

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

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

۱- دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

۲- رئیس تحقیقات فرآوری مدیریت مرکز تحقیقات گل گهر سیرجان، شرکت معدنی و صنعتی گل گهر سیرجان

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

DOI: [10.22034/ANM.2024.20840.1613](https://doi.org/10.22034/ANM.2024.20840.1613)

این نسخه "پذیرفته شده پیش از انتشار" مقاله است که در نشریه روش های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، پس از طی فرآیند داوری، برای چاپ، قابل پذیرش تشخیص داده شده است. این نسخه پس از اعلام پذیرش و قبل از فرآیند ویراستاری به صورت آنلاین منتشر می شود. مقاله پس از طی فرآیند آماده سازی و انتشار نهایی، از نسخه پذیرفته شده پیش از انتشار خارج و در شماره های مشخص در وب سایت نشریه منتشر می شود. صفحه آرایی و ویراستاری فنی باعث ایجاد تغییرات صوری در مقاله خواهد شد.

چکیده

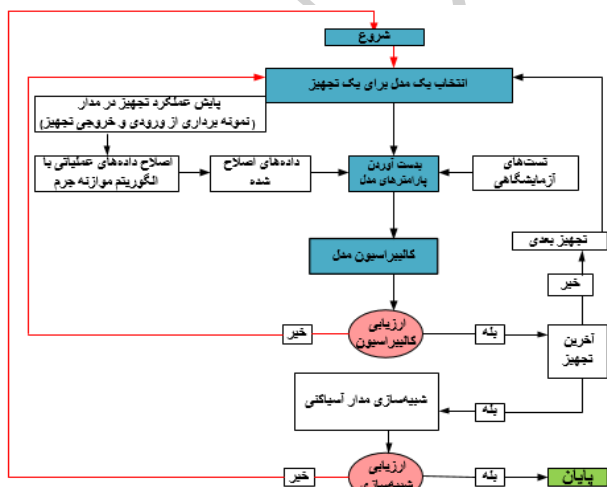
مدل سازی و شبیه سازی در طراحی، توسعه و بهینه سازی مدارهای فرآوری و پیش بینی رفتار و عملکرد کارخانه، نقش بسزایی دارد. خط ۵، ۶ و ۷ مجتمع گل گهر از نظر فرآیندی با یکدیگر مشابه هستند و از معدن شماره سه این شرکت خوراک دهی می شوند. با توجه به این که خوراک ورودی به این خطوط دارای مقدار قابل توجهی نرمة است، اهمیت جانمایی صحیح هیدروسیکلون دو چندان 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 یوسیمپک بررسی شد. برای دست یابی به این مهم، 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 کیلوپاسکال 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 ۲۴۳/۵۲، ۱۰۲ و ۳۲۱/۸۶ میکرون است. در حالت پیشنهادی، سه هیدروسیکلون با فشار عملیاتی ۱۳۴ کیلوپاسکال 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 ۵۷۴/۲۵، ۱۰۴ و ۱۲۲۹/۰۱ میکرون بدست آمد. در مدار آسیاکنی پیشنهادی نسبت به فعلی به دلیل راهیابی ذرات نرمة خوراک ورودی به جریان سرریز هیدروسیکلون، تناژ و d_{80} خوراک ورودی به آسیاگلوله ای به ترتیب ۲۱/۶۹٪ کاهش و ۱۵۹/۰۳٪ افزایش، به دلیل بهبود خردایش، تناژ و d_{80} جریان بار برگشتی و d_{80} جریان خروجی از آسیا به ترتیب ۳۷/۷۱٪، ۴۳/۰۴٪ و ۸٪ کاهش یافت. استفاده از حالت پیشنهادی نسبت به فعلی، سبب افزایش ۲۱/۶۹٪ ظرفیت مدار و افزایش ۱۷۲/۹۸٪ نسبت خردایش آسیاگلوله 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 یوسیمپک

تجهیزات با استفاده از نیروی گریز از مرکز در محیط سیال، ذرات را بر اساس اندازه طبقه‌بندی می‌کنند. در زمینه مدلسازی هیدروسیکلون از نیم قرن گذشته فعالیت‌های متعددی صورت گرفته است. یکی از مدل‌های کاربردی مورد استفاده در شبیه‌سازی هیدروسیکلون، روابط تجربی و شناخته شده 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 تصحیح شده، تقسیم جریان بین سرریز و ته‌ریز، دقت جدایش و افت فشار می‌باشد [۱۰]، [۱۱]، [۱۲].

نرم‌افزار یوسیم‌پک به عنوان یک نرم‌افزار توانمند، با استفاده از مدل‌های ریاضی و تجربی ارائه شده، به صورت مستقیم و معکوس فرآیندهای یک کارخانه فرآوری را شبیه‌سازی می‌کند [۱۳]، [۱۴]. جهت شبیه‌سازی هر تجهیز، مدل‌های متفاوتی وجود دارد که این مدل‌ها شامل طیفی از مدل‌های کاملاً تجربی تا مدل‌های پدیده‌شناختی می‌باشند. هر کدام از این مدل‌ها توانایی درون‌یابی و برون‌یابی متفاوتی در تخمین نتایج دارند [۱۳]، [۱۴]. برای شبیه‌سازی تجهیزات و مدارهای فرآوری، در اولین مرحله، از روش موازنه جرم استفاده می‌شود تا داده‌های عملیاتی بر هم منطبق شوند [۱۳]، [۱۴]. مرحله بعدی شبیه‌سازی مدار کارخانه و کالیبره کردن مدل‌های تجهیزات می‌باشد. 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) [۱۳]، [۱۴].



شکل ۱ - روند شبیه‌سازی یک کارخانه فرآوری با نرم‌افزار یوسیم‌پک [۱۳]، [۱۴].

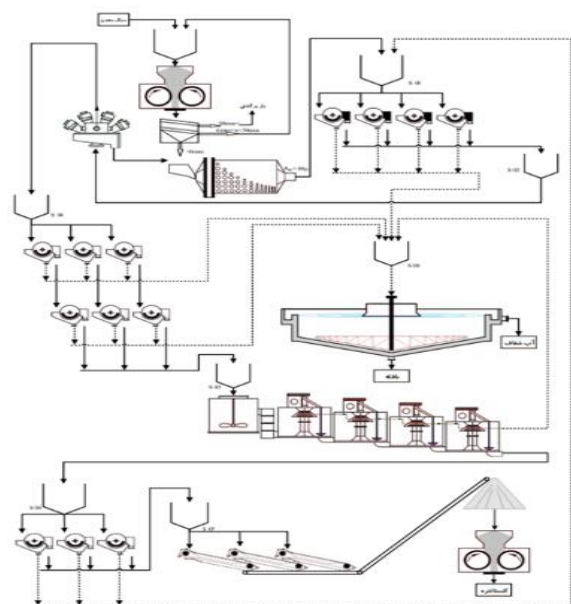
با پیشرفت علم، نیاز به انجام آزمایش‌های پرهزینه و زمان بر، جهت مطالعه مدارهای کانه‌آرایی کاهش یافته است. به منظور درک بهتر فرآیندها و به کارگیری قوانین فیزیکی پایه در تحلیل و پیش‌بینی فرآیندها، مدل‌های ریاضی بیش از پیش توسعه یافته‌اند. شبیه‌سازی و مدل‌سازی ابزار مناسبی برای طراحی، تحلیل، بهینه‌سازی و کنترل واحدهای عملیاتی فرآوری مواد معدنی می‌باشد. هدف اصلی همه روش‌های شبیه‌سازی، انتخاب بهترین روش و تجهیزات با بیشترین درجه اطمینان و کمترین هزینه می‌باشد. شبیه‌سازی روشی سریع، ارزان قیمت و دقیق‌تر از روش‌های آزمایشگاهی می‌باشد و بنابراین برای بهینه‌سازی کارایی مدارهای فرآوری به کار گرفته می‌شود. پیشرفت اخیر در زمینه سخت افزار و نرم‌افزارهای رایانه‌ای، موجب شده است که متخصصان شیوه‌های جدید را برای مسائل شبیه‌سازی توسعه دهند. بنابراین، یکی کردن الگوریتم‌های بهینه‌سازی با الگوریتم‌های شبیه‌سازی امکان پذیر شده است [۱]، [۲]، [۳].

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 پیوستنی و مخلوط کننده کامل، قابل تشریح است. دبی ورودی به آسیا، تاثیرگذارترین عامل بر زمان ماند مواد در داخل آسیا می‌باشد [۴]، [۵]، [۶]، [۷]. 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 [۴]، [۵]. ج) تابع انتخاب، سینتیک (نرخ) شکست در آسیا را نشان داده و تابعی از عملکرد شرایط آسیا می‌باشد. تابع انتخاب به محیط و سطح انرژی خردایش بستگی دارد [۸]، [۹]. با ترکیب سه مفهوم تابع شکست، تابع انتخاب و توزیع زمان ماند، فرآیند خردایش در آسیاهای گلوله‌ای به زبان ریاضی قابل توصیف است [۸]، [۹].

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 کمی را اشغال کرده و راندمان جدایش مطلوبی دارند. این

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 در عین حال تولیدکنندگان سنگ آهن مورد نیاز صنایع فولاد ایران محسوب می شود. این مجتمع دارای کارخانه های 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 می باشد. این خطوط بر مبنای خوراک دهی از معدن شماره سه این شرکت طراحی شده اند و کنسانتره تولیدی این خطوط خوراک کارخانه گندله سازی شماره ۲ این شرکت را تامین می کند. 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 غلتکی فشار بالا و آسیای گلوله ای، جدایش فیزیکی و ابعادی توسط هیدروسیکلون، پرعیارسازی مغناطیسی توسط جداکننده های مغناطیسی شدت متوسط و پایین و همچنین سولفورزدایی با سلول های فلوتاسیون است. عملیات آبگیری از کنسانتره مگنتیت در این خطوط، توسط فیلتر نواری خلا و آبگیری از باطله، توسط تیکتر انجام می شود. در نهایت افزایش سطح ویژه کنسانتره مگنتیت، توسط آسیای غلتکی فشار بالا صورت می گیرد (شکل ۲) [۱۸].



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

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. نرمه های موجود در خوراک آسیا، عمدتاً در مراحل خردایش در مدار سنگ شکنی و به خصوص در پیش خردایش با آسیای غلطکی فشار بالا، ایجاد می شوند. همچنین با هدف افزایش ظرفیت کارخانه و تولید خوراک با دانه بندی مناسب به منظور افزایش کارایی تجهیزات در پایین دست (مدار پرعیارسازی 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-جداکننده های مغناطیسی-هیدروسیکلون) توسط نرم افزار یوسیم پک مدلسازی 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 شده و خصوصیات جریان های این مدار پیش بینی شدند. در این تحقیق تلاش شد تا جایی که امکان تحصیل داده های لازم برای مدل ها وجود دارد، از مدل های با ساختار معنادار فیزیکی (پدیده شناختی: مدل های سطوح بالاتر یوسیم پک) استفاده شود. در نهایت، عملکرد مدار فرآوری فعلی با مدار فرآوری جدید مورد مقایسه قرار گرفت.

۲- مواد و روش ها

۲-۲- تهیه نمونه

اولین قدم برای شبیه سازی یک مدار فرآوری، نمونه برداری دقیق از مدار و آنالیز صحیح آن ها می باشد. نمونه برداری باید معرف و در نقاط معین و در حالت پایدار مدار انجام شود. در این تحقیق به منظور بررسی عملکرد تجهیزات و بدست 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 نمونه ها صورت گرفت. در نمونه برداری، شکل هندسی نمونه گیر بایستی به گونه ای 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 نمونه گیرهای طراحی شده توسط شرکت Metso، (شکل ۳) استفاده شد. در حین فرآیند نمونه گیری، تغییرات عملیاتی مانند فشار عملیاتی هیدروسیکلون، توان آسیا و دبی جریان ها

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]، رابطه‌ای 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، γ و ϕ_j پارامترهای مدل آستین هستند. ϕ_j پارامتر شکست است که تابعی از اندازه ذراتی می‌باشد که در آسیا خردایش می‌شوند و از طریق رابطه ۳ تعیین می‌شود:

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

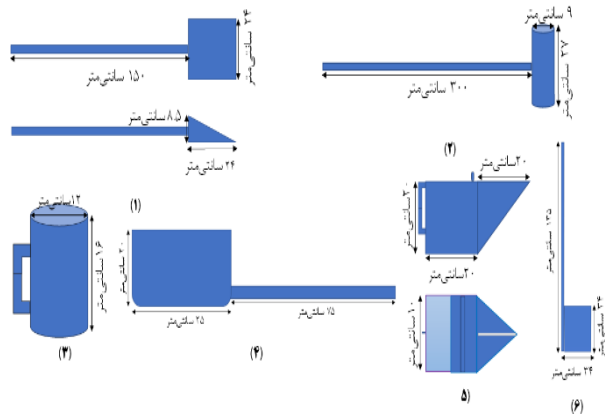
پارامترهای این مدل دارای بازه فیزیکی معنی داری هستند که این محدوده‌ها مطابق با جدول ۱ است.

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 ۱۶۰۰۰، 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 ۱۶۰۰۰ 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 نرم‌افزار یوسیم‌پک مقدار δ مگنتیت ۰/۱۱۳ و δ سایر کانی‌ها ۰/۱۱۲ محاسبه شد.

ثابت شدند. مقدار کلی نمونه‌برداری بایستی با ابعاد بزرگترین ذرات نمونه متناسب باشد. در این تحقیق به طور 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

۳-۲- شبیه‌سازی آسیاگلوله‌ای

۱-۳-۲- اندازه‌گیری تابع شکست

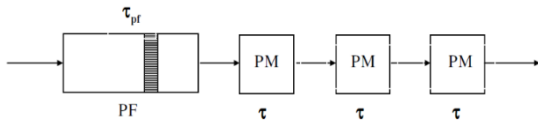
تابع شکست، به توصیفی از توزیع ذرات با اندازه‌های مختلف حاصل از شکستن یک ذره اطلاق می‌شود [۸]. کلی و اسپاتیسوو تابع توزیع شکست را به صورت میانگین توزیع ابعادی که از شکست یک ذره واحد ایجاد شده به صورت رابطه زیر تعریف کردند [۸]، [۹].

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

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 [۸]، [۹].

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.

۲-۳-۲- اندازه‌گیری تابع انتخاب



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 می‌باشد.

$$RTD = \frac{n^n (t - \tau_{pf})^{n-1} \exp\left(\frac{-n(t - \tau_{pf})}{\tau_{\Sigma}}\right)}{(\tau_{\Sigma})^n (n-1)!} \quad (۶)$$

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

در این تحقیق برای انجام آزمایش زمان ماند مواد در آسیاگلوله‌ای 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

۲-۳-۴- سازگارسازی (اصلاح) داده‌ها با استفاده از

الگوریتم موازنه جرم در نرم افزار 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 عملکرد دستگاه‌ها و آگاهی از نحوه توزیع مواد در قسمت‌های مختلف مدار امکان‌پذیر است. بدین منظور اطلاعاتی نظیر عیار کانی یا فلز،

تابع انتخاب شاخص سینتیک فرآیند آسیا شدن مواد است و به عوامل مختلفی مانند قطر آسیا، اندازه و جنس گلوله‌ها وابسته می‌باشد [۸]. ناپدید شدن مواد از یک طبقه سرندی در رابطه با آسیاهای گلوله‌ای در اغلب موارد از سینتیک مرتبه اول پیروی می‌کند [۸]، [۹]. در این تحقیق از مدل ارائه شده در نرم افزار 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.

$$S_i = S_1 e^{\alpha_1 \ln \frac{d_i}{d_1} + \alpha_2 \left(\frac{d_i}{d_1}\right)^2} \quad (۴)$$

که در آن d_i میانگین هندسی اندازه ذرات در کلاس ابعادی d_1 اندازه ذرات مرجع، S_i تابع انتخاب ویژه - انرژی در ابعاد d_i و α_1 و α_2 پارامترهای مدل هستند [۸]، [۹]. دیدگاه سینتیک و دیدگاه انرژی لازم برای خردایش با استفاده از رابطه ۵ با یکدیگر مرتبط می‌شوند [۸]، [۹].

$$S_1 = S_1^E \frac{P}{H} \quad (۵)$$

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].

۲-۳-۳- 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 [۱۵]، [۱۶]، [۱۷]. 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 مخلوط کننده کامل با زمان‌های ماند برابر تشکیل شده است (شکل ۴) [۱۵]، [۱۶]، [۱۷].

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 سرریز هیدروسیکلون (سانتی‌متر)، h ارتفاع آزاد پیداکننده 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 با استفاده 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]، [۱۱] و [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) بر حسب 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]، [۱۱]، [۱۲].

$$P = F_4 \times \frac{1.88 Q^{1.78} \exp(0.0055\Phi)}{D_c^{0.37} D_i^{0.94} h^{0.28} (D_u^2 + D_o^2)^{0.87}} \quad (11)$$

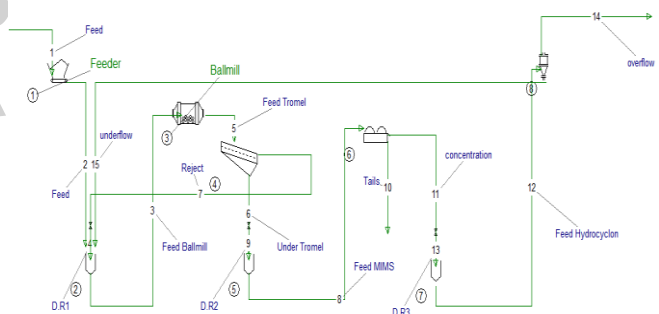
که در آن F_4 ضریب کالیبراسیون افت فشار است. بازیابی آب به تهریز (R_f) با استفاده از رابطه ۱۲ بیان می‌شود:

$$R_f = \frac{\left(\frac{s}{1+s}\right) - \left(\frac{R_s Q}{100}\right)}{1 - \left(\frac{Q}{100}\right)} \quad (12)$$

که در آن قسمت (R_s) جامد خوراک راه‌یافته به تهریز است.

دبی، درصد جامد و غیره جمع‌آوری می‌شوند، سپس پارامترهای مربوط به جریان‌های نمونه برداری 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 تهریز 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

۲-۴- شبیه‌سازی هیدروسیکلون

پلیت در سال ۱۹۷۶ میلادی، مدلی را برای عملکرد هیدروسیکلون‌ها، براساس 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].

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

۳- نتایج و بحث

جدول ۲: ضرایب محاسبات برگشتی روش اصلاح شده H&F

تک اندازه شده (میکرون)	ضرایب محاسبه شده برادبنت و کلکات		
	φ	α	β
۱۶۰۰۰	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

۳-۱-۲- تابع انتخاب

با توجه به روشی که در بخش ۲-۲-۲ تشریح شد مقدار پارامترهای تابع انتخاب محاسبه شد. در جدول ۴ مقادیر پارامترهای مدل دوپارامتری و در جدول ۵ تابع انتخاب محاسبه شده توسط نرم‌افزار یوسیم‌پک آورده شده است. S_1^E مگنتیت و S_2^E سایر کانی‌ها ۰,۸ محاسبه شد. میزان اختلاف بین مقادیر پارامترهای نرمال شده تابع انتخاب مگنتیت و سایر ذرات، به تفاوت اندیس کار کانی مگنتیت و دیگر ذرات نسبت داده شده است.

جدول ۳: مقادیر پارامترهای مدل دو پارامتری تابع انتخاب

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

جدول ۴: تابع انتخاب محاسبه شده توسط نرم‌افزار یوسیم‌پک در

مقیاس صنعتی

اندازه ذرات (میکرون)	مگنتیت	سایر ذرات
۱۶۰۰۰	۰,۸۵	۰,۶۸
۱۱۲۰۰	۰,۹۷	۰,۷۹
۸۰۰۰	۱,۰۹	۰,۹۲
۵۶۰۰	۱,۱۶	۱,۰۲
۴۰۰۰	۱,۱۶	۱,۰۸

۳-۱-۳- اندازه‌گیری زمان ماند

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

۳-۱-۱- شبیه‌سازی مدار فعلی (آسیاگلوله‌ای - جداکننده‌های مغناطیسی - هیدروسیکلون)

برای شبیه‌سازی مدار آسیاکنی فعلی با نرم‌افزار یوسیم‌پک، پارامترهایی از قبیل مشخصات هندسی تجهیزات مدار، تابع شکست، تابع انتخاب، توزیع زمان ماند، توزیع عیار مگنتیت و دیگر کانی‌ها در بخش‌های ابعادی مختلف جریان‌های مدار، توزیع دانه‌بندی، تناژ جامد و آب‌های اضافه شده به مدار و غیره مورد نیاز است. در نهایت با انتخاب مدل‌های مناسب، کالیبراسیون مدل تجهیزات مختلف، برای یکسان شدن پارامترهای مدار شبیه‌سازی و عملیاتی انجام شد. برای اعتبارسنجی مدل در ابتدا با پایین‌ترین مدل‌های موجود در نرم‌افزار (مدل‌های سطح صفر) برای هر تجهیز و با استفاده از الگوریتم موازنه جرم، سازگاری داده‌ها انجام شد. سپس برای هر کدام از تجهیزات آسیای گلوله‌ای، جداکننده‌های مغناطیسی شدت متوسط و هیدروسیکلون به ترتیب از بالاترین مدل‌های موجود (3) Ballmill، (0) Separator و (1) Hydrocyclon در نرم‌افزار یوسیم‌پک استفاده شد. مدل (3) Ballmill مدل آسیاکنی پیوسته است که پارامترهای آن در بخش ۱-۲ توضیح داده شده است، مدل (1) Hydrocyclon مدل تجربی پلیت است که پارامترهای آن در بخش ۲-۲ توضیح داده شد، مدل (0) Separator برای شبیه‌سازی جداکننده‌های مغناطیسی شدت پایین و شدت متوسط استفاده می‌شود و بازیابی هر نوع ذره در یک جریان مشخصی تعیین کند.

۳-۱-۱-۱- تابع شکست

مقادیر تابع شکست محاسبه شده (با توجه به روشی که در بخش ۳-۲-۲ تشریح شد)، در جدول ۲ و ضرایب محاسبات برگشتی در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۱: تابع شکست تجمعی روش اصلاح شده H&F

طبقه	۱۶۰۰۰	۱۱۲۰۰	۸۰۰۰	۵۶۰۰	۴۰۰۰
سرندي	۰	۰	۰	۰	۰
۱۶۰۰۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۱۲۰۰	۰,۵۹	۰	۰	۰	۰
۸۰۰۰	۰,۱۲	۰,۵۳	۰	۰	۰
۵۶۰۰	۰,۰۵	۰,۱۵	۰,۴۲	۰	۰
۴۰۰۰	۰,۰۴	۰,۰۷	۰,۱۸	۰,۳۵	۰

جدول ۶: تناژ جامد اندازه‌گیری و اصلاح شده

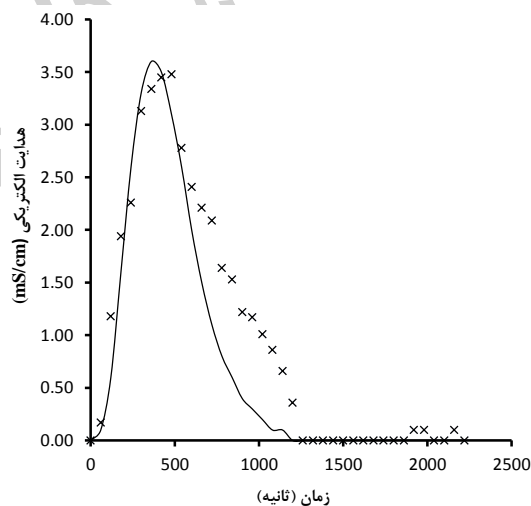
تناژ جامد (تن بر ساعت)		جریان
اصلاح شده	اندازه‌گیری شده	
۴۶۱,۴۲	۴۵۹	۱ و ۲
۱۲۶۱,۴۱	۱۱۶۳,۵	۳
۱۲۶۱,۴۱	۱۱۶۳,۵	۵
۱۲۴۶,۵۵	۱۱۵۰	۶
۱۴,۹۳	۱۳,۵	۷
۱۲۴۶,۵۵	۱۱۵۰	۸
۷۲,۴۸	۶۶,۸	۱۰
۱۱۷۴,۰۷	۱۰۸۳,۲	۱۱
۱۱۷۴,۰۷	۱۰۸۳,۲	۱۲
۳۸۸,۹۵	۳۹۲,۲	۱۴
۷۸۵,۱۲	۶۹۱	۱۵

جدول ۵: نتایج تعیین زمان ماند مواد بر اساس برازش با مدل N مخلوط کننده کامل با نرم‌افزار KMPCsim

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

جدول ۷: دبی آب در جریان‌های مخلف اندازه‌گیری و اصلاح شده

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



مدل برازش شده — داده‌های واقعی ×

جدول ۸: درصد جامد در جریان‌های مخلف اندازه‌گیری و اصلاح شده

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

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

۴-۱-۳- سازگاری 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 شماره ۶، ۷ و ۸ نشان داده شده است.

۳-۱-۵- پارامترهای مدل پلیت

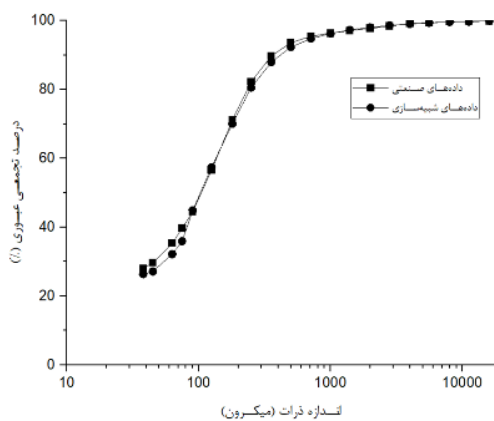
در جدول شماره ۹ پارامترهای محاسباتی مدل پلیت با توجه به روندی که در بخش ۲-۲-۵ تشریح شد، آورده شده است.

جدول ۹: پارامترهای مدل پلیت در کالیبراسیون مدل هیدروسیکلون مدار فعلی

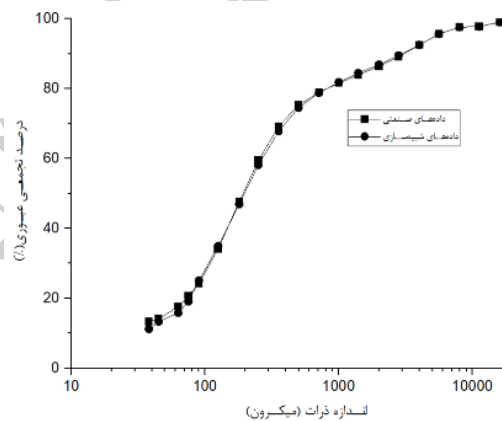
مقدار	پارامتر	
۶۶	قطر داخلی هیدروسیکلون (cm)	۱
۲۶	قطر ورودی هیدروسیکلون (cm)	۲
۱۶	قطر سرریز هیدروسیکلون (cm)	۳
۱۳	قطر ته‌ریز هیدروسیکلون (cm)	۴
۱۴۷,۲۵	ارتفاع آزاد گرداب هیدروسیکلون (cm)	۵
۲۶,۱۸	درصد جامد حجمی بار ورودی (%)	۶
۱۶۳۷۱,۶۶	دبی حجمی بار ورودی (Lit/min)	۷
۸۰,۹۲	حد جدایش تصحیح شده (μ)	۸
۱۱۲,۳۹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

۳-۱-۶- اعتبارسنجی مدل آسیاگلوله‌ای

جهت بررسی اعتبار مدل آسیاگلوله‌ای، توانکشی، d_{80} و منحنی‌های توزیع ابعادی جریان‌های ورودی و خروجی آسیاگلوله‌ای با مقدار داده‌های صنعتی آن مقایسه شد. نتایج مقایسه جریان‌های اطراف آسیاگلوله‌ای با مقدار شبیه‌سازی شده در شکل ۸ و در جدول شماره 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.



(ب)



(الف)

شکل ۸ - الف) مقایسه توزیع ابعادی جریان خوراک آسیاگلوله‌ای در شرایط عملیاتی و شبیه‌سازی، ب) مقایسه توزیع ابعادی جریان خروجی آسیاگلوله‌ای با مقدار شبیه‌سازی

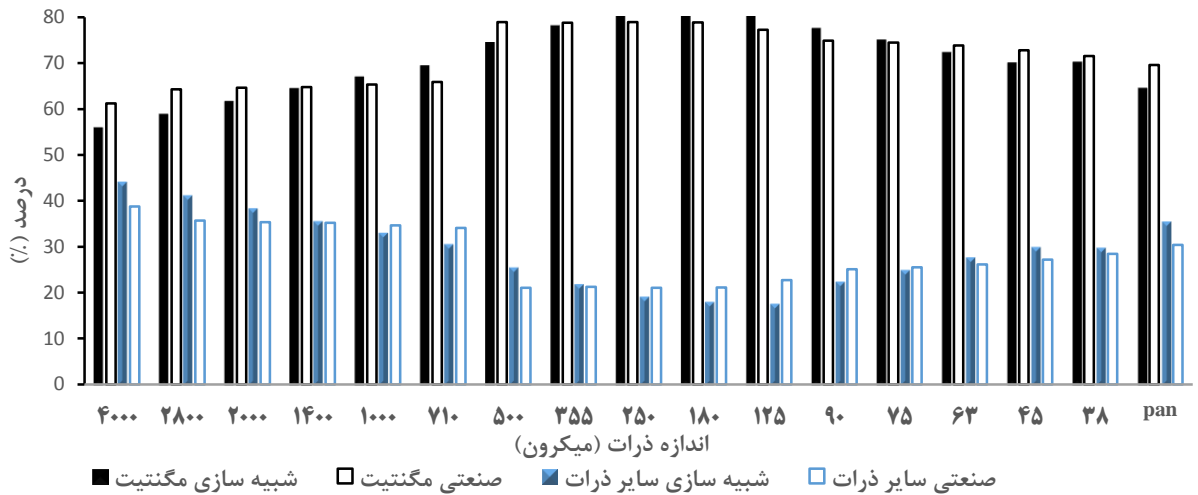
۳-۱-۷- اعتبارسنجی مدل جداکننده‌های مغناطیسی

شدت متوسط

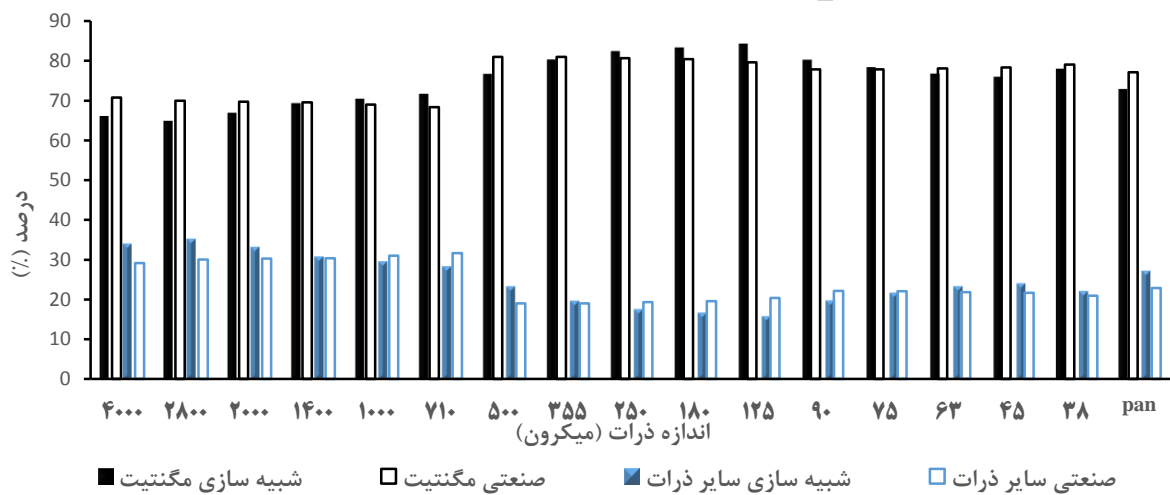
برای بررسی اعتبار مدل جداکننده‌های مغناطیسی مقادیر توزیع عیار مگنتیت و دیگر ذرات در فراکسیون‌های ابعادی مختلف جریان‌های خوراک، کنسانتره و باطله مدار آسیاکنی با مقدار داده‌های صنعتی آن مقایسه شد. نتایج مقایسه جریان‌های اطراف جداکننده مغناطیسی با مقدار شبیه‌سازی در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که نتایج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

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

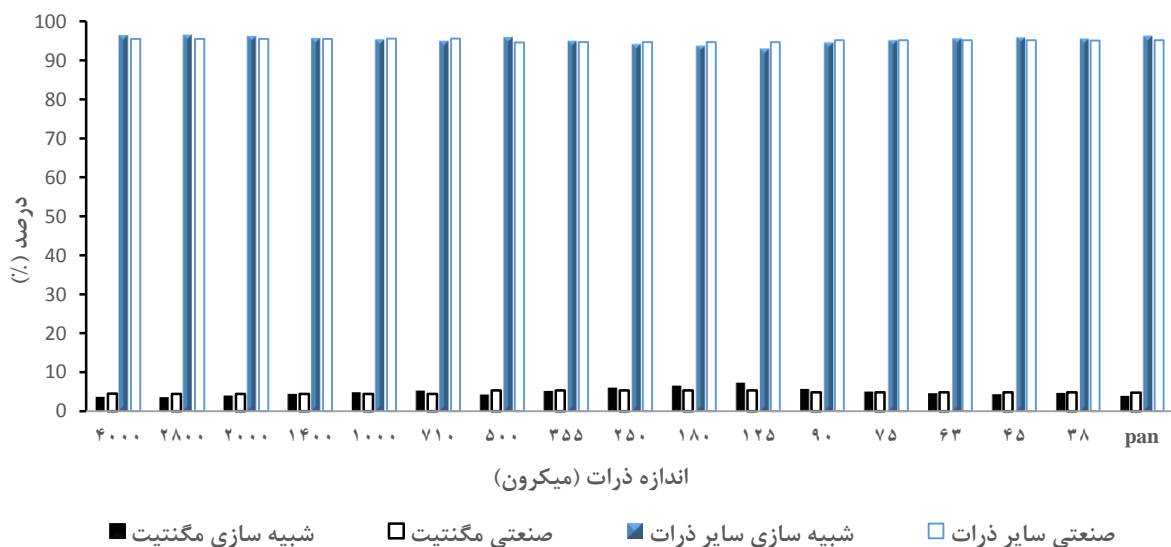
پارامتر	مدار صنعتی	مدار شبیه‌سازی
d_{80} جریان ورودی به آسیا (μ)	۸۰۶,۴۴	۸۲۵,۶۷
d_{80} جریان خروجی به آسیا (μ)	۲۴۴	۲۵۰
توانکشی آسیاگلوله‌ای (W)	۴۵۱۷	۴۶۰۰



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



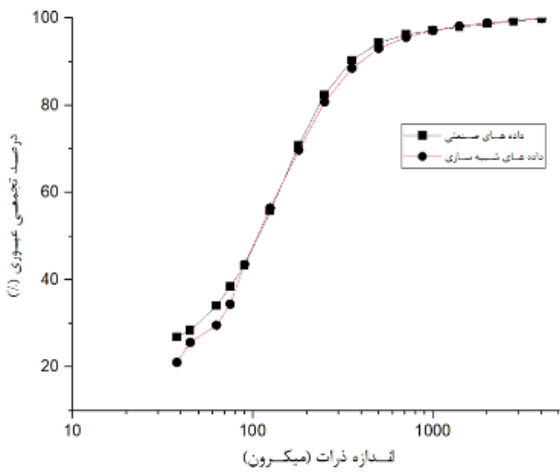
شکل ۱۱ - مقایسه عیار مگنتیت و دیگر کانی‌ها، در توزیع ابعادی جریان باطله جداکننده‌های مغناطیسی با مقدار شبیه‌سازی

۳-۱-۸- اعتبارسنجی مدل هیدروسیکلون

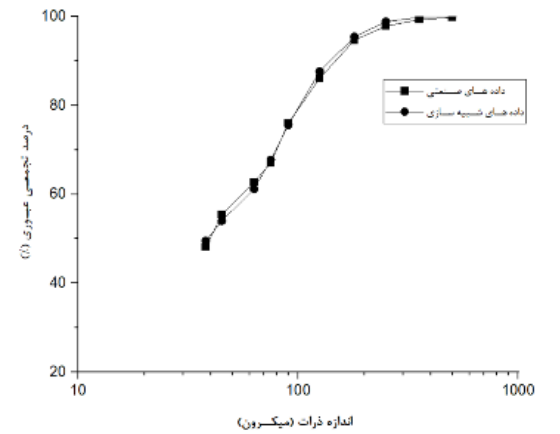
برای بررسی اعتبار مدل هیدروسیکلون، توزیع ابعادی جریان‌های اطراف هیدروسیکلون با مقدار داده‌های صنعتی مقایسه شدند. توزیع دانه‌بندی و نتایج مقایسه جریان‌های اطراف هیدروسیکلون در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، در این بخش نیز داده‌های شبیه‌سازی بر داده‌های صنعتی منطبق هستند. بنابراین کالیبراسیون مدل Hydrocyclon (1) در این مدار آسیابانی از اعتبار برخوردار است.

۳-۲- شبیه‌سازی مدار پیشنهادی (هیدروسیکلون - آسیاگولهای - جداکننده‌های مغناطیسی)

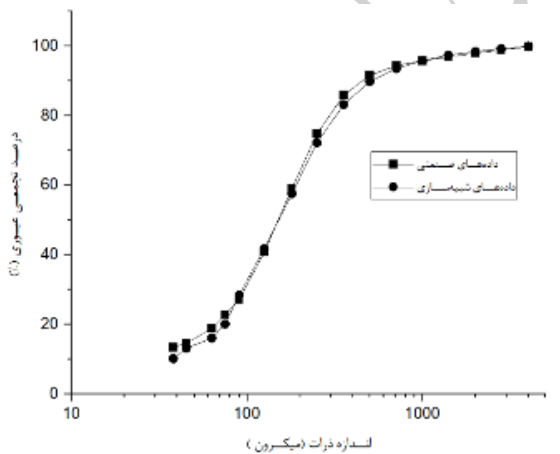
در این مدار پس از تغییر فلوشیت مدار آسیابانی فعلی و جایجایی هیدروسیکلون به اول مدار، فلوشیت مدار پیشنهادی ۱۲ رسم شد. برای شبیه‌سازی اولیه، به هیدروسیکلون مدل سطح صفر داده شد. از آنجا که چنین مداری در واقعیت وجود نداشت، برای اعتبارسنجی، یک مدار ایده‌آل با هیدروسیکلون مدل سطح صفر طراحی شد و داده‌های این مدار ایده‌آل مقادیر داده‌های صنعتی فرض شدند. سپس مدل به بالاترین مدل موجود در نرم‌افزار (Hydrocyclon (1)) 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 دانه-بندی 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 نشان دهنده دقت بالای شبیه‌سازی در این مدار است.



(الف)

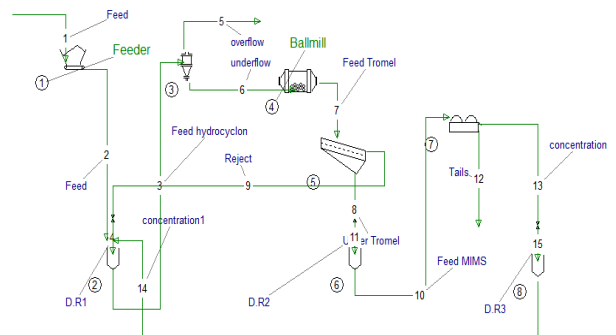


(ب)



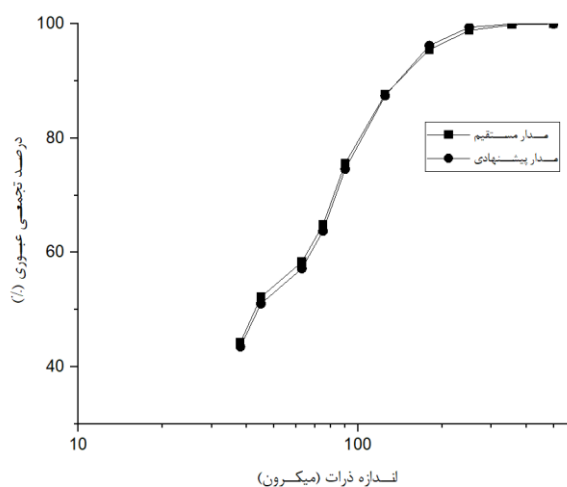
(ج)

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

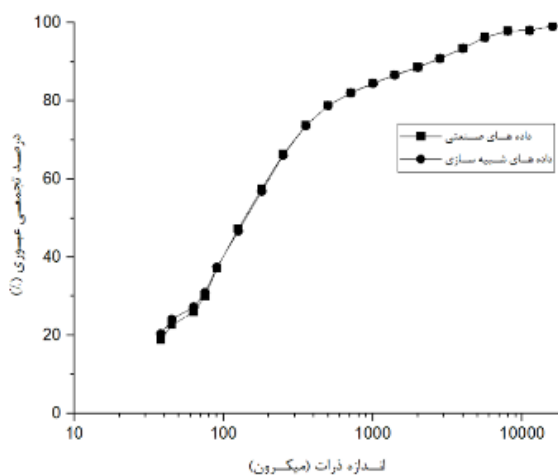


شکل ۱۲- فلوشیت مدار آسیابانی پیشنهادی خط ۶ گل‌گهر در نرم‌افزار یوسم‌پک

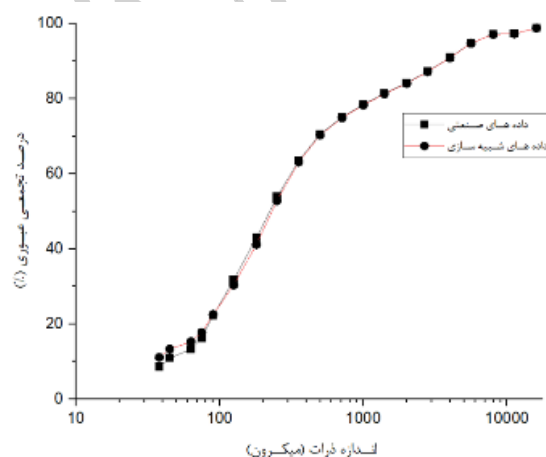
(الف)



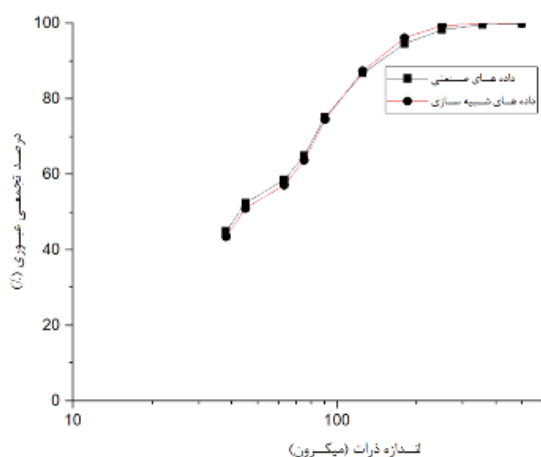
(ب)



(ج)



(د)



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

جریان های مختلف مدار فعلی و پیشنهادی در جدول ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که نتایج در شکل های ۱۵ و ۱۶ نشان می دهد، در مدار پیشنهادی به دلیل حذف نرمه توزیع دانه بندی تهریز هیدروسیکلون و خوراک آسیای گلوله ای نسبت به مدار فعلی وسیع تر است، همچنین نتایج در جدول ۱۱ نشان می دهد که کاهش نرمه خوراک ورودی به آسیای گلوله ای، سبب کاهش ۲۱٫۶۹٪ تناژ و افزایش ۱۵۹٫۰۳٪ d_{80} خوراک ورودی آسیای گلوله ای شده است. کاهش تناژ و افزایش d_{80} خوراک آسیای گلوله ای سبب افزایش قدرت ضربه بار خردکننده و افزایش زمان ماند در آسیای گلوله ای شده و

۳-۲-۱- مقایسه شبیه سازی مدار آسیاکنی در دو حالت

فعلی و پیشنهادی

همانطور که در بخش قبل به آن اشاره شد، توزیع دانه بندی 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 گلوله ای در شکل های ۱۵ و ۱۶ و مقایسه d_{80} و دبی

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 می‌باشد.

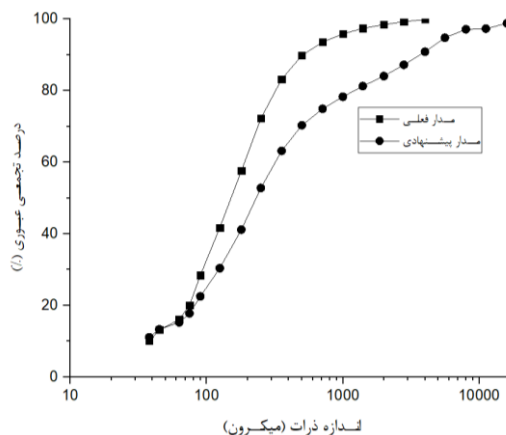
نتایج شبیه‌سازی مدار آسیاکنی فعلی نشان می‌دهد که کالیبراسیون مدل تجهیزات از دقت بالایی برخوردار است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سرریز هیدروسیکلون مدار فعلی و پیشنهادی بر هم منطبق است و هدف اصلی طراحی هیدروسیکلون با d_{80} و توزیع دانه‌بندی سرریز مشابه، محقق شده است، همچنین تطبیق داده‌های واقعی و 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 d_{80} خوراک ۲۱٫۶۹ درصد وزن و افزایش ۱۵۹٫۰۳ درصدی d_{80} خوراک ورودی به آسیاگلوله‌ای می‌شود. همچنین نسبت خردایش آسیاگلوله‌ای 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 آسیاگلوله‌ای، 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.

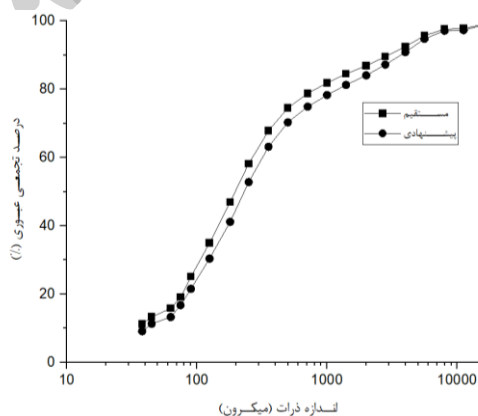
۵- تقدیر و تشکر

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

بهبود فرآیند خردایش در آسیای گلوله‌ای منجر به کاهش ۸٪ d_{80} جریان خروجی، افزایش ۱۷۲٫۹۸٪ نسبت خردایش کلی آسیاگلوله‌ای، کاهش ۳۷٫۷۱٪ تناژ و ۴٫۴۳٪ d_{80} جریان بار برگشتی و افزایش ۲۱٫۶۹٪ 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 ۱۱ - 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)	۱۴٫۹۳	۹٫۳۰
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

- 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 .
 - 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
- ۱۸- هاشمی، حسن، ارزیابی کارایی و بهینه‌سازی مدار آسیاکنی خط ۵، ۶، و ۷ شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ۱۴۰۰.
- 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

Optimizing Hydrocyclone Placement in Grinding Circuits of Lines 5, 6, and 7 at Golgohar Iron Complex using USIM PAC Software

ABSTRACT

Modeling and simulation play a crucial role in designing, developing, and optimizing processing circuits, enabling accurate prediction of their behavior and performance. Lines 5, 6, and 7 of the Golgohar plant are similar, each receiving feed from the No. 3 Gogohar mine. The high concentration of fine particles in the feed to these lines significantly increases the importance of proper hydrocyclone positioning. This research aims to find the best layout for the ball mill, medium intensity magnetic separators, and hydrocyclones. Two placement options for the hydrocyclone were evaluated: at the beginning or the end of the grinding circuit. USIM PAC software was used to simulate how the hydrocyclone's placement affected the milling circuit's performance. The initial step involved defining the key simulation parameters, such as the breakage function, selection function, residence time, and the geometric features of the equipment used. Both the existing circuit (Ballmill-Magnetic Separators-Hydrocyclones) and the proposed alternative (Hydrocyclones-Ballmill-Magnetic Separators) were simulated. The analysis suggests that the existing circuit requires three hydrocyclones operating at 112 kilopascals. Optimal diameters are 260 mm for the inlet, 160 mm for the overflow, and 130 mm for the underflow. The feed, overflow, and underflow particle sizes (d_{80}) are 52, 243, 102, and 321.86 microns, respectively. The proposed circuit incorporates three hydrocyclones, each operating at 134 kilopascals. These hydrocyclones have inlet, overflow, and underflow diameters of 225 mm, 297 mm, and 82.5 mm, respectively. The particle size (d_{80}) of the feed, overflow, and bottom products was measured as 574.25, 104, and 1229.01 microns, respectively. The proposed grinding circuit's input feed saw a 21.69% reduction in tonnage, while particle size increased by 159.03%. The circulating load tonnage, particle size, and outflow particle size from the ball mill decreased by 37.71%, 4.43%, and 8%, respectively. The proposed circuit boosts capacity and the size reduction ratio of the ball mill by 21.69% and 172.98% respectively. These results, confirmed that the proposed circuit has a higher efficiency than the existing one.

KEYWORDS

Simulation, Grinding circuit, Hydrocyclone placement, USIM PAC Software