

بررسی عوامل موثر در انتشار جریان هوا در ستون فلوتاسیون فردیس نخعی^۱، مهدی ایران نژاد^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری فرآوری مواد معدنی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، fardis_nakhaei@aut.ac.ir

۲- دانشیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، iranajad@aut.ac.ir

(دریافت ۷ اردیبهشت ۱۳۹۳، پذیرش ۱۴ تیر ۱۳۹۴)

چکیده

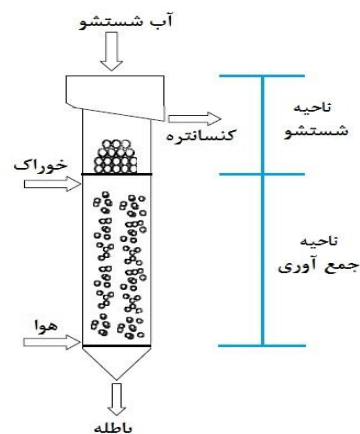
پارامترهای انتشار گاز نظیر نرخ ظاهری سطح حباب (S_b) و ماندگی گاز (ϵ_g) در کارایی عملکرد ستون‌های فلوتاسیون موثر هستند. در این مقاله تأثیر سرعت جریان گاز و خوراک ورودی، غلظت کف‌ساز، ارتفاع کف، ابعاد ذرات و درصد جامد خوراک ورودی روی پارامترهای انتشار گاز بررسی شده است. آزمایش‌ها در ستونی با جنس پلاکسی گلاس با قطر ۱۰ و ارتفاع ۴۰۰ سانتیمتر انجام شد. ماندگی گاز با استفاده از روش اختلاف فشار اندازه‌گیری شد و اندازه حباب از روش تحلیل جابجایی شار تخمین زده شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش سرعت ظاهری گاز و میزان کف‌ساز، نرخ ظاهری سطح حباب افزایش می‌یابد، در حالیکه افزایش درصد جامد خوراک ورودی کاهش S_b و ϵ_g را به دنبال دارد. اگرچه ماندگی گاز به دلیل افزایش در سرعت جریان خوراک کاهش می‌یابد ولی تأثیر آن در مقایسه با سرعت جریان گاز و میزان کف‌ساز قابل چشم‌پوشی است. با کاهش ارتفاع ناحیه کف ستون فلوتاسیون از ۱۱۰ به ۷۰ سانتیمتر، کاهش جزئی در ماندگی گاز در منطقه جمع‌آوری مشاهده می‌شود و این نرخ با افزایش سرعت جریان گاز افزایش می‌یابد. تأثیر ابعاد ذرات بر ماندگی گاز در دو دامنه ابعادی ۱۰۰-۱۵۰ میکرون و ۴۵-۶۳ میکرون نشان داد که با کاهش ابعاد ذرات ماندگی گاز کاهش می‌یابد. با استفاده از روش‌های آماری، مدلی برای پیش‌بینی نرخ ظاهری سطح حباب بر اساس ماندگی گاز با دقت بسیار بالایی ارائه شده است.

کلمات کلیدی

ستون فلوتاسیون، ماندگی گاز، نرخ ظاهری سطح حباب، انتشار گاز.

۱- مقدمه

فلوتاسیون فرآیند جدایش فیزیکوشیمیایی است که از تفاوت ویژگی‌های سطح کانی‌های با ارزش و کانی‌های باطله استفاده می‌کند [۱]. ستون‌های فلوتاسیون به علت ظرفیت بالا، کارآمدی بیشتر جداسازی، هزینه پایین در فرآوری مواد معدنی (فلزی و غیرفلزی) پیشرفت قابل ملاحظه‌ای داشته است. ستون‌های فلوتاسیون، سلول‌های عمودی و بلندی هستند که به طور پیوسته با خوراکی با ابعاد ۱۰۰-۱۰ میکرون تغذیه می‌شوند. خوراک ورودی در فاصله یک سوم از بالای ستون وارد می‌شود و هنگام پایین رفتن در مقابل انبوه حباب‌های تولید شده توسط حباب ساز قرار می‌گیرد. حباب‌ها ذرات قابل شناور شدن را جمع‌آوری کرده و به سمت سطح مشترک پالپ - کف حرکت می‌کنند، به همین دلیل به این منطقه از ستون ناحیه جمع‌آوری گفته می‌شود. ذرات جمع‌آوری شده به کفی که توسط آب شستشو پدیدار شده است، متصل می‌گردند. منطقه کف یک بستر حباب متحرک است که بخش عمده آن (۶۰ تا ۹۰ درصد) بوسیله حباب‌های هوا اشغال شده است و تقریباً ۱ متر ارتفاع دارد و در تماس با آب شستشو (اضافه شده از بالای سرریز) قرار دارد. نقش اصلی آب شستشو پاک کردن کف از ذرات ناخواسته (باطله) است که به همراه آب و یا حباب‌های هوا از منطقه جمع‌آوری بالا آمده‌اند. بنابراین ناحیه کف، ناحیه شستشو نیز نامیده می‌شود [۲-۴]. شکل ۱ بخش‌های مختلف ستون فلوتاسیون را نشان می‌دهد.



شکل ۱: شمای کلی ستون فلوتاسیون.

افزایش ارتفاع ناحیه جمع‌آوری اجازه می‌دهد ذرات، زمان بیشتری برای چسبیدن به حباب هوا داشته باشند و در نتیجه بازیابی ذرات افزایش می‌یابد. افزایش ارتفاع ناحیه کف، زمان شستشو را افزایش داده و باعث حذف ذرات ریز آبدوست از منطقه کف می‌شود، بنابراین عیار محصول افزایش می‌یابد.

میزان بازیابی در سلول فلوتاسیون به‌طور مستقیم با سرعت هوای وارد شده به سلول ارتباط دارد. روشی که از طریق آن، هوا به ستون فلوتاسیون اضافه می‌شود بسیار مهم است، زیرا اندازه حباب‌های تولید شده و الگوهای جریان در سلول را کنترل می‌کند. حباب‌سازها باید اغتشاش کافی برای برخورد ذره - حباب در سلول فلوتاسیون را فراهم کرده و قادر به تولید حباب‌ها در محدوده اندازه معین (با توجه به اندازه ذرات خوراک ورودی) باشند. اگر فاز گازی به درستی کنترل نشود عملکرد سلول فلوتاسیون با مشکل مواجه می‌شود. پارامترهای انتشار گاز که برای بهینه‌سازی عملکرد فاز گازی استفاده می‌شوند عبارتند از: ماندگی گاز، اندازه حباب، سرعت ظاهری گاز و نرخ ظاهری سطح حباب. با توسعه حس‌گرها، اندازه‌گیری دقیق بعضی پارامترهای انتشار گاز مانند سرعت ظاهری گاز، ماندگی گاز و اندازه حباب میسر شده است. تحقیقات جدید به اندازه‌گیری دقیق پارامترهای انتشار گاز مانند ماندگی گاز (ε_g)، اندازه حباب (d_b)، سرعت ظاهری گاز (J_g) و نرخ ظاهری سطح حباب (S_b) اختصاص پیدا کرده‌اند [۵-۷].

سرعت ظاهری گاز عبارتست از سرعت جریان حجمی گاز (Q_g) به ازای سطح مقطع ستون فلوتاسیون (A) که از 0.5 تا 2.5 سانتیمتر بر ثانیه (بر اساس اندازه حباب و رئولوژی خوراک ورودی)، تغییر می‌کند. سرعت ظاهری گاز ورودی بر حسب سانتی متر بر ثانیه به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲]:

$$J_g = \frac{Q_g}{A} \quad (1)$$

ماندگی گاز به عنوان کسر حجمی از فاز گاز در سلول بیان می‌شود. روش‌های رایج برای اندازه‌گیری ماندگی گاز عبارتند از روش‌های هدایت سنجی و اختلاف فشار. روش اختلاف فشار نیازمند داشتن دانشی در مورد دانسیته پالپ است. روش هدایت سنجی برای اندازه‌گیری بلادرنگ مناسب است اما نیاز به کالیبراسیون دارد، از این رو دقت پایینی دارد. برای تعیین ماندگی گاز در ناحیه جمع‌آوری (ε_{gc}) مابین دو حسگر فشار با متوسط وزن مخصوص پالپ (ρ_{sl}) رابطه (۲) کاربرد دارد [۲]:

$$\varepsilon_{gc} = 1 - \frac{\Delta P}{\rho_{sl} g \Delta H} \quad (2)$$

که در این رابطه:

ΔP : اختلاف فشار ($P_2 - P_1$) بر حسب پاسکال

ΔH : اختلاف فاصله ($H_2 - H_1$) بر حسب متر

نرخ ظاهری سطح حباب (S_b) به مساحت کلی سطح حباب-های عبوری از یک سطح مقطع از ستون در واحد زمان، اطلاق می‌شود و اغلب برای ارتباط نرخ فلوتاسیون با متغیرهای هیدرودینامیکی استفاده می‌شود. میزان S_b به پارامترهایی

مانند سرعت ظاهری گاز (J_g) و قطر متوسط حباب هوا (d_b) بستگی دارد و از رابطه (۳) به دست می آید [۲]:

$$S_b = \frac{6J_g}{d_b} \quad (3)$$

روش دوم شامل اندازه گیری ماندگی گاز و محاسبه نرخ ظاهری سطح حباب از سرعت های گاز و خوراک با استفاده از تحلیل های جابجایی شار است [۲]. روش سوم که در وضعیت های غیر پیوسته کاربرد دارد از یک رابطه تجربی بین پارامترهای عملیاتی و طراحی ماشین شامل J_g و d_{80} خوراک ورودی به سلول استفاده می کند [۸].

ماندگی گاز و نرخ ظاهری سطح حباب، یکی از مهم ترین پارامترهایی است که برای تعیین ویژگی های هیدرودینامیکی حباب استفاده و ارتباط اندازه حباب و سرعت گاز را به صورت ترکیبی بیان می کند. همچنین به عوامل مختلف نظیر نوع و میزان کف ساز، هندسه ستون فلوتاسیون، دمای فرآیند و ذرات جامد وابسته است.

کیلیمپل و همکاران تأثیر فاکتورهای طراحی و عملیاتی را بر عملکرد متالورژیکی فرآیند فلوتاسیون مورد بررسی قرار دادند. فاکتورهای عملیاتی شامل درصد جامد، سرعت جریان خوراک و متغیرهای انتشار گاز بود. نتایج این تحقیق نشان داد که میزان و توزیع هوادهی در ستون های فلوتاسیون به شدت بر روی عیار و بازیابی محصول تأثیر می گذارد [۹].

بررسی ارتباط خطی و غیر خطی بین S_b و ثابت سینیتیک مرتبه اول فلوتاسیون در منطقه جمع آوری موضوع تحقیقات زیادی بوده است [۸ و ۱۰].

گوراین و همکاران نشان دادند که ثابت نرخ فلوتاسیون با هیچ یک از پارامترهای اندازه حباب، ماندگی گاز، سرعت ظاهری گاز به تنهایی رابطه ندارد اما به نرخ ظاهری سطح حباب وابسته است. تحت شرایطی که سینیتیک فلوتاسیون مرتبه اول به کار گرفته می شود، ثابت نرخ فلوتاسیون به طور مستقیم نسبتی از نرخ ظاهری سطح حباب است [۸]. بر این اساس آن ها در سال ۱۹۹۹ مدل تجربی برای پیش بینی نرخ ظاهری سطح حباب به عنوان تابعی از متغیرهای عملیاتی در سلول های مکانیکی را ارائه دادند [۵]. هیسکانن اعتقاد داشت که این رابطه باید برای گونه های مختلف مینرالوژی اصلاح شود [۱۱]. لوترل و همکاران نتیجه گرفتند که ظرفیت حمل به طور مستقیم با S_b رابطه دارد [۱۲]. وجود رابطه میان J_g و S_b بسیار ارزشمند است زیرا اندازه گیری J_g بسیار ساده تر از اندازه گیری ابعاد حباب و در نتیجه محاسبه S_b است.

زو و همکاران بالاترین میزان S_b را برای عملیات ستون فلوتاسیون و سلول جیمسون تعیین کردند. بررسی نتایج نشان داده است که در ستون های فلوتاسیون و سلول های مکانیکی

بیشترین J_g و S_b در منطقه جمع آوری به ترتیب در حدود ۲۵ درصد و 1.3×10^{-1} به دست آمده است [۱۳]. پاور و فرانزیدیس دریافتند که نرخ ظاهری سطح حباب در شرایط عملیاتی معمول در محدوده بین ۳۰ تا ۷۰ قرار دارد [۱۴]. بنیسی و همکاران نشان دادند که افزایش درصد جامد، ماندگی گاز را در منطقه جمع آوری کاهش می دهد [۱۵]. شوکلا و همکاران نشان دادند که ماندگی گاز در فلوتاسیون ستونی زغال بدون مواد شیمیایی با افزایش درصد جامد کاهش می یابد [۱۶].

مسنیایی و دوست محمدی در سال ۲۰۱۰، به منظور مدل سازی نرخ ظاهری سطح حباب در ستون فلوتاسیون از شبکه های عصبی استفاده کردند. در این تحقیق که بر روی ستون فلوتاسیون CISA (۴ متر قطر و ۱۲ متر ارتفاع) در مدار رافر انجام شد، S_b به عنوان تابعی از مهمترین متغیرهای عملیاتی انتشار گاز در ستون فلوتاسیون، بر حسب درصد جامد خوراک، سرعت ظاهری گاز، غلظت و نوع کف ساز مدل شد [۱۷].

اگرچه حجم زیادی از تحقیقات برای درک تأثیر متغیرهای مختلف مانند ارتفاع کف، ماندگی گاز، نرخ ظاهری سطح حباب و نرخ بایاس روی عملکرد متالورژیکی و تعیین ارتباط میان آن ها انجام شده است ولی مطالعات کمی برای تأثیر متغیرهای عملیاتی بر روی رفتار پارامترهای انتشار گاز انجام گرفته است. در مقاله حاضر تأثیر متغیرهای فرآیند (سرعت جریان گاز، ارتفاع کف، درصد جامد، توزیع دانه بندی ذرات، سرعت جریان خوراک ورودی و غلظت کف ساز) بر روی J_g و S_b در منطقه جمع آوری مورد بررسی قرار می گیرد. همچنین، رابطه بین ماندگی گاز و نرخ ظاهری سطح حباب در ستون های فلوتاسیون تحت شرایط عملیاتی مختلف نیز ارائه می شود.

۲- روش آزمایش

ستون فلوتاسیون مورد استفاده از یک لوله پلاکسی گلاس به قطر ۰/۱ و طول ۴ متر تشکیل شده است (شکل ۲). خوراک ورودی پس از آماده سازی به وسیله پمپ پرستالیک به محفظه خوراک ستون ارسال می شود و هوای فشرده از طریق حباب سازهای متخلخل وارد ستون می شود. این ستون مجهز به سیستم کنترل اتوماتیک است و برای ثابت نگه داشتن ارتفاع کف، پمپ باطله به طور اتوماتیک کنترل می شود. میزان فشار، دما و pH در نقاط مختلف ستون توسط حسگرهای تعبیه شده در مکان های مشخص در ستون، اطلاعات را دریافت و به نمایشگر منتقل می کنند. ماندگی گاز با توجه به مقادیری که سه حسگر فشار از مکان های مختلف ستون نمایش می دهند، با توجه به روابط مربوط به ماندگی گاز محاسبه می شود. نمونه مورد استفاده در آزمایش ها از کنسانتره سلول های رافر (مکانیکی) مجتمع مس میدوک استفاده شد. ۲۰ دقیقه برای رسیدن به شرایط پایا در نظر گرفته شد. در طول آزمایش ها،

سرعت لغزش گاز و مایع در جریان غیر هم جهت (حرکت گاز به سمت بالا و مایع به سمت پایین) به صورت رابطه ۴ تعیین می‌شود:

$$U_{sb} = \frac{J_g}{\varepsilon_g} + \frac{J_l}{(1-\varepsilon_g)} \quad (4)$$

که در آن J_g و J_l سرعت ظاهری گاز و خوراک، ε_g ماندگی گاز است. رابطه ۵ ارتباط سرعت نهایی بالا رفتن یک حباب (U_T) در یک ظرف نامحدود با سرعت لغزش (U_{sb}) را بیان می‌کند:

$$U_T = \frac{U_{sb}}{(1-\varepsilon_g)^{m-1}} \quad (5)$$

در این رابطه m ، ثابت و برابر ۳ فرض می‌شود. میانگین قطر حباب از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$d_b = \sqrt{\frac{18\mu_f U_T}{g(\rho_f - \rho_a)} (1 + 0.15 Re_b^{0.687})} \quad (6)$$

عدد رینولدز حباب (Re_b) از رابطه ۷ بدست می‌آید:

$$Re_b = \frac{d_b U_{sb} \rho_f (1 - \varepsilon_g)}{\mu_f} \quad (7)$$

که در آن ρ_f دانسیته و μ_f ویسکوزیته پالپ است. نکته اینکه محاسبه عدد رینولدز نیاز به دانشی از قطر حباب دارد. هنوز قطر حباب بدون دانشی از عدد رینولدز قابل محاسبه نیست. بدین منظور از یک حلقه تکرار استفاده می‌شود. به طور کلی فرآیند تعیین قطر حباب به ترتیب به صورت زیر بیان می‌شود:

- ۱- فرض یک قطر حباب اولیه برابر ۰/۱ سانتیمتر
- ۲- محاسبه U_{sb} از معادله ۴
- ۳- محاسبه U_T با استفاده از معادله ۵
- ۴- محاسبه عدد رینولدز با استفاده از معادله ۷
- ۵- محاسبه قطر حباب جدید با استفاده از معادله ۶
- ۶- تکرار مرحله ۱ تا ۵ تا زمانی که قطر حباب اولیه و به دست آمده برابر شود.

۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- تأثیر متغیرهای عملیاتی روی S_b

تأثیر سرعت ظاهری گاز، درصد جامد خوراک و میزان کف‌ساز بر روی S_b در ستون فلوتاسیون در شکل‌های ۳ و ۴ آمده است. مشاهده شد که با افزایش سرعت ظاهری گاز و میزان کف‌ساز نرخ ظاهری سطح حباب افزایش می‌یابد، در حالی که افزایش درصد جامد خوراک ورودی، کاهش S_b را به دنبال دارد.

ارتفاع کف در حدود ۹۰ سانتیمتر، سرعت ظاهری خوراک ورودی در حدود ۱/۸ سانتیمتر بر ثانیه و درصد جامد برابر ۱۰ درصد در نظر گرفته شد. ۱۰ گرم بر تن کف‌ساز MIBC (متیل ایزوبوتیل کربونیل) و ۱۴ گرم بر تن کلکتور NASCOL (مخلوطی از مرکاپتوبنزوتیازول با دی ان بوتیل دیتیوفسفات سدیم) و R407 (مخلوطی از مرکاپتوبنزوتیازول با دیتیوفسفات) استفاده شد. همچنین d_{80} خوراک ورودی در همه آزمایش‌ها برابر ۷۰ میکرون بود. لازم به ذکر است در هر آزمایش یک یا دو متغیر در یک محدوده خاص تغییر داده شد و بقیه پارامترها در مقدار مذکور حفظ شدند. محدوده متغیرهای عملیاتی استفاده شده در آزمایش‌ها در جدول ۱ آمده است.



شکل ۲: ستون فلوتاسیون نیمه صنعتی

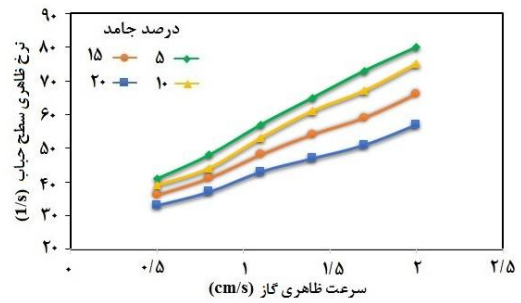
جدول ۱: محدوده متغیرهای عملیاتی در آزمایش‌ها

محدوده انتخابی	متغیر عملیاتی
۰/۵ - ۲	سرعت ظاهری گاز (cm/s)
۱ - ۲/۱	سرعت ظاهری خوراک (cm/s)
۵ - ۳۵	غلظت کف‌ساز (gr/t)
۵ - ۲۰	درصد جامد خوراک (%)

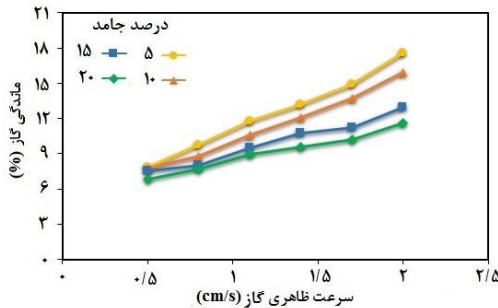
۳-۲- روش تعیین اندازه حباب (تحلیل جابجایی شار)

برای محاسبه قطر حباب در این مقاله از روش بنیسی و فینچ استفاده شد. با استفاده از این مدل اگر ε_{gc} و J_g و J_l معلوم باشند، d_b را می‌توان تخمین زد. معادلات تخمین ابعاد حباب به طور خلاصه در زیر آمده است [۱۸]:

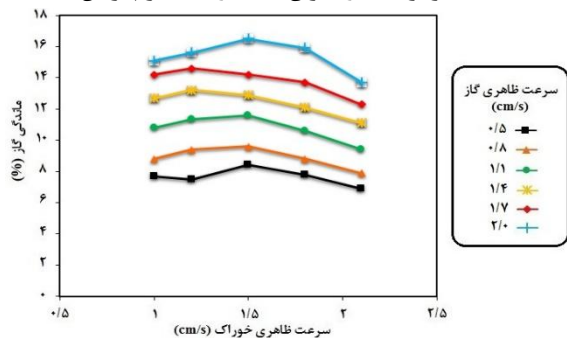
برای ماندن در مسیرشان در سرعت‌های پایین خوراک می-توانند تغییر شکل دهند (در برابر تغییر مسیر از خود مقاومت نشان نمی‌دهند). وجود حباب‌ها حاوی ذرات در جریان باطله دلیل مهمی بر کاهش ماندگی گاز در سرعت های بالای خوراک است.



شکل ۳: تأثیر سرعت ظاهری گاز بر روی نرخ ظاهری سطح حباب با تغییر درصد جامد (ارتفاع کف = ۹۰ سانتیمتر، سرعت ظاهری خوراک = ۱/۸ سانتیمتر بر ثانیه و میزان کف‌ساز = ۱۰ گرم بر تن)



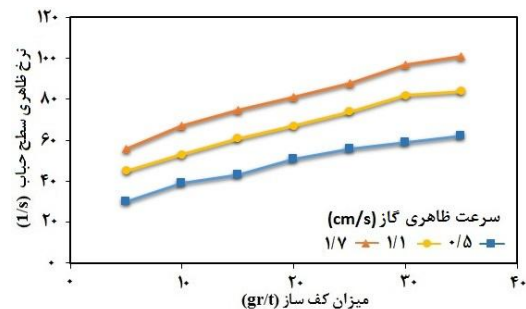
شکل ۵: تأثیر سرعت ظاهری گاز بر روی ماندگی گاز با تغییر درصد جامد (ارتفاع کف = ۹۰ سانتیمتر، سرعت ظاهری خوراک = ۱/۸ سانتیمتر بر ثانیه و میزان کف‌ساز = ۱۰ گرم بر تن)



شکل ۶: تأثیر سرعت ظاهری خوراک بر روی ماندگی گاز با تغییرات سرعت ظاهری گاز (ارتفاع کف = ۹۰ سانتیمتر، درصد جامد = ۱۰ درصد و میزان کف‌ساز = ۱۰ گرم بر تن)

شکل ۵ تأثیر درصد جامد بر ماندگی گاز در ستون فلوتاسیون را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که ماندگی گاز هنگام افزایش درصد جامد به دلیل افزایش اتصال حباب‌ها در منطقه جمع‌آوری و همچنین افزایش سرعت حباب‌ها، کاهش می‌یابد. بنیسی و همکاران چهار مکانیزم که باعث کاهش ماندگی گاز در حضور جامد می‌شوند را پیشنهاد دادند: ائتلاف حباب‌ها، تغییر در دانسیته و ویسکوزیته پالپ، تغییر در پروفیل‌های جریان و ماندگی شعاعی و تأثیرات پشت حباب. نتیجه آن شد که تغییر در ماندگی گاز به دلیل افزایش درصد جامد به دلیل ترکیبی از دو مکانیزم آخر است [۱۶ و ۱۹]. شکل ۷ تأثیرات پشت حباب را نشان می‌دهد.

شکل ۳ افزایش نرخ ظاهری سطح حباب با افزایش سرعت گاز ورودی را نشان می‌دهد. همچنین در سرعت ظاهری گاز ثابت، با بالا رفتن درصد جامد نرخ ظاهری سطح حباب کاهش می‌یابد؛ که نشان‌دهنده افزایش اتصال حباب‌ها به دلیل بالا رفتن ویسکوزیته پالپ است. با بالا رفتن غلظت کف‌ساز میزان S_b افزایش می‌یابد، که به دلیل کاهش اندازه حباب‌ها است (شکل ۴). اما تغییرات S_b در غلظت های بالای کف‌ساز به دلیل تشکیل ائتلاف بحرانی حباب‌ها چشمگیر نیست و حتی کاهش می‌یابد.

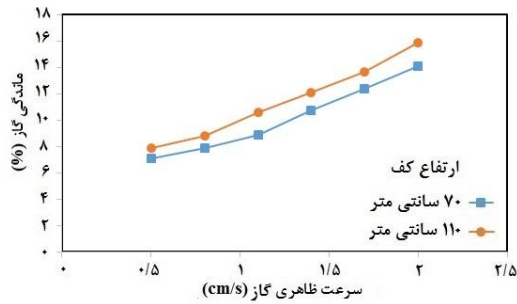


شکل ۴: تأثیر میزان کف‌ساز بر روی نرخ ظاهری سطح حباب با تغییر سرعت ظاهری گاز (ارتفاع کف = ۹۰ سانتیمتر، سرعت ظاهری خوراک = ۱/۸ سانتیمتر بر ثانیه و درصد جامد = ۱۰ درصد)

۳-۲- تأثیر شرایط عملیاتی بر روی ماندگی گاز

تأثیر سرعت ظاهری خوراک، درصد جامد و سرعت گاز ورودی روی ماندگی گاز در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. میزان ماندگی گاز با افزایش سرعت ظاهری گاز تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد.

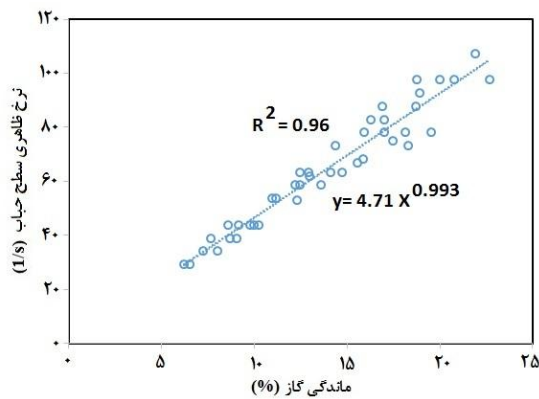
از شکل ۶ مشاهده می‌شود که ماندگی گاز با بالا رفتن سرعت خوراک ورودی به ستون افزایش یافته سپس از آن کاسته می‌شود. در سرعت بالاتر ذرات بیشتری وارد ستون می‌شوند که سطح حباب را اشباع می‌کند و دانسیته ذره - حباب را افزایش می‌دهند و باعث کاهش سرعت حباب‌ها می‌شوند که این امر منجر به افزایش ماندگی گاز می‌شود. ولی تغییر (افت) ماندگی گاز، در سرعت‌های ظاهری گاز بالاتر خیلی برجسته‌تر است. این به دلیل طبیعت الاستیک حباب‌های هوا است که



شکل ۹: تأثیر ارتفاع کف بر روی ماندگی گاز (سرعت ظاهری خوراک = ۱/۸ سانتیمتر بر ثانیه، درصد جامد = ۱۰ درصد و میزان کف ساز = ۱۰ گرم بر تن)

۴- رابطه بین S_b و ε_g

چون ماندگی گاز و نرخ ظاهری سطح حباب هر دو به سرعت ظاهری گاز و ابعاد حباب وابسته هستند بنابراین یک روش مناسب، پیش‌بینی نرخ ظاهری سطح حباب بر اساس ماندگی گاز است، زیرا تعیین ماندگی گاز به مراتب ساده تر از اندازه حباب (برای محاسبه S_b) است. نتایج اندازه گیری های ε_g و S_b نشان داد که با استفاده از مدل به دست آمده، تخمین نرخ ظاهری سطح حباب با دقت بالایی ممکن است (شکل ۱۰).

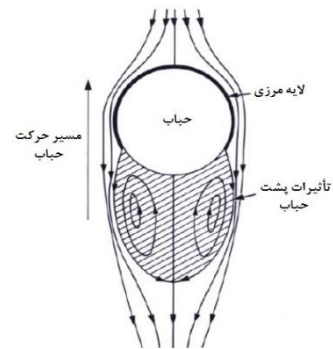


شکل (۱۰): رابطه بین S_b و ε_g

این نتیجه حقیقتی را تقویت می‌کند که ماندگی گاز به عنوان تخمین خوبی از نرخ ظاهری سطح حباب در نظر گرفته شود تا پارامترهای انتشار گاز فرآیند فلوتاسیون مشخص شود.

۵- نتیجه‌گیری

ماندگی گاز و نرخ ظاهری سطح حباب، از مهم‌ترین پارامترهایی هستند که برای تعیین ویژگی‌های هیدرودینامیکی حباب استفاده می‌شوند و ارتباط اندازه حباب و سرعت گاز را به صورت ترکیبی بیان می‌کنند. مطالعه حاضر به بررسی عوامل موثر بر پارامترهای انتشار گاز در سلول فلوتاسیون ستونی در مقیاس نیمه صنعتی پرداخته است. نتایج نشان داد ماندگی

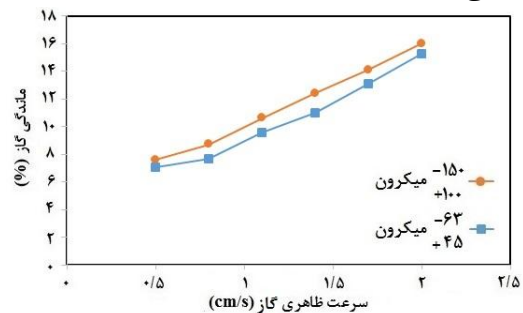


شکل ۷: صعود حباب و تأثیرات پشت آن [۲۰].

درصد جامد بالا، باعث افزایش دانسیته و ویسکوزیته در پالپ می‌شود که هر دو تأثیر عکس بر سرعت رو به بالای حباب دارند. چسبیدن ذرات جامد به حباب‌ها باعث افزایش دانسیته حباب و از طرف دیگر افزایش ویسکوزیته پالپ، باعث بیشتر شدن اختلاف فشار بیرون و داخل حباب شده و در نتیجه باعث سریعتر شدن حرکت حباب می‌شود.

۳-۳- تأثیر اندازه ذرات

تأثیر اندازه ذرات بر روی ماندگی گاز در شکل ۸ نشان داده شده است. ماندگی گاز در پالپی با اندازه ذرات بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ میکرون به میزان کمی بالاتر از پالپ با ابعاد ۴۵ تا ۶۳ میکرون است. با افزایش اندازه ذرات پالپ دانسیته حباب-ذره افزایش می‌یابد در نتیجه با کاهش سرعت حباب‌ها، ماندگی گاز افزایش می‌یابد.



شکل ۸: تأثیر اندازه ذرات بر روی ماندگی گاز (ارتفاع کف = ۹۰ سانتیمتر، سرعت ظاهری خوراک = ۱/۸ سانتیمتر بر ثانیه، درصد جامد = ۱۰ درصد و میزان کف ساز = ۱۰ گرم بر تن)

۳-۴- تأثیر ارتفاع کف بر ماندگی گاز

تأثیر ارتفاع کف ستون فلوتاسیون بر روی ماندگی گاز در شکل ۹ نشان داده شده است. بر این اساس، مشاهده می‌شود که ماندگی گاز در ناحیه جمع‌آوری با کاهش ارتفاع ناحیه کف کاهش می‌یابد. این به دلیل این حقیقت است که احتمال ائتلاف حباب‌ها با افزایش فشار ناشی از ارتفاع ستون، افزایش می‌یابد. همچنین نرخ کاهش در ماندگی گاز با افزایش سرعت جریان گاز افزایش می‌یابد.

- گاز در منطقه جمع‌آوری با افزایش درصد جامد، کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که اگرچه ماندگی گاز به دلیل افزایش در سرعت جریان خوراک کاهش می‌یابد ولی تأثیر آن در مقایسه با سرعت جریان گاز و میزان کف‌ساز قابل چشم‌پوشی است. با کاهش ارتفاع ناحیه کف، کاهش جزئی در ماندگی گاز در منطقه جمع‌آوری مشاهده می‌شود و این نرخ کاهش با افزایش سرعت جریان گاز افزایش می‌یابد.
- با افزایش سرعت ظاهری گاز و میزان کف‌ساز، نرخ ظاهری سطح حباب افزایش می‌یابد. تأثیر ابعاد ذرات بر ماندگی گاز در دو دامنه ابعادی ۱۰۰-۱۵۰ میکرون و ۴۵-۶۳ میکرون نشان داد که با افزایش ابعاد ذرات ماندگی گاز با شیب ملایمی افزایش می‌یابد. همچنین نرخ ظاهری سطح حباب با استفاده از روش آماری مدل‌سازی شد که قادر بود پیش‌بینی نرخ ظاهری سطح حباب بر اساس ماندگی گاز را با دقت بسیار بالایی تخمین بزند.
- منابع**
- [1] Wills, B.A., 2006. "Mineral Processing Technology - An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery". Seventh edition, Elsevier Science & Technology Books.
- [2] Finch, J. A., Dobby, G. S., 1990 "Column Flotation", Pergamon Press, London.
- [3] Pu, M., Gupta Y. P. and AI taweel, A. M. "Model predictive control of flotation columns", Intern. Conf. on Column Flotation'91, Sudbury, Canada, Vol. 2, 467-478.
- [4] Bergh, L. G., Yianatos, J. B., Acuna, C. P., Perez H. and Lopez, F. 1999. "Supervisory control at Salvador flotation columns", Minerals Engineering, 12 (7), 733-744.
- [5] Gorain, B. K., Franzidis, J. P., and Manlapig, E. V., 1999. "The empirical prediction of bubble surface area flux in mechanical flotation cells from cell design and operating data", Minerals Engineering, 12 (3), 309-322.
- [6] Hernández, H., Gómez, C. O. and Finch, J. A., 2003. "Gas dispersion and de-inking in a flotation Column", Minerals Engineering, 16 (8), 739-744.
- [7] Kracht, W., Vallebuona, G., and Casali, A., 2005. "Rate constant modelling for batch flotation, as a function of gas dispersion properties", Minerals Engineering, 18 (11), 1067-1076.
- [8] Gorain B.K., Franzidis J.-P., Manlapig E.V., 1997. "Studies on Impeller Type, Impeller Speed and Air Flow Rate in an Industrial Scale Flotation Cell – Part 4: Effect of Bubble Surface Area Flux on Flotation Performance", Minerals Engineering, 10 (4), 367-379.
- [9] Klimpel, R. R., Dhansen, R. and Fee, B. S., 1986. "Selection of flotation reagents for mineral flotation". in Design and Installation Concentration and Dewatering Circuit, A.L. Mular and M.A. Anderson (Eds), Chapter 26, 384-404.
- [10] Deglon, D. A., Egya-Mensah, D., and Franzidis, J. P., 2000. "Review of hydrodynamics and gas dispersion in flotation cells on South African platinum concentrators", Minerals Engineering, 13 (3), 235-244.
- [11] Heiskanen, K., 2000. "On the relationship between flotation rate and bubble surface area flux", Minerals Engineering, 13 (2), 141-149.
- [12] Luttrell, G. H., Mankosa, M. J. and Yoon, R. H., 1993. "Design and scale-up criteria for column flotation", XIII International Mineral Processing Congress, Sydney, May 23-28, 785-791.
- [13] Xu, M., Uribe-Salas, A. and Finch, J. A., 1991. "Maximum gas and bubble surface rates in column flotation", International Journal of Mineral Processing, 32 (3-4), 233-250.
- [14] Power, A. and Franzidis, J. P., 2000. "The characterization of hydrodynamic conditions in industrial flotation cells", Proceedings AusIMM 7th Mill Operators Conference, Kalgoorlie, WA, 243-255.
- [15] Banisi, S., Finch, J. A., Laplante, A. R. and Weber, M. E., 1995. "Effect of solid particles on gas holdup in flotation columns-I Measurement", Chemical Engineering Science, 50 (14), pp 2329-2334.
- [16] Shukla, S. C., Kundu, G. and Mukherjee, D., 2010. "Study of gas holdup and pressure characteristics in a column flotation cell using coal", Minerals Engineering, 6 (1), 55-67.
- [17] Massinaei, M. and Doostmohammadi, R., 2010. "Modeling of bubble surface area flux in an industrial rougher column using artificial neural network and statistical techniques," Mineral Engineering, 23 (2), 83-90, 2010.
- [18] Banisi S., Finch J. A., 1994. "Technical Note: Reconciliation of Bubble Size Estimation Methods Using Drift Flux Analysis", Minerals Engineering, 7 (12), 1555-1559.
- [19] Banisi, S., Finch, J. A., Laplante, A. R. and Weber M. E., 1995. "Effect of solid particles on gas holdup in flotation columns-II Investigation of mechanisms of gas holdup reduction in presence of solids", Chemical Engineering Science, 50 (14), 2335-2342.
- [20] Smith, P.G., Warren, L. J., 1989. "Entrainment of Particles into Flotation Froths", Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review: An International Journal, 5 (1-4), 123-145.