

شبیه‌سازی مدار بسته آسیای نیمه‌خودشکن و هیدروسیکلون کارخانه فرآوری طلای آق‌دره

اکبرفرزانگان^{۱*}، علی ابتداعی قلائی^۲

۱-دانشیار دانشکده معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ص. پ. ۴۵۶۳-۱۱۱۵۵، farzanegan@ut.ac.ir
۲-دانش‌آموخته فرآوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کد پ. ۵۱۱۶۷-۸۷۳۱۷، ali.ebtadaei64@gmail.com

چکیده

کانسنگ استخراجی از معدن طلای آق‌دره به منظور آزادسازی ذرات حاوی فلز طلا، نخست تحت‌فرآیندهای سنگ‌شکنیو آسیاکنی در کارخانه فرآوری قرار می‌گیرد. سپس، ذرات‌خرد شده با استفاده از یک خوشه هیدروسیکلون در مدار بسته با آسیای نیمه‌خودشکنطبقه‌بندی می‌شوند و به‌دنبال آن استحصال طلا با روش فروشویی و سیانوراسیون داخل مخازن هم‌زن‌دار انجام می‌گیرد. در این تحقیق بهینه‌سازی مدار خردایش این کارخانه، با هدف کاهش ابعاد محصول نهایی (P_{80}) به کمتر از ۷۰ میکرونبرای افزایش درجه آزادی ذرات طلادار با ظرفیت موجود و با رویکرد توجه به فرآیند فروشویی با روش مدلسازی و شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار MODSIMTM انجام شد. جریان‌های مختلف مدار خردایش در دو مرحله و در وضعیت یکنواخت عملیات نمونه‌برداری شدند.نخست، داده‌های توزیع اندازه ذره‌نمونه‌های جمع‌آوری شده به منظور مدلسازی دقیق‌تر مدار، موازنه جرم شدند. سپس از نرم‌افزار MODSIM، برای کالیبراسیون مدل‌ها و شبیه‌سازی مدار استفاده شد. پس از اعتبارسنجی مدل کالیبره شده پلیت در محیط MODSIM، شبیه‌سازی مدار خردایش با قطر داخلی سرریز و قطر داخلی ته‌ریز به ترتیب با اندازه‌های ۸۲ و ۷۰ میلی‌متر، با تعداد ۶ سیکلون در حال کار و افزایش درصد حجمی بار داخل آسیای نیمه‌خودشکن از ۲۱ درصد به ۳۵ درصد با حجم بار گلوله ۱۰ تا ۱۲ درصد، انجام شد که نشان می‌دهد P_{80} محصول آسیاکنی قابل کاهش به حدود ۵۱ میکرون می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: مدارهای آسیاکنی، مدلسازی و شبیه‌سازی خردایش، بهینه‌سازی آسیاهای نیمه‌خودشکن، کارخانه طلای آق‌دره

۱- مقدمه

هیدروسیکلونها خارج شده و پس از عبور از سردند آشغالگیر وارد مخازن فروشویی می‌گردند (شکل ۱). برای اینکه بتوان عملکرد دستگاهها را مشخص کرد و همچنین مدار را موازنه نمود، لازم بود از خوراک، محصول و مواد برگشتی به آسیای نیمه‌خودشکن، خوراک، سرریز و ته‌ریز سیکلونها نمونه‌برداری شود. در دو مرحله از مدار نمونه‌برداری شد که هدف مرحله اول مدلسازی یا کالیبراسیون مدل‌ها و هدف مرحله دوم اعتبارسنجی و شبیه‌سازی بود.

نمونه‌برداری جزئی به صورت همزمان هر ۱۰ دقیقه در یک بازه زمانی ۲ ساعته از جریانهای آسیا (ته‌ریز سردند گردان^۱)، اسکت^۲ (ذرات برگشتی از سردند گردان به آسیا)، خوراک، سرریز و ته‌ریز سیکلون انجام شد و نمونه‌های ترکیبی از مخلوط آنها تهیه شدند. پس از اتمام نمونه‌برداری، نوار نقاله خوراک‌دهنده به آسیای نیمه‌خودشکن متوقف و محتوای ۲ متر از نوارنقاله تخلیه و توزین شد. همچنین، یک نسخه از اطلاعات عملیاتی مدار خردایش (مثل توان آسیا، وزن آسیا، تناژ خوراک تازه ورودی) ثبت شده در هنگام نمونه‌برداری از اتاق کنترل تهیه شد.

تمامی نمونه‌ها به جزء خوراک تازه ورودی به آسیا و ذرات اسکت برگشتی به آن در آزمایشگاه کارخانه با سرندهای آزمایشگاهی ۶۷۳۰ تا ۳۸ میکرون آنالیز سرندي شده و درصد جامدشان تعیین شد. در مورد نمونه‌های مربوط به خوراک آسیا نیز آنالیز سرندي با استفاده از سرندهای میله‌ای و آزمایشگاهی انجام شد که وزن نمونه‌ها پس از خشک کردن به ترتیب ۷۵ و ۱۰۵ کیلوگرم بود. براساس اطلاعات ثبت شده تناژ خوراک تازه ورودی به آسیای نیمه‌خودشکن در حین نمونه‌برداری، در مرحله اول ۱۴۲ تن در ساعت و مرحله دوم ۱۴۱ تن در ساعت بود که تقریباً معادل ۲ برابر ظرفیت اسمی (۷۵ تن در ساعت) می‌باشد.

برای رفع خطاهای ناشی از نوسانات عملکرد مدار خردایش در وضعیت یکنواخت به هنگام نمونه‌برداری و خطاهای احتمالی در جمع‌آوری نمونه‌های مختلف و ثبت شرایط اجرایی و همچنین آزمایش‌های تجزیه سرندي، داده‌های خام حاصل از نمونه‌برداری‌ها در مراحل اول و دوم موازنه (تعدیل) جرم شدند.

به منظور موازنه جرم در اطراف سیکلون، توزیع اندازه ذره جریانهای سیکلون و شدت جریان‌ها توسط نرم‌افزار NorBal (بر اساس روش لاگرانژ) موازنه جرم شده و تصحیح شدند [۲].

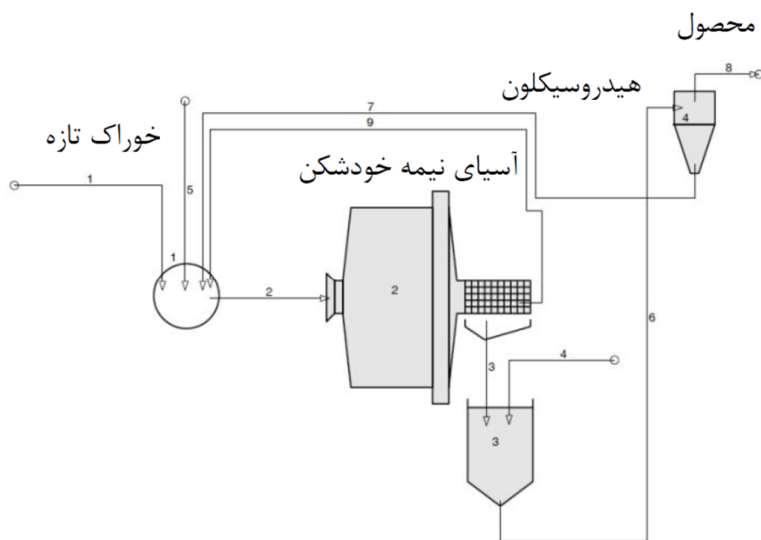
فرآیند خردایش بویژه در محدوده ریزدانه به دلیل اتلاف انرژی بالایی که به همراه دارد، معمولاً پر هزینه‌ترین بخش تولید در کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی و صنایع معدنی وابسته می‌باشد. بهینه‌سازی خردایش در تمامی کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی که در آنها فرآیندهای سنگ‌شکنی و آسیاکنی بخشی از فرآیند تولید محصول پرعیار شده را تشکیل می‌دهد، می‌باید به طور پیوسته برای افزایش کیفی و کمی تولید یا کاهش هزینه‌های جاری انجام گیرد. این موضوع در کارخانه‌های فرآوری کانسنگ طلا که معمولاً نیاز به آسیاکنی بیشتر ذرات برای رسیدن به درجه آزادی مناسب ذرات طلا و جلوگیری از هدررفت ذرات به همراه باطله کارخانه اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. مزایای بهینه‌سازی عملیات خردایش ممکن است به صورت کاهش هزینه‌های عملیاتی، افزایش ظرفیت و در نتیجه تولید فلزات با ارزش بیشتر و بهبود عملکرد فرآیندهای پایین‌دستی به علت بهبود توزیع اندازه ذره خوراک دیده شود [۱].

اکنون، مدلسازی و شبیه‌سازی فرآیندها در صنعت مهمترین ابزار بهینه‌سازی است [۱]. عمل بهینه‌سازی بر پایه شبیه‌سازی شامل مراحل متعددی از جمله الف) تعیین مشخصه‌های مواد خوراک در آزمون‌های آزمایشگاهی (تخمین پارامترهای مدل‌های مورد استفاده بر اساس بررسی‌های کارخانه‌ای و کالیبراسیون مدل‌ها) انجام شبیه‌سازی‌ها برای جستجوی راه‌های ممکن برای اصلاح و بهینه‌سازی عملکرد کارخانه با تغییر در فلوشیت، تجهیزات یا شرایط عملیاتی و د) به کاربردن شرایط انتخابی می‌باشد [۱].

در این تحقیق بهینه‌سازی مدار خردایش کارخانه فرآوری طلای آق‌دره، با هدف کاهش اندازه محصول نهایی بخش آسیاکنی و با حفظ ظرفیت موجود و با رویکرد توجه به فرآیند پایین‌دستی فروشویی با روش مدلسازی و شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار MODSIMTM انجام شده است.

۲- نمونه‌برداری از مدار خردایش

اولین مرحله برای بررسی وضعیت کنونی عملکرد مدار خردایش و بهینه‌سازی آن، ارائه طرح نمونه‌برداری بود. در حال حاضر مواد درشت‌تر از تقریباً ۹۰ میکرون از ته‌ریز هیدروسیکلونها خارج شده و بعنوان بار در گردش وارد آسیا می‌شوند و مواد ریزتر از ۹۰ میکرون نیز از سرریز



شکل ۱: شمای عملیات آسیاکنی و طبقه‌بندی کارخانه فرآوری طلای آق‌دره و محل‌های نمونه‌برداری از مدار

در برنامه MODSIM مدل‌های کلی مورد استفاده در شبیه‌سازی عملیات واحدهای مختلف، می‌باید برای یک کارخانه خاص تعریف شوند و با توجه به نوع دستگاهها و شرایط عملیاتی حاکم کالیبره شوند [۳].

۴- مدل آسیای نیمه‌خودشکن

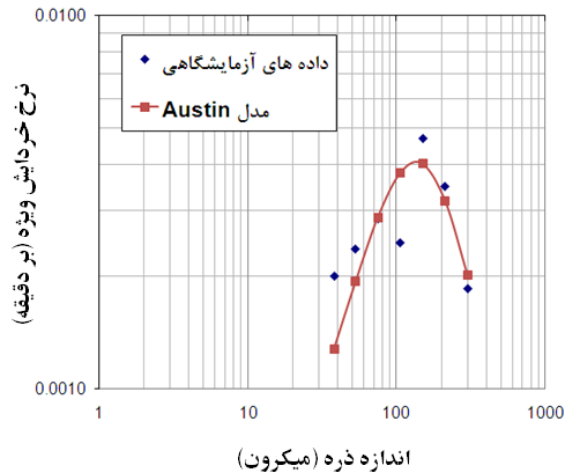
مدل مورد استفاده برای آسیای نیمه‌خودشکن در نرم‌افزار MODSIM، مدل SAGT (Semi Autogenous Grinding Trommel) نام دارد. در این مدل، آسیای نیمه‌خودشکن با سرند گردان در خروجی با استفاده از موازنه جرم کامل مدلسازی شده‌اند که شامل فرآیندهای فرسایش و سایش ذره است که توسط آستین^۳ و هوپر^۴ توسعه یافته‌اند. در این نرم‌افزار سه فرآیند شکست به صورت جداگانه برای آسیای نیمه‌خودشکن مدلسازی شده‌اند: شکست ضربه‌ای^۵، خودشکست^۶ و سایش (یا فرسایش) سطحی^۷ در نظر گرفته شده است. همچنین فرض می‌شود که آسیا مخلوط‌کننده کامل است و ذرات به هنگام خروج از آسیابه دلیل وجود شبکه تخلیه‌دهنده انتهای آن، تحت فرآیند طبقه‌بندی قرار می‌گیرند. بار داخل آسیا با استفاده از ابعاد آسیا محاسبه شده است و میانگین زمان اقامت از طریق محاسبه نسبت حجم بار داخل آسیا به ظرفیت (دبی خروجی) آسیا به دست می‌آید. آب را به طور مستقیم می‌توان با یک نرخ از پیش تعیین شده به خوراک آسیا اضافه کرد و یا شبیه‌ساز نرخ افزودن آب را محاسبه

وزن مخصوص ذرات جامد کانسنگ ورودی ۲/۹ است. نسبت بار در گردش برای نمونه‌برداری مرحله اول از روش درصد جامد ۲/۶۸ و از روش توزیع اندازه ذره ۲/۶۹ و برای نمونه‌برداری مرحله دوم از روش درصد جامد ۲/۶۶ و از روش توزیع اندازه ذره نیز ۲/۶۶ به دست آمدند. با معلوم بودن نسبت بار در گردش و دبی جرمی سرریز سیکلون که همان خوراک تازه ورودی به مدار خردایش است، مشخصات جریانهای خوراک، سرریز و ته‌ریز سیکلون برای دو سری نمونه‌برداری محاسبه شدند. سپس به منظور اطلاع از کارایی کنونی هیدروسیکلون و اعمال تغییرات لازم برای بهبود آن، بر اساس داده‌های واقعی، منحنی کارایی سیکلون‌ها برای دو سری نمونه‌برداری قبل از اصلاح و پس از آن، در محیط نرم‌افزار Excel تهیه شد. مقدار بازیابی آب به ته‌ریز (R_f) نیز برای نمونه‌برداری مراحل اول و دوم به ترتیب ۰/۴۴ و ۰/۴۳ به دست آمد. این مقادیر نشان‌دهنده عملکرد ضعیف هیدروسیکلون‌ها است.

۳- نرم‌افزار MODSIM

شبیه‌ساز MODSIM یک برنامه کامپیوتری است که بر اساس مدلسازی ریاضی تجهیزات، موازنه جرم را به صورت جزئی برای هر کارخانه کانه‌آرایی محاسبه می‌کند. موازنه جرم شامل همه دبی‌های جامد و آب، توزیع اندازه ذره فاز جامد، توزیع ترکیب ذره و میانگین عیارسنجی فاز جامد خواهد بود.

آزمایشگاهی که در آزمایشگاه کارخانه فرآوری آق‌دره برای تعیین توابع شکست و انتخاب انجام شده بود به‌دست آمد [۸]. نمودار داده‌های آزمایشگاهی تابع انتخاب بر اساس اندازه ذره در مقیاس لگاریتمی ترسیم شد و در نرم افزار Excel با روش حداقل مربعات با استفاده از امکانات بخش Solver، مدل «آستین» بر داده‌های آزمایشگاهی برای تعیین پارامترهای مدل «آستین»، برازش شد (شکل ۲).



شکل ۲: مقادیر نرخ ویژه خریداریش (تابع انتخاب) حاصل از آزمایش آسیای گردان آزمایشگاهی و مدل برازش شده «آستین» بر مقادیر به‌دست آمده

بنابراین پس از برازش مدل آستین بر داده‌های آزمایشگاهی و تعیین پارامترهای مجهول، مدل آستین حاکم بر تابع انتخاب داده‌های آزمایشگاهی برای تعیین مدل مربوط به مکانیسم شکست ضربه‌ای در آسیای نیمه‌خودشکن آق‌دره بصورت رابطه (۲) به‌دست آمد.

$$S_i = \frac{0.1 \times \left(\frac{x_i}{1000}\right)^{1.33}}{1 + \left(\frac{x_i}{150}\right)^{3.16}} \quad (2)$$

در هنگام محاسبات شبیه‌سازی، پارامترهای تعیین شده تابع انتخاب برای آسیای آزمایشگاهی، داده شده در رابطه (۲)، بر اساس مشخصات هندسی و شرایط عملیاتی آسیاهای آزمایشگاهی و نیمه‌خودشکن واقعی در کارخانه (آسیای مورد شبیه‌سازی) توسط MODSIM بزرگ مقیاس و سپس در

خواهد کرد که برای رسیدن به درصد جامد معین در خروجی آسیا نیاز است [۳].

۱-۴-۱- مدلسازی شکست ضربه‌ای

شکست ضربه‌ای در مدل آسیای نیمه‌خودشکن با سرند گردان (SAGT)، با استفاده از توابع استاندارد شکست و انتخاب «آستین» مدلسازی شده است. ذراتی که تقریباً کوچکتر از ۱۲/۵ میلی‌متر هستند، نرخ ویژه شکست مربوط به مکانیسم خودشکست آنها ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن است. مکانیسم شکست غالب در این محدوده ابعادی، شکست ضربه‌ای است. برای مدلسازی، نیاز به محاسبه پارامترهای تابع شکست و تابع انتخاب می‌باشد. آسیای مورد استفاده برای انجام این آزمایش، آسیای گلوله‌ای استاندارد آزمایشگاهی است. بنابراین، پارامترهای تابع انتخاب مدل «آستین» در یک آسیای گلوله‌ای کوچک مقیاس تعیین می‌شود [۴،۵].

۱-۴-۱-۱- مدل «آستین»

تغییرات نرخ خریداریش نسبت به تغییر اندازه ذره برای ذرات ریزتر در مدل «آستین» با رابطه (۱) در زیر بیان می‌شود [۶،۷]:

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

که در آن، a مقدار تابع انتخاب در ۱ میلی‌متر، x_i اندازه ذرات بر حسب میکرون و مقدار α عددی مثبت است که بطور معمول در فاصله بین ۰/۵ تا ۱/۵ قرار دارد و بستگی به خواص مواد معدنی دارد. ولی مقدار a با تغییر شرایط آسیاکنی تغییر می‌کند. واحد a در رابطه (۱) با تغییر مقدار α تغییر خواهد کرد. μ معادل اندازه ذره‌ای بر حسب میلی‌متر است که در آن فاکتور تصحیح $Q_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_i}{\mu}\right)^\Lambda}$ برابر ۰/۵ است. Λ عدد مثبت ($\Lambda \geq 1$) و شاخصی است که نشان می‌دهد نرخ خریداریش با چه سرعتی با افزایش اندازه ذرات کاهش می‌یابد. Λ در واقع بستگی به ماده معدنی دارد ولی μ با تغییر شرایط آسیا تغییر می‌کند.

برای تعیین تابع انتخاب و پارامترهای شکست ضربه‌ای کانسنگ طلای آق‌دره در آسیای نیمه‌خودشکن مربوطه، با استفاده از نتایج آزمایش آسیای گلوله‌ای استاندارد

را در مکانیسم شکست خودشکست تعیین می‌کند، گزارش می‌شود. پارامتر $A \times b$ شیب منحنی $E_{CS}-t_{10}$ است و یک اندازه شکست کانسنگ در سطوح انرژی پائین‌تر آسیای نیمه‌خودشکن است.

۴-۳- مدل شکست سایشی

برای مکانیسم شکست سایش، جی. کی. ام. آر. سی. از پارامتر سایش، t_a ، که طبق رابطه (۵) تعریف شده است، استفاده می‌کند [۹]:

$$t_a = \frac{t_{10}}{10} \quad (۵)$$

پارامتر مکانیسم سایش، t_a ، بوسیله آزمایش سایش کانسنگ با آسیای گردان آزمایشگاهی ۳۰۰ میلی‌متر در ۳۰۰ میلی‌متر با چهار میله بالابرنده ۱۰ میلی‌متر تعیین می‌شود (یادآوری می‌شود که این آزمایش با آزمایش شاخص سایش باند تفاوت دارد). در آزمایش استاندارد جی. کی. ام. آر. سی. یک نمونه ۳ کیلوگرمی کانسنگ در طبقه اندازه $۳۸+۵۵-۷۰$ میلی‌متر برای مدت ۱۰ دقیقه با سرعت آسیای معادل ۷۰ درصد سرعت بحرانی (یعنی ۵۳ دور در دقیقه) آسیا می‌شود [۱].

داده کوچکتر t_{10} (در نتیجه t_a) نشان می‌دهد که درصد کمتری از مواد از $۱/۱۰$ اندازه ذره اولیه عبور می‌کنند، یا سختی بیشتری در برابر شکست سایش دارند. ناپیر-مان^۹ و همکارانش تعدادی روابط قابل قبول را بین پارامترهای ضربه $(A \times b)$ و پارامتر سایش (t_a) با شاخص کار گلوله‌ای باند W_i بصورت زیر به‌دست آوردند [۱۰]:

$$A \times b = -3.5W_i + 117 \quad (۶)$$

$$t_a = 19.7W_i^{-1.34} \quad (۷)$$

شاخص کار باند قابلیت خردایش خوراکی با ابعاد $۳/۳۵-۳۵$ میلی‌متر را در یک آسیای گلوله‌ای خشک که ترکیبی از سایش و ضربه است، اندازه‌گیری می‌کند ولی آزمایش‌های فوق، بطور جداگانه، شکست ضربه‌ای و سایشی را می‌سنجند [۱۰]. این پارامترها، برای اینکه با جزئیات تجهیزات و شرایط عملیاتی برای مدلسازی عملکرد آسیای خودشکن یا نیمه‌خودشکن ترکیب شوند، در نرم‌افزار شبه‌ساز MODSIM استفاده

مدل آسیای نیمه‌خودشکن برای پیش‌بینی توزیع اندازه ذره خروجی آسیا مورد استفاده قرار می‌گیرد. برخی از پارامترهای لازم برای بزرگ مقیاس کردن تابع انتخاب آسیای آزمایشگاهی، قطر آسیا، قطر گلوله، سرعت گردش، درصد پرشدگی، درصد پرشدگی گلوله، پرشدگی فضای بین گلوله‌ای، خشک یا تر بودن روش آسیاکردن در آسیاهای آزمایشگاهی و شبه‌سازی می‌باشند (جدول ۲).

۴-۲- مدل شکست ضربه‌ای «جی. کی. ام. آر. سی.»^۸

در یک آسیای نیمه‌خودشکن، دو مکانیسم اصلی شکست وجود دارد، شکست ضربه‌ای (انرژی بالا) و سایش (انرژی پایین). در رابطه با شکست ضربه‌ای، موسسه جی. کی. ام. آر. سی. درصد عبوری از یکدهم اندازه ذره اولیه (اصلی) " t_{10} " را به عنوان شاخص استفاده می‌کند، که این همان تابع شکست (B) در آسیاهای نیمه خودشکن است. رابطه رابطه (۳) شاخص شکست، t_{10} ، را به انرژی خردایش ویژه (E_{CS})، مربوط می‌سازد [۹]:

$$t_{10} = A(1 - e^{-bE_{CS}}) \quad (۳)$$

پارامترهای مکانیسم شکست ضربه‌ای، A و b ، با استفاده از یک وسیله انجام شکست ضربه‌ای با انرژی بالا تعیین می‌شود که دستگاه آزمایش وزنه افتان نامیده می‌شود. مقدار انرژی خردایش ویژه با استفاده از رابطه (۴) قابل محاسبه شود [۹]:

$$E_{CS} = \frac{0.0272M_d(h_i - h_f)}{\bar{m}} \quad (۴)$$

که در آن، E_{CS} انرژی خردایش ویژه بر حسب kWh/t، M_d جرم وزنه افتان (kg)، \bar{m} متوسط جرم هر طبقه اندازه ذره (g)، h_i ارتفاع اولیه وزنه افتان تا بستر (cm)، h_f ارتفاع نهایی وزنه افتان تا بستر (cm) است.

پارامتر A (%) مقدار ماکزیمم داده‌های t_{10} می‌باشد که برای شکستی با انرژی بیشتر مربوط است. پارامتر b (t/kWh) به شیب کلی منحنی $E_{CS}-t_{10}$ در انرژی‌های پائین‌تر مربوط است. A و b بهم وابسته هستند، به همین خاطر معمولاً $A \times b$ بعنوان داده واحدی که سختی کانسنگ

برای این نوع آسیا تا ۳۵٪ نیز قابل افزایش است. مقدار مناسب مقیاس شارژ گلوله روی ۱۲٪ تنظیم شده است. جهت افزایش گلوله توصیه می‌شود که حجم بارگیری تا ۲۶٪ افزایش یابد. وزن بار داخل آسیا برای ۱۲٪ گلوله شارژ شده با حجم بار ۲۶٪، ۱۰۵ تن است [۱۱].

۵- مدلسازی هیدروسیکلون

بهینه‌سازی عملکرد هیدروسیکلون در مدار خردایش آق‌دره با هدف دسترسی به محصولی با ابعاد مناسب (کوچکتر از ۵۰ میکرون) انجام می‌گیرد. با توجه به تاثیر متقابل سیکلونها روی همدیگر و پیچیده بودن فرآیند بهینه‌سازی، از روش مدلسازی و شبیه‌سازی بعنوان بهترین راه برای ارزیابی مناسب‌ترین گزینه‌های آزمایش عملکرد هیدروسیکلون استفاده شد. مدل مورد استفاده برای هیدروسیکلون در نرم‌افزار MODSIM (CYCLONE L. R.، CYCL(CYCLONE L. R. Plitt نام دارد. این مدل توسط پلیت توسعه یافته که یک مدل محاسباتی دستگاه طبقه‌بندی هیدروسیکلون است [۳]. جدول ۳ پارامترهای طراحی (ابعاد هندسی) سیکلون آق‌دره را نشان می‌دهد.

جدول ۳: پارامترهای طراحی هیدروسیکلون آق‌دره

مقدار	پارامتر
۶	قطر دهانه ورودی (cm)
۲۵	قطر سیکلون (cm)
۱۰۵	ارتفاع آزاد سیکلون (cm)
۸/۷	قطر سرریز (cm)
۷	قطر ته‌ریز (cm)

۵-۱- مدل پلیت

یکی از کاملترین و رایج‌ترین مدل‌های ریاضی هیدروسیکلون، مدل پلیت است که در سال ۱۹۷۶ میلادی ارائه شد و در نرم‌افزار MODSIM به کار رفته است. مدل پلیت بر پایه ۴ معادله تجربیکه روابط همبستگی میان چهار متغیر وابسته با متغیرهای مستقل مربوط به پارامترهای طراحی هیدروسیکلون و شرایط اجرایی می‌باشند، استوار است که در منبع [۱۲] توضیح داده است.

مدل تجربی پلیت نخست پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه بازیابی کسری جامد به ته‌ریزها بر اساس پارامترهای طراحی هیدروسیکلون و شرایط اجرایی پیش‌بینی می‌کند.

شدند [۹]. جدول ۱ پارامترهای مکانیسم شکست ضربه‌ای و سایش کانسنگ مخلوط آق‌دره را نشان می‌دهد.

جدول ۱: پارامترهای شکست ضربه‌ای و سایش کانسنگ مخلوط آق‌دره

نوع کانسنگ	W_i (kWh/t)	A×b	t_a
مخلوط	۱۴/۱۴	۶۷/۵۱	۰/۵۷

در نتیجه مدل برازش‌کننده شکست «ضربه‌ای» برای کانسنگ مخلوط آق‌دره که رابطه t_{10} را بر حسب انرژی خردایش ویژه E_{CS} تعریف می‌کند به صورت رابطه (۸) به دست آمد:

$$t_{10} = 67.51 \times (1 - e^{-1 \times E_{CS}}) \quad (8)$$

۴-۴- مشخصات آسیای نیمه‌خودشکن آق‌دره

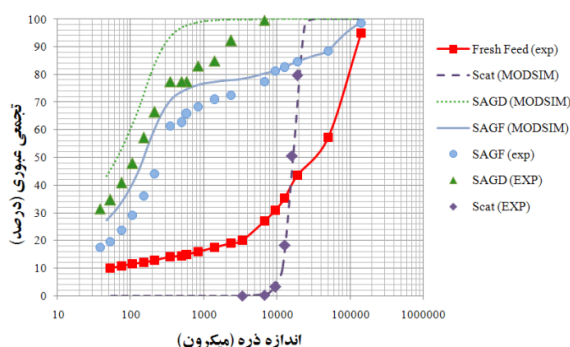
ابعاد دقیق آسیای نیمه‌خودشکن موجود در کارخانه فرآوری آق‌دره و همچنین پارامترهای عملیاتی نیز که در طی نمونه‌برداری و توقف آسیا ثبت شده‌اند، در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲: پارامترهای طراحی و عملیاتی آسیای نیمه‌خودشکن آق‌دره

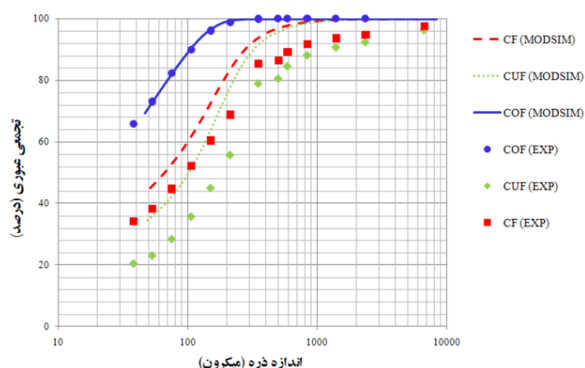
مقدار	پارامتر
۵	قطر (m)
۸/۲۷	طول خط مرکزی (m)
۶/۳۶	طول قسمت استوانه‌ای (m)
۱/۲	قطر ترونیون (m)
٪۲۱	درصد پرشدگی (/)
٪۱۰	درصد پرشدگی گلوله‌ها (/)
۹۰	اندازه گلوله (mm)
٪۷۵	سرعت بحرانی (/)
۲۳	بازشدگی شبکه تخلیه (mm)
۱۶	ابعاد دهانه سرند گردان (mm)

همچنین، استارکی^{۱۰} و همکارانش، در مطالعات بهینه‌سازی مدار آسیای نیمه‌خودشکن آق‌دره (دارای نسبت قطر به طول کمتر از ۱)، سه حالت مختلف درصد حجمی بار درون آسیا بصورت سطح پایین، متوسط و سطح بالا تعیین کرده‌اند که عبارتند از: ۳۰٪ - ۲۶٪ - ۲۰٪ [۱۱]. این پارامتر

برای نمونه‌برداری اول و دوم به ترتیب ۴۶/۱ و ۴۲/۶ تن محاسبه شد.



شکل ۳: توزیع اندازه ذره جریان‌های آسیا، نمونه‌برداری مرحله اول



شکل ۴: توزیع اندازه ذره جریان‌های هیدروسیکلون، نمونه‌برداری مرحله اول

پس از اعمال ضرایب کالیبراسیون مدل، بازیابی جامد به تهریز برای طبقات سردی از رابطه (۹) قابل محاسبه خواهد بود که در حقیقت همان توزیع اندازه ذره تهریز هیدروسیکلون است.

$$R_i = R_f + (1 - R_f) \times \left(1 - e^{-0.693 \left(\frac{d_i}{d_{50c}}\right)^m}\right) \quad (9)$$

که در آن، d_i اندازه ذرات در طبقات سردی مختلف و R_i بازیابی ذرات جامد به تهریز سیکلون و R_f بازیابی آب به تهریز می‌باشند. البته در این رابطه «دنباله‌روی» مواد جامد در آب راه یافته به تهریز نیز در نظر گرفته شود. مقادیر واقعی پارامتر d_{50c} پس از موازنه جرم ذرات در تمام طبقات سردی حول هیدروسیکلون با استفاده از نمودار ضریب توزیع (%) نسبت به میانگین هندسی اندازه ذرات برای دو سری نمونه‌برداری محاسبه شد. مقدار پارامتر P (فشار سیکلون) نیز در حین نمونه‌برداری برای هر دو سری ۱۷۵ کیلووات ثبت شد. همچنین مقادیر واقعی پارامترهای R_f و S پس از موازنه جرم ذرات در تمام طبقات سردی حول هیدروسیکلون برای دو سری نمونه‌برداری محاسبه شد. اما مقدار پارامتر m با بکارگیری تابع طبقه‌بندی پلیت^{۱۱} بر روی داده‌های موازنه شده طبقات سردی در محیط نرم‌افزار صفحه‌گسترده Excel و استفاده از روش حداقل مربعات دستور Solver محاسبه شدند.

۶- پیش‌بینی توسط نرم‌افزار MODSIM

پس از مدلسازی مکانیسم‌های مختلف شکست در آسیای نیمه‌خودشکن و انتخاب مدل پلیت برای هیدروسیکلون، عملکرد مدار خردایش آق‌دره با استفاده از نرم‌افزار MODSIM برای دو مرحله نمونه‌برداری پیش‌بینی شد. توزیع اندازه ذره مربوط به جریان‌های مختلف در نمونه‌برداری مرحله اول و دوم که توسط نرم‌افزار MODSIM پیش‌بینی شده‌اند، در شکل‌های ۳ تا ۶ نشان داده شده‌اند. در جداول ۴ و ۵ مشخصات واقعی و پیش‌بینی شده جریان‌های مختلف نشان داده شده است.

توان‌کشی آسیا برای نمونه‌برداری مرحله اول و دوم به ترتیب ۱۷۵۴/۱ و ۱۸۱۴ کیلووات و زمان اقامت متوسط ذرات جامد داخل آسیا در هر دو سری ۵/۹ دقیقه محاسبه شد. وزن بار داخل آسیا بدون گلوله (کانسنگ و دوغاب^{۱۲})

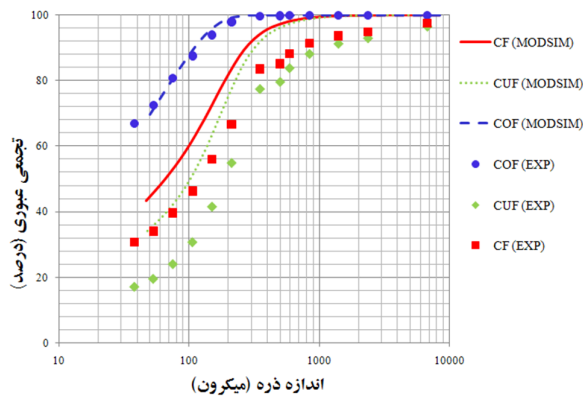
همانطوری که در جدول ۵ مشخص است، پیش‌بینی d_{80} برای تهریز و خوراک سیکلون تفاوت نسبتاً زیادی با مقدار واقعی دارد، که علتش این است که پارامترهای مدل SAGT بیشتر با هدف انطباق داده‌های آزمایشگاهی (واقعی) جریان سرریز با داده‌های پیش‌بینی (شبیه‌سازی شده) صورت گرفته و با توجه به اینکه هدف از شبیه‌سازی کاهش d_{80} سرریز سیکلون بوده و مقدار شبیه‌سازی آن به مقدار واقعی بسیار نزدیک است، در نتیجه اختلاف مقادیر واقعی با پیش‌بینی شده در جریان‌های خوراک و تهریز سیکلوناثری در نتایج و اهداف شبیه‌سازی نداشتند. یادآوری می‌شود که d_{80} و P_{80} به ترتیب پارامترهای معرف اندازه ذرات برای تمام جریان‌ها و جریان سرریز سیکلون می‌باشند.

جدول ۴: مشخصات واقعی و پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار MODSIM برای جریانهای مختلف آسیای نیمه‌خودشکن

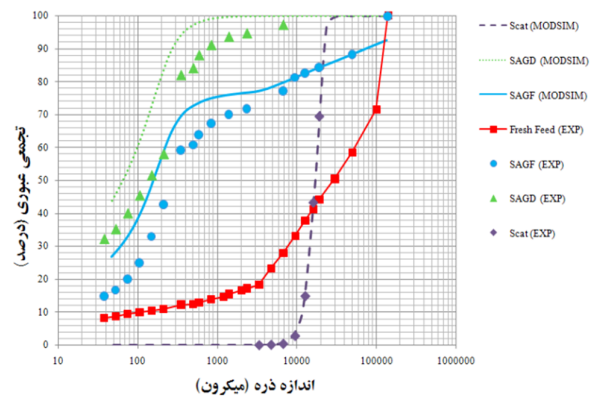
نام جریان	نمونه‌برداری مرحله اول				نمونه‌برداری مرحله دوم			
	جامد (t/h)	درصد جامد (%)	d_{80} (μm)	آب (m^3/h)	جامد (t/h)	درصد جامد (%)	d_{80} (μm)	آب (m^3/h)
ته ریز سرند گردان	۴۶۲/۵	۶۸	۷۰۲/۵	۳۶۳/۴	۴۳۳/۷	۶۸	۳۳۸/۱	۲۰۴/۱
پیش‌بینی	۴۶۵/۱	۶۶/۲	۱۸۸	۲۳۷/۲	۴۳۲	۶۵/۸	۱۸۷	۲۲۵
خوراک تازه آسیا	۱۲۵/۵	۸۸/۴	۱۰۴۰۰۰	۱۶/۵	۱۲۰/۸	۱۴/۳	۱۱۲۰۰	۲۰/۲
واقعی	۶	۹۵	۲۰۰۰۰	۰/۳۲	۶	۹۵	۲۱۰۰۰	۰/۳۲
پیش‌بینی	۰/۰۱	۹۵	۲۰۹۰۰	۰/۰۰۰۵	۰/۰۱	۹۵	۲۰۳۰۰	۰/۰۰۰۳

جدول ۵: مشخصات واقعی و پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار MODSIM برای جریانهای هیدروسیکلون

جریان	نمونه‌برداری مرحله اول				نمونه‌برداری مرحله دوم			
	جامد (t/h)	درصد جامد (%)	d_{80} (μm)	آب (m^3/h)	جامد (t/h)	درصد جامد (%)	d_{80} (μm)	آب (m^3/h)
خوراک	۴۶۲/۵	۵۶	۳۰۶	۳۶۳/۴	۴۳۳/۷	۵۸	۳۲۰/۹	۳۱۴/۱
پیش‌بینی	۴۶۵/۱	۵۶/۶	۱۸۸	۳۵۷/۲	۴۳۲	۵۶/۷	۱۸۷	۳۳۰
واقعی	۱۲۵/۵	۳۸	۶۹/۴	۲۰۵	۱۲۰/۸	۴۰/۲	۷۲/۷	۱۸۰
پیش‌بینی	۱۲۵/۵	۳۹/۶	۶۹/۱	۱۹۱/۵	۱۲۰/۸	۴۰/۸	۷۲/۳	۱۷۵/۲
ته ریز	۳۳۶/۹	۶۸	۴۴۴/۹	۱۵۸/۶	۳۱۲/۹	۷۰	۵۰۸/۸	۱۳۴/۱
پیش‌بینی	۳۳۹/۵	۶۷/۲	۲۲۶	۱۶۵/۷	۳۱۱/۱	۶۶/۸	۲۲۵	۱۵۴/۸



شکل ۶: توزیع اندازه ذره جریان‌های هیدروسیکلون، نمونه‌برداری مرحله دوم



شکل ۵: توزیع اندازه ذره جریان‌های آسیا، نمونه‌برداری مرحله دوم

۶-۱- ضرایب کالیبراسیون مدل پلیت

همواره مقادیر عملیاتی و مقادیر به‌دست‌آمده از روابط مدل برای هر کدام از پارامترها باهم متفاوت هستند. به همین دلیل در روابط مدل پلیت سیکلون، ضرایب کالیبراسیون به منظور حذف این تفاوت در نظر گرفته شده است. پس از محاسبه مقادیر اندازه‌گیری شده پارامترهای d_{50c} ، m و R_f ، به کمک نمونه‌برداری مرحله اول، مقادیر این پارامترها نیز توسط نرم‌افزار

MODSIM برای محاسبه ضرایب کالیبراسیون این پارامترها پیش‌بینی شدند که در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶: پارامترهای مدل پلیت در نمونه‌برداری مرحله اول

پارامتر	اندازه‌گیری شده (واقعی)	پیش‌بینی شده توسط MODSIM
d_{50c}	۸۹/۱	۸۵/۵۳
S	۱/۱۱	۱/۲۰۱
m	۱/۱	۰/۳۴۸

ضرایب لازم برای کالیبراسیون پارامترهای مدل پلیت با استفاده از داده‌های جدول ۶ و رابطه (۱۰) محاسبه شدند [۱۳].

$$(10) \quad CF = \frac{\text{مقدار اندازه‌گیری شده}}{\text{مقدار محاسبه شده}} \quad \text{ضریب کالیبراسیون } (CF)$$

که در آن، مقدار محاسبه شده همان مقدار پیش‌بینی شده با نرم‌افزار MODSIM است. جدول ۷ ضرایب کالیبراسیون پارامترهای مدل پلیت کالیبره شده هیدروسیکلون آق‌دره را نشان می‌دهد.

جدول ۷: ضرایب کالیبراسیون پارامترهای مدل پلیت

ضریب	پارامتر	مقدار ضریب
CF_1	d_{50c}	۱/۰۴
CF_2	S	۰/۹۲
CF_3	m	۳/۱

چون نرم‌افزار MODSIM پارامتر P را بعنوان ورودی دریافت می‌کند، در نتیجه ضریبی برای آن تعریف نشده است.

۷- اعتبارسنجی و شبه‌سازی

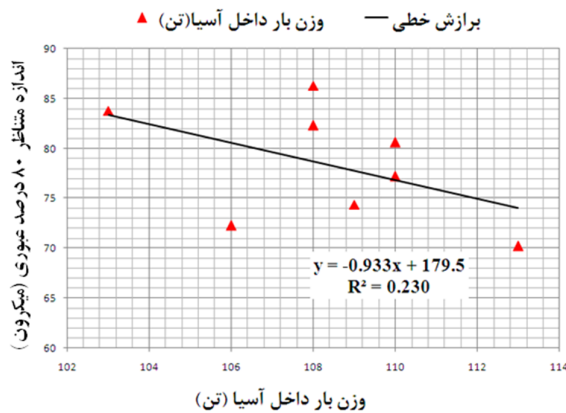
به‌منظور اعتبارسنجی مدل پلیت کالیبره شده از نمونه‌گیری مستقل در مرحله دوم استفاده شد. به این صورت که توزیع اندازه ذره جریان‌های مختلف مدار توسط نرم‌افزار MODSIM همراه با بکارگیری ضرایب کالیبراسیون در نمونه‌برداری مرحله دوم پیش‌بینی شدند. جدول ۸ مشخصات پیش‌بینی شده جریان‌های مدار آسیاکنی توسط نرم‌افزار MODSIM پس از کالیبراسیون را نشان می‌دهد.

جدول ۸: مشخصات پیش‌بینی شده جریان‌های مدار آسیاکنی توسط نرم‌افزار MODSIM پس از کالیبراسیون

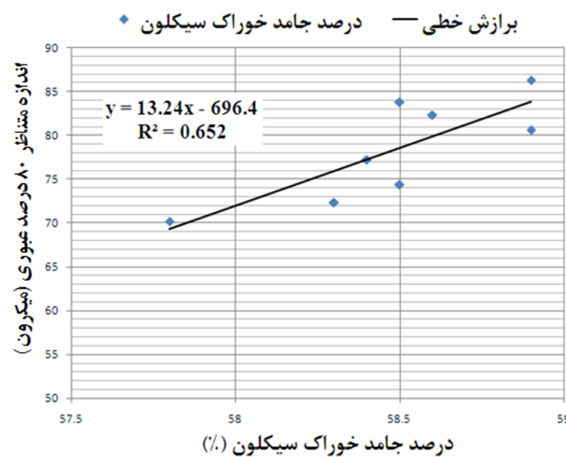
جریان	جامد (t/h)	محتوی جامد (%)	d_{80} (μm)	آب (m^3/h)
تهریز سرند گردان	۴۵۶/۵	۶۹/۶	۲۲۵	۱۹۹/۵
اسکت	۰/۰۰۲۲	۹۵	۱۹۹۰۰	۰/۰۰۰۱۲
خوراک سیکلون	۴۵۶/۵	۶۰	۲۲۵	۳۰۴/۵
سرریز سیکلون	۱۲۰/۸	۴۰/۸	۷۳	۱۷۵/۲
تهریز سیکلون	۳۳۵/۶	۷۲/۲	۲۵۵	۱۲۹/۳

توان‌کشی آسیا ۱۸۳۰ کیلووات و زمان اقامت ذرات جامد داخل آسیا ۵/۸ دقیقه و وزن بار داخل آسیا بدون گلوله (کانسنگ و دوغاب) نیز ۴۴/۳ تن برای نمونه‌برداری دوم پس از کالیبراسیون محاسبه شد. شکل ۷ نیز مقایسه این پیش‌بینی‌ها را با توزیع اندازه ذره آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

در مدت ۸ هفته از مدار خردایش کارخانه فرآوری آق دره جمع آوری شده است).

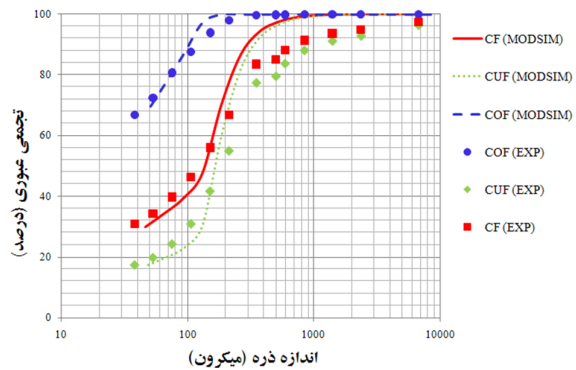


شکل ۸: تاثیر وزن بار داخل آسیا بر روی P_{80}



شکل ۹: تاثیر درصد جامد خوراک سیکلون بر روی P_{80}

با توجه به شکل ۸، وزن بار داخل آسیا تقریباً رابطه عکس با P_{80} دارد. البته از آنجایی که داده‌های نمودار شکل ۸ بصورت روزانه ارائه نشده بلکه هر کدام از داده‌ها معرف میانگین داده‌های یک هفته است، در نتیجه پراکندگی زیاد به نظر می‌رسد. در شکل ۹ نیز آشکار است که درصد جامد خوراک سیکلون رابطه مستقیم با P_{80} دارد. شبیه‌سازی مدار خردایش برای رسیدن به P_{80} کمتر از ۷۰ میکرون نشان داد که افزایش درصد حجمی بار داخل آسیای نیمه‌خودشکن (وزن بار داخل آسیا) که عبارت بودند از ۲۶، ۳۰ و ۳۵ درصد، بیشترین تاثیر را دارد و کاهش درصد جامد خوراک هیدروسیکلون و تغییر قطر داخلی سرریز و قطر داخلی ته‌ریز و تعداد سیکلون تاثیر بسیار کمتری داشتند. جدول ۱۰ نتایج



شکل ۷: توزیع اندازه ذره جریان‌های مختلف هیدروسیکلون پس از کالیبراسیون برای نمونه‌برداری مرحله دوم

با توجه به نمودار فوق، توزیع اندازه ذره پیش‌بینی شده با توزیع اندازه ذره واقعی در جریان سرریز سیکلون که هدف اصلی شبیه‌سازی می‌باشد، اختلاف بسیار اندکی دارد و P_{80} پس از کالیبراسیون ۷۳ میکرون به دست آمده است (مقدار واقعی ۷۲/۷ میکرون). همچنین برای بررسی دقت نرم‌افزار MODSIM پارامترهای مدل پلیت قبل از کالیبراسیون (پیش‌بینی شده) با پس از کالیبراسیون در نمونه‌برداری مرحله دوم در جدول ۸ مقایسه شدند (جدول ۹).

جدول ۹: مقایسه پارامترهای مدل پلیت در نمونه‌برداری مرحله دوم

پارامترها	اندازه‌گیری شده	پیش‌بینی قبل از کالیبراسیون	پیش‌بینی پس از کالیبراسیون
d_{50c}	۸۸	۹۱/۶۵	۱۱۶/۹
S	۱/۰۹	۱/۲۱	۱/۱۳
m	۱/۱۸	۰/۳۵	۰/۷۲

مهمترین پارامترهای مؤثر بر P_{80} ، چهار عامل بار در گردش، درصد جامد خوراک هیدروسیکلون، وزن بار داخل آسیا خوراک آسیا در سطوح مختلف هم بصورت تجربی و هم با استفاده از نرم‌افزار Minitab[®] به دست آمده بودند [۹]. بررسی تاثیر پارامتر F_{80} خوراک آسیا بر روی اندازه محصول مدار خردایش، بدلیل تغییرات زیاد و عدم کنترل آن در کارخانه، بسیار مشکل است. پارامتر بار در گردش نیز مستقل نیست. شکل ۸ و ۹ به ترتیب تاثیر درصد حجمی بار داخل آسیا و درصد جامد خوراک هیدروسیکلون بر روی کاهش P_{80} را نشان می‌دهد (داده‌ها میانگین هفتگی بوده و

کرده و تعداد برخوردها افزایش می‌یابد. همچنین دقت جدایش (m) به ۰/۷ افزایش یافته است که نشان دهنده بهبود عملکرد هیدروسیکلون نسبت به شرایط کنونی می‌باشد.

تشکر و قدردانی

از مدیران و کارکنان کارخانه فرآوری طلای آق‌دره به خاطر همکاری صمیمانه آنان در طول انجام این تحقیق صمیمانه تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

مراجع

[1] Napier-Munn, T.J., Morrel, S., Morrison, R. D. and Kojovic, T., 1996, "Mineral comminution circuits", JKMCRC, Australia, pp. 318-320, 332.

[2] Spring, R., 1992, "NorBal3 software for material balance reconciliation", Noranda Technology Center.

[3] King, R. P.; 2001; "The User Manual of MODSIM"; Department of Metallurgical Engineering, University of Utha, USA, pp. 1-2, 37, 55.

[۴] حسینی، سعید، دهقانی، علی، خسروی، مهدی؛ ۱۳۸۸؛ "آزمایش‌های شکست مورد نیاز در مدلسازی آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن"؛ سومین کنفرانس مهندسی معدن ایران، صفحه ۱۷۷۸

[5] King, R. P; 2001; "Modelling and Simulation of Mineral Processing Systems"; Department of Metallurgical Engineering, University of Utha, USA, pp. 201-202.

[۶] ارجمند، قربان؛ ۱۳۸۸؛ "بررسی امکان فرآوری سنگ آهن آبرفتی سنگان و تولید در مقیاس پایلوت و طراحی مهندسی آن"؛ پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، صفحه ۱۱۱-۱۱۴.

[7] Austin, L. G., Klimple, R.P., Luckie, P.T; 1984; "Processing Engineering of Reduction: Ball Mill"; Society of Mining Engineering.

کلی شبه‌سازی مدار خردایش با تغییر پارامتر وزن بار داخل آسیارا همراه با ۶ سیکلون فعال، قطر داخلی سرریز ۸۲ میلیمتر و قطر داخلی ته‌ریز ۷۰ میلیمتر نشان می‌دهد.

البته به دلیل تاثیر کمتر پارامتر درصد جامد خوراک سیکلون در کاهش P_{80} ، که با کاهش درصد جامد خوراک سیکلون از ۵۸/۳ به ۵۷/۲ درصد (افزایش آب ورودی به سیکلون از ۱۰۵ مترمکعب بر ساعت تا ۱۳۰ مترمکعب بر ساعت)، P_{80} تنها از ۷۲/۴ میکرون تا ۷۰/۴ میکرون کاهش یافت. دلیل افزایش آب ورودی به سیکلون تا ۱۳۰ مترمکعب بر ساعت، محدودیت کاهش درصد جامد سرریز سیکلون است که به دلیل نیاز فرآیند فروشویی به درصد جامد ۳۷ تا ۳۸ درصد داخل مخازن فروشویی، نباید بیشتر از این مقدار آب به ورودی سیکلون اضافه کرد.

جدول ۱۰: نتایج شبه‌سازی مدار خردایش با تغییر پارامتر وزن بار داخل آسیا

پارامترها	حجم بار داخل آسیا، ٪۲۶	حجم بار داخل آسیا، ٪۳۰	حجم بار داخل آسیا، ٪۳۵
d_{50c}	۹۴/۲	۸۷/۲	۸۱/۳۵
وزن بار آسیا بدون گلوله (t)	۶۱/۱	۷۴/۳	۹۱
توان آسیا (kW)	۱۹۴۴/۳	۲۰۱۱	۲۰۶۷/۱
زمان اقامت ذرات جامد (min)	۷/۴	۹/۴	۱۲
m	۰/۷	۰/۷	۰/۷
P_{80} (μm)	۶۱/۷	۵۶/۱	۵۰/۹

۸- نتیجه‌گیری

شبه‌سازی با قطر داخلی سرریز و قطر داخلی ته‌ریز به ترتیب با اندازه‌های ۸۲ و ۷۰ میلیمتر، با تعداد ۶ سیکلون در حال کار و افزایش درصد حجمی بار داخل آسیا به ۳۵ درصد، انجام شد (بهترین نتیجه برای کاهش P_{80} با این ترکیب از متغیرهای هندسی هیدروسیکلون به دست آمد) که P_{80} به ۵۰/۹ میکرون کاهش یافت. می‌توان نتیجه گرفت که، افزایش درصد حجمی بار داخل آسیا مهمترین پارامتر موثر در کاهش ذرات محصول مدار خردایش است، و با افزایش زمان اقامت متوسط به ۱۲ دقیقه و افزایش توان کشی به ۲۰۶۷ کیلووات، ذرات فرصت بیشتری برای خردشدن پیدا

- [8] حسین زاده قره قشلاق، حجت؛ ۱۳۸۶؛ "بهینه سازی خردایش آسیای نیمه خودشکن کارخانه فرآوری آق دره"؛ پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، صفحه ۱۱۴.
- [9] <http://www.jktech.com.au>, JKTech of JKMRC, Australia.
- [10] حسنی، سعید، دهقانی، علی، خسروی، مهدی؛ ۱۳۸۸؛ "تعیین اندیس کار باند با استفاده از آسیای سایش و دستگاه وزنه افتان"؛ سومین کنفرانس مهندسی معدن ایران، صفحه ۱۷۸۶.
- پی نوشت

¹Trommel screen

²Scat

³Austin

⁴Hoyer

⁵Impact breakage

⁶Self-breakage

⁷Surface wear

⁸JKMRC (Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre)

⁹Napier-Mann

¹⁰Starkey

¹¹Plitt

¹²Slurry