نشریه علمی پژوهشی «مهندسی معدن» دوره ۱۵، شماره ۴۶، بهار ۱۳۹۹، صفحه ۱۹ تا ۲۶
Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME) Vol 15, No 46, 2020, pp 19-26

بهینه‌سازی فرآیند آبگیری از باطله کارخانه‌های فرآوری طلا با استفاده از هیدروسیکلون

عطاالله بهرامی[1*]، ساغر فرج‌زاده[2]، محسن افتخاری[3]

۱. دانشیار گروه مهندسی معدن، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ارومیه A.bahrami@urmia.ac.ir
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ارومیه st_s.farajzadeh@urmia.ac.ir
۳. کارشناس ارشد متالورژی، کارخانه فرآوری طلای زرشوران mohsen4pi@gmail.com

(دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۲۰ - پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۶)

چکیده

عملیات آبگیری و بازیابی آب مورد استفاده در فرآیندهای فرآوری مواد معدنی، علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف آب موجب به حداقل رسیدن تخلیه پسماند در محیط زیست می‌شود. در این تحقیق به بهینه‌سازی فرآیند آبگیری کارخانه فرآوری طلای زرشوران با استفاده از مدار شامل هیدروسیکلون پرداخته شده است. بدین منظور تعداد ۱۲ آزمایش با قطرهای اسپیگات ۲، ۳، ۶ و ۹ میلی‌متر و در سه حالت عملیاتی تخلیه افشان، حالت گذر و تخلیه طنابی، هیدروسیکلون انجام شده است. قابلیت آبگیری هیدروسیکلون در هر آزمایش بر اساس مقادیر درصد جامد وزنی و بازیابی جرمی جامد جریان ته‌ریز ارزیابی شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در شرایط عملیاتی ثابت، با افزایش قطر اسپیگات بازیابی جرمی جامد به جریان ته‌ریز افزایش و درصد جامد وزنی ته‌ریز کاهش می‌یابد. از طرفی با گرایش وضعیت تخلیه ته‌ریز از حالت طنابی به حالت افشان، درصد جامد وزنی و بازیابی جرمی جامد جریان ته‌ریز به طور هم‌زمان افزایش می‌یابند. بنابراین می‌توان گفت الگوی تخلیه افشان در ته‌ریز دارای قابلیت آبگیری بالاتری است. در قطر ۶ میلی‌متر اسپیگات و الگوی تخلیه افشان، بازیابی جرمی جامد ته‌ریز و درصد جامد وزنی ته‌ریز به ترتیب به ۷۵ و ۶۱ درصد می‌رسد. در این حالت با در نظر گرفتن هیدروسیکلون به عنوان مرحله اول فرآیند آبگیری، این مقدار از جامد بدون نیاز به آبگیری مستقیما و با هزینه کمتری قابل انتقال به سد باطله است. از طرف دیگر سرریز هیدروسیکلون محتوای ۲۵ درصد از کل جامد ورودی است. در صورتی که از فیلتر پرس موجود در واحد آبگیری به عنوان مرحله نهایی آبگیری استفاده شود، بار ورودی آن ۷۵ درصد کاهش خواهد یافت و این به معنی افزایش کلی ظرفیت این واحد به وسیله هیدروسیکلون است.

کلمات کلیدی

هیدروسیکلون، آبگیری، بهینه‌سازی، الگوی تخلیه، قطر اسپیگات، باطله طلای زرشوران.

* نویسنده مسئول مکاتبات.

۱- مقدمه

بیشتر فرآیندهای جدایش و تغلیظ مواد معدنی (مانند آسیاکنی، فلوتاسیون، مغناطیسی، فروشویی) در محیط‌های آبی انجام می‌گیرد [۱]. این فرآیندها برای انجام عملیات و تولید محصول، به حجم بالایی از آب نیاز دارند. تخلیه پساب تولیدی این گروه از صنایع در محیط، از یک سو آثار مخربی بر محیط‌زیست داشته و از سوی دیگر موجب هدر رفتن مقدار زیادی آب و به تبع آن افزایش هزینه‌های سالیانه تامین آب می‌شود. از طرف دیگر، خشکسالی‌های پیاپی و تقاضای رو به رشد استفاده از آب شیرین، موجب وقوع بحران کم آبی و تبدیل آب به یک کالای حیاتی در برخی از نقاط جهان شده است [۲]. بنابراین با توجه به حجم بالای آب مصرفی در صنایع معدنی، باید از طریق شیوه‌های مدیریت آب و به کارگیری فناوری‌های پیشرفته، اقداماتی برای بهینه‌سازی مصرف آب در این صنعت، انجام گیرد [۳]. در این زمینه برخی از شرکت‌های معدنی اقدام به استفاده از آب دریا برای انجام عملیات‌های فرآوری کرده‌اند و برخی دیگر به انجام مطالعاتی در راستای بهبود سیستم‌های بازیافت آب مصرفی پرداخته‌اند [۴]. با مقایسه و بررسی طرح‌های آبرسانی (به عنوان مثال استفاده از دریا) و فرآیندهای آبگیری، این نتیجه حاصل می‌شود که اغلب طرح‌های آبرسانی به علت هزینه‌های بالا، فاقد توجیه اقتصادی‌اند. بنابراین بهینه‌سازی سیستم‌های آبگیری موجود، گزینه‌ای منطقی‌تر است [۱].

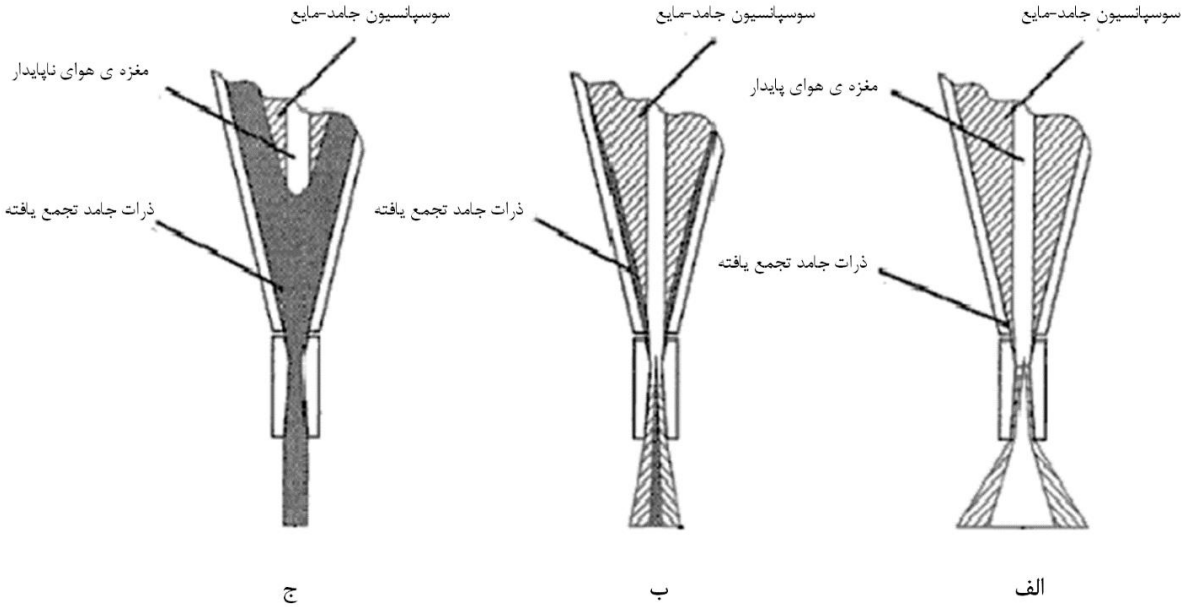
در صنایع فرآوری مواد معدنی، برای بازیابی آب از روش‌های ته‌نشینی و فیلتراسیون استفاده می‌شود و سیستم‌های رایج برای این فرآیندها شامل تیکنرها[1]، سرندهای آبگیری، فیلترهای خلا[2]، سانتریفیوژها[3] و فیلترهای فشاری[4] است [۱]. در شرایطی که اختلاف چگالی جامد و مایع زیاد باشد، روش ته‌نشین کردن در تانک‌هایی با عنوان شستشوگر، کلاریفایر[5] و تیکنر دارای بهترین بازدهی است [۶, ۵]. در پروسه آبگیری برخی از مواد معدنی، به ویژه ذرات ریزدانه، از سیستم‌های فیلتراسیون استفاده می‌شود. از جمله این موارد می‌توان به فیلترینگ ذرات زغال ریزدانه در کارخانه‌های فرآوری انجیرتنگه واقع در البرز مرکزی و همچنین فیلتر باطله کارخانه فرآوری طلای زرشوران اشاره کرد. مساله اساسی در رابطه با استفاده از تیکنر و فیلترها در پروسه آبگیری، نیاز به فضای بزرگ برای ایجاد و نصب تاسیسات، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بالای این سیستم‌ها و مدت زمان ماند طولانی پالپ در آن‌ها است. در این راستا، استفاده از هیدروسیکلون‌ها در مدارهای آبگیری به عنوان جایگزینی برای تیکنرها و یا وسیله‌ای برای کاهش بار ورودی به تیکنر و فیلترها و به تبع کاهش ابعاد آن‌ها، بسیار کارآمد خواهد بود [۷].

هیدروسیکلون یک وسیله با طراحی ساده اما مکانیزم جدایش بسیار پیچیده است. در صنایع فرآوری مواد معدنی، از هیدروسیکلون‌ها اغلب برای اهداف طبقه‌بندی و آرایش کانی‌ها استفاده می‌شود [۸]، در حالی که می‌توان از این وسیله برای اهداف آبگیری و افزایش غلظت محصولات فرآیندهای پردازش مواد معدنی نیز استفاده کرد [۹]. از مزایای استفاده از هیدروسیکلون در فرآیند آبگیری سوسپانسیون‌های جامد- مایع در صنایع مختلف، می‌توان به نبود قطعات متحرک، محدوده عملیاتی وسیع، مصرف انرژی پایین، نیاز به فضای کوچکتر (در مقایسه با تیکنر و فیلترپرس‌ها)، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی و تعمیر و نگهداری پایین، کاهش زمان پروسه آبگیری، تطابق‌پذیری بالا با تغییر در شرایط عملیاتی واحد صنعتی و در نهایت مقرون به صرفه بودن فرآیند آبگیری (نسبت به دیگر فرآیندهای آبگیری مانند استفاده مستقیم از فیلترپرس) اشاره کرد [۱۰].

کارایی طبقه‌بندی و آبگیری با استفاده از هیدروسیکلون به طراحی پارامترهای عملیاتی آن وابسته است. بر اساس بررسی‌های انجام شده، پارامترهای تاثیرگذار بر درصد جامد خروجی ته‌ریز و سرریز هیدروسیکلون شامل قطر دهانه خروجی ته‌ریز (اسپیگات[6])، دانسیته بار ورودی و اندازه ستون هوا است [۱۱]. نظارت بر الگوی تخلیه ته‌ریز هیدروسیکلون نیز یک روش مفید برای ارزیابی عملکرد آن است [۱۲, ۷]. با افزایش گرانروی پالپ قطر مغزه هوا کاهش می‌یابد و الگوی تخلیه ته‌ریز به حالت طنابی (شکل ۲- الف) گرایش پیدا میکند. با توجه به محدودیت سطح عبور در ته‌ریز، افزایش غلظت پالپ منجر به تجمع ذرات جامد در بخش مخروطی می‌شود و در نهایت با جلوگیری از مکش صحیح هوا به داخل هیدروسیکلون سبب تخلیه طنابی در ته‌ریز خواهد شد، در نتیجه بخش اعظم جامد از سرریز تخلیه می‌شود. در تخلیه به حالت افشان (شکل ۲- ب) مغزه هوا در کل طول هیدروسیکلون و از ته‌ریز تا سرریز گسترش می‌یابد [۷]. حالت مابین تخلیه افشان و طنابی (حالت گذر شکل ۲ـ پ) برای

1-Thickeners
2-Vacuum filters
3-Centrifuges
4-Pressure filters
5-Clarifier
6-Spigot

طبقه‌بندی و حالت تخلیه طنابی برای آبگیری مناسب است [۱۳]. از طرف دیگر قطر هیدروسیکلون مهمترین پارامتر تاثیرگذار در حد جدایش این دستگاه است که می‌تواند یک معیار تاثیرگذار در بازدهی آبگیری با استفاده از هیدروسیکلون نیز باشد. قطر کوچکتر هیدروسیکون منجر به حد جدایش کوچکتر و همچنین نسبت غلیظسازی بیشتر می‌شود [۱۵, ۱۴].



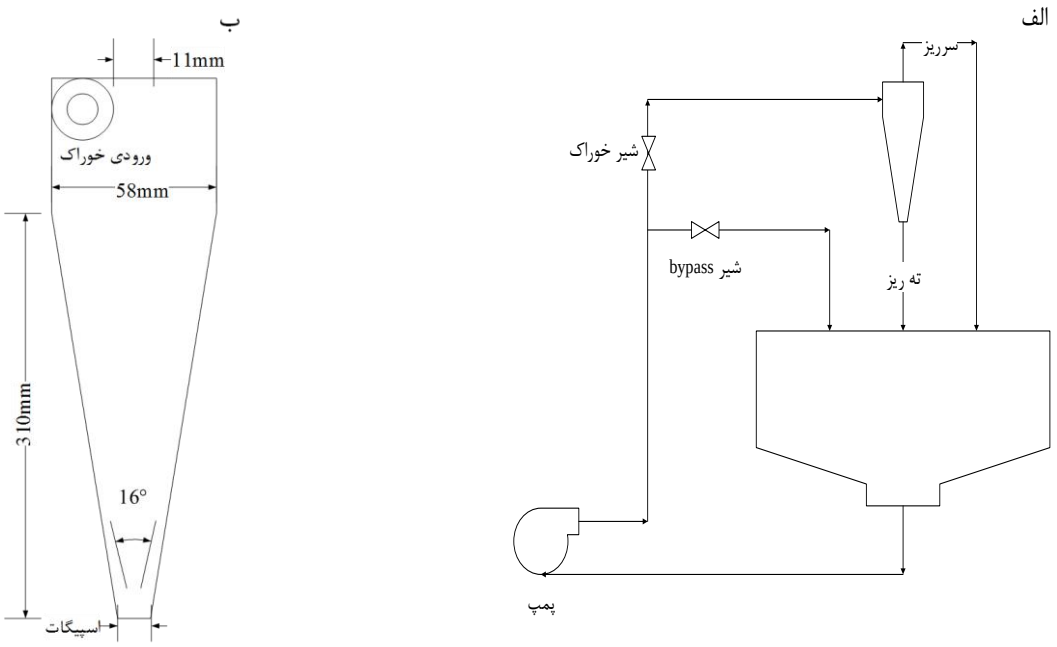
شکل ۱- حالت‌های عملیاتی هیدروسیکلون؛ الف- الگوی تخلیه افشان، ب- حالت گذر و پ- الگوی تخلیه طنابی.

فرآیند استحصال طلا از جمله فرآیندهای با میزان مصرف بالای آب است [۱۶]. در واحدهای تولیدکننده طلا عمده آلاینده‌ها مانند سیانور، آرسنیک و نظایر آن، به وسیله آب خروجی از سیستم به محیط زیست وارد می‌شوند. مساله دفع این پساب‌ها از جمله مهمترین مشکل‌های واحدهای فرآوری طلا است. این مشکل به ویژه زمانی که طلا همراه با ناخالصی‌هایی مانند آرسنیک، آنتیموان و نظایر آن، همراه بوده جدی‌تر می‌شود. معدن طلای زرشوران به عنوان بزرگترین معدن طلای ایران در ۳۵ کیلومتری شهرستان تکاب در استان آذربایجان غربی واقع شده است. در کارخانه فرآوری طلای زرشوران، پس از عملیات سنگ‌شکنی و آسیاکنی (با هدف دستیابی به محصولی که ۸۰ درصد آن دارای اندازه ذرات کوچکتر از ۴۵ میکرون باشند)، استحصال طلا به روش سیانوراسیون انجام می‌شود. باطله فرآیند سیانوراسیون با درصد جامد وزنی ۲۸ تا ۳۳ درصد به واحد آبگیری منتقل می‌شود. تجهیزات آبگیری مورد استفاده در این واحد عبارت از ۷ سری فیلتر پرس است که ظرفیت کلی آن‌ها برابر ۱۲۰ مترمکعب پالپ در ساعت است. کیک فیلتر با رطوبت ۳۰ تا ۳۵ درصد به عنوان باطله نهایی با کامیون به سد باطله انتقال می‌یابد. در این تحقیق با هدف طراحی فرآیند سیستم آبگیری مناسب برای کارخانه فرآوری طلای زرشوران، سعی بر بهینه‌سازی پارامترهای طراحی و عملیاتی موثر بر بازدهی آبگیری هیدروسیکلون‌ها شده است. در این راستا و با هدف تولید محصول با درصد جامد بالا از خروجی ته‌ریز هیدروسیکلون آبگیری، به بررسی درصد جامد وزنی و همچنین بازیابی جرمی جامد به جریان‌های سرریز و ته‌ریز در مکانیزم‌های سه‌گانه تخلیه ته‌ریز (طنابی، حالت گذر و افشان) پرداخته شده است. به علاوه تاثیر قطر دهانه خروجی ته‌ریز بر این دو پارامتر و همچنین مکانیزم‌های خروجی پالپ از ته‌ریز (طنابی، حالت گذر و افشان) بررسی شده است. در نهایت، امکان افزایش ظرفیت واحد آبگیری کارخانه فرآوری طلای زرشوران با استفاده از هیدروسیکلون مطالعه و گزینه‌های موجود برای بهبود فرآیند آبگیری به طور مختصر ارزیابی شده‌اند.

۲- مواد و روش‌ها

برای بررسی تاثیر مکانیزم تخلیه ته‌ریز هیدروسیکلون و قطر دهانه خروجی آن بر درصد جامد وزنی و بازیابی جرمی جامد جریان‌های ته‌ریز و سرریز هیدروسیکلون، ۱۲ سری

آزمایش در حالت مکانیزم‌های طنابی، حالت گذر و افشان تخلیه ته‌ریز و قطرهای ۲، ۳، ۶ و ۹ میلی‌متر دهانه خروجی ته‌ریز هیدروسیکلون انجام گرفته است. دستگاه مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها متشکل از یک هیدروسیکلون، پمپ، شیر کنترل بار ورودی و شیر کمکی، تانک ذخیره و مخلوط‌کنی است. شکل ۲- الف نحوه ارتباط این بخش‌ها را با هم نشان می‌دهد. قطر هیدروسیکلون ۵۸ میلی‌متر و زاویه مخروط آن ۱۶ درجه است (شکل ۲- ب).



شکل ۲- الف- تصویر شماتیک هیدروسیکلون آزمایشگاهی مورد استفاده و ب- مشخصات هندسی هیدروسیکلون استفاده شده در آزمایش‌ها.

بار ورودی مورد استفاده در آزمایش‌ها، پالپ با درصد جامد وزنی ۲۸ تا ۳۳ درصد است که از ترکیب کیک فیلتر خشک شده بخش آبگیری کارخانه فرآوری طلای زرشوران و آب معمولی حاصل شده است. این مقدار برابر با درصد جامد وزنی پالپ ورودی بخش آبگیری کارخانه فرآوری طلای زرشوران است. نمونه‌برداری در هر آزمایش پس از برقراری شرایط تعادل و به طور هم‌زمان از خروجی سرریز و ته‌ریز هیدروسیکلون انجام گرفته است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تاثیر نسبت مخروط بر حالت عملیاتی هیدروسیکلون

نسبت مخروط در هیدروسیکلون (نسبت قطر اسپیگات به ورتکس) تعیین‌کننده شرایط تخلیه ته‌ریز است. با استفاده از این نسبت، دو معیار توسط کنچا[1] و باستامنت[2] برای تعیین مکانیزم تخلیه محتمل در ته‌ریز پیشنهاد شده است [۱۸, ۱۷]. در جدول ۱ الگوی‌های تخلیه محتمل بر اساس این نسبت‌ها ارایه شده است. برای بررسی شرایط حصول الگوهای سه‌گانه تخلیه، آزمایش‌هایی با دانسیته بار ورودی یکسان (۱٫۲ گرم بر سانتی‌مترمکعب) و قطر دهانه سرریز ۱۱ میلی‌متر، در قطرهای مختلف ۲، ۳، ۶ و ۹ میلی‌متر (معادل نسبت‌های مخروط به ترتیب ۰٫۱۸، ۰٫۲۷، ۰٫۵۴ و ۰٫۸۱) دهانه ته‌ریز، انجام گرفته است. امکان مشاهده الگوهای سه‌گانه با تغییر فشار بار ورودی بررسی شده است. نتایج این بررسی در جدول ۲ ارایه شده است. خانه‌های مشخص شده به رنگ قرمز، الگوهای تخلیه مشاهده شده در ته‌ریزند. همان‌گونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، با وجود محدوده تعیین شده نسبت مخروط برای شکل‌گیری الگوهای تخلیه سه‌گانه توسط کنچا و باستامنت (جدول ۱)، دستیابی به مکانیزم‌های تخلیه افشان و حالت گذر در مقادیر کوچکتر نسبت مخروط (۰٫۱۸ و ۰٫۲۷) نیز امکان‌پذیر بوده است اما با افزایش این نسبت به بیان ساده‌تر با افزایش قطر دهانه ته‌ریز (در این تحقیق) گرایش مکانیزم تخلیه به حالت افشان بیشتر می‌شود، به گونه‌ای که در نسبت مخروط ۰٫۸۱ (و یا قطر ۹ میلی‌متر) تنها مکانیزم قابل دستیابی در ته‌ریز، مکانیزم افشان بوده است. در غلظت ثابتی از بار ورودی، افزایش نسبت مخروط،

1-Concha
2-Bustamante

سبب افزایش زاویه تخلیه ته‌ریز می‌شود [۱۹]. طبق جدول ۲ نیز با افزایش این نسبت، گرایش الگوی تخلیه به حالت افشان بیشتر می‌شود تا جایی که در نسبت مخروط ۰٫۸۱ تنها الگوی قابل دستیابی در ته‌ریز، الگوی افشان بوده است.

منابع متفاوتی به تاثیر قطر دهانه خروجی ته‌ریز بر مکانیزم خروجی پالپ از ته‌ریز اشاره داشته‌اند. اندازه دهانه خروجی کوچکتر به علت عدم تشکیل ستون هوا، منجر به تشکیل خروجی طنابی شکل از ته‌ریز می‌شود [۲۰]. با توجه به محدودیت سطح عبور در ته‌ریز، کوچکتر شدن دهانه منجر به تجمع ذرات جامد در بخش مخروطی هیدروسیکلون و در نهایت با جلوگیری از مکش صحیح هوا به داخل هیدروسیکلون، سبب تخلیه طنابی در ته‌ریز خواهد شد [۷]. از طرف دیگر قطر کوچکتر موجب دستیابی به پتانسیل حد جدایش ریزتر در هیدروسیکلون شده که این مساله موجب افزایش بازیابی ذرات ریز در ته‌ریز و کارایی هیدروسیکلون در فرآیند آبگیری مواد معدنی می‌شود [۱۴, ۱۵].

جدول ۱- مقایسه معیارهای ارایه شده برای پیش‌بینی الگوی تخلیه ته‌ریز.

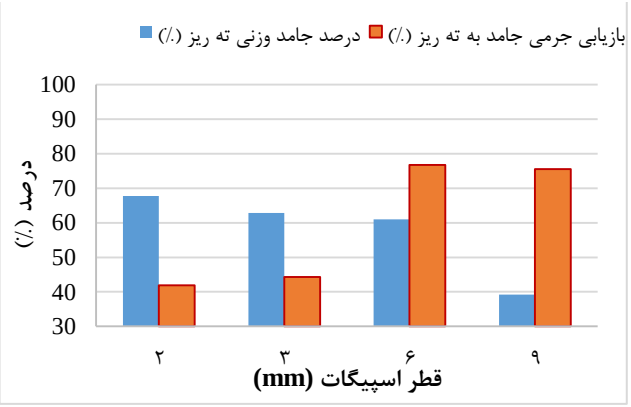
شرایط تخلیه	نسبت مخروط	قطر و نوع هیدروسیکلون	معیار
فقط طنابی	<۰٫۳۴	۱۵۲ میلی‌متر Krebs	Bustamante
طنابی یا افشان (بسته به سایر پارامترها)	۰٫۳۴ تا ۰٫۵		
فقط افشان	۰٫۵ تا ۰٫۹		
فقط طنابی	<۰٫۴۵	۱۰۰ میلی‌متر AKW	Concha
طنابی، شبه طنابی یا افشان	۰٫۴۵ تا ۰٫۵۶		
افشان	>۰٫۵۶		

جدول ۲- تاثیر نسبت مخروط هیدروسیکلون بر الگوی تخلیه ته‌ریز، قطر ورتکس ۱۱ میلی‌متر.

الگوهای تخلیه مشاهده شده در ته‌ریز				
افشان	حالت گذر	طنابی	نسبت مخروط	قطر اسپیگات (میلی‌متر)
■			۰٫۸۱	۹
■	■		۰٫۵۴	۶
■	■	■	۰٫۲۷	۳
■	■	■	۰٫۱۸	۲

۳-۲- تاثیر قطر اسپیگات بر درصد جامد وزنی و بازیابی جامد ته‌ریز هیدروسیکلون

دو پارامتر مهم برای انتخاب حالت بهینه آبگیری با استفاده از هیدروسیکلون، درصد جامد وزنی و بازیابی جرمی جامد جریان ته‌ریز است. در آبگیری با هیدروسیکلون بالاترین درصد جامد وزنی و بازیابی جرمی جامد در ته‌ریز مورد انتظار است [۲۱]. هدف از بیشینه کردن درصد جامد وزنی ته‌ریز حذف نیاز به آبگیری مجدد ته‌ریز و یا کاهش رطوبت آن به عنوان بار ورودی مرحله بعدی آبگیری، به عنوان مثال فیلتراسیون است. افزایش بازیابی جرمی جامد ته‌ریز معادل کاهش مقدار جامد راه یافته به سرریز و به تبع آن کاهش مقدار جامد بار ورودی تجهیز آبگیری بعدی، به عنوان مثال تیکنر است. برای بررسی تاثیر قطر اسپیگات بر این دو پارامتر، در شرایط یکسان تخلیه افشان ته‌ریز، درصد جامد وزنی و بازیابی جامد جریان ته‌ریز برای قطرهای مختلف اسپیگات، اندازه‌گیری شده است. برای اندازه‌گیری درصد جامد وزنی، با نمونه‌برداری هم‌زمان از ته‌ریز و سرریز، حجم و وزن نمونه‌ها تعیین و سپس دانسیته پالپ‌ها محاسبه شد. میزان بازیابی جامد هر یک از جریان‌ها نیز با استفاده از زمان نمونه‌برداری و تعیین شدت جریان جرمی جامد خشک در جریان‌ها، محاسبه شده است. زاویه تخلیه ته‌ریز برای هر اسپیگات متفاوت و در هر مورد بیشترین زاویه قابل دستیابی، به کار گرفته شده است. در شکل ۳ تاثیر قطر اسپیگات بر درصد جامد وزنی و بازیابی جامد جریان ته ریز نشان داده شده است.

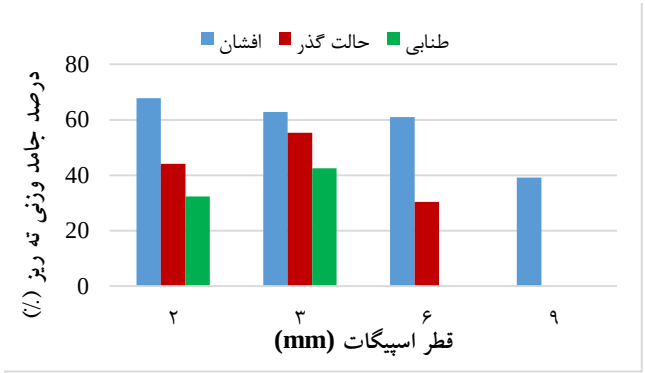


شکل ۳- تاثیر قطر اسپیگات بر درصد جامد وزنی و بازیابی جامد جریان ته ریز در الگوی تخلیه افشان.

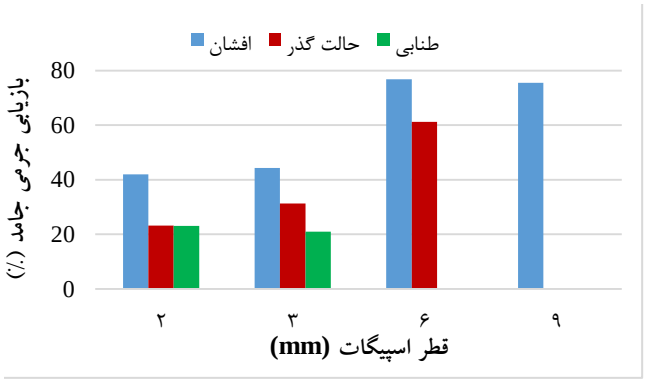
طبق نمودار شکل ۳ با افزایش قطر دهانه ته‌ریز، بازیابی جامد به ته‌ریز افزایش و درصد جامد وزنی ته‌ریز کاهش می‌یابد؛ به گونه‌ای که با تغییر قطر از ۲ به ۹ میلی‌متر بازیابی جامد به ته‌ریز ۳۳٫۶۰ درصد افزایش و درصد جامد وزنی ۲۸٫۵۱ درصد کاهش داشته است. به طورکلی می‌توان گفت بازیابی جامد به جریان ته‌ریز با قطر ته‌ریز رابطه مستقیم داشته و با افزایش اندازه قطر، بازیابی جامد ته‌ریز افزایش می‌یابد.

۳-۳- تغییرات درصد جامد وزنی و بازیابی جامد به ته‌ریز در الگوهای سه‌گانه تخلیه ته‌ریز

عملکرد هیدروسیکلون به شدت متاثر از هندسه مغزه هوا و حرکت آن است [۲۰]. با افزایش گرانروی پالپ قطر مغزه هوا کاهش می‌یابد و الگوی تخلیه ته‌ریز به حالت طنابی گرایش پیدا می‌کند. با توجه به محدودیت سطح عبور در ته‌ریز، افزایش غلظت پالپ منجر به تجمع ذرات جامد در بخش مخروطی می‌شود و در نهایت با جلوگیری از مکش صحیح هوا به داخل هیدروسیکلون سبب بروز حالت تخلیه طنابی در ته‌ریز خواهد شد. نتیجه نهایی این اتفاق راه‌یابی بخش بزرگی از جامد به سرریز است. در تخلیه به حالت افشان مغزه هوا در کل طول هیدروسیکلون و از ته‌ریز تا سرریز گسترش می‌یابد [۷]. اغلب محققان بر این باورند که مکانیزم تخلیه طنابی در ته‌ریز از نظر آبگیری مطلوب‌ترین حالت است. خروجی طنابی شکل دارای درصد جرمی پالپ بالاتری نسبت به دیگر مکانیزم‌ها است، در نتیجه پالپ خروجی از ته‌ریز در این حالت محتوی میزان آب کمتری خواهد بود [۱۹, ۱۲]. از این جهت، تعیین حالت عملیاتی بهینه برای مقاصد آبگیری لازم است. بدین منظور، برای مقایسه قابلیت آبگیری هیدروسیکلون در شرایط مختلف تخلیه ته‌ریز، درصد جامد وزنی و بازیابی جرمی جامد این جریان در قطرهای مختلف اسپیگات محاسبه شد. نتایج به دست آمده در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴- تغییرات درصد جامد وزنی ته‌ریز در الگوهای سه‌گانه تخلیه ته‌ریز.



شکل ۵- تغییرات بازیابی جرمی جامد به ته‌ریز در الگوهای سه‌گانه تخلیه ته‌ریز.

همان‌طور که در نمودار شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، مقادیر درصد جامد وزنی و بازیابی جرمی جامد ته‌ریز در تمامی قطرها، در مکانیزم تخلیه افشان بیشتر است، بنابراین می‌توان گفت که این مکانیزم دارای کاربرد بهتری برای فرآیند آبگیری است. طبق نمودار شکل ۴ با گرایش مکانیزم تخلیه ته‌ریز از حالت افشان به حالت طنابی در تمامی قطرها درصد جامد وزنی ته‌ریز کاهش می‌یابد. روند مشابهی برای تغییرات بازیابی جرمی جامد به ته‌ریز در شکل ۵ نیز مشاهده می‌شود. بدیهی است که کاهش بازیابی جرمی جامد به ته‌ریز معادل افزایش این پارامتر در جریان سرریز است. به طور کلی روند منظم و سیستماتیکی برای تغییرات بازیابی جامد به سرریز مشاهده نمی‌شود. البته با توجه به تاثیر سایر پارامترها از جمله فشار بر عملکرد هیدروسیکلون، ممکن است با تغییر در سایر پارامترها، روند منظمی برای بازیابی جامد به سرریز قابل دستیابی باشد. بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان گفت، بازیابی جامد به سرریز تاثیرپذیری بیشتری از قطر اسپیگات نسبت به مکانیزم تخلیه ته‌ریز داشته است.

۳-۴- بهبود فرآیند آبگیری کارخانه فرآوری طلای زرشوران

با در نظر گرفتن درصد جامد وزنی ته‌ریز هیدروسیکلون و بازیابی جرمی جامد به این جریان، به عنوان پارامترهای تعیین‌کننده قابلیت آبگیری هیدروسیکلون، گزینه‌های زیر برای بهبود مدار آبگیری فعلی موجود است:

- درصد جامد وزنی ته‌ریز ۴۰ تا ۵۰ درصد:

با توجه به اینکه در هیدروسیکلون عمده رس در سرریز تجمع می‌یابد، بنابراین می‌توان گفت که ته‌ریز تقریبا بدون رس است و در نتیجه قابلیت فیلتراسیون آن بالاست و می‌توان با در نظر داشتن ظرفیت، چند سری فیلتر برای آبگیری هر چه بیشتر ته‌ریز اختصاص داد. در این حالت انتظار می‌رود که رطوبت کیک فیلتر کمتر از مقدار فعلی باشد و در نتیجه بازیابی آب نیز افزایش خواهد یافت. البته با توجه به نمودارهای شکل‌های ۴ و ۵ بازیابی جامد در این حالت ۲۰ تا ۲۵ درصد است. بنابراین، این حالت از نظر قابلیت آبگیری چندان مطلوب به نظر نمی‌رسد. سرریز هیدروسیکلون در این حالت می‌تواند پس از آماده‌سازی با مواد شیمیایی مناسب، بار ورودی انواع تیکنر را تشکیل دهد.

- درصد جامد وزنی ته‌ریز ۶۰ تا ۷۰ درصد:

درصد جامد وزنی ته‌ریز هیدروسیکلون نزدیک به درصد جامد وزنی کیک فیلتر در مدار فعلی است. همان‌طور که گفته شد، در شرایط فعلی کیک فیلتر با کامیون به سد باطله منتقل می‌شود. با توجه به اینکه ته‌ریز هیدروسیکلون به شکل پالپ است و قابلیت پمپاژ دارد، هزینه انتقال آن به سد باطله می‌تواند کمتر باشد.

در قطرهای کوچکتر ته‌ریز بازیابی جرمی جامد به ته‌ریز حدود ۴۰ تا ۴۵ درصد است. این مقدار در قطر ۶ میلی‌متر به حدود ۷۵ درصد می‌رسد. در حالت اخیر، با فرض هیدروسیکلون به عنوان مرحله اول آبگیری، این مقدار از جامد بدون نیاز به آبگیری مستقیما و با هزینه کمتر قابل انتقال به سد باطله است. از طرف دیگر سرریز هیدروسیکلون محتوای ۲۵ درصد از کل جامد ورودی است. در صورتی که فیلتر پرس موجود در واحد آبگیری به عنوان مرحله بعدی آبگیری استفاده شود، بار ورودی آن ۷۵ درصد کاهش خواهد یافت و این به معنی افزایش کلی ظرفیت این واحد به وسیله هیدروسیکلون است. البته با توجه به تغییر خواص بار ورودی از جمله دانه‌بندی و ترکیب کانی‌شناسی، احتمالا یک یا چند مرحله آماده‌سازی با مواد شیمیایی و فلوکولانت‌های مناسب مورد نیاز باشد که نیاز به مطالعه و بررسی بیشتر دارد.

- درصد جامد وزنی ته‌ریز ۵۰ تا ۶۰ درصد:

این حالت مابین دو حالت قبلی است و در صورت انتخاب این حالت می‌توان با در نظر گرفتن ملاحظات فنی و اقتصادی تصمیم گرفت ته‌ریز به سد باطله یا فیلتر پرس انتقال یابد. البته با توجه به وجود سیانور و عناصر سمی مانند آرسنیک، جیوه و آنتیموان در باطله، از نظر زیست‌محیطی ترجیح بر این است که ورودی سد باطله دارای حداقل رطوبت باشد. از طرفی بازیابی جرمی جامد ته‌ریز در این حالت حدود ۳۰ درصد است که نسبت به حالت دوم بسیار پایین‌تر است.

۴- نتیجه‌گیری

در طی این مطالعه به طراحی مدار و امکان افزایش ظرفیت واحد آبگیری کارخانه فرآوری طلای زرشوران با استفاده از هیدروسیکلون پرداخته شده است. در همین راستا تاثیر پارامترهای عملیاتی و طراحی شامل قطر دهانه خروجی ته‌ریز و مکانیزم خروجی آن بر درصد جامد وزنی و بازیابی جامد جریان خروجی از ته‌ریز هیدروسیکلون بررسی شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، با افزایش قطر ته‌ریز هیدروسیکلون، مکانیزم تخلیه ته‌ریز بیشتر به وضعیت افشان گرایش خواهد یافت، به گونه‌ای که در قطر ۹ میلی‌متر تنها مکانیزم تخلیه قابل دستیابی، حالت افشان است. تخلیه افشان در مقادیر کمتر نسبت مخروط (قطر ته‌ریز کوچکتر با ثابت نگه داشتن قطر سرریز) به عنوان مثال ۰٫۱۸ و ۰٫۲۷ نیز قابل دستیابی است. با گرایش الگوی تخلیه ته‌ریز از حالت طنابی به حالت افشان، در تمامی قطرهای دهانه ته‌ریز، درصد جامد وزنی و بازیابی جرمی جامد جریان ته‌ریز افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت، مکانیزم تخلیه افشان دارای بالاترین قابلیت آبگیری است. همچنین در مکانیزم تخلیه یکسان، افزایش قطر ته‌ریز، سبب افزایش بازیابی جامد به ته‌ریز و کاهش درصد جامد وزنی ته‌ریز خواهد شد که این پارامترها در حالت تخلیه افشان دارای بیشترین مقادیرند.

استفاده از هیدروسیکلون با قطر ۵۸ میلی‌متر و قطر دهانه ته‌ریز ۶ میلی‌متر در حالت عملیاتی افشان، علاوه بر فراهم کردن درصد جامد وزنی ۶۱ درصد در ته‌ریز، بازیابی ۷۵ درصدی جامد را در ته‌ریز موجب خواهد شد. در این حالت درصد جامد ته‌ریز هیدروسیکلون نزدیک به درصد جامد وزنی کیک فیلتر در مدار آبگیری کنونی کارخانه فرآوری طلای زرشوران است که دارای قابلیت پمپاژ مستقیم به سد باطله است. استفاده از هیدروسیکلون با مشخصات یاد شده به جای سیستم آبگیری کارخانه، موجب کاهش هزینه‌ها و افزایش ظرفیت مدار آبگیری می‌شود. در صورتی که از فیلتر پرس‌های موجود در مدار کنونی

کارخانه زرشوران برای آبگیری سرریز هیدروسیکلون در حالت یاد شده استفاده شود، بار ورودی آن‌ها از ۱۱۰ تن بر ساعت جامد خشک به ۲۷٫۵ تن بر ساعت کاهش می‌یابد که این به معنای افزایش ظرفیت کلی واحد آبگیری کارخانه است.

منابع

1. Galvez, E., Cruz, R., Robles, P.A., Cisternas, L.A. (2014). Optimization of dewatering systems for mineral processing. Minerals Engineering, 63, 110-117.
2. Klemes, J. (2012). Industrial water recycle/reuse. Current Opin. Chem. Eng. 1, 238– 245.
3. Usher, S.P., Scales, P.J. (2005). Steady state thickener modelling from the compressive yield stress and hindered settling function. Chem. Eng. J. 111, 253–261.
4. Johnson, N.W. (2003). Issues in maximization of recycling of water in a mineral processing plant. In: Proceedings of Water in Mining, 13–15 October 2003, Brisbane, Queensland. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Publication Series 6, 239–245.
5. Bergh, L., Ojeda, P., Torres, L. (2015). Expert Control Tuning of an Industrial Thickener. IFAC-Papers on Line, 48(17), 86-91.
6. Rudman, M., Paterson, D.A., Simic, K. (2010). Efficiency of raking in gravity thickeners. International Journal of Mineral Processing, 95(1), 30-39.
7. Dubey, R.K., Singh, G., Majumder, A.K. (2017). Is it an optimum dewatering performance condition in a hydro cyclone? Powder Technology, 321, 218-231.
8. WANG, C., HARBOTTLE, D., LIU, Q. & XU, Z. 2014. *Current state of fine mineral tailings treatment: A critical review on theory and practice*. Minerals Engineering, 58, 113-131.
9. GARMSIRI, M. R. & UNESI, M. 2018. *Challenges and opportunities of hydrocyclone-thickener dewatering circuit: A pilot scale study*. Minerals Engineering, 122, 206-210.
10. NI, L., TIAN, J., SONG, T., JONG, Y. & ZHAO, J. 2018. *Optimizing Geometric Parameters in Hydrocyclones for Enhanced Separations: A Review and Perspective*. Separation & Purification Reviews, 1-22.
11. Gutierrez, J.A., Dyakowski, T., Beck, M.S., Williams, R.A. (2000). Using electrical impedance tomography for controlling hydro cyclone underflow discharge. Powder Technol. 108, 180–184.
12. Viljoen, T. (1993). Recent developments in instrumentation. SAIMM School: Process Simulation, Control and Optimization. The South African Institute of Mining and Metallurgy, Randburg, August 18– 20.
13. NEESSE, T., SCHNEIDER, M., DUECK, J., GOLYK, V., BUNTENBACH, S. & TIEFEL, H. 2004a. *Hydrocyclone operation at the transition point rope/spray discharge*. Minerals Engineering, 17, 733-737.
14. Yang, Q., Li, Z.M., Lv, W.J., Wang, H.L. (2013). On the laboratory and field studies of removing fine particles suspended in wastewater using mini-hydro cyclone, Sep. Purif. Technol. 110, 93–100.
15. PASQUIER, S. & CILLIERS, J. 2000. *Sub-micron particle dewatering using hydrocyclones*. Chemical Engineering Journal, 80, 283-288.
16. WANG, C., HARBOTTLE, D., LIU, Q. & XU, Z. 2014. *Current state of fine mineral tailings treatment: A critical review on theory and practice*. Minerals Engineering, 58, 113-131.
17. BUSTAMANTE, M. 1991. *Effect of the hydrocyclone geometry on normal operation conditions*. University of Concepción.
18. CONCHA, F., BARRIENTOS, A., MONTERO, J. & SAMPAIO, R. 1996. *Air core and roping in hydrocyclones*. Comminution 1994. Elsevier.
19. DUBEY, R., CLIMENT, E., BANERJEE, C. & MAJUMDER, A. K. 2016. *Performance monitoring of a hydrocyclone based on underflow discharge angle*. International Journal of Mineral Processing, 154, 41-52.
20. Neesse, T., Dueck, J. (2007). Air core formation in the hydrocyclone. Minerals Engineering, 20(4), 349-354.
21. NEESSE, T., SCHNEIDER, M., DUECK, J., GOLYK, V., BUNTENBACH, S. & TIEFEL, H. 2004a. *Hydrocyclone operation at the transition point rope/spray discharge*. Minerals Engineering, 17, 733-737.