۰)، به کمک روش کمینه سازی مجموع مربعات خطاها، مقادیر A و b محاسبه می شود.

مقدار پارامتر A ، شکست نمونه در سطوح انرژی خیلی بالاتر از آنچه در آسیاهای نیمه خودشکن می تواند رخ دهد را بیان می کند و پارامتر b مرتبط با شیب کلی منحنی $E_{cs}-t_{10}$ (شکل ۷) در سطوح پایین انرژی است [۹].

۳-۲-۲- آزمایش شکست سایشی (اندیس سایش)

کاهش اندازه ذرات در آسیا در اثر پدیده های سایش و فرسایش نیز رخ می دهد. آزمایش شکست یا خردایش در اثر سایش، یک آزمایش شکست در سطوح انرژی پایین است که توسط تعدادی آزمایش در یک آسیای سایشی گردان و بر روی نمونه هایی با ابعاد مشخص انجام می شود.

در آزمایش استاندارد پیشنهادی توسط مرکز JKMR، اندازه t_{10} در هر آزمایش اندازه گیری شد و پارامتر سایش به کمک رابطه (۱۱) محاسبه شد:

$$t_a = \frac{\text{cum.Pass.(\%) of } t_{10}}{10} \quad (11)$$

مقادیر کمتر t_{10} (و در نتیجه t_a) نشان دهنده درصد عبوری کمتر از یک دهم ابعاد اولیه ذرات است. بنابراین چنین نمونه ای در برابر سایش مقاومت بیشتری از خود نشان می دهد. مقدار t_a برای مواد معدنی سخت در حدود ۰/۲ و برای مواد معدنی نرم بیش از ۲ است [۹].

۳-۳- مراحل محاسبه مدل و شبیه سازی در نرم افزار JKSimMet

برای محاسبه پارامترهای مدل در نرم افزار JKSimMet ابتدا داده هایی شامل ابعاد طراحی آسیا، میزان گلوله بارگذاری شده، ظرفیت خوراک ورودی، توزیع ابعادی جریان ها، پارامترهای A ، b ، t_a ، چگالی سنگ و نرخ های شکست تخمینی وارد می شود. سپس حجم مواد کوچک تر از شبکه (عبوری از شبکه) و به طور هم زمان توزیع نرخ شکست با استفاده از درون یابی به روش اسپلاین درجه سوم در ۵ ابعاد ذره خاص محاسبه شده و انرژی ویژه شکست برای هر ابعاد ذره و تابع طبقه بندی، تخمین زده می شوند. در مرحله بعد، میزان بار آسیا و محصول به کمک "مدل اختلاط کامل" محاسبه می شود. در نهایت مقدار پیش بینی شده X_g و مقدار محاسباتی آن مقایسه می شود. چنانچه خطا زیاد باشد به مراحل قبل بازگشته و با محاسبه مجدد توزیع نرخ شکست، تخمین انرژی ویژه شکست برای هر ابعاد ذره و تخمین تابع طبقه بندی مجدداً میزان بار آسیا و محصول محاسبه می شود. همان گونه که در مراحل مدل سازی مشاهده می شود رابطه های انتقال و خروج مواد بسیار مهم هستند [۸].

زمانی که پارامترهای مدل مربوط به فرآیند مشخص شد، شبیه سازی مدار امکان پذیر می شود. در این مرحله پارامترهای مدل که در مرحله برازش مدل مشخص شدند ثابت نگه داشته می شوند و با تغییر در پارامترهای مدل، گزینه های مختلف آزمایش می شوند تا به این ترتیب خروجی های به دست آمده با داده های اندازه گیری شده مقایسه شوند.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- مشخصات شیمیایی نمونه کانسنگ چغارت

نمونه تهیه شده از کپه خوراک ورودی به مدار آسیای چغارت مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفت که نتایج به دست آمده در جدول ۱ ارائه شده است. مشاهده می شود نسبت Fe به FeO یا در واقع سهم بخش اکسیده، در این نمونه در حد متوسط است. عیار نمونه به طور نسبی کمتر از خوراک مورد نظر کارخانه است.

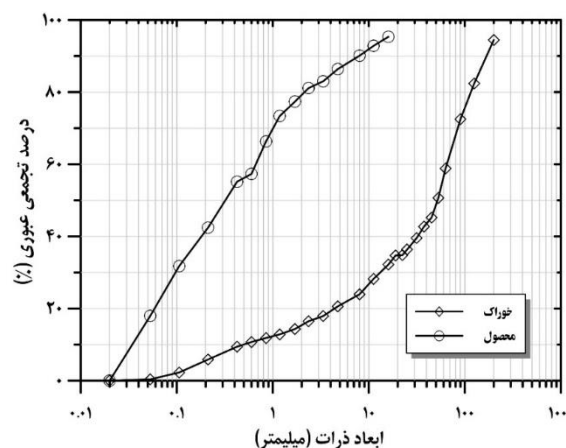
جدول ۱: آنالیز شیمیایی نمونه تهیه شده از کانسنگ چغارت

نمونه	Fe (%)	FeO (%)	P (%)	Ratio (Fe/FeO)
۱	۵۰/۸۴	۱۳/۳۱	۱/۳	۳/۸۲

۲-۴- دانه‌بندی جریان ورودی و خروجی آسیای خودشکن

پس از نمونه‌گیری از جریان‌های ورودی و خروجی آسیای خودشکن بر اساس روش شرح داده شده، نتایج دانه‌بندی مطابق شکل ۴ به دست آمد. همان گونه که در شکل دیده می‌شود، d_{80} محصول آسیای خودشکن حدود ۱/۹ میلی‌متر و d_{80} خوراک ورودی ۱۱۷ میلی‌متر است. بدین ترتیب نسبت خردایش آسیای خودشکن چغارت حدود ۶۱ به دست آمد. هر چند کارایی آسیا را نمی‌توان فقط با نسبت خردایش ارزیابی کرد ولی این میزان نسبت خردایش برای آسیاهای خودشکن به طور نسبی خیلی کم است. برای خردایش سنگ آهن با آسیای خودشکن موادی با ابعاد ۱۲۵ میلی‌متر لازم است که این مواد در خوراک ورودی آسیای خودشکن چغارت وجود نداشت و از جمله عوامل موثر بر عملکرد تجهیز است [۱۲].

دامنه دانه‌بندی ذرات ورودی به آسیا را می‌توان با کنترل آتشباری، خفه کار کردن سنگ‌شکن و همگن‌سازی مناسب کنترل کرد، اما ۳ دلیل عمده پیشنهاد شارژ گلوله به آسیای خودشکن در زمان خوراک‌دهی سنگ با سختی بالا را تقویت می‌کرد: الف) وجود انبارهای عظیمی از سنگ آهن استخراج شده در معدن چغارت که عملاً کارخانه مجبور به استفاده از آن هست و بهینه‌سازی آتشباری امکان پذیر نخواهد بود، ب) تغییرات زیادی که در سختی سنگ معدن چغارت وجود دارد و ج) با افزایش عمق پیت معدن چغارت، سنگ معدن به مرور سخت‌تر می‌شود و ذخیره معدن چغارت رو به اتمام است.



شکل ۴: توزیع ابعادی خوراک ورودی و محصول آسیای خودشکن چغارت

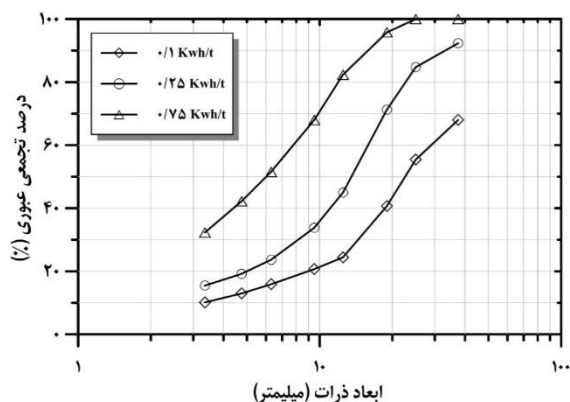
۳-۴- آزمایش شکست ضربه‌ای با دستگاه وزنه افتان

آزمایش شکست ضربه‌ای با دستگاه وزنه افتان در آزمایشگاه کانه‌آرایی دانشگاه یزد انجام و سطوح انرژی پیشنهادی مطابق جدول ۲ تعیین شد.

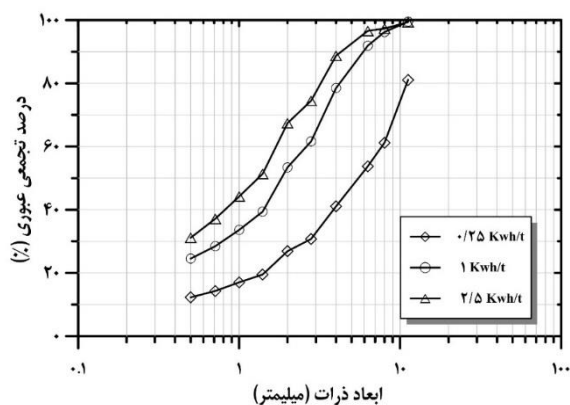
جدول ۲: فراکسیون‌های ابعادی و دامنه انرژی پیشنهادی

برحسب kWh/t برای کانسنگ چغارت					
آزمایش	-۱۶+۱۳/۲	+۱۹	+۲۶/۵	+۳۷/۵	+۵۳
میلی‌متر	-۲۲/۴	-۳۱/۵	-۴۵	-۶۵	
۱	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۱	۰/۱
۲	۱	۱	۱	۰/۲۵	۰/۱۵
۳	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۰/۷۵	۰/۲۵

پس از انجام آزمایش‌ها، نمودارهای توزیع ابعادی محصول شکست، یعنی درصد تجمعی عبور کرده از اندازه ذره اولیه (میانگین هندسی محدوده ابعادی) ترسیم شد. شکل‌های ۵ و ۶ برخی از نتایج حاصل را نشان می‌دهند.



شکل ۵: توزیع ابعادی محصول شکست با ابعاد اولیه (۳۷/۵+۴۵-) در سطوح مختلف انرژی



شکل ۶: توزیع ابعادی محصول شکست با ابعاد اولیه (۱۲/۵+۱۶-) در سطوح مختلف انرژی

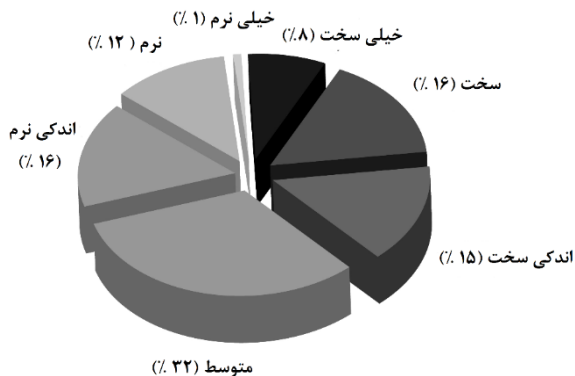
با استفاده از ترکیب‌های ذکر شده از اندازه ذرات و سطوح انرژی، t_{10} های مربوط به هر آزمایش اندازه‌گیری شد و با برازش به کمک روش کمینه‌سازی مجموع مربعات خطاها،

نتایج حاصل از آزمایش بر روی کانسنگ چغارت نشان داد که مقدار P_A یا میزان ذرات با سایز اولیه که به وسیله عملیات سایش به ابعاد ریزتر منتقل شده اند ۱۰ درصد، مقدار D_A که اندازه بزرگترین ذره حاصل شده از عملیات سایش است برابر 0.425 میلی متر و مقدار λ_A یا شیب بخش خط راست منحنی در ناحیه محصول سایش 0.179 است. در نهایت مدل تابع شکست برای محصول عملیات سایش به صورت رابطه (۱۳) ارائه شد:

$$A(x, D_A) = \left(\frac{x}{0.425}\right)^{0.179} \quad (13)$$

۴-۵- سختی نسبی کانسنگ چغارت

براساس آزمایش های انجام شده توسط مرکز تحقیقات JKMR، توزیع فراوانی سختی کانسنگ ها بر اساس دو پارامتر $A \times b$ به صورت شکل ۹ است. مبنای طبقه بندی کانسنگ ها بر حسب پارامترهای حاصل از آزمایش های وزنه افتان و سایش بوده که در جدول ۳ ارائه شده است. برای این نوع از کانسنگ چغارت مقدار پارامتر $A \times b$ $78/31$ و پارامتر t_a $1/0.04$ به دست آمد که با توجه به طبقه بندی ارائه شده، این کانسنگ در مقابل شکست ضربه ای و شکست سایشی جزء سنگ های نرم محسوب می شود.



شکل ۹: توزیع سختی کانه ها براساس پارامترهای $A \times b$ [۱۳]

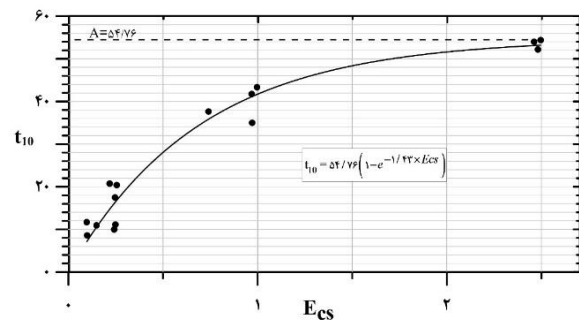
جدول ۳: طبقه بندی سنگ بر اساس آزمایش های بار افتان و سایش

توصیف پارامتر	$A \times b$	خیلی سخت	سخت	اندکی سخت	متوسط	اندکی نرم	نرم	خیلی نرم
$A \times b$	< 30	$30-38$	$38-43$	$43-56$	$56-67$	$67-127$	> 127	
t_a	< 0.24	$0.24-0.35$	$0.35-0.41$	$0.41-0.54$	$0.54-0.65$	$0.65-1.38$	> 1.38	

شکل گفته شده مقادیر کمتر $A \times b$ نشانه سخت تر بودن کانه در مقابل شکست ضربه ای است. باتوجه به مطالعات قبلی انجام گرفته به نظر می رسد با افزایش نسبت Fe به FeO در کانسنگ چغارت میزان سختی سنگ چغارت نیز افزایش می یابد و می توان گفت در

مقادیر A و b به ترتیب برابر با $54/76$ درصد و kwh/t $1/43$ محاسبه شد (شکل ۷). مدل خودشکنی (شکست ضربه ای) با مقدار R^2 (ضریب رگرسیون) برابر 0.94 به صورت رابطه (۱۲) ارائه شد.

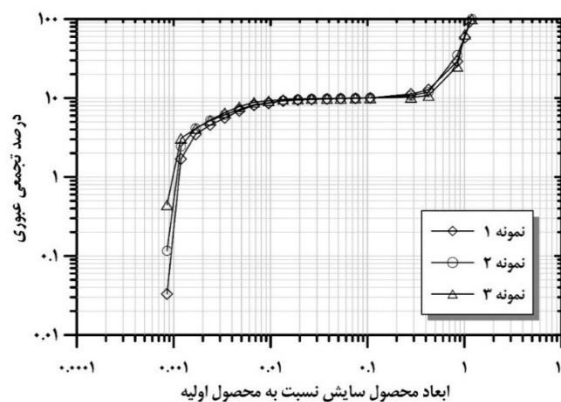
$$t_{10} = 54.76 \times (1 - e^{-1.43 \times E_{cs}}) \quad (12)$$



شکل ۷: نتایج آزمایش سقوط وزنه بر روی نمونه بار اولیه چغارت

۴-۴- آزمایش شکست سایشی (اندیس سایش)

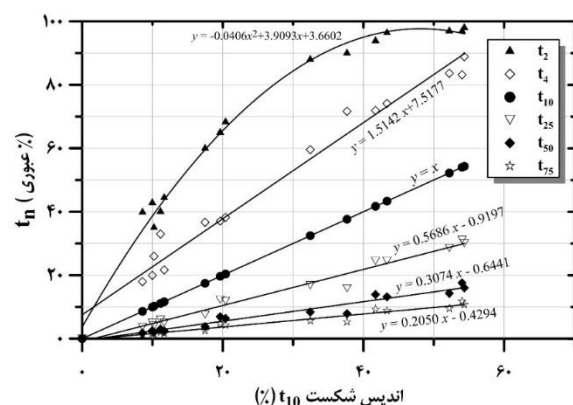
سه نمونه معرف از سنگ چغارت به وسیله آسیای گردان سایش مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج حاصل در شکل ۸ ارائه شده است. از روی نمودارها مقدار متوسط t_a $1/0.04$ درصد به دست آمد.



شکل ۸: نتایج آزمایش نمونه چغارت در عملیات سایش توسط آسیای گردان آزمایشگاهی

در شکل ۱۰ نتایج حاصل از آزمایش های انجام شده بر روی کانسنگ چغارت با داده های JKSimMet مقایسه شده است. این مقایسه دید بهتری نسبت به کانسنگ چغارت در مقابل کانسنگ هایی با ترکیبات دیگر ارائه می دهد. مطابق

برای مدلسازی فرآیند شکست، یک روش ساده ارتباط انرژی با کاهش ابعاد است. در مرکز JKMRC با استفاده از این روش و با گروهی از منحنی‌های t که بیانگر توزیع ابعادی مواد حاصل از شکست فرآیند بوده، مدلسازی شکست انجام می‌شود. این مجموعه از منحنی‌های t برای توصیف شکست کانه به کار می‌رود، به گونه‌ای که نقاط شاخص t_2 ، t_4 ، t_{10} ، t_{25} و t_{75} به صورت ماتریسی در برابر t_{10} ایجاد می‌شود که می‌توان به کمک معادلات برازش شده به ازای هر انرژی، یک مقدار t_{10} را محاسبه نمود. این مجموعه منحنی‌ها برای کانسنگ چغارت در شکل ۱۲ نشان داده شده است. نقاط شاخص t_2 ، t_4 ، t_{10} ، t_{25} ، t_{50} و t_{75} بیانگر درصد تجمعی عبوری از سرنندی به اندازه $1/n$ میانگین هندسی ابعاد اولیه است. هر خط عمودی در نمودار شکل ۱۲ (مقادیر t_{10}) نماینده یک توزیع ابعادی کامل شکست در انرژی معینی است [۹، ۱۷-۱۹].

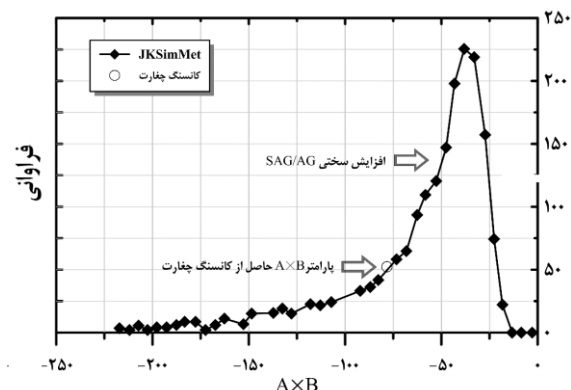


شکل ۱۲: مجموعه منحنی‌های t محاسبه شده کانسنگ چغارت در نهایت با استفاده از منحنی‌های رسم شده (شکل‌های ۷ و ۱۲)، مقادیر تابع توزیع شکست (B_{ij}) محاسبه شد. مقادیر محاسبه شده تابع شکست برای کانسنگ چغارت در جدول ۴ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که برای ذرات در محدوده ابعاد ۱۶ تا ۳۱ میلی‌متر، مقادیر تابع شکست غیر تجمعی به طور نسبی بیش‌تر است. بنابراین ذرات با این ابعاد توانند بخشی ذرات بحرانی ایجاد شده داخل آسیا باشند.

۴-۷- تعیین تابع انتخاب

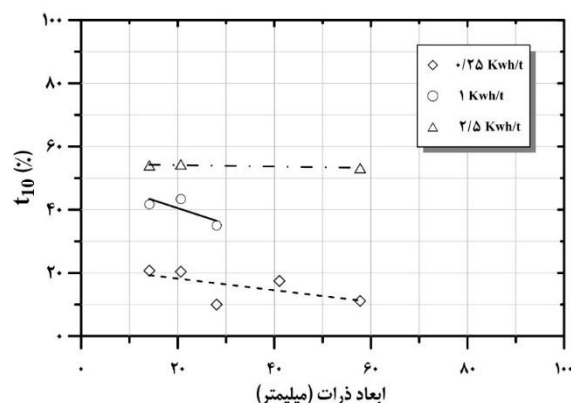
پس از تعیین پارامترهای آزمایش وزنه افتان و آزمایش شکست سایشی، با ورود داده‌ها در نرم‌افزار JKSimMet، مدلسازی انجام شد [۴-۵].

طبقه‌بندی سنگ‌ها از نظر شکست ضربه‌ای و سایشی، کانسنگ چغارت در رده سنگ‌های متوسط تا نرم قرار می‌گیرد [۱۵-۱۶].



شکل ۱۰: مقایسه نتایج آزمایش روی کانسنگ چغارت با داده‌های تقریبی JKSimMet [۱۴]

از دیگر ویژگی‌های جالب آزمایش وزنه افتان، اندازه‌گیری تغییرات سختی سنگ برحسب ابعاد (از ۱۳/۲ تا ۶۵ میلی‌متر) است. این مشخصه برای سنگ چغارت (با توجه به محدودیت‌های دستگاه وزنه افتان آزمایشگاه دانشگاه یزد) به صورت شکل ۱۱ است.



شکل ۱۱: تغییرات سختی سنگ چغارت با ابعاد مختلف براساس آزمایش وزنه افتان

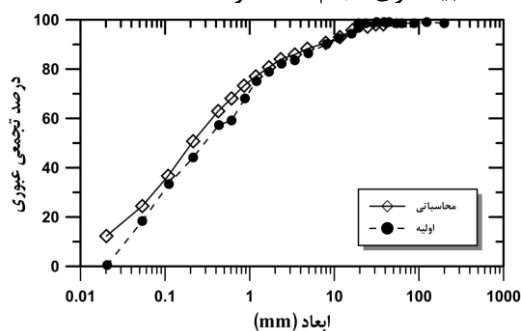
همان‌طور که در شکل ۱۱ دیده می‌شود در کانسنگ چغارت با افزایش ابعاد، میزان خردایش (t_{10}) کاهش یافته است یا به عبارتی سختی سنگ (در مقابل ضربه) با افزایش ابعاد سنگ، افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد که سنگ‌های سخت‌تر در ابعاد درشت‌تر در بار اولیه حضور دارند. از این نمودارها می‌توان برای پیش‌بینی کیفیت سنگ در بازه‌های ابعادی که آزمایش انجام نشده نیز استفاده نمود.

۴-۶- محاسبه تابع شکست کانسنگ چغارت

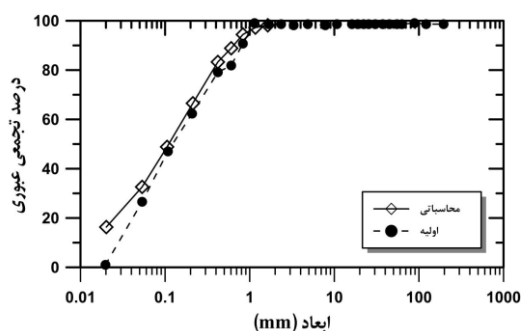
جدول ۴: مقادیر محاسبه شده تابع توزیع شکست کانسنگ معدن چغارت

ابعاد (میلی متر)	تابع شکست	ابعاد	تابع شکست	ابعاد	تابع شکست
۲۵۰	۰	۴۴	۰/۱۶۶۲۷۷	۸	۰/۰۷۳۹۹۷
۱۷۷	۰/۱۵۹۷۱	۳۱	۰/۱۱۷۵۷۵	۶	۰/۰۶۰۴۴۷
۱۲۵	۰/۱۱۲۹۳	۲۲	۰/۱۰۱۶۴۹	۴	۰/۰۴۷۱۳۱
۸۸	۰/۰۶۷۸۸۳	۱۶	۰/۱۰۰۰	۳	۰/۰۴۷۰۸۱
۶۳	۰/۰۴۸۰۰۱	۱۱	۰/۰۷۰۷۵۲	۲	۰/۰۲۰۱۰۴

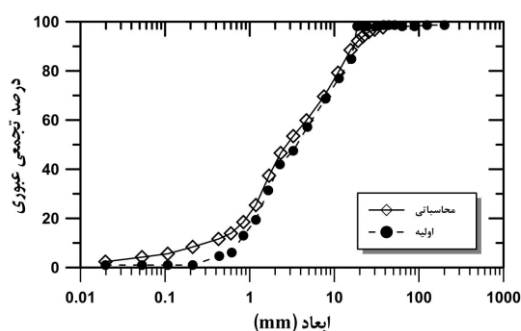
طور که در شکل مشاهده می شود نقاط منحنی واقعی با منحنی شبیه سازی شده انطباق مناسبی دارد و مجموع مربعات خطا نیز ۰/۱۱۱ محاسبه شده است که دلالت بر صحت شبیه سازی انجام شده دارد.



شکل ۱۴: مقایسه دانه بندی خروجی آسیای خود شکن مدار اندازه گیری شده و شبیه سازی شده



شکل ۱۵: مقایسه دانه بندی زیر سرندي آسیای خود شکن مدار اندازه گیری شده و شبیه سازی



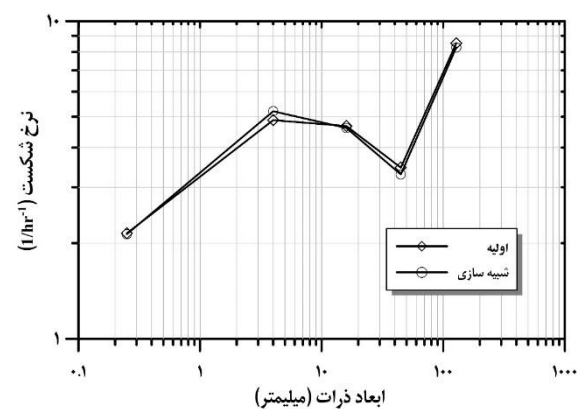
شکل ۱۶: مقایسه دانه بندی بار برگشتی آسیای خود شکن مدار اندازه گیری شده و شبیه سازی

پس از انجام برازش، نرخ های شکست برای کانسنگ معدن چغارت توسط نرم افزار پیش بینی شد که نتایج آن در جدول ۵ و شکل ۱۳ ارائه شده است.

جدول ۵: نرخ های شکست محاسبه شده توسط نرم افزار

JkSimMet برای نمونه چغارت

ابعاد (میلی متر)	نرخ شکست اولیه	نرخ شکست شبیه سازی شده
۱۲۸	۸/۵۲۰	۸/۲۶
۴۴/۸	۳/۴۵۸	۳/۲۹۳
۱۶	۴/۶۷۶	۴/۶۱۰
۴	۴/۸۸۱	۵/۲۰۴
۰/۲۵	۲/۱۴۸	۲/۳۱۵



شکل ۱۳: توزیع نرخ های شکست پیش بینی شده کانسنگ معدن چغارت توسط نرم افزار JkSimMet

۴-۸- شبیه سازی مدار آسیای خود شکن چغارت

پس از شبیه سازی مدار آسیای خود شکن با روشی که قبلاً توضیح داده شد، مقایسه نتایج به دست آمده از نرم افزار و داده های اندازه گیری شده در مدار، به شرح زیر انجام گرفت:

۴-۸-۱- بررسی توزیع ابعادی خروجی از آسیا

در نمودارهای شکل های ۱۴ تا ۱۶ توزیع ابعادی خروجی آسیا (بازسازی شده) و بخش های زیرسرندي و روسرندي در حالت های واقعی و شبیه سازی شده، مقایسه شده اند. همان

۴-۸-۲- بررسی توان‌کشی آسیا

یکی دیگر از عواملی که به صورت هم‌زمان با نتایج بالا باید مورد توجه قرار گیرد، مسئله توان‌کشی آسیاها است که بیش از ۵۰ درصد از هزینه‌های عملیاتی کارخانه فراوری مواد معدنی را به خود اختصاص می‌دهند. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی توان مصرفی با حالت واقعی (آسیای خودشکن معدن چغارت) در جدول ۶ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج حاصل از توان مصرفی نیز در مدار واقعی و شبیه‌سازی شده به هم نزدیک است و صحت شبیه‌سازی توان مصرفی را نیز تأیید می‌کند.

جدول ۶: نتایج حاصل از شبیه‌سازی توان مصرفی توسط نرم‌افزار JKSimMet

توان ناخالص (KW)	توان بدون بار (KW)	روش محاسبه توان
۲۸۶۳	۲۷۰/۸	توان شبیه‌سازی شده
۲۸۱۶	---	توان واقعی

۴-۸-۳- بررسی تبدیل آسیای خودشکن معدن چغارت به نیمه خودشکن

پس از شبیه‌سازی مدار تاثیر افزودن گلوله به آسیای خودشکن معدن چغارت در نرم‌افزار JKSimMet مورد بررسی قرار گرفت. مقدار ۵ درصد و ۱۰ درصد حجم آسیا گلوله‌های با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر به آسیای خودشکن اضافه شد که نتایج این تغییر همراه با شرایط اولیه در جدول ۷ آمده است.

جدول ۷: نتایج حاصل از شبیه‌سازی توان مصرفی توسط نرم‌افزار

وضعیت	شرایط اولیه (شبیه‌سازی شده)	افزودن ۵ درصد گلوله	افزودن ۱۰ درصد گلوله
توان مصرفی (kw)	۲۸۶۳	۳۱۸۲	۳۲۲۷
خوراک آسیا (t/h)	۵۱۵	۵۲۸	۵۴۹
زیرسرندي (t/h)	۳۶۴	۳۶۴	۳۶۴
رو سرندي (t/h)	۱۵۱	۱۶۴	۱۸۵
زیرسرندي D ₈₀	۳۶۹	۳۹۰	۴۲۱

با توجه به جدول ۷ نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد افزودن گلوله به میزان ۵ و ۱۰ درصد موجب افزایش ظرفیت خوراک‌دهی به آسیای خودشکن به ترتیب، به میزان حدود ۳ و ۷ درصد خواهد شد؛ هم‌زمان توان مصرفی آسیا، دانه‌بندی محصول آسیا و نرخ بار در گردش آسیا نیز به ترتیب، حدود ۱۱، ۱۰ و ۱۵ درصد افزایش می‌یابند. اگر چه

تاثیر سایر پارامترهای عملیاتی مانند درصد جامد بار ورودی به آسیا نیاز به بررسی دارد.

از آنجا که هم‌زمان اصلاح مدار و اضافه کردن آسیای گلوله‌ای به این مدار در حال انجام است، از این آسیا می‌توان برای آسیا کردن بیش‌تر مواد استفاده نمود. بنابراین افزایش ابعاد محصول آسیای خودشکن مشکلی در بخش‌های پایین دست به خصوص جداکننده‌های مغناطیسی، ایجاد نخواهد کرد.

۴-۹- افزودن گلوله به آسیای خودشکن در مقیاس صنعتی

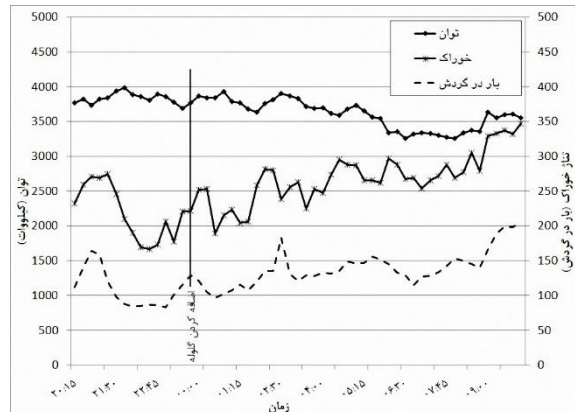
به منظور راستی آزمایی نتایج پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار، بار اولیه‌ای با نسبت Fe به FeO بیش‌تر از ۵ آماده شد و تاثیر افزودن گلوله‌های ۱۰۰ میلی‌متری در مقادیر مختلف بررسی شد (امکان فراهم کردن بار مطابق مشخصات بار اولیه مطالعه شده، با توجه به شرایط معدن وجود نداشت). با توجه به محدودیت‌های عملی، بیش‌ینه حدود ۲/۵ درصد حجمی گلوله به آسیا اضافه شد و تغییرات انجام شده در مدار با حالت خودشکنی مقایسه شد. در آغاز بررسی، میزان خوراک تازه ورودی به آسیا ۲۷۵ تن بر ساعت بود که در این حالت توان کشیده شده از آسیا به بیش‌ینه مجاز خود (۴۰۰۰ کیلووات) نزدیک شده بود. در این مرحله هم‌زمان با کاهش بار اولیه (به دلیل احتمال خطر برای آسیا)، گلوله به آسیا اضافه شد. با اضافه شدن گلوله توان کشیده شده از موتور کاهش یافت، بنابراین امکان افزایش بار اولیه تا حدود ۳۰۰ تن در ساعت فراهم شد. در این حالت توان کشیده شده کم‌تر از ۳۵۰۰ کیلووات و بار در گردش حدود ۱۵۰ تن بر ساعت بوده است. بنابراین با افزایش گلوله توان کشیده شده به تدریج کاهش یافته و در مراحل پایدار شده است، در حالی که خوراک ورودی افزایش یافته است. ضمناً تغییرات تناژ بار در گردش آسیا از روند تغییرات خوراک پیروی کرده است. شکل ۱۷ روند تغییرات توان آسیا، تناژ خوراک و بار در گردش در آسیای خودشکن معدن چغارت در هنگام اضافه کردن گلوله نشان داده شده است.

شکل ۱۸ تغییرات توزیع ابعاد محصول آسیا را در مراحل مختلف افزایش گلوله نشان می‌دهد. اگرچه در مراحل اولیه افزایش گلوله، ابعاد محصول کاهش یافته است، ولی با افزایش گلوله و گذشت زمان ابعاد افزایش یافته است.

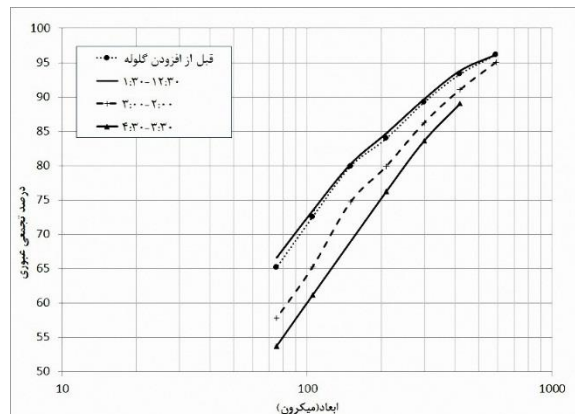
داشته و افزودن گلوله منجر به افزایش پرتدگی و در نتیجه افزایش توان کشی شده است. اما در زمان آزمایش در مقیاس صنعتی بار به صورت اکسیده بوده و چون آسیای خودشکن توانایی انجام کامل خردایش را نداشته، توان کشی زیاد شده و با افزودن گلوله که باعث خردایش و خروج مواد از آسیا شده، توان کشی کاهش یافته یا تثبیت شده است. در نهایت باتوجه به بررسی ها و تجربیات حاصله در کانسنگ چغارت به نظر می رسد با افزایش نسبت Fe به FeO سختی سنگ در برابر شکست ضربه ای افزایش می یابد. بنابراین جهت افزودن انرژی ضربه ای و خردایش بیش تر در آسیا، یکی از راه حل ها اضافه کردن گلوله بوده است. اگر چه لازم است تاثیر سایر پارامترهای عملیاتی هم مطالعه شده و همچنین تاثیر افزودن گلوله های با قطرهای متفاوت یا ترکیب گلوله ها نیز بررسی شود.

۵- نتیجه گیری

هدف از انجام این پژوهش بررسی امکان افزودن گلوله به آسیای خودشکن معدن چغارت برای افزایش بازدهی خردایش بوده است. به این منظور بار اولیه ای در قسمت همگن سازی کارخانه تهیه و به مدار آسیا خوراک دهی شده است. همزمان با این خوراک دهی نمونه هایی از بار اولیه و محصولات آسیا تهیه شد و داده های مربوط به توان، ظرفیت، تناژ و سایر اطلاعات کارخانه جمع آوری گردید. بررسی های اولیه نشان داد که F_{80} خوراک ورودی حدود ۱۱۷ میلی متر، و ابعاد مواد خروجی از آسیا حدود ۱/۹ میلی متر (P_{80} محصول آسیا ۴۲۵ میکرون) بود. بنابراین نسبت خردایش آسیا حدود ۶۱ بود که افزایش آن ضروری به نظر می رسید. مطالعات قابلیت شکست کانسنگ معدن چغارت با استفاده از آزمایش های وزنه افتان و آسیای سایش انجام شد. با استفاده از نتایج آزمایش های ضربه ای و سایش، مقادیر پارامترهای A و b و مقدار اندیس سایش، به ترتیب، برابر با ۵۴/۷۶ درصد، ۱/۴۳ kwh/t و ۱/۰۰۴ درصد محاسبه شد. بنابراین کانسنگ مورد مطالعه در این پژوهش در طبقه بندی سنگ ها از نظر شکست ضربه ای و سایشی، در رده سنگ های متوسط تا نرم قرار می گیرد. نتایج آزمایش شکست ضربه ای همچنین نشان داد که با افزایش ابعاد، سختی سنگ افزایش می یابد. در واقع سنگ هایی که سخت تر هستند با ابعاد بزرگ تری در بار اولیه حضور دارند.



شکل ۱۷: تغییرات توان آسیا، تناژ خوراک و بار در گردش در آسیای خودشکن چغارت پس از اضافه نمودن ۲/۵ درصد حجمی گلوله ۱۰۰ میلی متر



شکل ۱۸: توزیع دانه بندی محصول آسیای خودشکن چغارت قبل و بعد از اضافه کردن گلوله در زمان های مختلف

به طور کلی می توان گفت که در این مرحله d_{80} محصول از حدود ۱۵۰ میکرون به ۲۵۰ میکرون افزایش یافته است. همچنین میزان مواد بزرگ تر از ۳۰۰ میکرون در محصول سرند از ۱۱ به ۱۷ درصد افزایش یافته است. علاوه بر این ابعاد مواد باقیمانده روی سرند با افزایش گلوله، افزایش یافته است. روند نمایش داده شده در شکل های ۱۷ و ۱۸ تقریباً به جز توان کشی با نتایج حاصل از نرم افزار همخوانی داشت. ولی با توجه به اینکه میزان گلوله اضافه شده و بار اولیه با شرایط زمان شبیه سازی یکسان نبود، اعداد و ارقام به دست آمده متفاوت بود. توان کشی آسیا در شبیه سازی با افزودن گلوله به آسیا افزایش یافته است ولی در زمان آزمایش در مقیاس صنعتی با کاهش (یا تثبیت) همراه بوده است که می توان گفت این اتفاق به علت تفاوت ماهیت بار اولیه موراستفاده بوده است.

در زمان شبیه سازی، کانسنگ کمتر اکسیده بوده و آسیا به صورت خودشکن توانایی انجام خردایش بدون گلوله را

یا ترکیب گلوله‌ها انجام شود. همچنین تاثیر سایر پارامترهای عملیاتی نیز بررسی شود.

به طور کلی از نظر فنی در مواردی که بار اولیه دارای قابلیت خودشکنی نسبتاً کمی است، نیمه خودشکن کردن آسیا یکی از مهم‌ترین انتخاب‌های پیش رو است. هم‌زمان بررسی تاثیر سایر پارامترهای عملیاتی و بررسی اقتصادی این تغییرات در کارخانه ضروری است.

۶- تشکر و تقدیر

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند که از همکاری‌های بی‌دریغ مدیریت محترم شرکت سنگ آهن مرکزی ایران و مجموعه کارخانه فرآوری چغارت، به منظور فراهم آوردن امکان انجام این پژوهش، صمیمانه سپاسگزاری نمایند. همچنین از راهنمایی‌های ارزنده آقای دکتر یحیایی، عضو مرکز تحقیقات JKMRC، قدردانی می‌شود.

مراجع

- [1] Schwarz, S. and Richardson, J. (2013). Modelling and simulation of mineral processing circuits using JKSimMet and JKSimFloat. In: 2013 SME Annual Meeting & Exhibit (SME 2013)
- [2] Banisi, S. (2008). Course notes of crushing Engineering. Shahid bahonar university, Kerman, Iran (In Persian).
- [3] Parandeh, L. Dehghani, A. Khosravi, M. (2010) the comparison of the up-scaled laboratory selection function and the industrial-scale selection function. Case study Se-Chahun Ball Mill circuit. In third Conference of IRSME, bafgh (In Persian).
- [4] Bueno, M. D. P. (2013). Development of a multi-component model structure for autogenous and semi-autogenous mills.
- [5] Bueno, M. P., Kojovic, T., Powell, M. S., & Shi, F. (2013). Multi-component AG/SAG mill model. Minerals Engineering, 43, 12-21.
- [6] Mitchell, D. (2015). Improved relationships for discharge in SAG/AG mills.
- [7] Morrell, S., & Morrison, R. D. (1996). AG and SAG mill circuit selection and design by simulation. In International Conference on Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology (Vol. 2, pp. 769-790).

به کمک مدل "با نرخ‌های متغیر" شکست (مدل ۴۳۵ در نرم‌افزار) برای آسیای خودشکن، که براساس نرخ‌های شکست و شرایط عملیاتی آسیاها پایه‌گذاری شده است، نمودار توزیع نرخ‌های شکست در کانسنگ معدن چغارت پیش‌بینی شد. مجموعه منحنی‌های t نسبت به t_{10} ، تابع توزیع شکست کانسنگ چغارت محاسبه گردید.

سپس با استفاده از نتایج آزمایش‌ها و سایر داده‌های کارخانه، مدار آسیای خودشکن با استفاده از نرم‌افزار JKSimMet، شبیه‌سازی شد و نتایج آن با داده‌های اندازه‌گیری شده مقایسه گردید. مشاهده شد که نرم‌افزار توزیع ابعاد محصول آسیا را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی می‌کند.

بررسی تاثیر افزودن گلوله به آسیای خودشکن، با استفاده از نرم‌افزار JKSimMet شبیه‌سازی شد. پیش‌بینی شد که با افزودن گلوله‌های ۱۰۰ میلی‌متری به میزان ۵ درصد و ۱۰ درصد (حجمی آسیا) در شرایط فعلی خوراک ورودی کارخانه، ظرفیت آسیای خودشکن، به ترتیب، حدود ۳ و ۷ درصد افزایش می‌یابد. البته ابعاد محصول آسیا نیز حدود ۵۰ میکرون افزایش خواهد یافت. همچنین توان‌کشی آسیا و نرخ بار برگشتی نیز افزایش می‌یابند. اگر چه افزودن گلوله، موجب افزایش هزینه‌های عملیاتی شامل، هزینه‌های گلوله‌های مصرفی، هزینه بالابرها و آسترها و افزایش توان مصرفی آسیا خواهد شد، ولی برای آسیا کردن کانسنگ‌های اکسیده و با نسبت Fe به FeO بالا، در ظرفیت معقول، استفاده از این روش ضروری است. با توجه به نصب آسیای گلوله‌ای در این مدار، افزایش محصول این آسیای خودشکن مشکلی ایجاد نخواهد کرد.

راستی آزمایی نتایج شبیه‌سازی با استفاده از گلوله‌های ۱۰۰ میلی‌متری و به میزان ۲/۵ درصد حجمی آسیا بر روی بار اولیه ای با نسبت Fe به FeO بیش‌تر از نمونه قبل نیز انجام شد. مشاهده گردید با افزایش گلوله توان کشیده شده به تدریج کاهش یافته و در مراحل پایدار شده است، در حالی که میزان خوراک ورودی حدود ۸ درصد افزایش یافته است. در این شرایط d_{80} محصول نیز حدود ۹۰ میکرون افزایش نشان داد. بنابراین تقریباً روندی مشابه نتایج پیش‌بینی شده توسط شبیه‌سازی مدار داشته است. البته ضروری است مطالعات بیش‌تری روی گلوله‌های با قطرهای مختلف و

Tenke project. In CMP Conference Proceedings (pp. 19-31).

[15] Dehghani Ahmadabadi, M.(2008). Geological remodeling Choghart iron ore mine based on drilling information with geostatistic method. MSc thesis. Yazd University (In Persian).

[16] Hassani, S & Dehghani, A & Khosravi-Rad, M. (2010). Simulation of Choghart AG mill circuit using MODSIM software. IRJME, Vol 5, No 9, pp.13-25 (In Persian).

[17] Morrell, S. (2004). A new autogenous and semi-autogenous mill model for scale-up, design and optimisation. Minerals Engineering, 17(3), 437-445.

[18] Deniz, V. (2011). A new size distribution model by t-family curves for comminution of limestones in an impact crusher. Advanced Powder Technology, 22(6), 761-765.

[19] Hosseinzadeh, H., & Ergun, L. (2012). 'Determination of breakage distribution function of fine chromite ores with bed breakage method. In XIII International Mineral Processing Symposium, Bodrum, Turkey. (In Persian).

[8] JKSimMet 2001, Steady State Mineral Processing Simulator Software help file, Version 5.1, JKRC Commercial Division, Australia

[9] Napier-Munn, T. J., Morrell, S., Morrison, R. D., & Kojovic, T. (1996). Mineral comminution circuits: their operation and optimisation (Vol. 2). Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, University of Queensland.

[10] McKen, A., & Williams, S. (2006). An overview of the small-scale tests available to characterise ore grindability. Proceedings international autogenous and semiautogenous grinding technology, 4, 315-330.

[11] King, R. P. (2012). Modeling and simulation of mineral processing systems. Elsevier.

[12] Nematollahi, H. (1999). Mineral Processing (Vol. 1). Tehran University (In Persian).

[13] Rosario, P. P. (2010). Comminution circuit design and simulation for the development of a novel high pressure grinding roll circuit (Doctoral dissertation, University of British Columbia).

[14] Starkey, J., & Meadows, D. (2007, January). Comparison of ore hardness measurements for grinding mill design for the

⁷ Leung

⁸ Variable Rate

⁹ Cubic Spline

¹⁰ Morrell & Morrison

¹¹ Efficiency Curve

¹ Grate

² Shoulder Point

³ toe

⁴ Breakage rate

⁵ Appearance function

⁶ Discharge rate