

مطالعه تاثیر متقابل متغیرهای عملیاتی فلوتاسیون ستونی با ویژگی‌های تصاویر کف

مهدی ایران نژاد^{۱*}، فردیس نخعی^۲، سیما محمدنژاد^۳

- ۱- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
۲- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
۳- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

(دریافت ۱۳۹۶/۱۲/۱۹، پذیرش ۱۳۹۷/۰۲/۲۴)

چکیده

ساختار سطح کف فلوتاسیون، حاوی اطلاعات مهمی از فرآیند است که به خوبی شرایط عملیاتی فرآیند را بازتاب می‌دهد. در این تحقیق تاثیر متغیرهای عملیاتی فلوتاسیون ستونی (نرخ جریان گاز، ارتفاع کف، درصد جامد پالپ، نرخ مواد شیمیایی و pH) بر ویژگی‌های استخراج شده از تصاویر کف (اندازه حباب، رنگ کف، سرعت و پایداری کف) در عملیات گوگردزایی از کانه‌های آهن بررسی شد. برای انجام آزمایش‌ها از کنسانتره جداکننده‌های مغناطیسی خط فرآوری باطله‌های خشک مجتمع سنگ آهن گل‌گهر با عیار متوسط گوگرد و آهن ۶۳ و ۰/۴۸ درصد نمونه‌برداری شد و به منظور جمع‌آوری ویژگی‌های تصاویر کف و متغیرهای فرآیند، ۴۵ آزمایش‌ها بر اساس طراحی آزمایش مرکب مرکزی (CCD) انجام شد. مجموعه داده‌های تصویری کف با استخراج فریم‌های متوالی از دوربین عکاسی و فیلم‌برداری به دست آمد و میانگین ویژگی‌های استخراج شده از تصاویر کف انتخابی محاسبه شد. نتایج تحلیل واریانس داده‌ها نشان داد که متغیرهای عملیاتی فلوتاسیون ستونی تاثیر معناداری بر ویژگی‌های استخراج شده از تصاویر کف دارند. تاثیر pH و تاثیر متقابل pH-نرخ کلکتور بر همه ویژگی‌های کف اثر معناداری دارد. نتایج نشان داد که وضعیت فرآیند فلوتاسیون می‌تواند با دقت بالایی از ظاهر سطح کف تفسیر شود که رویکرد مناسبی را برای تعیین و بهینه‌سازی متغیرهای عملیاتی به عنوان تابعی از فرآیند کنترل، فراهم می‌کند.

کلمات کلیدی

تحلیل تصاویر، ویژگی‌های کف، فلوتاسیون ستونی، متغیرهای عملیاتی، آهن، گوگردزایی.

۱- مقدمه

زیرا کل مدار فلوتاسیون یک فرآیند وسیع و پیوسته است که چندین بانک سلول فلوتاسیون دارد. علاوه بر آن، خستگی کاربران به واسطه مشاهدات طولانی اجتناب ناپذیر است و در نتیجه نمی‌توانند وضعیت کف را با مشاهدات لحظه‌ای به طور صحیح شناسایی نمایند [۵].

به عنوان یک نتیجه، کنترل واحدهای فلوتاسیون صنعتی اغلب بر اساس ظاهر بصری فاز کف است و به میزان تجربه و توانایی کاربر وابسته است. این مهارت در طی سال‌ها تجربه و آموزش به دست می‌آید و یک واحد صنعتی در صورت از دست دادن کاربران باتجربه، متحمل مشکلات زیادی می‌شود، زیرا مهارت کسب شده توسط یک کاربر منحصر به یک واحد فلوتاسیون خاص است و هیچ منبع و راهنمای مشخصی از دانش کاربر وجود ندارد و قابل تعمیم به واحدهای فلوتاسیون دیگر نیست. بنابراین درک و تفسیر فاز پیچیده کف، منحصراً از طریق مشاهدات بصری کاربران کاملاً دشوار و غیرممکن است و نیازمند استفاده از روش‌های محاسباتی است.

در حال حاضر با توسعه سریع ابزارهای محاسباتی، برای غلبه بر این مشکلات می‌توان از روش‌های تصویربرداری دیجیتال از کف استفاده کرد. در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای در رابطه با استفاده از روش‌های تحلیل تصاویر در فرآیند فلوتاسیون انجام گرفته است [۱۲-۶]. ظاهر سطح کف را می‌توان با استفاده از روش‌های پردازش تصویر که قادر به توصیف ویژگی‌های مورفولوژیکی [۱۲] و رنگی [۱۳]، بافتی و دینامیکی تصویراند، تحلیل کرد. ابعاد حباب، رنگ، سرعت (جابه‌جایی حباب‌ها در سطح کف) و پایداری کف معمولاً به عنوان ویژگی‌های بصری حایز اهمیت در کنترل و پایش عملیات فلوتاسیون در نظر گرفته می‌شوند. این ویژگی‌ها با عوامل متالورژیکی اندازه‌گیری شده در واحد فلوتاسیون ارتباط معناداری دارند. این رابطه می‌تواند به کاربران فرآیند در تحلیل، پایش و کنترل عملیات فلوتاسیون کمک شایانی نماید. ویژگی‌های ساختاری را می‌توان از طریق محاسبه توصیف‌گرهای مختلف شکل (مانند روش آب‌پخشان) استخراج کرد. اطلاعات بافت به وسیله محاسبه برخی ویژگی‌های آماری (مانند ماتریس هم‌رخداد، هیستوگرام، آنتروپی و نظایر آن) استخراج می‌شود. اطلاعات رنگی معمولاً از فضاهای رنگی مانند RGB یا مقیاس خاکستری محاسبه می‌شود. ویژگی‌های دینامیکی از سلسه تصاویر نتیجه می‌شود.

در چندین مطالعه بنیادی با استفاده از تحلیل کیفی فاز کف، تاکید شده است که می‌توان از ساختار کف به عنوان یک

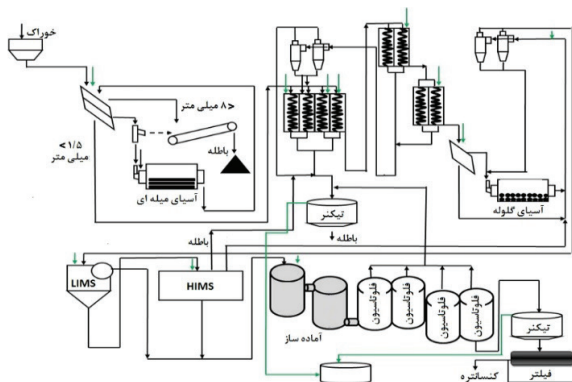
عملیات فلوتاسیون رایج‌ترین روش در جدایش کانی‌های بارزش از باطله، در فرآوری مواد معدنی است. این فرآیند یک روش جدایش فیزیکی- شیمیایی است که از وجود اختلاف در خواص سطحی کانی‌های بارزش و باطله استفاده می‌کند. فرآیند فلوتاسیون به شدت توسط بسیاری از عوامل مانند تغییرات ویژگی‌های پالپ ورودی (عیار، توزیع ابعادی ذرات، درجه آزادی، خواص سطحی و نظایر آن) و متغیرهای فرآیند (میزان مصرف مواد شیمیایی، pH و نظایر آن) تحت تاثیر قرار می‌گیرد [۱]. تعداد و اندازه حباب‌ها، توزیع ابعاد ذرات و به طور کلی رفتار کف در فرآیند فلوتاسیون اهمیت زیادی دارد. نرخ هوا و مقدار کف‌ساز، بر تعداد و اندازه حباب‌ها در فاز پالپ و کف تاثیر قابل ملاحظه‌ای دارد. مشخصات کانه ورودی و شرایط عملیات آسیاب‌کنی اندازه و ویژگی‌های سطحی ذرات را تعیین می‌کند. مواد شیمیایی مانند کلکتور با اصلاح خواص سطحی، انتخابی بودن و میزان بازیابی کانی‌های با ارزش از باطله را افزایش می‌دهد.

از مطالعات ابتدایی انجام گرفته توسط محققان مختلف در بیان رفتار فاز کف، مشاهده شد که تغییرات ظاهری سطح کف کلید درک رفتار کلی فرآیند است و می‌توان از ویژگی ظاهری سطح کف به عنوان یک شاخص موثر از وضعیت عملکرد فرآیند استفاده کرد [۴-۲].

در بسیاری از واحدهای فلوتاسیون، متغیرهای عملیاتی از قبیل مواد شیمیایی، جریان هوا و سطح پالپ، اساساً از طریق مشاهدات انجام گرفته از ویژگی‌های سطحی کف توسط کاربران باتجربه تنظیم می‌شود. با این وجود، مشکلات بسیاری در کنترل عملیات فلوتاسیون، مبتنی بر مشاهدات انجام گرفته توسط چشم انسان وجود دارد.

مشاهدات کاربران از سطح کف، کیفی و فاقد اندازه‌گیری‌های کمی است. هر یک از کاربران ممکن است درک متفاوتی از ویژگی‌های بصری داشته باشند زیرا هیچ معیار مشخصی برای قضاوت در مورد وضعیت کف وجود ندارد. حتی در مورد وضعیت‌های کف فلوتاسیون در شرایط و زمان یکسان، کاربران مختلف احتمالاً نتایج کاملاً متفاوتی را گزارش می‌دهند. به عبارت دیگر، هر کاربر بر اساس وضعیت مشاهده شده از کف، ممکن است یک یا چند عامل ورودی را برای دستیابی به عملکرد بهینه بر مبنای نظر و دانش شخصی، تغییر دهد [۵]. کاربران قادر به پایش موثر کل مدار فلوتاسیون نیستند

یک مدار بسته با آسیای میله‌ای مورد خردایش قرار می‌گیرد. ته‌ریز سرند وارد بخش ماریپیچ رافر می‌شود. باطله این بخش به عنوان باطله نهایی وارد تیکنر باطله شده و کنسانتره آن وارد ماریپیچ‌های کلینر اولیه و ثانویه می‌شود. باطله این دو بخش در یک مدار بسته با ماریپیچ رافر، وارد هیدروسیکلون می‌شود. سرریز هیدروسیکلون که محتوای آهن بسیار پایینی دارد به تیکنر باطله انتقال می‌یابد. کنسانتره مرحله کلینر ثانویه وارد سرند با دهانه ۳۰۰ میکرون می‌شود. ذرات بزرگ‌تر برای خردایش مجدد به آسیای گلوله‌ای ارسال می‌شود. خروجی آسیا با ته‌ریز سرند مخلوط شده و به سیکلونی که در مدار بسته با آسیای گلوله‌ای قرار دارد منتقل می‌شود. سرریز سیکلون با دانه‌بندی ریزتر از ۱۰۰ میکرون، وارد جداکننده مغناطیسی شدت پایین^۲ می‌شود. باطله جداکننده LIMS، وارد جداکننده مغناطیسی شدت بالا^۳ می‌شود. باطله HIMS وارد تیکنر باطله و محصول میانی آن به سیکلون انتقال می‌یابد. کنسانتره دو جداکننده مغناطیسی بعد از اختلاط به منظور کاهش میزان گوگرد وارد مرحله فلوتاسیون می‌شود. مدار پرعیار کنی خط DTP در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: شمای کلی مدار DTP

به طور کلی پیریت به دلیل ایجاد مشکل در صنایع فولادسازی به عنوان کانی باطله و مزاحم در نظر گرفته می‌شود. گوگرد باعث شکنندگی و تردی فولاد در حرارت‌های بالا، کاهش خاصیت جوش خوردگی، افزایش خوردگی، آلودگی هوا در حین پخت گندله، افزایش مصرف سنگ آهک و افزایش تولید سرباره در بخش فولادسازی می‌شود. پیریت و پروتیت کانی‌های پارامگنتیت‌اند و هنگامی که در میدان مغناطیسی در مجاورت کانی‌های آهن‌دار مانند مگنتیت و هماتیت قرار

معیار مناسب برای ارزیابی کارایی کیفی سیستم فلوتاسیون استفاده کرد [۷، ۱۴]. مولمان و همکاران [۷] بیان کردند که روش‌های کیفی طبقه‌بندی کف را نه تنها باید بر اساس مشاهدات ساده کف بلکه بر مبنای یک تحلیل تفصیلی از رابطه بین ظاهر کف و کارایی فرآیند پایه‌گذاری کرد. بر اساس همین استدلال، آن‌ها سه طبقه اصلی کف شامل کف ایده‌آل، کف روان و کف چسبنده را بر مبنای این فرض شناسایی کردند که تحرک کف، پایداری کف و ابعاد متوسط حباب مهم‌ترین ویژگی‌های کف‌اند.

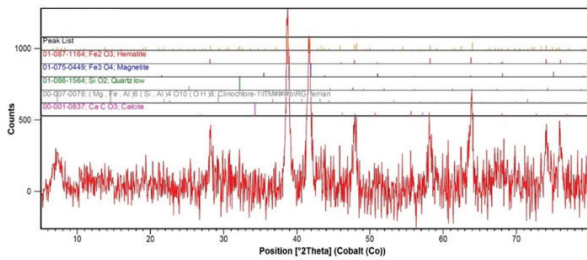
اکثر تحقیقات انجام گرفته در رابطه با موضوع مورد مطالعه، بر روی کمی‌سازی مشاهدات انجام گرفته از کف (روش‌های استخراج ویژگی) متمرکز شده‌اند و توجه کمتری به ارتباط میان متغیرهای عملیاتی فرآیند فلوتاسیون و ویژگی‌های بصری کف شده است. در این مقاله، تاثیر متغیرهای عملیاتی فرآیند فلوتاسیون شامل نرخ جریان هوا، ارتفاع کف، مقدار کف‌ساز، مقدار کلکتور، pH و درصد جامد بر رفتار کف (تغییرات ظاهر بصری سطح کف) بررسی می‌شود. بدین منظور روش‌های مختلف استخراج داده‌ها از تصاویر کف با تمرکز بر آخرین پیشرفت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. ویژگی‌های استخراج شده از تصاویر سطح کف شامل ویژگی‌های فیزیکی (رنگ و ابعاد) و ویژگی‌های دینامیکی مانند پایداری و سرعت کف (جابه‌جایی حباب‌ها در سطح کف یا نرخ انتقال کف به سمت سرریز سلول)، به عنوان شاخص‌های عملکرد فرآیند در نظر گرفته می‌شوند.

۲- مواد و روش انجام آزمایش‌ها

۲-۱- ویژگی‌های نمونه

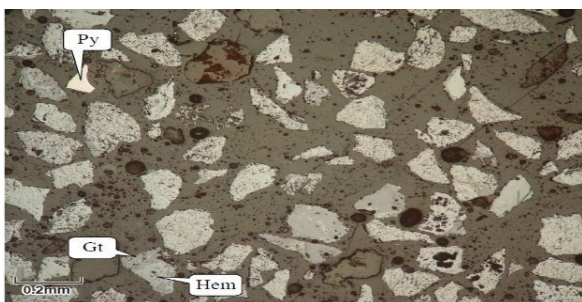
در مطالعه حاضر برای انجام آزمایش‌ها، از جریان ورودی به سلول‌های فلوتاسیون مکانیکی خط فرآوری باطله‌های خشک مجتمع سنگ آهن گل‌گهر نمونه‌برداری شد.

در خط فرآوری باطله‌های خشک^۱ مجتمع سنگ آهن گل‌گهر، باطله‌های بخش خشک کارخانه مگنتیت (با ذخیره احتمالی ۲۵ میلیون تن که از زمان شروع تولید در محل مشخصی انباشته شده‌اند)، مورد فرآوری قرار گرفته و هماتیت و مگنتیت آن استحصال می‌شود. در مدار یاد شده، مواد معدنی با نوارنقاله به سیلوی ۲۰۰۰ تنی انتقال می‌یابد. مواد در اولین مرحله وارد سرند دو طبقه می‌شود. ذرات درشت‌تر از ۸ میلی‌متر از مدار خارج شده و ذرات با ابعاد ۸-۱٫۵ میلی‌متر در



شکل ۳: تحلیل پراش پرتو ایکس نمونه معرف

مطالعات کانی‌شناسی مقاطع صیقلی و تیغه‌های نازک نمونه معرف نشان داد که هماتیت مهم‌ترین کانی آهن‌دار است. هماتیت در نمونه ثانویه است و در اثر اکسیداسیون مگنتیت و طی فرآیند مارتیتی شدن ایجاد می‌شود و حدود ۵۵ تا ۶۰ درصد نمونه را تشکیل می‌دهد. شدت مارتیتی شدن بسیار شدید است و در مواردی بلورهای مگنتیت کاملاً به هماتیت تبدیل می‌شود و اثری از مگنتیت باقی نمی‌ماند و یا به صورت باقیمانده‌هایی در مرکز بلور دیده می‌شود. همچنین فراوانی بسیار کم بلورهای مگنتیتی که در آن مارتیتی شدن ضعیفی رخ داده مشاهده می‌شود. در مواردی شدت اکسیداسیون به حدی بالا است که هماتیت نیز در اثر اکسیداسیون به گوتیت تبدیل شده است. در نمونه معرف معمولاً هماتیت و مگنتیت با یکدیگر درگیری دارند. مقدار تقریبی مگنتیت در نمونه تقریباً ۸ تا ۱۰ درصد است. همچنین گوتیت در اثر اکسیداسیون پیریت حاصل شده است و دارای فراوانی در حدود ۶ درصد است. پیریت دارای فراوانی ۲ درصد است و درگیری کمی با کانی‌های حاوی آهن را در نمونه نشان می‌دهد (شکل ۴).

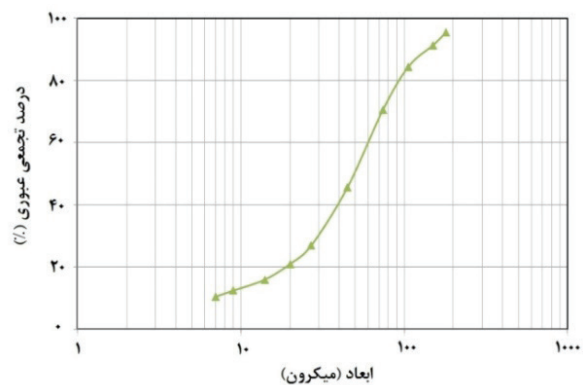


شکل ۴: بیشتر بلورهای هماتیت و پیریت به صورت آزاد (106+ و 150- میکرون)

درجه آزادی پیریت در ۵ فراکسیون بررسی شد و مشاهده شد که ذرات بین ۱۰۶ و ۷۵ میکرون که ۱۵ درصد از نمونه را تشکیل می‌دهند، آزادی ۹۰ و ذرات زیر ۷۵ میکرون که ۷۰

می‌گیرند دارای خاصیت مغناطیسی می‌شوند و به طور کامل با جداکننده‌های مغناطیسی بازیابی نمی‌شوند. به همین دلیل کنسانتره‌های حاصل از جدایش مغناطیسی در این واحد فرآوری، حاوی ۰٫۴ تا ۰٫۶ درصد گوگرد است که بیشتر از حد مجاز برای تولید فولاد (۰٫۱ درصد) است. بنابراین در این مجتمع از فلوتاسیون معکوس برای کاهش گوگرد کنسانتره جداکننده‌های مغناطیسی استفاده می‌شود. در عملیات فلوتاسیون، از آمیل گزنات پتاسیم به عنوان کلکتور و از متیل ایزوبوتیل کربونیل (MIBC) به عنوان کف‌ساز استفاده می‌شود.

تحلیل نتایج دانه‌بندی نمونه معرف نشان داد که به طور متوسط در حدود ۸۰ درصد وزنی از ذرات نمونه معرف سهم ذرات زیر ۹۰ میکرون است. توزیع دانه‌بندی نمونه معرف در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲: توزیع دانه‌بندی نمونه مورد مطالعه

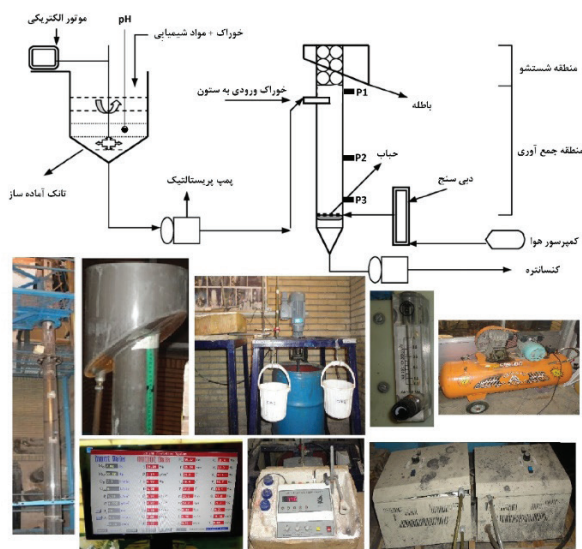
میانگین عیاری عناصر با آنالیز عیاری نمونه معرف در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات عیاری نمونه معرف برای انجام آزمایش‌ها

P (%)	S (%)	FeO (%)	Fe (%)
۰٫۱۳	۰٫۴۸	۱٫۴۸	۶۳٫۳۳

به منظور شناسایی و تعیین مقادیر نیمه کمی کانی‌ها بر روی نمونه‌های معرف، تحلیل پراش پرتو ایکس انجام شد (شکل ۳). نتایج تحلیل‌ها نشان داد که در نمونه معرف کانی‌های هماتیت و مگنتیت فاز اصلی را تشکیل می‌دهند. علاوه بر این کانی‌های کلسیت، کوارتز، پیریت دیکیت و کلریت نیز شناسایی شدند.

در این ستون برای اندازه‌گیری ماندگی گاز و ارتفاع کف از سه فشارسنج استفاده شده است، بطوری که دو حسگر در ناحیه پالپ (ناحیه جمع‌آوری) و یک حسگر در ناحیه کف (ناحیه شستشو) قرار دارد. داده‌های به دست آمده از حسگرها برای انجام کالیبراسیون و مانیتورینگ به یک پردازشگر مخابره می‌شود و داده‌های واقعی به یک کنترل‌کننده ارسال می‌شود. سیستم کنترل سطح پالپ سلول ستونی، دور موتور پمپ باطله را بر اساس موقعیت سطح مشترک نسبت به مقدار مطلوب، تغییر می‌دهد. سلول فلوتاسیون ستونی مورد استفاده در آزمایش‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است.

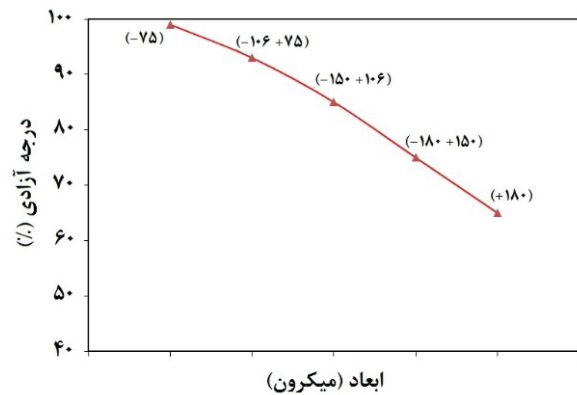


شکل ۶: مدار و تجهیزات سلول فلوتاسیون ستونی مورد استفاده

برای پایش سطح کف عملیات فلوتاسیون از یک دوربین تصویربرداری کانن مدل EOS 50D و یک دوربین فیلم‌برداری سونی مدل HDR-SR10 استفاده شد. فن‌آوری نوین کاهش نویز در دوربین عکاسی مورد استفاده کیفیت تصویربرداری در نور ضعیف را افزایش می‌دهد. برای تنظیم دوربین و عکاسی از راه دور و پایش بلادرنگ سطح کف بر روی صفحه نمایش رایانه از نرم‌افزار DSLR Remote Pro استفاده شد. دوربین عکاسی مورد استفاده دارای سنسور ۱۸ مگاپیکسلی CMOS با توانایی ضبط ویدیویی Full HD بود.

دوربین عکاسی به طور عمود در فاصله ۲۵ سانتی‌متری از لبه بالایی سلول در داخل یک محفظه ثابت قرار گرفت به طوری که دقیقاً مرکز لنز دوربین با مرکز سلول تطابق داشت. دوربین فیلم‌برداری با زاویه اندکی نسبت به سلول بر روی

درصد نمونه را تشکیل می‌دهند، تقریباً آزادند (شکل ۵).

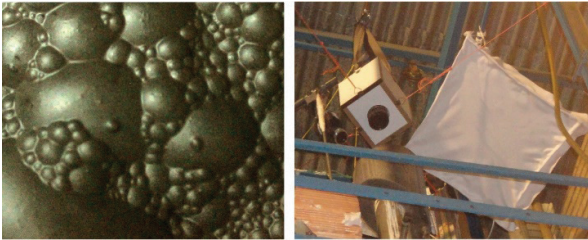


شکل ۵: درجه آزادی نمونه مورد مطالعه

۲-۲- فلوتاسیون ستونی

برای انجام آزمایش‌ها از سلول فلوتاسیون ستونی دانشگاه صنعتی امیرکبیر به منظور گوگردزایی از کانه‌های آهن در مقیاس نیمه صنعتی و به طور پیوسته استفاده شد. این ستون از جنس پلاکسی گلاس با ارتفاع ۴۰۰ و قطر ۱۰ سانتی‌متر بود. برای تامین بار اولیه از یک مخزن مجهز به یک همزن استفاده شد، تا ضمن آماده‌سازی از ته‌نشینی مواد جلوگیری کند. پالپ آماده‌سازی شده با پمپ پرستالتیک به مخزن نوسان‌گیر سلول فلوتاسیون (برای کم کردن نوسانات نرخ جریان ورودی) ارسال و سپس به صورت ثقلی به ستون وارد شد. برای اندازه‌گیری و تنظیم نرخ جریان هوا از فلومتر مدل ACA05 (محدوده نرخ اندازه‌گیری ۱-۱۰ m³/h و دارای شیر تنظیم دبی هوا) استفاده شد. حباب‌ساز مورد استفاده از نوع داخلی و متخلخل (قطر منافذ ۵۰ تا ۱۰۰ میکرون) با قطر ۳ cm و طول ۱۴ cm بود.

pH پالپ در طول آزمایش‌ها در مخزن پالپ ورودی به طور پیوسته با pH متر دیجیتالی آزمایشگاهی مدل MTT65 اندازه‌گیری و با افزودن اسید سولفوریک و NaOH در مقدار مورد نظر تنظیم شد. از آنجایی که هدف از عملیات فلوتاسیون ستونی، کاهش پیریت در محصول نهایی است، بنابراین از عملیات فلوتاسیون معکوس با آمیل‌گزنتات پتاسیم (PAX) به عنوان کلکتور و MIBC به عنوان کف‌ساز استفاده شد. پس از تنظیم pH و آماده‌سازی پالپ با مواد شیمیایی (۳ دقیقه کلکتور و ۲ دقیقه کف‌ساز)، پالپ به ستون ارسال شد. قبل از انجام نمونه‌گیری از کنسانتره و باطله، برای تضمین عملیات فلوتاسیون ستونی در شرایط پایا، سطح مشترک پالپ - کف برای دوره‌ای (دو برابر زمان ماند ستون)، ثابت نگه داشته شد.



شکل ۷: نصب سیستم تصویربرداری و منبع نور استفاده شده برای تامین روشنایی مناسب به همراه تصویر کف گرفته شده با روشنایی مناسب

در طیف وسیعی از متغیرهای عملیاتی و پوشش رفتارهای مختلف کف فلوتاسیون است. بدین ترتیب نتایج آرایه شده با در نظر گرفتن محدوده‌های وسیعی از داده‌ها، اعتبار بالایی دارد. هدف از طراحی آزمایش‌ها بررسی تاثیر متغیرهای عملیاتی بر رفتار فاز کف است. در این مطالعه از روش طراحی آزمایش سطح پاسخ CCD استفاده شد. مهم‌ترین متغیرهای عملیاتی شامل نرخ هوادهی، درصد جامد، ارتفاع کف، میزان مواد شیمیایی و pH در پنج سطح مورد ارزیابی قرار گرفتند. در مجموع ۴۵ آزمایش در مقیاس نیمه صنعتی طراحی و انجام شد. عوامل و سطوح به کار رفته در آزمایش‌های فلوتاسیون ستونی در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: مقادیر سطوح انتخاب شده برای آزمایش‌های فلوتاسیون ستونی

عامل	شاخص	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴	سطح ۵
میزان کلکتور (gr/t)	A	۴۰	۷۰	۱۳۰	۱۹۰	۲۲۰
میزان کف‌ساز (gr/t)	B	۶۳	۹۰	۱۴۵	۲۰۰	۲۲۸
ارتفاع کف (cm)	C	۱۰	۱۵	۲۵	۳۵	۴۰
سرعت ظاهری هوا (cm/s)	D	۱٫۳	۱٫۴	۱٫۶	۱٫۸	۱٫۹
درصد جامد (%)	E	۱۰	۱۵	۲۵	۳۵	۴۰
pH	F	۱٫۴	۲٫۵	۴٫۷۵	۷	۸٫۱۵

پایه‌ای نصب و ثابت شد. از اطلاعات دوربین فیلم‌برداری بیشتر برای تعیین ویژگی‌های دینامیکی تصاویر کف (نیاز به فریم‌های متوالی) استفاده شد.

عملگر زوم دوربین طوری تنظیم شد که اندازه میدان دید مناسبی در فوکوس دوربین مشاهده شود، به طوری که بزرگترین حباب ممکن، حداکثر ۲۰-۱۵ درصد فضای تصویر را اشغال کند. برای یک دوربین دیجیتال، زوم می‌تواند به راحتی با استفاده از عملگر زوم خودکار تنظیم شود اما برای جلوگیری از تار شدن تصاویر در آزمایش‌ها عملیات زوم به صورت دستی کنترل شد.

در تحلیل تصاویر کف، روشنایی مناسب در زمان تصویربرداری اهمیت زیادی دارد. روشنایی موجود در محیط معمولاً برای گرفتن تصاویر با کیفیت بالا مناسب نیست و به روشنایی اضافی نیاز است. در این تحقیق برای حذف نورهای خارجی که منجر به برجستگی‌های چندگانه بر روی حباب‌های سطح کف می‌شود، اطراف سلول فلوتاسیون کاملاً با عایق‌های نوری پوشیده و از منبع نوری با پراکندگی نوری یکنواخت (سافت باکس) استفاده شد. منبع نوری باید به گونه‌ای انتخاب شود که تفاوت رنگ تصاویر کف در شرایط مختلف آزمایش‌ها به وضوح قابل مشاهده باشد. بدین منظور از یک پرژکتور LED^۵ ۱۰۰ واتی در داخل سافت‌باکس به عنوان منبع نوری استفاده شد. برای بیان ویژگی‌های یک منبع نوری شاخص‌هایی از طرف استاندارد CIE^۶ تعریف شده‌اند که مهم‌ترین آن‌ها شاخص نمود رنگ^۷ و دمای رنگ است. CRI شاخصی برای مشخص کردن میزان کافی بودن نور موجود برای تشخیص رنگ‌ها است. محدوده دمای رنگ در عمل بین ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ کلوین است و در دمای پایین‌تر از رنگ قرمز و زرد شروع می‌شود و در دماهای بالا به رنگ آبی می‌رسد.

شاخص نمود رنگ منبع نوری LED مورد استفاده بزرگتر از ۸۰ و دمای رنگ آن در حدود ۵۰۰۰ کلوین (در حدود روشنایی روز) است. شکل ۷ موقعیت منبع نور و قرارگیری دوربین نسبت به سلول فلوتاسیون و همچنین یک نمونه از کف گرفته شده با روشنایی مناسب را نشان می‌دهد.

مزیت اصلی داشتن یک پایگاه داده‌ای بزرگ، در دسترس بودن تعداد زیادی از نقاط داده‌ها و ایجاد ارتباط دقیق بین عوامل ورودی و خروجی و قابلیت تعمیم نتایج است. از آنجایی که هدف از این تحقیق، تعیین ارتباط متغیرهای عملیاتی و ویژگی‌های سطح کف فلوتاسیون ستونی بر پایه پردازش تصویر کف است، بنابراین اولین قدم، انجام آزمایش‌ها

تصاویر کف محدوده‌های وسیعی از داده‌ها را پوشش می‌دهد. در هر آزمایش با تغییر متغیرهای عملیاتی، رفتارهای کف مختلفی به دست آورده می‌شوند. برای تعیین رفتار ظاهری سطح کف از اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی (میانگین ابعاد و سطح خاکستری) و دینامیکی (میانگین سرعت و پایداری) تصاویر کف استفاده شد.

۳- تعیین ویژگی‌های تصاویر کف

۳-۱- قطعه‌بندی تصویر و اندازه‌گیری ابعاد حباب

تعیین مرز بین حباب‌ها در تصویر کف یکی از مهم‌ترین و در عین حال پیچیده‌ترین مرحله در روند تحلیل تصاویر کف به شمار می‌آید که از دلایل آن می‌توان به پیچیدگی بافتی تصاویر کف و بازتاب‌های نوری غیر یکنواخت در سطح حباب‌ها اشاره کرد. در این تحقیق پس از افزایش کنتراست تصویر و اعمال فیلترها از روش آب‌پخشان^۸ برای قطعه‌بندی تصویر و تعیین ابعاد حباب سطح کف استفاده شد (شکل ۹). از نرم‌افزار Image J برای پیش‌پردازش تصویر و از نرم‌افزار Image J برای قطعه‌بندی آب‌پخشان استفاده شد.

ایده اصلی قطعه‌بندی آب‌پخشان بر مبنای مفهوم شبیه‌سازی جریان‌های آب در یک نمایش توپوگرافی از شدت‌های تصویر، پایه‌گذاری شده است [۱۶، ۱۵]. همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده می‌شود، شدت یک تصویر به وسیله یک پهنه توپوگرافی نمایش داده می‌شود که در آن نقاط حداقل محلی معرف کف دره‌ها هستند و هر نقطه از تصویر بر همین اساس به صورت یک نقطه مرتفع لحاظ می‌شود. به طور معمول دو بیان کلی تعریف بر اساس خطوط دارای بیشترین شیب و تعریف بر اساس غوطه‌وری برای روش آب‌پخشان ارائه شده است.

- تعریف بر اساس خطوط دارای بیشترین شیب: با فرض اینکه یک قطره آب روی این سطح مرتفع بیافتد، این قطره مسیر بیشترین شیب را طی می‌کند تا به یک نقطه حداقل برسد. مجموعه‌ای از نقاط با شیب حداقل که چند مسیر با شیب‌های زیاد به آن ختم می‌شود را حوزه آب‌گیر گویند. آب‌پخشان در واقع نواحی تشکیل شده از حوزه‌های آب‌گیر مجاور یکدیگر است.

- تعریف بر اساس غوطه‌وری: با فرض اینکه در هر کمینه ناحیه‌ای یک سوراخ ایجاد شود با فرو بردن توپوگرافی از پایین در آب، آب از میان سوراخ‌ها با یک نرخ یکنواخت بالا می‌آید. زمانی که آب بالا رونده در آب‌گیرهای مجزای حوزه آب‌ریز در شرف الحاق‌اند، یک سد ساخته می‌شود

آزمایش‌ها برای حذف خطای بایاس به طور تصادفی انجام شد. عملیات فلوتاسیون تا قبل از رسیدن به شرایط پایا در یک مدار بسته انجام شد. فرض بر این بود که شرایط پایا بدون هیچ تغییر عملیاتی در کمترین زمان به دست آید. برای تضمین عملیات سیستم در شرایط پایا، سطح مشترک پالپ- کف برای دوره‌ای معین قبل از نمونه‌برداری ثابت نگه داشته شد. در هر دقیقه سه مرتبه (هر مرتبه ۱۰ ثانیه) به طور پیوسته با استفاده از دوربین عکاسی با سرعت ۳/۷ فریم بر ثانیه از سطح کف تصویربرداری شد. همچنین به طور همزمان فیلم ویدیویی از سطح کف گرفته شد. با توجه به نزدیکی سیستم تصویربرداری به موقعیت نمونه گرفته شده از کف، تصاویر گرفته شده نشان‌دهنده شرایط همان لحظه سلول فلوتاسیون و نمونه معرف بود.

مجموعه داده‌های تصویری کف با استخراج فریم‌های متوالی از دوربین عکاسی و فیلم‌برداری در زمان نمونه‌برداری به دست آورده شد. از آنجایی که ممکن است در طول دوره نمونه‌گیری ویژگی‌های ظاهری کف تغییر کند، بنابراین یک تصویر منفرد به طور کامل ویژگی‌های سطح کف را در طول آزمایش روشن نمی‌سازد. بنابراین در طول دوره نمونه‌برداری، ۸ تصویر تصادفی از فریم‌های متوالی از یک بخش از فیلم ویدئو یا دوربین عکاسی اتخاذ می‌شود و میانگین ویژگی‌های استخراج شده از تصاویر کف انتخابی محاسبه می‌شود.

برای بررسی کافی بودن میزان نور، از آزمایش فلوتاسیون ناپیوسته استفاده شد. در فلوتاسیون ناپیوسته، بزرگترین حباب‌ها در فاز اول فرآیند ایجاد می‌شوند و با گذشت زمان در فازهای بعدی از اندازه آن‌ها کاسته می‌شود. همچنین نقاط سفید بیشتری (بازتاب نور بر روی سطح حباب‌ها) در تصاویر با حباب‌های کوچک نسبت به حباب‌های بزرگ مشاهده می‌شود. از این‌رو شدت پیکسل‌ها باید با پیشرفت فرآیند فلوتاسیون افزایش یابد. نتایج نشان داد که میزان نور به اندازه کافی بوده است (شکل ۸).



۷۷ = سطح خاکستری

۹۱ = سطح خاکستری

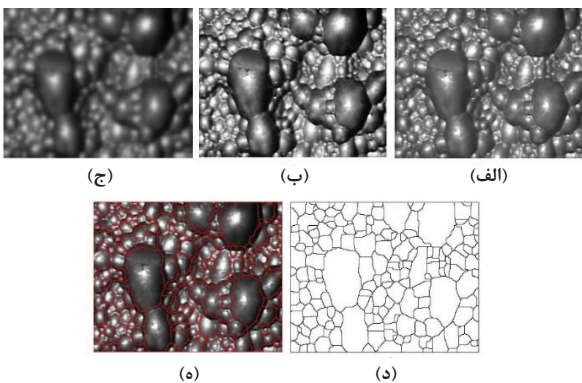
۱۰۲ = سطح خاکستری

شکل ۸: افزایش سطح خاکستری با ادامه فرآیند فلوتاسیون

ناپیوسته در زمان ۱، ۳ و ۵ دقیقه

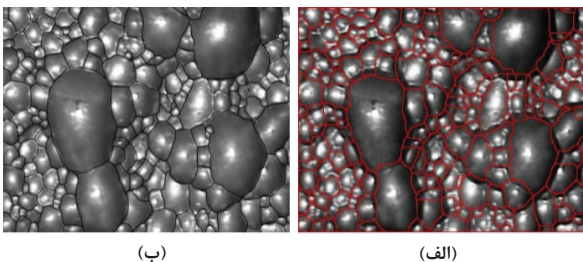
از آنجایی که آزمایش‌ها در محدوده وسیعی از شرایط عملیاتی طراحی و انجام شده‌اند، ویژگی‌های استخراج شده از

تا از الحاق جلوگیری کند. فرو رفتن در آب سرانجام به مرحله‌ای می‌رسد که تنها بخش بالای سدها بر روی خط آب قابل مشاهده است. مرزهای این سد به خطوط تقسیم آب‌پخشان‌ها مربوط می‌شود. بنابراین آن‌ها مرزهای بسته‌ای هستند که با یک روش تقطیع آب‌پخشان استخراج شده‌اند [۱۵].
تصاویر انتخاب شده از کف پس از افزایش کنتراست و حذف نویزهای تصویر با فیلتر میانه و فیلتر گوسی با استفاده از روش آب‌پخشان قطعه‌بندی شد (شکل ۱۱).

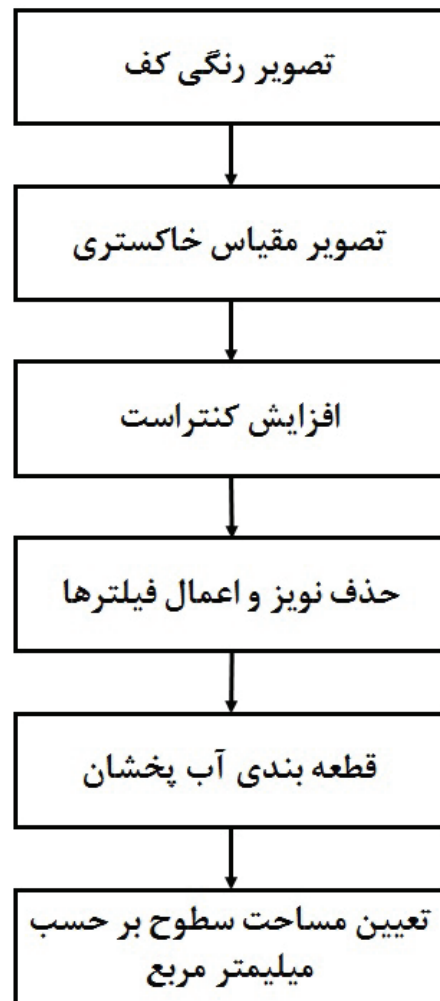


شکل ۱۱: مراحل انجام الگوریتم آب‌پخشان الف) تصویر اصلی مقیاس خاکستری، ب) افزایش کنتراست، ج) اعمال فیلتر میانه و گوسی، د) قطعه‌بندی تصویر، ه) اعمال قطعه‌بندی بر روی تصویر اصلی

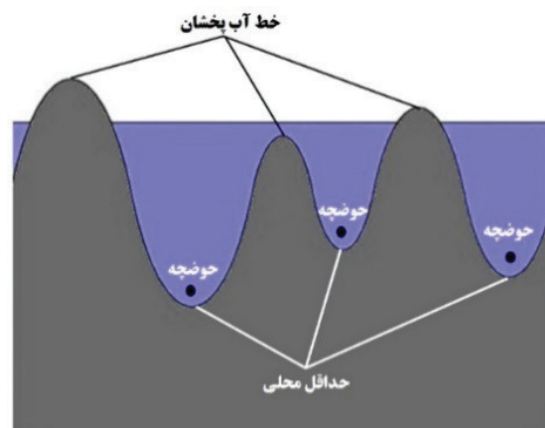
روش پیشنهادی یک مقایسه بین نتایج روش آب‌پخشان با قطعه‌بندی به صورت دستی (دقیق) برای اعتبارسنجی انجام شد (شکل ۱۲). در روش دستی، پس از اجرای تصویر در نرم‌افزارهای ویرایش تصویر و اعمال عمل‌گر زوم، مرز بین حباب‌ها با دقت بسیار بالایی با قلم‌های مناسب برجسته و سپس ابعاد حباب‌های برجسته شده با نرم‌افزار Image J محاسبه شد. جدول ۳ نتایج اندازه‌گیری ویژگی‌های هندسی حباب‌های کف بر اساس هر دو روش را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که روش آب‌پخشان با دقت بالایی مرز حباب‌ها را شناسایی و ابعاد حباب را تعیین می‌کند.



شکل ۱۲: الف) قطعه‌بندی آب‌پخشان تصویر، ب) قطعه‌بندی دستی تصویر



شکل ۹: روند تعیین ابعاد حباب کف با استفاده از روش آب‌پخشان



شکل ۱۰: نمونه تک‌بعدي از قطعه‌بندی آب‌پخشان (نقاط حداقل محلي سطح خاکستری حوضه آبریز و نقاط حداکثر، خطوط آب‌پخشان را نشان می‌دهد.)

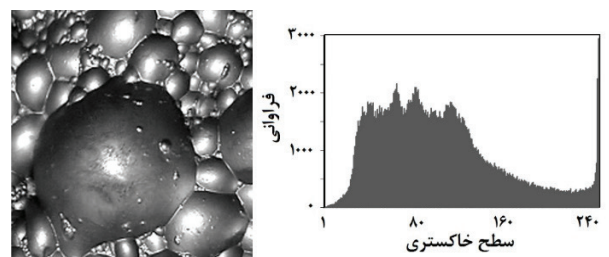
جدول ۳: مقایسه نتایج ابعاد حباب به دست آمده از روش قطعه‌بندی

آب‌پخشان و روش دستی

روش	ضریب گردی	AR	میانگین ابعاد حباب (mm ²)	تعداد حباب‌ها
الگوریتم آب‌پخشان	۰٫۷	۱٫۴۹	۲۱٫۸۲	۱۸۱
قطعه‌بندی دستی (روش دقیق)	۰٫۷۴	۱٫۵۷	۲۰٫۵	۱۹۳

۲-۳- اندازه‌گیری سطح خاکستری تصویر کف

اغلب توابع به کار رفته در روش‌های پردازش تصویر بر روی تصاویر سطح خاکستری اعمال می‌شوند که در آن‌ها طیف رنگ پیکسل‌ها بین سیاه (صفر) و سفید (۲۵۵) قرار دارد. در این تحقیق میانگین ویژگی‌های رنگی مقیاس خاکستری تصاویر کف، تصویر استخراج شدند. در این روش ساده‌ترین مجموعه از ویژگی‌ها که مربوط به هیستوگرام سطوح شدت پیکسل‌هاست به عنوان آماره‌های مرتبه اول استخراج می‌شود. این ویژگی‌ها با در نظر گرفتن هر پیکسل (سطح خاکستری آن) به صورت مجزا و نادیده گرفتن ارتباط مکانی میان پیکسل‌ها با استفاده از هیستوگرام روشنایی تصویر استخراج می‌شوند. هیستوگرام تصویر در حقیقت بیان گرافیکی میزان روشنایی تصویر است. در شکل ۱۳ هیستوگرام به دست آمده از فضای رنگی تصویر کف نشان داده شده است.



شکل ۱۳: هیستوگرام تصویر کف

۳-۳- اندازه‌گیری سرعت کف

سرعت کف با میزان پایداری کف و به ویژه نرخ انهدام حباب‌ها رابطه دو سویه دارد. زمانی که مقدار زیادی از هوا در سطح کف از بین می‌رود، نرخ انتقال کف به سمت سرریز کاهش می‌یابد، در حالی که در شرایط پایداری کف، نرخ انتقال کف به سمت سرریز بالاتر خواهد بود. از طرف دیگر با بارگذاری

بالاتر ذرات بر روی سطح حباب‌های کف مقداری از آب حاضر در سطح مشترک هوا/آب کاهش یافته و حباب‌ها پایدارتر شده و به دلیل شرایط دینامیکی سرعت حرکت کف کاهش می‌یابد. از آنجایی که در فرآیند ردیابی پیکسل هدف تعیین مکان شی یا اشیا متحرک در طول زمان است، از تصاویر متوالی استفاده می‌شود. روش ردیابی پیکسل توانایی تعیین محدوده وسیعی از سرعت‌های کف را دارد. استفاده از روش ردیابی پیکسل بر دو فرض زیر استوار است:

۱- شدت روشنایی پیکسل‌های مربوط به یک شی در

فریم‌های متوالی ثابت خواهد بود.

۲- نقاط مربوط به همسایگی یک پیکسل خاص دارای

خواص و جابه‌جایی‌های مشابه یکدیگرند.

سرعت کف با اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی حباب‌ها

در سطح کف در دو فریم متوالی با استفاده از روش ردیابی

پیکسل تعیین شد. در این رویکرد حرکت بازتاب محلی نور از

سطح حباب در دو فریم متوالی ردیابی شد. در تحلیل حرکت

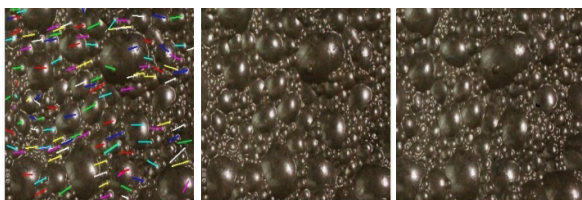
حباب یک بردار برای هر حباب نشانه‌گذاری شده محاسبه شد

و میانگین پیکسل‌های جابه‌جا شده در طول زمان در دو فریم

متوالی به عنوان سرعت کف در نظر گرفته شد (شکل ۱۴). در

هر آزمایش ۱۶ فریم متوالی از تصاویر کف گرفته شده به طور

تصادفی انتخاب و نتایج به صورت میانگین ارائه شد.



شکل ۱۴: اندازه‌گیری سرعت حرکت کف با الگوریتم ردیابی حباب

۴-۳- تعیین پایداری کف

نرخ انهدام حباب‌ها بر روی سطح کف به عنوان نتیجه‌ای

از ناپایداری لاملای سطح کف است. در این تحقیق نرخ انهدام

حباب از اختلاف‌های به وجود آمده بین سایه‌ها و انعکاس‌های

ایجاد شده در فریم‌های متوالی به عنوان نتیجه‌ای از ظهور و

ناپدید شدن حباب در سطح کف به دست آمد. استخراج این

اطلاعات در فریم‌های متوالی همراه با اطلاعات سرعت به دست

می‌آید. در این تحقیق پایداری کف به صورت درصد حباب‌های

باقیمانده بین دو فریم متوالی بیان می‌شود که به صورت زیر

۴-۱- تاثیر شرایط عملیاتی بر ابعاد حباب کف

جدول ۴ تاثیر متغیرهای معنادار بر ابعاد حباب سطح کف را در شرایط عملیاتی مختلف فرآیند فلوتاسیون ستونی نشان می‌دهد. ارتفاع کف، نرخ هوا و pH پالپ بیشترین تاثیر را بر ابعاد حباب کف دارند.

جدول ۴: تحلیل واریانس مدل ابعاد حباب کف

عامل	میانگین مربعات	F	P
مدل	۲۱۲,۰۴	۹,۷۷	<۰,۰۰
A-A	۱۱۵,۸۴	۵,۳۱	۰,۰۳
B-B	۱۵۱,۷۵	۷,۰۱	۰,۰۲
C-C	۵۷۷,۵۹	۲۶,۸۶	<۰,۰۰
D-D	۵۸۲,۳۲	۸۲,۹۶	<۰,۰۰
E-E	۲۰۵۸,۳۳	۹۴,۶۷	<۰,۰۰
F-F	۱۰۲۲,۸	۴۷,۲۸	<۰,۰۰
AB	۱۳۰,۵۹	۶,۰۳	۰,۰۳
AF	۱۰۰,۸۲	۴,۵۵	۰,۰۴۸
BD	۹۶,۲	۴,۴	۰,۰۵
CE	۹۸,۸۹	۴,۵	۰,۰۴۷
CF	۹۴,۹۵	۴,۳۷	۰,۰۵
EF	۹۷,۸۶	۴,۵	۰,۰۴۹
D ²	۲۲۴,۶۶	۱۰,۳۱	۰,۰۱
F ²	۱۴۹,۷۱	۶,۹۴	<۰,۰۲
Adj R ² = ۰,۸۴ Pred R ² = ۰,۵۹ C.V. % = ۱۵,۲			

به طور معمول افزایش در میزان کف‌ساز منجر به کاهش در ابعاد حباب‌های تولیدی می‌شود. با این وجود ابعاد حباب‌های ایجاد شده در نرخ‌های کف‌ساز بالاتر از ۲۰۰ گرم بر تن کاهش نمی‌یابد. افزایش نرخ هوا، pH و درصد جامد سبب افزایش ابعاد حباب کف می‌شود. با افزایش ارتفاع کف، ابعاد حباب سطح کف افزایش می‌یابد، زیرا ائتلاف حباب‌ها در فاز کف به دلیل نازک شدن لاملای ناشی از زهکشی افزایش می‌یابد.

همان‌طور که از شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، نرخ کاهش ابعاد حباب کف با افزایش میزان کف‌ساز، در نرخ‌های بالای کلکتور برجسته‌تر است. در pHهای اسیدی با افزایش میزان کلکتور ابعاد حباب کف افزایش می‌یابد ولی در pHهای خنثی با افزایش میزان کلکتور ابعاد حباب کاهش می‌یابد که دلیل آن می‌تواند به بارگذاری بیش از حد حباب‌ها و افزایش نرخ انهدام حباب‌های بزرگ و همچنین پایداری حباب‌های کوچک با بارگذاری مناسب مربوط باشد. در نرخ‌های بالای هوا، افزایش

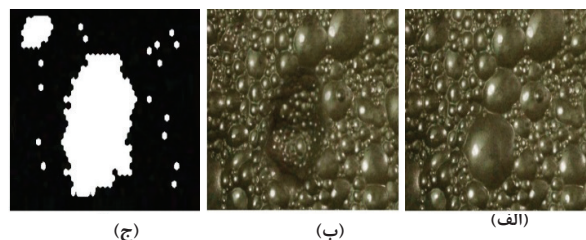
به دست می‌آید:

۱- تعیین میزان جابه‌جایی بین دو تصویر متوالی با استفاده از مقادیر سرعت حرکت کف

۲- انطباق تصاویر با یکدیگر. به عبارت دیگر هر منطقه در فریم دوم به مناطقی با هم‌پوشانی متناظر در فریم قبلی ترسیم می‌شود.

۳- تعیین مناطق دارای هم‌پوشانی و اختلاف بین فریم‌های متوالی. در تصاویر متوالی کف حباب‌های فروپاشی شده با حباب‌های کوچک ظاهر شده که در زیر آن‌ها قرار گرفته‌اند (در فریم‌های بعدی) شناسایی می‌شوند، بنابراین پس از تفریق تصاویر کف منطبق شده، میانگین اختلاف بین دو فریم متوالی می‌تواند تعیین می‌شود و اندازه‌ای از پایداری به دست می‌آید.

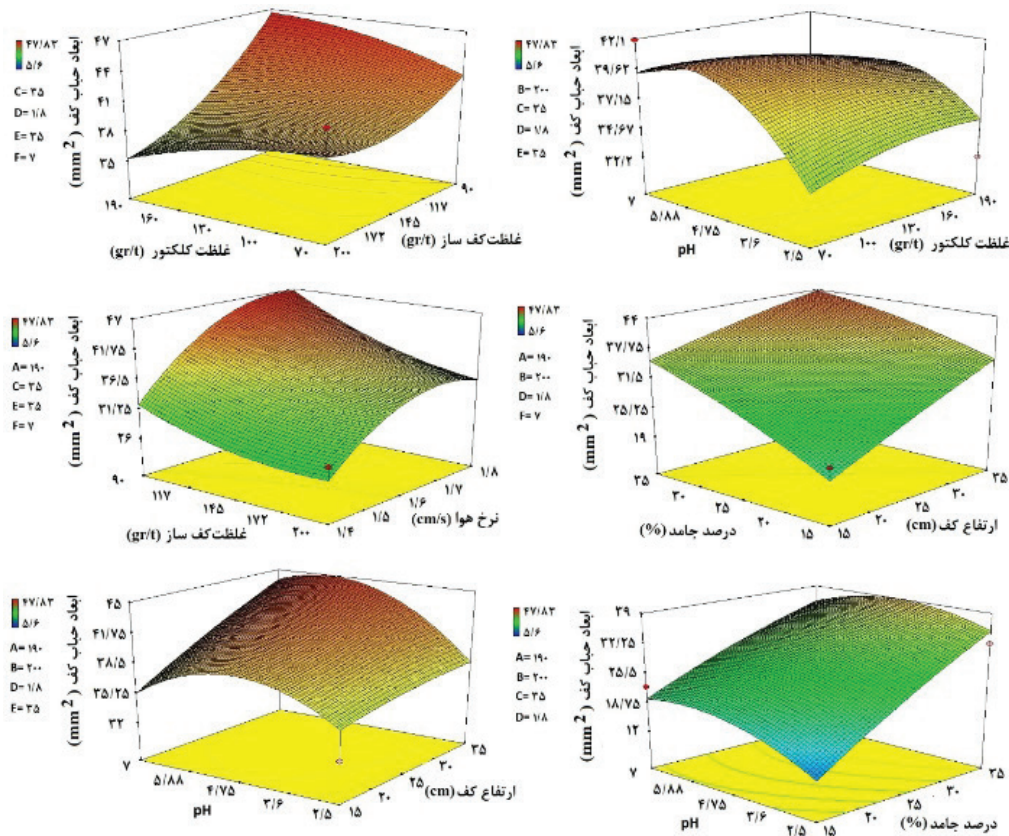
۴- اندازه‌گیری مساحت مناطق دارای هم‌پوشانی و تعیین درصد حباب‌های باقی‌مانده به عنوان شاخصی از پایداری کف در هر آزمایش ۱۶ فریم متوالی از تصاویر کف گرفته شده به طور تصادفی انتخاب و نتایج به صورت میانگین ارایه شد (شکل ۱۵).



شکل ۱۵: اندازه‌گیری پایداری کف به عنوان درصد حباب‌های باقیمانده در دو فریم متوالی

۴- نتایج و بحث

از آنجایی که فرآیند فلوتاسیون ستونی یک سیستم غیر خطی است، تعیین رفتار سطح کف با تغییر شرایط عملیاتی بسیار متغیر و پیچیده است. در این بخش تاثیر شرایط عملیاتی فلوتاسیون بر توصیف‌کننده‌های سطح کف به صورت آماری ارایه می‌شود. در این مقاله با انتخاب مدل مناسب و اطمینان از برازش مدل و همچنین توزیع مناسب باقی‌مانده‌ها، نتایج حاصل از آزمایش‌ها بررسی شد. همچنین برای ارزیابی برازش مدل، ضریب همبستگی (R^2)، ضریب همبستگی تعدیل شده و ضریب تغییرات (CV) مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۱۶: تاثیر متقابل میان متغیرهای عملیاتی و ابعاد حباب کف تاثیر شرایط عملیاتی بر پایداری کف

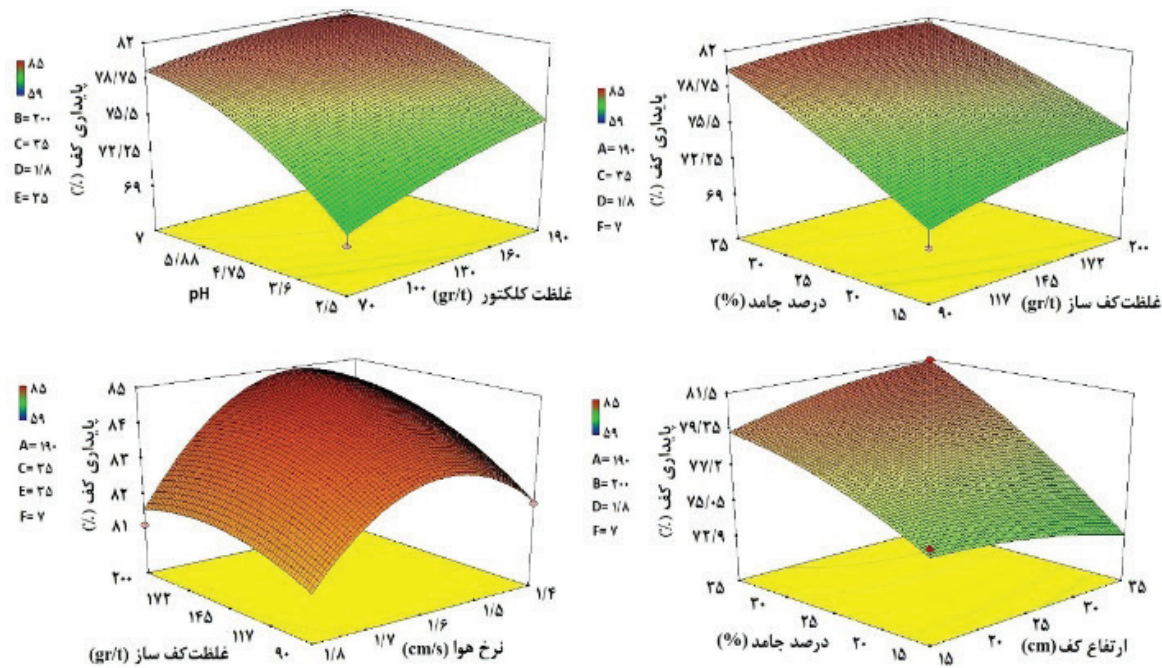
قابل اندازه‌گیری نیستند. با این وجود در صورت اندازه‌گیری پایداری سطح کف با استفاده از پردازش تصاویر تعیین عوامل موثر بر پایداری سطح کف ممکن می‌شود. بر اساس تحلیل واریانس آزمون فیشر، مقادیر P کوچکتر از 0.05 نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی برای پایداری کف معنادار است (جدول ۵). تمامی متغیرهای اصلی و تاثیرهای دوگانه میزان کلکتور - pH، میزان کف‌ساز - درصد جامد و ارتفاع کف - درصد جامد تأثیر معناداری بر پایداری کف دارند. ترتیب تأثیر عوامل موثر به صورت $F > E > B > A > D > AF > CE > C > BE$ است. شکل ۱۷ تاثیر متقابل معنادار هر کدام از عوامل اصلی را بر پایداری کف نشان می‌دهد.

با کاهش پایداری، نرخ انهدام حباب‌ها افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد که افزایش درصد جامد و pH موجب پایداری بیشتر فاز کف می‌شود. افزایش کلکتور باعث افزایش مقدار ذرات آبریز وارد شده به فاز کف می‌شود و سطح حباب کف به دلیل حضور غلظت‌های بالاتر ذرات آبریز پایدارتر می‌شود. با افزایش کف‌ساز میزان ائتلاف حباب‌ها کاهش و پایداری افزایش می‌یابد.

ابعاد حباب کف با کاهش میزان کف‌ساز برجسته‌تر است. نتایج نشان داد که نرخ افزایش ابعاد حباب با تغییر ارتفاع کف، در نرخ‌های پایین جامد بیشتر است. تحت شرایطی که میزان بالای از ذرات فاز پالپ به کف وارد می‌شوند، ارتفاع کف به دلیل اشباع پوشش لاملا حباب و پایداری آن یک تأثیر اندک بر روی ائتلاف حباب‌ها خواهد داشت ولی تحت شرایط با درصد جامد پایین پالپ یا پوشش لاملا کمتر حباب، یک افزایش در ارتفاع کف منجر به مقادیر بالایی از ائتلاف و افزایش ابعاد حباب کف می‌شود. ارتفاع کف در pHهای اسیدی قوی تأثیر چندانی بر اندازه حباب ندارد ولی در pHهای خنثی با افزایش ارتفاع کف، ابعاد حباب با نرخ بیشتری افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که تاثیر pH در ابعاد حباب، در درصد جامدهای پایین برجسته‌تر است.

۴-۲- تاثیر شرایط عملیاتی بر پایداری کف

پایداری فاز کف فقط در سطح کف قابل مشاهده است. بنابراین مکانیزم‌های موثر بر پایداری کف به طور مستقیم



شکل ۱۷: تاثیر متقابل میان متغیرهای عملیاتی و پایداری حباب کف

افزایش اندازه و تعداد کانال‌های زهکشی پالپ در کف می‌شود. همچنین افزایش نسبت آب به جامد، موجب کاهش تاثیرات ویسکوزیته بر این کانال‌های زهکشی و جریان سریع‌تر پالپ می‌شود. این جریان منجر به افزایش جدایش ذرات چسبیده شده به حباب‌ها می‌شود. از این‌رو تاثیر نرخ هوا بر روی آب وارد شده به فاز کف به طور غیر مستقیم سبب کاهش در بارگذاری جامد سطح کف و در نهایت منجر به ناپایداری کف می‌شود. همچنین با افزایش ابعاد و کاهش زمان ماند حباب در فاز پالپ (ناشی از افزایش هوای ورودی به ستون)، نرخ برخورد ذره- حباب کاهش می‌یابد. از طرف دیگر به دلیل افزایش شار جامد وارد شده به فاز کف در اثر افزایش نرخ هوا، بارگذاری جامد حباب کاهش یافته و در نتیجه حباب‌ها ناپایدار می‌شوند. این موضوع را می‌توان با کاهش مقدار ذرات قابل شناور به ازای هر حباب به واسطه حضور تعداد بالاتر حباب‌ها توجیه کرد.

تاثیر مقدار کلکتور بر پایداری حباب کف در pH های اسیدی برجسته‌تر از pH های بازی است. در حضور غلظت‌های بالای ذرات قابل شناور یک افزایش در میزان کف‌ساز تاثیر بسیار کمی نزدیک به صفر در نرخ انهدام حباب‌ها دارد. دلیل آن می‌تواند به وجود عوامل پایدارساز قوی مانند بارگیری مناسب ذرات موجود در سطح کف ناشی از درصد جامد بالا باشد. در زمان عملیات در غلظت‌های پایین جامد پالپ و

جدول ۵: تحلیل واریانس مدل پایداری حباب کف

عامل	میانگین مربعات	F	P
مدل	۵۹,۷۴	۲۲,۸۷	<۰,۰۰
A-A	۱۴۲,۰۱	۵۴,۴۱	<۰,۰۰
B-B	۱۴۹,۰۵	۵۷,۱	<۰,۰۰
C-C	۱۲,۶۶	۴,۸۵	۰,۰۴
D-D	۴۷,۱۸	۱۸,۰۸	۰,۰۰
E-E	۲۹۶,۳۳	۱۱۳,۵۶	<۰,۰۰
F-F	۷۵۴,۹	۲۸۹,۲۶	<۰,۰۰
AF	۱۸,۷۲	۷,۱۹	۰,۰۲
BD	۱۲,۰۲	۴,۵	۰,۰۵
BE	۱۱,۹	۴,۵۵	۰,۰۵
CE	۱۷,۲۶	۶,۶۱	۰,۰۲
D ²	۳۱,۵۶	۱۲,۰۹	۰,۰۰
F ²	۴۰,۴۱	۱۵,۵۱	<۰,۰۰
Adj R ² = ۰,۸۹ Pred R ² = ۰,۷۴ C.V. % = ۲,۱۷			

تحت همه شرایط آزمایش‌ها، بارگذاری ذرات حباب با افزایش نرخ هوا کاهش می‌یابد زیرا افزایش در نرخ هوا نسبت جامد به آب وارد شده به کف را کاهش می‌دهد. این تاثیر می‌تواند منجر به افزایش نرخ انهدام حباب‌ها در سطح کف شود. افزایش در مقدار آب وارد شده به فاز کف منجر به

جدول ۶: مکانیزم‌های مهم متغیرهای عملیاتی بر روی پایداری کف

متغیر عملیاتی	تاثیر اولیه	تاثیر ثانویه	تاثیر بر پایداری
نرخ هوا	افزایش اندازه و تعداد کانال‌های زهکشی در کف	افزایش جدایش ذرات قابل شناور از کف	کاهش پایداری
ارتفاع کف	کاهش محتوی آب در سطح کف	درصد جامد بالا: بارگذاری بیشتر ذرات بر روی لاملا درصد جامد پایین: نازک شدن فیلم	افزایش پایداری کاهش پایداری
مقدار کف‌ساز	آب بیشتر به همراه حباب‌ها	درصد جامد بالا: افزایش ضخامت لاملا درصد جامد پایین: افزایش ضخامت لاملا	افزایش پایداری (به میزان کم) افزایش پایداری
مقدار کلکتور	افزایش محتوی جامد در کف	pH بالا: افزایش بارگذاری ذرات pH پایین: افزایش بارگذاری ذرات	افزایش پایداری (به میزان کم) افزایش پایداری

(جدول ۷). ارتفاع کف، نرخ هوا و مقدار کف‌ساز بیشترین تاثیر را بر سرعت حباب کف دارند.

بارگذاری کمتر ذرات جامد بر روی سطح حباب، افزایش میزان کف‌ساز بر روی کاهش نرخ ائتلاف حباب‌ها و پایداری کف تاثیر چشمگیری خواهد داشت.

جدول ۷: تحلیل واریانس مدل سرعت حباب کف

عامل	میانگین مربعات	F	P
مدل	۲۳,۱۴	۱۵,۸۷	<۰,۰۰
A-A	۱۰,۴۱	۷,۱۱	۰,۰۲
B-B	۵۹,۲۵	۴۰,۵۱	<۰,۰۰
C-C	۱۸۹,۸۶	۱۲۹,۸۵	<۰,۰۰
D-D	۲۵۶,۴۸	۱۷۵,۳۸	<۰,۰۰
E-E	۲۳,۸۳	۱۶,۳۶	۰,۰۰
AF	۵,۹۲	۳,۹۹	۰,۰۵
CD	۸,۵۱	۵,۸۲	۰,۰۳
DF	۷,۵۱	۵,۱۵	۰,۰۴
EF	۱۴,۴۶	۹,۸۸	۰,۰۱
F ²	۷,۵۷	۵,۱۸	۰,۰۴
Adj R ² = ۰,۸۸ Pred R ² = ۰,۷۴ C.V. % = ۷,۴۴			

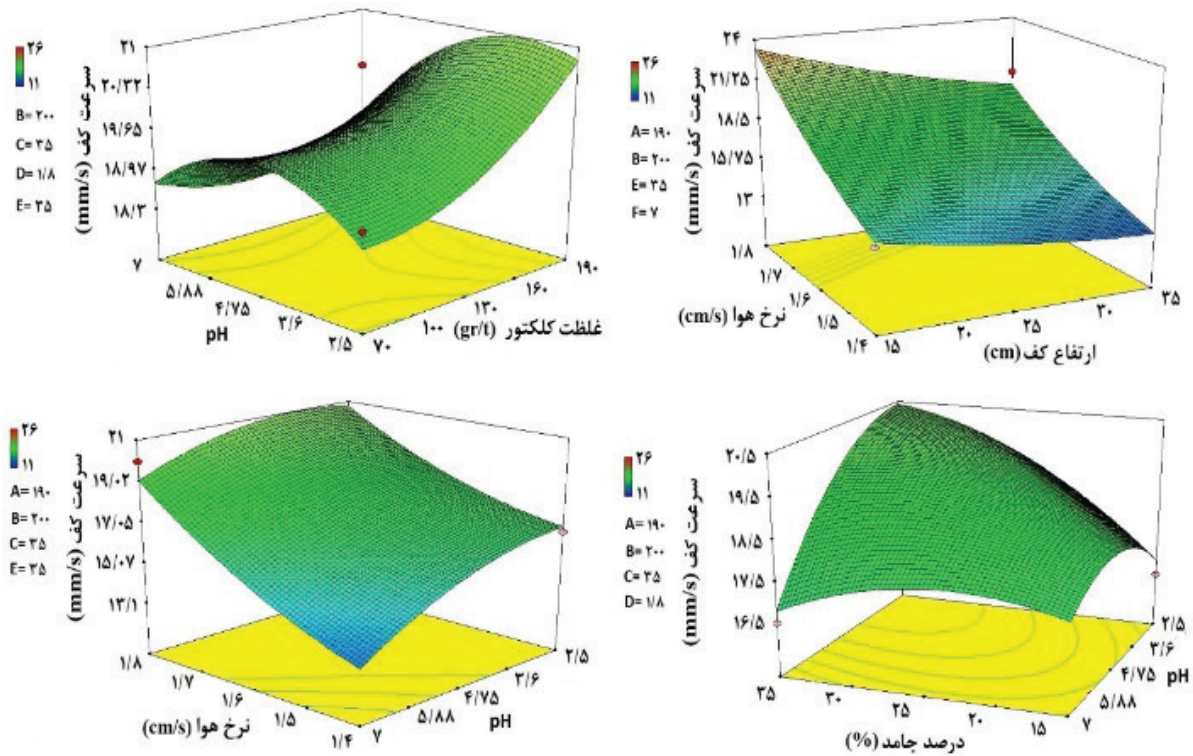
نتایج اندازه‌گیری پایداری سطح کف نشان داد که در حضور غلظت‌های بالای جامد با افزایش ارتفاع کف نرخ انهدام حباب‌ها کاهش می‌یابد ولی در درصد جامدهای پایین نرخ انهدام حباب‌ها با افزایش ارتفاع کف به میزان اندکی افزایش می‌یابد. تحت شرایطی که غلظت‌های بالایی از ذرات به فاز کف وارد می‌شوند، با افزایش ارتفاع کف بارگذاری ذرات بر روی لاملا افزایش می‌یابد و بنابراین پایداری کف افزایش می‌یابد. از طرف دیگر با افزایش ارتفاع کف، ابعاد حباب سطح کف افزایش می‌یابد، بنابراین تعداد حباب‌ها بر روی تصویر سطح کف کاهش می‌یابد که می‌تواند بخشی از کاهش مشاهده شده در نرخ انهدام حباب‌ها را توضیح دهد. همچنین با افزایش ارتفاع کف در درصد جامدهای پایین پالپ، فیلم حباب‌ها نازک شده و کف ناپایدار می‌شود. جدول ۶ خلاصه‌ای از مکانیزم‌های مهم متغیرهای عملیاتی بر روی پایداری کف را نشان می‌دهد.

۳-۴- تاثیر متغیرهای عملیاتی بر سرعت کف

افزایش مقدار کف‌ساز منجر به افزایش سرعت کف می‌شود. دلیل آن به افزایش پایداری کف، افزایش محتوی آب ناشی از غلظت بالاتر گروه‌های قطبی چسبیده شده در سطح مشترک هوا/ آب و کاهش ابعاد حباب مربوط است. افزایش میزان کلکتور به دلیل افزایش پایداری ناشی شده از افزایش ذرات آب‌گریز در کف منجر به افزایش سرعت کف می‌شود. نتایج نشان داد که کاهش سرعت کف تحت غلظت‌های جامد بسیار پایین و بالای پالپ رخ می‌دهد.

سرعت کف، نرخ انتقال کف به سمت سرریز سلول را بازتاب می‌کند. نتایج تحلیل واریانس نشان می‌دهد که مدل ارائه شده برای سرعت کف در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار است. مقادیر R² و R² تعدیل شده حاکی از مناسب بودن برازش مدل است. همه متغیرهای اصلی بجز pH و تاثیر متقابل مقدار کلکتور- pH، ارتفاع کف- نرخ هوا، نرخ هوا- pH، درصد جامد- pH تاثیر معناداری بر سرعت کف فلوتاسیون دارند

در شکل ۱۸ مشاهده شد که سرعت کف با افزایش نرخ هوا



شکل ۱۸: تاثیر متقابل میان متغیرهای عملیاتی و سرعت حباب کف

حباب‌های کف تضعیف می‌شود.

۴-۴- تاثیر متغیرهای عملیاتی بر رنگ کف

در این بخش تاثیر متغیرهای عملیاتی بر میزان سطح خاکستری تصویر کف ارزیابی می‌شود. مقدار F مدل پیشنهادی برابر با ۱۶ است که دلالت بر معنادار بودن آن در سطح اطمینان ۹۵ درصد است.

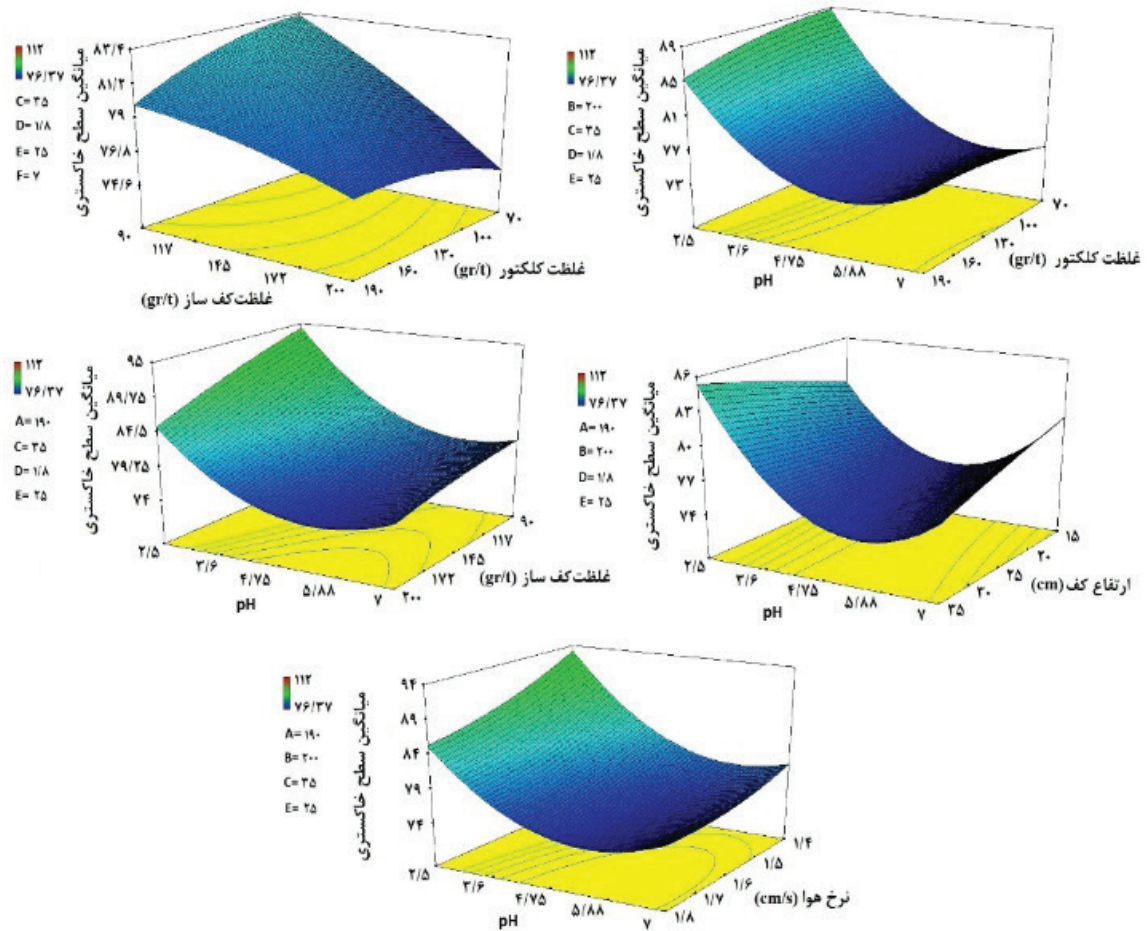
به طور کلی با تغییر شرایط عملیاتی ویژگی‌های بصری سطح کف از جمله مقیاس سطح خاکستری تصاویر نیز تغییر می‌کند. در سطح اطمینان ۹۵ درصد تاثیر کلیه متغیرهای اصلی و تاثیر متقابل متغیرهای AB, AF, BF, CF و DF بر میزان سطح خاکستری تصویر کف معنادار است (جدول ۸).

از شکل ۱۹ مشاهده می‌شود که تغییرات سطح خاکستری تصاویر کف در نرخ‌های پایین کلکتور، با کاهش کف‌ساز برجسته‌تر است. در نرخ‌های پایین کف‌ساز و کلکتور، حباب‌های نسبتاً درشت و کم‌بار در سطح تشکیل می‌شوند که باعث افزایش بازتاب‌های نوری از سطح حباب‌ها و مقدار سطح خاکستری می‌شود.

تاثیر میزان کلکتور بر تغییرات سطح خاکستری در pH

افزایش یافته و پس از رسیدن به مقدار حداکثر، کاهش می‌یابد. افزایش در میزان تحرک کف تحت شرایطی رخ می‌دهد که افزایش هوای از دست‌رفته به دلیل افزایش نرخ انهدام حباب‌ها کمتر از افزایش نرخ هوای سلول فلوتاسیون باشد. زمانی که افزایش هوای از دست‌رفته از انهدام حباب‌ها، بیشتر از هوای اضافی ورودی به سلول باشد، سرعت کف با افزایش نرخ هوا شروع به کاهش می‌کند. افزایش ارتفاع کف به دلیل کاهش محتوی آب نزدیک به سطح کف منجر به کاهش سرعت کف می‌شود.

افزایش میزان کلکتور در pHهای اسیدی منجر به افزایش سرعت کف می‌شود، ولی در pHهای خنثی تغییرات میزان کلکتور تاثیری بر تحرک کف ندارد. همان‌طور که بیان شد، افزایش نرخ هوا باعث افزایش سرعت کف به دلیل حجم هوای اضافه شده به فاز کف می‌شود و این نرخ افزایش در ارتفاع‌های پایین کف برجسته‌تر است. دلیل آن می‌تواند به افزایش شدید شار جامد راه یافته به سطح کف در ارتفاع‌های کف پایین باشد. در pHهای اسیدی با افزایش درصد جامد پالپ، سرعت کف به دلیل افزایش پایداری حباب‌ها افزایش می‌یابد ولی میزان این تاثیر در pHهای قلیایی به دلیل بارگذاری مناسب



شکل ۱۹: تاثیر متقابل میان متغیرهای عملیاتی و سطح خاکستری حباب کف

جدول ۸: تحلیل واریانس مدل سطح خاکستری تصویر کف

عامل	میانگین مربعات	F	P
مدل	۱۴۷,۶۴	۱۶,۳۴	<۰,۰۰
A-A	۷۶,۴۱	۸,۴۶	۰,۰۱
B-B	۲۶۵,۶۵	۲۹,۴	<۰,۰۰
C-C	۱۷۲,۶۸	۱۹,۱۵	۰,۰۰
D-D	۲۴۷,۶۸	۲۷,۴۱	<۰,۰۰
E-E	۵۹۸,۸۳	۶۶,۳۶	<۰,۰۰
F-F	۱۴۵۶,۹	۱۶۱,۲۶	<۰,۰۰
AB	۶۹,۳	۷,۶۷	۰,۰۱
AF	۶۹,۴۲	۷,۶۹	۰,۰۱
BF	۷۴,۸۸	۸,۲۹	۰,۰۱
CF	۱۰۴,۰۸	۱۱,۵۲	۰,۰۰
DF	۶۹,۶۱	۶,۹۵	۰,۰۲
E^2	۶۶,۱۶	۷,۳۴	۰,۰۲
F^2	۴۳۶,۴۳	۴۸,۳۱	<۰,۰۰
Adj R ^۲ = ۰,۹ Pred R ^۲ = ۰,۷۰ C.V. % = ۳,۵			

های اسیدی قوی برجسته‌تر است. این عمل را می‌توان با مصرف بالاتر کلکتور برای بارگذاری ذرات پیریت در pHهای اسیدی نسبت به pHهای قلیایی توضیح داد. بدین ترتیب در pHهای اسیدی قوی با نرخ پایین کلکتور، حباب‌های بدون بار و با پایداری بسیار کم در سطح کف تشکیل می‌شوند که میانگین سطح خاکستری تصاویر آن‌ها بسیار بالاست.

به طور کلی با افزایش میزان کف‌ساز، سطح خاکستری تصویر کف کاهش می‌یابد و نرخ کاهش در pH برابر ۲,۵ برجسته‌تر است. این نتایج در تطابق با نیاز بیشتر کف‌ساز در عملیات فلوتاسیون در pHهای اسیدی است. معمولا با افزایش ارتفاع کف ابعاد حباب و بارگذاری ذرات جامد در سطح مشترک هوا/ آب افزایش می‌یابد که منجر به کاهش سطح خاکستری تصویر کف می‌شود ولی در pHهای اسیدی قوی با افزایش ارتفاع کف، سطح خاکستری تصاویر کف به دلیل ناپایداری و کاهش بارگذاری حباب‌ها افزایش می‌یابد.

حباب و پایداری آن یک تاثیر اندک بر روی ائتلاف حبابها دارد ولی تحت شرایط با درصد جامد پایین پالپ یا پوشش لاملای کمتر حباب، یک افزایش در ارتفاع کف منجر به مقادیر بالایی از ائتلاف و افزایش ابعاد حباب کف می‌شود.

۴- pH، درصد جامد و کف ساز بیشترین تاثیر را بر پایداری حباب کف دارند.

۵- در حضور غلظت‌های بالای ذرات جامد، یک افزایش در مقدار کف‌ساز تاثیر بسیار کمی نزدیک به صفر در نرخ انهدام حبابها دارد. دلیل آن می‌تواند به وجود عوامل پایدارساز قوی مانند بارگیری مناسب ذرات موجود در سطح کف ناشی از درصد جامد بالای پالپ مربوط باشد.

۶- در حضور غلظت‌های بالای جامد با افزایش ارتفاع کف، نرخ انهدام حبابها کاهش می‌یابد ولی در درصد جامدهای پایین نرخ انهدام حبابها با افزایش ارتفاع کف افزایش می‌یابد. تحت شرایطی که غلظت‌های بالایی از ذرات به فاز کف وارد می‌شوند، ارتفاع کف به دلیل اشباع حبابها تاثیر اندکی بر میزان ائتلاف حبابها خواهد داشت، بنابراین پایداری کف افزایش می‌یابد.

۷- ارتفاع کف و نرخ هوا بیشترین تاثیر را بر میزان سرعت حباب کف دارند.

۸- افزایش مقدار کلکتور در pHهای اسیدی منجر به افزایش سرعت حرکت کف می‌شود ولی در pHهای خنثی تغییرات میزان کلکتور تاثیری بر تحرک کف ندارد.

۹- افزایش نرخ هوا باعث افزایش سرعت کف به دلیل حجم هوای اضافه شده به فاز کف می‌شود و این نرخ افزایش در ارتفاع‌های پایین کف برجسته‌تر است. دلیل آن می‌تواند به افزایش شدید شار جامد راه یافته به باطله در ارتفاع کف پایین باشد.

۱۰- تغییرات سطح خاکستری تصویر کف در نرخ‌های پایین کلکتور، با افزایش کف‌ساز برجسته‌تر است. در نرخ‌های پایین کلکتور و کف‌ساز، حباب‌های نسبتاً درشت و کم بار در سطح تشکیل می‌شوند که باعث افزایش بازتاب‌های نوری از سطح حبابها شده به همین دلیل مقدار سطح خاکستری افزایش می‌یابد.

۱۱- تاثیر میزان کلکتور بر تغییرات سطح خاکستری تصویر در pHهای اسیدی قوی برجسته‌تر است. این عمل را می‌توان با مصرف بالاتر کلکتور برای بارگذاری ذرات

با این وجود برای تعیین رفتار کف در ارتفاع‌های کف مختلف باید pH و دیگر عوامل مانند بارگذاری جامد سطح کف در نظر گرفته شود. تحت شرایطی که شار مساحت سطح حباب به واسطه افزایش نرخ هوا افزایش می‌یابد، سطح خاکستری کف روند کاهشی دارد. تغییرات میزان سطح خاکستری با افزایش نرخ هوادهی، در pHهای اسیدی برجسته‌تر است.

۵- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این تحقیق، استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی یا روش‌های مبتنی بر آنالیز تصویر برای ارتقای درک رفتار فاز کف ستون فلوتاسیون تحت شرایط عملیاتی مختلف بود. با انجام آزمایش‌های فلوتاسیون ستونی در مقیاس نیمه صنعتی بر اساس طراحی آزمایش مکعب مرکزی (CCD) در طیف وسیعی از شرایط عملیاتی، تاثیر متغیرهای عملیاتی بر روی عملکرد متالورژیکی و ویژگی‌های ظاهری سطح کف بررسی شد. آزمایش‌های فلوتاسیون معکوس ستونی برای گوگردزایی از کنسانتره کانه‌های آهن مجتمع سنگ آهن گل‌گهر انجام شد. تاثیر مهم‌ترین متغیرهای عملیاتی سلول فلوتاسیون ستونی شامل نرخ هوادهی، درصد جامد، ارتفاع کف، میزان مواد شیمیایی و pH در قالب ۴۵ آزمایش در ۵ سطح با یک مدل درجه دوم مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین ترتیب عوامل دارای بیشترین تاثیر بر عملکرد فلوتاسیون و ویژگی‌های بصری کف (رنگ، ابعاد حباب، پایداری و سرعت کف) شناسایی شد. نتایج به دست آمده از این مطالعه به شرح زیر است:

۱- ارتفاع کف، نرخ هوای ورودی و pH پالپ بیشترین تاثیر

را بر ابعاد حباب کف دارند. افزایش نرخ هوا، pH و درصد جامد سبب افزایش ابعاد حباب کف می‌شوند. افزایش مقدار کف‌ساز منجر به کاهش ابعاد حباب‌های تولیدی می‌شود. با افزایش ارتفاع کف، ابعاد حباب کف افزایش می‌یابد، زیرا ائتلاف حبابها در فاز کف به دلیل نازک شدن لاملای ناشی از زهکشی افزایش می‌یابد.

۲- در pHهای اسیدی با افزایش میزان کلکتور، ابعاد حباب کف افزایش و در pHهای خنثی کاهش می‌یابد که دلیل آن می‌تواند به بارگذاری بیش از حد حبابها و افزایش نرخ انهدام حباب‌های بزرگ و همچنین پایداری حباب‌های کوچک با بارگذاری مناسب مربوط باشد.

۳- تحت شرایطی که غلظت بالایی از ذرات به فاز کف وارد می‌شوند، ارتفاع کف به دلیل اشباع پوشش لاملای

- J. (1995). "The interpretation of flotation froth surfaces by using digital image analysis and neural networks". *Chemical Engineering Science*, 50: 3501–3513.
- [8] Holtham, P. N., and Nguyen, L. K. (2002). "On-line analysis of froth surface in coal and mineral flotation using JK FrothCam". *International Journal of Mineral Processing*, 64: 163–180.
- [9] Kaartinen, J., Hatonen, J., Hyotyniemi, H., and Miettunen, J. (2006). "Machine vision based control of zinc flotation—a case study". *Control Engineering Practice*, 14: 1455–1466.
- [10] Vanegas, C., and Holtham, P. (2008). "On-line froth acoustic emission measurements in industrial sites". *Minerals Engineering*, 21: 883–888.
- [11] Aldrich, C., Marais, C., Shean, B. J., and Cilliers, J. J. (2010). "Online monitoring and control of froth flotation systems with machine vision: a review". *International Journal of Mineral Processing*, 96: 1–13.
- [12] Sadr-Kazemi, N., and Cilliers, J. J. (1997). "An image processing algorithm for measurement of flotation froth bubble size and shape distributions". *Minerals Engineering*, 10(10): 1075–1083.
- [13] Oestreich, J. M., Tolley, W. K., and Rice, D. A. (1995). "Development of a color sensor system to measure mineral compositions". *Minerals Engineering*, 8(1–2): 31–39.
- [14] Banford, A. W., Aktas, Z., and Woodburn, E. T. (1998). "Interpretation of the effect of froth structure on the performance of froth flotation using image analysis". *Powder Technology*, 98(1): 61–73.
- [15] Lin, B., Recke, B., Knudsen, J. K. H., and Jorgensen, S. B. (2008). "Bubble size estimation for flotation processes". *Minerals Engineering*, 21: 539–548.
- [16] Mehrshad, N., and Massinaei, M. (2011). "New image processing algorithm for measurement of bubble size distribution from flotation froth images". *Minerals & Metallurgical Processing Journal*, 28(3): 146–150.
- پیریت در pH های اسیدی نسبت به pH های قلیایی توضیح داد. در pH های اسیدی قوی و نرخ پایین کلکتور، حباب‌های بدون بار و با پایداری بسیار کم در سطح کف تشکیل می‌شوند که میانگین سطح خاکستری تصاویر آن‌ها بسیار بالاست.
- ۱۲- با افزایش ارتفاع کف، ابعاد حباب و بارگذاری ذرات جامد در سطح مشترک هوا/ آب افزایش می‌یابد که منجر به کاهش سطح خاکستری تصویر کف می‌شود ولی در pH های اسیدی قوی با افزایش ارتفاع کف سطح خاکستری به دلیل ناپایداری و کاهش بارگذاری حباب‌ها افزایش می‌یابد.
- ### ۶- سپاس‌گزاری
- نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر و پژوهشکده سنگ آهن و فولاد به خاطر همکاری صمیمانه، تشکر و سپاس‌گزاری نمایند.
- ### ۷- مراجع
- [1] Nakhaei, F., Mosavi, M. R., Sam, A., and Vaghei, Y. (2012). "Recovery and grade accurate prediction of pilot plant flotation column concentrate: neural network and statistical techniques". *International Journal of Mineral Processing*, 110–111: 140–154.
- [2] Shean, B. J., and Cilliers, J. J. (2011). "A review of froth flotation control". *International Journal of Mineral Processing*, 100(3-4): 57-71.
- [3] Bonifazi, G., Serranti, S., Volpe, F., and Zuco, R. (2001). "Characterization of flotation froth colour and structure by machine vision. *Comput*". *Geosciences*, 27(9): 1111–1117.
- [4] Yang, C., Xu, C., Mu, X., and Zhou, K. (2009). "Bubble size estimation using interfacial morphological information for mineral flotation process monitoring". *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19: 694–699.
- [5] Moolman, D. W., Eksteen, J. J., Aldrich, C., and Van Deventer, J. S. J. (1996). "The significance of flotation froth appearance for machine vision control". *International Journal of Mineral Processing*, 48(3-4): 135–158.
- [6] Morar, S. H., Harris, M. C., Bradshaw, D. J. (2012). "The use of machine vision to predict flotation performance". *Minerals Engineering*, 36–38: 31–36.
- [7] Moolman, D. M., Aldrich, C., and Van Deventer, J. S.

^۱ Dry Tailing Process

^۲ Low Intensity Magnetic Separator

^۳ High Intensity Magnetic Separator

^۴ Complementary Metal Oxide Semiconductor

^۵ Light Emitting Diode

⋆ Commission Internationale de l'Eclairage

⋇ Color Rendering Index

⋈ Watershed