

یادداشت فنی:

افزایش کارایی مدار آسیاکنی اولیه کارخانه پرعیارکنی مس شهر بابک

مجید پورسعیدی^{۱*}، رضا شمس‌الدینی^۲، احسان ارغوانی^۳، صمد بنیسی^۴

۱- کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- مجتمع مس شهر بابک، شرکت ملی مس ایران

۳- کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی، پژوهشگر مرکز تحقیقاتی فرآوری مواد کاشی‌گر

۴- استاد بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

(دریافت ۱۵ مهر ۹۱، پذیرش اردیبهشت ۹۲)

چکیده

در مدار آسیاکنی کارخانه پرعیارکنی مس شهر بابک از دو آسیای گلوله‌ای (۵/۰۳×۷/۶۲ متر) با توان موتور ۲۹۸۴ کیلووات که در مدار بسته با ۱۰ عدد هیدروسیکلون به قطر ۶۷ سانتیمتر است استفاده می‌شود. در طرح اولیه کارخانه پیش‌بینی شده است که این مدار، خوراکی با F_{80} (اندازه ۸۰ درصد عبوری خوراک) ۷۸۹ میکرون و دبی ۷۲۱ تن بر ساعت را به محصولی با P_{80} (اندازه ۸۰ درصد عبوری محصول) ۹۰ میکرون برساند. بررسی کارکرد مدار در یک سال گذشته نشان داد که به دلیل نوسان خصوصیات خوراک ورودی و مناسب نبودن شرایط عملیاتی، d_{80} سرریز هیدروسیکلون‌های اولیه (خوراک فلوتاسیون) به ۱۲۸ میکرون با انحراف معیار ۱۲ میکرون رسیده است. جهت فراهم نمودن شرایط عملیاتی مناسب، درصد جامد پالپ آسیا از ۶۶ به ۷۰ و میزان پرشدگی گلوله آن از ۲۳ به ۳۵ درصد و همزمان توان‌کشی آسیا ۲۸ درصد افزایش یافت. به منظور افزایش کارایی هیدروسیکلون‌ها، درصد جامد خوراک هیدروسیکلون با راه‌اندازی حلقه کنترل خودکار دانسیته خوراک هیدروسیکلون، به طور متوسط از ۵۲ به ۴۸ رسانده شد. این تغییرات باعث افزایش ۱۴۲ درصدی نسبت خردایش آسیاها و کاهش d_{80} و نوسان سرریز هیدروسیکلون‌ها به ترتیب به میزان ۲۲/۷ و ۴۰ درصد شد.

کلمات کلیدی

آسیای گلوله‌ای، هیدروسیکلون، کارخانه پرعیارکنی مس شهر بابک

۱- مقدمه

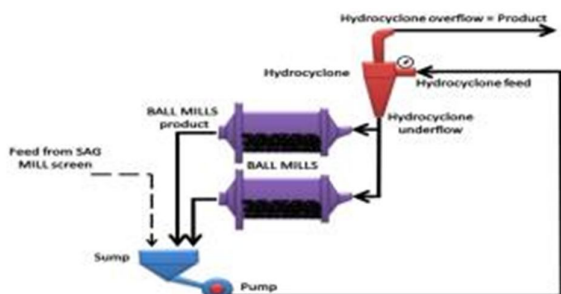
در کارخانه‌های فرآوری افزایش درجه آزادی در مرحله آسیاکنی انجام می‌شود که تأثیر زیادی بر نتایج متالورژیکی (عیار و بازیابی) مدار جدایش دارد. آسیاهای گلوله‌ای از مهم‌ترین تجهیزات خردایش می‌باشند که معمولاً با هیدروسیکلون یک مدار بسته آسیاکنی را تشکیل می‌دهند. کنترل عملیات آسیاکنی در کارخانه‌های فرآوری، به ویژه در مراحل نهایی آسیا کردن اهمیت زیادی دارد [۱]. هیدروسیکلون مهم‌ترین وسیله برای طبقه‌بندی ذرات در ابعاد ریز در صنعت فرآوری است [۲] و اصول عملکرد آن بر اساس ته نشینی یک ذره جامد در میدان گریز از مرکز بنا نهاده شده است [۳]. هیدروسیکلون به عنوان یک وسیله جداکننده بیش از ۵۰ سال است که در صنعت مورد استفاده قرار گرفته است [۴]. در صورت استفاده از هیدروسیکلون برای طبقه‌بندی ذرات، زمان رسیدن به حالت پایدار در صورت ایجاد تغییر در مدار کوتاه می‌شود و این امر خیلی مفید است چون از اکسید شدن مواد که برای شناورسازی فرستاده می‌شوند، جلوگیری می‌کند [۵].

در این تحقیق مدار آسیاکنی تر کارخانه پرعیارکنی مس شهر بابک با نمونه‌برداری سیستماتیک مورد بررسی قرار گرفته است. در این مدار محصول آسیای نیمه خودشکن به همراه محصول دو آسیای گلوله‌ای وارد مخزن خوراک ۱۰ عدد هیدروسیکلون می‌شود که معمولاً ۸ عدد از آن‌ها در مدار است و توسط پمپ برای طبقه‌بندی مواد به مجموعه هیدروسیکلون ها فرستاده می‌شود. در طرح اولیه کارخانه پیش‌بینی شده که این مدار، خوراکی با F_{80} (اندازه ۸۰٪ عبوری خوراک) $789 \mu m$ و دبی $721 t/h$ را به محصولی با P_{80} (اندازه ۸۰٪ عبوری محصول) $90 \mu m$ تبدیل کند [۶]. به دلیل نوسان خصوصیات خوراک ورودی و مناسب نبودن شرایط عملیاتی، d_{80} سرریز هیدروسیکلون ها به طور متوسط به ۱۲۸ میکرون رسیده است که باعث کاهش بازیابی ذرات درشت در مدار فلوتاسیون شده است. عواملی که بر کارایی آسیاهای گلوله‌ای تأثیر می‌گذارند شامل ابعاد و شکل آسترهای آسیا، سرعت آسیا، نحوه آماده سازی خوراک، بسته یا باز بودن مدار، ترکیب و خصوصیات خوراک، استفاده از واسطه خردایش (گلوله) و میزان کنترل مدار می‌شوند [۷]. میزان پرشدگی گلوله و درصد جامد بهینه خوراک ورودی آسیا از مهم‌ترین عوامل در آسیاکنی مواد می‌باشند. بسیاری از این عوامل مانند سرعت

چرخش آسیا و مشخصات خوراک، یا قابل تغییر نیستند و یا به علت نوسان زیاد قابل کنترل نمی‌باشند [۸]. میزان پرشدگی گلوله داخل آسیا در حدود ۵۰-۴۰٪ است که در حدود ۴۰٪ از این حجم، فضای خالی است [۹]. درصد جامد آسیاهای گلوله‌ای بسته به نوع کانه، بین ۸۰-۶۵٪ وزنی پالپ است [۲]. افزایش درصد جامد باعث افزایش تعداد ذرات در واحد حجم شده و نرخ خردایش مواد را افزایش می‌دهد. همچنین عملکرد هیدروسیکلون تأثیر زیادی در طبقه‌بندی مواد، جلوگیری از ورود مجدد ذرات ریز (تولید نرمه) و ورود ذرات درشت به سرریز دارد. یکی از عوامل مهم در عملکرد هیدروسیکلون درصد جامد پالپ خوراک آن است.

۲- روش تحقیق

به منظور بررسی شرایط اولیه مدار آسیاکنی در کارخانه پرعیارکنی مس شهر بابک (شکل ۱)، قبل از اعمال هر گونه تغییری، نمونه‌برداری از نقاط مختلف مدار به مدت ۵ روز صورت گرفت. نمونه‌ها در یک نوبت کاری (۸ ساعته) و به فاصله زمانی ۱ ساعت گرفته و در پایان نوبت کاری با هم مخلوط شدند.



شکل ۱: مدار آسیاکنی کارخانه پرعیارکنی مس شهر بابک

نقاط نمونه‌برداری شامل خوراک، سرریز و ته ریز هیدروسیکلون و محصول آسیاهای گلوله‌ای بود. مشخصات آسیاهای گلوله‌ای و مجموعه هیدروسیکلون ها ی اولیه موجود در مدار آسیاکنی در جداول ۱ و ۲ آورده شده است.

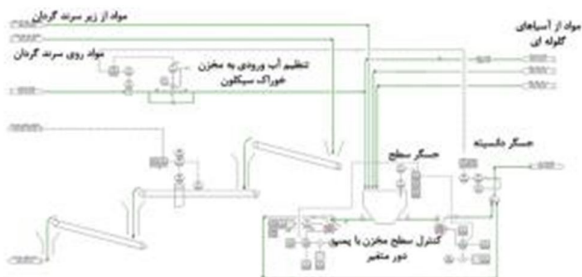
جدول ۱: مشخصات آسیاهای گلوله‌ای کارخانه پرعیارکنی

ابعاد آسیا (m)	۷/۶۲×۵/۰۲۹
توان موتور (hP)	۴۰۰۰
سرعت موتور (rpm)	۱۴/۶
نحوه خروج مواد	سرریز شونده
جهت چرخش آسیا	یک طرفه

هیدروسیکلون‌ها، دانسیته سنج هسته‌ای خوراک هیدروسیکلون‌ها نصب و کالیبره شد. به منظور کالیبراسیون دانسیته سنج، چندین نمونه از خوراک هیدروسیکلون گرفته و همزمان میزان قرائت‌شده از دانسیته سنج یادداشت و درصد جامد واقعی و دانسیته خشک نمونه‌ها در آزمایشگاه تعیین شد. دانسیته پالپ نمونه‌های گرفته‌شده با میزان قرائت‌شده از انتقال‌دهنده مقایسه و اختلاف آن‌ها به میزان قرائت‌شده اضافه شد. با قرار دادن متوسط دانسیته‌های خشک به دست آمده و دانسیته آب (به ترتیب ۲/۸ و ۱ گرم بر سانتی مترمکعب) و با قرائت پیوسته دانسیته پالپ توسط دانسیته سنج هسته‌ای، میزان درصد جامد خوراک با توجه به رابطه زیر [۵] به طور پیوسته در اتاق کنترل کارخانه قابل رویت است.

$$X = \frac{100s(D-1000)}{D(s-1000)} \quad (1)$$

در این رابطه X درصد جامد، s دانسیته جامد خشک (کیلوگرم بر مترمکعب) و D دانسیته پالپ (کیلوگرم بر مترمکعب) است. پس از راه‌اندازی دانسیته‌سنج و کالیبره کردن آن، برای تنظیم درصد جامد مطلوب خوراک هیدروسیکلون‌ها، حلقه کنترل دانسیته خوراک با شیر (Valve) آب ورودی به مخزن خوراک هیدروسیکلون‌ها راه‌اندازی شد. برای این منظور شیر آب ورودی و دانسیته‌سنج خوراک هیدروسیکلون‌ها به ترتیب در حالت زنجیره‌ای (Cascade) و خودکار (Auto) گذاشته شدند. با تعیین نقطه مطلوب برای دانسیته پالپ (Set point)، کنترل‌کننده با تنظیم شیر آب ورودی به مخزن خوراک هیدروسیکلون‌ها، مقدار آب ورودی را کم یا زیاد کرده تا به دانسیته و درصد جامد تعیین‌شده برسد (شکل ۲). برای داشتن درصد جامد ۴۸ برای خوراک هیدروسیکلون‌ها، نقطه مطلوب دانسیته پالپ روی 1490 kg/m^3 قرار داده شد.



شکل ۲: حلقه کنترل درصد جامد خوراک هیدروسیکلون و سطح مخزن

جدول ۲: مشخصات هیدروسیکلون‌های اولیه کارخانه پرعیارکنی

تعداد هیدروسیکلون	۱۰
قطر سیکلون (cm)	۶۶/۷۹
قطر سرریز (cm)	۲۰/۳
قطر ته ریز (cm)	۱۳/۳
قطر دهانه ورودی (cm)	۱۹/۲۳

تغییراتی که به منظور افزایش کارایی مدار آسیاکنی اعمال شد شامل افزایش پرشدگی گلوله، افزایش درصد جامد پالپ آسیاهای گلوله‌ای و راه‌اندازی حلقه‌های کنترل خودکار سطح مخزن خوراک و دانسیته پالپ خوراک هیدروسیکلون‌ها بودند.

۱-۲- افزایش پرشدگی آسیاهای گلوله‌ای

میزان پرشدگی گلوله در آسیاها قبل از اعمال تغییرات ۲۳ درصد بود. به منظور افزایش پرشدگی گلوله، ۱۲ درصد حجمی آسیا (معادل ۸۴ تن)، گلوله به هر یک از آسیاها اضافه شد. ابعاد گلوله‌های مصرفی برای آسیاهای گلوله‌ای ۶۰ و ۸۰ میلی‌متر بود. با افزایش میزان پرشدگی آسیاها تا ۳۵ درصد، توان کشی (Power draw) آن‌ها از مقدار ۲۵۰۰ کیلووات به ۳۲۰۰ کیلووات افزایش یافت.

۲-۲- افزایش درصد جامد آسیاهای گلوله‌ای

به منظور افزایش درصد جامد آسیاهای گلوله‌ای، آب ورودی به خوراک آسیاها تنظیم شد تا مقدار متوسط درصد جامد از ۶۶ به ۷۰ افزایش پیدا کند.

۳-۲- راه‌اندازی حلقه کنترل خودکار سطح مخزن خوراک هیدروسیکلون‌ها

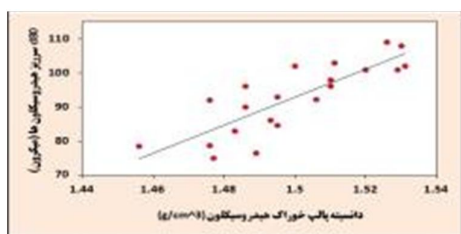
برای ثابت نگه‌داشتن سطح پالپ مخزن خوراک دهی هیدروسیکلون‌ها، پمپ سرعت متغیر با حسگر تعیین سطح پالپ مخزن، در یک حلقه کنترلی بسته قرار دارند. برای این منظور ارتفاع مطلوب پالپ در مخزن خوراک، روی ۸۰٪ ارتفاع مخزن تنظیم شد. برای راه‌اندازی حلقه کنترل سطح، ضرایب مربوط به کنترل تناسبی، انتگرالی و مشتقی (PID) مربوط به پمپ‌های دور متغیر خوراک هیدروسیکلون‌ها تنظیم شدند تا سرعت پمپ در مقابل تغییرات سطح، واکنش مناسبی داشته باشد و از نوسان دبی ورودی به هیدروسیکلون‌ها جلوگیری شود.

۴-۲- راه‌اندازی حلقه کنترل دانسیته سنج هسته‌ای خوراک هیدروسیکلون‌ها

جهت راه‌اندازی حلقه کنترل دانسیته پالپ خوراک

۲-۵- ارائه یافته‌ها و تحلیل نتایج

خوراک هیدروسیکلون دارد و با کاهش آن d_{80} دانه‌بندی سرریز نیز کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود با افزایش دبی آب ورودی به مخزن خوراک هیدروسیکلون‌ها، دانسیته پالپ و درصد جامد خوراک هیدروسیکلون کاهش می‌یابد با کاهش درصد جامد خوراک هیدروسیکلون، مقدار d_{80} دانه‌بندی سرریز کاهش یافت.



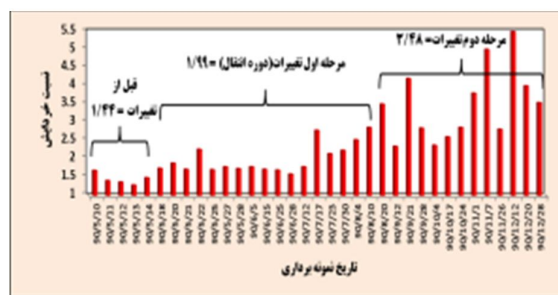
شکل ۵: تأثیر دانسیته خوراک هیدروسیکلون بر روی d_{80} سرریز هیدروسیکلون

با راه‌اندازی دانسیته سنج پالپ خوراک هیدروسیکلون و حلقه مربوط به آن، درصد جامد خوراک ورودی به مجموعه هیدروسیکلون‌ها از مقدار متوسط ۵۲ به ۴۸ کاهش یافت و طبقه‌بندی ذرات در آن به علت کاهش نیروی مقاومت درونی سیال بهتر صورت گرفت. بر اساس داده‌های حاصل از آنالیز سرندی واحد متالورژی کارخانه پرعیارکنی در سال ۱۳۹۰ (نمونه برداری ۲۴ ساعته)، d_{80} سرریز هیدروسیکلون‌ها از میزان متوسط ۱۲۸ میکرون قبل از اعمال تغییرات به ۹۹ میکرون بعد از اعمال دوم مرحله تغییرات (راه‌اندازی حلقه‌های کنترل) کاهش یافت. نوسان d_{80} از میزان ۱۲ میکرون قبل از اعمال تغییرات به ۷ میکرون بعد از مرحله دوم تغییرات کاهش یافت. شکل ۶ تغییرات d_{80} دانه‌بندی سرریز هیدروسیکلون را بر اساس داده‌های واحد متالورژی، از ابتدای سال ۱۳۹۰ نشان می‌دهد. نقاط نشان داده‌شده متوسط d_{80} سرریز در یک هفته است.



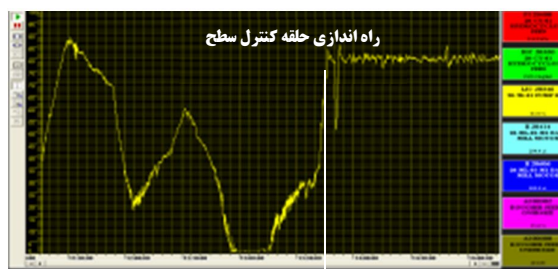
شکل ۶: تغییرات d_{80} سرریز هیدروسیکلون در مراحل مختلف اعمال تغییرات (داده‌های واحد متالورژی کارخانه در سال ۱۳۹۰)

نسبت خردایش (F_{80}/P_{80}) که نسبت اندازه ۸۰٪ عبوری خوراک به اندازه ۸۰٪ عبوری محصول آسیا می‌باشد یکی از شاخص‌هایی است که برای بررسی عملکرد آسیاها به کار برده می‌شود. دانه‌بندی خوراک ورودی به آسیا و دانه‌بندی محصول آسیا، از عواملی هستند که بر مقدار نسبت خردایش تأثیر می‌گذارند. با افزایش پرشدگی گلوله (از ۲۳ به ۳۵ درصد)، افزایش درصد جامد آسیا (از ۶۶ به ۷۰) و همچنین کاهش درصد جامد خوراک هیدروسیکلون (از ۵۲ به ۴۸) نسبت خردایش آسیاهای گلوله‌ای از ۱/۴۴ به ۳/۴۸ نسبت به قبل از اعمال تغییرات، افزایش یافت. شکل ۳ مقادیر نسبت خردایش را در مراحل مختلف اعمال تغییرات نشان می‌دهد.



شکل ۳: تغییرات نسبت خردایش آسیاهای گلوله‌ای در مراحل مختلف اعمال تغییرات

با راه‌اندازی حلقه کنترل سطح مخزن خوراک هیدروسیکلون‌ها، سطح پالپ مخزن ثابت و از خالی شدن یا سرریز شدن ناگهانی پالپ جلوگیری شد. شکل ۴ تغییرات سطح پالپ را قبل و بعد از راه‌اندازی حلقه کنترل سطح نشان می‌دهد.



شکل ۴: تغییرات سطح پالپ مخزن خوراک هیدروسیکلون‌ها قبل و بعد از اعمال تغییرات

مقدار d_{80} دانه‌بندی سرریز رابطه مستقیم با دانسیته پالپ

۳- نتیجه‌گیری

تغییرات اعمال شده در مدار آسیاکنی گلوله‌ای شامل افزایش پرشدگی گلوله از مقدار اولیه ۲۳ به ۳۵ درصد حجمی آسیا، افزایش درصد جامد پالپ آسیا از مقدار اولیه ۶۶ به ۷۰ و کاهش درصد جامد خوراک هیدروسیکلون از ۵۲ به ۴۸ بود. با افزایش پرشدگی آسیاهای گلوله‌ای، توان کشی آن‌ها به میزان ۲۸ درصد نسبت به قبل از تغییرات افزایش پیدا کرد. حلقه‌های کنترل سطح پالپ مخزن خوراک و دانسیته پالپ خوراک هیدروسیکلون‌های اولیه راه‌اندازی شد که باعث کاهش نوسان و افزایش کارایی مدار گردید.

تغییرات اعمال شده در مدار آسیاکنی باعث افزایش ۱۴۲ درصدی نسبت خردایش آسیاهای گلوله‌ای نسبت به قبل از اعمال تغییرات شد.

تغییرات اعمال شده در کل مدار آسیاکنی، باعث کاهش d_{80} و نوسان سرریز هیدروسیکلون‌ها به ترتیب به میزان ۲۲/۷ و ۴۰ درصد شد.

۴- تقدیر و تشکر

از زحمات تمامی مسئولان مجتمع مس شهربابک و کارکنان واحد تغلیظ مجتمع به خاطر همکاری صمیمانه و اجازه انتشار مقاله کمال تشکر را داریم.

۵- مراجع

[۱] نعمت الهی، حسین؛ ۱۳۸۱؛ "کانه آرایی"؛ انتشارات دانشگاه تهران؛ جلد اول.

[2] Wills B.A.; Nupier-Munn, T.J. ; 2006; "*Mineral Processing Technology*", 7th Edition, Elsevier.

[۳] اسداله پور، ابراهیم، ۱۳۸۵؛ "بررسی دو مدل تجربی هیدروسیکلون"، پایان‌نامه کارشناسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

[4] Wu Chen, Nathalie Zydek, Frank Parma; 2000; "*Evaluation of hydrocyclone models for practical applications*", *Chemical Engineering Journal* 80, pp.295-303.

[۵] بنیسی، صمد، ۱۳۸۹؛ "جزوه درس مهندسی خردایش"، گروه فرآوری بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

[6] *Miduk plant operation manual: overview*, 1998.

[7] McIvor R.E.; 1983; "*Effect of Speed and Liner Configuration on Ball Mill Performance*", *Mining Engineering*.

[۸] ارغوانی، احسان، ۱۳۹۰؛ "افزایش کارایی مدار آسیاکنی تر مجتمع سنگ آهن گل‌گهر"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

[9] Gupta A. Yan D. ; 2006; "*Mineral Processing Design and Operation*", Elsevier.