

کنترل درصد جامد سرریز هیدروسیکلون‌های کارخانه پرعیارکنی ۱ مجتمع مس سرچشمه با استفاده از حسگر نرم

حمزه امیری^۱، مصطفی مالکی مقدم^{۲*}، سعید زارع^۳، حمیدرضا رحیمی پور^۴، صمد بنیسی^۵

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد فرآوری مواد، دانشگاه ولی عصر رفسنجان Hamzeh.Amiri1370@gmail.com

۲. استادیار فرآوری مواد معدنی، گروه مهندسی معدن دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، m.maleki@vru.ac.ir

۳. کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی، مرکز تحقیقات کاشی گر، دانشگاه شهید باهنر کرمان، Zare@kmpc.ir

۴. ریاست برق و ابزار دقیق امور تغلیظ مجتمع مس سرچشمه rahimi-hr@nicico.com

۵. استاد فرآوری مواد، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان، Banisi@uk.ac.ir

(دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۱۱ - پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۰)

چکیده

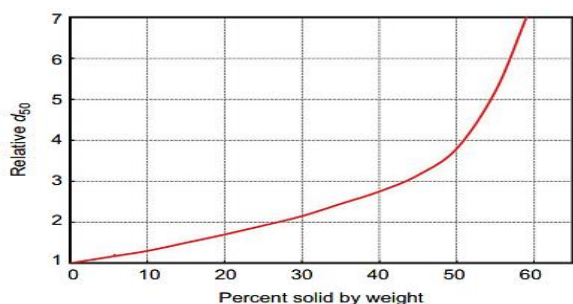
مدار آسیابکنی اولیه کارخانه پرعیارکنی ۱ مجتمع مس سرچشمه از ۸ آسیای گلوله‌ای که در مدار بسته با هیدروسیکلون کار می‌کنند، تشکیل شده است. با توجه به اهمیت زیاد دانسیته خوراک ورودی هیدروسیکلون‌ها در فرآیند طبقه‌بندی، حلقه کنترل دانسیته سرریز در طرح اولیه برای تامین درصد جامد مناسب سرریز هیدروسیکلون‌ها در این مدار در نظر گرفته شده بود. به دلیل نیاز به هشت دانسیته‌سنج هسته‌ای، مشکلات تعمیر و نگهداری، مسایل ایمنی و محدودیت‌های جانمایی، این حلقه کنترل عملیاتی نشده بود. در این تحقیق، درصد جامد بر مبنای محاسبات موازنه جرم و ایجاد حسگرهای نرم تعیین شد. این حسگرها، برنامه‌های کامپیوتری‌اند که جایگزین نسبتا ارزان برای حسگرهای سخت‌افزاری‌اند و در سال‌های اخیر استفاده از آن‌ها در صنعت فرآوری مواد افزایش یافته است. با انتقال داده‌ها به اتاق کنترل و آماده‌سازی برنامه انجام محاسبات موازنه آب، حسگر نمایش لحظه‌ای درصد جامد محاسباتی برای هر ۸ آسیا عملیاتی شد. برای راه‌اندازی حلقه کنترل دانسیته سرریز، در مسیر آب ورودی به مخزن خوراک هیدروسیکلون، شیر کنترلی نصب شد. با نصب تجهیزات سخت‌افزاری و استفاده از حسگر نرم درصد جامد، حلقه کنترل دانسیته سرریز هیدروسیکلون برای یکی از آسیاها برنامه‌نویسی و راه‌اندازی شد. پایش‌هایی انجام شده از مدار نشان داد، میزان تغییرات درصد جامد سرریز هیدروسیکلون از محدوده $30 \pm 4/5$ درصد در زمان عدم نمایش درصد جامد و تنظیم آن به صورت دستی، به محدوده $28 \pm 0/5$ درصد در زمان استفاده از حلقه کنترلی درصد جامد، کاهش یافت. علاوه بر این، بررسی دانه‌بندی‌های سرریز هیدروسیکلون‌ها نشان داد، میانگین دانه‌بندی ورودی به مدار فلوتاسیون از $63/5$ درصد زیر 74 میکرون در قبل از راه‌اندازی حلقه کنترل درصد جامد، به 67 درصد زیر 74 میکرون، بعد از مطلوب نگه داشتن درصد جامد سرریز هیدروسیکلون رسید.

کلمات کلیدی

آسیای گلوله‌ای، هیدروسیکلون، حلقه کنترل، درصد جامد، سرریز، سرچشمه.

۱- مقدمه

درصد جامد ورودی به هیدروسیکلون باعث کاهش حد جدایش و ریزتر شدن سرریز می‌شود [۱۶ و ۱۵].



شکل ۱- رابطه درصد جامد خوراک هیدروسیکلون و حد جدایش [۳]

پالانیاندی^۴ و همکارانش در مرکز تحقیقات معدنی JKMR^۵ تحقیقات گسترده‌ای در رابطه با عملکرد هیدروسیکلون در مدارهای فرآوری مواد معدنی از طریق جمع‌آوری داده‌های صنعتی و ایجاد پایگاه داده‌ای در این ارتباط، انجام دادند. آن‌ها با استفاده از این پایگاه داده به بررسی عملکرد هیدروسیکلون‌ها و مهمترین عوامل موثر بر آن‌ها پرداختند [۱۵].

با توجه به اهمیت کار هیدروسیکلون و تاثیر عملکرد آن بر کارکرد مدار آسیاکنی و جداسازی پایین‌دست، در برخی موارد حسگرهای برخط برای شناسایی هیدروسیکلون با عملکرد نامطلوب، ساخته شده است [۱۷ و ۱۸]. با توجه به پیشرفت روز افزون تکنولوژی، رقابت بین صنایع و تغییر سریع شرایط اقتصادی، کنترل و خودکارسازی فرآیندها، اهمیت بسیار ویژه‌ای یافته است. کنترل فرآیند به معنای کنترل خودکار یک متغیر خروجی با پایش و اندازه‌گیری یک ویژگی از آن متغیر خروجی با استفاده از حسگرها و مقایسه آن با یک نقطه مطلوب است. در ادامه با ارسال یک سیگنال خروجی از کنترل‌کننده به عنصر نهایی کنترل برای انطباق متغیر خروجی با نقطه مطلوب کار حلقه تکمیل می‌شود [۱۹ و ۲۰].

۱-۱- حسگرهای نرم^۶

از آنجایی که بیشتر متغیرهای فرآیند به وسیله حسگرهای سخت‌افزاری اندازه‌گیری می‌شوند، مهم‌ترین عوامل برای نظارت و کنترل موفق فرآیند، دقت حسگرها، قابلیت دسترسی و فرکانس نمونه‌گیری است. علاوه بر این، بعضی از اطلاعات

در مدارهای فرآوری مواد، طبقه‌بندی نقطه اتصال بین خردایش و جداسازی است. هیدروسیکلون به دلیل سادگی، اندازه کوچک و توانایی طبقه‌بندی آهنگ بالای خوراک، مهم‌ترین وسیله برای طبقه‌بندی ذرات در ابعاد ریز در صنعت کانه‌آرایی است [۱]. هیدروسیکلون‌ها در طیف گسترده‌ای از اندازه‌ها، از قطر ۱۰ میلی‌متر تا ۲٫۵ متر بسته به کاربردشان مورد استفاده قرار می‌گیرند و این اندازه‌ها مربوط به حد جدایش از ۱٫۵ تا ۳۰۰ میکرون با فشار متفاوت خوراک از ۳ تا ۳۰ psi است [۲]. در هیدروسیکلون از نیروی گریز از مرکز برای شتاب دادن به سرعت ته‌نشینی ذرات استفاده می‌شود. ذرات با سرعت ته‌نشینی زیاد به سمت دیواره حرکت می‌کنند و از دهانه ته‌ریز بیرون می‌روند. به دلیل عمل نیروی مقاومت سیال، ذرات با سرعت ته‌نشینی کم به سمت منطقه کم فشار در امتداد محور حرکت می‌کنند و به طرف بالا از طریق دیافراگم به سر ریز حمل می‌شوند.

در ۵۰ سال گذشته تحقیقات گسترده‌ای در زمینه عوامل انجام شده است [۱۰-۴]. رنر^۱ و کوهن^۲ (۱۹۷۸) نشان دادند که طبقه‌بندی، تمام قسمت داخلی هیدروسیکلون را شامل نمی‌شود. آن‌ها با استفاده از حسگرهای با سرعت بالا نمونه‌هایی از چند موقعیت انتخاب شده در داخل هیدروسیکلون گرفتند و داخل سیکلون را به چند منطقه بر اساس توزیع دانه‌بندی در هر منطقه تقسیم کردند [۱۱].

علاوه بر این، مدل‌های تجربی مختلفی برای پیش‌بینی عملکرد هیدروسیکلون مطرح شده است [۱۳، ۵، ۱۲]. از بین این مدل‌های تجربی بیشترین استفاده مربوط به مدل پلیت^۳ و شکل اصلاح شده آن است [۱۴]. این مدل‌ها، بر اساس یک توصیف پدیده‌شناختی از فرآیند با ثابت‌های عددی که از پایگاه داده‌های بزرگ تعیین شده‌اند، به وجود آمده‌اند [۳].

یکی از مهمترین پارامترهای تاثیرگذار بر عملکرد هیدروسیکلون درصد جامد ورودی به آن است. این عامل بر کارایی هیدروسیکلون و حد جدایش تاثیر می‌گذارد. درصد جامد بالا، باعث افزایش حد جدایش و در نتیجه با درشت‌تر شدن اندازه ذرات سرریز، بازیابی در فرآیند پایین‌دست مانند فلوتاسیون کاهش پیدا می‌کند (شکل ۱). از طرف دیگر، کاهش

۴-Palaniandy

۵-Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre

۶-Soft sensors

۱-Renner

۲-Cohen

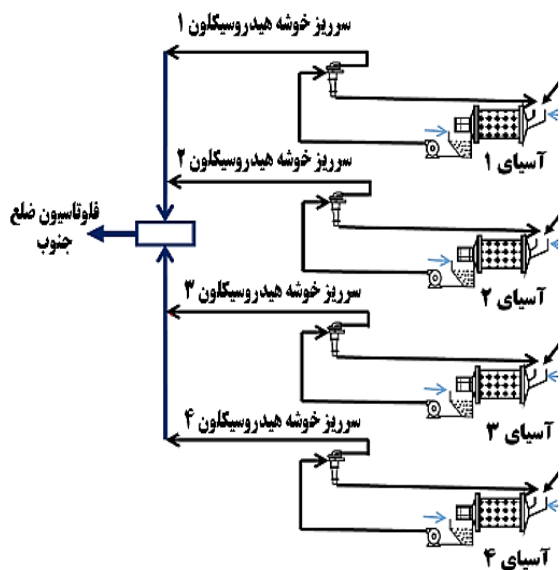
۳-Plitt

استفاده از مدل‌های شبکه عصبی، طراحی شد. با توجه به تغییرات زیاد در مدار آسیاکنی و هیدروسیکلون یک حسگر ساده مبتنی بر شبکه عصبی با استفاده از تجزیه و تحلیل مولفه‌ها و پارامترهای اصلی، توسعه داده شد [۲۷].

با توجه به تعداد زیاد متغیرهای موثر بر خروجی فرآیندهای صنعتی، شناسایی و در نظر گرفتن همه این عوامل از محدودیت‌های استفاده از حسگرهای نرم است. برای اولین بار مشکلات استفاده از حسگرهای نرم در فرآیندها توسط مهندسان شیمی مورد بررسی قرار گرفت [۲۱].

۲-۱- مدار آسیاکنی اولیه مجتمع مس سرچشمه

مدار آسیاکنی اولیه در کارخانه پرعیارکنی ۱ مجتمع مس سرچشمه به دو بخش ضلع شمال و ضلع جنوب تقسیم‌بندی می‌شود. شکل ۲ مدار آسیاکنی ضلع جنوب را نشان می‌دهد که از ۴ آسیای گلوله‌ای با خوشه هیدروسیکلون مربوط به صورت مدار بسته کار می‌کند. مدار آسیاکنی ضلع شمال همانند مدار آسیاکنی ضلع جنوب است. مواد خروجی از هر آسیا وارد یک سردن گردان می‌شود. مواد درشت‌تر از روزنه‌های سردن، به عنوان ذرات با ابعاد بحرانی (بار برگشتی) از مدار خارج و ذرات عبوری از روزنه‌های سردن وارد مخزن پمپ هیدروسیکلون شده و با هدف طبقه‌بندی به خوشه هیدروسیکلون مربوط پمپ می‌شود. ته‌ریز هیدروسیکلون به صورت ثقیل وارد آسیا می‌شود. سرریز هیدروسیکلون‌های چهار آسیا (هر ضلع) با درصد جامد ۲۸ مخلوط شده و به سمت مدار فلوتاسیون هدایت می‌شود [۲۸].



شکل ۲- مدار آسیاکنی اولیه ضلع جنوب کارخانه پرعیارکنی ۱ مجتمع مس سرچشمه.

هر خوشه شامل ۱۰ هیدروسیکلون با قطر ۵۱ سانتی‌متر

حاصل از این حسگرها به دلایل زیر کم فایده و غیرقابل اعتمادند:

- معیوب شدن حسگرها
- خرابی سیستم داده‌گیری
- حذف حسگر به دلیل مشکل نگهداری یا جایگزینی آن
- فرکانس نمونه‌برداری بسیار کم حسگر

این امر می‌تواند بر روی نظارت و کنترل فرآیند تاثیر منفی داشته باشد و منجر به افزایش هزینه‌های تولید، کیفیت محصول یا حتی شرایط خطرناک برای کارکنان کارخانه یا محیط زیست شود [۲۱].

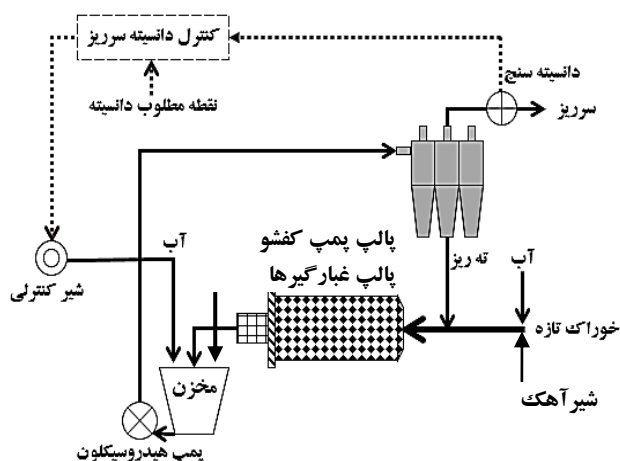
بنابراین برای بهبود قابلیت اطمینان سیستم، نظارت بر فرآیند و کنترل، حسگرهای نرم استفاده می‌شوند. این حسگرها، برنامه‌های کامپیوتری‌اند که به عنوان یک جایگزین نسبتاً ارزان برای حسگرهای سخت‌افزاری استفاده می‌شوند. کاربردهای اصلی حسگر نرم برآورد برخط متغیرهای با قابلیت اندازه‌گیری دشوار و نظارت بر فرآیند است. علاوه بر این، حسگر نرم اغلب به عنوان یک پشتیبان برای یک حسگر سخت‌افزاری استفاده می‌شود [۲۱].

از زمان ابداع این روش تاکنون، استفاده از حسگرهای نرم در صنعت فرآوری مواد افزایش یافته است و از آن‌ها برای اندازه‌گیری وزن مواد [۲۲]، آهنگ‌های جریان در فرآیند فلوتاسیون [۲۳] دانسیته سرریز هیدروسیکلون [۲۴]، ردیابی نوع کانی در هر مرحله از فرآیند کارخانه [۲۵]، اندازه ذرات و سطح انبار درشت [۲۶] استفاده شده است. به عنوان مثال در تحقیقی از حسگر نرم برای ردیابی نوع کانی در طی مراحل فرآیند از سنگ‌شکنی تا مراحل جدایش و مخازن کنسانتره استفاده شده است. گزارش‌های مربوط به ویژگی‌ها و نوع کانی‌ها به صورت روزانه، هفتگی و ماهانه در سیستم وجود دارد و امکان بهبود کارایی را از طریق کنترل بهتر فرآیند فراهم می‌کند. این سیستم در یک معدن الماس مورد استفاده قرار گرفته است [۲۵]. از آنجا که متغیرهای فرآیند که با کیفیت نهایی مربوط می‌شود، همیشه نمی‌تواند با حسگرهای سخت‌افزاری اندازه‌گیری شوند، حسگر نرم می‌تواند یک راه حل مناسب باشد. حسگر نرم بر اساس مدل ریاضی فرآیند است و از آنجایی که فرآیندهای صنعتی پیچیده‌اند، مدلسازی نظری، رویکرد غیرعملی، گران و گاهی حتی غیرممکن است و مدلسازی فرآیند عمدتاً بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده است [۲۱ و ۲۲].

در تحقیقی که توسط دو^۱ و همکارانش انجام شد، برای تخمین توزیع اندازه ذرات سرریز هیدروسیکلون، نرم‌افزاری با

۳-۱- حلقه کنترل دانسیته سرریز هیدروسیکلون اولیه

برای تنظیم دانسیته عملیاتی هیدروسیکلون و بار در گردش هیدروسیکلون‌های اولیه، آب به مخزن بار ورودی هیدروسیکلون‌ها اضافه می‌شود. با توجه به اهمیت زیاد دانسیته سرریز در فرآیند طبقه‌بندی، این حلقه برای تامین درصد جامد مناسب سرریز هیدروسیکلون‌ها در نظر گرفته شده است. در طرح اولیه، یک دانسیته‌سنج هسته‌ای، دانسیته جریان سرریز هیدروسیکلون‌های اولیه را اندازه‌گیری می‌کند و پس از ارسال سیگنال به کنترل‌گر، میزان آب اضافه شده به ورودی مخزن پمپ بار ورودی هیدروسیکلون‌ها، از طریق شیر کنترلی تنظیم می‌شود. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، علاوه بر آب ورودی به آسیا، شیرآهک برای جلوگیری از خوردگی فلز و آماده‌سازی بهتر در مرحله فلوتاسیون، اضافه می‌شود. علاوه بر این به همراه آب اضافه شده به مخزن، پالپ پمپ کفشو و غبارگیرهای کارخانه پس از تقسیم بین آسیاها، به مخزن وارد می‌شوند. جدول ۲ داده‌های مربوط به جریان‌های مدار را نشان می‌دهد.



شکل ۴- حلقه کنترل دانسیته سرریز هیدروسیکلون (طبق طرح).

جدول ۲- داده‌های مربوط به جریان‌های مدار.

نوع جریان	درصد جامد	تناژ (تن/ساعت)	شدت جریان (مترمکعب/ساعت)
بار ورودی تازه آسیا	۹۴ تا ۹۶	۲۲۵٫۶	-
آب ورودی آسیا	-	-	۸۲٫۳
شیرآهک	۱۰	۱٫۰۷	۱۰
آب ورودی مخزن	-	-	۴۷۷
بار ورودی هیدروسیکلون‌ها	۵۴	۱۱۲۸	-
ته‌ریز	۷۰	۹۰۳	-

است. یک عدد آماده به کار و ۹ عدد دیگر برای مطلوب نگه داشتن فشار هیدروسیکلون‌ها در مدارند (شکل ۳).



شکل ۳- خوشه هیدروسیکلون‌های اولیه.

کارایی هیدروسیکلون‌های اولیه تحت تاثیر پارامترهای عملیاتی آن‌ها است. طبق طرح در درصد جامد خوراک ۵۴ و فشار هیدروسیکلون ۶psi، حداکثر کارایی طبقه‌بندی ایجاد می‌شود. در نتیجه با طبقه‌بندی استاندارد هیدروسیکلون و کارکرد صحیح آسیا، دانه‌بندی مطلوب برای مدار پایین دست قابل فراهم شدن است. در جدول ۱ درصد جامد و دانه‌بندی جریان‌های مختلف هیدروسیکلون مطابق طرح اولیه آورده شده است.

جدول ۱- درصد جامد و دانه‌بندی هیدروسیکلون (طبق طرح).

جریان هیدروسیکلون	درصد جامد	دانه‌بندی (درصد عبوری از سرنده ۷۵ میکرون)
بار ورودی	۵۴	۲۴٫۱
سرریز	۲۸	۷۰
ته‌ریز	۷۰	۱۲٫۶

حلقه‌های کنترلی در نظر گرفته شده در طرح اصلی این مدار آسیاکنی، شامل کنترل نسبت آب به جامد در ورودی آسیا، حلقه کنترل سطح مخزن پمپ بار ورودی هیدروسیکلون‌ها و حلقه کنترل درصد جامد سرریز هیدروسیکلون‌ها است [۲۹]. در مدارهای خردایش از حلقه کنترل دانسیته بار ورودی هیدروسیکلون برای تنظیم درصد جامد عملیاتی هیدروسیکلون استفاده می‌شود. در طرح اصلی مدار آسیاکنی مجتمع مس سرچشمه، با توجه به ارتباط مستقیم بین دانسیته بار ورودی و دانسیته سرریز و اهمیت تنظیم درصد جامد ورودی فلوتاسیون (سرریز هیدروسیکلون‌های اولیه)، حلقه کنترل دانسیته سرریز هیدروسیکلون‌های اولیه در نظر گرفته شده است.

اندازه‌گیری آب ورودی آسیا و سر مخزن، رسوب‌زدایی و با شدت جریان سنج آلتراسونیک واسنجی شدند. همچنین برای ترازوی مربوط به نوار بار ورودی آسیا، واسنجی به روش زنجیر روی نوار نقاله^۱ انجام شد.

با انتقال داده‌ها به اتاق کنترل و آماده‌سازی برنامه و انجام محاسبات موازنه آب، امکان نمایش لحظه‌ای درصد جامد محاسباتی فراهم شد. مرحله دوم، اعتبارسنجی درصد جامد سرریز محاسباتی بود. درصد جامد سرریز هیدروسیکلون‌ها در محل طی دفعات متعدد اندازه‌گیری و عوامل اختلاف آن با درصد جامد محاسباتی سرریز هیدروسیکلون‌ها در اتاق کنترل بررسی و رفع شد. در مرحله سوم بعد از نوسان‌گیری از اختلاف درصد جامد محاسباتی سرریز هیدروسیکلون‌ها با نمونه‌گیری، برنامه‌ای برای استفاده از منطق کنترلی درصد جامد سرریز هیدروسیکلون‌ها بین شیر تنظیم‌کننده آب سر مخزن پمپ هیدروسیکلون و درصد جامد محاسباتی نوشته و مورد استفاده قرار گرفت.

در این حلقه، شیر کنترلی نوع نیشگونی به عنوان عامل نهایی کنترل و برای تغییر مقدار آب سر مخزن تهیه و در مسیر آب بعد از شدت جریان سنج نصب شد (شکل ۵).



شکل ۵- شیر نیشگونی کنترلی سر مخزن پمپ هیدروسیکلون.

۳- نتایج و بحث

در این تحقیق، به جای استفاده از یک حسگر دانسیته‌سنج، از حسگر نرم‌افزاری بر مبنای محاسبه درصد جامد استفاده شد. ورودی‌های مدار آسیاکنی در رابطه درصد جامد، شامل آهنگ بار ورودی آسیا (T)، آب ورودی به آسیا (W_1)، آب ورودی به مخزن پمپ بار ورودی هیدروسیکلون (W_2) و آب همراه دوغاب و خروجی پمپ کفشو (W_3) است.

با پایش‌هایی که از مدار انجام شد، ورودی‌ها و خروجی‌های مدار شناسایی شدند. شیر آهک، خروجی پمپ‌های کفشو،

هیدروسیکلون‌ها			
سرریز	۲۸	۲۲۵/۶	-
هیدروسیکلون‌ها			

با توجه به اینکه در مدار آسیاکنی اولیه، هشت آسیا به طور موازی در حال کارند، علاوه بر این که تامین، تعمیر و نگهداری این تعداد دانسیته‌سنج هسته‌ای هزینه بالایی دارد، از نظر مسایل ایمنی نیز کاربرد این تجهیزات در سرریز هیدروسیکلون‌ها، محدودیت‌هایی را ایجاد کرده بود و از این حلقه استفاده نمی‌شد. بنابراین دانسیته سرریز هیدروسیکلون‌ها به طور دستی توسط کارکنان اندازه‌گیری می‌شد که به دلیل تعداد زیاد جریان‌های مدار و زمان‌بر بودن و عدم دقت کافی، کمتر مورد توجه قرار می‌گرفت. در نتیجه نوسان زیادی در درصد جامد سرریزها و در نتیجه دانه‌بندی بار ورودی فلوتاسیون وجود داشت. بنابراین در این تحقیق تعیین درصد جامد، بر مبنای محاسبات موازنه جرم و استفاده از سایر داده‌های مدار مورد توجه قرار گرفت. به همین دلیل، برنامه‌ای برای ایجاد حسگر نرم محاسبه درصد جامد سرریز هیدروسیکلون‌ها با در نظر گرفتن داده‌های اندازه‌گیری شده مدار نوشته شد و برای ۸ آسیای موازی مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه کار با استفاده از داده‌های این حسگر، حلقه کنترل درصد جامد سرریز راه اندازی شد.

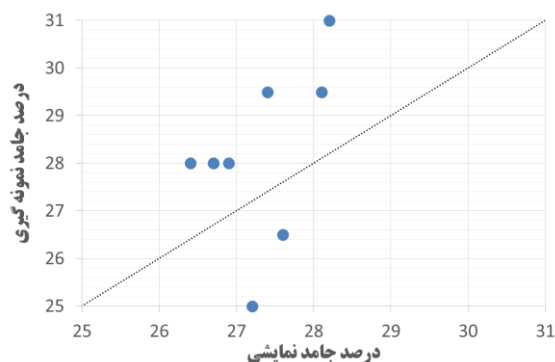
۲- روش تحقیق

روش به کار رفته در این تحقیق، موازنه آب ورودی و خروجی از مدار آسیاکنی بود. با توجه به اینکه تنها جریان خروجی از مدار، سرریز هیدروسیکلون‌های اولیه بود، راهکار مناسب برای کنترل درصد جامد سرریز هیدروسیکلون‌ها در مرحله اول، به دست آوردن درصد جامد سرریز از طریق موازنه آب بود. بنابراین لازم بود، شدت جریان آب و تناز ورودی به آسیا و آب‌های اضافه شده به مخزن پمپ بار ورودی هیدروسیکلون‌ها اندازه‌گیری و برای انجام محاسبات به اتاق کنترل فرستاده شود. تناز ورودی به آسیاها از طریق ترازوی در نظر گرفته شده روی نوار بار ورودی آسیاها اندازه‌گیری می‌شد و شدت جریان‌های آب اضافه شده به مدار از طریق شدت جریان‌سنج‌ها قابل اندازه‌گیری بود.

شدت جریان‌سنج‌ها شامل مدارهای الکترومغناطیسی‌اند که با عبور آب که ماده‌ای هادی است، یک جریان القا می‌شود و با توجه به قانون فارادی سرعت آب اندازه‌گیری می‌شود و با در نظر گرفتن قطر شدت جریان‌سنج، شدت جریان آب محاسبه می‌شود. شدت جریان‌سنج‌های مغناطیسی موجود در مدار برای

۱-Conveyor chain calibration

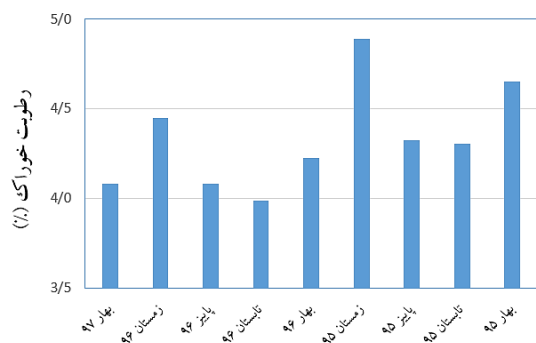
تساوی (خط ۴۵ درجه) نشان‌دهنده تفاوت میان درصد جامد نمونه‌گیری و مقدار محاسباتی نمایش داده شده در اتاق فرمان است. نتایج نشان داد، مقدار قدرمطلق اختلاف درصد جامد محاسباتی و نمونه‌برداری در این شرایط برابر ۱٫۷ درصد بود که خطایی برابر ۶ درصد ایجاد می‌شد (شکل ۷) و برای استفاده عملیاتی به دقت بالاتری نیاز بود.



شکل ۷- اختلاف درصد جامد محاسباتی و نمونه‌گیری سرریز هیدروسیکلون‌ها (قبل از نوسان‌گیری).

۳-۱- رفع اختلاف درصد جامد نمایشی و واقعی سرریز هیدروسیکلون‌ها

برای افزایش دقت محاسبات، شدت جریان و درصد جامد شیرآهک ورودی به آسیاها، آب همراه دوغاب و خروجی پمپ کفشو از طریق نمونه‌گیری دوره‌ای به دقت اندازه‌گیری شدند و میزان آن‌ها در فرمول درصد جامد سرریز لحاظ شد. برای کاهش خطا، میزان رطوبت بار ورودی آسیاها، طی سه سال گذشته بررسی شد. اطلاعات مربوط به تغییرات رطوبت در شکل ۸ به صورت میانگین فصل نشان داده شده است. به طور کلی، رطوبت بار ورودی میانگین فصل‌ها بین ۳٫۹ تا ۴٫۹ درصد بود. رطوبت بار ورودی به صورت میانگین ۴٫۵ درصد در رابطه محاسباتی در نظر گرفته شد.



شکل ۸- تغییرات رطوبت ۳ سال اخیر بار ورودی آسیاها.

برای کاهش خطای درصد جامد نمایشی و افزایش دقت داده

دوغاب خروجی غبارگیرها و رطوبت، ورودی‌های مدار بودند که در محاسبات در نظر گرفته شدند. بار برگشتی (دورریز) آسیاها هم خروجی دیگر مدار بود که در محاسبات وارد شد. بنابراین تمام موارد به صورت دقیق بررسی و در محاسبات در نظر گرفته شدند (رابطه ۱).

$$X_h (\%) = \frac{(T-r) \times (1-w) + S_m}{T + S_m + W_1 + W_2 + W_3 + W_4} \times 100 \quad (1)$$

که در آن:

X_h : درصد جامد سرریز هیدروسیکلون

T : آهنگ بار ورودی آسیا (t/h)

w : کسر رطوبت بار ورودی

r : ذرات با ابعاد بحرانی (t/h)

S_m : جامد خشک همراه شیر آهک (t/h)

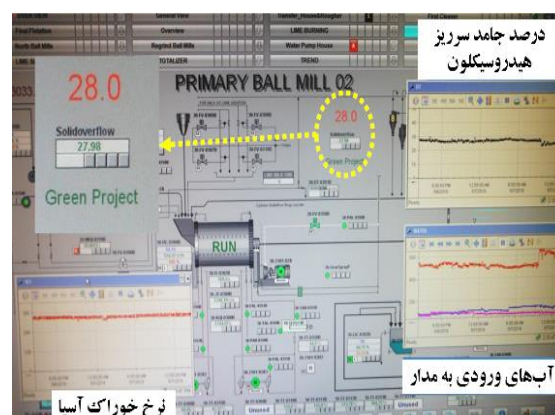
W_1 : آب ورودی به آسیا (m^3/h)

W_2 : آب ورودی به مخزن پمپ بار ورودی هیدروسیکلون (m^3/h)

W_3 : آب همراه دوغاب و خروجی پمپ کفشو (m^3/h)

W_4 : شدت جریان آب همراه شیرآهک (m^3/h)

با انتقال داده‌ها به اتاق فرمان، امکان محاسبه و نمایش لحظه‌ای درصد جامد فراهم شد. علاوه بر این، همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، روند مقادیر لحظه‌ای پارامترهای تناژ ورودی، آب‌های اضافه شده و درصد جامد قابل مشاهده و بررسی شد.



شکل ۶- نمایش درصد جامد در سیستم کنترل.

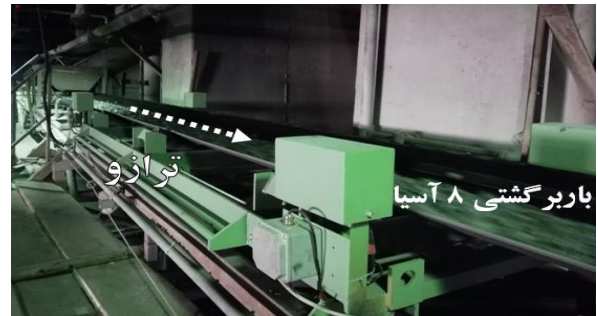
برای اطمینان از صحت درصد جامد محاسباتی سرریز در برنامه، نمونه‌گیری و مقایسه انجام گرفت. شکل ۷ نشان‌دهنده مقایسه درصد جامد محاسباتی و نمونه‌گیری سرریز قبل از انجام تغییرات و نوسان‌گیری است. هر نقطه مربوط به یک آسیا و میانگین ۱۰ نمونه‌برداری و ثبت عدد محاسباتی در یک زمان برای یک خوشه هیدروسیکلون است. فاصله نقاط از خط

ورودی به مخزن بار ورودی هیدروسیکلون، شیر کنترلی نصب شد و مسیر ارتباطی آن با اتاق کنترل برقرار شد. با نصب تجهیزات سخت‌افزاری و استفاده از درصد جامد محاسباتی، حلقه کنترل دانسیته سرریز هیدروسیکلون آسیای شماره ۵ برنامه نویسی و راه‌اندازی شد. سپس ضرایب PID (تناسی، انتگرالی و مشتقی) متناسب با این حلقه کنترلی انتخاب و اعمال شد. درصد جامد سرریز هیدروسیکلون‌های اولیه، طبق دستورالعمل اصلی فرآیند برابر با ۲۸ قرار داده شد. هنگامی که درصد جامد سرریز بیشتر از مقدار مطلوب باشد، دستور باز شدن شیر کنترلی آب ورودی به مخزن بار ورودی هیدروسیکلون داده می‌شود و با کاهش درصد جامد سرریز هیدروسیکلون نسبت به مقدار مطلوب، دستور بسته شدن شیر کنترلی داده می‌شود.

۳-۳- تاثیر استفاده از حلقه کنترل درصد جامد سرریز هیدروسیکلون‌ها

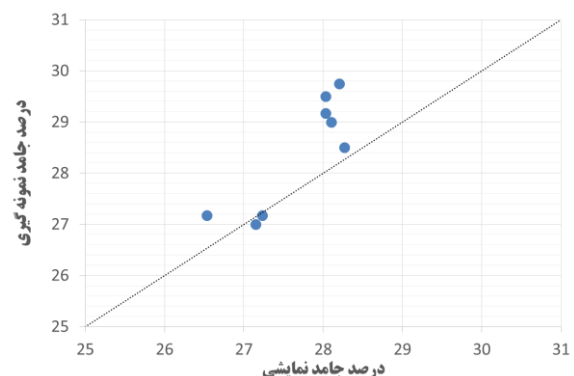
برای بررسی تاثیر استفاده از حلقه کنترل درصد جامد، داده‌های مربوط به آن در طی سه دوره در بازه‌های یک ماهه مورد مقایسه قرار گرفتند. دوره اول، قبل از اینکه درصد جامد سرریز هیدروسیکلون‌ها از طریق حسگر محاسبه‌ای در اتاق کنترل نمایش داده شود، دوره دوم، زمان نمایش درصد جامد در اتاق کنترل و دوره سوم زمان استفاده از حلقه کنترلی بود. در شکل ۱۱ مقایسه این سه دوره کارکرد هیدروسیکلون‌ها نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، در زمان عدم نمایش درصد جامد و تنظیم آن به صورت دستی، میزان تغییرات درصد جامد سرریز هیدروسیکلون در محدوده 30 ± 4.5 قرار داشت که موجب کاهش کارایی هیدروسیکلون می‌شد. هنگامی که از حسگر نرم درصد جامد سرریز استفاده شد، میزان تغییرات درصد جامد سرریز هیدروسیکلون در محدوده 29 ± 2.5 قرار گرفت که با آگاهی از وضعیت لحظه‌ای درصد جامد، کنترل دستی توسط مراقبت‌کاران انجام می‌شد. در زمانی که از حلقه کنترلی درصد جامد سرریز استفاده شد، میزان تغییرات درصد جامد سرریز هیدروسیکلون در محدوده 28 ± 0.5 درصد تنظیم شد که موجب افزایش کارایی هیدروسیکلون و ایجاد شرایط مطلوب برای مدار فلو تاسیون شد.

های ورودی، ترازوی نواری دقیقی برای اندازه‌گیری تناژ باربرگشتی آسیاها نصب شد و داده‌های برخت آن برای محاسبه درصد جامد محاسباتی به اتاق کنترل انتقال داده شد (شکل ۹).



شکل ۹- نصب ترازوی با دقت بالا در مسیر بار برگشتی آسیاها.

بعد از لحاظ کردن تمام مواردی که باعث ایجاد اختلاف بین درصد جامد محاسباتی و نمونه‌گیری سرریز هیدروسیکلون‌ها شده بود، میزان این اختلاف دوباره مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱۰). در شکل ۱۰ که مانند شکل ۸ رسم شده است، هر نقطه مربوط به یک خوشه هیدروسیکلون است. بررسی نتایج نشان داد، متوسط مقدار قدرمطلق اختلاف درصد جامد نمایشی و نمونه‌برداری از میزان ۱٫۷ درصد قبل از اعمال تغییرات به ۰٫۷۷ درصد بعد از انجام تغییرات و مقدار خطا از ۶ درصد به ۲٫۷ درصد کاهش یافت. همچنین، تحلیل آماری میزان اختلاف مطلق درصد جامد محاسباتی و نمونه‌گیری با استفاده از روش ANOVA نشان داد با احتمال بیش از ۹۹ درصد، میزان اختلاف قبل و بعد از تغییر از یک جمعیت نبوده و پس از اعمال تغییرات، مقدار مطلق اختلاف کاهش یافته است. این اختلاف نیز ناشی از نوسانات بار ورودی، شدت جریان آب (که به درصد جامد محاسباتی منتقل می‌شود) و نمونه‌گیری است.



شکل ۱۰- اختلاف درصد جامد محاسباتی و نمونه‌گیری سرریز هیدروسیکلون‌ها (بعد از نوسان‌گیری).

۳-۲- حلقه کنترل درصد جامد سرریز هیدروسیکلون‌ها

برای راه‌اندازی حلقه کنترل دانسیته سرریز، در مسیر آب

شدت جریان‌های آب اضافه شده با به کارگیری یک حسگر نرم تعیین شد.

با انتقال داده‌ها به اتاق کنترل و نوشتن برنامه انجام محاسبات موازنه آب، حسگر نمایش لحظه‌ای درصد جامد محاسباتی برای ۸ آسیا اجرایی شد. برای راه‌اندازی حلقه کنترل دانسیته سرریز، در مسیر آب ورودی به مخزن بار ورودی هیدروسیکلون، شیر کنترلی نصب شد. با نصب تجهیزات سخت‌افزاری و استفاده از حسگر نرم درصد جامد، حلقه کنترل دانسیته سرریز هیدروسیکلون برای یکی از آسیاها برنامه‌نویسی و راه‌اندازی شد.

پایش‌های انجام گرفته از مدار نشان داد، در زمان عدم نمایش درصد جامد و تنظیم آن به صورت دستی، میزان تغییرات درصد جامد سرریز هیدروسیکلون در محدوده $۳۰ \pm ۴/۵$ قرار داشت که موجب کاهش کارایی هیدروسیکلون می‌شد. هنگامی که از حسگر درصد جامد سرریز استفاده شد، میزان تغییرات درصد جامد سرریز هیدروسیکلون در محدوده $۲۹ \pm ۲/۵$ قرار گرفت و در زمانی که از حلقه کنترلی درصد جامد سرریز استفاده شد، میزان تغییرات درصد جامد سرریز هیدروسیکلون در محدوده $۲۸ \pm ۰/۵$ تنظیم شد.

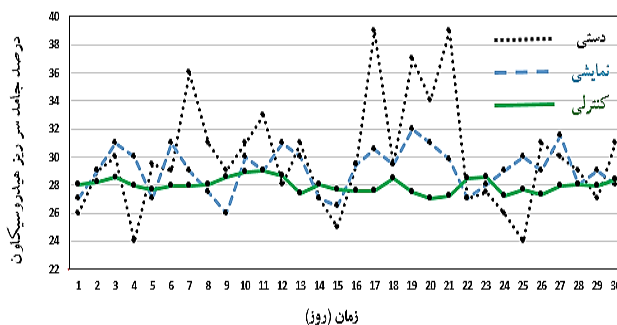
بررسی دانه‌بندی‌های سرریز هیدروسیکلون‌ها نشان داد، قبل از راه‌اندازی حلقه کنترل درصد جامد میانگین دانه‌بندی ورودی به مدار فلوتاسیون $۶۳/۵$ درصد زیر ۷۵ میکرون بود. بعد از مطلوب نگه داشتن درصد جامد سرریز هیدروسیکلون ۲۸ درصد) دانه‌بندی ورودی به مدار فلوتاسیون به ۶۷ درصد زیر ۷۵ میکرون افزایش یافت. با مطلوب نگه داشتن درصد جامد و دانه‌بندی سرریز هیدروسیکلون‌ها، انتظار می‌رود کارایی مدار فلوتاسیون افزایش یابد.

۵- تقدیر و تشکر

از مدیران و کارکنان مجتمع مس سرچشمه برای همکاری‌های لازم در انجام این تحقیق عملی و همچنین اجازه انتشار مقاله، تشکر می‌شود.

منابع

1. Kawatra, S.K., Eisele, T.C., Zhang, D., Rusesky, M.; 1988; "Effects of temperature on hydrocyclone efficiency". Int. J. Miner. Process. 23, 205-211.
2. Heiskanen, K.; 1993; "Particle Classification". Chapman & Hall, London, UK.
3. Wills, B.A., Finch, J.A.; 2016; "Will's Mineral



شکل ۱۱- مقایسه سه وضعیت کارکرد هیدروسیکلون‌ها.

با توجه به اینکه در مدار آسیاکنی، هدف، تامین دانه‌بندی مطلوب برای فرآیند پایین‌دست (فلوتاسیون) است، تاثیر تغییرات روی دانه‌بندی محصول مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه در این مدار، درصد ذرات زیر ۲۰۰ مش (۷۵ میکرون) به عنوان معیار دانه‌بندی در نظر گرفته می‌شود، این معیار در این تحقیق به عنوان شاخص دانه‌بندی مورد استفاده قرار گرفت. بررسی داده‌ها نشان داد قبل از راه‌اندازی حلقه کنترل درصد جامد، میانگین دانه‌بندی ورودی به مدار فلوتاسیون $۶۳/۵$ درصد زیر ۷۴ میکرون بود. بعد از مطلوب نگه داشتن درصد جامد سرریز هیدروسیکلون ۲۸ درصد) دانه‌بندی ورودی به مدار فلوتاسیون به ۶۷ درصد زیر ۷۵ میکرون افزایش یافت. با مطلوب نگه داشتن درصد جامد و دانه‌بندی سرریز هیدروسیکلون‌ها، انتظار می‌رود کارایی مدار فلوتاسیون افزایش یابد.

نکته مهم دیگر، بررسی صحت داده‌های حاصل از این حسگر نرم است. با توجه به اینکه داده‌های حاصل از ترازوها و شدت جریان‌سنج‌ها، به عنوان ورودی به این سیستم‌اند، واسنجی منظم و با برنامه این تجهیزات ضروری است. علاوه بر این، تغییر برخی از داده‌ها مانند شدت جریان پالپ کفشو یا غبارگیر که شدت جریان‌سنج ندارند، ممکن است باعث خطای هر چند کم شود. برای کاهش این خطا، اندازه‌گیری دوره‌ای این پارامترها ضروری است.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت زیاد دانسیته سرریز در فرآیند طبقه‌بندی، این حلقه در طرح اولیه برای تامین درصد جامد مناسب سرریز هیدروسیکلون‌های اولیه کارخانه پرعیارکنی ۱ مجتمع مس سرچشمه در نظر گرفته شده بود.

با توجه به هزینه زیاد و مشکلات تعمیر و نگهداری هشت دانسیته‌سنج هسته‌ای مورد نیاز برای راه‌اندازی حلقه‌های کنترلی دانسیته، در این تحقیق درصد جامد بر مبنای محاسبات موازنه جرم و استفاده از سایر داده‌های مدار مانند

- Comminution Circuits: Their Operation and Optimisation*". Chapter 12, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC), The University of Queensland, Brisbane, Australia.
17. Westendorf, M., et al.; 2015; "Managing cyclones: A valuable asset, the Copper Mountain case study". *Min. Eng.* 67 (6), 2641.
 18. Cirulis, D., Russell, J.; 2011; "Cyclone monitoring system improves operations at KUC's Copperton concentrator". *Eng. Min. J.* 212 (10), 4449.
 19. King, R.P.; 2001; "Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems", Butterworth – Heinemann.
 20. Flintoff, B.C., Mular A.L.; 1991; "The Plant Audit", A Practical Guide to Process Controls in the Minerals Industry, UBC, Brenda, P.P.48.
 21. Sliškovic, D., Grbic, R. Hocenski, Z.; 2011; "Methods for Plant Data-Based Process Modeling in Soft-Sensor Development" *ATKAF* 52(4), 306–318(2011).
 22. Pan X.W., Metzner G.; 2004; "Development of Weightometer Soft Sensor" APCOM 2004, Cape Town.
 23. Bazin, C. and Trusiak, A.; 1998; "A Soft Sensor for Flotation Plants" *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Volume 76, February, 1998.
 24. Casali, A., Vallebuona, G., Bustos, M. Gonzalez, G. and Gimenez, P.; 1998; "A Soft-Sensor For Solid Concentration In Hydrocyclone Overflow", *Minerals Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 375-383.
 25. Pan X.W.; 2012; "Smart Ore Tracking System Using Soft Sensor Technology" *AGH Journal of Mining and Geoengineering*, vol. 36, No. 4.
 26. Pan X.W.; 2012; "Development Of Stock pile Soft Sensor" *AGH Journal of Mining and Geoengineering*, vol. 36, No. 4.
 27. Du Y-G, del Villar R, Thibault J.; 1997; "Neural net-based soft sensor for dynamic particle size estimation in grinding circuits", *International Journal of Mineral Processing*, 52(2):121–135
 28. National Iranian Copper Industries Company; 1977; "Fine Crushing and Fine Ore Storage, Operating Manual".
 - Processing Technology", 8nd ed., Elsevier.
 4. Heiskanen, K.; 2000; "Experimental hydrocyclone coping models". *Chem. Eng. J.* 80,289–293.
 5. Nageswararao, K., Wiseman, D.M., Napier-Munn, T.J.; 2004; "Two empirical hydrocyclone models revisited". *Miner. Eng.* 17, 671–687.
 6. Neesse, T.; 1971; "Hydrocyclone as a turbulence classifier". *Chem. Tech. (Leipzig)* 23,146.
 7. Neesse, T., Golyk, V., Kaniut, P., Reinsch, V.; 2004; "Hydrocyclone control in grinding circuits". *Miner. Eng.* 17, 1237–1240.
 8. Neesse, T., Schneider, M., Golyk, V., Tiefel, H.; 2004; "Measuring the operating state of the hydrocyclone". *Miner. Eng.* 17, 697–703.
 9. Aldrich, C., Uahengo, F.D.L., Kistner, M.; 2015; "Estimation of particle size in hydrocyclone underflow streams by use of multivariate image analysis". *Miner. Eng.* 70, 14–19.
 10. Elsele, T.C., Jeltama, C.H.N., Walqui, H., Kawatra, S.K.; 2013; "Coarse and fine "fishhook" inflections in hydrocyclone efficiency curves". *Miner. Metall. Process.* 30,137–144.
 11. Renner, V.G., Cohen, H.E.; 1978; "Measurement and interpretation of size distribution of particles within a hydrocyclone". *Trans. Inst. Min.Metall., Sec. C.* 87 (June), C139C145.
 12. Leith, D., Licht, W.; 1972; "The collection efficiency of cyclone type particle collector: anew theoretical approach". *AIChE Symp.Series(Air-1971)*. 68 (126), 196206.
 13. Kraipech, W., et al.; 2006; "The performance of the empirical models on industrial hydrocyclone design". *Int. J. Miner. Process.* 80, 100115.
 14. Plitt, L.R.; 1976; "A mathematical model of the hydrocyclone classifier". *CIM Bull.* 69 (Dec.), 114123.
 15. Palaniandy S., Yahyaei M, Powell M.; 2017; "Assessment of hydrocyclone operation in gravity induced stirred mill circuits". Elsevier; *Minerals Engineering* 108 (2017) 83–92
 16. Napier-Munn, T.J.; 1996; "Mineral