

اندازه‌گیری زمان ماند ذرات در آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای کارخانه فرآوری فسفات اسفوردی

ضیاءالدین پورکریمیⁱ، علی دهقانی احمدآبادیⁱⁱ، محمد نوع‌پرستⁱⁱⁱ، سید ضیاءالدین شفاعی^{iv}

چکیده

مدار خردایش کارخانه فسفات اسفوردی از دو آسیای میله‌ای و گلوله‌ای تشکیل شده است. به منظور بررسی عملکرد این مدار از شاخه‌های مختلف خوراک و محصول آسیای میله‌ای، خوراک، سرریز و ته‌ریز هیدروسیکلون، محصول آسیای گلوله‌ای و ته‌ریز هیدروسیکلون خوشه‌ای آن، طی هفت روز، نمونه‌برداری صورت پذیرفت. آزمایش‌های تجزیه سرنده، درصد وزنی جامد و اندیس کار بر روی این نمونه‌ها انجام شد. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان داد که اندیس کار ماده معدنی معادل 9.47 kWh/mt و همچنین درصد وزنی جامد بخش‌های مذکور (به استثنای خوراک آسیای میله‌ای) برابر 55.6 ، 58.0 ، 16.0 ، 83.6 ، 76.0 و 54.0 درصد است. طبق محاسبات انجام شده، نسبت خردایش آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای به ترتیب برابر 64.65 و 1.15 و حاصل شد که تفاوت بسیار زیادی با نسبت‌های طراحی اولیه دارد (23 و $7/5$). همچنین زمان ماند ذرات در داخل آسیا نیز اندازه‌گیری شد. مقادیر متوسط زمان ماند ذرات در آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای به ترتیب برابر $16/68$ (حداکثر 51) و $2/07$ (حداکثر 20) دقیقه به دست آمد. این امر دلالت دارد بر این که یکی از علل اصلی نسبت خردایش بالا در آسیای میله‌ای و پایین در آسیای گلوله‌ای، زمان ماند زیاد و کم ذرات به ترتیب در داخل آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای است.

کلمات کلیدی

فسفات اسفوردی، آسیای میله‌ای، آسیای گلوله‌ای، زمان ماند، خردایش، اندیس‌کار

Measurement of particles residence time in rod and ball mills of Esfordi phosphate processing plant

Z. Pourkarimi, A. Dehghani Ahmadabadi, M. Noaparast, Z. Shafaei

ABSTRACT

Grinding circuit of Esfordi phosphate plant includes two rod and ball mills. To evaluate the performance of grinding circuit, the required samples collected from different streams of: feed and product of rod mill, feed, overflow and underflow of hydrocyclone, ball mill feed and cyclone cluster underflow, during 7 days. These samples used in various experiments such as screen analyzing, solid weight percent and work index estimation. The results obtained from different tests indicated that work index average value is equal to 9.47 kWh/mt , also solid weight percent in streams (except rod mill feed) were equal to 55.6 , 58.0 , 16.0 , 83.6 , 76.0 and 54.0 percent, respectively. According to the results the reduction ratio in rod and ball mills were estimated as 64.65 , 1.15 , respectively, which show a remarkable discrepancy with initial design values. Thus, in order to verify this conclusion, the residence times of

ⁱ دانشجوی کارشناسی ارشد گرایش فرآوری مواد معدنی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات: zpourkarimi@yahoo.com

ⁱⁱ دانشجوی کارشناسی ارشد گرایش فرآوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران

ⁱⁱⁱ دانشیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تلفن: 82084260 : noparast@ut.ac.ir

^{iv} دانشیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود

particles in mills measured. Mean residence times of particles in rod and ball mills were obtained equal to 16.68 (maximum 51), 2.07 (maximum 20) minutes. The residency time for rod mill is higher, and that of ball mill is lower than that at normal conditions. Therefore, it was postulated that the residency time could be one major factor for high (in rod mill), and low (in ball mill) reduction ratios.

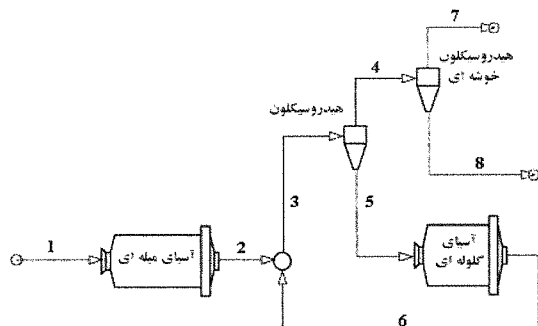
KEYWORDS

Esfordi phosphate, Rod mill, Ball mill, Residence time, Grinding, Work index

۱- مقدمه

از جمله پارامترهای اساسی در مدل سازی و شبیه سازی سیستم های خردایش و آسیا، RTD یا توزیع زمان ماند است و در واقع، این پارامتر، حمل و انتقال مواد در سیستم خردایش را شرح می دهد. در حقیقت، در برخی آسیاهای صنعتی که به صورت مدار بسته با کلاسیفایر قرار دارند، خردایش به صورت جریان قالبی^۱ و مخلوط کامل^۲ و یا حالتی بین این دو حالت، می تواند بیان شود [۱]. اسمیت^۳ برای اولین بار RTD را در آسیاهای گردان مطالعه کرد و زمانی را که در آن غلظت، ماکزیم مقدار را دارد، زمان توقف متوسط مواد نامید و آن را با τ نشان داد [۲].

کارخانه فرآوری فسفات اسفوردی در استان یزد واقع شده و از سال ۲۰۰۰ میلادی شروع به کار کرده است. بر اساس مدارک طراحی، مواد پس از خردایش با سنگ شکن های فکی و مخروطی و رسیدن به d_{80} معادل ۱۴ میلی متر، به آسیای میله ای با بار خردکننده ای به قطر ۸ سانتی متر وارد می شود. مواد پس از خرد شدن و رسیدن به d_{80} معادل ۶۰۰ میکرون، به یک هیدروسیکلون با حد جدایش ۱۰۰ میکرون منتقل می شوند. ته ریز هیدروسیکلون با d_{80} برابر ۷۵۰ میکرون به یک آسیای گلوله ای با گلوله های ۵۰ میلی متری وارد می شود. مواد پس از خرد شدن و رسیدن به d_{80} معادل ۱۰۰ میکرون به وسیله آسیای گلوله ای مجدداً وارد هیدروسیکلون مذکور می شود؛ که با آسیای گلوله ای در مدار بسته قرار دارد، و سرریز آن به مرحله نرمه گیری (با سیکلون خوشه ای) و سپس فلو تاسیون می رود [۳]. در شکل (۱) فلوشیت مدار خردایش (آسیا) کارخانه فسفات اسفوردی نمایش داده شده است. توضیح این مطلب لازم است که در شکل (۱)، جریان های ۷ و ۸ به ترتیب به سوی باطله و فلو تاسیون می روند؛ همچنین در جداول (۱) و (۲) مشخصات فنی و عملیاتی آسیاهای میله ای و گلوله ای و نیز هیدروسیکلون مشاهده می شود.



شکل (۱): فلوشیت مدار آسیای کارخانه فسفات اسفوردی

جدول (۱): مشخصات فنی و عملیاتی دستگاه های خردایش [۴]

مشخصات		نوع آسیا
قطر آسیا (m)	۲/۴	آسیای میله ای
طول آسیا (m)	۴/۳	آسیای میله ای
سرعت عملیاتی آسیا (rpm)	۱۹	۲۱
C_s (%)	۶۹/۶۰	۷۶/۹۱
متوسط قطر بار خرد کننده (mm)	۸۰	۵۰
وزن مخصوص بار خرد کننده (gr/cm^3)	۷/۸	۷/۸
حجم پرشدگی بار خرد کننده (%)	۳۵-۴۰	۳۵-۴۰
وزن مخصوص مواد (gr/cm^3)	۳/۵	۲/۸
دبی وزنی جامد خوراک (t/h)	۵۷/۵	۴۶
نوع تخلیه	سرریز	سرریز
توان موتور (kWh/t)	۳۱۵	۳۱۵

C_s : سرعت گردش آسیا نسبت به سرعت بحرانی (%)

جدول (۲): مشخصات فنی و عملیاتی هیدروسیکلون [۴]

دبی وزنی جامد خوراک (t/h)	۱۷۲/۵	فشار پالپ (bar)	۰/۶
دبی حجمی پالپ خوراک (m^3/h)	۲۶۰/۱	قطر سیکلون (m)	۰/۵
حد جدایش عملیاتی (μm)	۱۰۰	قطر ورودی (inch)	۶
d_{50} جدایش براساس طراحی (μm)	۸۰	قطر سرریز (inch)	۷
نوع هیدروسیکلون	تکی	قطر ته ریز (inch)	۴

یکی از مشکلات موجود در کارخانه فسفات اسفوردی، پایین بودن نسبت خردایش در آسیای گلوله‌ای و بالا بودن آن در آسیای میله‌ای است. این امر به شکل‌گیری این ایده و ذهنیت انجامید که حتی می‌توان آسیای گلوله‌ای را از مدار خارج کرد؛ بنابراین در این تحقیق، صحت مطلب فوق ارزیابی شد و بدین منظور، به مدت هفت روز مختلف از جریان‌های خوراک آسیای میله‌ای، محصول آسیای میله‌ای، خوراک، سرریز و ته‌ریز هیدروسیکلون (جریان ورودی به آسیای گلوله‌ای)، محصول آسیای گلوله‌ای و ته‌ریز هیدروسیکلون خوشه‌ای؛ که در واقع، خوراک بخش فلوتاسیون است و به ترتیب با اعداد ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۸ در شکل (۱) نمایش داده شده است، برای انجام آزمایش‌های مختلف اعم از تجزیه سرندي، تعیین درصد وزنی جامد پالپ، بار در گردش آسیای گلوله‌ای و تعیین اندیس کار خوراک آسیای میله‌ای نمونه‌گیری به عمل آمد. به منظور تأیید و تأکید بر نتایج به دست آمده، اندازه‌گیری زمان ماند ذرات در آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای بررسی شد که برای نیل به این هدف، میزان pH در جریان خروجی آسیای میله‌ای (جریان شماره ۲ در شکل (۱)) و جریان‌های ورودی به آسیای گلوله‌ای (ته‌ریز هیدروسیکلون) و همچنین خروجی از آسیای گلوله‌ای (جریان‌های شماره ۵ و ۶ در شکل (۱))، با استفاده از سود (NaOH) به عنوان ماده ردیاب، در فواصل زمانی مختلف تعیین شد. در این مقاله نتایج حاصل ارائه شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش، به منظور اندازه‌گیری نسبت خردایش در آسیای میله‌ای و گلوله‌ای در مدار آسیای کارخانه فسفات اسفوردی، در هفت روز مختلف از شاخه‌های خوراک آسیای میله‌ای، محصول آسیای میله‌ای، خوراک، سرریز و ته‌ریز هیدروسیکلون، محصول آسیای گلوله‌ای و ته‌ریز هیدروسیکلون خوشه‌ای نمونه لازم تهیه شد. آزمایش‌های تجزیه سرندي، تعیین درصد وزنی جامد و اندیس کار بر روی این نمونه‌ها انجام شد که برای انجام تست‌های مذکور از سرندهای آزمایشگاهی استاندارد ASTM، دستگاه شیکر، آسیای گلوله‌ای آزمایشگاهی و ترازو استفاده شد. زمان ماند ذرات در داخل آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای کارخانه فسفات

اسفوردی نیز اندازه‌گیری شد. مواد و وسایل مورد استفاده جهت انجام آزمایش فوق، عبارت است از سود (NaOH) به میزان ۲۵ کیلوگرم به عنوان ردیاب، دستگاه pH متر؛ که در ابتدای امر به وسیله بافرهای ۷ و ۹ کالیبره شد، و کرنومتر برای اندازه‌گیری زمان. از نرم‌افزار «شبیه‌سازی توزیع زمان ماند در مدارهای باز و بسته، ویرایش ۱/۱»، نیز برای تعیین زمان متوسط اقامت ذرات درون آسیاها استفاده شد [۵]. توضیح این مطلب لازم است که آزمایش‌های فوق در آزمایشگاه‌های دانشگاه تهران و مجتمع فسفات اسفوردی انجام پذیرفتند.

۳- آزمایش‌های تجزیه سرندي

به منظور اندازه‌گیری نسبت خردایش در آسیای میله‌ای و گلوله‌ای در مدار آسیای کارخانه فسفات اسفوردی در هفت روز مختلف از شاخه‌های خوراک آسیای میله‌ای، محصول آسیای میله‌ای، خوراک، سرریز و ته‌ریز هیدروسیکلون، محصول آسیای گلوله‌ای و ته‌ریز هیدروسیکلون خوشه‌ای نمونه لازم تهیه شد. این نمونه‌ها مورد آزمایش تجزیه سرندي قرار گرفتند و بر اساس نتایج حاصل d_{80} توزیع ابعادی محاسبه شد که در جدول (۳) ارائه شده است؛ سپس نسبت‌های خردایش آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای بر اساس نتایج مندرج در جدول (۳) محاسبه شد که در جدول (۴) آمده است.

با توجه به جدول (۴)، مقدار متوسط نسبت خردایش برای آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای (تقسیم مقدار d_{80} خوراک بر d_{80} محصول)، به ترتیب برابر $۶۴/۶۵$ و $۱/۱۵$ به دست آمد. مقادیر انحراف معیار این نسبت‌ها برابر $۳/۹۱$ و $۰/۰۳$ به ترتیب برای آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای محاسبه شد. با در نظر گرفتن توزیع نرمال برای نسبت‌های خردایش، با سطح اعتماد ۹۵٪ نسبت‌های خردایش برای آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای، در محدوده‌های $۷/۶۶ \pm ۶۴/۶۵$ و $۱/۱۵ \pm ۰/۰۶$ محاسبه شد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود نتایج محاسبه شده بر نسبت خردایش بالای آسیای میله‌ای (میانگین $۶۴/۶۵$) و همچنین نسبت خردایش پایین در آسیای گلوله‌ای (میانگین $۱/۱۵$) دلالت دارند (در طراحی اولیه نسبت‌های خردایش ۲۳ و $۷/۵$ برای آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای در نظر گرفته شده بود).

جدول (۳): نتایج d80 های محاسبه شده (میکرون)، برای جریان‌های مختلف در هفت روز نمونه‌برداری D1 تا D7

شاخه / روز	خوراک آسیای میله‌ای	محصول آسیای میله‌ای	خوراک هیدروسیکلون	محصول هیدروسیکلون	تهریز هیدروسیکلون	محصول آسیای گوله‌ای	تهریز سیکلون خوشه‌ای
D ₁	۱۸۱۱۰	۲۸۰/۳	۲۵۷/۹	۹۹/۷	۲۵۸/۰	۲۱۵/۴	۱۱۷/۲
D ₂	۱۷۶۱۷	۲۶۴/۰	۲۴۲/۲	۹۷/۵	۲۳۱/۵	۲۰۱/۴	۹۹/۱
D ₃	۱۷۶۰۰	۲۷۰/۴	۲۴۶/۴	۱۳۱/۵	۲۴۹/۶	۲۱۵/۱	۱۰۰/۴
D ₄	۱۷۸۸۴	۲۶۸/۰	۲۲۸/۲	۱۱۲/۵	۲۱۰/۰	۱۸۷/۵	۹۴/۸
D ₅	۱۶۴۸۴	۲۹۱/۷	۲۴۰/۶	۹۸/۴	۲۵۰/۶	۲۱۸/۱	۸۳/۲
D ₆	۱۸۰۸۳	۲۸۷/۵	۲۳۳/۸	۷۷/۴	۲۳۹/۵	۲۰۸/۸	۸۷/۶
D ₇	۱۸۰۲۴	۲۵۷/۵	۲۲۱/۹	۸۹/۶	۲۱۶/۳	۱۹۸/۳	۷۶/۶
میانگین	۱۷۶۸۶	۲۷۴/۲	۲۳۸/۷	۱۰۰/۹	۲۳۶/۵	۲۰۶/۴	۹۴/۱

حد وسطی از نظر درصد وزنی جامد در پالپ به دست می‌آید [۱]. به منظور تعیین درصد وزنی جامد در پالپ به مدت ۷ روز از جریان‌های مختلف کارخانه؛ شامل محصول آسیای میله‌ای، محصول آسیای گوله‌ای، خوراک هیدروسیکلون، ته‌ریز هیدروسیکلون، سرریز هیدروسیکلون و ته‌ریز هیدروسیکلون خوشه‌ای به وسیله یک ظرف ۱ لیتری نمونه‌گیری به عمل آمد. با تعیین وزن مخصوص هر نمونه، و همچنین در دست داشتن وزن مخصوص جامد، درصد جامد هر قسمت محاسبه شد [۶].

وزن مخصوص جامد در بخش‌های مختلف به ترتیب ذکر شده در فوق برابر با ۳/۴، ۳/۸، ۳/۲، ۳/۸، ۳/۸ و ۳/۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب به دست آمد و مقادیر محاسبه شده درصد‌های وزنی جامد، در جدول (۵) ارائه شده است.

بر اساس این نتایج، مقدار میانگین درصد‌های وزنی جامد محاسبه شد (جدول (۵)) که این مقادیر برای محصول آسیای میله‌ای، محصول آسیای گوله‌ای، خوراک هیدروسیکلون، ته‌ریز هیدروسیکلون، سرریز هیدروسیکلون و ته‌ریز هیدروسیکلون خوشه‌ای به ترتیب برابر ۵۴/۷۵، ۷۵/۹۳، ۵۷/۶۷، ۸۳/۶۴، ۱۶/۰۰ و ۵۳/۲۰ درصد است (با توجه به اطلاعات طراحی کارخانه، درصد جامد آسیای میله‌ای و گوله‌ای باید برابر با ۶۰٪ و خوراک هیدروسیکلون ۴۵٪ و درصد جامد سرریز و ته‌ریز هیدروسیکلون به ترتیب ۲۵٪ و ۷۵٪ باشند).

جدول (۴): نسبت‌های خردایش محاسبه شده برای آسیاهای میله‌ای و گوله‌ای در D1 تا D7

روز	نسبت خردایش	
	آسیای گوله‌ای	آسیای میله‌ای
D ₁	۱/۲۰	۶۴/۶۲
D ₂	۱/۱۵	۶۶/۷۴
D ₃	۱/۱۶	۶۵/۰۹
D ₄	۱/۱۲	۶۶/۷۳
D ₅	۱/۱۵	۵۶/۵۱
D ₆	۱/۱۵	۶۲/۸۹
D ₇	۱/۰۹	۶۹/۹۸
میانگین	۱/۱۵	۶۴/۶۵

۴- تعیین درصد‌های وزنی جامد در پالپ

از آنجایی که پالپ‌های کانیهای مختلف از نوع نیوتنی نیستند؛ لذا رابطه بین تنش برشی و سرعت برشی، خطی نیست و در نتیجه، این امر را از خواص مواد و به صورت ویژه از اثرات ویسکوزیته می‌دانند. ویسکوزیته با درصد وزنی پالپ افزایش می‌یابد و در نتیجه، سبب افزایش زمان ماند می‌شود، و می‌دانیم که با کاهش ویسکوزیته احتمال چسبیدن ذرات به سطح گوله نیز کاهش می‌یابد. نشان داده شده است که به ویسکوزیته حداقل برای چسبیدن ذرات به سطح گوله‌ها نیاز است؛ لذا اپتیمم کارآیی آسیا معمولاً در

جدول (۵): نتایج درصدهای وزنی جامد در پالپ در شاخه‌های مختلف

شاخه روز	محصول آسیای میله‌ای	محصول آسیای گلوله‌ای	خوراک هیدروسیکلون	ته‌ریز هیدروسیکلون	سرریز هیدروسیکلون	ته‌ریز سیکلون خوشه‌ای
D ₁	۶۲/۲۶	۷۲/۸۶	۵۹/۴۸	۸۰/۷۰	۲۶/۲۰	۶۸/۱۰
D ₂	۴۸/۲۵	۷۶/۹۴	۵۸/۱۷	۸۷/۲۰	۱۴/۴۰	۴۸/۵۰
D ₃	۵۹/۲۹	۸۱/۴۱	۶۲/۱۶	۸۲/۵۰	۲۰/۱۰	۶۸/۴۰
D ₄	۴۸/۲۵	۷۰/۱۵	۵۰/۸۹	۸۱/۸۵	۹/۵۰	۴۷/۲۰
D ₅	۵۵/۲۶	۷۸/۴۳	۵۱/۹۵	۸۴/۷۰	۹/۵۰	۶۶/۴۰
D ₆	۵۲/۱۱	۷۴/۰۲	۵۷/۷۲	۸۳/۱۰	۱۴/۴۰	۳۵/۳۰
D ₇	۵۶/۸۲	۷۷/۶۸	۶۲/۳۵	۸۵/۴۰	۱۷/۹۰	۲۸/۵۰
میانگین	۵۴/۷۵	۷۵/۹۳	۵۷/۶۷	۸۳/۶۴	۱۶/۰۰	۵۲/۲۰

توضیح این مطلب لازم است که مقدار باردرگردش (ته‌ریز هیدروسیکلون) مطابق طراحی اولیه باید حدود ۱۵۰٪ باشد؛ و بنابر اظهار نظر کارشناسان بخش کانه‌آرایی مجتمع اسفوردی، این مقدار در حدود ۴۰۰٪ مناسب است. مقدار میانگین باردرگردش با حذف داده مربوط به روز اول (D₁) که پراکندگی بیشتری نسبت به داده‌های دیگر دارد، برابر ۱۰۰۶/۶۴٪ به دست آمد که با هر دو حالت ۱۵۰٪ و ۴۰۰٪ اختلاف زیادی دارد؛ بنابراین ناهماهنگی موجود در این بخش کاملاً قابل ملاحظه است. این امر می‌تواند بر وجود ناهماهنگی در خردایش آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای و همچنین عملکرد هیدروسیکون از نظر شرایط اجرایی دلالت داشته باشد.

۶- محاسبه اندیس کار خوراک آسیای میله‌ای

به منظور بررسی این موضوع که خوراک ورودی به مدار خردایش کارخانه از نظر قابلیت خردایش، در روزهای مختلف نمونه‌برداری دارای هماهنگی است، نمونه‌های تهیه شده از خوراک آسیای میله‌ای در هفت روز مختلف D₁ تا D₇ در آزمایش استاندارد اندیس کار باند استفاده شدند [۸]، [۹] که نتایج آن در جدول (۷) آمده است.

جدول (۷): مقادیر اندیس کار برای نمونه‌های روزهای D₁ تا D₇

نام نمونه	اندیس کار (کیلو وات ساعت بازای تن متریک)
D ₁	۹/۵۲
D ₂	۹/۵۸
D ₃	۸/۶۱
D ₄	۹/۰۶
D ₅	۹/۰۸
D ₆	۱۰/۳۰
D ₇	۱۰/۱۵
میانگین	۹/۴۷

۵- تعیین باردرگردش در مدار آسیای گلوله‌ای

با اندازه‌گیری مقادیر درصدهای جامد، با استفاده از رابطه (۱)، مقادیر باردرگردش هیدروسیکلون برای هفت روز مختلف محاسبه شد که نتایج آن در جدول (۶) ارائه شده است [۷].

$$\%CL = \frac{\left(\frac{100-f}{f}\right) - \left(\frac{100-o}{o}\right)}{\left(\frac{100-u}{u}\right) - \left(\frac{100-f}{f}\right)} \times 100 \quad (1)$$

که در رابطه بالا:

CL: درصد باردرگردش،

f: درصد وزنی جامد در خوراک هیدروسیکلون،

o: درصد وزنی در سر ریز هیدروسیکلون،

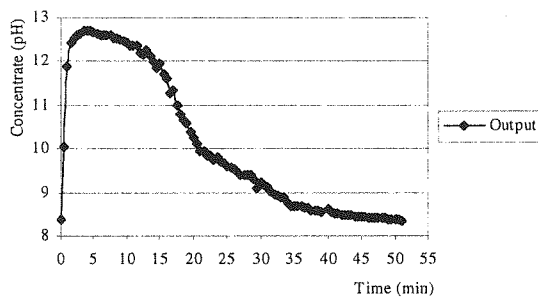
u: درصد وزنی در ته‌ریز هیدروسیکلون،

جدول (۶): نتایج محاسبه شده باردرگردش در هفت روز مختلف

نمونه‌برداری

روز	بار در گردش (%)
D ₁	۴۸۳/۰۰
D ₂	۹۱۳/۲۳
D ₃	۹۱۳/۸۵
D ₄	۱۱۵۱/۹۲
D ₅	۱۱۵۵/۶۵
D ₆	۹۸۵/۰۰
D ₇	۹۲۰/۲۱
میانگین	۱۰۰۶/۶۴

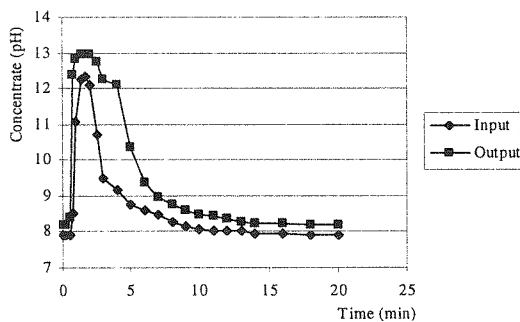
با توجه به جدول (۶) مشاهده می‌شود که تغییرات میزان باردرگردش در روزهای مختلف قابل ملاحظه است. این مقادیر از کمترین (۴۸۳/۰۰ درصد) در اولین روز نمونه‌برداری، تا بیشترین (۱۱۵۵/۶۵ درصد) در پنجمین روز نمونه‌برداری، بر عدم ثبات باردرگردش در مدار خردایش دلالت دارد. البته



شکل (۲): نمودار توزیع زمان ماند آسیای میله‌ای

جدول (۸): نتایج شبیه‌سازی زمان ماند آسیای میله‌ای

شبیه‌سازی آسیای میله‌ای	
ولر	مدل شبیه‌سازی
۹۶/۱۰	K
۰/۰۰	τ_{pf}
۰/۷۹	τ_s
۱۵/۱۰	τ_l
۱۶/۶۸	متوسط زمان ماند
۰/۲۰	مجموع مربعات
۱۸	خطا (%)



شکل (۳): نمودار توزیع زمان ماند آسیای گلوله‌ای مدار بسته

جدول (۹): نتایج شبیه‌سازی زمان ماند آسیای گلوله‌ای

شبیه‌سازی آسیای گلوله‌ای	
ولر	مدل شبیه‌سازی
۱۰/۱۰	K
۰/۴۳	τ_{pf}
۰/۱۸	τ_s
۱/۲۸	τ_l
۲/۰۷	متوسط زمان ماند
۰/۰۰	مجموع مربعات
۲۸	خطا (%)

با توجه به نتایج مندرج در جدول (۷)، انحراف معیار اندیس کار نمونه ورودی به آسیای میله‌ای برابر ۰/۵۶ به دست آمد. در نتیجه، مقدار اندیس کار نمونه ورودی به آسیای میله‌ای با سطح اعتماد ۹۵٪ برابر با $۱/۱۰ \pm ۹/۴۷$ محاسبه شد (اندیس کار برای این بخش در اطلاعات طراحی کارخانه $۷/۵۵ \text{ kWh/mt}$ بود)، لذا ملاحظه می‌شود که اندیس کار ماده مورد استفاده در زمان نمونه‌برداری متفاوت با آن است.

۷- زمان ماند آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای

به منظور اندازه‌گیری زمان ماند ذرات در آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای، میزان pH در جریان خروجی آسیای میله‌ای و جریان‌های ورودی و خروجی آسیای گلوله‌ای در فواصل زمانی مختلف تعیین شد. توجه به این نکته ضروری است که در هنگام اندازه‌گیری pH در شاخه‌های مذکور دبی بار ورودی به آسیای میله‌ای برابر با ۳۰ t/h و همچنین دبی پالپ ورودی به آسیای گلوله‌ای با در نظر گرفتن بار در گردش، معادل ۲۲۵ t/h به دست آمد. همچنین درصد‌های جامد جریان‌های ورودی، سرریز و ته‌ریز هیدروسیکلون به ترتیب برابر با $۴۷/۴۵$ ، $۱۱/۸۵$ و $۷۸/۶۴$ درصد حاصل شد. بر این اساس، ابتدا مقدار ۲۵ کیلوگرم سود (NaOH) به عنوان ماده ردیاب برای تعیین زمان ماند ذرات در آسیای میله‌ای به شوت خوراک ورودی آن اضافه شد؛ و pH در خروجی آسیای میله‌ای در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری شد تا به pH اولیه برسد. برای تعیین زمان ماند ذرات در آسیای گلوله‌ای نیز همین مقدار سود به شوت خوراک ورودی آسیای گلوله‌ای (ته‌ریز هیدروسیکلون) اضافه شد و به ترتیب فوق در زمان‌های مختلف، pH در شاخه‌های ورودی و خروجی آسیا اندازه‌گیری شد تا به pH اولیه برسد. سپس با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی (شبیه‌سازی توزیع زمان ماند در مدارهای باز و بسته، ویرایش ۱/۱) توزیع زمان ماند [۴]، مقادیر متوسط زمان ماند ذرات در آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای به ترتیب برابر $۱۶/۶۸$ (حداکثر ۵۱ دقیقه و $۲/۰۷$ (حداکثر ۲۰ دقیقه) به دست آمد که نتایج شبیه‌سازی‌های انجام گرفته به ترتیب در شکل‌های (۲) و (۳) و جداول (۸) و (۹) ارائه شده است (ذکر این نکته لازم است که برای تعیین pH از دستگاه pH متر، پس از کالیبره شدن دستگاه به ترتیب از بافرهای ۷ و ۹ استفاده شد).

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود زمان ماند ذرات در آسیای میله‌ای به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از زمان ماند ذرات در آسیای گلوله‌ای است. این امر بدان معناست که ذرات، زمان اقامت بیشتری را در آسیای میله‌ای دارند و نسبت خردایش بالای آسیای میله‌ای (در مقایسه با آسیای گلوله‌ای) می‌تواند ناشی از آن باشد.

۸- نتایج و بحث

مدار آسیا در کارخانه فسفات اسفوردی از دو آسیای میله‌ای و گلوله‌ای تشکیل شده است. در طراحی اولیه، نسبت خردایش آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای به ترتیب ۲۳ و ۷/۵ در نظر گرفته شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده از نمونه‌گیری‌ها و آزمایش‌های انجام شده طی ۷ روز، نسبت خردایش این آسیاها به ترتیب ۶۴/۶۵ و ۱/۱۵ به‌دست آمد. این امر بدان معناست که آسیای میله‌ای دارای نسبت خردایشی بیش از مقدار طراحی شده دارد و ماده معدنی را بیش از حد جرد می‌کند. در نتیجه، d_{80} خروجی از آسیای میله‌ای؛ که همان خوراک ورودی به آسیای گلوله‌ای است، بیش از حد ریز و موجب آن است تا احتمال برخورد مؤثر گلوله-ذره-گلوله کاهش یابد. نتیجه این امر نسبت خردایش بسیار پایین (۱/۱۵) در آسیای گلوله‌ای است.

اندازه‌گیری زمان ماند ذرات در آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای نشان داد که میانگین این زمان برابر ۱۶/۶۸ (حداکثر ۵۱) و ۲/۰۷ (حداکثر ۲۰) دقیقه برای به ترتیب آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای است. این نتایج بر اختلاف زیاد زمان ماند در آسیای میله‌ای در مقایسه با آسیای گلوله‌ای دلالت دارد که می‌تواند توجیهی بر بالا بودن نسبت خردایش آن نیز باشد. بنابراین، به منظور برطرف شدن این مشکل با توجه به شرایط موجود، پیشنهاد می‌شود با افزایش دبی مواد ورودی به آسیای میله‌ای، زمان ماند ذرات در آسیای میله‌ای کاهش یابد تا از نسبت خردایش آسیای میله‌ای کاسته شده و ذرات درشت‌تری وارد آسیای گلوله‌ای شود و بدین ترتیب، نسبت خردایش آسیای گلوله‌ای نیز افزایش یابد.

از طرف دیگر، می‌توان اظهار داشت یکی از دلایل اصلی زمان ماند کم ذرات در آسیای گلوله‌ای، مقدار باردرگردش بالای مواد در مدار بسته آسیای گلوله‌ای-هیدروسیکلون (میانگین ۱۰۰۶/۶۴٪) است. به منظور رفع این مشکل باید نسبت به تغییر و اصلاح پارامترهای عملیاتی هیدروسیکلون (از قبیل تغییر فشار پالپ ورودی به هیدروسیکلون و قطر سرریز و یا اضافه کردن هیدروسیکلون دیگری به مدار خردایش) اقدام شود.

۹- خلاصه و نتیجه‌گیری

با توجه به مشکلات موجود در مدار خردایش کارخانه فسفات اسفوردی و تست‌ها و بررسی‌های انجام شده در این راستا، نتایج ذیل حاصل شد:

۱- بر اساس نتایج به‌دست آمده از نمونه‌گیری‌ها و آزمایش‌های انجام شده طی ۷ روز، نسبت خردایش آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای به ترتیب ۶۴/۶۵ و ۱/۱۵ به‌دست آمد.

۲- اندازه‌گیری زمان ماند ذرات در آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای نشان داد که میانگین این زمان برابر ۱۶/۶۸ (حداکثر ۵۱) و ۲/۰۷ (حداکثر ۲۰) دقیقه برای به ترتیب آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای است.

۳- یکی از دلایل اصلی زمان ماند کم ذرات در آسیای گلوله‌ای، مقدار باردرگردش بالای مواد در مدار بسته آسیای گلوله‌ای-هیدروسیکلون (میانگین ۱۰۰۶/۶۴٪) است که با تغییر و اصلاح پارامترهای عملیاتی هیدروسیکلون از قبیل تغییر فشار پالپ ورودی به هیدروسیکلون و قطر سرریز و یا اضافه کردن هیدروسیکلون دیگری به مدار خردایش می‌تواند برطرف شود.

۱۰- قدردانی

این پروژه در راستای قرارداد تحقیقاتی با مرکز تحقیقات مواد معدنی ایران-یزد انجام شد. لذا بدین وسیله از کمک‌های مرکز تقدیر و سپاسگزاری می‌شود.

۱۱- منابع

- [۱] نوع‌پرست، محمد، کنترل و مدل‌سازی سیستم‌های کانه‌آرایی، جزوه درسی، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی معدن، ۱۳۷۷.
- [۲] رضایی، بهرام، ۱۳۷۶، "تکنولوژی فرآوری مواد معدنی (خردایش و طبقه بندی)"، موسسه تحقیقاتی و انتشاراتی نور.
- [۳] نوع‌پرست، محمد و همکاران، ۱۳۸۶، "مطالعه و بررسی امکان خارج سازی آسیای گلوله‌ای از خط تولید کارخانه فسفات اسفوردی"، مرکز تحقیقات مواد معدنی ایران-یزد.
- [۴] کریمی، غلامحسین، طباطبایی، سید عباس و رفیعی مهرآبادی، امیرآرش و ...، ۱۳۸۲، "بررسی عملکرد کارخانه های فرآوری مواد معدنی فلزی استان یزد"، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، صفحات ۱۳۰-۱۰۱.
- [۵] جوادی، فرهاد، بنیسی، صمد، ۱۳۷۶، "نرم افزار شبیه‌سازی توزیع زمان ماند در مدارهای باز و بسته"، ویرایش ۱/۱، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

- Weiss, N.L., 1985, "SME Mineral Processing Handbook", SME Publishers. [۶]
- Wills, B.A., Napier-Munn, T., 2006, "Wills' Mineral Processing Technology", 7th Edition, Butterworth Heinemann, Boston. [۷]
- Bond, F.C., 1961, "Crushing & grinding calculations: Part I", British Chemical Engineering, Vol. 6, No. 6, pp.378-385. [۸]
- Barratt, D., Sherman, M., 2002, "Factors which influence the selection of comminution circuits", in Book entitled: Mineral Processing Plant Design, Practice and Control, edited by: Mular, A.L., Doug, N.H., Derek, J.B., SME Publishers, pp. 539-565. [۹]

۱۲- زیر نویس ها

-
- ¹ Residency Time Distribution
 - ² Plug Flow
 - ³ Perfect Mixing
 - ⁴ Smith