بهینه‌سازی تک‌هدفه مدار آسیای گلوله‌ای مجتمع فسفات اسفوردی بر پایه الگوریتم ژنتیک

زینب سادات میرزایی[۱] و اکبر فرزانگان[۲*]

اطلاعات مقاله

واژگان کلیدی:
بهینه‌سازی تک‌هدفه،
الگوریتم ژنتیک،
آسیای گلوله‌ای،
نرم‌افزار BMCS،
کارخانه فسفات اسفوردی.

چکیده

هدف پژوهش حاضر بهینه‌سازی مدار آسیای گلوله‌ای کارخانه فسفات اسفوردی با استفاده از تلفیق الگوریتم‌های شبیه‌سازی فرآیند آسیاکنی و جستجوی ژنتیک است. پس از بررسی کارخانه فرآوری فسفات اسفوردی، مشخص شد که مشکل عمده موجود در مدار، ذرات نرمه با عیار بالای آهن در ته‌ریز هیدروسیکلون در مدار خردایش است که در اثر بیش‌آسیاکنی این ذرات، در مدار فلوتاسیون که پس از مدار خردایش قرار دارد، مشکلات اساسی ایجاد می‌شود. بنابراین، هدف از بهینه‌سازی مدار خردایش، بهبود خردایش در آسیای گلوله‌ای و نیز افزایش بازدهی جدایش در هیدروسیکلون قرار گرفت. بهینه‌سازی به‌صورت تک‌هدفه انجام شد. با بهینه‌سازی مدار، نتایجی در حالات مختلف حاصل شد که انتخاب هر یک از این نتایج به اثر اقتصادی آن، تغییر بر مدار و همچنین عملکرد کارخانه بستگی دارد.

۱- مقدمه

هدف تمامی شیوه‌های بهینه‌سازی، بهبود عملکرد کارخانه و استفاده بهتر از انرژی و تجهیزات است. در کارخانه فرآوری، بهینه‌سازی منجر به تولید بهتر محصولات با ارزش (یا کاهش تولید آلاینده‌ها)، کاهش مصرف انرژی و مواد شیمیایی، نرخ تولید بالاتر و کاهش توقف‌های کارخانه می‌گردد. بهینه‌سازی ممکن است به‌صورت خارج از خط (بررسی مدار و شبیه‌سازی) یا به‌صورت در خط (روش‌های کنترل دستی و اتوماتیک) انجام شود. همچنین می‌توان بهینه‌سازی را محدود به بخش خاصی از کارخانه نمود و یا آن‌را برای کل کارخانه اجرا نمود [۱].

در مهندسی فرآوری مواد معدنی نیز بهینه‌سازی امری بسیار مهم می‌باشد. در مدارهای خردایش که معمولاً مهم‌ترین بخش را در کارخانه‌های کانه‌آرایی تشکیل می‌دهند، میزان مصرف انرژی و هزینه ناشی از آن بسیار بالاست. درصورتی‌که این مدارها عملکرد مناسبی نداشته باشند، عملیات پایین دستی که در ادامه عملیات خردایش قرار دارند، با اشکال مواجه می‌شوند. بهینه‌سازی در این مدارها علاوه بر افزایش کیفیت محصول، می‌تواند منجر به مصرف بهینه انرژی نیز گردد.

از آنجا که در بسیاری از صنایع در کشور از جمله صنایع معدنی، سیمان، داروسازی، رنگ‌سازی، سرامیک از فرآیند خردایش استفاده می‌شود، کاهش مصرف انرژی در این

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: farzanegan@ut.ac.ir
۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان
۲. دانشیار، دانشکده معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ص. پ. ۴۵۶۳ - ۱۱۱۵۵

صنایع در کاهش هزینه‌های تولید بسیار مؤثر خواهد بود که این کار تنها با انجام بهینه‌سازی میسر می‌شود.

ترکیب الگوریتم‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی ابزاری بسیار قدرتمند برای مهندسین فرآوری ایجاد می‌کند تا بتوانند بهترین مقادیر پارامترهای طراحی و عملکرد مدار را تعیین کنند [۲].

الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های جستجوی فرا-ابتکاری می‌باشد که کاربرد آن در بهینه‌سازی مدارهای خردایش در مقالات متعدد توسط محققان فرآوری بررسی شده است. در همه این موارد قدرت جستجوی این الگوریتم برای بهینه‌سازی تابع هدف موفق بوده است. این روش برخلاف روش‌های جستجوی متداول می‌تواند خیلی سریع چندین مجموعه جواب را بررسی کند و همچنین به حدس اولیه یا هر مجموعه جواب مساله حساس نبوده و جستجو را تا رسیدن به جواب بهینه ادامه می‌دهد. باوجود این، روش الگوریتم ژنتیک در مقایسه با روش‌های متداول نیازمند منابع محاسباتی قدرتمند می‌باشد که با پیشرفت‌های پدید آمده در زمینه سخت‌افزار ماشین‌های محاسباتی امروزی این محدودیت کمتر شده است.

در مهندسی فرآوری به‌منظور بهینه‌سازی عملیات آسیاکنی صنعتی در یک کارخانه تولید محصول پرعیار سرب و روی، از روش الگوریتم ژنتیک نخبه‌گرا استفاده شد [۳]. دو تابع هدف در این بررسی تعریف شد که عبارت بود از بیشینه کردن میزان تولید و بیشینه کردن درصد عبور کرده از اندازه‌ای خاص به‌منظور بهبود عملیات فلوتاسیون که پس از مدار خردایش قرار داشت. هنگامی‌که نتایج حاصل از بهینه‌سازی در شرایط موجود در کارخانه به‌کار گرفته شد، بدون آن‌که تغییرات زیادی در کیفیت محصول ایجاد شود، مزایای مشخصی که بیشتر براساس اصلاحات مهمی در میزان تولید (افزایشی در حدود ۲۵ درصد) بود، به‌دست آمد. بهبود قابل‌توجهی در بازیابی روی (افزایش نزدیک ۳ درصد در برابر مقدار اولیه ۱ درصد) پس از انجام بهینه‌سازی نسبت به قبل از آن ایجاد گردید. توجه به این نکته مهم ضروریست که این افزایش در مقدار بازدهی بدون آن‌که تأثیری در عیار ایجاد شود، به‌دست آمده است. این افزایش در بازیابی دوره بازگشت سرمایه را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد و آن‌را از ۱/۵ سال به کمتر از ۶ ماه تبدیل می‌کند. همچنین مزایای غیرمستقیم دیگری نیز از این بهینه‌سازی به‌دست آمد که می‌توان به کاهش مصرف انرژی در مدار خردایش اشاره کرد [۴].

پژوهش حاضر با هدف بهینه‌سازی مدار خردایش آسیای گلوله‌ای مجتمع فسفات اسفوردی انجام شده است. مجتمع معدنی فسفات اسفوردی واقع در ۳۵ کیلومتری شمال شرقی شهرستان بافق، در استان یزد می‌باشد و دارای مختصات جغرافیایی طول ۵۵ درجه و ۳۳ دقیقه شرقی و عرض ۳۱ درجه و ۴۷ دقیقه شمالی است.

۲- نرم‌افزار BMCS تحت MATLAB

BMCS حروف اختصاری عبارت BMCS-Based Modular Comminution Simulator است که BMCS در این عبارت از Ball Milling Circuits Simulator به معنای «شبیه‌ساز مدارهای آسیای گلوله‌ای» دریافت شده است. جدیدترین نسخه این نرم‌افزار علاوه‌بر قابلیت شبیه‌سازی آسیای گلوله‌ای و هیدروسیکلون، قادر به شبیه‌سازی جداکننده‌های هوایی، غلتک‌های آسیاکنی فشار بالا، آسیای میله‌ای و سرند نیز می‌باشد [۵].

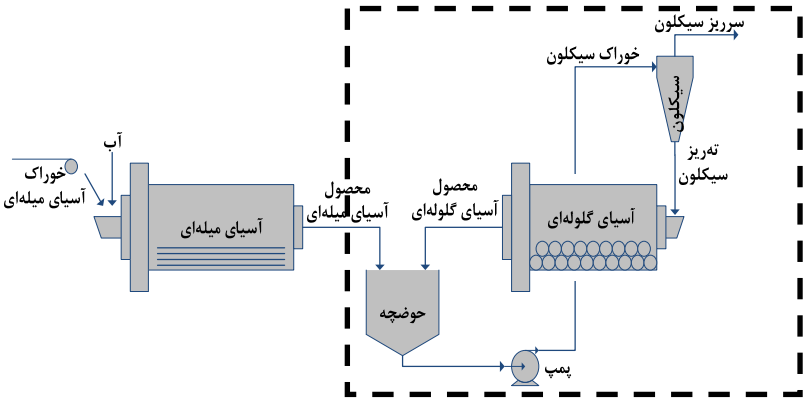
در سال ۲۰۰۸ مدل جدیدی از برنامه BMCS تحت MATLAB توسط فرزانگان و وحیدی‌پور توسعه داده شد که در آن با تلفیق الگوریتم شبیه‌ساز و الگوریتم قدرتمند جستجوگر ژنتیک، می‌توان به بهینه‌سازی مدارهای خردایش پرداخت.

۳- مدار خردایش کارخانه فسفات اسفوردی

مدار خردایش موجود در کارخانه فسفات اسفوردی شامل یک آسیای میله‌ای در مدار باز و یک آسیای گلوله‌ای در مدار بسته با یک هیدروسیکلون است. محصول آسیای میله‌ای و آسیای گلوله‌ای در یک حوضچه با یکدیگر مخلوط می‌شوند و خوراک هیدروسیکلون را تشکیل می‌دهند. سپس، ته‌ریز هیدروسیکلون به‌عنوان خوراک به آسیای گلوله‌ای وارد می‌شود. سرریز هیدروسیکلون برای انجام مراحل بعدی فرآوری، به هیدروسیکلون‌های نرمه‌گیر وارد می‌شود. در شکل ۱ این مدار نشان داده شده است.

۴- بیان مسأله و هدف بهینه‌سازی

براساس مطالعات و بررسی‌های گذشته توسط مهندسان کارخانه فسفات اسفوردی، وجود بیش از حد نرمه با عیار بالای آهن در ته‌ریز هیدروسیکلون یکی از مشکلات اصلی در فرآوری کانسنگ ورودی به کارخانه است. این ذرات از راه ته‌ریز مجدداً وارد آسیای گلوله‌ای می‌شوند و دچار بیش‌آسیاکنی می‌گردند و پس از رسیدن به ابعاد بسیار ریز از سرریز خارج و به مدار فلوتاسیون وارد می شوند. بیش‌آسیاکنی ذرات نرمه سبب اتلاف انرژی الکتریکی از یک سو و کاهش کارآیی فرآیند فلوتاسیون به‌دلیل وجود ذرات نرمه با عیار بالای آهن در خوراک خواهد شد. از آنجا که جریان سرریز محصول نهایی مدار خردایش است، هدف بهینه‌سازی دستیابی به d_{80} برابر ۱۰۰ میکرون در سرریز قرار داده شد.



شکل ۱- مدار خردایش کارخانه فسفات اسفوردی

۵- جمع‌آوری داده‌ها

باتوجه به مدار تشریح شده در بخش پیش و بررسی مدار برای تعیین نقاط قابل دسترس در نمونه‌برداری، ۵ نقطه از کل مدار خردایش برای انجام عملیات نمونه‌برداری انتخاب گردید. این ۵ نقطه و عبارات مختصری که برای آن‌ها درنظر گرفته شده است، در جدول ۱ بیان شده‌اند. در ادامه از این عبارات مختصر استفاده خواهد شد. از آنجا که محصول آسیای میله ای خوراک مدار آسیای گلوله ای را تشکیل می دهد، از این جریان نیز نمونه برداری انجام شد.

جدول ۱- نقاط نمونه‌برداری از جریان‌های مختلف در مدار خردایش و نام مختصر آن‌ها

نام جریان	نام مختصر
خروجی آسیای میله‌ای	RMD
خروجی آسیای گلوله‌ای	BMD
ته ریز هیدروسیکلون	CUF
خوراک هیدروسیکلون	CYCF
سرریز هیدروسیکلون	COF

هنگامی‌که مدار در حالت یکنواخت قرار داشت، نمونه‌برداری به مدت ۲ ساعت و ۳۰ دقیقه با فواصل ۱۰ دقیقه از جریان‌های گفته شده به‌طور همزمان با استفاده از ظرف های مشخصی برای هر جریان با حجم تقریبی ۳۰۰ تا ۵۰۰ میلی لیتر انجام گرفت. بنابراین در پایان عملیات نمونه‌برداری از هر جریان تعداد ۱۵ نمونک جمع‌آوری شد که مجموع آن‌ها نمونه اصلی حاصل از هر جریان را تشکیل می‌داد.

به‌علاوه، همزمان با انجام نمونه‌برداری از جریان‌های مختلف، شدت جریان آب اضافه شونده به تهریز هیدروسیکلون و محصول آسیای گلوله‌ای نیز اندازه‌گیری شد.

۵-۱- انجام آزمایش‌های تعیین دانه‌بندی

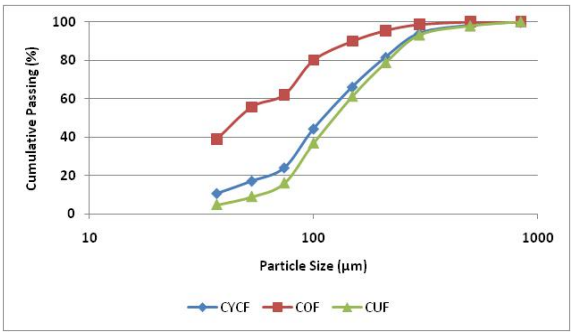
تمامی نمونه‌های به‌دست آمده به‌صورت پالپ بودند. بنابراین در آزمایشگاه کارخانه فسفات اسفوردی، علاوه‌بر دانه‌بندی جریان‌ها، مقدار جامد و آب هر یک از نمونه‌ها نیز تعیین گردید.

در مرحله بعد، موازنه جرم مدار با استفاده از نرم‌افزار NorBal [۶] انجام شد. این نرم‌افزار تلفیق داده‌های خام حاصل از اندازه‌گیری‌ها در هنگام نمونه‌برداری و همچنین داده‌های حاصل از آزمایش‌های دانه‌بندی نمونه‌ها را با روشی ترکیبی برمبنای رگرسیون خطی و غیرخطی کمینه کردن مربعات انجام می‌دهد. نرم‌افزار NorBal ابتدا مساله موازنه جرم را به قسمت‌های خطی و قسمت‌های غیرخطی تقسیم می‌کند. سپس، قسمت‌های خطی با استفاده از رگرسیون خطی معمولی و با استفاده از محاسبات ماتریسی و قسمت‌های غیرخطی با استفاده از روش‌های جستجو حل می‌شوند. با این روش، از تعداد متغیرهای جستجو کاسته شده و روش جستجو با اختصاص کمتر حافظه کامپیوتر و صرف زمان کمتر مساله موازنه جرم را حل می‌کند. در جدول ۲ مقدار d_{80} مربوط به هر جریان نشان داده شده است. در حالت مانا، مقدار بار در گردش در مدار خردایش آسیای گلوله‌ای برابر ۴۷۱/۷۵ درصد محاسبه شد که با مقدار درنظر گرفته شده در زمان طراحی کارخانه (۱۵۰ درصد) فاصله زیادی دارد. در پژوهشی که توسط دهقانی احمدآبادی و همکاران [۷] در مجتمع فسفات اسفوردی انجام شده است، برخی از پارامترهای به‌دست آمده برای دریافت دید کلی از مدار با داده های حاضر مقایسه گردید. در جدول ۳ نسبت خردایش هر دو آسیا نشان داده شده است.

جدول ۲- اندازه d_{80} مربوط به هر جریان

جریان	d_{80} (میکرون)
RMF	۹۸۳۵/۰۴
RMD	۲۰۹/۵۲
BMF	۲۰۵/۸۹
BMD	۱۸۹/۴۰
CYCF	۱۹۵/۱۰
COF	۹۸/۱۵
CUF	۲۰۵/۸۹

دانه‌بندی جریان‌های اطراف هیدروسیکلون در شکل ۲ نشان داده شده است و همان‌طور که مشاهده می‌شود عملیات جدایش در این هیدروسیکلون به‌خوبی انجام نمی‌شود. زیرا نمودار دانه‌بندی تهریز هیدروسیکلون تقریباً منطبق بر نمودار دانه‌بندی خوراک ورودی به هیدروسیکلون می‌باشد.



شکل ۲- دانه‌بندی جریان‌های اطراف هیدروسیکلون

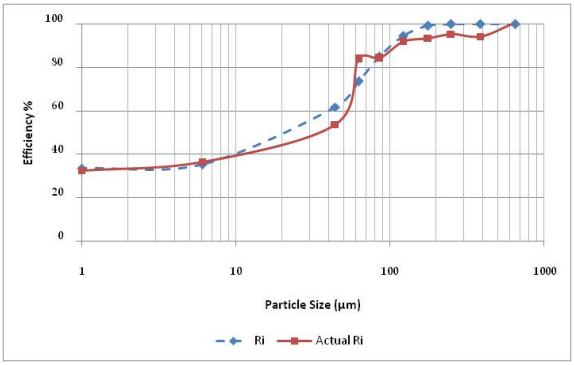
در نمودار بازیابی جامد به تهریز نشان داده شده در شکل ۳ مشاهده می‌شود که در اندازه ۶۰ میکرون منحنی دارای شیب تندی می‌باشد. به‌علاوه در ابعاد بزرگ‌تر از ۶۰

میکرون (۶۰ تا ۹۰ میکرون) نمودار از شکل استاندارد خود خارج شده است. براساس مطالعات کانی‌شناسی، این کانسنگ از دو جزء سبک (فلوئورآپاتیت) و سنگین (هماتیت) تشکیل شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که شکل خاص نمودار بازیابی هیدروسیکلون به‌دلیل وجود دو جزء سبک و سنگین در خوراک هیدروسیکلون می‌باشد. به‌همین دلیل نمی‌توان مقدار دقیق حد جدیش تصحیح شده d_{50c} و تیزی جدایش m را محاسبه نمود [۸]. مقادیر تقریبی این شاخص‌ها که حاصل برازش مدل بازیابی به منحنی بازدهی واقعی هیدروسیکلون می‌باشند در جدول ۴ دیده می‌شوند.

منحنی‌های دانه‌بندی خوراک و محصول آسیای گلوله ای در شکل ۴ نشان می‌دهند که عملیات خردایش قابل توجهی درون آسیای گلوله‌ای انجام نمی‌شود و نسبت خردایش بسیار پایین است.

جدول ۳- نسبت خردایش آسیاهای گلوله‌ای و میله‌ای و مقایسه آن‌ها با مقادیر پیشین

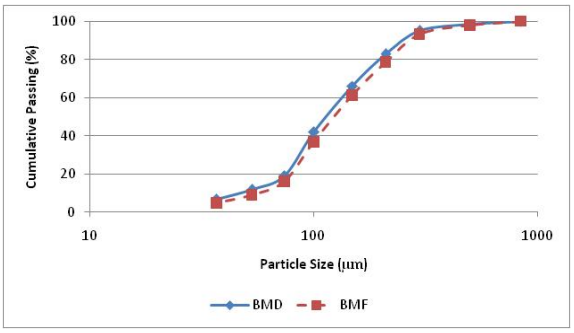
آسیا	نسبت خردایش در حال حاضر	نسبت خردایش در پژوهش پیشین	وضعیت نسبی
میله‌ای	۴۶/۹۸۱	۶۴/۶۵	کاهش
گلوله‌ای	۱/۰۸۷	۱/۱۵	کاهش



شکل ۳- بازیابی جامد به تەریز هیدروسیکلون

جدول ۴- مقادیر بازیابی آب، حد جدایش تصحیح شده و تیزی جدایش حاصل از برازش مدل بازیابی

پارامتر	مقدار
بازیابی آب به تەریز (R_f)	۰/۳۴
حد جدایش تصحیح شده (d_{50c})	۵۱/۴۷
تیزی جدایش (m)	۱/۵۰



شکل ۴- دانه‌بندی خوراک و محصول آسیای گلوله‌ای

۶- مقایسه عملکرد کنونی مدار با عملکرد پیش‌بینی شده در زمان طراحی

هدف از این مقایسه به‌دست آوردن معیارهای مناسب برای انجام بهینه‌سازی مدار می‌باشد. با آن‌که در این پژوهش هدف بهینه‌سازی آسیای میله‌ای نیست، برای دستیابی به دید کلی در مورد عملکرد متفاوت کنونی مدار خردایش نسبت به عملکرد پیش‌بینی شده در طراحی اولیه کارخانه، وضعیت کنونی و پیشین آسیای میله‌ای نیز درنظر گرفته شد. جداول ۵ تا ۸ مقایسه وضعیت کنونی با وضعیت پیش‌بینی شده طراحی را نشان می‌دهند.

جدول ۵- مقایسه میان دو وضعیت آسیای میله‌ای

پارامتر	مقدار در زمان طراحی	مقدار کنونی	اختلاف (درصد)
نرخ جامد خوراک ورودی (t/h)	۵۷/۵۰	۴۷/۱۰	۱۸ کاهش
d_{80} خوراک (mm)	۱۴/۰۰	۹/۸۴	۲۹ کاهش
d_{80} محصول (mm)	۰/۶۰	۰/۲۰	۶۶ کاهش
جامد محصول (%)	۳۰	۶۶/۵۰	۱۲۱ افزایش
نسبت خردایش	۲۳/۳۳	۴۶/۹۸	۱۰۱ افزایش

جدول ۶- مقایسه میان دو وضعیت آسیای گلوله‌ای

پارامتر	مقدار در زمان طراحی	مقدار کنونی	اختلاف (درصد)
پالپ ورودی به مدار بسته (t/h)	۴۶	۶۱/۵۰	۳۳ افزایش
d_{80} خوراک (µm)	۷۵	۲۰۶	۱۷۴ افزایش
d_{80} محصول (µm)	۱۰۰	۱۸۹	۸۹ افزایش
نسبت خردایش	۵/۷	۱/۰۸	۸۵ کاهش
بار در گردش (%)	۱۵۰	۴۷۱	۲۱۴ افزایش

جدول ۷- مقایسه میان مقادیر دو وضعیت هیدروسیکلون

پارامتر	در زمان طراحی	کنونی	اختلاف (درصد)
دبی جامد خوراک (t/h)	۱۷۲/۵۰	۲۳۲/۲۸	۳۴ افزایش
دبی پالپ خوراک (m^3/h)	۲۶۰/۱۰	۲۰۲/۷۸	۲۲ کاهش
حد جدایش هیدروسیکلون (µm)	۱۰۰/۰۰	۵۱/۴۷	۴۸ کاهش
d_{98} سرریز هیدروسیکلون (µm)	۱۵۰/۰۰	۱۷۵/۷۲	۱۷ افزایش
جامد خوراک هیدروسیکلون (درصد)	۴۵/۰۰	۶۳/۰۰	۴۰ افزایش
جامد سرریز هیدروسیکلون (درصد)	۲۵/۰۰	۳۰/۷۰	۲۲ افزایش
جامد تهریز هیدروسیکلون (درصد)	۷۵/۰۰	۸۱/۱۰	۸ افزایش

جدول ۸- مقایسه میان مقدار شاخص کار باند کانسنگ در زمان طراحی و هم‌اکنون

پارامتر	اولیه	کنونی	اختلاف (درصد)
شاخص کار باند آسیای میله‌ای و گلوله‌ای (kWh/t)	۷/۵۰	۹/۴۷	۲۶ افزایش

۷- بررسی مشکلات موجود در مدار خردایش

در مدار بسته آسیای گلوله‌ای، از شرایط و بررسی‌های موجود مشاهده می‌شود که مشکلاتی وجود دارد. این مشکلات را می‌توان به‌صورت زیر دسته‌بندی کرد:

- عدم کارایی خردایش در آسیای گلوله‌ای
- عدم کارایی جدایش در هیدروسیکلون
- درصد جامد بالا در خوراک هیدروسیکلون
- وجود نرمه زیاد در تهریز هیدروسیکلون
- افزایش ذرات ریز آهن‌دار در سرریز هیدروسیکلون که منجر به کاهش کیفیت محصول مرحله فلوتاسیون می‌شود.

علت این مشکلات را می‌توان در وجود دو جزء تشکیل دهنده در خوراک کارخانه جستجو کرد. به‌دلیل آن‌که خوراک از دو جزء آهن (سنگین) و آپاتیت (سبک) تشکیل شده است، هنگام جدایش این ذرات در هیدروسیکلون، ذرات آهن که سنگین هستند، با آن‌که دارای ابعاد ریزی هستند و باید از سرریز خارج شوند، از تهریز خارج می‌گردند و موجب افزایش بار در گردش و درصد جامد ورودی به آسیای گلوله‌ای می‌شوند. ذرات آهن‌دار به‌دلیل این‌که سنگین هستند برای خروج از مسیر سرریز می‌باید به‌حدی ریز شوند تا جرمشان به اندازه‌ای کم شود که بتوانند از سرریز خارج شوند و به‌همین دلیل در آسیای گلوله‌ای دچار بیش‌آسیاکنی می‌گردند و در نتیجه نرمه‌ای تولید می‌شود که عیار آهن در آن‌ها بالاست. به‌علاوه افزایش درصد جامد خوراک همزمان با افزایش دبی خوراک نیز در آسیا موجب کاهش خردایش ذرات دانه‌درشت در آسیا می‌شود. به این ترتیب ورود جریان محصول آسیا با درصد جامد بالا به هیدروسیکلون همراه با دو جزئی بودن خوراک، موجب کارایی نامناسب هیدروسیکلون می‌شود. همچنین به‌دلیل محدود بودن ظرفیت حوضچه خوراک هیدروسیکلون، نمی‌توان در این حوضچه مقدار آب اضافه شونده را از آنچه که هست بیشتر نمود تا درصد جامد خوراک هیدروسیکلون کاهش یابد.

از بررسی‌های انجام شده و صحبت‌هایی که با کارکنان کارخانه انجام شد، می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات نوع خوراک ورودی به کارخانه بسیار زیاد است. بنابراین نمی‌توان حالتی پایدار برای خوراک درنظر گرفت تا براساس آن شرایط مختلف عملیاتی را در مقادیر ثابت تنظیم نمود.

۸- بهینه‌سازی مدار آسیای گلوله‌ای

۸-۱- اهداف بهینه‌سازی

با درنظر گرفتن جریان‌های مختلف و توجه به وضعیت عملیاتی کارخانه و براساس تجربیات کارکنان کارخانه، هدف بهینه‌سازی، تنظیم مقدار d_{80} سرریز هیدروسیکلون برابر ۱۰۰ میکرون تعریف گردید. در حال حاضر مقدار این پارامتر برای سرریز هیدروسیکلون برابر ۹۴/۲ میکرون است. همزمان با تنظیم مقدار d_{80} سرریز در محدوده مورد

نظر، دستیابی به بیشترین تولید نیز جزء اهداف بهینه‌سازی مدار خردایش به‌شمار می‌رود.

۸-۲- پارامترهای قابل تغییر در بهینه‌سازی

باتوجه به فلوشیت مدار خردایش پارامترهای قابل تغییر در مدار عبارت از جامد ورودی به مدار آسیای گلوله‌ای، درصد جامد جریان ورودی به مدار آسیای گلوله‌ای، آب اضافه شونده به حوضچه خوراک هیدروسیکلون، آب اضافه شونده به خوراک آسیای گلوله‌ای می‌باشند.

۸-۳- حدود پارامترهای قابل تغییر

حدود پارامترهای قابل تغییر در جدول ۹ نشان داده شده است. x_1 مقدار جامد ورودی به مدار خردایش آسیای گلوله‌ای است. مقدار این پارامتر هم اکنون ۴۵ تن در ساعت است. چون یکی از اهداف بهینه‌سازی افزایش میزان تولید است، حد بالایی برای این پارامتر اختصاص داده نشد.

پارامتر x_2 درصد جامد جریان تازه ورودی به مدار آسیای گلوله‌ای است. این مقدار به‌طور حدودی برابر ۴۵ تا ۶۵ درصد درنظر گرفته شد. از آنجا که در بهینه‌سازی‌ها مشاهده شد که این پارامتر همواره در کمترین مقدار تنظیم می‌شود، برای حصول اطمینان از عملکرد مناسب آسیای میله‌ای، یک مرحله بهینه‌سازی نیز با کمترین مقدار ۵۰ درصد انجام گردید.

پارامتر x_3 آب اضافه شونده به حوضچه اختلاط محصول دو آسیا (خوراک هیدروسیکلون) است. به‌دلیل آن‌که از نظر ظرفیت حوضچه این جریان نقشی بحرانی دارد، مقدار بیشینه آن برابر مقدار کنونی درنظر گرفته می‌شود تا از عدم سرریز کردن حوضچه اطمینان حاصل شود. x_4 نیز دبی آب اضافه شونده به ته‌ریز هیدروسیکلون یا خوراک آسیای گلوله‌ای است.

۸-۴- حالات مختلف بهینه‌سازی

براساس مشخصات فیزیکی هیدروسیکلون، سرریز و ته‌ریز آن هرکدام در دو اندازه مختلف (سرریز برابر ۸ و ۹ و ته‌ریز برابر ۳ و ۴ اینچ) قابل تنظیم هستند. بنابراین از ترکیب اندازه قطرهای سرریز و ته‌ریز، ۴ حالت مختلف برای هر بهینه‌سازی درنظر گرفته و باتوجه به سه محدوده اولیه، ۱۲ بهینه‌سازی انجام شد.

جدول ۹- مقادیر اولیه و نهایی هر یک از متغیرهای بهینه‌سازی

حدود پایینی				حدود بالایی			
مرحله	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1	x_2	x_3	x_4
۱	۴۵	۴۵	۴۰	۲۵	Inf	۶۵	۶۹	۴۵
۲	۴۵	۴۵	۴۰	۲۵	Inf	۶۵	۵۰	۴۵
۳	۴۵	۵۰	۴۰	۲۵	Inf	۶۵	۵۰	۴۵

۸-۵- بهینه‌سازی مدار با استفاده از برنامه BMCS تحت MATLAB

برای انجام بهینه‌سازی با استفاده از برنامه BMCS تحت MATLAB، پرونده input.df و پرونده تابع هدف با پسوند m. لازم است تهیه شود. اولین پرونده در واقع همان پرونده ورودی به نرم‌افزار BMCS شبیه‌ساز است که مطابق با حالات مختلف درنظر گرفته شده تنظیم گردید.

پرونده تابع هدف نیز با توجه به هدف تهیه شد. الگوریتم ژنتیک با استفاده از این پرونده می‌تواند به جستجوی مقادیر مناسب برای پارامترهای مورد نظر بپردازد. نتیجه حاصل از نرم‌افزار در پرونده bmcs.out ذخیره می‌شود.

۹- نتایج بهینه‌سازی

الگوریتم ژنتیک با تغییر مقادیر متغیرهای تعریف شده سعی در کم کردن مقدار تابع هدف دارد. هر مجموعه متغیر که مقدار تابع هدف متناظر با آن کمترین مقدار باشد، مناسب‌تر است.

هر ۱۲ عملیات بهینه‌سازی در این شرایط با تنظیمات پیش‌فرض الگوریتم ژنتیک در محیط MATLAB انجام شد. معیار توقف الگوریتم دستیابی به تلرانس ۰/۰۰۱ بین هر بار اندازه‌گیری تنظیم گردید.

در ارزیابی نتایج به‌دست آمده علاوه‌بر مقدار تابع هدف، درصد تجمعی عبور کرده از اندازه ۱۰۰ میکرون در سرریز، درصد جامد خوراک آسیای گلوله‌ای، درصد تجمعی عبور کرده از اندازه ۷۴ میکرون در جریان ته‌ریز و دبی حجمی خوراک ورودی به هیدروسیکلون نیز درنظر گرفته می‌شوند.

اولین معیار همان هدف بهینه‌سازی است و با بررسی این معیار می‌توان دریافت که تا چه اندازه الگوریتم در تعیین مقادیر پارامترها دقیق بوده است. دومین معیار که درصد جامد آسیای گلوله‌ای است، به‌دلیل حصول اطمینان از عدم بیش‌آسیاکنی در آسیای گلوله‌ای درنظر گرفته شده است. به‌دلیل وجود نرمه زیاد در ته‌ریز هیدروسیکلون که به‌علت دو جزئی بودن خوراک اتفاق می‌افتد، با بررسی معیار سوم می‌توان راه‌حلی را انتخاب نمود که میزان نرمه موجود در ته‌ریز آن کمترین باشد. معیار چهارم نیز به‌منظور بررسی توانایی پمپ موجود در حوضچه خوراک هیدروسیکلون (حداکثر تا ۲۶۰ متر مکعب بر ساعت) انتخاب شد.

با توجه به مقادیر تابع هدف جدول ۱۱، مشاهده می‌شود که به‌طور کلی ترکیب قطر سرریز ۲۰/۳۲ سانتی‌متر (۸ اینچ) و قطر ته‌ریز ۱۰/۱۶ سانتی‌متر (۴ اینچ)، اصلاً برای عملکرد کارخانه مناسب نمی‌باشد. زیرا علاوه‌بر مقدار زیاد تابع هدف، هم درصد مواد زیر ۷۴ میکرون در ته‌ریز و هم دبی حجمی ورودی به پمپ خوراک هیدروسیکلون بسیار زیاد است.

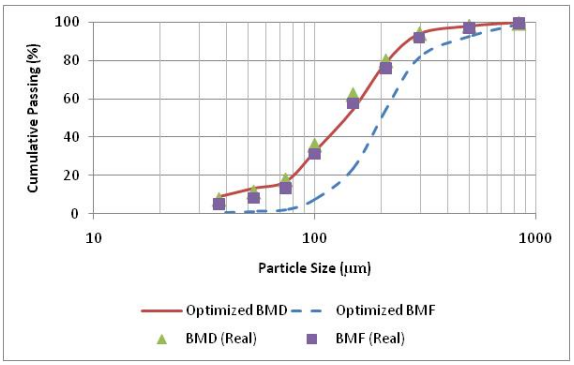
اما مشاهده می‌شود در بهینه‌سازی شماره ۱ و شماره ۱۰، مقدار تابع هدف دقیقاً برابر صفر شده است که به معنی دستیابی ۱۰۰ درصد به هدف تعیین شده می‌باشد.

در جدول ۱۲ مشخصات تمامی جریان‌ها برای بهینه‌سازی شماره ۱ و ۱۰ نشان داده شده است. در شکل ۵ تا نمودار شکل ۸ دانه‌بندی خوراک و محصول آسیای گلوله‌ای و جریان‌های اطراف هیدروسیکلون برای بهینه‌سازی شماره ۱ و ۱۰ مشاهده می‌شود.

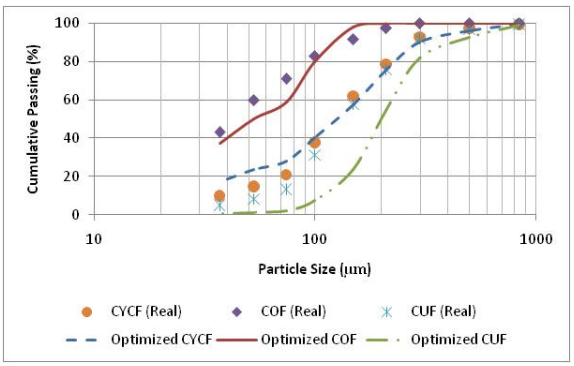
۱۰- بیان نتایج

در انجام این پژوهش از ترکیب الگوریتم ژنتیک با شبیه‌ساز مدار خردایش استفاده شد تا بتوان با درنظرگرفتن قیود موجود و شرایط عملیاتی کارخانه، بهترین حالت پاسخ را برای دستیابی به هدف تعریف شده یافت. در این بررسی مشخص گردید که مدار آسیای گلوله‌ای در کارخانه فسفات اسفوردی در حالت بهینه نمی‌باشد و برای دستیابی یا نزدیک شدن به شرایط بهینه، باید قطر سرریز در ۲۲/۸۶ سانتی‌متر و قطر ته‌ریز در ۱۰/۱۶ سانتی‌متر و همزمان دبی جریان‌های قابل کنترل نیز در مقادیر مشخصی تنظیم شوند.

در بهینه‌سازی تک‌هدفه تنها یک نقطه عملیاتی تولید می‌شود که جز آن نقطه انتخاب دیگری نمی‌توان داشت.



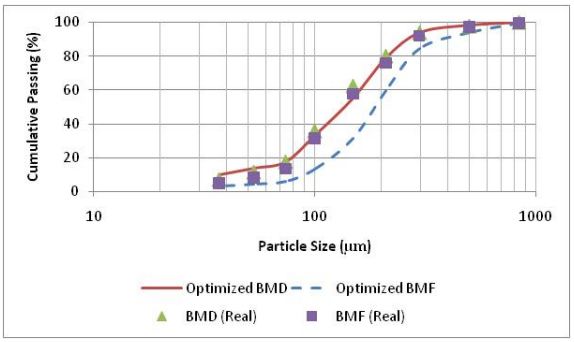
شکل ۵- دانه‌بندی خوراک و محصول آسیای گلوله‌ای پس از بهینه‌سازی شماره ۱



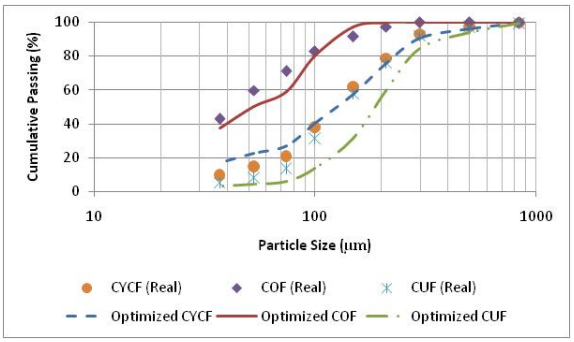
شکل ۶- دانه‌بندی خوراک، سرریز و ته‌ریز هیدروسیکلون پس از بهینه‌سازی شماره ۱

در بهینه‌سازی سرریز مشاهده شد که ترکیب اندازه قطر سرریز برابر ۲۰/۳۲ سانتی‌متر (۸ اینچ) و قطر تەریز ۱۰/۱۶ سانتی‌متر (۴ اینچ) کارآیی هیدروسیکلون و به‌دنبال آن مدار خردایش را کاهش می‌دهد و برای دستیابی به d_{80} برابر ۱۰۰ میکرون در سرریز، می‌توان از هر دو ترکیب ۲۰/۳۲-۷/۶۲ و ۲۲/۸۶-۱۰/۱۶ برای سرریز و تەریز استفاده نمود. البته مقدار دبی ورودی به پمپ هیدروسیکلون در ترکیب اول ایجاب می‌کند که با احتیاط بیشتری از این ترکیب استفاده نمود.

همچنین با تغییر قطر تەریز به ۷/۶۲ سانتی‌متر و ثابت ماندن قطر سرریز در اندازه پیشین، مشکل وجود نرمه زیاد در داخل تەریز هیدروسیکلون رفع می‌شود و دبی ورودی به آسیا کاهش می‌یابد و در نتیجه خردایش در آن به نحو مطلوبی انجام می‌شود. اما مقدار درصد جامد تەریز هیدروسیکلون بسیار بالاست.



شکل ۷- دانه‌بندی خوراک و محصول آسیای گلوله‌ای پس از بهینه‌سازی شماره ۱۰



شکل ۸- دانه‌بندی خوراک، سرریز و تەریز هیدروسیکلون پس از بهینه‌سازی شماره ۱۰

جدول ۱۰- مقادیر متغیرها در هر مرحله بهینه‌سازی سرریز

مرحله	x_1	x_2	x_3	x_4	مرحله	x_1	x_2	x_3	x_4
۱	۴۵/۴۷	۴۷/۱۹	۶۴/۰۰	۳۴/۰۲	۷	۴۵/۰۳	۴۵/۰۰	۶۸/۹۶	۳۷/۸۹
۲	۴۵/۰۰	۴۵/۰۰	۴۹/۶۲	۲۵/۰۰	۸	۴۵/۱۱	۴۵/۰۱	۴۹/۸۷	۲۵/۱۲
۳	۴۵/۰۰	۵۰/۰۱	۴۹/۹۴	۲۵/۱۸	۹	۴۵/۸۰	۵۰/۰۰	۴۹/۸۷	۲۵/۰۰
۴	۴۵/۳۰	۵۱/۷۸	۶۹/۶۴	۲۷/۹۸	۱۰	۴۷/۰۵	۴۶/۱۳	۶۷/۶۰	۲۸/۰۵
۵	۴۵/۰۰	۴۵/۰۷	۴۹/۳۱	۲۵/۰۰	۱۱	۴۵/۰۰	۴۵/۲۰	۴۹/۹۸	۲۵/۲۵
۶	۴۵/۰۳	۵۰/۳۴	۴۶/۵۷	۲۵/۰۴	۱۲	۴۵/۰۹	۵۰/۰۰	۴۹/۸۸	۲۸/۱۰

جدول ۱۱- نتایج حاصل از بهینه‌سازی سرریز هیدروسیکلون

ردیف	قطر سرریز (cm)	قطر تەریز (cm)	محدوده متغیرها	مقدار تابع هدف	جامد خوراک آسیای گلوله‌ای (درصد)	جرم تجمعی عبور کرده از ۱۰۰ میکرون در سرریز (درصد)	جرم تجمعی عبور کرده از ۷۴ میکرون در تەریز (درصد)	دبی پالپ خوراک هیدروسیکلون (m^3/h)
۱			محدوده ۱	۰/۰۰۰	۵۹/۶۵	۸۰	۱/۹۳	۱۸۰/۱۵
۲	۲۰/۳۲	۷/۶۲	محدوده ۲	۰/۶۷۲	۶۰/۵۳	۷۹/۱۸	۲/۸	۱۵۹/۰۶
۳			محدوده ۳	۶/۷۰۸	۵۸/۴۳	۷۷/۴۱	۳/۰۷	۱۴۹/۳۳
۴			محدوده ۱	۱۱۸/۵۹۲	۴۵/۶۹	۶۹/۱۱	۱۵/۷۱	۳۶۲/۷۸
۵	۲۰/۳۲	۱۰/۱۶	محدوده ۲	۱۲۳/۲۰۹	۴۵/۵۵	۶۸/۹	۱۶/۲۴	۳۳۰/۲۲
۶			محدوده ۳	۱۳۳/۴۰	۴۵/۰۷	۶۸/۴۵	۱۶/۹۰	۳۲۲/۷۸
۷			محدوده ۱	۱/۴۳۹	۵۷/۲۲	۷۸/۸	۰/۸۷	۲۱۱/۳۱
۸	۲۲/۸۶	۷/۶۲	محدوده ۲	۱۰/۱۷۶	۵۷/۹۱	۷۶/۸۱	۱/۸۲	۱۵۶
۹			محدوده ۳	۳۶/۹۳۶	۵۵/۹۶	۷۴/۸۱	۲/۰۹	۱۴۶/۳۴
۱۰			محدوده ۱	۰/۰۰۰	۶۱/۵	۸۰	۵/۸۱	۲۰۰/۷۵
۱۱	۲۲/۸۶	۱۰/۱۶	محدوده ۲	۲/۴۹۶	۵۹/۰۷	۷۸/۴۲	۶/۸۹	۱۷۶/۴۷
۱۲			محدوده ۳	۱۰/۸۲۴	۵۶/۷۳	۷۶/۷۱	۷/۰۸	۱۶۸/۹۲

جدول ۱۲ مشخصات جریان‌ها در بهینه‌سازی‌های شماره ۱ و ۱۰

z	دبی پالپ (t/h)		درصد جامد		مقدار جامد (t/h)		مقدار آب (t/h)		چگالی پالپ (t/m^3)		دبی پالپ (m^3/h)	
	شماره ۱	شماره ۱۰	شماره ۱	شماره ۱۰	شماره ۱	شماره ۱۰	شماره ۱	شماره ۱۰	شماره ۱	شماره ۱۰	شماره ۱	شماره ۱۰
CFF	۹۶/۳۶	۱۰۲/۰۰	۴۷/۲۰	۴۶/۱۳	۴۵/۴۸	۴۷/۰۶	۵۰/۸۸	۵۴/۹۴	۱/۵۱	۱/۴۹	۸۷۶۳	۶۸/۳۸
CYCW	۶۴/۰۰	۶۷/۶۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۶۴/۰۰	۶۷/۶۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۶۴/۰۰	۶۷/۶
BMD	۹۱/۰۹	۱۱۵/۵۰	۵۹/۶۵	۶۱/۵۰	۵۴/۳۳	۷۱/۰۳	۳۶/۷۶	۴۴/۴۷	۱/۷۴	۱/۷۸	۵۲/۲۸	۶۴/۷۶
CYCF	۲۵۱/۴۵	۲۸۵/۱۰	۳۹/۷۰	۴۱/۴۲	۹۹/۸۲	۱۱۸/۰۹	۱۵۱/۶۳	۱۶۷/۰۱	۱/۴۰	۱/۴۲	۱۸۰/۱۵	۲۰۰/۷۵
COF	۱۹۴/۳۸	۱۹۷/۶۴	۲۳/۴۰	۲۳/۸۱	۴۵/۴۸	۴۷/۰۵	۱۴۸/۹۰	۱۵۰/۵۹	۱/۲۰	۱/۲۰	۱۶۱/۹۰	۱۳۴/۰۳
CUF	۵۷/۰۶	۸۷/۴۵	۹۵/۲۲	۸۱/۲۲	۵۴/۳۳	۷۱/۰۳	۲/۷۳	۱۶/۴۲	۳/۱۳	۲/۳۸	۱۸/۲۵	۳۶/۷۱
BMW	۳۴/۰۳	۲۸/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۴/۰۳	۲۸/۰۵	۱/۰۰	۱/۰۰	۳۴/۰۳	۲۸/۰۵
BMF	۹۱/۰۹	۱۱۵/۵	۵۹/۶۵	۶۱/۵۰	۵۴/۳۳	۷۱/۰۳	۳۶/۷۶	۴۴/۴۷	۱/۷۴	۱/۷۸	۵۲/۲۸	۶۴/۷۶

جدول ۱۳- نسبت خردایش و بار در گردش آسیای گلوله‌ای در بهینه‌سازی‌های شماره ۱ و ۱۰

بهینه‌سازی	نسبت خردایش	بار در گردش (درصد)
شماره ۱	۱/۳۵	۱۱۹/۴۶
شماره ۱۰	۱/۳۰	۱۵۰/۹۳

جدول ۱۴- پارامترهای مدل پلیت برای بهینه‌سازی شماره ۱ و ۱۰

پارامتر	بهینه‌سازی شماره ۱	بهینه‌سازی شماره ۱۰
d_{50c} (mμ)	۹۹/۰۰	۹۴/۰۰
P (kPa)	۵۶/۷۲	۵۳/۹۹
S	۰/۱۱	۰/۲۲
m	۳/۵۰	۳/۰۳
R_f	۰/۰۲	۰/۱۰

جدول ۱۵- مقدار d_{80} جریان‌های مختلف در بهینه‌سازی‌های شماره ۱ و ۱۰

جریان	بهینه‌سازی شماره ۱	بهینه‌سازی شماره ۱۰
CFF	۲۶۱/۸۰	۲۶۱/۸۰
BMD	۲۱۵/۰۰	۲۱۵/۲۶
CYCF	۲۳۷/۴۲	۲۳۴/۸۰
COF	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰
CUF	۲۹۰/۶۴	۲۸۱/۵۰
BMF	۲۹۰/۶۴	۲۸۱/۵۰

همچنین با انتخاب قطر سرریز برابر ۲۲/۸۶ سانتی‌متر و قطر تەریز برابر ۱۰/۱۶ سانتی‌متر مقدار جامد ورودی به مدار خردایش آسیای گلوله‌ای برابر ۴۷ تن در ساعت با درصد جامد ۴۶/۱۳ درصد تعیین شد. با تنظیم آب اضافه شونده به حوضچه خوراک هیدروسیکلون و آب اضافه شونده به خوراک آسیای گلوله‌ای به‌ترتیب در مقادیر ۶۷/۶ و ۲۸ تن در ساعت، مقدار d_{80} سرریز از ۹۴ میکرون دقیقاً به ۱۰۰ میکرون می‌رسد. این تغییر نتایج مناسبی را به‌همراه دارد. با درنظرگرفتن جرم تجمعی عبور کرده از ۷۴ میکرون در جریان تەریز به‌عنوان معیاری برای میزان نرمه در این جریان، مشاهده شد که نتیجه بهینه‌سازی این مقدار را از ۱۶ به ۵/۸ درصد می‌رساند. دبی ورودی به آسیای گلوله‌ای تعدیل می‌شود و دقیقاً به ۱۱۵ تن در ساعت می‌رسد. با بررسی سایر جریان‌ها مشاهده می‌شود که درصد جامد خوراک، سرریز و تەریز به‌ترتیب حدود ۴۱، ۲۴ و ۸۱ تعیین شده است. در این حالت نتیجه آخرین شبیه‌سازی براساس نتایج بهینه به‌دست آمده نشان می‌دهد که مقدار تیزی جدایش حدود ۳ تا ۳/۵ است که خود دلیلی دیگر بر بهبود عملکرد هیدروسیکلون می‌باشد. نمودار دانه‌بندی جریان‌های اطراف هیدروسیکلون هم به حالت استاندارد نزدیک شده‌اند و نمودار دانه‌بندی تەریز که بسیار به خوراک نزدیک بود، تامقدار زیادی به سمت پایین حرکت کرده است و این امر نشان‌دهنده درشت شدن تەریز هیدروسیکلون می‌باشد.

ایجاد این تغییر در وضعیت آسیای گلوله‌ای نیز تأثیرگذار است. مقدار درصد جامد آسیای گلوله‌ای از ۷۸ درصد به ۶۱/۵ درصد می‌رسد و با درشت‌تر شدن اندازه ذرات و کاهش دبی تەریز هیدروسیکلون که خوراک آسیای گلوله‌ای به‌شمار می‌رود، خردایش بهتری در این آسیا صورت می‌گیرد. مهم‌ترین تغییری که در این بخش رخ

می‌دهد، مقدار بار درگردش است که از۷۱۱ درصد به ۱۵۱ درصد و همچنین نسبت خردایش نیز با اندکی افزایش به ۱/۳ می‌رسد. تمامی این نشانه‌ها حکایت از بهبود یافتن عملکرد مدار خردایش دارد. این مقدار نسبت خردایش با درنظرگرفتن سایر آسیاهای گلوله‌ای، باز هم نامناسب است و باز هم پتانسیلی برای بهینه‌سازی آسیای گلوله‌ای وجود دارد. برای بهبود خردایش در این آسیا لازم است خوراک آن درشت‌تر شود. به‌عبارت دیگر، لازم است محصول آسیای میله‌ای که خوراک تازه ورودی به مدار خردایش آسیای گلوله‌ای است، درشت‌تر شود. برای این‌کار لازم است که عملکرد آسیای میله‌ای و عملیات خردایش در آن مورد بررسی قرار گیرد. پیش‌بینی می‌شود با کاهش بیش‌آسیاکنی در آسیای میله‌ای، علاوه‌بر کاهش مصرف انرژی در این آسیا، می‌توان با ظرفیت بیشتری برای تولید محصولی مناسب مدار را به‌کار گرفت.

در این شرایط مقدار d_{80} ته‌ریز برابر ۲۸۱/۵ میکرون است که نسبت به مقدار آن پیش از بهینه‌سازی حدود ۵۰ میکرون درشت‌تر شده است. از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت که با تغییر قطر سرریز و ته‌ریز هیدروسیکلون و دبی برخی جریان‌ها حتی راه‌حلی برای مشکل دو جزئی بودن خوراک نیز می‌توان یافت.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از همکاری کارکنان مجتمع فسفات اسفوردی، به‌ویژه مدیریت محترم گروه فرآیند آقای مهندس توکلی، به خاطر در اختیار گذاردن اطلاعات مورد نیاز صمیمانه سپاسگزاری می‌نمایند.

۱۱- مراجع

[1] Farzanegan, A. (1998). “Knowledge-based optimization of mineral grinding circuits”. Ph.D Thesis, McGill University,Canada.

[2] Farzanegan, A., Vahidipour, S.M. (2009). “Optimization of comminution circuits simulations based on genetic algorithms search method”. Minerals Engineering, Vol. 22, Issues 7-8, pp. 719-726

[3] Kishalay, M., Ravi, G. (2004). “Multiobjective optimization of an industrial grinding operation using elisit nondominated sorting genetic algorithm”. Chemical Engineering Science, Vol. 59, pp 385-396.

[۴] میرزایی، ز. (۱۳۸۸). "کاربرد الگوریتم ژنتیک در فرآوری مواد معدنی". سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه کاشان.

[۵] ولیان، ع. (۱۳۸۷). "شبیه‌سازی جداکننده‌های هوایی در BMCS". پایان‌نامه کارشناسی، دانشگاه کاشان.

[6] Spring, R. (1992). “NorBal3 Software for material balance reconciliation”. NORANDA Technology Center.

[۷] دهقانی احمدآبادی، ع.، نوع‌پرست، م.، شفائی، ض. (۱۳۸۶). "مطالعه و بررسی امکان خارج‌سازی آسیای گلوله‌ای از مدار خردایش کارخانه فسفات اسفوردی". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

[8] Laplante, A.R., Finch, J. A. (1984). “The origin of unusual cyclone performance curves”. International Journal of Mineral Processing, Vol. 13, No. 1, pp. 1-11.