

## تعیین و بزرگ مقیاس کردن ثابت نرخ سینتیک خردایش کانسنگ آهن آبرفتی سنگان

قربان ارجمند<sup>۱</sup>، سید ضیاءالدین شفائی<sup>۲\*</sup>، محمد نوع پرست<sup>۳</sup>، اکبر فرزنانگان<sup>۴</sup>، نعیمه غفاری توران<sup>۱</sup>

۱- کارشناسی ارشد فراآوری مواد معدنی، دانشکده معدن، دانشگاه تهران، ghorban\_arjmand@yahoo.com

۲- استاد دانشکده معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، kaveh\_shafaei@yahoo.com

۳- استاد دانشکده معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، noparast@ut.ac.ir

۴- استادیار دانشکده معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، farzanegan@ut.ac.ir

(دریافت ۱۴ دی ۱۳۸۸، پذیرش ۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۰)

### چکیده

نرخ ویژه خردایش یکی از پارامترهای مهم در مدل‌سازی و شبیه‌سازی مدار خردایش است. این پارامتر با تغییر شرایط خردایش تغییر می‌کند. در این تحقیق سعی شد تا تاثیر قطر آسیا و گلوله، پرشوندگی آسیا بوسیله بارخردکننده و ماده معدنی و سرعت گردش آسیا بر سینتیک خردایش بررسی شود. تابع انتخاب سنگ آهن پلاسری سنگان با دانه‌بندی ۱۰- میلی‌متر در آسیای آزمایشگاهی با قطر ۲۰۰ میلی‌متر تعیین شد و مقادیر تابع انتخاب آزمایشگاهی به آسیای پایلوت با قطر ۱۲۰۰ میلی‌متر بزرگ مقیاس شد. از نرم افزار BMCS v. 1.3 برای شبیه‌سازی آسیای پایلوت و پیش‌بینی دانه‌بندی محصول خروجی آن استفاده شد. نتیجه شبیه‌سازی انطباق خوبی با نتایج آزمایش‌های پایلوت داشت. انطباق خوب این نتایج نشان‌دهنده صحت روابط و فرآیند به مقیاس کردن تابع انتخاب از آسیای آزمایشگاهی در مقیاس کوچک به آسیای پایلوت در مقیاس بزرگتر است. بر این اساس، می‌توان با اطمینان کافی از تابع انتخاب بزرگ مقیاس شده برای شبیه‌سازی عملکرد آسیاهای بزرگتر در مقیاس صنعتی برای اهداف طراحی استفاده نمود.

### کلمات کلیدی

مدلسازی و شبیه‌سازی، سینتیک خردایش، بزرگ مقیاس کردن تابع انتخاب، سنگان

## ۱- مقدمه

روش متداول برای انتخاب آسیاها به هنگام طراحی مدارهای آسیاکنی بر اساس رابطه باند برای تخمین انرژی الکتریکی مورد نیاز صورت می‌گیرد:

$$W = 11w_i \left( \frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) \quad (1)$$

در این رابطه  $W$  انرژی مورد نیاز ویژه  $W_i$  (kWh/t)، اندیس کار باند (kWh/ton) و  $F_{80}$  و  $P_{80}$  بترتیب اندازه خوراک ورودی به آسیا و محصول خروجی از آن هستند [۱]. این روش دارای نارسایی‌هایی است. برای مثال، در این روش سرعت بحرانی، مقدار پرشوندگی و زمان اقامت ذرات در آسیا در نظر گرفته نمی‌شوند. در برخی از موارد، نتایج حاصل از طراحی‌های انجام گرفته با استفاده از روش باند انتظارات از مدار خردایش را تأمین نموده است.

در صورت مشخص بودن سرعت و نحوه شکست و همچنین زمان انجام خردایش، در واقع تمام جوانب خردایش در نظر گرفته می‌شود. سرعت خردایش و نحوه شکست بترتیب تابع انتخاب و شکست نامیده می‌شود. زمان خردایش نیز بوسیله توزیع زمان اقامت توصیف می‌شود [۲، ۳].

تابع شکست با تغییر شرایط آسیا تغییر نمی‌کند. ولی تابع انتخاب بستگی به شرایط آسیا کنی مانند قطر آسیا، قطر و چگالی گلوله‌های بکار رفته در آن، سرعت چرخش آسیا و پرشوندگی‌های آسیا بوسیله گلوله و پودر دارد. بنابراین در صورت تغییر هر یک از شرایط فوق تابع انتخاب نیز متناسب با آن تغییر می‌کند [۲، ۳]. برای مثال تعداد متوسط برخوردی که گلوله در اثر آبشار کوچک باعث می‌شود متناسب با  $D$  (قطر داخلی آسیا) است. همچنین در کسری از سرعت بحرانی تعداد گردش آسیا در هر واحد زمان بستگی به  $1/\sqrt{D}$  دارد. با ترکیب این فاکتورها و با فرض اینکه هر برخورد منجر به خرد شدن شود،

$$S_i \propto \frac{D}{\sqrt{D}} \Rightarrow S_i \propto D^{0.5} \quad (2)$$

بنابراین تابع انتخاب ( $S_i$ ) متناسب با ریشه دوم قطر آسیا است [۳].

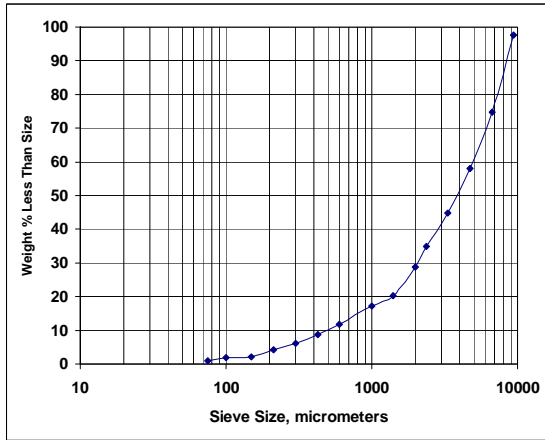
مدلسازی و شبیه سازی فرآیندهای خردایش امروزه جایگاه خود را بعنوان ابزاری برای بهینه سازی و طراحی مدارهای خردایش پیدا کرده است، و بتدریج میان مهندسان فرآوری مواد معدنی بیشتر شناخته شده و مورد پذیرش قرار می‌گیرد. تابع انتخاب از پارامترهای مورد نیاز برای مدلسازی و شبیه

سازی فرآیند خردایش است. معمولاً برای تعیین تابع انتخاب آسیایی با اندازه‌های بزرگتر (آسیای در حال طراحی)، ابتدا مقادیر تابع انتخاب کانسنگی مشخص در آسیای آزمایشگاهی با ابعاد کوچکتر و مشخصات معلوم، تعیین می‌شود، سپس این مقادیر آزمایشگاهی با توجه به مشخصات آسیای بزرگتر، بزرگ مقیاس می‌شوند [۲]. تابع (توزیع) شکست نیز پارامتر دیگر مورد نیاز در پروژه‌های مدلسازی و شبیه سازی می‌باشد که با انجام آزمایش‌های تعیین تابع شکست و به کمک نرم افزارهایی مانند BFDS (Breakage Function Determination Software) قابل محاسبه است [۴].

معدن سنگ آهن آبرفتی سنگان در استان خراسان رضوی قرار دارد. اجرای آزمایشهای خردایش پایلوت بخشی از مراحل طراحی کارخانه فرآوری این معدن بوده است. طبق طراحی انجام شده کانسنگ بعد از خردایش و پرعبارسازی بوسیله جداکننده مغناطیسی خشک وارد آسیای گلوله‌ای برای رسیدن به درجه آزادی می‌شود. درجه آزادی این کانسنگ ۱۰۰ میکرون است و بزرگترین ابعاد بار ورودی به این مرحله ۱۰ میلیمتر است. اعظمی، فرزائگان و خدادادی [۵] قبلاً مطالعاتی را بر روی نمونه‌های کانسنگ آنومالی‌های B و C سنگان با آسیای گلوله‌ای آزمایشگاهی برای شبیه سازی عملکرد یک آسیای پیشنهادی انجام داده‌اند. در تحقیق حاضر، ابتدا تابع شکست و تابع انتخاب نمونه‌ای از کانسنگ آبرفتی سنگان در مقیاس آزمایشگاهی تعیین شد. سپس این توابع بر اساس روش رایج شده در منابع [۲ و ۳] به مقیاس بالاتر (آزمایش‌های پایلوت) تعمیم داده شده و شبیه سازی مدار آسیاکنی پایلوت انجام شد. با مقایسه نتایج شبیه‌سازی و داده‌های اندازه‌گیری شده واقعی، روش بزرگ مقیاس کردن به کار گرفته شده برای استفاده در طراحی مدارهای آسیاکنی صنعتی مورد اعتبار سنجی تفصیلی قرار گرفت [۶].

## ۲- بررسی در مقیاس آزمایشگاهی

بررسی‌های در سطح آزمایشگاهی به وسیله آسیای با مشخصات شرح داده شده در جدول (۱) انجام گرفت. بزرگترین ابعاد ذره‌هایی که در این آسیا خرد شد ۲/۳ میلیمتر بود. در این مجموعه آزمایشها تابع شکست و تابع انتخاب آزمایشگاهی تعیین شد. برای تعیین تابع انتخاب آزمایشهای مجزایی انجام نگرفت و از داده‌های حاصل از آزمایشهای تعیین تابع شکست برای محاسبه آن استفاده شد.



شکل ۱- نمودار درصد تجمعی عبور کرده از سرندها، بار ورودی به آسیای پایلوت

فراکسیونهای ابعادی محدود باید با دقت تهیه شوند چون عدم دقت در این مرحله موجب خطای زیادی در نتیجه نهایی خواهد شد.

### ۲-۲- تعیین میزان پرشدگی بوسیله گلوله و پودر در آسیا

برای تعیین درصد حجمی از آسیا که بوسیله بار خردکننده پر می‌شود، می‌توان از رابطه (۳) استفاده کرد.

$$J = \frac{W_b / \rho_b}{V_m} \times \frac{1}{0.6} \quad (3)$$

که در آن  $W_b$ ،  $\rho_b$  و  $V_b$  بترتیب وزن گلوله، چگالی گلوله و حجم داخلی آسیا می‌باشد. در این حالت فرض بر آن است که بستر گلوله‌ها دارای ۴۰ درصد تخلخل می‌باشد [۳]. مقدار پرشدگی آسیا بوسیله پودر (شارژ)،  $f_c$  که کسر حجمی پرشده آسیا بوسیله پودر نیز نامیده می‌شود، با در نظر گرفتن ۴۰ درصد تخلخل برای بستر پودر بوسیله رابطه (۴) تعریف می‌شود.

$$f_c = \frac{W_p / \rho_p}{V_m} \times \frac{1}{0.6} \quad (4)$$

که در آن  $W_p$ ،  $\rho_p$  و  $V_m$  بترتیب وزن پودر، چگالی پودر و حجم داخلی آسیا است [۳].

برای نسبت دادن بارگذاری پودر به بارگذاری گلوله، از پارامتر  $U$  که بوسیله رابطه (۵) تعریف می‌شود استفاده می‌شود.

در واقع  $U$  کسری از حجم بین گلوله‌ها در حالت متوقف آسیا است که بوسیله پودر (یا پالپ) پر می‌شود [۳].

### ۲-۱- تعیین دانه بندی بار ورودی به آسیا و تهیه فراکسیونهای ابعادی محدود

با استفاده از سری سرندهای با نسبت  $\sqrt{2}$  بین ابعاد روزنه سرندها، بار ورودی به آسیا (۱۰- میلیمتر) مورد تجزیه سرندهای قرار گرفت. شکل (۱) منحنی درصد تجمعی عبور کرده از سرندها را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود D80 نمونه ۷/۵ میلیمتر است. برای انجام آزمایشهای تعیین تابع شکست و انتخاب نیاز به فراکسیونهای ابعادی محدود است. بدین منظور برای تهیه هر فراکسیون، سرندها مربوط به آن به مدت حداقل ۱۵ دقیقه سرندها شد.

جدول ۱- مشخصات آسیاهای آزمایشگاهی و پایلوت مورد استفاده

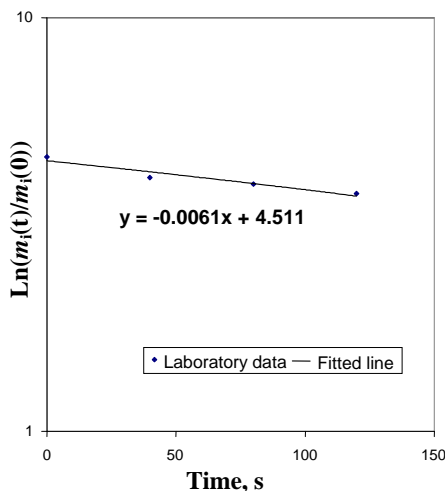
نام پارامتر	آسیای آزمایشگاهی	آسیای پایلوت
قطر آسیا (m)	۰/۲	۱/۲
طول آسیا (m)	۰/۲	۱/۸
پر شدگی حجم آسیا		
توسط بار خردکننده (%)	۲۰	۳۵
پر شدگی فضای بین گلوله‌های (%)	۲۲	۱۰۰
$\phi$ (%)	۸۸	۷۷
وزن گلوله‌ها (kg)	۶	۳۳۰۰
اندازه گلوله (mm)		
۱۵/۸	۶/۷	-
۱۹	۱۰	-
۲۵	۳/۵	۳
۳۱/۷	۳/۵	-
۳۸	۴۳/۶	-
۴۰	-	۸
۵۰	-	۱۹
۶۰	-	۳۹
۸۰	-	۳۱

$$U = \frac{f_c}{0.4 J} \quad (5)$$

$$\ln \left[ \frac{m_i(t)}{m_i(0)} \right] = -S_i t \quad (6)$$

که در آن  $m_i(t)$  مقدار جرم باقیمانده روی سرنده نام پس از گذشت زمان  $t$  از شروع خردایش و  $m_i(0)$  مقدار جرم باقیمانده روی سرنده نام در زمان صفر یعنی شروع خردایش می‌باشد. اگر مقدار جرم باقیمانده در هر فراکسیون بعد از زمان‌های خردایش متفاوت نسبت به زمان خردایش در مقیاس نیمه لگاریتمی رسم شود، با اندازه گیری شیب خط برازش شده به آن نقاط می‌توان مقدار تابع انتخاب آن فراکسیون را محاسبه کرد [۳].

شکل (۲) نمودار مربوط به کاهش مواد باقیمانده روی سرنده با اندازه روزنه ۱۰۰۰ میکرون را نشان می‌دهد. با برازش یک معادله خطی درجه اول بر روی این نقاط می‌توان شیب خط عبور کرده از آن را محاسبه کرد. برای تمام فراکسیونهای ابعادی مرحله فوق انجام شد و تابع انتخاب مربوط به آن تعیین شد. جدول (۲) مقادیر تابع انتخاب آنها را نشان می‌دهد.



شکل (۲) منحنی مربوط به کاهش ماده باقیمانده بر روی سرنده با اندازه روزنه ۱۰۰۰ میکرون

شکل (۳) تغییرات نرخ ویژه خردایش نسبت به تغییرات اندازه ذره (فراکسیون) در حالت کلی را نشان می‌دهد. ذرات ریز مقاومت بیشتری در مقابل خردایش دارند چون هرچه ذره ریزتر

با توجه به اینکه  $W_b / \rho_b$  معرف حجم مجموع گلوله‌هاست، بجای استفاده مستقیم از رابطه (۳)، بدلیل در دسترس بودن تعداد گلوله‌های هر فراکسیون و قطر آنها، مستقیماً حجم گلوله‌ها محاسبه شد. سپس با تقسیم آن بر ۶/۰ مقدار حجم ظاهری آن محاسبه شد و با تقسیم آن بر حجم آسیا مقدار پرشدگی بوسیله گلوله ( $J$ ) تعیین شد.

مقدار چگالی پودر بوسیله پیکنومتر ۴/۳۵ گرم بر سانتیمتر مکعب تعیین شد و در نهایت بوسیله رابطه (۴) مقدار  $f_c$  محاسبه شد. سپس با استفاده از رابطه (۵) مقدار  $U$  برابر با ۰/۲۲ تعیین شد.

### ۳-۲- تعیین تابع شکست

تابع شکست توصیف کننده نحوه شکستن مواد در آسیا است. مقدار آن با تغییر شرایط آسیا تغییر نمی‌کند و تا اندازه‌ای ثابت است. دو روش عمده برای تعیین مقادیر تابع شکست در آزمایشگاه وجود دارد، روش سقوط وزنه و روش خردایش نمونه‌های با ابعاد محدود در زمانهای مشخص. روش سقوط وزنه روش نسبتاً پرهزینه‌ای است که معمولاً برای ذرات درشت بزرگتر از ۵ میلیمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد، ولی روش خردایش نمونه‌های با ابعاد محدود قابل اجرا در هر آزمایشگاه دارای آسیای گلوله‌ای آزمایشگاهی است. در این روش نمونه‌ای از بار ورودی به آسیا به فراکسیونهای محدود با نسبت  $\sqrt{2}$  تقسیم شده و هر فراکسیون برای مدت زمان لازم آسیا می‌شود و محصول آسیا با دقت تجزیه سرنده می‌شود [۳]، و سپس نتایج تجزیه سرنده را می‌توان وارد نرم افزار BFDS نموده و تابع شکست را تعیین کرد.

### ۴-۲- تعیین تابع انتخاب

تابع انتخاب بیانگر سرعت ویژه خردایش نمونه است. مقدار تابع انتخاب هر فراکسیون ( $S_i$ ) را می‌توان از رابطه (۶) بدست آورد:

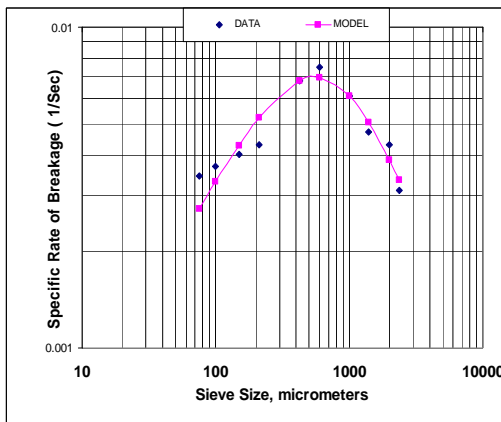
باشد گسستگی ساختاری در آن کمتر است. بعلاوه ذرات کوچکتر کمتر بین گلوله‌ها گیر می‌کنند و شانس کمتری جهت خرد شدن دارند. ذرات درشت بدلیل آنکه بسختی در بین جدول ۲- مقادیر نرخ ویژه خردایش فراکسیون‌های مختلف به دست آمده برای آسیای آزمایشگاهی

اندازه سرنده ( $\mu\text{m}$ )	۲۳۶۰	۲۰۰۰	۱۴۰۰	۱۰۰۰	۶۰۰	۴۲۵	۲۱۲	۱۵۰	۱۰۰	۷۵
نرخ ویژه خردایش ( $\text{s}^{-1}$ )	۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۶۱	۰/۰۰۷۵	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۴۰	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۳۴

$$S_i = \frac{a (x_i / 1000)^\alpha}{1 + \left(\frac{x_i}{\mu}\right)^\Lambda} \quad (7)$$

مقادیر تابع انتخاب محاسبه شده برای ابعاد ذره مختلف در آزمایشگاه در نمودار تمام لگاریتمی ترسیم شد و مدل رابطه (۷) به آن برازش شد (شکل ۴). عملیات برازش بوسیله روش حداقل مربعات و با استفاده از ابزار Solver نرم افزار Excel صورت گرفت. با استفاده از برازش مقادیر  $a$ ،  $\alpha$ ،  $\mu$  و  $\Lambda$  بر ترتیب ۰/۰۱۷۶، بر ثانیه، ۰/۷۱۱، ۷۰۰ میکرون و ۱/۷۸ بدست آمدند. بنابراین مدل تابع انتخاب این کانسنگ در آسیای آزمایشگاهی به شکل رابطه (۸) می‌باشد.

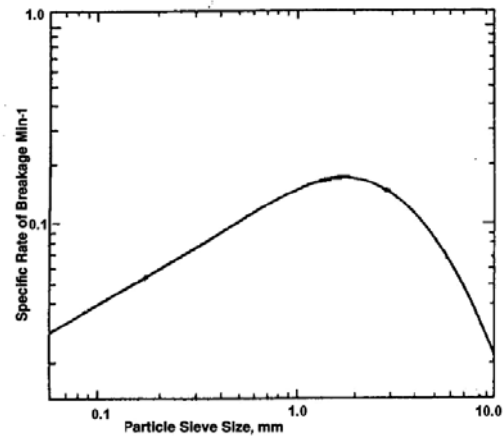
$$S_i = \frac{0.0176 (x_i / 1000)^{0.711}}{1 + \left(\frac{x_i}{700}\right)^{1.780}} \quad (8)$$



شکل ۴ - منحنی مقادیر تابع انتخاب محاسبه شده از آزمایشها و مدل برازش شده به آنها

گلوله‌ها گیر کرده شکسته می‌شوند، با افت نرخ خردایش مواجه می‌شوند (شکل ۳). بعلاوه تجمع مواد ریز در اطراف ذرات بزرگ، ضربه وارد به آنها را مستهلک کرده و مانع شکست آنها می‌شود.

پس خردایش ذرات کوچک از درجه اول و خردایش نرمال و خردایش ذرات بزرگتر از درجه غیر اول و خردایش غیرنرمال است [۳،۲].



شکل ۳- روند تغییرات نرخ ویژه خردایش در مقابل تغییر اندازه ذره [۳]

رابطه کلی حاکم بر تابع انتخاب به شکل رابطه (۷) است. در این رابطه مقدار  $a$  (آلفا) عددی مثبت و بدون بعد است که بطور معمول در فاصله بین ۰/۵ تا ۱/۵ قرار دارد و بستگی به خواص ماده دارد.  $a$  دارای بعد یکسان با  $k$  یعنی عکس زمان است. مقدار  $a$  با شرایط آسیا کنی تغییر می‌کند. همچنین  $\mu$  معادل اندازه ذره‌ای است که در آن مقدار پایین کسر رابطه (۷) برابر ۰/۵ است و  $\Lambda$  عدد مثبت و اندیسی است که نشان می‌دهد نرخ خردایش با چه سرعتی با افزایش اندازه ذرات کاهش می‌یابد و  $x_i$  اندازه ذره می‌باشد.  $\Lambda$  در واقع فقط بستگی به ماده معدنی دارد ولی  $\mu$  علاوه بر آن به شرایط آسیا کنی نیز وابسته است و با تغییر شرایط آسیا تغییر می‌کند [۳،۲].

نرخ خردایش ذرات کوچکتر هنگام استفاده از گلوله‌های با قطر کوچکتر بالاست. تحقیقات نشان می‌دهند در صورت خردایش مواد با ابعاد یکسان با افزایش ابعاد گلوله‌های بکار رفته نرخ خردایش کاهش می‌یابد (رابطه ۱۱) [۳]

$$a \propto \frac{1}{d} \quad (11)$$

در رابطه فوق  $d$  قطر گلوله است. گلوله‌های با قطر بزرگتر ذرات بزرگتر را کارآمدتر خرد می‌کنند. این مفهوم بوسیله رابطه (۱۲) کمی شده و به نرخ ویژه خردایش ارتباط داده می‌شود [۳].

$$x_m \propto d^2 \quad (12)$$

$x_m$  اندازه ذره‌ای است که ماکزیمم نرخ خردایش  $S$  در آن روی می‌دهد و  $d$  قطر گلوله است. رابطه (۱۲) این مفهوم را می‌رساند که مکان ماکزیمم مقدار  $S$  با افزایش قطر گلوله به ذرات درشت‌تر انتقال می‌یابد و یا به عبارت دیگر، با افزایش قطر گلوله آسیا می‌تواند ذرات بزرگتر را کارآمدتر خرد کند [۳]. بدلیل اینکه هیچ قطر گلوله‌ای نمی‌تواند تأثیر مخلوط گلوله‌ها بر روی ذرات درشت را داشته باشد، استفاده از قطر گلوله متوسط برای شرایط حاکم بر رابطه (۷) درست نیست بهتر است مقادیر  $S$  و  $B$  در آسیای با گلوله‌های با اندازه‌های مختلف تعیین شود. رابطه (۱۳) تأثیر مخلوط گلوله‌ها بر روی تابع انتخاب را نشان می‌دهد [۳].

$$S_i \propto x_i^a \sum_k \left( \frac{m_k}{d_k^n} \right) \quad (13)$$

برای تعیین تابع انتخاب آسیای با شرایط متفاوت از آسیای آزمایشگاهی از رابطه (۱۴) استفاده می‌شود. در این رابطه تنها  $a$  و  $\mu$  نیاز به بزرگ مقیاس شدن از مقدار تعیین شده در سطح آزمایشگاهی دارد. پارامترهایی مانند قطر آسیا، سرعت چرخش و میزان پرشدگی آسیا بوسیله پودر و گلوله بر روی مقدار  $a$  تأثیر می‌گذارند. رابطه (۱۵) این مطلب را نشان می‌دهد. همچنین طبق رابطه (۱۶) قطر آسیا و گلوله بر روی مقدار  $\mu$  تأثیر می‌گذارد [۳،۲].

با استفاده از رابطه (۱۵) مقدار  $a$  برای آسیای پایلوت بزرگ مقیاس شد و از رابطه (۱۶) برای بزرگ مقیاس کردن  $\mu$  استفاده شد و در نهایت مقادیر تابع انتخاب مربوط به آسیای پایلوت با استفاده از رابطه (۱۴) محاسبه شد. در رابطه (۱۴) اندیس  $k$  معرف فراکسیون گلوله‌های بکار رفته در آسیا است.

### ۳- آزمایشهای مقیاس پایلوت

آزمایش‌های پایلوت با استفاده از آسیای گلوله‌ای با ویژگی‌های شرح داده شده در جدول (۱) انجام گرفت که در آن بار ورودی با مشخصات ارائه شده در شکل (۱) و تناژ آن نیز ۰/۶ تن بر ساعت بود. خردایش با محتوی جامد ۷۰٪ انجام شد. این آسیا از نوع تخلیه سرریز و ساخت شرکت نوردبرگ سوئد و با توان ۳۰ کیلو وات بود.

#### ۳-۱- تعیین تابع انتخاب آسیای پایلوت

با توجه به اینکه تمام شرایط آسیاکنی در آسیای پایلوت از شرایط حاکم بر آسیای آزمایشگاهی متفاوت است، بنابراین کانسنگ در آسیای پایلوت تابع انتخاب متفاوت خواهد داشت. برای تعیین تابع انتخاب در آسیای پایلوت می‌توان از تابع انتخاب آسیای آزمایشگاهی استفاده کرد. بدین منظور از مدلسازی و روابط بزرگ مقیاس کردن استفاده می‌شود.

دو نوع عدم کارایی برای آسیا تعریف می‌شود اولین نوع عدم کارایی غیرمستقیم است، همان حالتی است که انرژی آسیا صرف بیش از حد خردایش ذراتی که به اندازه کافی خرد شده‌اند می‌شود. نوع دوم عدم کارایی مستقیم است، وقتی روی می‌دهد که شرایط آسیا باعث خردایش ضعیف می‌شود و در حالتی روی می‌دهد که میزان بار خرد کننده بیشتر از پودر و یا برعکس میزان پودر خیلی بیشتر از گلوله‌ها باشد. در این دو حالت بیش از حد پرشدگی و کم از حد پرشدگی روی می‌دهد. رابطه (۹) تأثیر پرشدگی بوسیله گلوله و پودر را نشان می‌دهد [۳].

$$S(f_c, J) \propto a \propto [1/(1+6.6J^{2.3})] \exp[-cU] \quad (9)$$

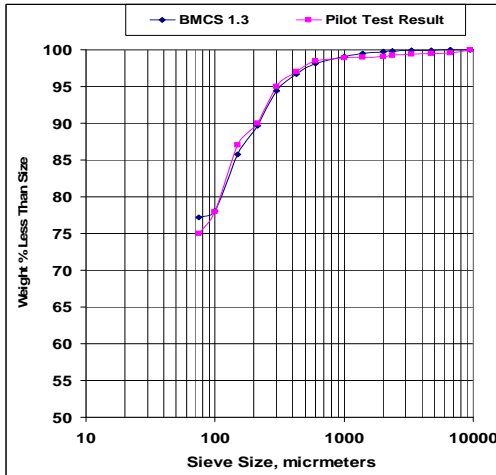
$$0.5 < U < 1.5 \quad 0.2 < J < 0.6$$

سرعت گردش بر انرژی آسیا ( $m_p$ ) تأثیر دارد. رابطه (۱۰) بستگی انرژی آسیا به سرعت گردش آسیا ( $\phi_c$ ) را نشان می‌دهد. نرخ ویژه خردایش به طور مشابه با انرژی ویژه با تغییر سرعت چرخش، تغییر می‌کند. البته حداکثر انرژی در کسرهای مختلف سرعت بحرانی از آسیایی به آسیای دیگر تغییر کرده و بستگی به قطر آسیا و نوع لیفترها، نسبت قطر گلوله به قطر آسیا و شرایط پرشدگی آسیا با گلوله و پودر دارد [۳].

$$m_p \propto (\phi_c - 0.1) \left( \frac{1}{1 + \exp[(15.7(\phi_c - 0.94))]} \right) \quad (10)$$

$$0.4 < \phi_c < 0.9$$





شکل ۶- نتایج نمودار تجمعی دانه بندی حاصل از آزمایش با آسیای پایلوت و شبیه ساز BMCS

### ۵- یافته‌ها و بحث

در فرآیند مدلسازی و بزرگ مقیاس کردن تاثیر پرشوندگی آسیا بوسیله گلوله و پودر، قطر آسیا و گلوله و سرعت بحرانی بر روی دانه بندی بار خروجی آسیا در نظر گرفته می‌شود، در حالی که، مدل باند فقط براساس  $d_{80}$  خوراک ورودی و محصول خروجی آسیا و اندیس باند ماده معدنی است.

مقادیر تابع انتخاب یک نمونه ماده را با استفاده از آسیای آزمایشگاهی ساده می‌توان با روشهای مرسوم تعیین کرده و نهایتاً آنرا به آسیای با ابعاد بزرگتر (صنعتی) بزرگ مقیاس کرد. روش خردایش نمونه‌های تک اندازه شده در زمانهای مختلف روشی است که نتایج قابل قبولی از جمله نتایج این تحقیق داده است. در این روش باید سعی شود مقادیر پرشوندگی بوسیله گلوله و پودر در آسیا بدقت تعیین شود. همچنین بدلیل آنکه گلوله با ابعاد معادل تاثیر خردایش ابعاد گوناگون گلوله را ندارد، بنابراین بهتر است از ابعاد گوناگون گلوله برای تعیین تابع شکست و انتخاب آسیای آزمایشگاهی استفاده شود.

در صورت در دسترس بودن تمام پارامترهای خردایش آسیای کوچکتر مانند تابع انتخاب و شکست، ابعاد آسیا، پرشوندگی بوسیله گلوله پودر و قطر گلوله‌های بکار رفته می‌توان می‌توان تابع انتخاب آسیای بزرگتر را با استفاده از روابط بزرگ مقیاس کردن تعیین کرد.

$$\theta = \frac{0.86}{1 + e^{(-14.13E^* + 3.07)}}, \theta \leq 0.859 \quad (21)$$

در رابطه (۲۱)،  $\theta$  معرف کسر زمان اقامت متوسط اختصاص یافته به واحد مخلوط کننده کامل بزرگ در مدل توزیع زمان اقامت است که بر اساس ضریب پراکندگی محوری محاسبه می‌شود. در این حالت  $\tau_1$  معادل  $\theta$  برابر زمان اقامت متوسط و  $\tau_{pf}$  و  $\tau_s$  معادل  $(1-\theta)/2$  برابر زمان اقامت متوسط است. قید  $\theta$  در این روش به معنی این است که ضریب پراکندگی محوری باید کوچکتر از  $0.688$  باشد [۶].

با در نظر گرفتن ۴۰ درصد تخلخل برای گلوله‌ها، حجم پرشده توسط ماده معدنی  $0.285$  متر مکعب بود. آسیای پایلوت با محتوی جامد  $70\%$  کار کرد و همچنین خوراک دهی جامد و دبی حجمی پالپ ورودی به آن بترتیب  $0.6$  تن بر ساعت و  $0.396$  مترمکعب بر ساعت بود، بنابراین با استفاده از رابطه (۱۹) زمان اقامت متوسط  $2585$  ثانیه محاسبه شد. با توجه به طول و عرض آسیای پایلوت (جدول ۱) مقدار  $\theta$ ،  $0.85$  محاسبه شد. بنابراین مقادیر  $\tau_{pf}$  و  $\tau_s$  معادل  $194$  ثانیه و مقدار  $\tau_1$  معادل  $2197$  ثانیه محاسبه شدند.

### ۴- شبیه سازی آسیای پایلوت

شبیه سازی آسیا با استفاده از مقادیر تابع انتخاب بزرگ مقیاس شده از مقادیر حاصل از آزمایشهای سطح آزمایشگاهی انجام شد و نتایج شبیه سازی با نتایج بدست آمده از اجرای خردایش در حالت واقعی مقایسه شد و صحت فرآیند بزرگ مقیاس کردن و مدلسازی آن بررسی شد. در این تحقیق از برنامه BMCS (Ball Milling Circuits Simulator) نسخه  $1/3$  برای شبیه سازی آسیای پایلوت در مدار باز استفاده شد. این نرم افزار از مدل موازنه جمعیتی برای شبیه سازی آسیا گلوله‌ای استفاده می‌کند. تناژ بار خشک و آب، تابع شکست و انتخاب، مقادیر توزیع زمان اقامت و دانه بندی بار ورودی به آسیا داده‌های ورودی به شبیه ساز است.

منحنی شکل (۶) نتایج شبیه ساز و آنالیز سرندی بار خروجی از آسیای پایلوت در حالت واقعی را نشان می‌دهد. انطباق بین نتایج آزمایش با آسیای پایلوت و شبیه سازی نشان دهنده صحت و اعتبار روابط و فرآیند بزرگ مقیاس کردن می‌باشد.



## ۶- نتیجه

مدل موازنه جمعیتی به دلیل آن که تمام جوانب خردایش را در نظر می‌گیرد، برای پیش بینی توزیع دانه بندی مواد خروجی از آسیا بسیار کارآمد است.

در صورت مشخص شدن تابع انتخاب و شکست و توزیع زمان اقامت آسیا می‌توان آنرا با استفاده از شبیه سازهای مرسوم شبیه سازی کرد. در مواردی که امکان تعیین زمان اقامت بوسیله ردیاب میسر نباشد (مانند آسیای در حال طراحی) استفاده از روش شرح داده شده در بخش (۲-۳) مناسب می‌باشد.

با استفاده از آزمون سعی و خطا و شبیه سازی می‌توان با تغییر ابعاد آسیای بزرگ مقیاس شده و تعیین مدل خردایش حاکم بر آن، ابعاد آسیا را می‌توان طوری طراحی کرد که دارای دانه بندی بار خروجی مورد نظر باشد.

شبیه سازی آزمایش خردایش با آسیای پایلوت که در آن از داده‌های بزرگ مقیاس شده استفاده شد نتایجی منطبق بر اجرای این آزمایش در حالت واقعی را نشان داد. این نتایج نزدیک دلیل بر صحت و اعتبار روابط و مراحل بزرگ مقیاس کردن است.

## منابع

۱- نعمت‌اللهی، حسین، (۱۳۷۵)، "کانه‌آرایی"، جلد اول و دوم (چاپ دوم)، انتشارات دانشگاه تهران.

2- King, R.P., 2001, "Modeling and simulation of mineral processing systems", Butterworth-Heinemann.

3- Austin L.G., Klimpel, R. R., Luckie, P. T., 1984, "Process engineering of size reduction: ball Milling", SME of AIME, New York, New York.

۴- یوسفی، ع. ا.، فرزندگان، ا. ایران نژاد، م. (۱۳۸۳)، تعیین تابع شکست مواد معدنی با استفاده از نرم افزار BFDS، کنفرانس مهندسی معدن ایران - ۸۳، ص. ۱۵-۱.

۵- اعظمی، م.، فرزندگان، ا. و خدادادی، ا.، ۱۳۸۵، مطالعه سینتیک خردایش کانه آهن معدن سنگان خراسان با آسیای گلوله‌ای آزمایشگاهی، نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر، دوره ۱۸، شماره ج ۶۶-، ص. ۷۸-۷۳.

6- Austin, G. L., Julianelli, K., De Souza, A. S., Schneider, C., "Simulation of wet ball milling of iron ore at Carajas, Brazil", Int. J. Miner. Process. 84 (2007), pp. 157-171.