



مقاله پژوهشی

جانمایی هیدروسیکلون در مدار آسیاکنی خطوط فرآوری شماره ۵، ۶ و ۷ مجتمع گل گهر با استفاده از مدل سازی و شبیه سازی با نرم افزار یوسیم پک

حسن هاشمی^۱، محمدرضا صمدزاده یزدی^{۱*}، مجتبی قربانزاد^۲، محمد قرداغی^۳

۱- دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲- پژوهشگر ارشد فرآوری مدیریت مرکز تحقیقات گل گهر سیرجان، شرکت معدنی و صنعتی گل گهر سیرجان، ایران

۳- ارشد فرآیند مدیریت امور فرآوری گل گهر سیرجان، شرکت معدنی و صنعتی گل گهر سیرجان، ایران

(دریافت: آبان ۱۴۰۲، پذیرش: تیر ۱۴۰۳)

چکیده

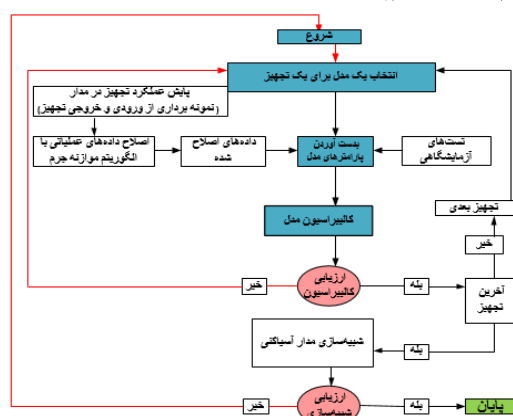
مدل سازی و شبیه سازی در طراحی، توسعه و بهینه سازی مدارهای فرآوری و پیش بینی رفتار و عملکرد کارخانه، نقش مهمی دارد. خط ۵، ۶ و ۷ مجتمع گل گهر از نظر فرآیندی با یکدیگر مشابه هستند و از معدن شماره سه این شرکت خوراک دهی می شوند. با توجه به این که خوراک ورودی به این خطوط دارای مقدار قابل توجهی نرمة است، جانمایی صحیح هیدروسیکلون مهم می شود. هدف اصلی این تحقیق، دستیابی به چیدمان بهینه مدار آسیای گلوله ای، جداکننده مغناطیسی شدت متوسط و هیدروسیکلون در مدار آسیاکنی این خطوط است. دو گزینه قرار دادن هیدروسیکلون ابتدا و انتها مدار آسیاکنی مورد ارزیابی قرار گرفت. شبیه سازی نحوه اثر جانمایی هیدروسیکلون بر عملکرد مدار آسیاکنی با استفاده از نرم افزار یوسیم پک بررسی شد. ابتدا پارامترهای لازم جهت شبیه سازی این مدار از قبیل تابع شکست، تابع انتخاب، زمان ماند و پارامترهای هندسی تجهیزات مختلف جمع آوری شده و سپس دو حالت مدار فعلی (آسیا-جداکننده های مغناطیسی-هیدروسیکلون) و پیشنهادی (هیدروسیکلون-آسیا-جداکننده های مغناطیسی) شبیه سازی شد. نتایج به دست آمده از شبیه سازی نشان داد که برای حالت فعلی، سه هیدروسیکلون با فشار عملیاتی ۱۱۲ کیلو پاسکال و با قطر دهانه ورودی، سرریز و ته ریز به ترتیب ۲۶۰، ۱۶۰ و ۱۳۰ میلی متر مورد نیاز بوده و d_{80} خوراک، سرریز و ته ریز به ترتیب ۵۲/۲۴۳، ۱۰۲ و ۳۲۱/۸۶ میکرون است. در حالت پیشنهادی، سه هیدروسیکلون با فشار عملیاتی ۱۳۴ کیلو پاسکال و قطر دهانه ورودی، سرریز و ته ریز هیدروسیکلون به ترتیب ۲۲۵، ۲۹۷ و ۸۲/۵ میلی متر مورد نیاز است. d_{80} خوراک، سرریز و ته ریز به ترتیب ۲۵/۵۷۴، ۱۰۴ و ۱۲۲۹/۰۱ میکرون به دست آمد. در مدار آسیاکنی پیشنهادی نسبت به فعلی به دلیل راه یابی ذرات نرمة خوراک ورودی به جریان سرریز هیدروسیکلون، تناژ و d_{80} خوراک ورودی به آسیا گلوله ای به ترتیب ۲۱/۶۹ درصد کاهش و ۱۵۹/۰۳ درصد افزایش، به دلیل بهبود خردایش، تناژ و d_{80} جریان بار برگشتی و d_{80} جریان خروجی از آسیا به ترتیب ۳۷/۷۱ درصد، ۴/۴۳ درصد و ۸ درصد کاهش یافت. استفاده از حالت پیشنهادی نسبت به فعلی، سبب افزایش ۲۱/۶۹ درصد ظرفیت مدار و افزایش ۱۷۲/۹۸ درصد نسبت خردایش آسیا گلوله ای می شود. از این رو کارایی مدار در حالت پیشنهادی نسبت به فعلی از عملکرد بالاتری برخوردار است.

کلمات کلیدی

شبیه سازی، مدار آسیاکنی، جانمایی هیدروسیکلون، نرم افزار یوسیم پک

*عهده دار مکاتبات: samadzadehyazdi@yazd.ac.ir

کمی را اشغال کرده و راندمان جدایش مطلوبی دارند. این تجهیزات با استفاده از نیروی گریز از مرکز در محیط سیال، ذرات را بر اساس اندازه طبقه‌بندی می‌کنند. در زمینه مدل‌سازی هیدروسیکلون از نیم‌قرن گذشته فعالیت‌های متعددی صورت گرفته است. یکی از مدل‌های کاربردی مورد استفاده در شبیه‌سازی هیدروسیکلون، روابط تجربی و شناخته‌شده پلیت است. مدل پلیت عملیات طبقه‌بندی در هیدروسیکلون را با استفاده از ۴ مدل توصیف می‌کند. شاخص‌های اصلی عملکرد هیدروسیکلون در این مدل، شامل حد جدایش تصحیح‌شده، تقسیم جریان بین سرریز و ته‌ریز، دقت جدایش و افت فشار است [۱۲-۱۰]. نرم‌افزار یوسیم‌پک به‌عنوان یک نرم‌افزار توانمند، با استفاده از مدل‌های ریاضی و تجربی ارائه‌شده، به‌صورت مستقیم و معکوس فرآیندهای یک کارخانه فرآوری را شبیه‌سازی می‌کند [۱۴-۱۳]. جهت شبیه‌سازی هر تجهیز، مدل‌های متفاوتی وجود دارد که این مدل‌ها شامل طیفی از مدل‌های کاملاً تجربی تا مدل‌های پدیده‌شناختی می‌باشند. هرکدام از این مدل‌ها توانایی درون‌یابی و برون‌یابی متفاوتی در تخمین نتایج دارند [۱۴-۱۳]. برای شبیه‌سازی تجهیزات و مدارهای فرآوری، در اولین مرحله، از روش موازنه جرم استفاده می‌شود تا داده‌های عملیاتی بر هم منطبق شوند [۱۴-۱۳]. مرحله بعدی شبیه‌سازی مدار کارخانه و کالبره کردن مدل‌های تجهیزات است. مرحله نهایی نیز تغییر برخی از موارد نظیر تغییر مشخصات هندسی تجهیزات و یا افزودن تجهیز جدید به مدار، تغییر خصوصیت محصولات و مشاهده توان تجهیزات و دیگر نتایج حاصل از شبیه‌سازی با اعمال این تغییرات خواهد بود (در شکل ۱ روند شبیه‌سازی یک کارخانه فرآوری با نرم‌افزار یوسیم‌پک نشان داده شده است) [۱۴-۱۳].



با پیشرفت علم، نیاز به انجام آزمایش‌های پرهزینه و زمان‌بر، جهت مطالعه مدارهای کان‌آرایی کاهش یافته است. به‌منظور درک بهتر فرآیندها و به‌کارگیری قوانین فیزیکی پایه در تحلیل و پیش‌بینی فرآیندها، مدل‌های ریاضی بیش‌ازپیش توسعه یافته‌اند. شبیه‌سازی و مدل‌سازی ابزار مناسبی برای طراحی، تحلیل، بهینه‌سازی و کنترل واحدهای عملیاتی فرآوری مواد معدنی است. هدف اصلی همه روش‌های شبیه‌سازی، انتخاب بهترین روش و تجهیزات با بیشترین درجه اطمینان و کمترین هزینه است. شبیه‌سازی روشی سریع، ارزان‌قیمت و دقیق‌تر از روش‌های آزمایشگاهی است و بنابراین برای بهینه‌سازی کارایی مدارهای فرآوری به کار گرفته می‌شود. پیشرفت اخیر در زمینه سخت‌افزار و نرم افزارهای رایانه‌ای، موجب شده است که متخصصان شیوه‌های جدید را برای مسائل شبیه‌سازی توسعه دهند؛ بنابراین، یکی کردن الگوریتم‌های بهینه‌سازی با الگوریتم‌های شبیه‌سازی امکان‌پذیر شده است [۳-۱].

مدل‌سازی آسیاهای گلوله‌ای با سه پدیده توصیف می‌شود. الف) توصیف انتقال مواد در آسیا گلوله‌ای که تحت عنوان توزیع زمان ماند مواد مورد بحث قرار می‌گیرد. زمان ماند ذرات در داخل آسیا با ترکیب دو حالت ایده‌آل جریان با الگوی اختلاط پیستونی و مخلوط کننده کامل، قابل تشریح است. دب) ورودی به آسیا، تأثیرگذارترین عامل بر زمان ماند مواد در داخل آسیا است [۷-۴]. ب) توزیع اندازه ذرات حاصل از شکست سنگ که تحت عنوان تابع شکست مورد بحث قرار می‌گیرد. تابع شکست توزیع ابعادی محصول را تشریح کرده و رفتار ذرات را در پاسخ به تنش‌های مکانیکی منعکس می‌کند و مستقل از عملکرد شرایط آسیا و وابسته به ماده معدنی در نظر گرفته می‌شود [۵-۴]. ج) تابع انتخاب، سینتیک (نرخ) شکست در آسیا را نشان داده و تابعی از عملکرد شرایط آسیا است. تابع انتخاب به محیط و سطح انرژی خردایش بستگی دارد [۹-۸]. با ترکیب سه مفهوم تابع شکست، تابع انتخاب و توزیع زمان ماند، فرآیند خردایش در آسیاهای گلوله‌ای به زبان ریاضی قابل توصیف است [۹-۸].

هیدروسیکلون یکی از کارآمدترین تجهیزات طبقه‌بندی است که کاربرد بسیار وسیعی در کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی، صنایع شیمیایی، پتروشیمی و بسیاری از صنایع دیگر پیدا کرده است. هیدروسیکلون‌ها با داشتن ظرفیت بالا، حجم

با توجه به نوسان خصوصیات خوراک ورودی به مدار و میزان نرمه قابل توجه موجود در خوراک مدار آسیاکنی، کارایی این مدار مجدداً مورد بررسی قرار گرفت. به طور میانگین، ۲۰ تا ۳۰ درصد از خوراک ورودی آسیا، اندازه ذرات کمتر از ۱۰۰ میکرون دارند. نرمه‌های موجود در خوراک آسیا، عمدتاً در مراحل خردایش در مدار سنگ شکنی و به خصوص در پیش خردایش با آسیا غلطکی فشار بالا، ایجاد می‌شوند. همچنین باهدف افزایش ظرفیت کارخانه و تولید خوراک با دانه‌بندی مناسب به منظور افزایش کارایی تجهیزات در پایین دست (مدار پرعبارسازی مغناطیسی و سولفورزدایی)، چیدمان فعلی مدار آسیاکنی بررسی شده و علاوه بر این، مدار جدیدی با جانمایی هیدروسیکلون قبل از آسیا طراحی و تحلیل شد. در این تحقیق جهت بررسی این مهم، ابتدا مدار فعلی (آسیا-جداکننده‌های مغناطیسی-هیدروسیکلون) توسط نرم افزار یوسیم‌پک مدل سازی و شبیه سازی شده و مورد تحلیل قرار گرفت. سپس مدار فرآوری دیگری با جانمایی هیدروسیکلون قبل از آسیا (مدار پیشنهادی)، طراحی و شبیه سازی شدند. در این تحقیق تلاش شد تا جایی که امکان تحصیل داده‌های لازم برای مدل‌ها وجود دارد، از مدل‌های با ساختار معنادار فیزیکی (پدیده شناختی: مدل‌های سطوح بالاتر یوسیم‌پک) استفاده شود. در نهایت، عملکرد مدار فرآوری فعلی با مدار فرآوری جدید مورد مقایسه قرار گرفت.

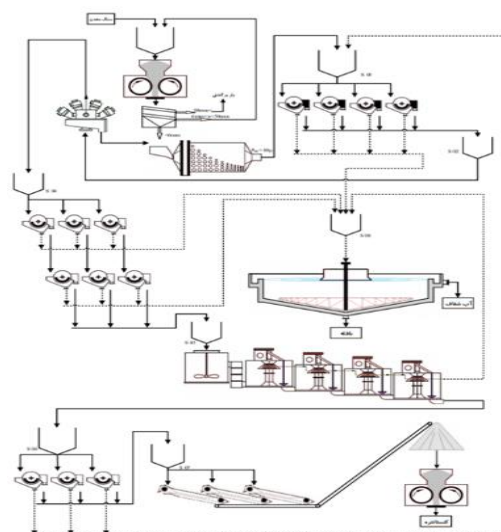
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تهیه نمونه

اولین قدم برای شبیه سازی یک مدار فرآوری، نمونه برداری دقیق از مدار و آنالیز صحیح آن‌ها است [۲۰]. نمونه برداری باید معرف و در نقاط معین و در حالت پایدار مدار انجام شود. در این تحقیق به منظور بررسی عملکرد تجهیزات و به دست آوردن پارامترهای مدل، شش مرحله نمونه گیری در حالت پایدار مدار و در هر مرحله به مدت ۲ ساعت با فاصله زمانی تقریبی ۲۰ دقیقه بین جزء نمونه‌ها صورت گرفت. در نمونه برداری، شکل هندسی نمونه گیر بایستی به گونه‌ای باشد که علاوه بر سهولت نمونه گیری، جریان مواد را پوشش داده و نمونه تهیه شده خصوصیات جریان مورد نظر را داشته باشد. در این تحقیق از

مجتمع معدنی و صنعتی گل گهر واقع در استان کرمان و در ۵۰ کیلومتری جنوب غربی شهرستان سیرجان قرار دارد. در این منطقه تاکنون ۶ آنومالی به ثبت رسیده است. این شرکت با حدود ۱/۲ میلیارد تن ذخیره سنگ آهن (عمدتاً مگنتیت و هماتیت) و تولید سالانه بیش از ۱۵ میلیون تن کنسانتره، یکی از بزرگ‌ترین معادن و درعین حال تولیدکنندگان سنگ آهن مورد نیاز صنایع فولاد ایران محسوب می‌شود. این مجتمع دارای کارخانه‌های فرآوری از جمله گلفا، تغلیظ، پلیکام، بازیابی غبار، بازیابی هماتیت و کارخانه گندله سازی شماره ۱ و ۲ است. کارخانه گلفا شرکت معدنی و صنعتی گل گهر متشکل از سه خط تولید کنسانتره مگنتیتی ۵، ۶ و ۷ است. این خطوط بر مبنای خوراک دهی از معدن شماره سه این شرکت طراحی شده‌اند و کنسانتره تولیدی این خطوط خوراک کارخانه گندله سازی شماره ۲ این شرکت را تأمین می‌کند. این خطوط از نظر فرآیندی با یکدیگر مشابه هستند [۱۸].

فرآیند فرآوری سنگ آهن در این خطوط شامل مراحل پیش خردایش و خردایش با آسیای غلطکی فشار بالا و آسیای گلوله‌ای، جدایش فیزیکی و ابعادی توسط هیدروسیکلون، پرعبارسازی مغناطیسی توسط جداکننده‌های مغناطیسی شدت متوسط و پایین و همچنین سولفورزدایی با سلول‌های فلوتاسیون است. عملیات آگیری از کنسانتره مگنتیت در این خطوط، توسط فیلتر نواری خلأ و آگیری از باطله، توسط تیکنر انجام می‌شود. در نهایت افزایش سطح ویژه کنسانتره مگنتیت، توسط آسیای غلطکی فشار بالا صورت می‌گیرد (شکل ۲) [۱۹-۱۸].



شکل ۲: فلوشیت خطوط تولید ۵، ۶ و ۷ شرکت معدنی و صنعتی گل گهر [۱۸].

در مواردی که انجام تجزیه و تحلیل‌های ابعادی بر روی نمونه، مشکل و یا به عبارتی غیرممکن است، از روش‌های محاسبات برگشتی برای تعیین تابع توزیع شکست استفاده می‌شود. محاسبات برگشتی داده‌های آسیاکنی نیازمند استفاده از یک مدل قوی برای تابع توزیع شکست با پارامترهای محدود شده برای کاهش تعداد متغیرهای نامعلوم برای تخمین است. مطالعاتی بر روی توصیف ریاضی تابع شکست انجام شده است [۱۵]، رابطه (۲) به نام معادله استاندارد آستین شناخته شده به صورت زیر است:

$$B_{ij} = \phi_j \left(\frac{dp_i}{dp_1} \right)^\gamma + (1 - \phi_j) \left(\frac{dp_i}{dp_1} \right)^\beta \quad (2)$$

در این رابطه B_{ij} تابع شکست تجمعی، dp_i حد پایین فراکسیون ابعادی، dp_1 حد پایین بالاترین محدوده ابعادی، ϕ_j و γ ، β پارامترهای مدل آستین هستند. ϕ_j پارامتر شکست است که تابعی از اندازه ذراتی است که در آسیا خردایش می‌شوند و از طریق رابطه (۳) تعیین می‌شود:

$$\phi_i = \phi_1 \left(\frac{x_i}{x_1} \right)^{-\delta} \quad (3)$$

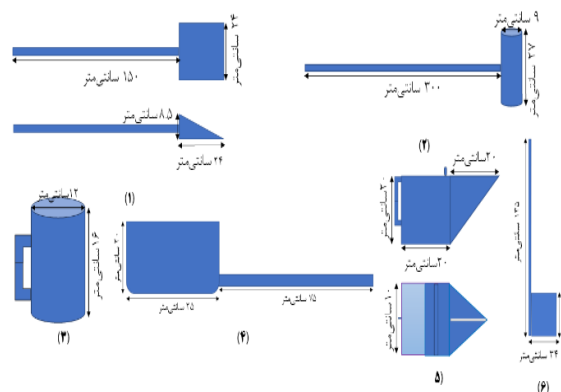
پارامترهای این مدل دارای بازه فیزیکی معنی‌داری هستند که این محدوده‌ها مطابق با جدول ۱ است.

جدول ۱: بازه پارامترهای مدل تابع شکست آستین

پارامترهای مدل تابع شکست	محدوده پارامتر
ϕ	۰٫۵-۱
γ	۰٫۵-۱٫۵
β	۲٫۵-۵

در این تحقیق جهت انجام آزمایش تابع شکست، ۲۰۰ کیلوگرم نمونه از خوراک خشک ورودی به آسیای گلوله‌ای تهیه شد. پس از همگن‌سازی، نمونه تک‌اندازه از بخش‌های ابعادی ۱۶۰۰، ۱۱۲۰۰، ۸۰۰۰، ۵۶۰۰ و ۴۰۰۰ میکرون (تقریباً از هر دامنه ابعادی ۵ تا ۱۲ کیلوگرم) جداسازی شد. جهت تعیین نرمال و یا غیرنرمال بودن تابع توزیع شکست، تابع شکست هر ۵ دامنه ابعادی فوق تعیین گردید. ابتدا ۳ کیلوگرم از نمونه تک سایز ۱۶۰۰ میکرون مورد خردایش قرار گرفت، آزمایش تا عبور مقدار تقریبی ۵۰ درصد از اندازه اولیه ادامه یافت. سپس همین روند برای ۴ فراکسیون ابعادی دیگر هم صورت گرفت. با استفاده از محاسبات بازگشتی با

نمونه‌گیرهای طراحی شده توسط شرکت Metso، (شکل ۳) استفاده شد. در حین فرآیند نمونه‌گیری، تغییرات عملیاتی مانند فشار عملیاتی هیدروسیکلون، توان آسیا و دبی جریان‌ها ثبت شدند. مقدار کلی نمونه‌برداری بایستی با ابعاد بزرگ‌ترین ذرات نمونه متناسب باشد. در این تحقیق به‌طور تقریبی از هر جریان ۵۰ کیلوگرم نمونه خشک گرفته شد.



شکل ۳: نمونه‌گیرهای مورد استفاده برای نمونه‌گیری از: (۱) خوراک ورودی به مدار، (۲) خروجی از آسیا، (۳) خوراک هیدروسیکلون و خوراک و کنسانتره جداکننده‌های مغناطیسی، (۴) باطله جداکننده‌های مغناطیسی، (۵) ته‌ریز هیدروسیکلون و (۶) سرریز هیدروسیکلون.

۲-۲- شبیه‌سازی آسیا گلوله‌ای

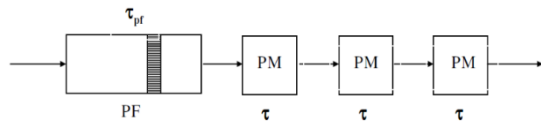
۲-۲-۱- اندازه‌گیری تابع شکست

تابع شکست، به توصیفی از توزیع ذرات با اندازه‌های مختلف حاصل از شکستن یک‌ذره اطلاق می‌شود [۲۱، ۸]. کلی و اسپاتیسو تابع توزیع شکست را به صورت میانگین توزیع ابعادی که از شکست یک ذره واحد ایجاد شده به صورت رابطه زیر تعریف کردند [۸-۹].

$$b_{ij} = B_{i-1,j} - B_{ij} \quad (1)$$

که در آن b_{ij} : تابع توزیع شکست سنگ و B_{ij} : تابع توزیع شکست تجمعی می‌باشند. هرگاه مقدار تابع شکست مستقل از اندازه اولیه باشد، آن را نرمال گویند. برای انجام این آزمایش، بایستی همه‌ی ذرات در یک دامنه ابعادی مشخص (روی یک سرند) باشند. در عمل، دانه‌بندی که مقدار ۹۶ تا ۹۸ درصد مواد بر روی سرند اول باشد، ایده‌آل فرض می‌شود. فرآیند خردایش تا زمانی که فقط ۴۰ تا ۶۰ درصد مواد اولیه بر روی سرند اول باقی بماند، ادامه دارد [۹-۸].

مخلوط کننده کامل با زمان‌های ماند برابر تشکیل شده است (شکل ۴) [۱۷-۱۵].



شکل ۴: نحوه ترکیب ظروف ایده‌آل در مدل n مخلوط کننده کامل [۶].

معادله توزیع زمان ماند در مدل n مخلوط کننده کامل به صورت رابطه زیر است.

$$RTD = \frac{n^n (t - \tau_{pf})^{n-1} \exp\left(-\frac{n(t - \tau_{pf})}{\tau_{\Sigma}}\right)}{(\tau_{\Sigma})^n (n-1)!} \quad (6)$$

که در آن τ_{pf} زمان ماند متوسط در ظرف پیستونی، n تعداد ظروف مخلوط کننده کامل، τ زمان ماند متوسط در ظروف مخلوط کننده و t زمان می‌باشند.

در این تحقیق برای انجام آزمایش زمان ماند مواد در آسیا گلوله‌ای از ردیاب سود (NaOH) استفاده شد. بدین منظور ۱۲۰ کیلوگرم سود به صورت محلول به عنوان ردیاب به ورودی آسیای گلوله‌ای افزوده شد (شکل ۵). تغییرات pH در ورودی (تهریز هیدروسیکلون) و خروجی آسیا در مدت زمان ۳۷ دقیقه اندازه‌گیری شد.



شکل ۵: آماده‌سازی ردیاب.

۲-۲-۴- سازگارسازی (اصلاح) داده‌ها با استفاده از الگوریتم موازنه جرم در نرم‌افزار یوسیم‌پک

در کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی، کنترل عملیات فرآوری جهت دستیابی به شرایط عملیاتی بهتر، بهبود وضعیت کارخانه و ارتقاء سطح بهره‌وری، تنها از طریق ارزیابی

نرم‌افزار یوسیم‌پک مقدار δ مگنتیت ۰/۱۱۳ و δ سایر کانی‌ها ۰/۱۱۲ محاسبه شد.

۲-۲-۲- اندازه‌گیری تابع انتخاب

تابع انتخاب شاخص سینتیک فرآیند آسیا شدن مواد است و به عوامل مختلفی مانند قطر آسیا، اندازه و جنس گلوله‌ها وابسته است [۸]. ناپدید شدن مواد از یک طبقه سرندی در رابطه با آسیاهای گلوله‌ای در اغلب موارد از سینتیک مرتبه اول پیروی می‌کند [۹-۸]. در این تحقیق از مدل ارائه شده در نرم‌افزار یوسیم‌پک (رابطه ۴) استفاده شده است. جهت بهبود شبیه‌سازی و افزایش انطباق بین پارامترهای مدل آسیای گلوله‌ای، پارامترهای این مدل از طریق محاسبات برگشتی توسط نرم‌افزار محاسبه می‌شوند.

$$S_i = S_1 e^{\alpha_1 \ln \frac{d_i}{d_1} + \alpha_2 \left(\frac{d_i}{d_1}\right)^2} \quad (4)$$

که در آن d_i میانگین هندسی اندازه ذرات در کلاس ابعادی d_i اندازه ذرات مرجع، S_1 تابع انتخاب ویژه - انرژی در ابعاد d_1 و α و α پارامترهای مدل هستند. دیدگاه سینتیک و دیدگاه انرژی لازم برای خردایش با استفاده از رابطه (۵) با یکدیگر مرتبط می‌شوند [۸، ۹].

$$S_1 = S_1^E \frac{P}{H} \quad (5)$$

که در آن P انرژی موجود برای خردایش، H جرم کلی موجود در آسیا و S_1^E پارامتر نرمال شده تابع انتخاب هستند [۴].

۲-۲-۳- اندازه‌گیری زمان ماند

میزان خرد شدن هر ذره به مدت اقامت آن ذره در داخل آسیا بستگی دارد. تابع چگالی احتمالی که توزیع زمان ماند را توصیف می‌کند، توزیع زمان ماند یا RTD نامیده می‌شود. این نوع توزیع معمولاً با انجام آزمایش مشخص می‌شود [۱۷-۱۵]. در این نوع آزمایش نشانه‌ای در ورودی سیستم اضافه و غلظت آن را در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری می‌کنند تا با استفاده از مدل‌های ریاضی، زمان ماند متوسط محاسبه می‌شود. دو مدل که کاربرد بیشتری برای آسیاهای صنعتی دارند عبارتند از مدل ولر و مدل n مخلوط کننده کامل که هر یک ترکیبی سری از راکتورهای ایده‌آل هستند. مدل n مخلوط کننده کامل از یک ظرف با جریان پیستونی و n

$$R_i = R_f + (1 - R_f) \times \left[1 - e^{\left(-0.693 \times \left(\frac{x_i}{d50_c} \right)^m \right)} \right] \quad (7)$$

که در آن R_i بازیابی ذرات جامد به تهریز، R_f بازیابی آب به تهریز، $d50_c$ حد جدایش تصحیح شده و m دقت جدایش هستند. سه پارامتر m ، R_f و $d50_c$ شاخص‌های عملکرد طبقه‌بندی هستند که با استفاده از برازش می‌توان آن‌ها را به دست آورد. حد جدایش تصحیح شده به صورت رابطه (۸) با متغیرهای هندسی هیدروسیکلون مربوط می‌شود [۱۰-۱۱].

$$d50_c = F_1 \frac{50.5 D_C^{0.46} D_0^{1.21} e^{(0.063\phi)}}{D_u^{0.71} h^{0.38} Q^{0.45} (\rho_s - \rho_p)^{0.5}} \quad (8)$$

که در آن D_C قطر هیدروسیکلون (سانتی‌متر)، D قطر ورودی هیدروسیکلون (سانتی‌متر)، D_u قطر تهریز هیدروسیکلون (سانتی‌متر)، D_o قطر سرریز هیدروسیکلون (سانتی‌متر)، h ارتفاع آزاد پیداکنده گرداب (سانتی‌متر)، Q دبی حجمی خوراک (لیتر بر دقیقه)، ϕ کسر حجمی جامد خوراک (%)، ρ_s دانسته جامد (gr/cm^3)، ρ_p دانسته پالپ (gr/cm^3)، F_1 ضریب کالیبراسیون حد جدایش می‌باشند [۱۰-۱۱].

تقسیم جریان، نسبت دبی حجمی تهریز به نسبت دبی حجمی سرریز است و از رابطه (۹) قابل محاسبه است:

$$S = F_2 \times \frac{1.9 \left(\frac{D_u}{D_o} \right)^{3.31} h^{0.54} (D_u^2 + D_o^2)^{6.36} e^{(0.0054\phi)}}{H^{0.24} D_C^{1.11}} \quad (9)$$

که در آن، H افت فشار در طول هیدروسیکلون، F_2 ضریب کالیبراسیون تقسیم جریان می‌باشند.

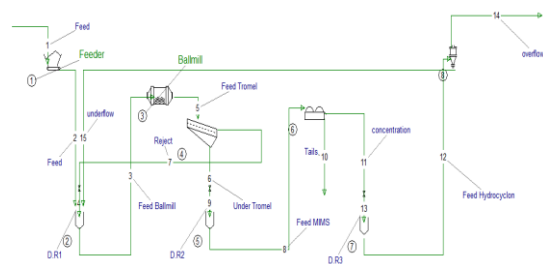
دقت جدایش، نشان‌دهنده مطلوب بودن و یا چگونگی عملکرد هیدروسیکلون در جدایش ذرات است [۱۰-۱۲]. این پارامتر با استفاده از رابطه (۱۰) قابل محاسبه است.

$$m = F_3 \times 1.94 \exp \left(-1.58 \frac{S}{S+1} \right) \left(\frac{D_C^2 h}{Q} \right)^{0.15} \quad (10)$$

که در آن F_3 ضریب کالیبراسیون دقت جدایش است. افت فشار (P) برحسب kPa، پارامتر دیگری است که برای طراحی سیستم انتقال با یک ظرفیت معین و همچنین برای محاسبه تقسیم جریان لازم است. این پارامتر با استفاده از رابطه (۱۱) قابل محاسبه است [۱۰-۱۲].

عملکرد دستگاه‌ها و آگاهی از نحوه توزیع مواد در قسمت‌های مختلف مدار امکان‌پذیر است. بدین منظور اطلاعاتی نظیر عیار کانی یا فلز، دبی، درصد جامد و غیره جمع‌آوری می‌شوند، سپس پارامترهای مربوط به جریان‌های نمونه‌برداری نشده محاسبه شده و پارامترهای اندازه‌گیری شده که دارای خطا هستند [۱۳-۱۴] تصحیح می‌شوند. این روش، یک روش محاسباتی است که اندازه‌گیری‌ها را با مدل فیزیکی فرآیند سازگار می‌کند؛ به عبارت دیگر، سازگاری داده‌ها باعث کاربرد شروط مدل فرآیند و دستیابی به تخمین متغیرهای فرآیند، با تعدیل اندازه‌گیری‌های فرآیند می‌شود. از این رو در این تحقیق برای تعدیل خطاهای احتمالی نمونه‌برداری و آنالیز داده‌ها، از الگوریتم موازنه جرم توسعه داده شده در نرم‌افزار BILCO3.1 (توسط BRGM توسعه داده شده است) موجود در نرم‌افزار یوسیم‌پک استفاده شد [۱۳-۱۴].

در شکل ۶ فلوشیت مدار آسیاکنی خط ۵، ۶ و ۷ گل‌گهر در نرم‌افزار یوسیم‌پک نشان داده شده است. امکان نمونه‌گیری از تمامی نقاط میسر نبود. برای مثال جریان خوراک ورودی به آسیا ترکیبی از خوراک ورودی به مدار، جریان بار برگشتی و جریان ته ریز هیدروسیکلون است که در ورودی به آسیا امکان نمونه‌گیری ندارد. سعی بر آن شد از نقاطی که امکان نمونه‌گیری صحیح وجود دارد نمونه‌گیری شده و مشخصات جریان‌های مجهول توسط نرم‌افزار به صورت معکوس محاسبه شوند.



شکل ۶: فلوشیت مدار آسیاکنی خط ۶ گل‌گهر در نرم‌افزار یوسیم‌پک.

۲-۳- شبیه‌سازی هیدروسیکلون

پلیت در سال ۱۹۷۶ میلادی، مدلی را برای عملکرد هیدروسیکلون‌ها، بر اساس داده‌های آزمایشگاهی گسترده‌ای ارائه داد. مدل پلیت در شکل کنونی خود توسط فلینتوف ۱۹۷۸ و همکاران اصلاح شده است و به صورت رابطه زیر ارائه شده است [۱۰-۱۱].

طبقه سرندي	۱۶۰۰	۱۱۲۰۰	۸۰۰۰	۵۶۰۰	۴۰۰۰
۱۶۰۰۰	.	.	.	.	.
۱۱۲۰۰	۰٫۵۹	.	.	.	.
۸۰۰۰	۰٫۱۲	۰٫۵۳	.	.	.
۵۶۰۰	۰٫۱۰۵	۰٫۱۵	۰٫۴۲	.	.
۴۰۰۰	۰٫۱۰۴	۰٫۰۷	۰٫۱۸	۰٫۳۵	.

تک اندازه شده (میکرون)	ضرایب محاسبه شده برادینت و کلکات		
	φ	α	β
۱۶۰۰	۰٫۳۹	۰٫۴۹	۵٫۰۰
۱۱۲۰۰	۰٫۳۲	۰٫۳۸	۵٫۰۰
۸۰۰۰	۰٫۴۴	۰٫۴۶	۴٫۶۷
۵۶۰۰	۰٫۵۹	۰٫۶۱	۴٫۲۴
۴۰۰۰	۰٫۶۲	۰٫۷۱	۵٫۰۰

	مقدار پارامتر	
	دیگر ذرات	مگنتیت
α_1 (بدون بعد)	۰٫۴۶۳	۰٫۷۲۲
α_2 (بدون بعد)	-۰٫۱۸۲	-۰٫۲۱۵

اندازه ذرات (میکرون)	مگنتیت	سایر ذرات
۱۶۰۰	۰٫۸۵	۰٫۶۸
۱۱۲۰۰	۰٫۹۷	۰٫۷۹
۸۰۰	۱٫۰۹	۰٫۹۲
۵۶۰۰	۱٫۱۶	۱٫۰۲
۴۰۰	۱٫۱۶	۱٫۰۸

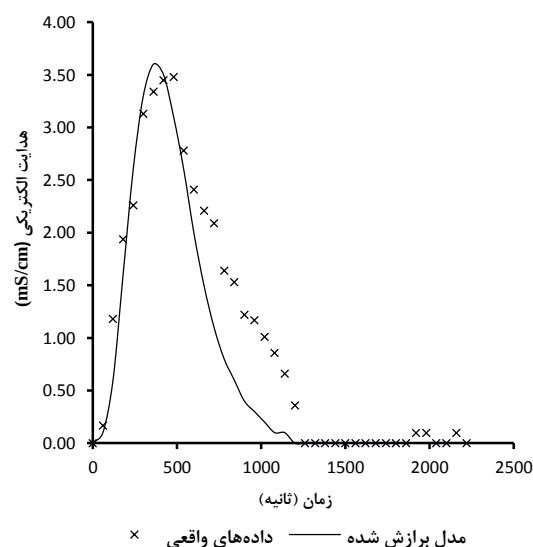
19

۳-۱-۳- اندازه‌گیری زمان ماند

زمان ماند با توجه به روشی که در بخش ۲-۲-۳ تشریح شد اندازه‌گیری شد. در شکل ۷ و جدول ۶ به ترتیب تغییرات pH در خروجی آسیا نسبت به زمان و پارامترهای محاسبه‌شده رابطه (۶) نشان داده شده است.

جدول ۶: نتایج تعیین زمان ماند مواد بر اساس برازش با مدل N مخلوط کننده کامل با نرم افزار KMPCsim

مقدار	پارامترهای مدل
	زمان مربوط به ظرف جریان پیستونی (τ_{pf}) (دقیقه)
۵	تعداد ظروف مخلوط کننده کامل (n)
۸/۲۰۴	زمان ظروف مخلوط کننده کامل (τ) (دقیقه)
۸/۲۰۴	متوسط زمان ماند (τ_{ave}) (دقیقه)
۰/۲	واریانس نسبی
۰/۳۶۹	خطای نسبی مربوط به سطح زیر منحنی ($R.E.$)
۲/۱۴	مجموع مربعات خطای مدل ($S.E.$)
بسته	نوع مدار



شکل ۷: نمودار تعیین زمان ماند مواد بر اساس برازش با مدل N مخلوط کننده کامل.

۳-۱-۴- سازگارسازی و اصلاح داده‌ها

با توجه به روشی که در بخش ۲-۲-۴ تشریح شد مشخصات جریان‌های مختلف مدار موازنه شد. مقادیر موازنه جرم در جداول ۶، ۷ و ۸ نشان داده شده است.

جدول ۷: تناژ جامد اندازه‌گیری و اصلاح شده

جریان	تناژ جامد (تن بر ساعت)	
	اندازه‌گیری شده	اصلاح شده
۱ و ۲	۴۵۹	۴۶۱/۴۲
۳	۱۱۶۳/۵	۱۲۶۱/۴۱
۵	۱۱۶۳/۵	۱۲۶۱/۴۱
۶	۱۱۵۰	۱۲۴۶/۵۵
۷	۱۳/۵	۱۴/۹۳
۸	۱۱۵۰	۱۲۴۶/۵۵
۱۰	۶۶/۸	۷۲/۴۸
۱۱	۱۰۸۳/۲	۱۱۷۴/۰۷
۱۲	۱۰۸۳/۲	۱۱۷۴/۰۷
۱۴	۳۹۲/۲	۳۸۸/۹۵
۱۵	۶۹۱	۷۸۵/۱۲

جدول ۸: دبی آب در جریان‌های مختلف اندازه‌گیری و اصلاح شده

جریان	دبی آب (مترمکعب بر ساعت)	
	اندازه‌گیری شده	اصلاح شده
۱ و ۲	۲۳/۹۹	۲۴/۰۰
۳	۲۵۹/۰۵	۲۵۹/۸۳
۵	۲۵۹/۰۵	۲۵۹/۸۳
۶	۲۵۶/۰۴	۲۵۸/۱۴
۷	۲/۳۰	۱/۶۹
۸	۷۵۶/۸۱	۶۸۱/۳۱
۱۰	۳۲۰/۵۲	۳۲۸/۶۸
۱۱	۳۹۰/۱۴	۳۶۶/۴۱
۱۲	۷۲۷/۸۶	۷۰۹/۸۶
۱۴	۵۲۸/۰۳	۵۴۳/۰۴
۱۵	۱۷۱/۵۶	۱۶۶/۸۲

جدول ۹: درصد جامد در جریان‌های مختلف اندازه‌گیری و اصلاح شده

جریان	درصد جامد (%)	
	اندازه‌گیری شده	اصلاح شده
۱ و ۲	۹۵/۰۳	۹۵/۰۳
۳	۸۱/۷۹	۸۲/۹۵
۵	۸۱/۷۹	۸۲/۹۵
۶	۸۱/۷۹	۸۲/۸۴
۷	۸۵/۴۷	۸۹/۸۳
۸	۶۰/۳۱	۶۲/۴۶
۱۰	۱۷/۲۵	۱۵/۸۹
۱۱	۷۳/۵۲	۷۶/۲۴
۱۲	۵۹/۸۱	۶۰/۸۱
۱۴	۴۲/۶۲	۴۱/۷۳

۳-۵- پارامترهای مدل پلیت

در جدول ۱۱ پارامترهای محاسباتی مدل پلیت با توجه به روندی که در بخش ۲-۵ تشریح شد، آورده شده است.

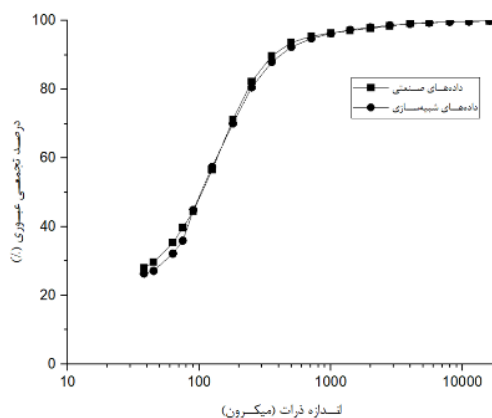
۳-۱-۶- اعتبارسنجی مدل آسیا گلوله‌ای

جهت بررسی اعتبار مدل آسیا گلوله‌ای، توانکشی، d_{80} و منحنی‌های توزیع ابعادی جریان‌های ورودی و خروجی آسیا گلوله‌ای با مقدار داده‌های صنعتی آن مقایسه شد. نتایج مقایسه جریان‌های اطراف آسیا گلوله‌ای با مقدار شبیه‌سازی شده در شکل ۸ و در جدول ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد داده‌های شبیه‌سازی

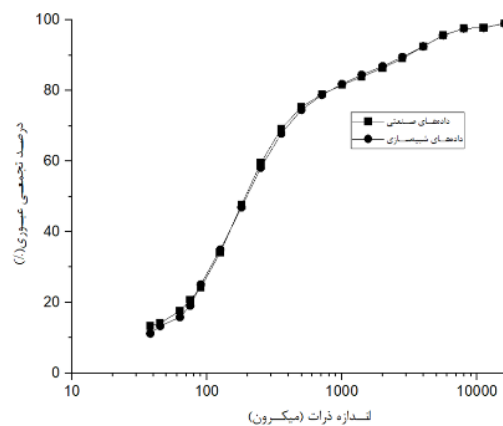
بر داده‌های صنعتی منطبق هستند بنابراین کالیبراسیون مدل (3) Ballmill در مدار آسیاکنی از دقت بالایی برخوردار است.

جدول ۱۰: مقایسه مقادیر d_{80} ، تناژ و توانکشی آسیای گلوله‌ای با مقدار شبیه‌سازی

پارامتر	مدار صنعتی	مدار شبیه-سازی
d_{80} جریان ورودی به آسیا (μ)	۸۰۶/۴۴	۸۲۵/۶۷
d_{80} جریان خروجی به آسیا (μ)	۲۴۴	۲۵۰
توانکشی آسیا گلوله‌ای (W)	۴۵۱۷	۴۶۰۰



(ب)



(الف)

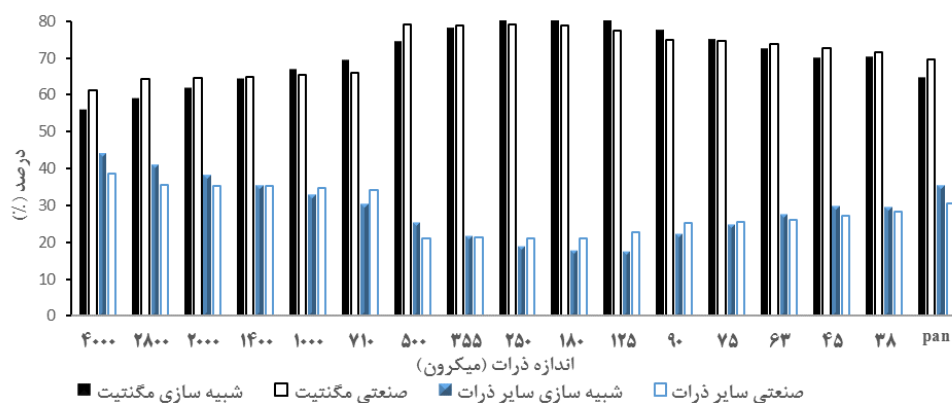
شکل ۸: الف) مقایسه توزیع ابعادی جریان خوراک آسیا گلوله‌ای در شرایط عملیاتی و شبیه‌سازی، ب) مقایسه توزیع ابعادی جریان خروجی آسیا گلوله‌ای با مقدار شبیه‌سازی.

۳-۱-۷- اعتبارسنجی مدل جداکننده‌های مغناطیسی شدت متوسط

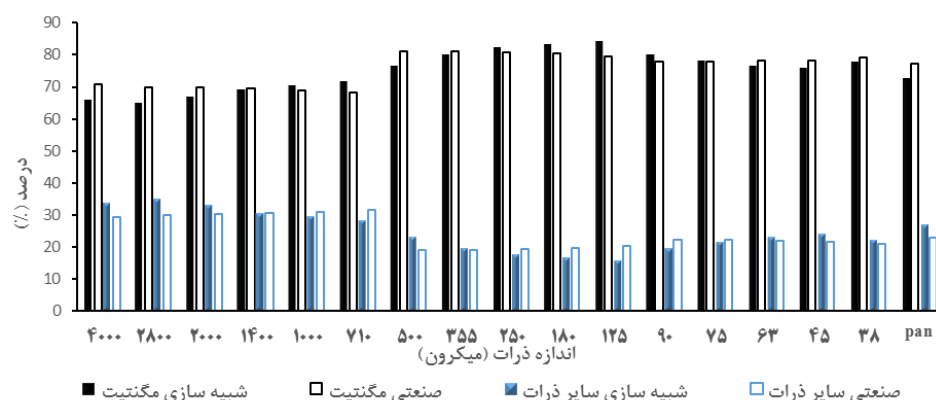
برای بررسی اعتبار مدل جداکننده‌های مغناطیسی مقادیر توزیع عیار مگنتیت و دیگر ذرات در فراکسیون‌های ابعادی مختلف جریان‌های خوراک، کنسانتره و باطله مدار آسیاکنی با مقدار داده‌های صنعتی آن مقایسه شد. نتایج مقایسه جریان‌های اطراف جداکننده مغناطیسی با مقدار شبیه‌سازی در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد در این بخش نیز داده‌های شبیه‌سازی بر داده‌های صنعتی منطبق هستند بنابراین کالیبراسیون مدل (0) Separator در مدار آسیاکنی از دقت بالایی برخوردار است.

جدول ۱۱: پارامترهای مدل پلیت در کالیبراسیون مدل هیدروسیکلون مدار فعلی

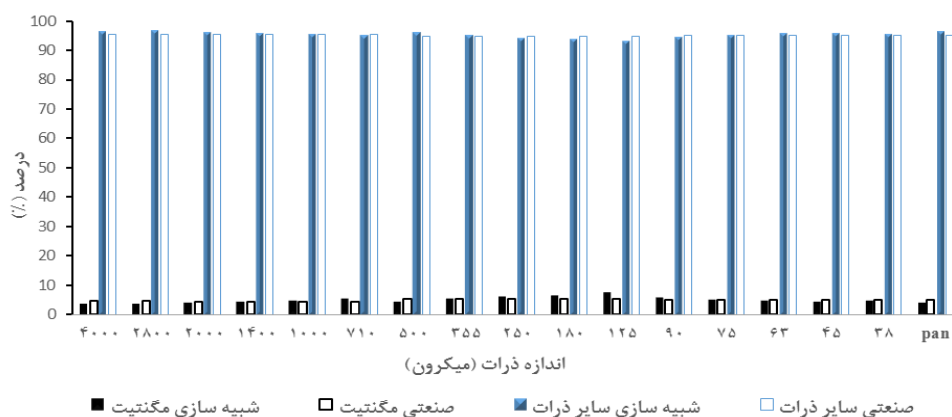
پارامتر	مقدار
۱ قطر داخلی هیدروسیکلون (cm)	۶۶
۲ قطر ورودی هیدروسیکلون (cm)	۲۶
۳ قطر سرریز هیدروسیکلون (cm)	۱۶
۴ قطر ته‌ریز هیدروسیکلون (cm)	۱۳
۵ ارتفاع آزاد گرداب هیدروسیکلون (cm)	۱۴۷/۲۵
۶ درصد جامد حجمی بار ورودی (%)	۲۶/۱۸
۷ دبی حجمی بار ورودی (Lit/min)	۱۶۳۷۱/۶۶
۸ حد جدایش تصحیح شده (μ)	۸۰/۹۲
۹ افت فشار (kpa)	۱۱۲/۳۹
۱۰ بازیابی آب به ته‌ریز (%)	۲۲
۱۱ تقسیم حجمی جریان	۰/۵۲
۱۲ کیفیت جدایش	۱/۰۹



شکل ۹: مقایسه عیار مگنتیت و دیگر کانی‌ها، در توزیع ابعادی جریان خوراک جداکننده‌های مغناطیسی با مقدار شبیه‌سازی.



شکل ۱۰: مقایسه عیار مگنتیت و دیگر کانی‌ها، در توزیع ابعادی جریان کنسانتره جداکننده‌های مغناطیسی با مقدار شبیه‌سازی.



شکل ۱۱: مقایسه عیار مگنتیت و دیگر کانی‌ها، در توزیع ابعادی جریان باطله جداکننده‌های مغناطیسی با مقدار شبیه‌سازی.

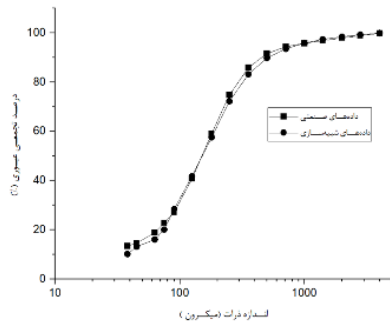
۳-۱-۸- اعتبارسنجی مدل هیدروسیکلون

برای بررسی اعتبار مدل هیدروسیکلون، توزیع ابعادی جریان‌های اطراف هیدروسیکلون با مقدار داده‌های صنعتی مقایسه شدند. توزیع دانه‌بندی و نتایج مقایسه جریان‌های اطراف هیدروسیکلون در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، در این بخش نیز داده‌های شبیه‌سازی بر داده‌های صنعتی منطبق هستند؛ بنابراین

کالیراسیون مدل (1) Hydrocyclon در این مدار آسیاکنی از اعتبار برخوردار است.

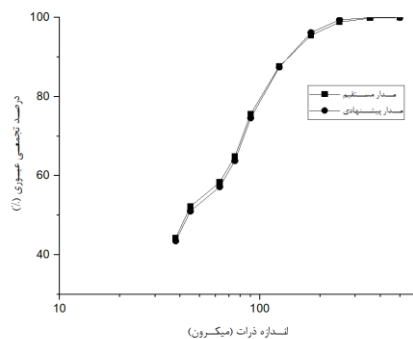
۳-۲- شبیه‌سازی مدار پیشنهادی (هیدروسیکلون - آسیا گلوله‌ای - جداکننده‌های مغناطیسی)

در این مدار پس از تغییر فلوشیت مدار آسیاکنی فعلی و جابجایی هیدروسیکلون به اول مدار، فلوشیت مدار پیشنهادی ۱۲ رسم شد، برای شبیه‌سازی اولیه، به

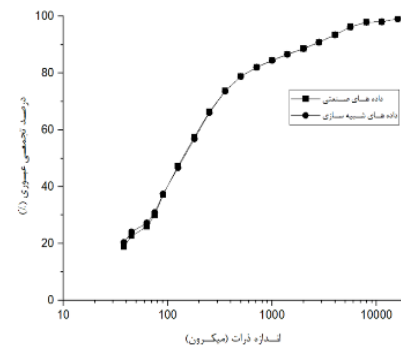


(ع)

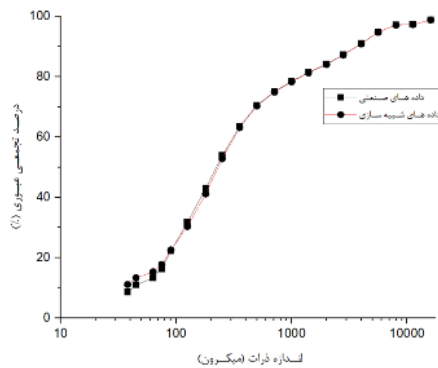
شکل ۱۳: الف) مقایسه توزیع ابعادی جریان خوراک هیدروسیکلون با مقدار شبیه‌سازی، ب) مقایسه توزیع ابعادی جریان سرریز هیدروسیکلون با مقدار شبیه‌سازی، ج) مقایسه توزیع ابعادی جریان ته‌ریز هیدروسیکلون با مقدار شبیه‌سازی.



(الف)

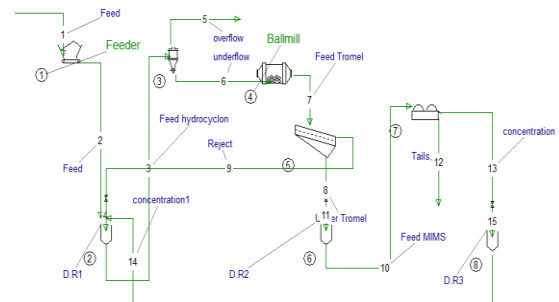


(ب)

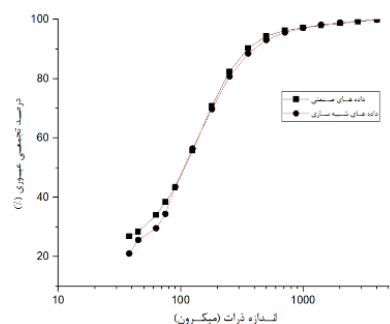


(ج)

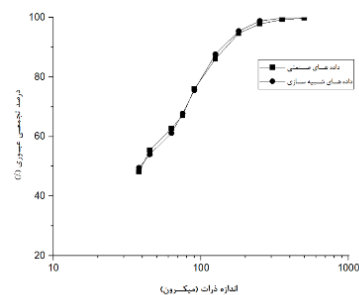
هیدروسیکلون مدل سطح صفر داده شد. از آنجا که چنین مداری در واقعیت وجود نداشت، برای اعتبارسنجی، یک مدار ایده‌آل با هیدروسیکلون مدل سطح صفر طراحی شد و داده‌های این مدار ایده‌آل مقادیر داده‌های صنعتی فرض شدند. سپس مدل به بالاترین مدل موجود در نرم‌افزار (1) (Hydrocyclon) ارتقاء یافته و طراحی هیدروسیکلون انجام شد. همان‌طور که نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد، در شکل ۱۴-الف توزیع ابعادی جریان سرریز هیدروسیکلون در مدار فعلی و پیشنهادی بر یکدیگر منطبق هستند، در نتیجه هدف طراحی هیدروسیکلون با توزیع دانه‌بندی یکسان سرریز هیدروسیکلون در مدار پیشنهادی محقق شده است و همچنین انطباق داده‌های شبیه‌سازی و صنعتی (فایل شاهد) در جریان‌های اطراف هیدروسیکلون در شکل ۱۴-ب، ج و د نشان‌دهنده دقت بالای شبیه‌سازی در این مدار است.



شکل ۱۲: فلوشیت مدار آسیاکنی پیشنهادی خط ۶ گل‌گهر در نرم‌افزار یوسم‌پک.

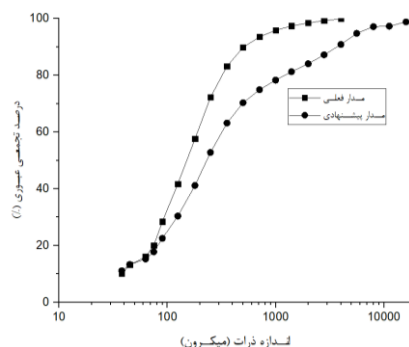


(الف)

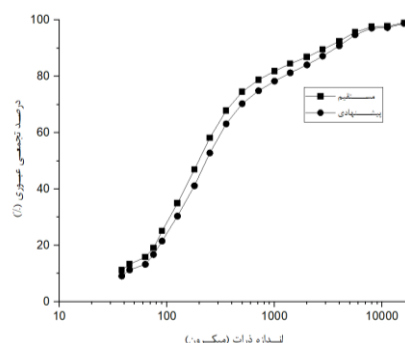


(ب)

افزایش ۲۱/۶۹ درصد ظرفیت آسیای گلوله‌ای و در نتیجه افزایش ظرفیت کلی مدار آسیاکنی شده است.



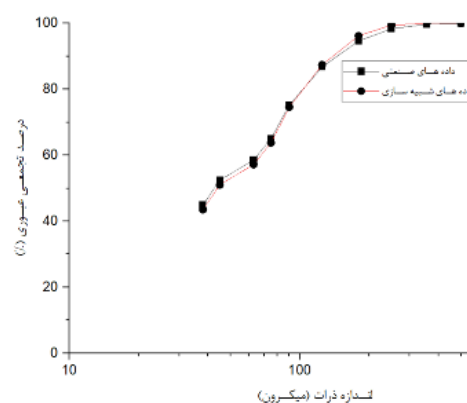
شکل ۱۵: مقایسه مقدار شبیه‌سازی توزیع ابعادی جریان تهریز هیدروسیکلون در مدار آسیاکنی فعلی و پیشنهادی.



شکل ۱۶: مقایسه مقدار شبیه‌سازی توزیع ابعادی جریان خوراک آسیای گلوله‌ای در مدار آسیاکنی فعلی و پیشنهادی.

جدول ۱۲: مقایسه مقدار شبیه‌سازی d_{80} و تناژ جریان‌های مختلف در مدار فعلی و پیشنهادی

عنوان	فعلی	پیشنهادی
تناژ ورودی مدار (تن بر ساعت)	۴۶۱	۴۶۱
تناژ جریان خوراک آسیا (تن بر ساعت)	۱۲۶۸	۹۹۳
تناژ جریان برگشتی (تن بر ساعت)	۱۴۹۳	۹۳۰
d_{80} جریان سرریز هیدروسیکلون (میکرون)	۱۰۲/۱۲	۱۰۴/۲۹
d_{80} جریان تهریز هیدروسیکلون (میکرون)	۳۲۴/۴۸	۱۲۲۹/۰۱
d_{80} جریان خروجی از آسیا (میکرون)	۲۵۰	۲۳۰/۱۸
d_{80} جریان خوراک ورودی به آسیا (میکرون)	۷۷۱/۶۷	۱۲۲۹/۰۱
d_{80} جریان برگشتی (میکرون)	۱۳۵۷۷/۰۴	۱۲۹۷۵/۴۲
d_{80} جریان خوراک جداکننده مغناطیسی (میکرون)	۲۳۸/۷	۲۲۹
نسبت خردایش	۳/۰۹	۵/۳۴



(د)

شکل ۱۴: الف) مقایسه مقدار شبیه‌سازی توزیع ابعادی جریان سرریز هیدروسیکلون در مدار آسیاکنی فعلی و پیشنهادی، ب) مقایسه توزیع ابعادی جریان خوراک هیدروسیکلون صنعتی با مقدار شبیه‌سازی، ج) مقایسه توزیع ابعادی جریان تهریز هیدروسیکلون صنعتی با مقدار شبیه‌سازی، د) مقایسه توزیع ابعادی جریان سرریز هیدروسیکلون صنعتی با مقدار شبیه‌سازی.

۳-۳- مقایسه شبیه‌سازی مدار آسیاکنی در دو حالت فعلی و پیشنهادی

همان‌طور که در بخش قبل به آن اشاره شد، توزیع دانه‌بندی سرریز هیدروسیکلون در هر دو حالت مدار آسیاکنی فعلی و پیشنهادی به دلیل محدودیت قرار دادن برای این جریان، بر یکدیگر منطبق هستند (شکل ۱۴-الف) و d_{80} تقریبی ۱۰۰ میکرون دارند. نتایج مقایسه توزیع ابعادی ذرات تهریز هیدروسیکلون و خوراک آسیای گلوله‌ای در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ و مقایسه d_{80} و دبی جریان‌های مختلف مدار فعلی و پیشنهادی در جدول ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان می‌دهد، در مدار پیشنهادی به دلیل حذف نرمه توزیع دانه‌بندی تهریز هیدروسیکلون و خوراک آسیای گلوله‌ای نسبت به مدار فعلی وسیع‌تر است، همچنین نتایج در جدول ۱۲ نشان می‌دهد که کاهش نرمه خوراک ورودی به آسیای گلوله‌ای، سبب کاهش ۲۱/۶۹ درصد تناژ و افزایش ۱۵۹/۰۳ درصد d_{80} خوراک ورودی آسیای گلوله‌ای شده است. کاهش تناژ و افزایش d_{80} خوراک آسیای گلوله‌ای سبب افزایش قدرت ضربه بار خردکننده و افزایش زمان ماند در آسیای گلوله‌ای شده و بهبود فرآیند خردایش در آسیای گلوله‌ای منجر به کاهش ۸ درصد d_{80} جریان خروجی، افزایش ۱۷۲/۹۸ درصد نسبت خردایش کلی آسیای گلوله‌ای، کاهش ۳۷/۷۱ درصد تناژ و ۴/۴۳ درصد d_{80} جریان بار برگشتی و

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق مدار آسیاکنی خط ۶ گل‌گهر با استفاده از نرم‌افزار یوسیم‌پک به صورت مستقیم و غیرمستقیم شبیه‌سازی شد. هدف از این شبیه‌سازی دستیابی به چیدمان بهینه از تجهیزات مدار آسیاکنی در راستای افزایش ظرفیت کارخانه و تولید خوراک با d_{80} مناسب‌تر در راستای افزایش کارایی تجهیزات مدار پرعیارسازی مغناطیسی و سولفورزدایی در پایین دست است.

نتایج شبیه‌سازی مدار آسیاکنی فعلی نشان می‌دهد که کالبراسیون مدل تجهیزات از دقت بالایی برخوردار است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سرریز هیدروسیکلون مدار فعلی و پیشنهادی بر هم منطبق است و هدف اصلی طراحی هیدروسیکلون با d_{80} و توزیع دانه‌بندی سرریز مشابه، محقق شده است، همچنین تطبیق داده‌های واقعی و شبیه‌سازی هیدروسیکلون در مدار پیشنهادی نشان می‌دهد طراحی هیدروسیکلون از دقت بالایی برخوردار است. با توجه به نتایج مقایسه مدار آسیاکنی فعلی و پیشنهادی، در مدار پیشنهادی به دلیل حذف ذرات نرمه خوراک ورودی به آسیا سبب کاهش ۲۱/۶۹ درصد وزن و افزایش ۱۵۹/۰۳ درصدی d_{80} خوراک ورودی به آسیا گلوله‌ای می‌شود. همچنین نسبت خردایش آسیا گلوله‌ای در مدار پیشنهادی نسبت به مدار فعلی ۱۷۲/۹۸ درصد افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج مقایسه مدار آسیاکنی فعلی و پیشنهادی، افزایش نسبت خردایش در مدار پیشنهادی سبب کاهش ۲۱/۶۸ درصد تناژ و ۴/۴۳ درصدی d_{80} جریان برگشتی، کاهش ۸ درصدی d_{80} جریان خروجی از آسیا و کاهش ۴/۰۶ درصدی d_{80} خوراک جداکننده‌های مغناطیسی شدت متوسط در مدار پیشنهادی نسبت به مدار فعلی می‌شود.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی، دانه‌بندی ذرات خوراک در ابتدای مدار، سبب کاهش میزان نرمه خوراک آسیا گلوله‌ای، کاهش باردرگردش و افزایش نسبت خردایش می‌شود. کاهش میزان باردرگردش و تناژ ورودی به آسیا و جداکننده‌های مغناطیسی علاوه بر جلوگیری از ایجاد باردهی اضافی بر روی جداکننده‌های مغناطیسی، سبب قابلیت افزایش ظرفیت خوراک ورودی به مدار می‌شود، از این رو کارایی مدار آسیاکنی پیشنهادی از مدار آسیاکنی فعلی از عملکرد بهتری برخوردار است.

۵- تقدیر و تشکر

از حمایت مادی و معنوی مجتمع معدنی گل‌گهر برای انجام این تحقیق قدردانی می‌شود.

مراجع

- [1] Morrison, R. D., and J. M. Richardson. "JKSimMet: A simulator for analysis, optimisation and design of comminution circuits." (2002): 442-460.
- [2] Souza de Oliveira, Pablo, et al. "simulacao em softwares de processamento para obtencao de fluxograma de comunicacao e classificacao da cromita", Revista Foco (Interdisciplinary Studies Journal) 16.6 (2023).
- [3] Bodin, Jérôme, et al. "Linking mineral processing simulation with life cycle assessment (LCA) to forecast potential environmental impacts of small-scale mining technologies development." 15th SGA Biennial Meeting on Life with Ore Deposits on Earth. 2019.
- [4] King, Ronald Peter. Modeling and simulation of mineral processing systems. Elsevier, 2001.
- [5] Basu, Saprativ, et al. "Modeling and simulation of mechanical degradation of iron ore sinter in a complex transfer chute system using the discrete element model and a particle breakage model." *Powder Technology* 417 (2023): 118264.
- [6] Gupta, A., and D. S. Yan. "Mineral Processing Design and Operation, Perth, Australia." (2006).
- [7] Whitworth, Anne J., et al. "Review on advances in mineral processing technologies suitable for critical metal recovery from mining and processing wastes." *Cleaner Engineering and Technology* 7 (2022): 100451.
- [8] Herbst, J. A., and Y. C. Lo. "Microscale comminution studies for ball mill modeling." *Comminution—Theory and Practice Symposium*. SME, 1992.
- [9] Rodriguez, Victor A., et al. "Mechanistic modeling and simulation of a wet planetary ball mill." *Powder Technology* 429 (2023): 118901.
- [10] Plitt, L. R. "A mathematical model of the hydrocyclone classifier." *Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum*, (1976).
- [11] Mohanty, Sunati, and Ajit Swain. "Design and Simulation Analysis of Dewatering Hydrocyclones." *Mining, Metallurgy & Exploration* 39.3 (2022): 1277-1284 .

- [18] Hashemi, Hasan, Evaluation of efficiency and optimization of ballmill and hydrocyclone circuit in line 6 of Golgozar Mining and Industrial Company, MSc thesis, Yazd University, 2022 (in Persian).
- [19] Sehati, Ramin, Mohamad Reza Samadzadeh Yazdi, and Amir Hajizadeh Omran. "Assessment of the effect of iron magnetic concentrate desulfurization by flotation method on the quality of green and cooked pellets: A laboratory and pilot-scale study." *Minerals Engineering* 202 (2023): 108269.
- [20] Barzegar, Hossein, and Mohamad Reza Samadzadeh Yazdi. "Evaluation of green phosphate rock beneficiation by the present processing circuit of Esfordi phosphate plant." *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering* 12.30 (2022): 15-30.
- [21] Poursaeidi, Majid, et al. "Increasing Efficiency of Initial Grinding Circuit of Share-Babak Copper Complex Concentration Plan." *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering* 2.4 (2013): 88-92.
- [12] Zhao, Qiang, et al. "Evaluation and improvement of mathematical models for hydrocyclone classifiers part I: Laboratory scale." *Powder Technology* (2023): 118718.
- [13] BRGM, Caspeo. "USIM PAC 3.2 user manual of steady mineral processing simulator (Starting Guide)." (2004): 1-25.
- [14] Hoseini Jirdehi, M., and S. M. Razavian. "Development of Minerals Liberation Spectrum Simulator in Ball Mills." *Journal of Mineral Resources Engineering* 4.2 (2019): 93-105.
- [15] Marchand, J. C., D. Hodouin, and M. D. Everell. "Residence time distribution and mass transport characteristics of large industrial grinding mills." *IFAC Proceedings Volumes* 13.7 (1980): 295-302.
- [16] Vinnett, Luis, et al. "Estimating Residence Time Distributions in Industrial Closed-Circuit Ball Mills." *Minerals* 12.12 (2022): 1574.
- [17] Moraga, Carlos, Willy Kracht, and Julian M. Ortiz. "Process simulation to determine blending and residence time distribution in mineral processing plants." *Minerals Engineering* 187 (2022): 107807