# مطالعه کمی تاثیر شرایط عملیاتی فرایند فلوتاسیون روی ساختار کف مس با استفاده از روش تجزیه تصویری

ناصر ثقةالاسلامی*+ و هجیر کریمی
زاهدان، دانشگاه سیستان و بلوچستان، گروه مهندسی شیمی، کد پستی ۱۶۱-۹۸۱۶۴

محمد چالکش امیری
اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی شیمی

حسن حاج امین شیرازی
کرمان، دانشگاه شهید باهنر، گروه معدن

**چکیده:** *در فرایند فلوتاسیون، ساختار کف تاثیر مهمی در میزان عملکرد متالورژیکی سلول دارد. این ساختارها را می‌توان با تغییر شرایط عملیاتی به‌طور قابل توجهی بهبود بخشید. در این پژوهش تاثیر شرایط عملیاتی نظیر غلظت موادشیمیایی، سرعت هوادهی و عمق کف، روی ساختار کف فلوتاسیون مس به‌طور کمی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این کار ابتدا در شرایط عملیاتی مختلف از ظاهر کف تصویر برداری شده است. سپس با استفاده از یک الگوریتم تجزیه تصویری، پارامترهایی نظیر اندازه متوسط، انحراف استاندارد اندازه و ضریب گردی حباب‌ها، به‌عنوان مهم‌ترین شاخص‌های تصویر استخراج و رابطه این شاخص‌ها با شرایط عملیاتی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتیجه‌های به‌دست آمده نشان می‌دهد غلظت کف ساز، سرعت هوادهی و عمق کف تاثیر مهمی روی ساختار کف، به‌ویژه توزیع اندازه حباب‌ها دارند. همچنین تاثیر غلظت کلکتور روی ساختار کف در مقایسه با غلظت کف ساز و سرعت هوادهی و نیز عمق کف چندان محسوس نمی باشد.*

**واژه های کلیدی:** *کف فلوتاسیون، تجزیه تصویری کف، غلظت کف ساز، سرعت هوادهی*

***KEY WORDS:*** *Flotation froth, Froth image analysis, Frother concentration, Air flow rate.*

## مقدمه

پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد که ساختار کف تولید شده روی سطح پالپ در سلول‌های فلوتاسیون تاثیر مهمی روی عیار و بازیابی مواد با ارزش کنسانتره دارد [۳،۲،۱]. به همین دلیل در فلوتاسیون، برای کنترل عملکرد متالورژیکی سلول فلوتاسیون اپراتور یک نظارت مداوم (نگاه چشمی) بر مشخصه‌های کف (ساختار و رنگ کف) تولید شده دارد.

ویژگی‌های کف تولید شده در فرایند فلوتاسیون به‌طور ذاتی به‌وسیله میزان ترشوندگی جامد و کشش سطحی فصل مشترک مایع-گاز تعیین می‌شود [۴]. مقدار این خاصیت‌ها را می‌توان با توجه به تاثیر عوامل بیرونی نظیر میزان مواد شیمیایی، میزان هوادهی، تغییرات pH محیط و تغییر عمق فاز کف تغییر داد. ساختار کف تولید شده می‌تواند تحت تاثیر این عوامل تغییر کند.

+ E-mail: slami@hamoon.usb.ac.ir
* عهده‌دار مکاتبات



Archive of SID
www.SID.ir

با تنظیم و کنترل شرایط عملیاتی ساختارهای متفاوتی از کف را می‌توان تولید کرد که هر کدام تاثیر متفاوتی روی عملکرد سلول دارد. بنابراین، تولید یک کف با ویژگی‌های مناسب می‌تواند به‌طور موثری عملکرد سلول را بهبود دهد.

در سال‌های اخیر پژوهش‌گران به مطالعات زیادی روی سیستم‌های مشاهده-کنترل[۱] در فرایند فلوتاسیون بر مبنای ساختار کف فلوتاسیون پرداخته‌اند [۵ و ۶].

هدف از این سیستم‌ها جایگزین کردن یک مجموعه تجزیه تصویر (دوربین ویدیویی و روش تجزیه تصویر) به جای نظارت چشمی اپراتور است. از این طریق ارزیابی ساختار کف و به دنبال آن کنترل عملکرد فرایند بر مبنای شرایط عملیاتی می‌تواند انجام گیرد. برای توسعه و تکمیل چنین سیستم‌هایی لازم است رابطه کمی ویژگی‌های کف سطح سلول با تغییر شرایط عملیاتی فرایند مطالعه و بررسی شود. بدین ترتیب شرایط مطلوب و مناسبی که بتواند یک نتیجه خوبی در سطح عملیات تولید کند باید مطالعه شود. تاکنون مطالعه کمی تاثیر این پارامترها روی ساختار کف انجام نگرفته است، اما تاثیر برخی از این پارامترها روی ویژگی‌های کف به‌طور کیفی در تعدادی از پژوهش‌ها به‌صورت پراکنده مطالعه شده است[۸,۷]. همچنین نتایج به‌دست آمده در این تحقیق می‌تواند در جهت آموزش مناسب اپراتور برای کنترل بهتر عملیات در تولید یک کف خوب به‌کار گرفته شود.

در این پژوهش به مطالعه تاثیر شرایط عملیاتی نظیر مواد شیمیایی، میزان هوادهی و عمق کف روی ساختار کف به‌ویژه اندازه وشکل حباب‌ها پرداخته شده است.

## کار آزمایشگاهی

مطالعات روی ساختار کف در یک مدار آزمایشگاهی فلوتاسیون پیوسته انجام گرفته است. عمل فلوتاسیون در یک سلول رافر[۲] به حجم تقریبی ۴۰ لیتر صورت پذیرفته و شرایط عملیاتی مورد نظر در هر آزمایش نیز تنظیم شده است. برای تصویر برداری از سطح کف از یک دوربین دیجیتال هندی کم (Sony EI132) در شرایط نوردهی مناسب استفاده شده [۹] و شرایط عملیاتی به‌کار گرفته شده در جدول ۱ نشان داده‌شده است.

## روش تجزیه تصاویر

روش‌های تجزیه تصویر به‌طور کلی به سه مرحله مشخص تقسیم می‌شوند [۱۰]. ابتدا پردازش سطح مقدماتی، که متشکل از جمع‌آوری و ذخیره تصویر و پیش پردازش است. سپس پردازش سطح میانی شامل روش‌های تقطیع تصویر[۳]، تشخیص و استخراج اطلاعات مفید از تصویر اصلی است. و در نهایت پردازش سطح بالا، که مرکب از طبقه‌بندی و توصیف اجزای موجود در تصویر است.

در این مطالعه برای تجزیه تصویرها، یک الگوریتم مناسب تجزیه تصویر در محیط نرم افزار IMAQ Vision Ver.6 تدارک دیده شده است. در این الگوریتم در مرحله پردازش مقدماتی از ترکیب توابع مختلف نظیر averaging، median و lowpass برای کاهش نویز و همگن سازی تصویر استفاده شده است. در مرحله میانی جهت تقطیع و مرزنمایی[۴] حباب‌ها از توابعی نظیر Laplacian و Soble استفاده شده است. سپس برای جداسازی کامل حباب‌ها و زمینه تصویر و نیز بهبود شکل آنها، از توابع مرفولژی ریاضی[۵] نظیر تابع open و erode و توابع پیشرفته properopen، properclose و separation و غیره استفاده شده است. در مرحله نهایی از تصویر تقطیع شده، قطر معادل، ضریب گردی[۶] و سایر پارامترهای قابل اندازه گیری بر حسب واحد تعریف شده محاسبه شده است. در شکل ۱ تصویر یک نمونه کف همراه با تصویر تقطیع شده آن نشان داده شده است.

## پارامترها روی ساختار کف

با توجه به اینکه بین اندازه حباب‌ها درون فاز پالپ و اندازه حباب‌ها درون فاز کف رابطه وجود دارد [۱۱]، انتظار می‌رود فاکتورهایی که روی اندازه حباب درون پالپ موثر باشند روی ظاهر کف سطح سلول نیز تاثیر بگذارند. بنابراین کنترل اندازه و شکل حباب‌ها در سطح کف می‌تواند در فراوری مواد معدنی با اهمیت باشد.

### تاثیر غلظت کف‌ساز روی ساختار حباب‌های کف

با توجه به مکانیسم عملکرد کف‌ساز روی فصل مشترک

(۱) Machine vision control
(۲) Rougher cell
(۳) Segmentation
(٤) Edge detection
(۵) Mathematical morphology
(٦) Circularity factor

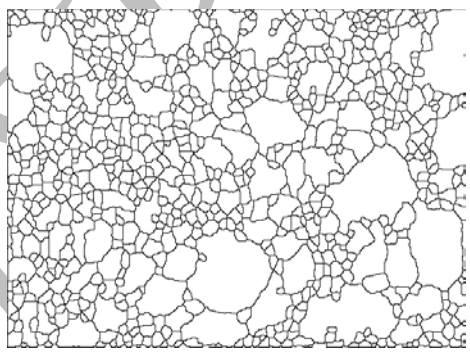


Archive of SID
www.SID.ir

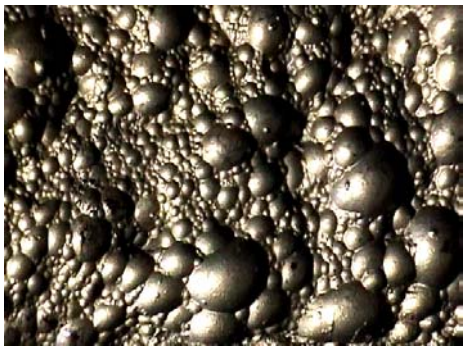
**جدول ۱- فهرست پارامترها و محدوده تغییر آن‌ها برای آماده‌سازی پالپ و کنترل عملیات فرایند فلوتاسیون در آزمایشگاه**

| پارامترها | محدوده مورد استفاده | واحد | ملاحظات |
|---|---|---|---|
| کلکتورها ($Z_{11}^{2} + R_{407}^{1}$) | ۱۰-۸۵ | gr/ton | محلول ۱۰ درصد |
| کف‌سازها ($A_{65}^{4}$ +MIBC$^{3}$) | ۱۰-۹۰ | gr/ton | محلول ۱۰ درصد |
| هوادهی (AFR) | | درصد باز بودن شیر | |
| pH | ۱۱/۸ | | |
| متوسط عیار خوراک | ۰/۹ | | |

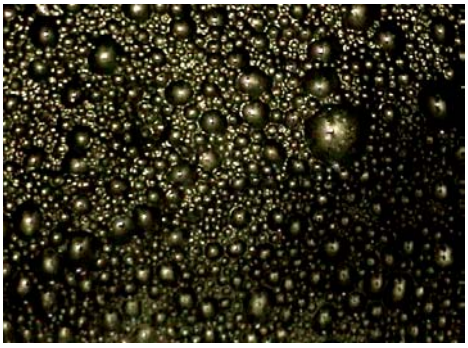
*Sodium mercaptobenzothiazole and Sodium dialkyl thiophosphate(۱)*
*Sodium isopropyl xanthate(۲)*
*Methyl isobutyl carbonyl(۳)*
*Glycol polypropylene(۴)*



**(الف)**
**شکل ۱- الف- تصویر تقطیع شده تصویر اصلی**



**(ب)**
**شکل ۱- ب- یک نمونه از تصویر اصلی کف**



**(الف)**
**شکل ۲- الف- مقدار کف‌ساز افزوده شده ۲۵ gr/ton، عمق کف ۲/۹cm**

**(ب)**
**شکل ۲- ب- مقدار کف ساز افزوده شده ۶۰ gr/ton، عمق کف ۲/۹cm**

مایع-گاز درون پالپ، اندازه و شکل حباب تولید شده می‌تواند تحت تاثیر غلظت آن قرار گیرد. بدین ترتیب با افزایش یا کاهش غلظت کف‌ساز می‌توان کف‌هایی با ساختار متفاوت تولید کرد [۶].

در شکل ۲ تاثیر غلظت کف‌ساز روی ساختار کف سطح سلول به‌طور کیفی نشان داده شده است. در شکل ۲- الف اندازه حباب‌ها به نسبت بزرگ، میزان توزیع اندازه حباب‌ها بسیار متغیر



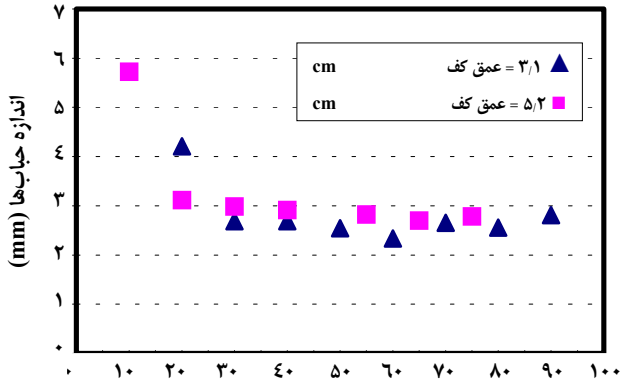
www.SID.ir

(تفاوت اندازه‌ها زیاد است) و شکل حباب‌ها متمایل به بیضی و چند ضلعی است. اما در شکل ۲- ب اندازه حباب‌ها کوچک و ضریب توزیع اندازه حباب‌ها نیز به نسبت کم است. در این حالت تحرک‌پذیری کف نیز به نسبت زیاد و عیار کف پایین است. در این پژوهش روند چنین تغییراتی به‌طور کمی نیز مطالعه شده است و نتایج آن در شکل‌های ۳ تا ۵ نشان داده شده است. همان‌طوری‌که انتظار می‌رفت افزایش غلظت کف‌ساز در پالپ، سبب شد که ساختار کلی کف (متشکل از حباب‌های به نسبت درشت با توزیع اندازه بیشتر) به ساختاری متشکل از حباب‌های کوچک‌تر تبدیل شود. از شکل ۵ می‌توان دریافت که افزایش غلظت کف‌ساز تا حدودی به پایداری شکل حباب‌ها (تمایل به کروی بودن) کمک می‌کند. البته مجموعه تغییرات نشان می‌دهد تغییر ساختار کف در یک محدوده مشخصی از تغییر غلظت کف‌ساز بیشتر محسوس بوده و به نظر می‌رسد با افزایش غلظت، تغییر قابل توجهی روی ساختار کف نخواهد داشت.

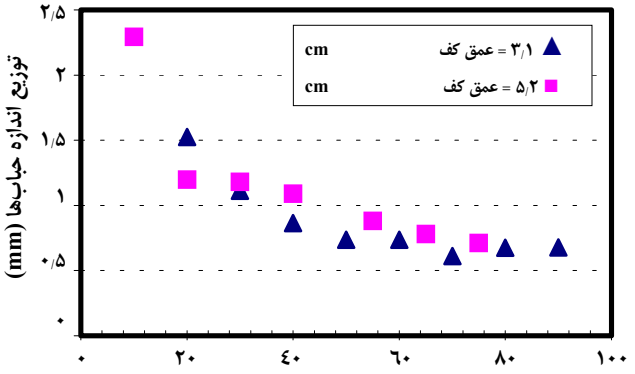
### اثر هوادهی

مطالعات نشان می‌دهد که بین سرعت هوادهی و اندازه حباب رابطه نزدیکی وجود داشته [۱۲] و سرعت هوادهی، عیار و بازیابی فرایند را نیز تحت تأثیر قرار خواهد داد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که اندازه حباب‌های مشاهده شده در سطح کف یک عامل مناسب برای تشخیص سرعت هوادهی و عملکرد فرایند فلوتاسیون است. اما تحقیقات نشان می‌دهد که تغییرات قابل توجه در ساختار کف در سرعت‌های بالای هوادهی رخ می‌دهد، و افزایش سرعت هوادهی سبب افزایش غلظت جامد و کاهش عیار کف می‌شود [۱۳]. رابطه کمی بین سرعت هوادهی و اندازه حباب‌ها برای سلول رافر کارخانه نیمه صنعتی نیز در شکل ۶ نشان داده شده است. در این حالت تامین هوای مورد نیاز به‌صورت خودمکش روی سلول انجام گرفته و کنترل مقدار آن به‌وسیله یک شیر به‌صورت دستی صورت می‌پذیرد.

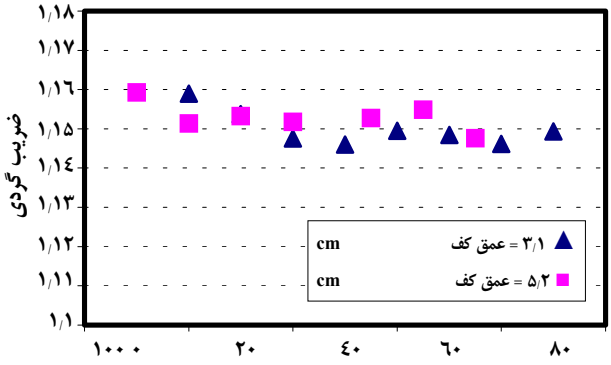
نتایج نشانگر آن است که علی رغم اینکه افزایش سرعت هوادهی سبب کاهش ناچیزی در اندازه حباب‌ها می‌شود، اما کاهش توزیع اندازه حباب‌ها در سطح کف محسوس به‌نظر می‌رسد. در شرایط پایدار این افزایش سرعت هوادهی و به دنبال آن افزایش فشار دینامیکی، سبب افزایش سرعت بالا رفت حباب‌ها هم درون فاز پالپ و هم درون فاز کف خواهد شد، و زمان ماند حباب‌ها در فاز کف کاهش می‌یابد. بنابراین، افزون بر




شکل ۳- تاثیر غلظت کف‌ساز روی اندازه حباب‌ها در دو عمق متفاوت از کف



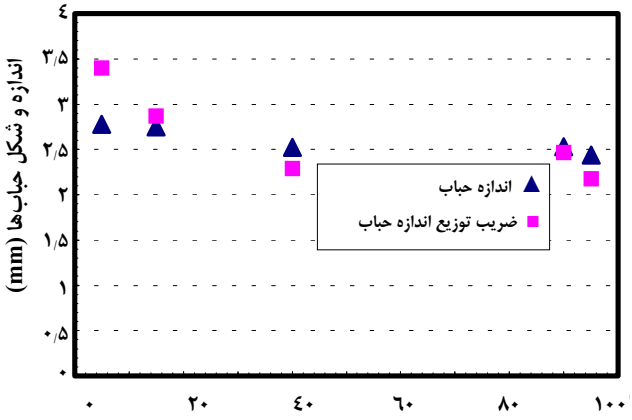

شکل ٤- تأثیر غلظت کف‌ساز روی توزیع اندازه حباب‌ها در دو عمق




شکل ۵- تاثیر غلظت کف ساز روی توزیع اندازه حباب‌ها در دو عمق متفاوت از کف



www.SID.ir




شکل ٦- تاثیر سرعت هوادهی روی ساختار کف

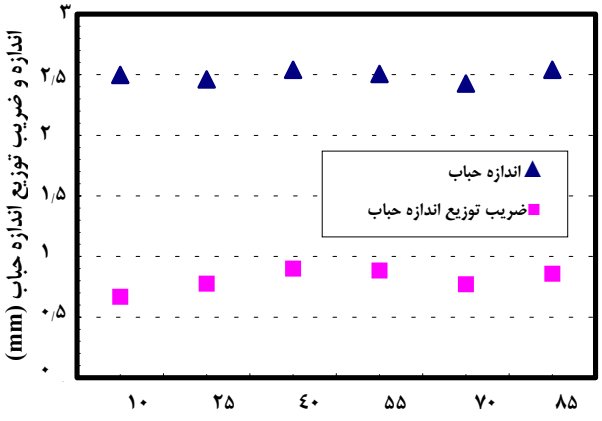
این‌که فرصت تخلیه فیلم مایع بین حباب‌های درون فاز کف کم می‌شود، همین امر نیز باعث خواهد شد، وضعیت ناپایداری درحباب‌های بزرگ به‌ویژه برای حباب‌های کم بار، بیشتر شود. بنابراین، حباب‌ها تمایل دارند به حباب های کوچک و پایدار تبدیل شوند. در نتیجه ساختار کلی کف ترکیبی از حباب‌های ریز و درشت ، کم بار و پرتحرک و کم عیار خواهد بود (کف از نوع runny). چنانچه سرعت هوادهی بیش از اندازه شود، این امر پدیده کانالیزه شدن جریان‌های درون پالپ و حتی درون فاز کف را به‌همراه خواهد داشت. در این صورت نقش مواد شیمیایی روی پدیده گزینش پذیری ذره‌ها و پایداری حباب نیز کم اثر می‌شود و ساختار کف آبکی شده و مقداری از گانگ به‌همراه کف از سلول سرریز خواهد شد. بدین ترتیب مقدار عیار کف به‌شدت کاهش یافته و شدت جرمی جامد و آب همراه کف زیاد می‌شود.

در مقابل در سرعت‌های پایین هوادهی، فضای درون کف آرام شده و فرصت به‌هم آمیختگی در حباب‌ها فراهم می‌شود. در این حالت انتظار می‌رود گستره توزیع اندازه حباب‌ها در سطح کف بیشتر شود.

در شرایطی که کف از سلول سرریز نداشته باشد، افزایش سرعت هوادهی سبب انبساط فاز کف می‌شود. البته با افزایش بیشتر سرعت هوادهی، دوباره حباب‌ها تمایل به ریز شدن پیدا می‌کنند.

## تاثیر کلکتور

تاثیر میزان کلکتور روی ساختار کف در مقایسه با تاثیر




شکل ۷- تاثیر غلظت کلکتور روی اندازه و ضریب توزیع اندازه حباب‌های کف، عمق ۳/۲ cm

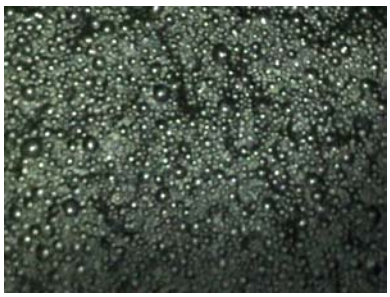
کف‌ساز و هوادهی چندان قابل توجه نیست. اما آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در یک گستره مشخصی از غلظت کلکتور (بین ۴۰ تا ۵۵ gr/ton) گستردگی توزیع اندازه حباب‌ها در کف در مقایسه با محدوده‌های دیگر غلظت کلکتور بیشتر است. علت این امر را می‌توان به دلیل تاثیر گذاری بیشتر کلکتور در این ناحیه از غلظت روی گزینش پذیری ذره‌ها به‌وسیله‌ی حباب‌ها در نظر گرفت. در نتیجه به‌دلیل افزایش بار حباب ، و افزایش ویسکوزیته کف، میزان کشیدگی حباب ها در جهت حرکت جریان کف زیاد می‌شود، و شکل هندسی آنها بیشتر به‌صورت چند ضلعی و بیضی دیده می‌شود (شکل ۷).

## تاثیر عمق کف

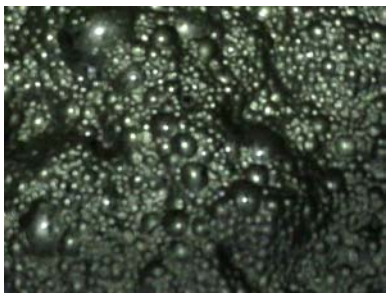
عمق کف نیز از فاکتورهایی است که به‌طور قابل ملاحظه‌ای روی ساختار کف تاثیر می‌گذارد. این اثر به زمان ماند ذره- حباب در فاز کف مربوط می‌شود. چنانچه عمق کف افزایش یابد، در اثر پدیده به‌هم آمیختگی حباب‌ها، توزیع اندازه حباب‌های سطح کف نیز می‌توانند بیشتر و متوسط اندازه حباب‌ها نیز افزایش خواهد یافت. همچنین فرصت تخلیه گانگ و گزینش پذیری حباب‌ها زیاد و غلظت مواد با ارزش درون کف نیز افزایش خواهد داشت. چنانچه عمق کف کاهش داده‌شود شرایط عکس در ساختار حباب‌های کف مشاهده شده، به‌طوری‌که حباب‌های تولیده شده به نسبت ریز و کم بار شده و کف پرتحرک حاصل می‌شود. شکل ۸ رابطه بین عمق کف و اندازه حباب‌ها را به‌صورت کیفی نشان می‌دهد.



Archive of SID
www.SID.ir



(الف)



(ب)

**شکل ۸ - ساختار تولید شده کف برای دو حالت:**
**الف) عمق کف ۲/۹cm، اندازه متوسط حباب‌ها ۲/۵٤۱ cm ، انحراف معیار اندازه حباب‌ها (توزیع اندازه) ۰/۸۵۸ cm**
**ب) عمق کف ۵/۲cm، اندازه متوسط حباب‌ها ۲/۹۱٦ cm ، انحراف معیار اندازه حباب‌ها (توزیع اندازه) ۱/۱٤۵ cm**

## نتیجه گیری

میزان کف‌ساز، سرعت هوادهی و عمق کف سه پارامتر مهم هستند که روی ساختار کف (اندازه وشکل حباب‌ها ) تاثیرگذار بوده و به‌صورت کمی در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است.

چنانکه شرایط پایدار برقرار باشد، افزایش سرعت هوادهی سبب می‌شود اندازه حباب‌ها و به‌ویژه توزیع اندازه حباب‌ها کمتر شود. برای حالتی که درصد جامد پالپ کم باشد، این تغییرات بیشتر محسوس است. علت این پدیده را می‌توان به دلیل افزایش سرعت بالا رفتن حباب‌ها، و نیز ناپایداری در حباب‌های بزرگ (به‌ویژه کم بار) دانست. در شرایطی که کف سلول سرریز نداشته باشد، افزایش سرعت هوادهی سبب انبساط کف می‌شود، در نتیجه اندازه حباب‌ها به‌تدریج بزرگ‌تر می‌شود.

نتایج نشانگر آن است که تغییر غلظت کف ساز اثر بارزتری نسبت به سرعت هوادهی روی ساختار کف خواهد داشت.

تغییر عمق کف به میزان زیادی می‌تواند در ساختار کف تولید شده اثرگذار باشد. نتیجه‌ها نشان می‌دهند که با افزایش عمق کف در شرایط پایدار، اندازه حباب‌ها بزرگتر شده و شکل حباب‌ها بیشتر حالت چند ضلعی به خود می‌گیرند. در این شرایط ساختار کلی کف کم تحرک و لزج به‌نظر رسیده و عیار آن نیز به‌نسبت زیاد می‌شود، با کاهش عمق کف، شرایط عکس این حالت در ساختار کف مشاهده می‌شود.

همچنین نتایج این تحقیق نشانگر آن است که افزایش یا کاهش میزان کلکتور به تنهایی اثر محسوسی روی ساختار کف ندارد، هر چند که در محدوده ای از غلظت کلکتور تغییراتی در توزیع اندازه حباب‌ها اما به میزان کم مشاهده می‌شود. اما چنانچه غلظت کلکتور پالپ به اندازه کافی باشد، در این صورت تاثیر تغییر پارامترهای دیگر (مقدار کف ساز، سرعت هوادهی و عمق کف) روی ساختار کف به‌ویژه شکل حباب‌ها بیشتر آشکار می‌شود.

*تاریخ دریافت: ۸۲/۲/۲۱ ؛ تاریخ پذیرش: ۸۲/۷/۱۵*

## مراجـــع

[1] Moolman, D. W., Aldrich, C., Van Deventer, J. S. J. and Stange, W., *Minerals Eng*., **7**(9), 1149 (1994).

[2] Van Deventer, J. S. J., Bezuidenhout, M. and Moolman, D. W., *Min. Cong*., Aachen, Germany, 315 (1997).

[3] Bonifazi, G., Serranti, S., Volpe, F. and Zuco, R., *Computers & Geosciences*, in press, (2000).

[4] Klassen, V.I. and Mokrousov, V.I., "An Introduction to Theory of Flotation", Butter Worth Co., London, (1963).

[5] Bonifazi, G., et al, *Proc. XXI Int. Min. Proc. Cong*., C8a39-C8a49 (2001).



Archive of SID
www.SID.ir

[6] Moolman, D. W., Ekesteen, J.J., Aldrich, C. and Van Deventer, J.S.J., *Int. J. Miner. Process*, **48**,135 (1996).

[7] Woodburn, E.T., Stockton, J.B., and Robbinsons, D.J., *Column Flotation 88*, **13**, 113 (1988).

[8] O'Connor, C.T., Randall, E.W., and goodall, C.M., *Int. J. Miner. Process*, **28**, 139 (1990).

[9] Moolman, D.W., Aldrich, C., Van Deventer, J.S.j., and Stange, W.W., *Minerals. Eng.*, **7**(9), 1149 (1994).

[10] Moolman, D.W., Aldrich, C., Van Deventer, J.S.J., *Computer-Aided Chemical Engineering*, **6**, 129 (1995).

[11] Cutting, G.W., *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, **5**, 169 (1989).

[12] Glembotskii, V.A., "Flotation Primery Sources", New York, (1972).

[13] Smar, V.D., Klimpel, R.R. and Aplan F.F., *Int. J. Miner. Process*, **42** (3-4), 255 (1994).

Archive of SID



www.SID.ir