

بررسی عملکرد هیدروسیکلون‌های اولیه و ثانویه مدار خردایش کارخانه فسفات اسفوردی

علی دهقانی احمدآبادی^۱، ضیاءالدین پورکریمی^۲، محمد نوع‌پرست^{۳*}

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

^۲ کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد علوم و تحقیقات،

^۳ استاد دانشکده مهندسی معدن - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۶/۱۰/۳، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۸/۷/۷، تاریخ تصویب ۸۸/۸/۲۷)

چکیده

نظر به اهمیت موضوع طبقه‌بندی مواد در مدارهای خردایش، با نمونه‌گیری به مدت یک هفته از خوراک، سرریز و ته‌ریز هیدروسیکلون‌های اولیه و ثانویه موجود در مدار خردایش کارخانه فسفات اسفوردی، عملکرد این هیدروسیکلون‌ها بررسی شد. در این راستا ابتدا نمونه‌های تهیه شده تجزیه سرندي و پس از رسم نمودارهای دانه‌بندی بخش‌های مختلف (شامل خوراک، ته‌ریز و سرریز هیدروسیکلون‌های اولیه و ثانویه)، d_{80} آنها محاسبه شد. نتایج حاصل، d_{80} های میانگین بخش‌های مختلف خوراک، ته‌ریز و سرریز هیدروسیکلون اولیه را به دست داد که به ترتیب برابر ۲۳۸/۷، ۲۳۶/۵ و ۱۰۰/۹ میکرون و برای خوراک و ته‌ریز هیدروسیکلون ثانویه به ترتیب برابر ۱۰۰/۹ و ۹۴/۱ میکرون بودند. درباره هیدروسیکلون اولیه با رسم منحنی‌های توزیع و حد جدایش‌های حاصل از آنها، حد جدایش‌های واقعی و اصلاح شده به ترتیب برابر ۳۵ و ۴۵ میکرون به دست آمد، در حالی که بر اساس طراحی، این مقدار معادل ۱۰۰ میکرون در نظر گرفته شده است. با توجه به عملکرد نامطلوب این هیدروسیکلون، سعی شد تا با نرم‌افزارهای شبیه‌سازی بررسی شود. نتایج حاصل درباره هیدروسیکلون اولیه، حاکی از حد جدایش ۸۰ میکرونی و افت فشار ۱۹۲/۳۰ کیلوپاسکال در طبقه‌بندی ابعادی ذرات بود. در ادامه مقدار باردرگردش معادل ۹۳۱/۸۴ درصد به دست آمد (در طراحی اولیه کارخانه، این مقدار معادل ۱۵۰ درصد در نظر گرفته شده است) و مشخص شد که یکی از دلایل اصلی بالا بودن باردرگردش می‌تواند نرخ خوراک‌دهی بالا به هیدروسیکلون باشد. بنابراین برای رفع این مشکل، به بررسی نتایج احتمالی حاصل از اضافه کردن یک هیدروسیکلون به صورت سری و یا موازی در مدار خردایش به کمک نرم‌افزار BMCS پرداخته شد. نتایج حاصل از جانمایی هیدروسیکلون به صورت موازی دلالت بر به دست آمدن حد جدایش ۸۶ میکرون با افت فشار ۶۲/۹۱ کیلوپاسکال را داشت که برای مدار مطلوب است.

واژه‌های کلیدی: اسفوردی، فسفات، هیدروسیکلون، شبیه‌سازی

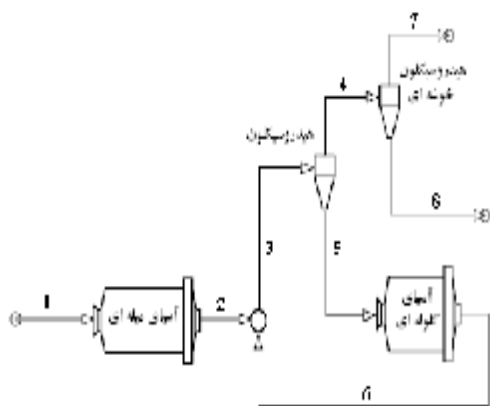
مقدمه

۱۵۰ میکرون، برای نرمة‌گیری به یک هیدروسیکلون ثانویه (از نوع خوشه‌ای) با حد جدایش ۱۰ میکرون پمپ می‌شود. سرریز این هیدروسیکلون با ابعاد ریزتر از ۱۰ میکرون، به عنوان باطله به سد باطله فرستاده و ته‌ریز آن نیز به عنوان خوراک واحد فلوتاسیون به آماده‌سازهای فلوتاسیون آپاتیت وارد می‌شود [۱].

در شکل (۱) فلوشیت مدار خردایش (آسیا) کارخانه فسفات اسفوردی نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که در شکل (۱)، جریان‌های ۷ و ۸ به ترتیب به سد باطله و سلول‌های فلوتاسیون منتقل می‌شوند.

در طراحی اولیه کارخانه، درصدهای جامد خوراک، سرریز و ته‌ریز هیدروسیکلون اولیه به ترتیب برابر ۲۵، ۴۵ و ۷۵ درصد و برای هیدروسیکلون ثانویه به ترتیب برابر ۱۸/۱، ۴/۲ و ۴۵ درصد در نظر گرفته شده است. با

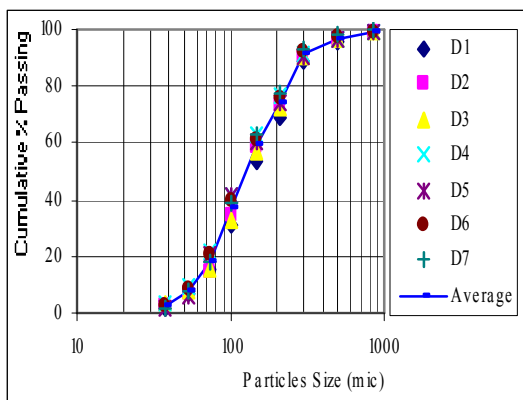
مجتمع معدنی فسفات اسفوردی در ۳۵ کیلومتری شمال غربی شهرستان بافق در استان یزد واقع است. در این مجتمع مواد معدنی پس از استخراج و بارگیری، به واحد سنگ‌شکنی کارخانه حمل می‌شوند. این مواد پس از دو مرحله خردایش و طبقه‌بندی توسط سرندي، در نهایت با ظرفیت ۵۷/۵ تن بر ساعت و d_{80} معادل ۱۴ میلی‌متر وارد آسیای میله‌ای می‌شوند. خروجی آسیای میله‌ای به شکل پالپ و با دانه‌بندی d_{80} معادل ۶۰۰ میکرون به هیدروسیکلون اولیه (با قطر ۵۰ سانتی‌متر و حد جدایش ۱۰۰ میکرون) پمپ می‌شود. ته‌ریز هیدروسیکلون با دانه‌بندی d_{80} معادل ۷۵۰ میکرون توسط یک آسیای گلوله‌ای که با هیدروسیکلون در مدار بسته قرار دارد، ذرات را تا رسیدن به ابعاد ریزتر از ۱۰۰ میکرون تحت خردایش قرار می‌دهد. سرریز هیدروسیکلون با دانه‌بندی ریزتر از



شکل ۱: فلوشیت مدار آسیای کارخانه فسفات اسفوردی.

جدول ۱: نتایج درصد جامد برای بخش‌های مختلف هیدروسیکلون‌ها.

شاخه روز	خوراک سیکلون اولیه	تهریز سیکلون اولیه	سرریز سیکلون اولیه	تهریز سیکلون ثانویه
D ₁	۵۹/۴۸	۸۰/۷۰	۲۶/۲۰	۶۸/۱۰
D ₂	۵۸/۱۷	۸۷/۲۰	۱۴/۴۰	۴۸/۵۰
D ₃	۶۳/۱۶	۸۲/۵۰	۲۰/۱۰	۶۸/۴۰
D ₄	۵۰/۸۹	۸۱/۸۵	۹/۵۰	۴۷/۲۰
D ₅	۵۱/۹۵	۸۴/۷۰	۹/۵۰	۶۶/۴۰
D ₆	۵۷/۷۲	۸۳/۱۰	۱۴/۴۰	۳۵/۳۰
D ₇	۶۲/۳۵	۸۵/۴۰	۱۷/۹۰	۳۸/۵۰
میانگین ن	۵۷/۶۷	۸۲/۶۴	۱۶/۰۰	۵۳/۲۰
انحراف معیار	۴/۴۵	۲/۰۸	۵/۵۳	۲۰/۱۱



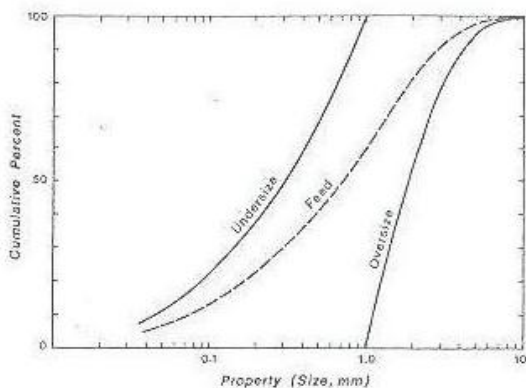
شکل ۲: نمودار دانه‌بندی نمونه‌های خوراک هیدروسیکلون اولیه.

نمونه‌گیری‌هایی که به مدت هفت روز از بخش‌های مختلف (از جمله، هیدروسیکلون‌های اولیه و ثانویه) کارخانه فسفات اسفوردی برای بررسی وضعیت خردایش مواد در آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای و بررسی عملکرد کلی مدار خردایش کارخانه صورت گرفت، مشخص شد، مقادیر درصد‌های جامد و دانه‌بندی‌های بخش‌های مختلف این هیدروسیکلون‌ها (اعم از خوراک، سرریز و تهریز) با مقادیر طراحی اولیه فاصله دارند. بنابراین سعی شد با توجه به نتایج حاصل از نمونه‌گیری‌هایی انجام شده طی هفت روز از خوراک، سرریز و تهریز این هیدروسیکلون‌ها، عملکرد آنها بررسی شود، که نتایج حاصل از این تحقیق در ادامه ارائه می‌شود.

محاسبه درصد‌های جامد و توزیع ابعادی بخش‌های مختلف هیدروسیکلون‌ها

برای بررسی عملکرد هیدروسیکلون‌های اولیه و ثانویه موجود در مدار خردایش کارخانه فسفات اسفوردی، با نمونه‌گیری به مدت یک هفته از خوراک، سرریز و تهریز این هیدروسیکلون‌های، درصد‌های جامد و نیز توزیع ابعادی بخش‌های مختلف محاسبه شد. میانگین درصد‌های جامد اندازه‌گیری شده خوراک، سرریز و تهریز هیدروسیکلون اولیه به ترتیب برابر ۵۷/۶۷، ۱۶/۰۰ و ۸۳/۶۴ درصد و با انحراف معیارهای ۴/۴۵، ۵/۵۳ و ۲/۰۸ و برای تهریز هیدروسیکلون ثانویه برابر، ۵۳/۲۰ درصد و با انحراف معیار ۲۰/۱۱ به دست آمد. انحراف معیار حاصل برای بخش‌های مختلف هیدروسیکلون اولیه، نشان‌دهنده همبستگی مناسب میان درصد‌های جامد روزهای مختلف است. اما انحراف معیار بالای تهریز هیدروسیکلون ثانویه، بیانگر خطای بالای نمونه‌گیری و یا شرایط عملیاتی متفاوت در روزهای مختلف است. درباره توزیع ابعادی بخش‌های مختلف، با میانگین‌گیری از نتایج به دست آمده برای هر بخش (طی مدت هفت روز) مقادیر d_{80} ‌های میانگین برای خوراک، سرریز و تهریز هیدروسیکلون اولیه به ترتیب برابر ۲۳۸/۷، ۱۰۰/۹ و ۲۳۶/۵ میکرون و با انحراف معیارهای ۱۱/۰۹، ۱۵/۹۰ و ۱۶/۸۱ و برای تهریز هیدروسیکلون ثانویه برابر ۹۴/۱ میکرون و با انحراف معیار ۱۲/۳۴ به دست آمد. نتایج حاصل از این محاسبات در جدول (۱) و شکل‌های (۲)، (۳)، (۴) و (۵) ارائه شده است.

هیدروسیکلون اولیه در طبقه‌بندی ذرات مشخص است. زیرا همان‌طور که در شکل (۷) ملاحظه می‌شود، توزیع دانه‌بندی‌های خوراک و ته‌ریز این هیدروسیکلون در عمل مشابه بوده و حتی در دانه‌بندی‌های ریزتر از حد جدایش (۱۰۰ میکرون، که در عمل باید موادی با این ابعاد، در ته‌ریز هیدروسیکلون ظاهر نشوند)، در حدود ۳۵ درصد ذرات ریزتر از ۱۰۰ میکرون ظاهر شده‌اند (بخش اعظم از ذراتی که باید به سرریز هیدروسیکلون وارد شوند، به دلیل شرایط عملیاتی نامناسب، به ته‌ریز هیدروسیکلون می‌روند).

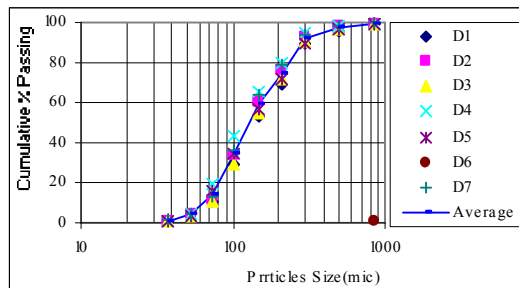


شکل ۶: منحنی‌های قابلیت جدایش برای دو مجموعه درشت‌تر و ریزتر از ابعاد خوراک [۲].

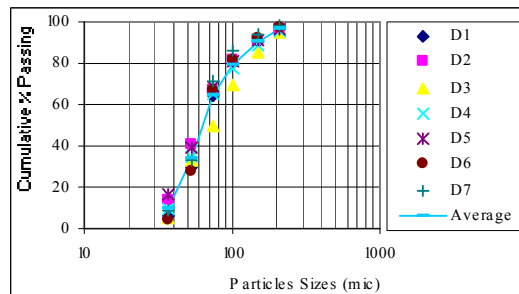
همان‌گونه که اشاره شد، دانه بندی خوراک و ته ریز هیدروسیکلون ثانویه، با تجزیه سردی نمونه‌ها و با نمونه گیری به مدت هفت روز مقایسه شد؛ (شکل ۸)، که با توجه به تجزیه نشدن سردی نمونه‌ها تا ابعاد ریزتر از حد جدایش هیدروسیکلون، امکان بررسی عملکرد آن وجود نداشت. اما همان‌گونه که در شکل (۸) نیز مشاهده می‌شود، در دانه‌بندی‌های درشت‌تر از ۷۰ میکرون، توزیع دانه‌بندی مواد در ته‌ریز از خوراک هیدروسیکلون کمتر شده است که احتمال دارد این موضوع ناشی از سایش بالای مواد در داخل این هیدروسیکلون (شامل خوشه‌های ۳۶ تایی) در اثر فشار نسبتاً زیاد پالپ ورودی به آن باشد.

محاسبه بازدهی جدایش هیدروسیکلون اولیه

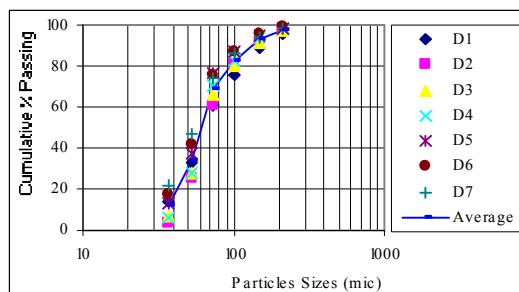
متداول‌ترین روش برای نمایش بازدهی جدایش در هیدروسیکلون‌ها، استفاده از منحنی توزیع (شکل ۹) است که محور افقی آن، نشان دهنده ابعاد و محور قائم نمایانگر درصدی از بخش‌های مختلف دانه‌بندی است که از ته‌ریز خارج شده است [۳]. حد جدایش هیدروسیکلون به طور



شکل ۳: نمودار دانه‌بندی نمونه‌های ته‌ریز هیدروسیکلون اولیه.



شکل ۴: نمودار دانه‌بندی نمونه‌های سرریز هیدروسیکلون اولیه.



شکل ۵: نمودار دانه‌بندی نمونه‌های ته‌ریز هیدروسیکلون ثانویه.

تحلیل نتایج حاصل از نمونه‌گیری‌ها

شکل (۶) عملکرد ایده‌آل یک وسیله طبقه‌بندی مواد را در طبقه‌بندی خوراک به دو بخش سرریز و ته‌ریز نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در یک جدایش ایده‌آل، خوراک پس از طبقه‌بندی، به بخش (ته‌ریز) با دانه‌بندی ۱۰۰ درصد درشت‌تر از حد جدایش و بخشی دیگر (سرریز) با دانه‌بندی ۱۰۰ درصد ریزتر از حد جدایش تقسیم می‌شوند [۲].

در طراحی اولیه کارخانه فسفات اسفوردی، حد جدایش هیدروسیکلون‌های اولیه و ثانویه به ترتیب معادل ۱۰۰ و ۱۰ میکرون در نظر گرفته شده است [۱]. درباره هیدروسیکلون اولیه با مقایسه نمودار دانه‌بندی‌های خوراک، ته‌ریز و سرریز در شکل (۷) (به عنوان منحنی قابلیت جدایش هیدروسیکلون اولیه)، عملکرد نامطلوب

بدین منظور با توجه به میانگین درصد‌های جامد محاسبه شده خوراک، تهریز و سرریز هیدروسیکلون اولیه (۵۷/۶۷، ۸۳/۶۴ و ۱۶/۰۰ درصد)، رقت پالپ در این بخش‌ها به ترتیب معادل ۰/۷۳۴، ۰/۱۹۷ و ۵/۲۵ به دست آمد. حال با استفاده از روابط موازنه وزنی ۱ و ۲ وزن جامد مواد موجود در شاخه‌های تهریز و سرریز محاسبه شد [۵]:

$$F = U + O \quad (1)$$

$$D_f F = D_u U + D_o O \quad (2)$$

که در آن‌ها:

F، U و O: تناژ جامد به ترتیب خوراک، تهریز و سرریز

D_f ، D_u و D_o : رقت پالپ به ترتیب خوراک، تهریز و سرریز

وزن جامد مواد موجود در تهریز و سرریز به ترتیب معادل ۸۹/۳۷ و ۱۰/۶۳ درصد خوراک ورودی هیدروسیکلون به دست آمد. با محاسبه توزیع دانه‌بندی‌های بازسازی شده خوراک، تهریز و سرریز هیدروسیکلون و نسبت آب موجود در تهریز به آب موجود در بار اولیه (مقداری از بار اولیه که بدون طبقه‌بندی به تهریز می‌روند) که معادل ۲۳/۹۹ درصد حاصل شد، ضریب توزیع هیدروسیکلون محاسبه شد. سپس با استفاده از رابطه ۳، ضریب توزیع اصلاح شده هیدروسیکلون محاسبه شد (جدول ۲).

$$Y' = \frac{Y - R}{1 - R} \quad (3)$$

که در آن:

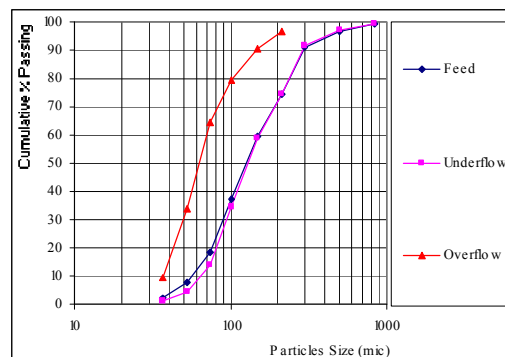
Y': ضریب توزیع اصلاح شده (٪)

Y: ضریب توزیع (٪)

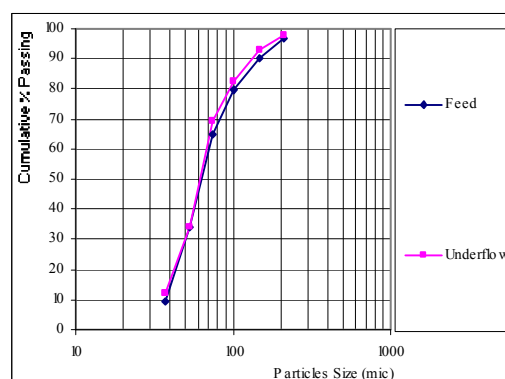
R: نسبت آب موجود در تهریز به آب موجود در بار اولیه (٪)

همان‌طور که ذکر شد، حد جدایش این هیدروسیکلون بر اساس اطلاعات طراحی کارخانه، معادل ۱۰۰ میکرون در نظر گرفته شده است، این بدان معنی است که ذراتی با دانه‌بندی ۱۰۰ میکرون با احتمال یکسان (۵۰ درصد)، به سرریز یا تهریز هیدروسیکلون می‌روند. اما با توجه به نتایج واقعی (حاصل از این بررسی) که در جدول (۲) آورده شده است، ذرات با ابعاد ۱۰۰ میکرون، با احتمال ۹۵ درصد به تهریز و تنها با احتمال ۵ درصد به سرریز می‌روند. همان‌گونه که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، حد جدایش این هیدروسیکلون در حال حاضر در عمل در حدود ۴۰ میکرون است، که این موضوع

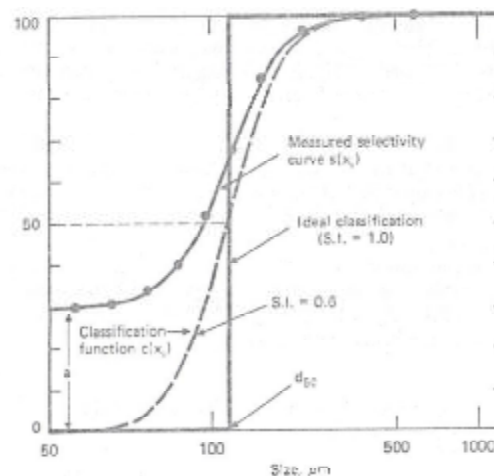
معمول معادل ابعاد ذراتی است که ۵۰ درصد آنها از تهریز تخلیه شده‌اند (یعنی احتمال ورود ذراتی با این ابعاد در سرریز و تهریز یکسان است) و آن را با d_{50} نشان می‌دهند [۴].



شکل ۷: مقایسه دانه‌بندی‌های (متوسط ۷ روز نمونه‌گیری) خوراک، تهریز و سرریز هیدروسیکلون اولیه.



شکل ۸: مقایسه دانه‌بندی‌های (متوسط ۷ روز نمونه‌گیری) خوراک و تهریز هیدروسیکلون ثانویه.



شکل ۹: منحنی‌های توزیع اصلاح شده، اصلاح نشده و ایده‌آل برای هیدروسیکلون [۳].

دلاله بر عملکرد مناسب این هیدروسیکلون در طبقه بندی ذرات دارد.

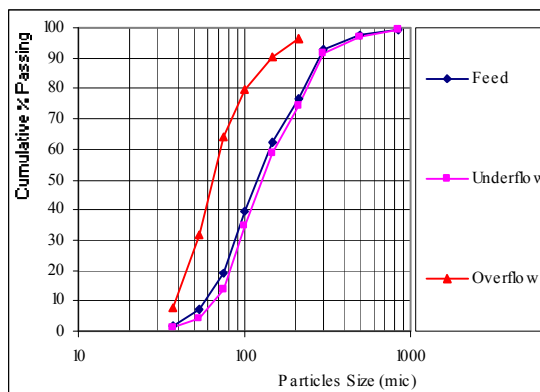
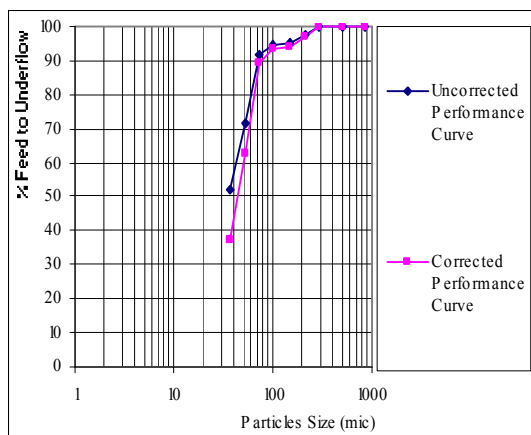
بررسی عملکرد هیدروسیکلون ها با مدل پلیت مقدمه

پلیت در سال ۱۹۷۶ میلادی، مدلی را برای هیدروسیکلون ها، بر اساس داده های آزمایشگاهی گسترده ای ارائه کرد. این مدل، عملیات هیدروسیکلون ها را با استفاده از چهار معادله تجربی توصیف می کند. در این مدل، شاخص های اصلی عملکرد هیدروسیکلون شامل حد

جدایش تصحیح شده، تقسیم جریان بین سرریز و تهریز، تیزی یا دقت جدایش و افت فشار است [۶]. این پارامترها بر عملکرد اجرایی هیدروسیکلون را می توان با ترسیم بازبایی جامد (برای تمامی ذرات) به تهریز هیدروسیکلون بر حسب یک پارامتر مشخص، مانند شکل (۹) نشان داد. نقاط داده با نمونه برداری از جریان های ورودی و خروجی هیدروسیکلون و تعیین دانه بندی هر نمونه به دست می آیند. منحنی جدایش که منحنی انتخاب شونده گی و یا ترامپ نیز نامیده می شود.

جدول ۲: تعیین مقادیر ضریب توزیع هیدروسیکلون اولیه.

ابعاد (میکرون)	وزن (%)		وزن نسبت به بار اولیه (%)		دانه بندی بازسازی شده بار اولیه (%)	ضریب توزیع (%)	اصلاح شده ضریب توزیع (%)
	تهریز	سرریز	تهریز	سرریز			
۸۴۰	۰/۷۱	۰/۰۰	۰/۶۴	۰/۰۰	۰/۶۴	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰
۵۰۰	۲/۱۲	۰/۰۰	۱/۸۹	۰/۰۰	۱/۸۹	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰
۲۹۷	۵/۵۱	۰/۰۰	۴/۹۲	۰/۰۰	۴/۹۲	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰
۲۱۰	۱۷/۲۸	۳/۴۷	۱۵/۴۵	۰/۳۷	۱۵/۸۲	۹۷/۶۷	۹۶/۹۴
۱۴۹	۱۵/۵۳	۶/۲۰	۱۳/۸۸	۰/۶۶	۱۴/۵۴	۹۵/۴۷	۹۴/۰۳
۱۰۰	۲۴/۱۸	۱۰/۹۲	۲۱/۶۱	۱/۱۶	۲۲/۷۷	۹۴/۹۰	۹۳/۲۹
۷۴	۲۰/۷۹	۱۵/۵۷	۱۸/۵۸	۱/۶۵	۲۰/۳۴	۹۱/۸۲	۸۹/۲۴
۵۳	۹/۶۷	۳۲/۰۲	۸/۶۵	۳/۴۰	۱۲/۰۵	۷۱/۷۵	۶۲/۸۳
۳۷	۳/۱۳	۲۴/۰۹	۲/۸۰	۲/۵۶	۵/۳۶	۵۲/۱۸	۳۷/۰۹
-۳۷	۱/۰۸	۷/۷۲	۰/۹۷	۰/۸۲	۱/۷۹	۵۴/۰۵	۳۹/۵۴
جمع	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۸۹/۳۷	۱۰/۶۳	۱۰۰/۰۰	-	-



شکل ۱۱: منحنی های توزیع محاسبه شده هیدروسیکلون اولیه.

شکل ۱۰: مقایسه دانه بندی های (متوسط ۷ روز نمونه گیری) خوراک، تهریز و سرریز بازسازی شده هیدروسیکلون اولیه.

پارامتر، شاخص طبقه‌بندی حقیقی ذرات پس از اعمال تصحیحات مربوط به مدار کوتاه شدن ذرات است. تقسیم جریان، نسبت آهنگ ته‌ریز حجمی به آهنگ سرریز حجمی است و با استفاده از معادله زیر به صورت رگرسیون قابل محاسبه است:

$$S = \frac{1.9 \left(\frac{D_u}{D_o} \right)^{3.31} h^{0.54} (D_u^2 + D_o^2)^{0.36} \exp(0.0054\phi)}{H^{0.24} D_c^{1.11}} \quad (۶)$$

که در آن S ، تقسیم جریان (بدون بعد) و H افت فشار در طول سیکلون است که با ارتفاع دوغاب خوراک بر حسب متر بیان می‌شود. دقت جدایش (m)، نشان دهنده مطلوب بودن و یا چگونگی عملکرد هیدروسیکلون در جدا کردن ذرات ریز و درشت از یکدیگر است. این پارامتر با استفاده از رابطه زیر به صورت رگرسیون قابل محاسبه است:

$$m = 1.94 \exp\left(-1.58 \frac{S}{S+1}\right) \left(\frac{D_c^2 h}{Q}\right)^{0.15} \quad (۷)$$

هیدروسیکلونی با $m > 3$ ، جدایشی تیز یا دقیق دارد. مقدار $m < 2$ بیانگر جدایش نامناسب و کم دقت است. افت فشار (P) بر حسب Kpa، پارامتر دیگری است که برای طراحی سیستم انتقال با یک ظرفیت معین یا تعیین ظرفیت برای هیدروسیکلون‌های موجود مورد نیاز است و باید مشخص شود. این پارامتر همچنین برای محاسبه تقسیم جریان لازم است.

$$P = \frac{1.88 Q^{1.78} \exp(0.0055\phi)}{D_c^{0.37} D_i^{0.94} h^{0.28} (D_u^2 + D_o^2)^{0.87}} \quad (۸)$$

بازیابی مایع به ته‌ریز (R_f)، با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R_f = \frac{\frac{S}{(1+S)} - \frac{R_s \phi}{100}}{1 - \frac{\phi}{100}} \quad (۹)$$

که در آن R_s ، بازیابی قسمت جامد خوراک به ته‌ریز هیدروسیکلون است.

نتایج حاصل از مدل پلیت برای هیدروسیکلون‌های اولیه و ثانویه اسفوردی

برای بررسی عملکرد هیدروسیکلون‌های اولیه و ثانویه موجود در مدار خردایش کارخانه فسفات اسفوردی با

(شکل ۹)، نموداری است از مدلی ریاضی که به نقاط آزمایشگاهی برازش داده می‌شود و عملکرد هیدروسیکلون را بر حسب حد جدایش، بازیابی سیال به ته‌ریز هیدروسیکلون و دقت جدایش، مشخص می‌کند. برای تجزیه و تحلیل فرآیند و شبیه‌سازی، پلیت (۱۹۷۶) رابطه زیر را ارائه کرد [۷، ۸]:

$$R_i = R_f + (1 - R_f) \times [1 - \exp(-0.693 \times (x_i / d_{50c})^m)] \quad (۴)$$

که در آن:

R_i : بازیابی جامد به ته‌ریز هیدروسیکلون برای طبقه اندازه m

R_f : بازیابی مایع به ته‌ریز هیدروسیکلون

x_i : اندازه ذره مشخصه برای طبقه اندازه m

d_{50c} : حد جدایش تصحیح‌شده

m : دقت جدایش

سه پارامتر مدل پلیت، R_f ، d_{50c} و m شاخص‌های عملکرد طبقه‌بندی هستند که با استفاده از برازش غیرخطی حداقل مربع‌ها می‌توان آنها را به طور تقریبی به دست آورد. حد جدایش تصحیح شده (d_{50c})، اندازه‌ای است که احتمال وارد شدن ذره‌ای با آن اندازه به جریان‌های سرریز یا ته‌ریز هیدروسیکلون، به دلیل طبقه‌بندی حقیقی، یکسان است. حد جدایش تصحیح شده به صورت زیر با متغیرهای هندسی هیدروسیکلون مربوط می‌شود [۶]:

$$d_{50c} = \frac{50.5 D_c^{0.46} D_i^{0.6} D_o^{1.21} \exp(0.063\phi)}{D_u^{0.71} h^{0.38} Q^{0.45} (\rho_s - \rho)^{0.5}} \quad (۵)$$

که در آن:

D_c : قطر داخلی سیکلون در پایین لوله گرداب (cm)

D_i : قطر داخلی ورودی سیکلون (cm)

D_o : قطر داخلی سرریز سیکلون (cm)

D_u : قطر داخلی ته‌ریز سیکلون (cm)

h : ارتفاع آزاد گرداب سیکلون (cm)

Q : آهنگ جریان حجمی خوراک به سیکلون (Lit/min)

ϕ : قسمت یا کسر حجمی جامد خوراک (/.)

ρ_s : چگالی جامد (gr/cm^3)

ρ : چگالی مایع (gr/cm^3)

حد جدایش تصحیح شده (d_{50c})، اهمیت بیشتری نسبت به حد جدایش تصحیح نشده (d_{50}) دارد، زیرا این

داده شد، استفاده شد. این مدل به این ترتیب است
[۳ و ۹]:

$$\text{Log}(d_{50}) = (k_1 * D_o) - (k_2 * D_u) + (k_3 * D_i) + (k_4 * \varphi) - (k_5 * Q) + k_6 \quad (10)$$

که در آن:

$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ ضرایب ثابت و برابر به ترتیب $۰/۰۴۱۸, ۰/۰۵۷۶, ۰/۰۳۶۶, ۰/۰۲۹۹, ۰/۰۰۰۰۵$ و $۰/۰۸۰۶$ ، D_o, D_u, D_i به ترتیب، قطر دهانه‌های سرریز، ته‌ریز و ورودی هیدروسیکلون بر حسب سانتی متر، φ و Q نیز به ترتیب، درصد جامد و تناژ (بر حسب لیتر بر دقیقه) خوراک ورودی به هیدروسیکلون است. با جای‌گذاری مقادیر پارامترها، حد جدایش حاصل برای این هیدروسیکلون، معادل $۱۵۹/۱۱$ میکرون به دست آمد. با نگاهی به مدل‌های ارائه شده، مشاهده می‌شود که در این مدل‌ها، تنها پارامترهای فیزیکی (شامل قطر بخش‌های مختلف) و عملیاتی (نظیر نرخ خوراک‌دهی، درصد جامد خوراک ورودی، فشار پالپ ورودی و غیره) هیدروسیکلون بررسی می‌شود و موضوع اصلی، یعنی دانه‌بندی خوراک ورودی به هیدروسیکلون، مدنظر قرار نمی‌گیرد.

بنابراین برای رفع این مشکل، سعی شد از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی مدارهای خردایش (نرم‌افزار BMCS) که در آنها برای بررسی عملکرد مدارهای خردایش و نیز هیدروسیکلون‌ها دانه‌بندی بخش‌های مختلف مدار خردایش را نیز در نظر می‌گیرند، استفاده شود [۱۰].

در حقیقت این نرم‌افزار فوق برای شبیه‌سازی مدار خردایش آسیاهای گلوله‌ای و پیش‌بینی عملکرد آنها است، که با ارائه داده‌های ورودی به آن شامل دی‌ها (جامد و مایع)، توزیع دانه‌بندی و وزن مخصوص خوراک ورودی به مدار، توابع شکست و انتخاب صنعتی خوراک آسیا، زمان ماند مواد در داخل آسیا، پارامترهای هندسی هیدروسیکلون و غیره اقدام به شبیه‌سازی و بررسی عملکرد مدار خردایش کارخانه می‌کند. از مزیت‌های دیگر این نرم‌افزار، توانایی آن در بررسی عمل کرد هیدروسیکلون‌های موجود در مدار خردایش مورد نظر است. در این بررسی پس از وارد کردن داده‌های مورد نیاز نرم‌افزار و اجرای برنامه، مقادیر پارامترهای شبیه‌سازی

استفاده از مدل پلیت، متغیرهای فیزیکی (شامل قطرهای داخلی بدنه، ورودی، سرریز و ته‌ریز هیدروسیکلون و نیز ارتفاع آزاد گرداب در داخل هیدروسیکلون) و عملیاتی (شامل نرخ آهنگ خوراک‌دهی، چگالی جامد خوراک ورودی و افت فشار در داخل هیدروسیکلون) برای این هیدروسیکلون‌ها، در کارخانه اندازه‌گیری شد. سپس با جای‌گذاری مقادیر اندازه‌گیری شده، در روابط مربوط به مدل پلیت، مقادیر پارامترهای این مدل شامل R_f, S, d_{50c} ، m و P محاسبه شد که مقادیر آنها برای هیدروسیکلون‌های اولیه و ثانویه در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳: پارامترهای محاسبه شده مدل پلیت برای هیدروسیکلون‌های مدار خردایش کارخانه.

پارامترهای مدل پلیت	هیدروسیکلون اولیه	هیدروسیکلون ثانویه
R_f	-	-
$d_{50c} (\mu)$	۶۱۶/۶۶	۳۶/۴۶
S	۰/۶۰	۰/۰۸
m	۲/۲۲	۲/۷۴
P (Kpa)	۱۷۶/۶۹	۱۲۵/۵۳

همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، مقدار m در هیدروسیکلون ثانویه موجود در مدار خردایش کارخانه، معادل $۲/۷۴$ به دست آمد که بیانگر جدایشی تقریباً تیز یا دقیق برای ذرات است. اما درباره حد جدایش این هیدروسیکلون، به نظر می‌رسد که مقدار $۳۶/۴۶$ میکرون محاسبه شده، در مقایسه با مقدار طراحی اولیه کارخانه (۱۰ میکرون) چندان قابل اطمینان نیست.

مقدار m برای هیدروسیکلون اولیه معادل $۲/۲۲$ به دست آمد که دلالت بر جدایشی به نسبت نامناسب و کم دقت ذرات در این هیدروسیکلون دارد. حد جدایش به دست آمده برای ذرات در این هیدروسیکلون، معادل $۶۱۶/۶۶$ میکرون است و همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، d_{50} محاسبه شده از این روش، بسیار زیاد و با توجه به محدوده دانه‌بندی خوراک هیدروسیکلون منطقی است). بنابراین سعی شد از روش دیگری برای محاسبه حد جدایش این هیدروسیکلون استفاده شود، بنابراین از مدل لینچ (Lynch et al. 1977) که برای هیدروسیکلون‌های کرب با قطر $۵۰/۸$ سانتی‌متر با پالپی دولومیتی توسعه

از طبقه‌بندی ذرات، سرریز آن به هیدروسیکلون ثانویه و ته‌ریز آن نیز به همراه ته‌ریز هیدروسیکلون اولیه به آسیای گلوله‌ای برگشت داده می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی این مدار در جدول (۵) ارائه شده است که بر این اساس، هیدروسیکلون‌های این مدار حد جدایش‌هایی معادل ۱۵۹ و ۷۱ میکرون و افت فشارهایی به ترتیب معادل ۳۷۲/۱۲ و ۱۸۸/۸۹ کیلوپاسکال خواهند داشت. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، کاهش افت فشار داخل هیدروسیکلون دوم چندان محسوس نیست و از طرف دیگر حد جدایش ذرات در این هیدروسیکلون به ۷۱ میکرون کاهش یافته است که احتمال دارد ناشی از سایش بالای پالپ در داخل این هیدروسیکلون‌ها در اثر فشار بالای پالپ ورودی به آنها باشد.

جدول ۵: پارامترهای شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار BMCS برای حالت سری.

مقادیر شبیه‌سازی شده برای		پارامترهای مدل پلیت
هیدروسیکلون ۱	هیدروسیکلون ۲	
۰/۱۰	۰/۱۳	R_f
۱۵۹	۷۱	$d_{50c} (\mu)$
۰/۴۰	۰/۴۱	S
۲/۳۸	۲/۴۸	m
۳۷۲/۱۲	۱۸۸/۸۹	P (Kpa)

جانمایی هیدروسیکلون به صورت موازی

برای بررسی نتایج حاصل از اضافه کردن هیدروسیکلون به صورت موازی در مدار خردایش کارخانه، این مدار نیز با استفاده از نرم‌افزار BMCS مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصل از این شبیه‌سازی (جدول ۶) مشاهده می‌شود که هیدروسیکلون‌های موجود در این مدار حد جدایشی معادل ۸۶ میکرون و افت فشاری معادل ۶۲/۹۱ کیلوپاسکال خواهند داشت و ملاحظه می‌شود با اضافه کردن این هیدروسیکلون به مدار خردایش، شرایط عملیاتی کارخانه به شرایط طراحی اولیه نزدیک‌تر می‌شود.

همچنین این نرم افزار قادر به شبیه‌سازی جریان‌های (تناژهای جامد و آب و درصد جامد) بخش‌های مختلف مدار خردایش کارخانه از جمله خوراک، سرریز و ته‌ریز هیدروسیکلون‌ها است. در جداول (۷) و (۸)، نتایج حاصل

شده برای این هیدروسیکلون طبق جدول (۴) به دست آمد.

با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی و حد جدایش (۸۰ میکرون) محاسبه شده (جدول ۴)، ملاحظه می‌گردد که هیدروسیکلونی با مشخصات هندسی موجود در کارخانه و شرایط خوراک‌دهی و دانه‌بندی بار ورودی به آن و مقدار m معادل ۲/۴۷، دقت جدایشی به نسبت مناسب دارد.

جدول ۴: پارامترهای شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار BMCS برای هیدروسیکلون اولیه.

مقادیر شبیه‌سازی شده برای هیدروسیکلون اولیه	پارامترهای مدل پلیت
۰/۱۱	R_f
۸۰	$d_{50c} (\mu)$
۰/۴۱	S
۲/۴۷	m
۱۹۲/۳۰	P (Kpa)

از طرف دیگر افت فشار در داخل این هیدروسیکلون معادل ۱۹۲/۳۰ کیلوپاسکال به دست آمد و با توجه به اینکه در طراحی اولیه کارخانه این مقدار افت فشار، معادل ۶۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است، به نظر می‌رسد که این موضوع ناشی از باردهی بیش از حد به هیدروسیکلون است [۱۲، ۱۱]. بنابراین احتمال دارد بتوان با اضافه کردن هیدروسیکلون دیگری به صورت سری یا موازی در مدار خردایش کارخانه برای طبقه‌بندی بهتر مواد، مشکل افت فشار زیاد (در نتیجه مشکل جدایش نامناسب مواد) در داخل هیدروسیکلون را رفع کرد [۱۳، ۱۴ و ۱۵]. بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده، امکان بهبود شرایط عملیاتی هیدروسیکلون (به ویژه نرخ خوراک‌دهی به آن) و دستیابی به حد جدایشی معادل ۱۰۰ میکرون وجود دارد.

شبیه‌سازی و بررسی عملکرد هیدروسیکلون پیشنهادی

جانمایی هیدروسیکلون به صورت سری

در این حالت هیدروسیکلونی مشابه به صورت سری بعد از هیدروسیکلون اولیه قرار می‌گیرد، به گونه‌ای که سرریز هیدروسیکلون اولیه وارد این هیدروسیکلون و پس

به مدت یک هفته از خوراک، سرریز و ته‌ریز هیدروسیکلون و تعیین درصد‌های وزنی جامد بخش‌های ذکر شده برای روزهای مختلف، رقت پالپ در این شاخه‌ها محاسبه و با استفاده از فرمول زیر مقادیر بار در گردش برای روزهای مختلف تعیین شد (جدول ۹) [۵].

$$\%CL = \left(\frac{D_f - D_o}{D_u - D_f} \right) * 100 \quad (11)$$

که در آن:

D_f ، D_o و D_u : رقت پالپ به ترتیب در خوراک، سرریز و ته‌ریز هیدروسیکلون،
 CL : درصد بار در گردش،

جدول ۸: نتایج شبیه‌سازی موازنه جرم مدار جانمایی موازی.

نام جریان	تناژ جامد (t/h)	درصد جامد	تناژ آب (t/h)
ورودی مدار	۵۷/۵۰	۶۰/۰۰	۳۸/۳۰
خوراک هیدروسیکلون	۲۹۵/۳۲	۵۲/۵۸	۲۶۶/۳۰
سرریز هیدروسیکلون	۵۷/۴۸	۲۱/۴۲	۲۱۰/۸۰
ته‌ریز هیدروسیکلون	۲۳۷/۸۵	۸۱/۰۸	۵۵/۵۰
خروجی آسیای گلوله‌ای	۲۳۷/۸۵	۸۱/۰۸	۵۵/۵۰

جدول ۹: مقادیر محاسبه شده بار در گردش در روزهای مختلف.

روزهای نمونه‌گیری	مقادیر 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	۹۳۱/۸۴

با توجه به جدول (۹) ملاحظه می‌شود که مقدار میانگین بار در گردش معادل ۹۳۱/۸۴ درصد و با انحراف معیار ۲۰۸/۲۶ به دست می‌آید (با حذف داده روز اول به عنوان داده پراکنده)، مقدار میانگین بار در گردش معادل ۱۰۰۶/۶۴ درصد و با انحراف معیار ۱۲۰/۸۱ به دست می‌آید (این مقدار در طراحی اولیه کارخانه، معادل ۱۵۰ درصد در نظر گرفته شده است). بنابراین مقایسه این

از شبیه‌سازی جریان‌های مختلف مدار خردایش برای حالت‌های سری و موازی آورده شده است. در طراحی اولیه کارخانه، درصد جامدهای خوراک، سرریز و ته‌ریز هیدروسیکلون اولیه به ترتیب معادل ۴۵، ۲۵ و ۷۵ درصد در نظر گرفته شده است و مشاهده می‌شود که درصد‌های جامد (۵۲/۵۸، ۲۱/۴۲ و ۸۱/۰۸ درصد) حاصل از جانمایی هیدروسیکلون به صورت موازی در مدار خردایش به حالت طراحی نزدیک‌تر است. بنابراین با توجه به نتایج حاصل، ملاحظه می‌شود که پیشنهاد قرارگیری هیدروسیکلون به صورت موازی در مدار خردایش کارخانه منطقی‌تر از حالت قرارگیری آن به صورت سری است.

جدول ۶: پارامترهای شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار BMCS برای حالت موازی.

پارامترهای مدل پلیت	مقادیر شبیه‌سازی شده برای هیدروسیکلون‌های موازی
R_f	۰/۲۱
$d_{50c} (\mu)$	۸۶
S	۰/۵۲
m	۲/۵۰
P (Kpa)	۶۲/۹۱

جدول ۷: نتایج شبیه‌سازی موازنه جرم مدار جانمایی سری.

نام جریان	تناژ جامد (t/h)	درصد جامد	تناژ آب (t/h)
ورودی مدار	۵۷/۵۰	۶۰/۰۰	۳۸/۳۰
خوراک هیدروسیکلون ۱	۶۶۰/۱۲	۷۰/۹۸	۲۶۹/۸۹
سرریز هیدروسیکلون ۱	۲۸۸/۴۰	۵۴/۳۹	۲۴۱/۸۳
ته‌ریز هیدروسیکلون ۱	۳۷۱/۷۲	۹۲/۹۸	۲۸/۰۶
سرریز هیدروسیکلون ۲	۵۷/۵۰	۲۱/۴۳	۲۱۰/۷۸
ته‌ریز هیدروسیکلون ۲	۲۳۰/۹۰	۸۸/۱۵	۳۱/۰۵
خروجی آسیای گلوله‌ای	۶۰۲/۶۲	۹۱/۰۷	۵۹/۱۱

محاسبه بار در گردش در مدار آسیا

نتایج حاصل از بررسی‌های ذکر شده، گویای افت فشار بالا در داخل هیدروسیکلون و در نتیجه نرخ خوراک‌دهی بالا به آن است. بنابراین برای بررسی این موضوع و نیز میزان صحت آن، مقادیر بار در گردش در مدار بسته آسیای گلوله‌ای- هیدروسیکلون با نمونه‌گیری

با مقدار ۱۰۰ میکرون طراحی اولیه) را در شرایط فعلی برای هیدروسیکلون اولیه ارزیابی کرد. اما بر اساس نتایج حاصل از بازدهی جدایش مواد در داخل این هیدروسیکلون (شکل ۱۱)، ملاحظه گردید که حد جدایش واقعی این سیکلون در شرایط فعلی حدود ۴۰ میکرون است. از طرف دیگر افت فشارهای محاسبه شده از روش‌های مختلف، گویای نرخ خوراک‌دهی بالای مواد به داخل هیدروسیکلون بود که برای بررسی میزان صحت این موضوع، بار درگرددش در مدار بسته آسیای گلوله‌ای با هیدروسیکلون مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر بار درگرددش محاسبه شده (با میانگین ۹۳۱/۸۴ درصد برای هفت روز نمونه‌گیری)، تأییدی بر ادعای فوق و میزان خوراک‌دهی بالا به هیدروسیکلون بود.

سیس برای بهبود وضعیت فعلی مدار خردایش پیشنهاد شد که هیدروسیکلون دیگری به صورت سری یا موازی با هیدروسیکلون اولیه، عمل طبقه‌بندی ذرات را انجام دهند. بنابراین حالت‌های قرارگیری هیدروسیکلون پیشنهادی به صورت سری و موازی توسط نرم‌افزار BMCS شبیه‌سازی شد. مقادیر شبیه‌سازی شده d_{50} ، R_f ، S ، m و P ، برای حالت قرارگیری هیدروسیکلون به صورت سری در مدار خردایش به ترتیب برابر ۰/۱۳، ۷۱، ۰/۴۱، ۲/۴۸ و ۱۸۸/۸۹ و مقادیر درصد جامد برای خوراک، ته‌ریز و سرریز هیدروسیکلون به ترتیب برابر ۵۴/۳۹، ۹۱/۰۷ و ۲۱/۴۳ درصد به دست آمد. همچنین مقادیر شبیه‌سازی شده d_{50} ، R_f ، S ، m و P ، برای حالت جانمایی هیدروسیکلون بصورت موازی در مدار خردایش به ترتیب برابر ۰/۲۱، ۸۶، ۰/۵۲، ۲/۵۰ و ۶۲/۹۱ و مقادیر درصد‌های جامد خوراک، ته‌ریز و سرریز هیدروسیکلون به ترتیب برابر ۵۲/۵۸، ۸۱/۰۸ و ۲۱/۴۲ درصد به دست آمد. در طراحی اولیه کارخانه، مقادیر حد جدایش و افت فشار هیدروسیکلون اولیه به ترتیب معادل ۱۰۰ میکرون و ۶۰ کیلوپاسکال و مقادیر درصد‌های جامد خوراک، ته‌ریز و سرریز هیدروسیکلون به ترتیب معادل ۴۵، ۷۵ و ۲۵ درصد در نظر گرفته شده است. از آنجایی که نتایج حاصل از جانمایی هیدروسیکلون به صورت موازی به شرایط طراحی اولیه نزدیک‌تر بود، پیشنهاد شد که هیدروسیکلون به صورت موازی در مدار خردایش قرار گیرد.

در انتها برای رفع مشکل و یا بهبود وضعیت جدایش نامناسب ذرات (به دلیل بار درگرددش بالا و در نتیجه افت

مقادیر، بیانگر بالا بودن میزان بار درگرددش (و دلیل اصلی بروز مشکل حد جدایش نامناسب ذرات در داخل هیدروسیکلون) است، که باید با تنظیم درصد جامد خوراک ورودی به هیدروسیکلون، تنظیم فشار پالپ ورودی به هیدروسیکلون، تغییر حد جدایش هیدروسیکلون (با تغییر قطر دهانه‌های سرریز و ته‌ریز)، و غیره و یا اضافه کردن هیدروسیکلون دیگری به صورت موازی به مدار خردایش کارخانه از میزان بار درگرددش کاسته شود، تا عملیات طبقه‌بندی در داخل هیدروسیکلون به نحو مطلوبی انجام گیرد.

خلاصه و نتیجه‌گیری

در راستای بررسی عملکرد هیدروسیکلون‌های اولیه و ثانویه موجود در مدار خردایش کارخانه فسفات اسفوردی، با نمونه‌گیری به مدت یک هفته از خوراک، سرریز و ته‌ریز این هیدروسیکلون‌ها، عملکرد آنها بررسی شد. بدین منظور ابتدا نمونه‌های تهیه شده از بخش‌های مختلف شامل خوراک، ته‌ریز و سرریز هیدروسیکلون‌های اولیه و ثانویه، تجزیه سرندي و پس از رسم نمودارهای دانه‌بندی، d_{80} آنها محاسبه شد. با میانگین‌گیری از نتایج حاصل، d_{80} ‌های میانگین بخش‌های مختلف خوراک، ته‌ریز و سرریز هیدروسیکلون اولیه به ترتیب برابر ۲۳۸/۷، ۲۳۶/۵ و ۱۰۰/۹ میکرون و برای خوراک و ته‌ریز هیدروسیکلون ثانویه برابر به ترتیب ۱۰۰/۹ و ۹۴/۱ میکرون به دست آمد.

عملکرد هیدروسیکلون‌های اولیه و ثانویه موجود در مدار خردایش کارخانه فسفات اسفوردی با استفاده از مدل پلیت، مورد بررسی قرار گرفت که بر این اساس، مقادیر پارامترهای این مدل شامل R_f ، d_{50} ، S ، m و P ، برای هیدروسیکلون‌های اولیه و ثانویه به ترتیب معادل -، ۶۱۶/۶۶، ۰/۶۰، ۲/۲۲ و ۱۷۶/۶۹، -، ۳۶/۴۶، ۰/۰۸، ۲/۷۴ و ۱۲۵/۵۳ به دست آمد. حد جدایش‌های محاسبه شده برای هیدروسیکلون‌ها توسط این روش (به دلیل در نظر نگرفتن توزیع ابعادی خوراک ورودی به آنها)، چندان قابل استناد نبود. بنابراین درباره هیدروسیکلون اولیه سعی شد با استفاده از مدل‌های دیگر و همچنین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی مدارهای خردایش، حد جدایش هیدروسیکلون در شرایط فعلی کارخانه بررسی شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی، حد جدایشی معادل ۸۰ میکرون (در مقایسه

تقدیر و تشکر

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

فشار بالا) در داخل این هیدروسیکلون، پیشنهاد شد پارامترهای عملیاتی هیدروسیکلون (نظیر کاهش نرخ خوراک‌دهی به هیدروسیکلون، افزایش قطر سرریز و غیره) اصلاح و یا هیدروسیکلون دیگری (برای طبقه‌بندی بهتر محصول آسیای گلوله‌ای) به صورت موازی به مدار خردایش اضافه شود.

مراجع

- 1 - *Internal Technical Reports and Documents*, Esfordi Phosphate Company.
- 2 - Kelly, E. G. and Spotisswood, D. J. (1989). *Introduction to mineral processing*. Mineral Engineering Services.
- 3 - Austin, L. G., Klimpel, R. R. and Luckie, P. T. (1984). *Process engineering of size reduction: Ball milling*. Society of Mining Engineers (SME) Publishers.
- 4 - Weiss, N. L. (1985). *SME Mineral Processing Handbook*. SME Publishers, Vol. I, PP.3d46-3d59.
- 5 - Nematollahi, H. (1381). *Mineral Processing*. Tehran University Publishers.
- 6 - Plitt, L. R. (1976). "A mathematical model of the hydrocyclone classifier." *CIM Bulletin*, Vol. 69, PP.114-123.
- 7 - Farzanegan, A. (2003). *Control and Modelling of Mineral Processing*. Course Note, Amirkabir University.
- 8 - Napier-Munn, T. J., Morrell, S., Morrison, R. D. and Kojovic, T. (1996). *Mineral comminution circuits*. JKMRRC & Queensland University.
- 9 - Lynch, A. J., et al., (1977). *Mineral Crashing and Grinding Circuits*. Chaps. 5 and 6, Elsevier Scientific Publishing Co., New York, PP.87-126.
- 10 - Farzanegan, A. and Laplante, R. A. (2004). "Ball Milling Circuits Simulation (BMCS)." Version 1.1, McGill University, Dept. of Mining and Metallurgical Engineering, Mineral Processing Group.
- 11 - Gao, M., Magee, M. and Way, D. (2004). "Secondary Grinding Circuit Optimisation for the Copper Concentrator of Mount Isa Mines." *Metallurgical Plant Design and Operating Strategies*, Perth, Western Australia.
- 12 - Honaker, R.Q., Ozsever, A.V., Singh, N. and Parekh, B. K. (2001). "Apex water injection for improved hydrocyclone classification efficiency." *Minerals Engineering*, PP. 1445-1458.
- 13 - Dawson, M. F. (1998). "Improved classification with a simple cyclone network." *Minerals Engineering Consultant*, Mintek, South Africa.
- 14 - Obeng, D. P. and Morrell, S. (2003). *The JK three-product cyclone—performance and potential applications*. Elsevier, Vol. 69, PP. 129-142.
- 15 - Rao, T. C., Bandyopadhyay, A. and Khare, R. N. (1982). "Improvement in mill-cyclone classifier circuit." A case study, *XIV International Mineral Processing Congress*, Toronto, Canada. PP. 7.1- 7.13.