

# شبیه سازی و بهینه سازی مدار آسیاهای گلوله‌ای کارخانه فرآوری سنگ آهن گل گهر

محمد تقی محمدی<sup>i</sup>؛ بهرام رضایی<sup>ii</sup>؛ اکبر فرزنانگان<sup>iii</sup>

## چکیده

مجتمع معدنی سنگ آهن گل گهر با تولید ۵ میلیون تن کنسانتره آهن ۳۳ درصد از کل تولیدات کنسانتره کشور در سال ۱۳۸۵ را به خود اختصاص داده است. با بررسی مدار آسیاهای گلوله‌ای مشخص شد که چیدمان مدار آسیاهای مجدد بایست تغییر کند. در این مقاله مدار خردایش آسیاهای گلوله‌ای در ابتدا شبیه‌سازی نرم افزاری شده و سپس به بهینه‌سازی مدار و پیش‌بینی محصول اقدام شد. نتایج شبیه‌سازی مشخص ساخت طبقه‌بندی خوراک آسیا توسط هیدروسیکلون و حذف مواد کوچک‌تر از ۱۲۵ میکرون از آن و جلوگیری از ورود محصول میانی جداکننده‌های مغناطیسی‌تر به آسیاهای گلوله‌ای موجب بالا رفتن ظرفیت تولید مدار آسیاهای گلوله‌ای تا میزان ۳۳ درصد و به میزان ۲ درصد از تولید ذرات کوچک تر از ۶۳ میکرون که در جدا کننده‌های مغناطیسی تر شدت پایین مشکل ساز هستند، کاسته خواهد شد. و با حفظ تولید کنونی کارخانه می‌توان یک آسیا را از مدار خارج و از مصرف انرژی و هزینه‌های مربوط به استهلاک و نگهداری تا ۳۰ درصد کاست.

## کلمات کلیدی

شبیه سازی، تابع شکست، تابع انتخاب، خردایش، آسیای گلوله‌ای، سنگ آهن گل گهر.

## *Simulation & Optimization of Ball milling Circuits of Gol Gohar Processing Plant*

M.Taghimohammadi; B.Rezai; A.Farzanegan;

### ABSTRACT

Golgozar iron mining Company which is one of the major suppliers of the raw material for Iran's steel industries produces 5 million tons of iron concentrate which is 33 percent of the concentrate production of iron in 2006. The feed of wet magnetic separators is supplied by three ball mills. The classification of the feed by hydrocyclone and the rejection of particles less than 100 microns and avoiding wet magnetic separator's middling from entering the ball mills increases the production capacity of the ball mill circuits by 33% removed of particles  $-125 \mu m$  from ball mill feed, reduces the production of particles  $-63 \mu m$  (which cause problems in low intensity wet magnetic separators) by 2 percent. By eliminating one mill from the circuit it is possible to reduce power consumption and the costs of depreciation, maintenance of ball charge and lubrication by 30 percent.

### KEYWORDS

Simulation, Breakage function, Selection function, Comminution, Ball mill, Golgozar iron mining Company.

i دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی فرآوری مواد معدنی، دانشگاه پلی تکنیک تهران: mtaghimohammadi@yahoo.com

ii استاد دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه پلی تکنیک تهران.

iii استادیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه کاشان.

یک آسیا با کسری از ظرفیت اسمی (بسته به تولید محصول میانی خشک) تقریباً ۸ تا ۱۲ ساعت در روز کار می‌کند و یک آسیا هم متوقف می‌باشد. ظرفیت واقعی هر آسیا ۱۳۰ تن بر ساعت است. فلوشیت کارخانه را می‌توان در شکل ۹ مشاهده نمود.

قطر هر آسیا ۴/۵ متر و طول آن ۵/۸ متر است. با توجه به هزینه‌های بالای عملیاتی و نگهداری آسیاهای گلوله‌ای و با توجه به اینکه محصول آسیاهای گلوله‌ای به عنوان بار اولیه وارد جداکننده‌های مغناطیسی تر می‌شود، از این رو شرایط عملیاتی مدار خردایش مجدد کارخانه، مورد مطالعه قرار گرفت.

## ۲- روش‌ها و مواد

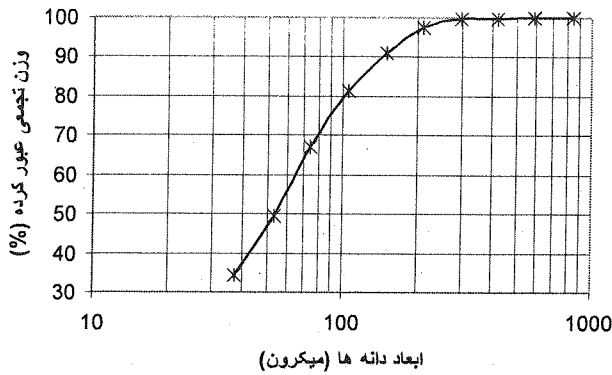
به منظور بررسی کارایی آسیاهای گلوله‌ای در کارخانه گل‌گهر، در گام اول تهیه نمونه‌ای معرف در دستور کار قرار گرفت. از بار اولیه و محصول یکی از آسیاهای گلوله‌ای معدن گل‌گهر نمونه‌گیری سیستماتیک صورت پذیرفت. بار اولیه ورودی به آسیا شامل محصول میانی جداکننده‌های مغناطیسی خشک و تر است. دبی وزنی محصول میانی جداکننده‌های مغناطیسی خشک که شامل باطله رافر و کنسانتره رمق‌گیر است ۱۲۵ تن بر ساعت و دبی محصول میانی جداکننده‌های مغناطیسی تر ۵ تن بر ساعت است، نمونه محصول میانی جداکننده‌های مغناطیسی تر خود شامل باطله جداکننده‌های کلینر و ریکلینر جداکننده‌های مغناطیسی تر است. در مجموع چهار نمونه معرف گرفته شد که به ترتیب عبارتند از: (۱) محصول میانی جداکننده‌های مغناطیسی خشک. (۲) باطله کلینر جداکننده‌های مغناطیسی تر. (۳) باطله ریکلینر جداکننده‌های مغناطیسی تر. (۴) محصول خروجی از آسیا. که سه نمونه نخست، بار اولیه ورودی به آسیا را تشکیل می‌دهند. ابعاد محصول میانی جداکننده‌های مغناطیسی خشک و محصول آسیای (۸۰ درصد عبور کرده) نمونه‌گیری شده به ترتیب برابر ۴۶۱ و ۱۰۵ میکرون به دست آمد که با گزارش فنی و عملیاتی کارخانه که ابعاد نمونه‌های فوق (۸۰ درصد عبور کرده) را به ترتیب ۴۵۰ و ۱۰۰ میکرون گزارش می‌کند، تطابق خوبی دارد که نشان دهنده معرف بودن نمونه‌ها است. دانسیته واقعی کانسنگ مورد مصرف ۴/۵ و دانسیته ظاهری آن ۲/۳ محاسبه شد. ابعاد باطله کلینر و ریکلینر جداکننده‌های مغناطیسی تر (۸۰ درصد عبور کرده) نمونه‌گیری شده به ترتیب برابر ۶۰ و ۸۵ میکرون محاسبه گردید. شکل‌های شماره ۱ تا ۴ نتایج آنالیز ابعادی بار اولیه و محصول آسیای گلوله‌ای را نشان می‌دهند. در مرحله بعد جهت شبیه سازی مدار آسیاهای گلوله‌ای اقدام به محاسبه پارامترهای شبیه سازی شد، که در ابتدا تابع

خردایش، فرآیندی با مصرف انرژی بالاست، بطوری‌که ۳ تا ۴ درصد از انرژی تولیدی در سراسر جهان و در حدود ۷۰ درصد از انرژی مورد مصرف در کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی را فرآیند خردایش به خود اختصاص می‌دهد. به این دلیل، یک بهبود جزئی در راندمان خردایش تاثیر قابل توجهی بر روی هزینه‌های عملیاتی کارخانه خواهد داشت [۱]. در دهه گذشته، در راندمان خردایش بهبود قابل توجهی صورت گرفته و این پیشرفت نه تنها بعلا پیشرفت ماشین آلات که توانایی استفاده بهینه از انرژی ورودی را دارند، بلکه بعلا طراحی بهینه سامانه‌های خردایش و متغیرهای عملیاتی بوده که دستگاه‌های موجود را با راندمان بالاتری به کار می‌اندازند [۲].

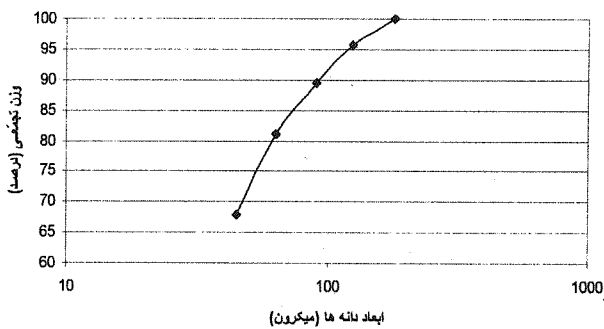
مجتمع معدنی سنگ آهن گل‌گهر در استان کرمان با تولید ۵ میلیون تن کنسانتره آهن ۲۳ درصد از کل تولیدات کنسانتره کشور در سال ۱۳۸۵ را به خود اختصاص داد. این مجتمع یکی از قطب‌های اصلی تامین کننده مواد اولیه صنایع فولاد کشور است. فرآیند خردایش در این کارخانه بدین صورت است که سنگ معدن استخراج شده توسط سنگ‌شکن ژیراتورری تا ابعاد زیر ۲۰۰ میلی‌متر مورد خردایش اولیه قرار می‌گیرد. مواد خروجی به سه آسیای نیمه خودشکن خشک وارد می‌شود و تا ابعاد  $d_{80}$  در حدود ۴۵۰ میکرون خردایش می‌شوند و به جداکننده‌های مغناطیسی استوانه‌ای شدت پایین خشک هدایت می‌شوند. این مرحله از جدایش از سه قسمت رافر، کلینر و رمق‌گیر تشکیل شده است که کنسانتره و مواد باطله حاصل از جداکننده مغناطیسی خشک به سیلوهای کنسانتره و باطله منتقل شده و محصول میانی، جهت رسیدن به درجه آزادی مناسب جهت خردایش مجدد به سمت سه آسیای گلوله‌ای تر هدایت می‌شود.  $d_{80}$  مواد خروجی از آسیای گلوله‌ای ۱۰۰ میکرون است که پس از رسیدن به درصد جامد وزنی ۲۵ درصد، به درون جداکننده‌های مغناطیسی استوانه‌ای تر شدت پایین منتقل می‌شود. مواد ورودی به جداکننده در سه مرحله رافر، کلینر و ریکلینر تحت عملیات پرعیار سازی قرار می‌گیرند. در مرحله رافر مواد به دو قسمت پرعیار و باطله تقسیم می‌شوند. محصول باطله به عنوان باطله نهایی، به تیکر منتقل شده و محصول پرعیار طی دو مرحله کلینر و ریکلینر تا رسیدن به کیفیت مطلوب تغلیظ می‌شود. شایان ذکر است که باطله دو مرحله کلینر و ریکلینر، جهت پرعیارسازی هرچه بیشتر جهت خردایش مجدد دوباره به درون آسیاهای گلوله‌ای و سپس به درون جداکننده منتقل می‌شود [۳]. در مدار خردایش مجدد معمولاً در هر زمان یک آسیای گلوله‌ای با تمام ظرفیت اسمی و

شکست و سپس تابع انتخاب محاسبه شد.

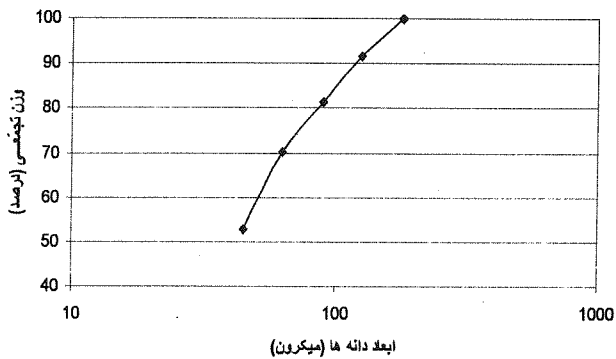
۱۲ کیلوگرم از نمونه معرف محصول میانی جداکننده‌های مغناطیسی خشک گرفته شده در مرحله قبل برای انجام آزمایشات مربوط به تعیین تابع شکست استفاده شد. عملیات خردایش در یک آسیای گلوله‌ای آزمایشگاهی با مشخصات جدول (۱)، با بار گلوله کمتر از ۱۲ درصد انجام شد، آسیا با سرعت ۶۰ دور بر دقیقه به چرخش در آمده و پس از اتمام زمان مورد نظر (۳۰ ثانیه)، آسیا بلافاصله متوقف شده و مواد و گلوله‌ها به داخل یک ظرف خالی شد و سپس مواد جدا و توسط طبقات سردی با نسبت  $\sqrt{2}$  طبقه‌بندی شد که بزرگترین دهانه ۱۶۸۰ و کوچکترین آن ۳۷ میکرون بود. لازم به ذکر است که الک‌های استفاده شده، دارای استاندارد ASTM هستند. مواد خرد شده به میزان کافی توسط دستگاه الک شدند. پس از آن مواد باقی‌مانده بر روی هر الک وزن و ثبت شدند. عملیات یاد شده شش بار برای فاصله زمانی ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ ثانیه تکرار شد. سپس تابع انتخاب و تابع شکست بر اساس روش‌های موجود محاسبه شدند. در آسیا از گلوله‌های ۳۸/۱، ۲۵/۴ و ۱۹ میلی‌متری به ترتیب به تعداد ۱۵، ۵۶ و ۵۱ عدد استفاده شد، وزن کل گلوله‌های مصرفی به ترتیب ۳۲۸۹، ۳۶۲۶ و ۱۴۰۰ گرم هستند.



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی محصول آسیای گلوله‌ای.



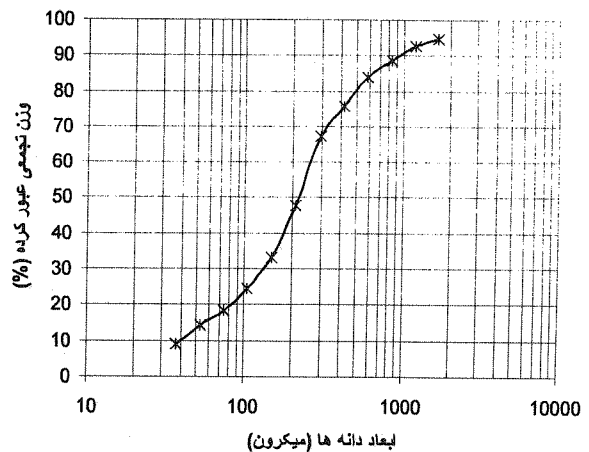
شکل ۳- منحنی دانه‌بندی باطله جداکننده مرحله کلینر.



شکل ۴- منحنی دانه‌بندی باطله جداکننده مرحله ریکلینر.

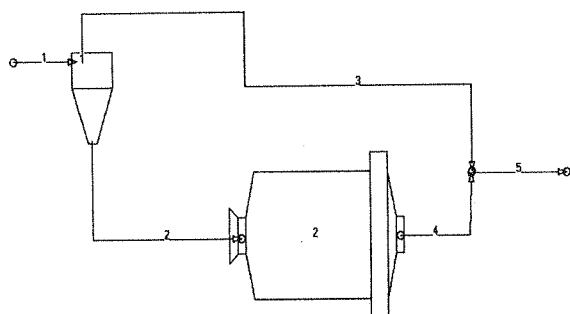
جدول ۱- مشخصات آسیای آزمایشگاهی

۳۰۴/۸	قطر آسیا (میلی‌متر)
۱۲۷	طول آسیا (میلی‌متر)
۷۶/۶	سرعت بحرانی آسیا (rpm)
۶۰	سرعت عملیاتی آسیا (rpm)
۲۴/۲۸	متوسط قطر گلوله (میلی‌متر)
۷/۶۱	وزن مخصوص گلوله (g/cm <sup>3</sup> )
۲۱/۴۵	تخلخل (U) (%)
۱۱/۵۶	حجم پرشدگی گلوله‌ها (J) (%)
۴/۵	وزن مخصوص مواد (g/cm <sup>3</sup> )



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی محصول میانی جداکننده‌های مغناطیسی خشک.

(جریان شماره ۳) و ته ریز هیدروسیکلون پس از رسیدن به درصد جامد ۷۰ وارد آسیای گلوله‌ای شود (جریان شماره ۲) که پس از خردایش به همراه سرریز هیدروسیکلون محصول نهایی مدار خردایش تر را تشکیل می‌دهد (جریان شماره ۵) و به بخش جدایش مغناطیسی تر منتقل می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این چیدمان از ورود محصول میانی جداکننده‌های مغناطیسی تر به آسیا جلوگیری به عمل آمده است.



شکل ۵- مدار پیشنهادی برای مدار خردایش آسیاهای گلوله‌ای گل‌گهر.

جهت پیش بینی محصول مدار اقدام به شبیه سازی چیدمان پیشنهادی شد. مقادیر توابع شکست با روش های بقوبه، هر بست و فورستائو و روش اصلاح شده هر بست و فورستائو توسط نرم افزار 'BFDS محاسبه شد [۵].

یک روش برای تعیین تابع انتخاب استفاده از توزیع ابعادی بار اولیه و محصول آسیای صنعتی در حال کار است. روش کار بدین صورت است که یک نمونه از بار اولیه آسیا و یک نمونه نیز از محصول آن گرفته و تجزیه سرنندی شد. سپس با استفاده از این اطلاعات و اطلاعات مربوط به تابع شکست بدست آمده از مراحل قبلی و وارد کردن آن‌ها به نرم افزار NGOTC<sup>۲</sup> تابع انتخاب آسیا بطور مستقیم محاسبه شد [۸,۷,۶]. لازم به ذکر است که واحد تابع انتخاب در جداول و شکل‌های مربوط به تابع انتخاب "بدون بعد" است. در محاسبه توابع انتخاب زمان ماند واحد در نظر گرفته شده است و در نتیجه واحد تابع انتخاب به صورت "بدون بعد" بیان می‌شود. اگر زمان ماند در محاسبات بر حسب دقیقه یا ثانیه محاسبه شود، واحد تابع انتخاب به ترتیب با  $\text{min}^{-1}$  یا  $\text{s}^{-1}$  بیان می‌شود. با توجه به این که میزان دقیق زمان ماند در این پروژه اهمیتی نداشت لذا میزان آن واحد در نظر گرفته شد. با فرض زمان ماند یک دقیقه در آسیای گلوله‌ای گل‌گهر توابع انتخاب محاسبه شده‌اند، و واحد آن در نتیجه  $\text{min}^{-1}$  تعیین شد.

با توجه به این که سه تابع شکست که به روش های بقوبه،

آنالیز ابعادی محصول خروجی از آسیا بیانگر این است که ۸۰ درصد از محصول دارای ابعادی ریزتر از ۱۰۵ میکرون هستند، و با نگاهی به توزیع ابعادی محصول میانی جداکننده‌های مغناطیسی خشک که بیش از ۹۵ درصد از بار اولیه ورودی به آسیا را تشکیل می‌دهد، مشخص می‌شود که ۲۵ درصد از بار اولیه ابعادی کوچکتر از ۱۰۵ میکرون دارند. به عبارت دیگر ۲۵ درصد از خوراک دارای ابعادی در اندازه محصول بوده و ورود این بخش از خوراک به آسیا منجر به خردایش مجدد و تولید نرمه و اشغال ظرفیت آسیا و افزایش هزینه‌های مربوطه می‌شود. مواد نرمه (مواد ریزتر از ۶۳ میکرون) در جداکننده‌های مغناطیسی تر ایجاد مشکل می‌کنند. در مطالعات قبلی مشخص گردید که بالاترین کارایی جداکننده‌های مغناطیسی تر زمانی به دست می‌آید که ۸۰ درصد بار ورودی به رافر جداکننده‌های مغناطیسی تر (محصول خروجی از آسیای گلوله‌ای) ریزتر از ۱۲۵ میکرون باشد [۴].

آنالیز ابعادی محصول میانی جداکننده‌های مغناطیسی تر که شامل باطله‌های کلینر و ریکلینر می‌شود مشخص کرد که ۸۰ درصد از باطله کلینر دارای ابعادی ریزتر از ۶۰ میکرون و ۸۰ درصد از باطله ریکلینر دارای ابعادی ریزتر از ۸۵ میکرون است. مواد در این ابعاد به درجه آزادی مطلوب رسیده‌اند و دلیلی به بازگرداندن مجدد این مواد به آسیا نیست زیرا خردایش مجدد این مواد به تولید نرمه و هزینه‌های مربوط به خردایش و اشغال ظرفیت آسیا منجر می‌شود و بهتر است که محصول میانی جداکننده‌های مغناطیسی تر به جای آسیای گلوله‌ای تر وارد مدار جدایش مغناطیسی تر شوند یعنی به بار اولیه رافر اضافه شوند.

نظر به اینکه در حدود ۲۸ درصد از بار اولیه ورودی به آسیای گلوله‌ای ابعادی کوچکتر از ۱۲۵ میکرون دارد با طبقه‌بندی بار ورودی به آسیا و خارج کردن ذرات کوچکتر از ۱۲۵ میکرون، از خردایش مجدد مواد و تولید نرمه جلوگیری می‌شود، این امر ضمن افزایش ظرفیت مدار با جلوگیری از ورود محصول میانی مدار جدایش مغناطیسی تر به آسیای گلوله‌ای ۱۵ تن بر ساعت به ظرفیت مدار خردایش اضافه می‌کند، یعنی در مجموع ۸۲/۲ تن بر ساعت که معادل ۳۳ درصد است، ظرفیت مدار آسیاهای گلوله‌ای افزوده می‌شود.

شکل ۵ ترتیب مدار پیشنهادی است که محصول میانی جداکننده‌های مغناطیسی خشک با ۵۰ درصد جامد وارد هیدروسیکلون می‌شوند (جریان شماره یک) و سرریز هیدروسیکلون به عنوان محصول مدار خردایش خارج شده

m تیزی یا همان دقت جدایش، s نسبت تقسیم جریان در ته ریز  $R_f$  بازایی آب در ته ریز سیکلون است.

#### ع- نتایج

(۱) محصول میانی جدایش مغناطیسی تر را باطله مراحل کلینر و ریکلینر تشکیل می‌دهد که  $d_{80}$  باطله کلینر ۶۰ میکرون و  $d_{80}$  باطله ریکلینر ۸۵ میکرون است و با توجه به این که در این محدوده ذرات به درجه آزادی کامل می‌رسند، برگرداندن مجدد آن به آسیای گلوله‌ای به هیچ وجه منطقی نیست. به همین دلیل بهتر است که محصول میانی جدایش مغناطیسی تر به ابتدای مدار جدایش مغناطیسی تر برگردانده شود (به بار اولیه رافر اضافه گردد).

(۲) در بررسی توزیع ابعادی محصول میانی جداکننده‌های مغناطیسی خشک که شامل باطله کلینر و کنسانتره رمق‌گیر است مشخص شد که  $d_{80}$  آن ۴۶۰ میکرون و ۲۵ درصد از بار اولیه ابعادی ریزتر از محصول که دارای  $d_{80}$  برابر با ۱۰۵ میکرون است، دارد.

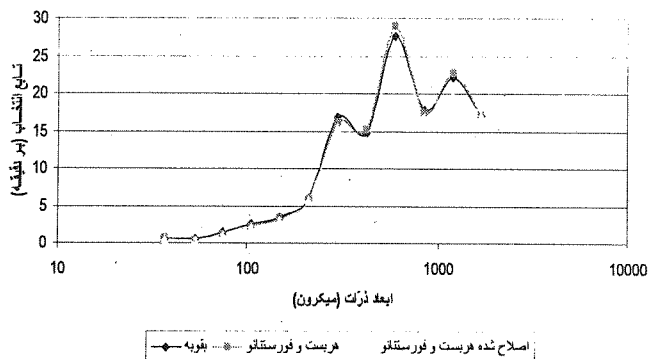
(۳) با طبقه‌بندی بار ورودی به آسیای گلوله‌ای و جلوگیری از ورود آن بخش از بار اولیه (محصول میانی جداکننده‌های خشک) که کوچکتر از ۱۲۵ میکرون هستند به آسیا، می‌توان ظرفیت تولید مدار خردایش را تا ۲۳ درصد افزایش داد که با حفظ میزان تولید کنونی تنها به کار کردن یک آسیا با حداکثر ظرفیت اسمی احتیاج است و با توجه به خارج شدن یک آسیای گلوله‌ای از مدار، مصرف انرژی تا ۳۰ درصد و مقادیر قابل توجهی از استهلاک، هزینه‌های مربوط به مصرف گلوله و روان‌کاری کاسته خواهد شد.

(۴) نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با خارج کردن مواد کوچکتر از ۱۲۵ میکرون از بار ورودی به میزان اندکی از تولید ذرات کوچکتر از ۶۳ میکرون کاسته خواهد شد (در حدود دو درصد). در کنسانتره جداکننده مغناطیسی تر، ذرات زیر ۶۳ میکرون به دلیل آگلومره شدن و به هم چسبیدگی، دارای بیشترین میزان سولفور هستند.

(۵) شکست ذرات از سینتیک مرتبه اول پیروی می‌کند. تابع شکست با تغییر اندازه ذرات تغییر می‌کند. به عبارت دیگر تابع شکست مستقل از ابعاد ذرات نیست و غیر همسان است. تابع شکست به دست آمده از تمام روش‌ها تا حد زیادی با هم مطابقت دارند و اختلاف کم آن‌ها از خطای آزمایشگاهی و روشهای محاسباتی ناشی می‌شود.

(۶) در رابطه با تابع انتخاب شکل‌ها نشان می‌دهد که با

برادبنت و کالکات و روش اصلاح شده برادبنت و کالکات در دسترس است، تابع انتخاب مربوط به هر سه تابع شکست محاسبه و مقایسه شد. نتایج توابع انتخاب محاسبه شده با نرم‌افزار در جدول ۳ ارائه شده و در شکل ۶ مورد مقایسه قرار گرفته است.



نمودار ۶- توابع انتخاب محاسبه شده با توابع شکست مختلف. پس از شبیه‌سازی با نرم‌افزار BMCS در نهایت مشخصات هیدروسیکلون مورد نیاز به شرح زیر به دست آمد [۹]:

- تعداد: یک عدد
  - قطر هیدروسیکلون: ۹۰۰ میلی‌متر
  - سطح مقطع دهانه ورودی: ۳۴۶۰۰ میلی‌متر مربع
  - قطر سرریز: ۳۴۰ میلی‌متر
  - قطر ته ریز: ۱۵۰ میلی‌متر.
- نتایج شبیه‌سازی مدار نشان داد که مدار خردایش مورد نظر قادر به تولید محصولی با مقدار  $d_{80}$  حدود ۱۰۰ میکرون است. شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با رعایت حداکثر ظرفیت آسیای گلوله‌ای (۱۳۰ تن بر ساعت) می‌توان ظرفیت مدار خردایش را تا ۱۷۳ تن بر ساعت یعنی تا ۲۳ درصد افزایش داد و تولید مواد ریزتر از ۶۴ میکرون را حدود ۲ درصد کاهش داد.

بیان کار هیدروسیکلون در جدول شماره ۲ و آنالیز ابعادی جریان‌های مدار هیدروسیکلون در نمودار شماره ۷ و آنالیز ابعادی جریان‌های مدار پیشنهادی در نمودار ۸ و جدول ۴ ارائه شده‌اند. همچنین شبیه‌سازی، پارامترهای هیدروسیکلون را به صورت زیر نشان می‌دهد:

$$d_{50c} = 108 \text{ میکرون}$$

$$P = 15/51 \text{ کیلو پاسکال}$$

$$s = 0/35$$

$$m = 3/65$$

$$R_f = 0/15$$

که  $d_{50c}$  حد جدایش اصلاح شده، p فشار ته ریز سیکلون،

کاهش ابعاد ذرات، تابع انتخاب (سینتیک خردایش) نیز کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر ذرات ریزتر سرعت خردایش کمتری دارند.

## ۵- مراجع

D.W. Fuerstenau, J.J. Lutch, A. De, *The effect of ball size on the energy efficiency of hybrid-pressure roll mill/ball mill grinding*, Powder Technol. 105 (1999) 199–204.

M. O'ner, *Ball size rationing affects clinker grinding*, World Cem. Res. (February 1999) 101–106.

مهرور اصلیل، علی؛ بهبود فرآیند تولید کارخانه فرآوری مجتمع معدنی و صنعتی سنگ آهن گل گهر براساس مطالعات کانه آرایی، پایان نامه کارشناسی ارشد استخراج رشته مهندسی استخراج.

فتحی، محمد امین؛ تعیین پارامترهای موثر بر جدایش مغناطیسی تر کارخانه فرآوری سنگ آهن گل گهر، پایان نامه کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی. (۱۳۸۵)

Yousefi, Ali asghar. *Development of a software for determination of minerals breakage functions*; Theses(MSC). Polytechnic University, Department of Mining and Metallurgical Engineering, Tehran, Iran. (2002)

Austin, L.G., Shoji, K. and Luckie, P.T. "The Effect of Ball Size on Mill Performance" Powder Technology 14 (1976): 7179.

Dierckx, P. "A Fast Algorithm for Smoothing Data on a Rectangular Grid While Using Spline Functions" SIAM J. Numer. Anal. 19 6 (1982): 1286-1304.

Morrel, S. *Effect of Ball Size on Ball Mill Breakage Rates*. rept., Queensland, Australia: Julius Kruttschnitt Mineral Research Center (JKMRC) 1990.

Farzanegan, Akbar. *Knowledge-Based Optimization of Mineral Grinding Circuits*; Theses (PH.D). Mc.Gill University, Department of Mining and Metallurgical Engineering, Montreal, Quebec, Canada.(1998)

[۱]

[۲]

[۳]

[۴]

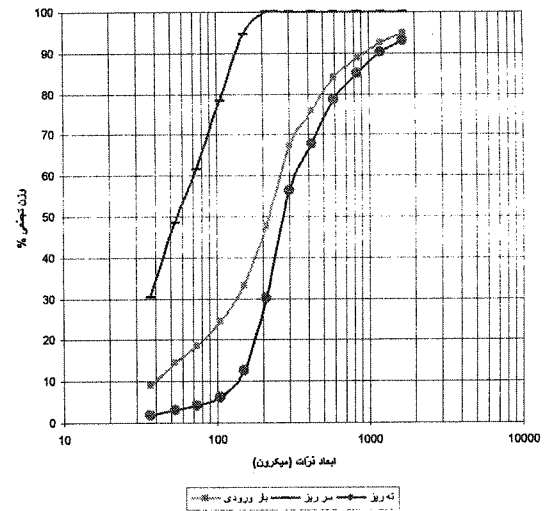
[۵]

[۶]

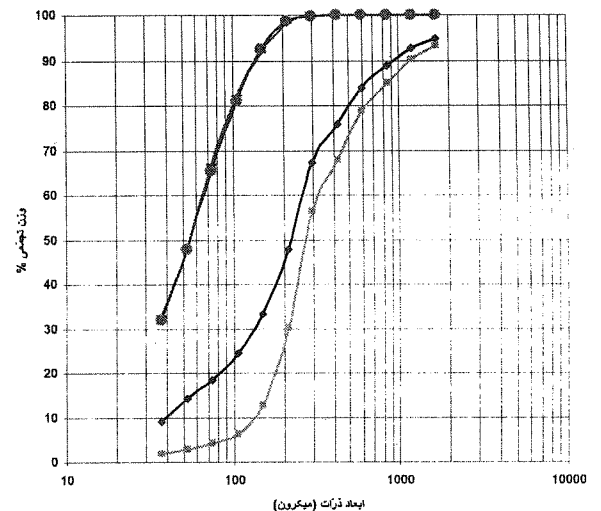
[۷]

[۸]

[۹]



شکل ۷- نتایج شبیه‌سازی هیدروسیکلون در نرم افزار «BMCS».



شکل ۸- نتایج شبیه‌سازی مدار خردایش در نرم افزار.

جدول ۲- مشخصات عملیاتی هیدروسیکلون

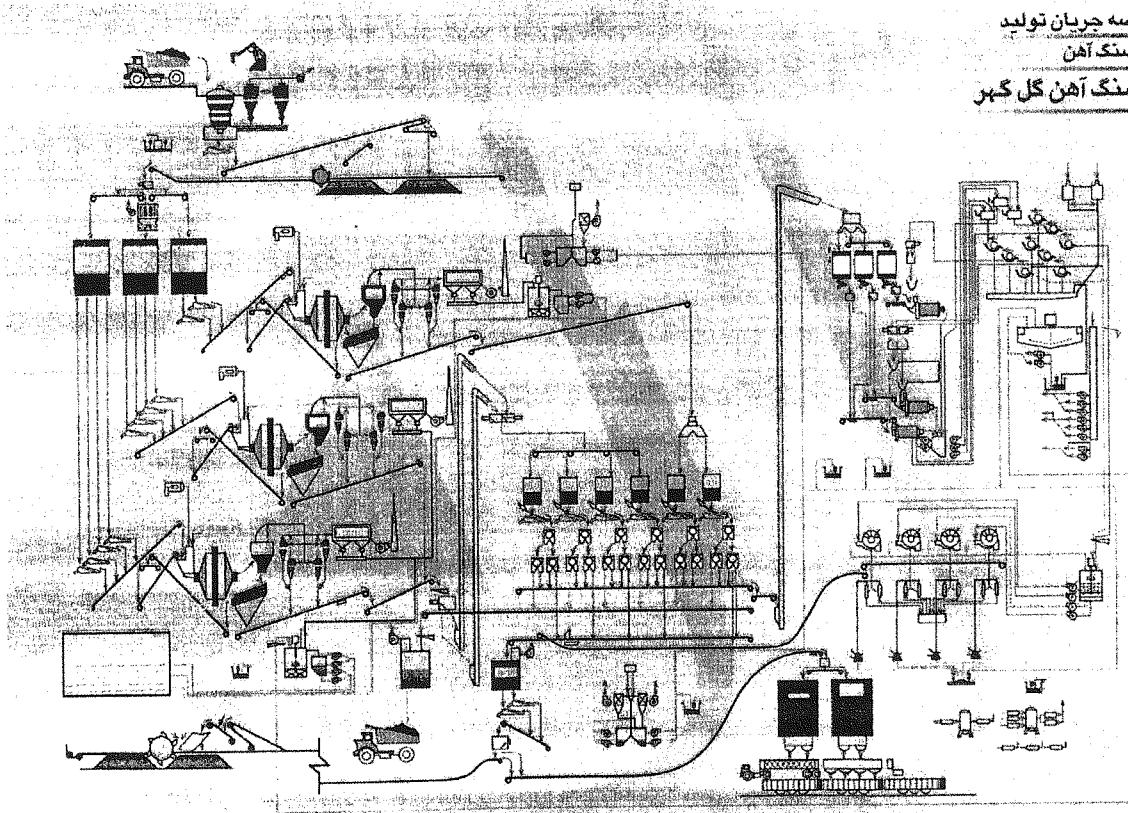
نوع جریان در هیدروسیکلون			مشخصه جریان
سر ریز	ته ریز	بارورودی	
۴۳/۴۴۷	۱۲۹/۵۵۲	۱۷۳	دبی جامد (t/h)
۱۴۷/۱	۲۵/۹	۱۷۳	دبی آب (t/h)
۱۹۰/۵۴۷	۱۵۵/۴۵۲	۲۴۶	دبی وزنی پالپ (t/h)
۱۵۶/۷۷۵	۵۴/۶۹	۲۱۱/۴۴۴	دبی حجمی پالپ (m <sup>3</sup> /h)
۲۵/۹	۸۳/۳۴	۵۰	غلظت وزنی پالپ یا جامد (%)
۶/۱۰۹	۵۲/۶۴۳	۱۸/۰۱۸۲	غلظت حجمی پالپ (%)
۱/۲۱۵	۲/۸۴۲	۱/۶۳۶	چگالی پالپ (t/m <sup>3</sup> )
۲/۲۸۶	۰/۲	۱	رقت

جدول ۳- مقایسه توابع انتخاب به دست آمده با توابع شکست مختلف

ابعاد ذرات (میکرون)	بقوبه	هر بست و فورستائو	اصلاح شده هر بست و فورستائو
۱۶۸۰	۱۷/۰۰۲	۱۷/۰۰۲	۱۷/۰۰۲
۱۱۹۰	۲۲/۲۰۹	۲۲/۷۷	۱۹/۷۸۵
۸۴۰	۱۷/۸۹۷	۱۷/۴۵۳	۱۶/۹۱۸
۵۹۰	۲۷/۵۹	۲۸/۹۲	۲۵/۱۸
۴۲۰	۱۴/۷	۱۵/۰۵۹	۱۳/۸۳۲
۲۹۷	۱۶/۸۳	۱۶/۲	۱۵/۴۴۶
۲۱۰	۵/۹۸۳	۵/۸۹۲	۵/۸۱۱
۱۴۹	۳/۴۵۳	۳/۲۳۱۵	۳/۱۵۰۸
۱۰۵	۲/۵۸۴	۲/۲۰۳	۲/۱۰۷۱
۷۴	۱/۴۲۸	۱/۱۱۱۳	۱/۰۸۹۵
۵۳	۰/۵۵۹	۰/۴۳۳۴	۰/۴۲۵۵
۳۷	۰/۶۲۱	۰/۵۲۸۹	۰/۵۲۵۱

جدول ۴- توزیع ابعادی جریان‌های مدار پیشنهادی

طبقه سردی	ابعاد (میکرون)	بار ورودی به هیدروسیکلون	سرریز هیدروسیکلون	ته ریز هیدروسیکلون	محصول خروجی از آسیا	محصول نهایی مدار خردایش
۱	۱۶۸۰	۵/۱۵	۰	۶/۸۸	۰	۰
۲	۱۱۹۰	۲/۲۲	۰	۲/۹۸	۰	۰
۳	۸۴۰	۳/۸۶	۰	۵/۱۵	۰/۰۲	۰/۰۱
۴	۵۹۰	۴/۸	۰	۶/۴۹	۰/۰۱	۰/۰۱
۵	۴۲۰	۸/۰۹	۰	۱۰/۸	۰/۰۶	۰/۰۴
۶	۲۹۷	۸/۵۳	۰	۱۱/۳۹	۰/۱۲	۰/۰۹
۷	۲۱۰	۱۹/۶۵	۰/۰۳	۲۶/۲۳	۱/۶۷	۱/۲۶
۸	۱۴۹	۱۴/۳۸	۵/۲۸	۱۷/۴۳	۶/۴	۶/۱۲
۹	۱۰۵	۸/۹۵	۱۶/۳۲	۶/۴۸	۹/۷۵	۱۱/۴
۱۰	۷۴	۵/۸۵	۱۶/۶۷	۲/۲۲	۱۵/۱۶	۱۵/۵۴
۱۱	۵۳	۴/۱	۱۳/۱۹	۱/۰۵	۱۹/۱۳	۱۷/۶۴
۱۲	۳۷	۵/۴۱	۱۸/۰۷	۱/۱۷	۱۵/۰۸	۱۵/۸۳
۱۳	۱۹	۹	۳۰/۴۴	۱/۸۱	۳۲/۵۹	۳۲/۰۵



شکل ۹- فلوشیت کارخانه فرآوری گل گهر

#### ۶- زیر نویس ها

- <sup>1</sup> Breakage Function Determination Software
- <sup>2</sup> Numerical Grinding Optimization Tools in C