

کالیبراسیون مدل پلیت در بهینه‌سازی عملکرد خوشه هیدروسیکلون کارخانه فرآوری طلائی آق‌دره

اکبر فرزنانگان^{۱*}، علی ابتداعی قلائی^۲

۱- استادیار دانشگاه کاشان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی معدن، Email: a.farzanegan@kashanu.ac.ir

۲- دانش‌آموخته فرآوری مواد معدنی، دانشگاه کاشان، گروه مهندسی معدن، Email: ali.ebtadaei64@gmail.com

(دریافت ۶ مرداد ۱۳۸۹، پذیرش ۱۷ آذر ۱۳۸۹)

چکیده

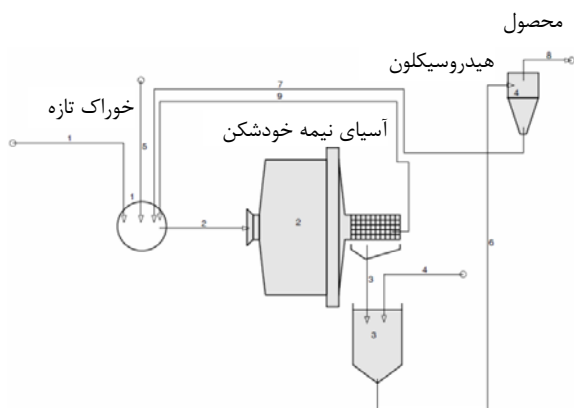
در کارخانه فرآوری طلائی آق‌دره اندازه ذرات حاصل از خردایش در فرایند فروشویی طلا اهمیت زیادی دارد. به‌همین دلیل، بهبود عملکرد خوشه هیدروسیکلون به‌منظور کاهش اندازه ذرات سرریز به کمتر از ۷۰ میکرون (وضعیت کنونی) تاثیر زیادی در افزایش بازایی طلا دارد. در این تحقیق بهینه‌سازی عملکرد خوشه هیدروسیکلون با کاربرد مدل تجربی پلیت^۱ (Plitt) و کالیبراسیون آن و شبیه‌سازی فرایند طبقه‌بندی انجام گرفته است. پس از انجام دو مرحله نمونه‌برداری از جریان‌های هیدروسیکلون و تجزیه سرنندی آنها، داده‌های توزیع اندازه ذره و دبی جریان‌های اندازه‌گیری شده اولیه موازنه جرم شدند. سپس با استفاده از نرم‌افزار BMCS^۲ توزیع اندازه ذره جریان‌های سرریز و ته‌ریز در نمونه‌برداری مرحله اول پیش‌بینی و کالیبراسیون پارامترهای مدل پلیت به منظور مدل‌سازی دقیق عملکرد هیدروسیکلون در محیط نرم‌افزار Excel انجام شد. پس از اعتبارسنجی مدل کالیبره شده پلیت توسط نمونه‌برداری مرحله دوم، شبیه‌سازی هیدروسیکلون با نرم‌افزار BMCS انجام شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که با سرریز و ته‌ریز به ترتیب با اندازه قطرهای ۷۵ و ۷۰ میلی‌متر، با تعداد ۶ سیکلون فعال اندازه معادل ۸۰ درصد عبوری محصول تقریباً به ۶۸/۵ میکرون کاهش یافت. همچنین با سرریز و ته‌ریز به ترتیب با اندازه قطرهای ۹۴ و ۵۳ میلی‌متر با تعداد ۶ سیکلون فعال، پارامتر تیزی یا دقت جدایش، m با ۲/۳۸ برابر افزایش، از ۱/۱۸ به ۲/۸۱ رسید که نشان‌دهنده طبقه‌بندی دقیق‌تر ذرات است.

کلمات کلیدی

طبقه‌بندی، هیدروسیکلون، خردایش، مدل‌سازی و شبیه‌سازی، فرآوری طلا، بهینه‌سازی، آق‌دره

* نویسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات

در بافت کانی‌شناسی کانسنگ آق‌دره، چگونگی توزیع آن و درجه آزادی در آزمایشگاه کارخانه فرآوری پوپازرکان و مؤسسه‌ها و آزمایشگاه‌های معتبر داخلی و خارجی از جمله موسسه داوسون کانادا تعریف شده است.



شکل ۱: شمای عملیات مدار آسیابکنی کارخانه فرآوری طلای آق‌دره

۱-۱- منحنی عملکرد هیدروسیکلون

رایج‌ترین روش برای نمایش عملکرد هیدروسیکلون‌ها، استفاده از منحنی توزیع است. سه پارامتر، بازیابی آب به تهریز سیکلون (R_f)، حد جدایش تصحیح شده (d_{50c}) و تیزی یا دقت جدایش (m) شاخص‌های اصلی عملکرد در فرایند طبقه‌بندی هستند. اگر R_f بین 0.4 تا 0.5 باشد عملکرد هیدروسیکلون ضعیف است. چنان‌چه m در محدوده تقریبی $1/5$ تا $3/5$ باشد، نشان‌دهنده تیزی جدایش مناسب است. برای بیان تیزی جدایش از پارامتر ضریب نقص نیز استفاده می‌شود. ضریب نقص^۵ هیدروسیکلون از رابطه ۱ به دست می‌آید [۳]:

$$I = \frac{d_{75} - d_{25}}{2 \times d_{50}} \quad (1)$$

که در آن، d_{75} و d_{25} به ترتیب اندازه‌هایی هستند که ۷۵ و ۲۵ درصد ذرات با آن اندازه‌ها به تهریز منتقل می‌شوند. کلسال^۶ (۱۹۵۳) [۲]، نشان داد ذرات ریز موجود در محصول تهریز سیکلون، متناسب با درصدی از آب (R_f) است که از تهریز خارج می‌شود که با رابطه (۲) نشان داده می‌شود:

$$R_f = \frac{W_u}{W_f} \quad (2)$$

که در آن، W_u دبی حجمی آب خروجی از تهریز و W_f دبی حجمی آب ورودی به سیکلون است. با حذف این ذرات از تهریز

۱- مقدمه

خردکردن کانسنگ طبیعی تا حد مطلوب آزادسازی فلز طلا و سپس استفاده از فرایند لیچینگ^۳ به روش سیانوراسیون^۴ در داخل مخازن همزن‌دار، معمول‌ترین مدار استحصال طلا می‌باشد. فرایند طبقه‌بندی توسط هیدروسیکلون‌ها در کارایی مدارهای بسته خردایش کانسنگ طلا و به‌دست آوردن ابعاد مطلوب ذرات برای فرایند مرحله بعدی فروشویی به روش سیانوراسیون بسیار مؤثر است و بهینه‌سازی آن در افزایش بازیابی فلز طلا و بازدهی کلی استحصال فلز طلا اهمیت زیادی دارد [۱]. بهینه‌سازی عملکرد یک هیدروسیکلون در یک مدار خردایش معمولاً با اهداف زیر انجام می‌گیرد [۲]:

- دسترسی به محصولی با ابعاد مناسب
- دسترسی به درصد جامد پالپ مناسب یا دبی آب مناسب
- بهبود راندمان طبقه‌بندی
- اصلاح ظرفیت (معمولاً افزایش آن)

به‌طور کلی فرایند بهینه‌سازی پیچیده می‌باشد، زیرا اهداف ذکر شده روی یکدیگر مؤثرند. پیچیدگی تأثیر متقابل سیکلون‌ها روی هم و تأثیر مدار به‌طور کلی مشخص می‌کند که شبیه‌سازی معمولاً بهترین راه برای ارزیابی مناسب‌ترین گزینه‌های آزمایش عملکرد هیدروسیکلون می‌باشد [۲]. دو گروه از متغیرهای موجود برای بهینه‌کردن عملکرد سیکلون عبارتند از: الف) متغیرهای هندسی سیکلون (قطر سیکلون، قطر دریچه‌های خروجی ته ریز و سرریز) ب) متغیرهای شرایط بار ورودی شامل چگالی و دبی کانی-های اصلی تشکیل دهنده کانسنگ

در کارخانه فرآوری طلای آق‌دره، آسیاب نیمه‌خودشکن در مدار بسته با هیدروسیکلون کار می‌کند (شکل ۱). در این نوع مدارهای خردایش ابعاد خردایش به‌راحتی در آسیاب نیمه‌خودشکن قابل کنترل نیست و به شدت تحت تأثیر کانسنگ ورودی می‌باشد. در نتیجه هیدروسیکلون نقش مهمی در کنترل ابعاد محصول مدار خردایش ایفا خواهد کرد. بنابراین، در این مدار می‌توان تنظیم ابعاد خردایش را با تغییر عملکرد هیدروسیکلون انجام داد. در این تحقیق با توجه به فرایند پایین دستی (فروشویی)، فرایند طبقه‌بندی در هیدروسیکلون برای تأمین اندازه ذرات مناسب برای بالا بردن راندمان فرایند فروشویی استفاده شده است. یکی از اهداف اصلی این تحقیق کاهش ابعاد محصول مدار خردایش از ۷۰ میکرون به کمتر از ۵۰ میکرون می‌باشد. این هدف‌گذاری با توجه به مطالعات مفصل کانی‌شناسی فرایند قبلی و انجام آزمایش‌های مختلف فروشویی در شرایط گوناگون بر روی اندازه ذرات با ارزش طلا

است. همچنین، η ویسکوزیته سیال (سانتی پواز)، Φ درصد حجمی جامد خوراک (درصد)، Q دبی حجمی خوراک سیکلون (لیتر در دقیقه)، ρ_s چگالی جامد (گرم بر سانتی‌متر مکعب)، ρ چگالی پالپ (گرم بر سانتی‌متر مکعب)، CF_1 تا CF_4 ضرایب لازم برای کالیبراسیون پارامترهای مدل پلیت هستند. پارامترهای درصد جامد، تناژ جامد و چگالی جامد خوراک و همچنین چگالی سیال، نیز پارامترهایی از خوراک هستند که در تعیین پارامترهای مدل در نظر گرفته می‌شوند [۶] و [۱۰]. رابطه ۸ به عنوان تابع طبقه‌بندی برای ترسیم منحنی توزیع در نظر گرفته می‌شود:

$$R_i = 1 - \exp\left(-0.693\left(\frac{d_i}{d_{50c}}\right)^m\right) \quad (8)$$

که در آن، d_i اندازه ذرات در طبقات سرندی مختلف و R_i درصد بازیابی ذرات جامد به تهریز سیکلون می‌باشد. در صورتی که میان بر زدن مواد جامد در آب راه یافته به تهریز نیز در نظر گرفته شود، از رابطه ۹ استفاده می‌شود [۶] و [۱۰]:

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

که در آن، R_f بازیابی آب به تهریز سیکلون است. ضریب CF_5 نیز برای تصحیح پارامتر، R_f به کار می‌رود. مدل پلیت کاربردهای گوناگونی از جمله آنالیز و عیب‌یابی فرآیند از طریق جستجوی مقادیر پارامترهای d_{50c} ، R_f و m که بر اساس داده‌های کارخانه و طراحی مدار تخمین زده شده‌اند، برای پیدا کردن هندسه تقریبی سیکلون و تعداد سیکلون مورد نیاز دارند [۶] و [۱۰].

۲- روش و مراحل تحقیق

در این تحقیق، به‌طور کلی روش مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی فرایند طبقه‌بندی اندازه ذره برای تجزیه و تحلیل کارایی هیدروسیکلون و بهینه‌سازی آن مورد استفاده قرار گرفت. در مرحله نخست، نمونه‌برداری‌های لازم از جریان‌های مختلف مدار خردایش انجام شد. در مرحله دوم با روش تجزیه سرندی توزیع اندازه ذره نمونه‌های جمع‌آوری شده تعیین شد. سپس، پردازش داده‌های خام مربوط به شرایط اجرایی در هنگام نمونه‌برداری و همچنین نتایج تجزیه سرندی با کمک نرم‌افزارهای موازنه جرم، صفحه گسترده و شبیه‌سازی هیدروسیکلون انجام شد که در قسمت‌های بعد توضیح داده شده‌اند.

حد جدایش اصلاح شده به دست می‌آید [۳]. بنابراین راندمان حقیقی (ضریب توزیع اصلاح شده)، با استفاده از رابطه ۳ به دست می‌آید [۳]:

$$E_{ci} = \frac{E_i / (100 - R_f)}{1 - R_f} \times 100 \quad (3)$$

که، E_i بازیابی ذرات جامد جریان خوراک سیکلون به تهریز برای طبقه سرندی نام که ضریب توزیع نیز نامیده می‌شود.

۲-۱- مدل پلیت

یکی از کامل‌ترین و رایج‌ترین مدل‌های ریاضی هیدروسیکلون، مدل پلیت است که در سال ۱۹۷۶ میلادی ارائه شد و نسخه اصلی آن در نرم‌افزار BMCS به کار رفته است [۴]. پلیت مدل خود را با استفاده از چهار معادله تجربی که روابط همبستگی میان متغیرهای اصلی عملکرد هیدروسیکلون با متغیرهای طراحی و شرایط عملیاتی آن را نشان می‌دهند، به صورت روابط ۴ تا ۷ ارائه کرده است [۵]، [۶]، [۷]، [۸] و [۹]:

$$d_{50c} = CF_1 \times \frac{39.7 \times D_c^{0.46} D_i^{0.6} D_o^{1.21} \exp(0.063\phi)}{D_u^{0.71} h^{0.38} Q^{0.45} (\rho_s - \rho)^{0.5}} \quad (4)$$

$$P = CF_2 \times \frac{1.88 \times Q^{1.78} \exp(0.0055\phi)}{D_c^{0.37} D_i^{0.94} h^{0.28} (D_u^2 + D_o^2)^{0.87}} \quad (5)$$

$$S = CF_3 \times 1.9 \left(\frac{D_u}{D_o}\right)^{3.31} \times h^{0.54} \times \frac{(D_u^2 + D_o^2)^{0.36} \exp(0.0054\phi)}{H^{0.24} D_c^{1.11}} \quad (6)$$

$$m = CF_4 \times 1.94 \exp\left(-1.58 \frac{S}{S+1}\right) \left(\frac{D_c^2 h}{Q}\right)^{0.15} \quad (7)$$

مدل پلیت در روابط ۴ تا ۷، دارای دو دسته متغیر وابسته و مستقل می‌باشد که متغیرهای وابسته عبارتند از: حد جدایش تصحیح شده (d_{50c})، فشار (P)، تقسیم حجمی جریان (S) و تیزی جدایش (m). متغیرهای مستقل یا طراحی نیز شامل قطر سیکلون (D_c)، قطر پیداکننده گرداب یا سرریز (D_o)، قطر تهریز (D_u)، قطر ورودی (D_i) و ترکیبی از آنها ($D_o^2 + D_u^2$)، D_u/D_o و همچنین ارتفاع آزاد، فاصله سرریز تا تهریز، (h)

۲-۱- موازنه جرم و برازش منحنی

و از روش آنالیز سرنندی ۲/۶۹ و برای نمونه برداری مرحله دوم از روش درصد جامد ۲/۵۹ و از روش آنالیز سرنندی ۲/۶۶ به دست آمدند. این مقادیر نشان می‌دهند که هر دو روش دقت یکسانی دارند البته روش آنالیز سرنندی به دلیل تاثیر دادن تمام طبقات سرنندی معتبر است. 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 در مراحل نمونه‌گیری محاسبه شدند (جدول ۲).

جدول ۲: برخی از مشخصات جریان‌های خوراک، سرریز و ته‌ریز سیکلون در نمونه‌گیری مراحل اول و دوم

مرحله دوم	مرحله اول		جریان	
	دبی جامد (t/h)	محتوی جامد (%)		دبی جامد (t/h)
۵۸	۴۳۳/۷	۵۶	۴۶۲/۵	خوراک سیکلون
۴۰/۲	۱۲۰/۸	۳۸	۱۲۵/۵	سرریز سیکلون
۷۰	۳۱۲/۹	۶۸	۳۳۶/۹	ته‌ریز سیکلون

۳- بررسی منحنی عملکرد هیدروسیکلون

به منظور اطلاع از کارایی کنونی هیدروسیکلون و اعمال تغییرات لازم برای بهبود آن، منحنی عملکرد هیدروسیکلون کارخانه فرآوری طلای آق‌دره قبل از اصلاح و بعد از آن برای دو سری نمونه برداری در محیط نرم‌افزار Excel تهیه شد که به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نمایش داده شده است. ضریب نقص (طبق رابطه ۱) برای حالت اصلاح نشده در محیط نرم‌افزار Excel برای نمونه برداری مرحله اول و دوم به ترتیب ۰/۸۸ و ۰/۹۴ و برای حالت اصلاح شده به ترتیب ۰/۵۳ و ۰/۵۴ به دست آمد. مقدار R_f نیز برای نمونه برداری حالت اول و دوم به ترتیب ۰/۴۴ و ۰/۴۳ به دست آمد. این مقادیر نشان‌دهنده عملکرد ضعیف هیدروسیکلون‌ها است.

۴- مدل‌سازی عملکرد هیدروسیکلون

به منظور بهبود عملکرد هیدروسیکلون از روش مدل‌سازی و سپس شبیه‌سازی با نرم‌افزار BMCS استفاده شد. برای مدل‌سازی ابتدا پارامترهای مدل پلیت با استفاده از نمونه برداری مرحله اول کالیبره شدند. پیش‌بینی توزیع اندازه ذره جریان‌های سرریز و ته‌ریز در شکل ۴ نشان داده شده است.

به منظور بالا بردن کیفیت توزیع‌های اندازه ذره اندازه‌گیری شده، این داده‌ها توسط نرم‌افزار موازنه جرم NorBal، بر اساس روش لاگرانژ تعدیل شدند [۱۱]. سپس بر اساس این داده‌ها، مقادیر ضریب توزیع مربوط به منحنی کارایی هیدروسیکلون محاسبه و نمودارهای آن ترسیم شد. مقادیر واقعی (آزمایشگاهی یا اندازه‌گیری شده) پارامترهای d_{50c} ، R_f و m از طریق برازش رابطه ۹ در محیط نرم‌افزار صفحه گسترده Excel بر داده‌های ضریب توزیع واقعی با کمک دستور Solver و بر اساس روش حداقل مربعات محاسبه شدند.

۲-۲- شبیه‌سازی

نرم‌افزار شبیه‌ساز BMCS برنامه‌ای است که به زبان C نوشته شده است و در محیط DOSTM اجرا می‌گردد و می‌تواند برای شبیه‌سازی عملکرد مدارهای باز یا بسته آسیابهای گلوله‌ای همراه با واحدهای طبقه‌بندی (هیدروسیکلون) استفاده شود [۴]. در این برنامه از مدل تجربی پلیت برای شبیه‌سازی واحدهای هیدروسیکلون استفاده شده است [۴] و [۵].

در کارخانه فرآوری طلای آق‌دره پس از انجام دو مرحله نمونه برداری از جریان‌های اطراف خوشه هیدروسیکلون، تجزیه سرنندی با روش‌های تر و خشک انجام شد و توزیع اندازه ذره و درصد جامد تمامی جریان‌ها اندازه‌گیری و تعیین شدند. سپس توسط نرم‌افزار BMCS پارامترهای فوق پیش‌بینی و ضرایب کالیبراسیون محاسبه شدند. به کمک نمونه برداری مرحله دوم و توسط مدل پلیت کالیبره شده، عملکرد سیکلون با تغییر متغیرهای هندسی (جدول ۱) و تعداد هیدروسیکلون فعال شبیه‌سازی و شرایط بهینه به دست آمد.

جدول ۱: متغیرهای هندسی هیدروسیکلون آق‌دره

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

تعداد سیکلون‌های خوشه هیدروسیکلون کارخانه فرآوری طلای آق‌دره ۱۰ عدد است که ۷ عدد از آن‌ها فعال می‌باشند. وزن مخصوص ذرات جامد خاک ورودی ۲/۹ است. نسبت بار در گردش برای نمونه برداری مرحله اول از روش درصد جامد ۲/۶۸

همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است، پیش‌بینی به مقدار واقعی بسیار نزدیک است و حداکثر اختلاف ۱/۴ درصد در طبقه سزندی ۳۸ میکرون مشاهده می‌شود. پس از برآزش مدل طبقه‌بندی پلیت به داده‌های آزمایشگاهی بازیابی ذرات جامد به تهریز، مقدار واقعی پارامترهای d_{50c} ، R_f و m محاسبه شدند. مقدار واقعی پارامتر P معادل مقدار قرائت شده هنگام نمونه- برداری از روی فشارسنج نصب شده در مسیر خوراک ورودی به خوشه هیدروسیکلون ثبت شد. مقدار پارامتر S نیز بعد از تعیین مشخصات جریان‌های سیکلون محاسبه شد که در جدول ۳ آمده است. در نمونه‌برداری مرحله اول اندازه ذرات سرریز سیکلون (P_{80})، ۶۹/۴ میکرون به دست آمد.

جدول ۳: پارامترهای مدل پلیت در نمونه‌برداری مرحله اول

پیش‌بینی BMCS	اندازه‌گیری شده (واقعی)	پارامتر
۷۷	۸۱/۸	d_{50c} (μm)
۱۶۵/۳۸	۱۷۵	P (KPa)
۱/۲۲	۱/۱۱	S
۱/۴۸	۱/۷۵	m
۰/۴۷	۰/۴۴	R_f

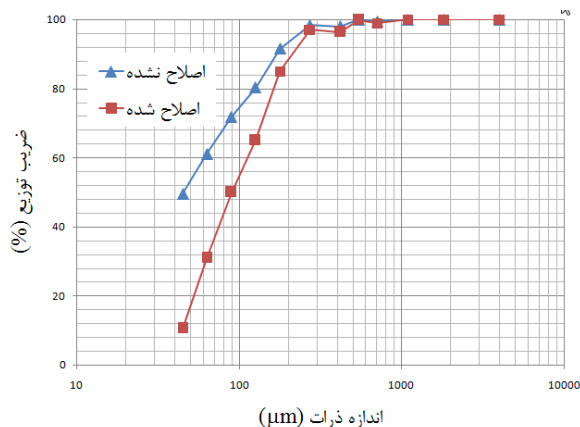
ضرایب لازم برای کالیبراسیون پارامترهای مدل پلیت با استفاده از رابطه ۱۰ محاسبه شدند [۴]:

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

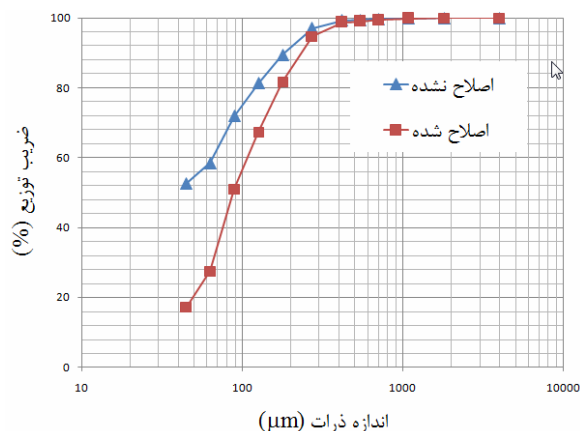
که در آن، مقدار محاسبه شده همان مقدار پیش‌بینی شده با نرم‌افزار BMCS است. جدول ۴ ضرایب کالیبراسیون پارامترهای مدل پلیت کالیبره شده هیدروسیکلون آق‌دره را نشان می‌دهد.

جدول ۴: ضرایب کالیبراسیون پارامترهای مدل پلیت

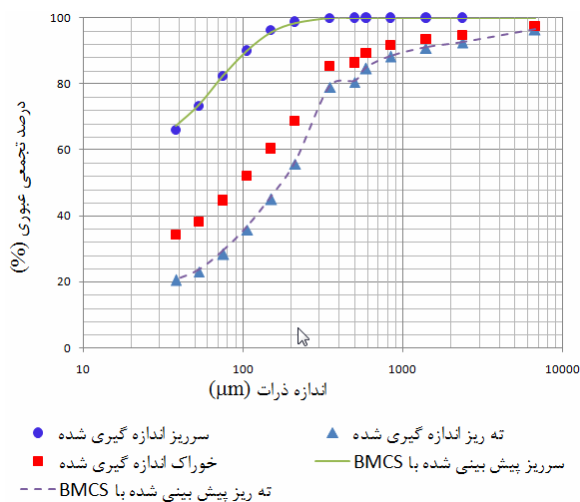
مقدار	ضریب
۱/۰۶	CF_1
۱/۰۶	CF_2
۰/۹۱	CF_3
۱/۱۸	CF_4
۰/۹۴	CF_5



شکل ۲: منحنی بازیابی هیدروسیکلون برای نمونه‌برداری مرحله اول

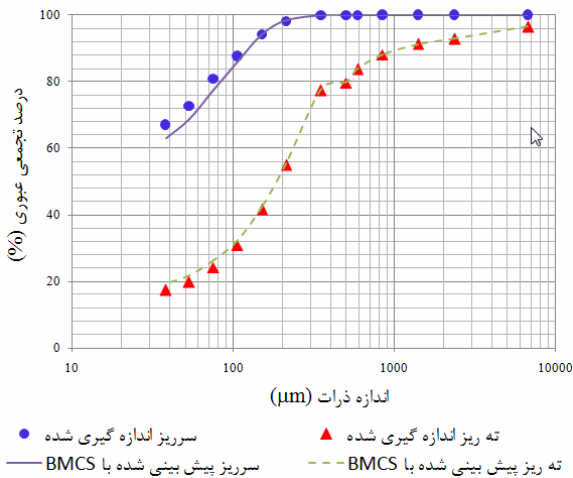


شکل ۳: منحنی بازیابی هیدروسیکلون برای نمونه‌برداری مرحله دوم



شکل ۴: مقایسه توزیع‌های اندازه ذره اندازه‌گیری شده (واقعی) با توزیع اندازه ذره پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار BMCS در نمونه- برداری مرحله اول

حداکثر خطای پیش‌بینی توزیع اندازه ذره در طبقه سرندي ۳۸ میکرون سرریز سیکلون پس از کالیبراسیون، به مقدار ۳/۸۷ درصد کاهش یافت. همچنین برای بررسی دقت نرم‌افزار BMCS پارامترهای مدل پلیت پیش از کالیبراسیون (پیش‌بینی شده) با پس از کالیبراسیون در نمونه‌برداری مرحله دوم در جدول ۵ مقایسه شدند.



شکل ۶: مقایسه توزیع‌های اندازه ذره اندازه‌گیری شده (واقعی) و پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار BMCS پس از کالیبراسیون در نمونه‌برداری مرحله دوم

جدول ۵: مقایسه پارامترهای مدل پلیت در نمونه‌برداری مرحله دوم

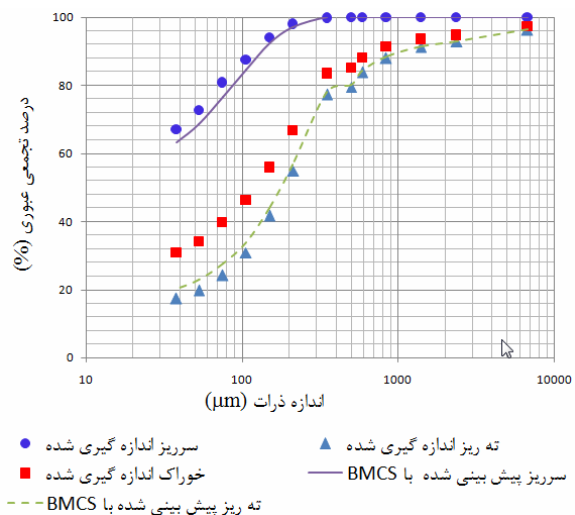
پارامتر	اندازه‌گیری شده	پیش‌بینی قبل از کالیبراسیون	پیش‌بینی بعد از کالیبراسیون
d_{50c} (μm)	۷۵/۴	۸۷	۹۲/۰
P (KPa)	۱۷۵	۱۳۸/۴	۱۴۶/۷
S	۱/۰۹	۱/۳۸	۱/۲۳
m	۱/۴۶	۱/۴۳	۱/۷۶
R_f	۰/۴	۰/۵	۰/۴۴

مقایسه مقادیر پارامترهای مشخصه هیدروسیکلون پیش و پس از کالیبراسیون نشان می‌دهد چنان‌چه ضرایب کالیبراسیون در ورودی برنامه مورد استفاده قرار گیرند، نتایج تولید شده توسط شبیه‌ساز به مقدار واقعی نزدیکتر خواهد بود و بنابراین به طور کلی می‌توان گفت با کالیبراسیون دقت شبیه‌سازی افزایش می‌یابد.

پس از تایید اعتبار مدل کالیبره شده پلیت، شبیه‌سازی با نرم‌افزار BMCS، با تغییر اندازه قطر سرریز و ته‌ریز و تعداد

۵- اعتبارسنجی مدل و شبیه‌سازی هیدروسیکلون

پس از کالیبره کردن پارامترهای مدل پلیت (برای تطبیق با شرایط ویژه عملیاتی هیدروسیکلون‌های مورد استفاده در کارخانه فرآوری طلای آق‌دره) با استفاده از نمونه‌برداری مرحله اول، اعتبار پیش‌بینی‌های انجام شده بر اساس آن مورد بررسی قرار گرفت. به منظور اعتبارسنجی مدل کالیبره شده پلیت از نمونه‌برداری مستقل در مرحله دوم استفاده شد. توزیع اندازه ذره اندازه‌گیری شده با توزیع اندازه ذره پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار BMCS در نمونه‌برداری مرحله دوم در شکل ۵ مقایسه شده‌اند.



شکل ۵: مقایسه توزیع‌های اندازه ذره اندازه‌گیری شده (واقعی) و پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار BMCS پس از کالیبراسیون در نمونه‌برداری مرحله دوم

همان‌طور که از شکل ۵ نیز مشخص است، پیش‌بینی نرم-افزار BMCS بسیار به مقدار واقعی نزدیک است و حداکثر اختلاف قبل از شبیه‌سازی در طبقه سرندي ۷۵ میکرون سرریز سیکلون برابر با ۴/۱۶ درصد است. در نمونه‌برداری مرحله دوم اندازه ذرات سرریز سیکلون (P_{80}) ۷۲/۷ میکرون است. با به-کارگیری مدل پلیت کالیبره‌شده در نرم‌افزار BMCS، توزیع اندازه ذره جریان‌های هیدروسیکلون پیش‌بینی شد و با توزیع اندازه ذره واقعی مرحله دوم مقایسه شد. به این صورت که داده‌های مربوط به خوراک سیکلون از نمونه‌گیری مرحله دوم را در مدل قرار داده تا سرریز و ته‌ریز را شبیه‌سازی کند. سپس نتایج توزیع اندازه ذره با نتایج به دست آمده از نمونه‌گیری مستقل مرحله دوم مقایسه گردید (شکل ۶).

با توجه به جدول ۷ نسبت بار در گردش ۳/۷۸ است. هم-چنین با توجه به جدول ۸، P_{80} تقریباً برابر ۶۸/۵ میکرون است. مقادیر سایر متغیرهای هندسی هیدروسیکلون‌ها مانند قطر دهانه ورودی، قطر سیکلون و ارتفاع آزاد گرداب با توجه به این که شبیه‌سازی‌ها برای هیدروسیکلون‌های از قبل نصب شده در کارخانه انجام می‌شدند، در تمامی شبیه‌سازی‌ها ثابت در نظر گرفته شدند.

۶- نتیجه‌گیری

کالیبراسیون مدل پلیت نشان داد که نرم‌افزار BMCS می‌تواند با دقت بالایی توزیع اندازه ذره جریان‌های سرریز و ته‌ریز سیکلون را شبیه‌سازی و پیش‌بینی نماید، به طوری که حداکثر اختلاف با مقادیر واقعی به ترتیب در نمونه‌برداری مرحله اول و دوم، ۱/۴ درصد در طبقه سرنندی ۳۸ میکرون و ۴/۱۶ درصد در طبقه سرنندی ۷۵ میکرون برای سرریز سیکلون به دست آمد.

شبیه‌سازی با قطرهای سرریز و ته‌ریز به ترتیب معادل ۷۵ و ۷۰ میلی‌متر و با تعداد ۶ سیکلون فعال انجام شد که P_{80} تقریباً ۶۸/۵ میکرون به‌دست آمد که دلیل این تغییر افزایش نسبت بار در گردش از ۲/۶۶ به ۳/۷۸ است که فرصت خردایش بیشتر برای ذرات بیشتری را در داخل مدار خردایش ایجاد می‌کند. همچنین شبیه‌سازی با سرریز و ته‌ریز به ترتیب با اندازه قطرهای ۹۴ و ۵۳ میلی‌متر و با تعداد ۶ سیکلون فعال انجام شد که ضریب نقص به مقدار ۰/۳۳ کاهش یافت که نشان‌دهنده افزایش ۶۵ درصدی بازدهی هیدروسیکلون است، پارامتر m به ۲/۸۱ افزایش یافت که نشان‌دهنده افزایش ۲/۳۸ برابری دقت جدایش است.

در این تحقیق بهینه‌سازی عملکرد خوشه هیدروسیکلون در مدار باز، بدون در نظر گرفتن اندرکنش آن با آسیای نیمه‌خودشکن مدار خردایش انجام شد. از آن‌جا که در مدارهای آسیاکنی واحد طبقه‌بندی و واحد خردایش دو بخش جدایی‌ناپذیر هستند و بر روی یکدیگر تاثیر متقابل دارند، بنابراین پیشنهاد می‌شود در یک تحقیق وسیع‌تر، تاثیر هر دو واحد با هم در بهبود عملکرد هیدروسیکلون و تامین ذرات با ابعاد مطلوب برای فرآیند فروشویی کارخانه فرآوری آق‌دره ارزیابی شود.

سیکلون و با اهداف کاهش اندازه ذرات جامد سرریز سیکلون به کمتر از ۷۰ میکرون و دستیابی به تیزی جدایش در محدوده ۱/۵ تا ۳/۵ انجام شد، که نتایج آن در جداول ۶، ۷ و ۸ آمده است.

جدول ۶: نتایج شبیه‌سازی پارامترهای مدل پلیت

پارامتر	با هدف کاهش P_{80}		با هدف افزایش بازدهی سیکلون	
	D_u (mm)	D_o (mm)	D_u (mm)	D_o (mm)
	۷۵	۹۴	۵۳	۷۵
d_{50c} (μm)	۷۴		۱۱۸	
P (KPa)	۲۱۸/۲		۱۹۹/۹	
S	۱/۶۱		۰/۳۲	
m	۱/۵۶		۲/۸۱	
R_f	۰/۵		۰/۱۱	

جدول ۷: نتایج شبیه‌سازی مشخصات جریانهای خروجی

هیدروسیکلون با هدف کاهش P_{80}

جریان	دبی جامد (t/h)	محتوی جامد (%)	دبی آب (t/h)
سرریز	۹۰/۳	۳۶/۶	۱۵۶/۷
ته‌ریز	۳۴۱/۷	۶۸/۳	۱۵۸/۸

جدول ۸: نتایج شبیه‌سازی توزیع اندازه ذره جریانهای خروجی

هیدروسیکلون با هدف کاهش P_{80}

اندازه سرنند (μm)	باقی مانده روی سرنند (%)	
	سرریز	ته‌ریز
۶۷۳۰	۰	۳/۲۹
۲۳۶۰	۰	۳/۲۹
۱۴۰۰	۰	۱/۵۴
۸۴۰	۰	۲/۸۴
۵۹۰	۰	۴/۰۰
۵۰۰	۰	۳/۸۶
۳۵۰	۰	۲/۰۰
۲۱۲	۱/۰۴	۲۰/۹۸
۱۵۰	۲/۹۶	۱۲/۸۴
۱۰۶	۶/۳	۱۰/۴۶
۷۵	۷/۲۹	۶/۵۲
۵۳	۸/۱۲	۴/۸۵
۳۸	۵/۶۸	۲/۶۳
سینی	۶۸/۶۲	۲۰/۹۱

- [5] Plitt, L. R., 1976, "A mathematical model of the hydrocyclone classifier", CIM Bulletin, Vol. 69, No. 776, pp. 114-123.
- [6] Flintoff, B. C., Plitt, L. R. and Turak, A. A., 1987, "Cyclone modelling: A review of present technology", CIM Bulletin, Vol. 7, No. 2. pp. 39-50.
- [7] Gupta, A. and Yan, D. S., 2006, "Mineral processing design and operation: An introduction", Elsevier Science, 1st Edition, pp. 1-718.
- [8] Schubert, H., 2010, "Which demands should and can meet a separation model for hydrocyclone classification?", International Journal of Mineral Processing, Vol. 96, Issues 1-4, pp. 14-26.
- [9] Silva, C. L. Q., Penna, W., Araújo, A. C. B., Brito, R. P., Vasconcelos, L. G. S. and Alves, J. J. N., 2009, "Model fine tuning for prediction of hydrocyclone performance—An industrial case study", International Journal of Mineral Processing, Vol. 92, Issues 1-2, pp. 34-41.
- [۱۰] فرزاتگان، اکبر، ۱۳۸۷، "کنترل و مدلسازی سیستم‌های فرآوری مواد معدنی"، جزوه درسی، دانشگاه تهران، ص. ۴۳-۴۷.
- [11] Spring, R., 1992, "NorBal3 software for material balance reconciliation", Noranda Technology Center.

۷- تشکر و قدردانی

از مدیران و کارکنان کارخانه فرآوری طلای آق‌دره به خاطر همکاری صمیمانه آنان در طول انجام این پروژه و همچنین از شرکت فرآوری پویا زرکان به دلیل موافقت با اجرای این تحقیق تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

منابع

- [۱] مارسدن، جان؛ هاوس، یان؛ ۱۳۸۷، "صنعت استحصال طلا"، ترجمه عباس رکاب قلاتی، انتشارات روایت، تهران، چاپ اول، ص. ۱۱۵-۱۱۹.
- [2] Napier-Munn, T.J., Morrel, S., Morrison, R. D. and Kojovic, T., 1996, "Mineral comminution circuits", JKMR, Australia, pp. 318-320, 332.
- [۳] نعمت‌اللهی، حسین، ۱۳۸۴، "کانه‌آرایی"، جلد اول، موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، جلد اول، چاپ چهارم، ص. ۲۵۶-۲۶۱.
- [4] Farzanegan, A; 1998, "Knowledge-based optimization of mineral grinding circuits", Ph.D. Thesis, University of McGill, Montreal, Canada. pp. 94, 102-105.

پی‌نوشت

- ¹ Plitt
² Based Modular Comminution Simulator
³ Leaching
⁴ Cyanidation
⁵ Imperfection
⁶ Kelsall