



Imam Khomeini International University

Vol. 7, No. 2, Summer 2022



نشریه مهندسی منابع معدنی

Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

Research Paper

Measurement of Froth Stability in Flotation Cells and Investigation of the Impact of Factors Affecting It

Ostadrhimi M.^{1,2}, Gharibi Kh.^{3*}, Farrokhpay S.⁴, Dehghani A.⁵, Ostadrhimi M.R.⁶

1- Ph.D, Dept. of Mining & Metallurgical Engineering, University of Yazd, Yazd, Iran

2- Iranian Mines & Mining Industries Development & Renovation Organization (IMIDRO), Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Dept. of Mining & Metallurgical Engineering, University of Yazd, Yazd, Iran

4- Associate Professor, GeoResources, University of Lorraine, 54505 Nancy, France

5- Associate Professor, Dept. of Mining & Metallurgical Engineering, University of Yazd, Yazd, Iran

6- M.Sc, Dept. of Mining, Islamic Azad University of Golpayegan, Isfahan, Iran

Received: 08 Dec. 2020

Accepted: 05 Jul. 2021

Abstract: Froth stability is of particular importance and has a significant impact on the flotation process. Froth stability can be defined based on the formation of froth (maximum froth height or froth retention time) or the froth decay (froth half-life). Froth stability is influenced by various factors such as the superficial air velocity (J_g), the collector dosage (C_c), frother dosage (F_c) and the sample particle size (d_{50}). In this work the effects of these factors were examined. The results showed that increasing the J_g , the C_c and the F_c will increase the froth stability. For example, by increasing the F_c from 60 to 140 g/liter, the froth retention time (FRT) and the half-life froth ($t_{1/2}$) increased by 92% and 71%, respectively. Sample particle size behaved differently in froth formation and decay, so that by reducing the d_{50} the froth retention time increased but the froth half-life decreased.

Keywords: : Froth stability, Gas velocity, Collector dosage, Frother dosage, Sample particle size (d_{50}).

How to cite this article

Ostadrhimi, M., Gharibi, Kh., Dehghani, A., Farrokhpay, S., and Ostadrhimi, M. R. (2022). "Measurement of froth stability in flotation cells and investigation of the impact of factors affecting it". Journal of Mineral Resources Engineering, 7(2): 179-194.

DOI: [10.30479/JMRE.2021.13213.1473](https://doi.org/10.30479/JMRE.2021.13213.1473)

*Corresponding Author Email: khgharibi@yazd.ac.ir

COPYRIGHTS



©2022 by the authors. Published by Imam Khomeini International University.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

INTRODUCTION

Froth stability plays an important role in determining the selectivity and recovery in flotation [1]. It should be noted that froth with very high stability is not good because in addition to recovering the particles attached to the bubble, it creates favorable conditions for entrainment [2]. Froth stability can be defined as froth retention time, which depends on the structure of the froth and the size distribution of the bubbles [3], or decay time of the froth [4].

Froth stability can be determined by dynamic and static tests. The froth dynamic is determined by measuring the maximum froth height, and the froth static is determined by froth decay to prevent the froth formation [1].

Dynamic froth stability is the ratio of froth volume to aeration value; If the cross-sectional area of the whole cell is assumed to be the same, the dynamic froth stability is equal to the froth retention time and is calculated using Equation 1:

$$\text{FRT} = \frac{V_f}{Q} = \frac{H_{\max}}{J_g} \quad (1)$$

Where:

V_f : froth volume

Q : air volume flow rate

H_{\max} : maximum froth height

J_g : is superficial gas velocity.

The effect of particle size has been investigated by several researchers [5-7]. In general, fine particles affect the froth stability and the role of hydrophobic particles is significant. In fact, fine particles can increase the froth stability of the overflow.

The type and amount of frother is also effective on the froth stability. Ata [8] examined the separation of particles during the bubble coalescence, and she found that increasing the frother dosage resulted in increasing the contact surface and decreasing the particle separation, and thus reducing the bubble coalescence and increasing froth stability [8].

Another factor that affects froth stability is the pH. The pH can change the chemical level of the minerals in the pulp by affecting the charge level of the particles. Farrokhpay and Zanin [9] examined the effect of water quality on the froth stability for a zinc concentrate in Australia. They found that by decreasing the pH, the froth half-life increases, which is due to the decrease in zeta potential and increase in the viscosity [9].

MATERIALS AND METHODS

In order to measure the froth stability and examine the effect of some operational parameters, a special column was used on a laboratory scale. This device was designed based on the column used by Zanin et al. [10] and McFadzin et al. [11].

The experiments were designed and performed using Design-Expert software version 10 (DX10). Independent variables or input parameters for this study were: collector and frother dosage, superficial air velocity, and particle size (d50). The dependent variables or responses were froth half-life and maximum froth height.

To perform the experiments, a sample of iron ore concentrate containing sulfide minerals from Gole-Gohar Sirjan Company (Iran) was used.

RESULTS AND DISCUSSIONS

According to the results of analysis of variance, the parameters examined at the 95% confidence level are significant. Also, the interaction between the superficial air velocity –frother dosage and frother dosage – d50 are significant.

Figure 1 shows the effect of various factors on the froth retention time (FRT). It is observed that increasing the superficial air velocity, collector dosage or frother dosage increases the froth retention time while increasing the d50 reduces the froth retention time.

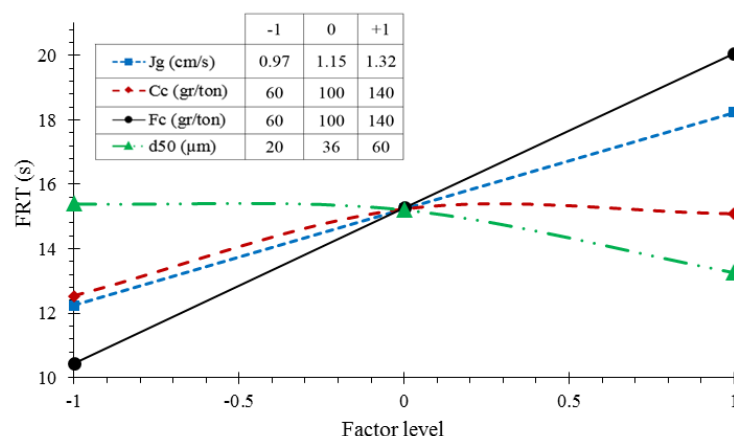


Figure 1. The effect of factors on froth formation

The superficial air velocity significantly changes the composition and structure of the froth, however, it is not entirely clear what effect superficial air velocity has on the characteristics of the froth and which feature of the froth is the main factor in determining the froth rheology. Due to the fact that increasing the superficial air velocity increases gas holdup, so increases the probability of the number of collisions and the attachment of particles-bubble, which increases the volume of solid particles in the froth phase. Therefore, the greater presence of particles in the froth phase leads to an increase in the froth height. However, excessive superficial air velocity will result in the formation of large bubbles, which can reduce the volume of particles in the froth phase.

The increase in the bubble load depends on the collector dosage, at higher collector dosage, the amount of particles presents in the froth phase increases due to the increased bubble-particle attachment. However, excessive collector will cause the bubble-clustering phenomenon and has a negative effect on the bubble loading.

An increase in the frother dosage will reduce the bubbles size and form more stable bubbles. The probability of collision of a particle with a bubble also increases. Therefore, the bubble loading increases, which will stabilize the froth. Although small bubbles have the stated benefits, the absence of large bubbles may reduce the flotation recovery.

The results of analysis of variance show that the effect of the independent variables is significant with 95% confidence, while the confidence level for frother dosage-d50 is 90%. It should be noted that the effect of the superficial air velocity (J_g), the collector dosage (C_c) and the frother dosage (F_c) is similar with the froth formation.

Figure 2 shows that the froth half-life increases with increasing the superficial air velocity, collector dosage, frother dosage and particle size (d_{50}).

When the froth decays, the increase in fine particles accelerates the process of froth decay, perhaps due to the presence of more water along with the fine particles, which causes the froth to move. If the number of very small particles increase, the presence of these particles in the froth phase and increased viscosity will prevent the rapid froth decay.

CONCLUSION

The effects of various parameters on the froth stability were examined. It was shown that increasing the superficial air velocity, the collector or frother dosage results in the increasing of the froth formation and froth decay. However, the behavior of the particles was different and the froth retention time increases with decreasing the particle size. This indicates that an increase in the fine particles has a positive effect on the froth formation due to the increased viscosity, but when the froth decays, the higher amount of fine particles accelerates the process of froth destruction probably due to the presence of more water along with the fine particles.

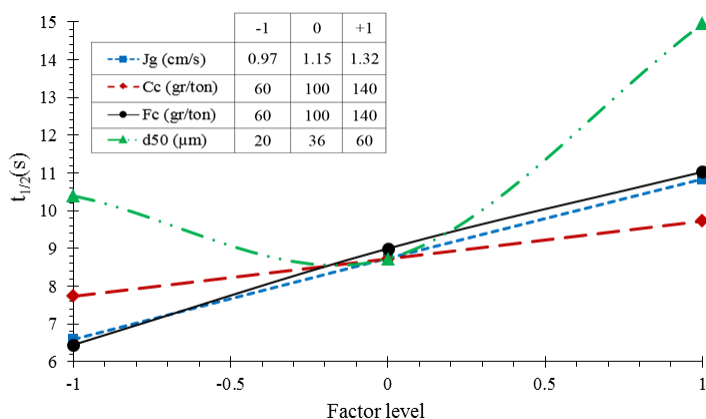


Figure 2. The effect of various factors on froth decay

REFERENCES

- [1] Farrokhpay, S. (2011). "The significance of froth stability in mineral flotation - A review". *Advances in Colloid and Interface Science*, 166: 1-7.
- [2] Zheng, X., Franzidis, J-P., and Johnson, N. W. (2006). "An evaluation of different models of water recovery in flotation". *Minerals Engineering*, 19: 871-882.
- [3] Aktas, Z., Cilliers, J. J., and Banford, A. W. (2008). "Dynamic froth stability: Particle size, airflow rate and conditioning time effects". *International Journal of Mineral Processing*, 87: 65-71.
- [4] Tsatouhas, G., Grano, S., and Vera, M. (2006). "Case studies on the performance and characterisation of the froth phase in industrial flotation circuits". *Minerals Engineering*, 19: 774-783.
- [5] Aveyard, R., Binks, B. P., Fletcher, P. D. I., Peck, T. G., and Rutherford, C. E. (1994). "Aspects of aqueous foam stability in the presence of hydrocarbon oils and solid particles". *Advances in Colloid and Interface Science*, 48: 93-120.
- [6] Long Liang, L., Li. Z., Peng, Y., Tan, J., and Xie, G. (2015). "Influence of coal particles on froth stability and flotation performance". *Minerals Engineering*, 81: 10-96.
- [7] Ata, S., Ahmed, N., and Jameson, G. J. (2004). "The effect of hydrophobicity on the drainage of gangue minerals in flotation froths". *Minerals Engineering*, 17: 897-901.
- [8] Ata, S. (2009). "The detachment of particles from coalescing bubble pairs". *Journal of Colloid and Interface Science*, 338: 558-565.
- [9] Farrokhpay, S., and Zanin, M. (2012). "An investigation into the effect of water quality on froth stability". *Advanced Powder Technology*, 23: 493-497.
- [10] Zanin, M., Wightman, E., Grano, S. R., and Franzidis, J.-P. (2009). "Quantifying contributions to froth stability in porphyry copper plants". *International Journal of Mineral Processing*, 91: 19-27.
- [11] McFadzean, B., Marozva, T., and Wiese, J. (2015). "Flotation frother mixtures: Decoupling the sub-processes of froth stability, froth recovery and entrainment". *Minerals Engineering*, 85: 72-79.



اندازه‌گیری پایداری کف در سلول فلوتاسیون و بررسی تاثیر عوامل موثر بر آن

مهدی استادرحیمی^{۱،۲}، خداکرم غریبی^{۳*}، سعید فرخ پی^۴، علی دهقانی^۵، محمدرضا استادرحیمی^۶

- ۱- دکتر، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد
- ۲- سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران، تهران
- ۳- استادیار، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد
- ۴- دانشیار، آزمایشگاه منابع زمین، دانشگاه لورین، فرانسه
- ۵- دانشیار، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد
- ۶- کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد گلپایگان، گلپایگان

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۴

دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۱۸

چکیده

پایداری کف با توجه به اینکه در فرآیند فلوتاسیون تاثیر قابل توجهی دارد، اهمیت خاصی دارد و عوامل مختلفی ممکن است بر آن تاثیر داشته باشد. از جمله عوامل موثر بر پایداری کف سرعت ظاهری هوا، غلظت کلکتور، غلظت کف ساز و اندازه ذرات نمونه است که در این مقاله عوامل یاد شده برای فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی کنسانتره سنگ آهن بررسی شد. پایداری کف با توجه به تشکیل و از بین رفتن کف تعیین می‌شود و برای این منظور از زمان ماند کف (یا حداکثر ارتفاع کف ایجاد شده) و نیمه عمر کف استفاده شد. نتایج نشان داد، افزایش سرعت ظاهری هوا، افزایش غلظت کلکتور و کف‌ساز در پایداری کف تاثیر مثبتی دارد، به طوری که با افزایش غلظت کف‌ساز از ۶۰ به ۱۴۰ گرم بر لیتر، زمان ماند کف و نیمه عمر کف به ترتیب ۹۲ و ۷۱ درصد افزایش یافت. اندازه ذرات نمونه رفتار متفاوت در تشکیل و فروپاشی کف داشت به طوری که با کاهش اندازه d_{50} ذرات، حداکثر ارتفاع کف افزایش ولی نیمه عمر کف کاهش یافت.

کلمات کلیدی

پایداری کف، سرعت ظاهری هوا، غلظت کلکتور، غلظت کف‌ساز، اندازه ذرات نمونه.

استناد به این مقاله

استادرحیمی، م.، غریبی، خ.، فرخ پی، س.، دهقانی، ع.، استادرحیمی، م. ر.؛ ۱۴۰۱؛ "اندازه‌گیری پایداری کف در سلول فلوتاسیون و بررسی تاثیر عوامل موثر بر آن". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره هفتم، شماره ۲، ص ۱۹۴-۱۷۹.

DOI: 10.30479/JMRE.2021.13213.1473



۱- مقدمه

که در آن:

ϵ_p : ماندگی گاز

α : بازیابی هوا است.

محاسبه زمان ماند کف از رابطه ۲ به دلیل اینکه بازیابی هوا به راحتی قابل اندازه‌گیری نیست مشکل است و می‌توان با دقت کمتری از رابطه ۱ استفاده کرد [۶]. نیمه عمر کف از جمله پارامترهای مهم در تعیین پایداری کف است. نیمه عمر کف عبارت از مدت زمانی که طول می‌کشد ارتفاع کف اولیه پس از قطع هوای ورودی به نصف کاهش یابد و بیانگر مقاومت کف در مقابل فروپاشی است [۶،۳،۱].

بازیابی هوا نسبت هوای خروجی از لبه سلول فلوتاسیون (به عنوان حباب‌های ترکیده نشده) به مقدار هوای ورودی به سلول است. بازیابی هوا در کل کم و مقدار بیش از ۵۰٪ احتمالاً در سلول‌های ستونی نهایی^۶ و مکانیکی کلیتر بسیار پایدار است. در سلول‌های اولیه^۷ و رمق‌گیر^۸ مقدار بازیابی هوا کمتر از ۲۰٪ (و حتی ۵٪) معمولاً مشاهده می‌شود [۷].

عوامل متعددی همچون توزیع اندازه و قدرت هیدروفوبیسته ذرات خوراک، کف سازها، هوادهی و چگالی پالپ و نظایر آن بر پایداری کف موثر است [۱].

تاثیر ذرات بر پایداری کف توسط محققان مختلفی بررسی شده است [۸-۱۳،۴]. از جمله دلایل تاثیر ذرات جامد بر پایداری کف محدود شدن زهکشی مایع و تغییر دادن اختلاف فشار مویرگی بین لاملا^۹ و مرزهای پلاتو^{۱۰} است که به افزایش پایداری کف منجر می‌شود [۱۴]. بر اساس تحقیقات به دست آمده ذرات ریز باعث افزایش پایداری کف شود. به عنوان مثال در تحقیقی که توسط نوری-مک کورماک^{۱۱} [۹] انجام شده مشخص گردید در صورتی که مقدار ذرات خوراک درشت‌تر شود (افزایش d_{50})، بازیابی هوا کاهش یافته و تاثیر منفی بر پایداری کف دارد [۹]. در تحقیق دیگری که ماکای^{۱۲} و همکارانش [۱۵] انجام دادند مشخص گردید، توزیع اندازه ذرات میانی ممکن است باعث افزایش پایداری کف شود [۱۵]. اگر چه در مطالعه لی^{۱۳} و همکارانش [۱۶] پایداری کف برای ذرات ریزتر نسبت به ذرات درشت به دلیل پوشش بیشتر حباب افزایش یافت. همچنین مشخص گردید با افزایش درصد جامد پایداری کف بیشتر می‌شود [۱۶].

در تحقیقات فانگ^{۱۴} و همکارانش [۱۷] مشخص گردید ذرات با خاصیت هیدروفوبیسته مناسب تاثیر قابل توجهی بر پایداری دارد [۱۷]. در صورتی که ذرات بسیار آبرن باشند، از طریق تشکیل پل باعث پاره شدن لایه نازک (فیلم) می‌شوند.

پایداری کف نقش مهمی در تعیین فلوتاسیون انتخابی و بازیابی فلوتاسیون دارد و باید کف پایداری مناسبی داشته باشد. در صورتی که کف پایداری بالایی داشته باشد، علاوه بر مشکلات عملیاتی شرایطی برای راه‌یابی ذرات باطله به کنسانتره را فراهم کرده و باعث کاهش عیار محصول خواهد شد [۱]. پایداری کف را می‌توان بر اساس زمان ماند کف که وابسته به ساختار کف و توزیع اندازه حباب‌ها است بیان [۲] و یا بر اساس زمان از بین رفتن کف به طوری که حباب جدیدی تشکیل نشود، تعریف کرد [۳].

اندازه‌گیری پایداری کف ابتدا برای کف دو فازی انجام گرفت و سپس روابط موجود به کف سه فازی تعمیم داده شد [۱]. حداکثر ارتفاع کف، نیمه عمر کف^۱ و بازیابی هوا مهم‌ترین فاکتورها در پایداری کف است [۴،۳،۱].

پایداری کف معمولاً با آزمایش‌های دینامیکی^۲ و استاتیکی^۳ کف تعیین می‌شود. آزمایش دینامیکی کف با اندازه‌گیری حداکثر ارتفاع کف و آزمایش استاتیکی کف با از بین رفتن کف از طریق جلوگیری از تشکیل کف (قطع هوا) تعیین می‌شود [۱]. پایداری کف به روش دینامیکی نسبت حجم کف به مقدار هوادهی است؛ در صورتی که سطح مقطع در کل سلول یکسان فرض شود، پایداری کف دینامیکی با مدت زمانی که حباب در ناحیه کف باقی می‌ماند^۴ (FRT) برابر است و با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$FRT = \frac{V_f}{Q} = \frac{H_{max}}{J_g} \quad (1)$$

که در آن:

V_f : حجم کف

Q : نرخ جریان حجمی گاز

H_{max} : ارتفاع کل کف

J_g : سرعت ظاهری هوا است.

تعریف دقیق‌تری از زمان ماند کف توسط زنگ^۵ و همکارانش [۵] شده است که در آن حجم کف به بخشی که به وسیله هوا اشغال شده است نسبت داده شده و همچنین با توجه به ترکیب حباب‌ها در سطح تنها بخشی از جریان هوا باعث تشکیل کف می‌شود ارتباط داده شده است [۵]:

$$FRT = \frac{\epsilon_g \cdot H_f}{\alpha \cdot J_g} \quad (2)$$

الف) $2,74 \times 10^{-5} \text{ mM}$ ب) $1,65 \times 10^{-2} \text{ mM}$

شکل ۱: تصاویر مربوط به جدا شدن ذرات با توجه به غلظت عامل سطحی [۱۵]

افزایش Eh ممکن است به دلیل افزایش حضور ذرات گانگ در ناحیه کف عیار و بازیابی را کاهش دهد [۲۳]. افزایش غلظت یون‌ها به ویژه هنگامی که از کلرید کلسیم و آلومینیم استفاده می‌شود، به تجمع ذرات کمک کرده و در نتیجه باعث پایداری کف شود [۲۲].

هدف از انجام این تحقیق بررسی تاثیر پارامترهای عملیاتی بر پایداری کف است. این پارامترها غلظت کف‌ساز، غلظت کلکتور، سرعت ظاهری هوا و اندازه ذرات است که به طور کامل نحوه و شدت تاثیر آن را بر تشکیل و فروپاشی کف بررسی می‌شود.

۲- روش تحقیق

۲-۱- اندازه‌گیری پایداری کف

برای اندازه‌گیری پایداری کف و بررسی تاثیر بعضی از پارامترهای عملیاتی، در مقیاس آزمایشگاهی از ستون پایداری کف استفاده شد، بنابراین با الگوگیری از دستگاه ستون کف زین و همکارانش [۶] و مک فادزین و همکارانش [۲۰] دستگاهی مطابق شکل ۲ ساخته شد تا بتوان پایداری کف را بررسی کرد. مشخصات دستگاه ساخته به صورت زیر است: - ارتفاع دستگاه ۱ متر و قطر داخلی: ۱۱ میلی‌متر

اگر زاویه تماس ذره کمتر از درجه بحرانی ترشوندگی باشد، ذرات به حالت پایدار باقی می‌مانند و در صورتی که زاویه تماس ذره بیشتر از درجه بحرانی ترشوندگی باشد، ذرات به راحتی از طریق هر دو طرف لامل خیس شده و باعث پارگی لایه نازک می‌شوند [۱۱].

بر اساس تحقیقات صورت گرفته نوع و غلظت کف‌ساز بر پایداری کف موثر است. آتا^{۱۵} [۱۸] جدا شدن ذرات را در هنگام به هم پیوستن حباب‌ها بررسی کرد و مشخص شد با افزایش کف‌ساز به دلیل افزایش سطح تماس و کاهش جدا شدن ذرات از حباب‌ها، به هم پیوستن حباب‌ها کاهش یافته و باعث افزایش پایداری کف می‌شود که در شکل ۱ به وضوح مشخص است [۱۸]. در تحقیقی که گوپتا^{۱۶} و همکارانش [۱۹] بر روی کف‌سازهای مختلف انجام دادند مشخص شد کف ساز اثر پلی گلیکول^{۱۷} نسبت به متیل ایزو بوتیل کربونیل^{۱۸} در جلوگیری از به هم پیوستن حباب و افزایش پایداری کف کارآیی بیشتری دارد [۱۹]. همچنین بر اساس تحقیق مک فادزین^{۱۹} که بر روی تاثیر تعدادی کف‌ساز بر بازیابی کف انجام شد، پایداری کف در کف‌سازهای پلی گلیکول نسبت متیل ایزو بوتیل کربونیل بیشتر است. همچنین مخلوط کف‌سازها پایداری کف را افزایش می‌دهد [۲۰]. زمانی که از مخلوط کف‌سازها استفاده می‌شود، هم‌افزایی ایجاد کرده و احتمالاً به دلیل کاهش نیروی دافع بین گروه‌های قطبی (یا یونی) مولکول‌های کف‌ساز از طریق پراکنده شدن مولکول‌های کف‌ساز دیگر باعث استحکام حباب (جذب روی فصل مشترک هوا-آب) می‌شوند [۲۱].

از جمله موارد تاثیرگذار بر پایداری کف می‌توان به غلظت یون هیدروژن (pH)، مقدار اکسیژن محلول^{۲۰} (Do)، پتانسیل اکسایش - کاهش (Eh)، قدرت یونی^{۲۱} (Is) اشاره کرد [۲۲-۲۴]. کاهش pH به دلیل کاهش پتانسیل زتا و در نتیجه افزایش ویسکوزیته ممکن است بر پایداری کف تاثیر مثبت داشته باشد [۲۲]. افزایش Eh به دلیل افزایش حضور ذرات در ناحیه کف، افزایش Is، بازیابی آب را به همراه دارد که این نشان می‌دهد یون‌هایی در سیستم آب وجود دارند که اثر تثبیت کننده کف دارند [۲۴]؛ در تحقیق دیگری افزایش Is به کاهش دنباله‌روی و افزایش پایداری کف منجر شده بود [۲۳]. افزایش بیش از حد Do ممکن است باعث کاهش انتخاب‌پذیری و اثربخشی کلکتور شده و نیز سطح کانی‌های سولفیدی را اکسید کرده و امکان راه‌یابی آنها به فاز کف را کاهش دهد که باعث کاهش پایداری کف می‌شود [۲۳].

مشخص شده است.

$$x = \frac{X - (X_{max} + X_{min})/2}{(X_{max} - X_{min})/2} \quad (3)$$

که در آن:

X: شماره کد

X_{max} : مقدار بالا در آزمایش‌های فاکتوریل (معادل کد +1)

X_{min} : مقدار پایین در آزمایش‌های فاکتوریل (معادل کد -1)

X: مقدار متغیر مستقل است.

لازم به توضیح است که در ابتدا برای هر فاکتور آزمایش‌های متعددی در مقادیر مختلف انجام و بر اساس خروجی‌های به دست آمده برای هر عامل دو سطح فاکتوریل انتخاب و طراحی آزمایش مطابق آن انجام گرفت.

۲-۳- مشخصات نمونه

از کنسانتره سنگ آهن ورودی به سلول‌های فلوتاسیون کارخانه شرکت سنگ آهن گل گهر، نمونه معرف تهیه و مطالعات کانی‌شناسی و دانه‌بندی انجام شد. لازم به ذکر است هدف از فلوتاسیون در این کارخانه کاهش گوگرد کنسانتره سنگ آهن است.

۲-۳-۱- مطالعات کانی‌شناسی

مطالعات XRD و مطالعات میکروسکوپی به روش میکروسکوپ الکترونی روبشی^{۲۷} بر روی نمونه انجام شد. مطالعات نشان داد که کانی اصلی نمونه منیتیت و کانی‌های فرعی به ترتیب هماتیت، پیریت و تالک بود (شکل ۳). همچنین پیریت کانی اصلی حاوی گوگرد بود.

۲-۳-۲- آزمایش دانه‌بندی

آزمایش دانه‌بندی بر روی نمونه معرف با استفاده از سیکلو سائزر^{۲۸} انجام گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده بیشترین مقدار نمونه که ۲۲٪ آن را تشکیل داد دارای ابعاد بین ۳۰ تا ۵۰ میکرون بود؛ همچنین ۵۰٪ و ۸۰٪ نمونه به ترتیب ابعاد کمتر از ۳۶ و ۱۰۰ میکرون داشت (شکل ۴).

۲-۴- مواد شیمیایی مورد استفاده

در آزمایش‌ها از پتاسیم آمیل گزنات^{۲۹} (PAX) و متیل ایزو بوتیل کربینول (MIBC) به ترتیب به عنوان کلکتور و کف‌ساز استفاده شد. یادآوری می‌شود در کارخانه فرآوری

- هوادهی از طریق پمپ هوا با دبی ۵۰ لیتر در دقیقه
- سرعت چرخش همزن ۲۵۰ دور در دقیقه
- حباب‌ساز^{۲۳} از جنس پارچه فیلتر
- قطر حباب‌ساز ۶ سانتی‌متر
- اندازه‌گیری هوای ورودی با روتامتر^{۲۴}
- با استفاده از این دستگاه امکان اندازه‌گیری زمان ماند کف، نیمه عمر کف و رسم نمودار زمان-ارتفاع کف میسر است. همچنین از استوانه‌ای با قطر ۱ سانتی‌متر و ارتفاع ۹ سانتی‌متر برای نمونه‌گیری از کف، استفاده شد.



شکل ۲: دستگاه ستون پایداری کف

۲-۲- طراحی آزمایش

طراحی آزمایش‌ها یکی از مهم‌ترین مباحثی است که امروزه در صنایع مختلف به ویژه فعالیت‌های آزمایشگاهی مطرح می‌شود. طراحی‌ها باعث دستیابی به نتایج مطمئن‌تر، صرفه‌جویی در زمان و کاهش قابل ملاحظه در تعداد آزمایش‌ها شده و در نهایت به بهینه‌سازی فرآیند منجر می‌شود [۲۵]. طراحی آزمایش‌ها بر اساس الگوی طرح مرکب مرکزی چرخشی^{۲۵} و با استفاده از نرم‌افزار طراحی آزمایش نسخه ۲۶۱۰ (DX10) انجام شد.

متغیرهای مستقل یا پارامترهای ورودی برای این تحقیق عبارت شامل غلظت کلکتور، غلظت کف‌ساز، سرعت ظاهری هوا و اندازه ابعاد نمونه (d_{50}) و متغیرهای وابسته یا پاسخ‌ها شامل نیمه عمر کف، حداکثر ارتفاع کف و زمان ماند کف بود. با توجه به رابطه ۳ مقادیر متغیرها به کد تبدیل شد؛ در جدول ۱ مقدار عددی کد با توجه به مقادیر متغیرهای مستقل

جدول ۱: تعداد آزمایش با توجه به تعداد عامل و سطوح در مقیاس آزمایشگاهی

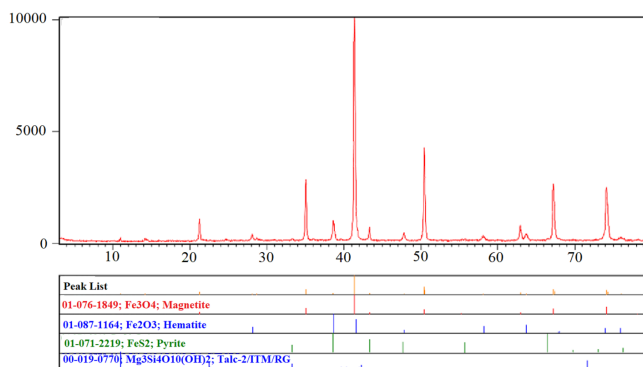
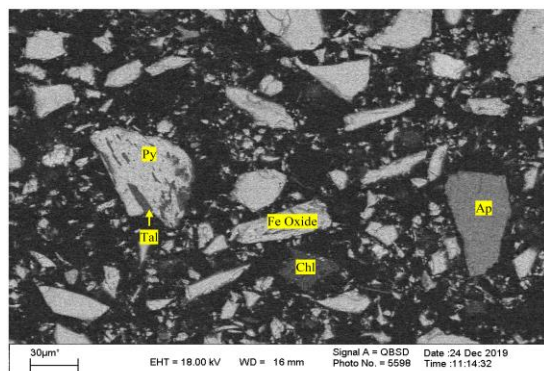
مقدار				کد				شماره الگو	شماره اجرا
d_{50} (μm)	F_C (gr/ton)	C_C (gr/ton)	J_g (cm/s)	d_{50}	کف ساز	کلکتور	J_g		
۲۰	۶۰	۶۰	۱,۳۲	-۱	-۱	-۱	+۱	۲	۱
۶۰	۱۴۰	۶۰	۰,۹۷	+۱	+۱	-۱	-۱	۱۳	۲
۲۰	۱۴۰	۱۴۰	۱,۳۲	-۱	+۱	+۱	+۱	۸	۳
۳۶	۱۸۰	۱۰۰	۱,۱۴	۰	+۲	۰	۰	۲۲	۴
۳۶	۱۰۰	۱۰۰	۱,۱۴	۰	۰	۰	۰	۲۵	۵
۱۵	۱۰۰	۱۰۰	۱,۱۴	-۲	۰	۰	۰	۲۳	۶
۲۰	۶۰	۱۴۰	۱,۳۲	-۱	-۱	+۱	+۱	۴	۷
۶۰	۶۰	۱۴۰	۰,۹۷	+۱	-۱	+۱	-۱	۱۱	۸
۶۰	۶۰	۶۰	۰,۹۷	+۱	-۱	-۱	-۱	۹	۹
۳۶	۱۰۰	۱۰۰	۱,۱۴	۰	۰	۰	۰	۳۰	۱۰
۲۰	۱۴۰	۶۰	۱,۳۲	-۱	+۱	-۱	+۱	۶	۱۱
۲۰	۱۴۰	۱۴۰	۰,۹۷	-۱	+۱	+۱	-۱	۷	۱۲
۳۶	۱۰۰	۲۰	۱,۱۴	۰	۰	-۲	۰	۱۹	۱۳
۳۶	۲۰	۱۰۰	۱,۱۴	۰	-۲	۰	۰	۲۱	۱۴
۶۰	۱۴۰	۱۴۰	۱,۳۲	+۱	+۱	+۱	+۱	۱۶	۱۵
۳۶	۱۰۰	۱۰۰	۱,۱۴	۰	۰	۰	۰	۲۶	۱۶
۶۰	۱۴۰	۶۰	۱,۳۲	+۱	+۱	-۱	+۱	۱۴	۱۷
۳۶	۱۰۰	۱۰۰	۱,۱۴	۰	۰	۰	۰	۲۹	۱۸
۳۶	۱۰۰	۱۰۰	۰,۷۹	۰	۰	۰	-۲	۱۷	۱۹
۳۶	۱۰۰	۱۰۰	۱,۱۴	۰	۰	۰	۰	۲۸	۲۰
۶۰	۶۰	۱۴۰	۱,۳۲	+۱	-۱	+۱	+۱	۱۲	۲۱
۲۰	۶۰	۱۴۰	۰,۹۷	-۱	-۱	+۱	-۱	۳	۲۲
۳۶	۱۰۰	۱۸۰	۱,۱۴	۰	۰	+۲	۰	۲۰	۲۳
۳۶	۱۰۰	۱۰۰	۱,۴۹	۰	۰	۰	+۱	۱۸	۲۴
۳۶	۱۰۰	۱۰۰	۱,۱۴	۰	۰	۰	۰	۲۷	۲۵
۲۰	۶۰	۶۰	۰,۹۷	-۱	-۱	-۱	-۱	۱	۲۶
۸۴	۱۰۰	۱۰۰	۱,۱۴	+۲	۰	۰	۰	۲۴	۲۷
۲۰	۱۴۰	۶۰	۰,۹۷	۰	+۱	-۱	-۱	۵	۲۸
۶۰	۱۴۰	۱۴۰	۰,۹۷	+۱	+۱	+۱	-۱	۱۵	۲۹
۶۰	۶۰	۶۰	۱,۳۲	+۱	-۱	-۱	+۱	۱۰	۳۰
F _C : غلظت کف‌ساز				J _g : سرعت ظاهری هوا					
d ₅₀ : ابعاد ذرات نمونه با توجه به ابعاد سرنده (۵۰٪ عبور کرده)				C _C : غلظت کلکتور					

و معدنی گل گهر انجام شد، سپس نمونه‌های تهیه شده به مدت ۲۴ ساعت در خشک‌کن در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد تا خشک شود. با توجه به اینکه یکی از پارامترها مورد بررسی اندازه ابعاد بود، نیاز بود ابتدا از کیفیت نمونه تعیین شود. آنالیز نمونه‌ها نشان داد ابعاد ذرات نمونه تاثیر چندانی بر عیار گوگرد نداشت (جدول ۲).

شرکت گل گهر از این مواد شیمیایی برای فرآیند فلوتاسیون استفاده می‌شود.

۳- نتایج

نمونه‌برداری از کنسانتره سنگ آهن ورودی به مدار فلوتاسیون گوگردزایی کارخانه هماتیت شرکت صنعتی



الف) مطالعات XRD کانی اصلی منیتیت و کانی سولفوردار پیریت (ب) مطالعات میکروسکوپی اکسیدهای آهن آزاد، درگیری پیریت با سایر کانی‌ها

شکل ۳: مطالعات کانی‌شناسی

۳-۱-۱- تشکیل کف

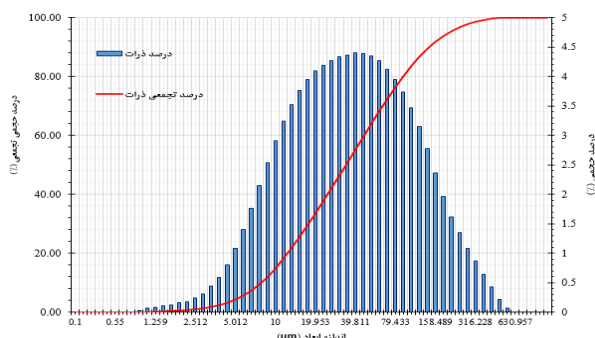
با توجه به نتایج تحلیل واریانس (جدول ۴)، پارامتر بررسی شده در سطح اعتماد ۹۵٪ از لحاظ آماری موثر است. همچنین برهمکنش سرعت ظاهری هوا- غلظت کف‌ساز و غلظت کف‌ساز- d_{50} در سطح اعتماد ۹۵٪ قرار داشت. در شکل ۵ تاثیر عوامل مختلف بر زمان ماند کف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که افزایش سرعت ظاهری گاز، غلظت کلکتور و غلظت کف‌ساز باعث افزایش زمان ماند کف شده در حالی که افزایش اندازه d_{50} نمونه، به کاهش زمان ماند کف منجر می‌شود.

۳-۱-۱-۱- سرعت ظاهری هوا

سرعت ظاهری هوا، ماندگی گاز را افزایش داده [۲۶] و احتمال افزایش تعداد برخوردها و در نتیجه اتصال ذرات جامد- حباب به افزایش حجم ذرات جامد در فاز کف منجر می‌شود [۲۸، ۲۷]. در نتیجه تاثیر مثبت بر تشکیل کف و افزایش پایداری کف دارد. لازم به ذکر است افزایش بیش از حد سرعت ظاهری هوا تشکیل حباب‌های درشت را به همراه دارد که ممکن است حجم ذرات در فاز کف را کاهش دهد [۲۸].

۳-۱-۲- غلظت کلکتور

افزایش حمل حباب به غلظت کلکتور وابسته است [۲۹]؛ هنگامی که کلکتور بیشتر می‌شود به دلیل افزایش اتصال ذرات به حباب مقدار حضور آنها در فاز کف بیشتر می‌شود. اگر چه افزایش بیش از حد کلکتور باعث پدیده خوشه‌ای شدن



شکل ۴: نتایج آزمایش دانه‌بندی بر روی نمونه ورودی به فلو تاسیون

جدول ۲: آنالیز نمونه‌ها با توجه به d_{50} نمونه‌ها

ردیف	d_{50} (µm)	S (%)	Fe (%)	FeO (%)
۱	۱۵	۱٫۲۶	۶۷٫۲۵	۲۳٫۳۴
۲	۲۰	۱٫۲۳	۶۷٫۶۳	۲۳٫۴۶
۳	۳۶	۱٫۲۲	۶۸٫۰۴	۲۳٫۵۹
۴	۶۰	۱٫۱۸	۶۸٫۶۷	۲۳٫۸۴
۵	۸۴	۱٫۱۵	۶۸٫۷۸	۲۳٫۵۳

نتایج مربوط به آزمایش‌ها در شرایط مختلف برای تشکیل کف (زمان ماند کف) و فروپاشی کف (نیمه عمر کف) در جدول ۳ مشخص شده است. با توجه به اینکه زمان ماند کف تابعی از حداکثر ارتفاع کف است، به نظر می‌رسد تاثیر عوامل بر آن شبیه حداکثر ارتفاع باشد بنابراین برای تشکیل کف نتایج زمان ماند کف بررسی خواهد شد.

جدول ۳: نتایج پایداری کف با توجه به شرایط آزمایش

شماره الگو	J_g (Cm/s)	C_c (g/t)	F_c (g/t)	d50 (μ m)	P_c (g/L)	H_{max} (Cm)	FRT (s)	$t_{1/2}$ (s)
۱	۰٫۹۷	۶۰	۶۰	۲۰	۱۷٫۵۷	۵٫۸	۶	۶٫۲
۲	۱٫۳۲	۶۰	۶۰	۲۰	۳۶٫۴۹	۱۳٫۷	۱۰٫۴	۷٫۳
۳	۰٫۹۷	۱۴۰	۶۰	۲۰	۲۲٫۲۰	۸	۸٫۲	۵٫۲
۴	۱٫۳۲	۱۴۰	۶۰	۲۰	۵۲٫۹۸	۱۴	۱۰٫۶	۹٫۸
۵	۰٫۹۷	۶۰	۱۴۰	۲۰	۲۰٫۰۰	۱۳	۱۳٫۴	۱۲
۶	۱٫۳۲	۶۰	۱۴۰	۲۰	۵۱٫۰۵	۳۰	۲۲٫۷	۱۲٫۳
۷	۰٫۹۷	۱۴۰	۱۴۰	۲۰	۳۱٫۸۹	۱۳٫۵	۱۳٫۹	۱۰٫۳
۸	۱٫۳۲	۱۴۰	۱۴۰	۲۰	۹۶٫۰۹	۳۴٫۵	۲۶٫۱	۱۹
۹	۰٫۹۷	۶۰	۶۰	۶۰	۱۳٫۹۳	۴	۴٫۱	۸٫۶
۱۰	۱٫۳۲	۶۰	۶۰	۶۰	۲۵٫۳۴	۱۲	۹٫۱	۱۶٫۹
۱۱	۰٫۹۷	۱۴۰	۶۰	۶۰	۲۵٫۶۸	۷٫۵	۷٫۷	۱۱٫۵
۱۲	۱٫۳۲	۱۴۰	۶۰	۶۰	۴۵٫۸۸	۱۵	۱۱٫۴	۱۷
۱۳	۰٫۹۷	۶۰	۱۴۰	۶۰	۱۶٫۱۷	۱۰٫۵	۱۰٫۸	۱۴٫۵
۱۴	۱٫۳۲	۶۰	۱۴۰	۶۰	۳۸٫۱۶	۲۳٫۵	۱۷٫۸	۱۷٫۵
۱۵	۰٫۹۷	۱۴۰	۱۴۰	۶۰	۲۱٫۰۱	۱۴	۱۴٫۴	۱۵
۱۶	۱٫۳۲	۱۴۰	۱۴۰	۶۰	۷۰٫۹۱	۲۴٫۵	۱۸٫۶	۱۹٫۵
۱۷	۰٫۷۹	۱۰۰	۱۰۰	۳۶	۱۴٫۱۲	۶٫۷	۸٫۵	۳٫۳
۱۸	۱٫۴۹	۱۰۰	۱۰۰	۳۶	۵۹٫۶۲	۳۰٫۵	۲۰٫۵	۱۰٫۵
۱۹	۱٫۱۴	۲۰	۱۰۰	۳۶	۲۴٫۳۹	۷	۶٫۱	۴٫۴
۲۰	۱٫۱۴	۱۸۰	۱۰۰	۳۶	۲۶٫۶۱	۱۵	۱۳٫۲	۱۰٫۴
۲۱	۱٫۱۴	۱۰۰	۲۰	۳۶	۱۹٫۲۵	۵	۴٫۴	۳٫۶
۲۲	۱٫۱۴	۱۰۰	۱۸۰	۳۶	۶۷٫۱۰	۳۰٫۵	۲۶٫۸	۱۲٫۳
۲۳	۱٫۱۴	۱۰۰	۱۰۰	۱۵	۸۴٫۵۷	۳۲٫۵	۲۸٫۵	۱۹٫۷
۲۴	۱٫۱۴	۱۰۰	۱۰۰	۸۴	۳۷٫۵۱	۱۰	۸٫۸	۱۲
۲۵	۱٫۱۴	۱۰۰	۱۰۰	۳۶	۴۷٫۸۹	۱۸٫۳	۱۶	۹٫۷
۲۶	۱٫۱۴	۱۰۰	۱۰۰	۳۶	۵۰٫۹۴	۱۷	۱۴٫۹	۹
۲۷	۱٫۱۴	۱۰۰	۱۰۰	۳۶	۵۲٫۱۱	۱۸	۱۵٫۸	۹٫۵
۲۸	۱٫۱۴	۱۰۰	۱۰۰	۳۶	۵۵٫۵۹	۲۰	۱۷٫۵	۱۲٫۲
۲۹	۱٫۱۴	۱۰۰	۱۰۰	۳۶	۳۸٫۶۳	۱۵٫۵	۱۳٫۶	۸٫۷
۳۰	۱٫۱۴	۱۰۰	۱۰۰	۳۶	۴۴٫۷۳	۱۷٫۴	۱۵٫۳	۹٫۲
P_c : غلظت ذرات جامد در کف				$t_{1/2}$: نیمه عمر کف				
H_{max} : حداکثر ارتفاع کف				FRT: زمان ماند کف				

کلکتور بیش از حد باشد در تشکیل کف تاثیر منفی دارد.

۳-۱-۳- غلظت کف ساز

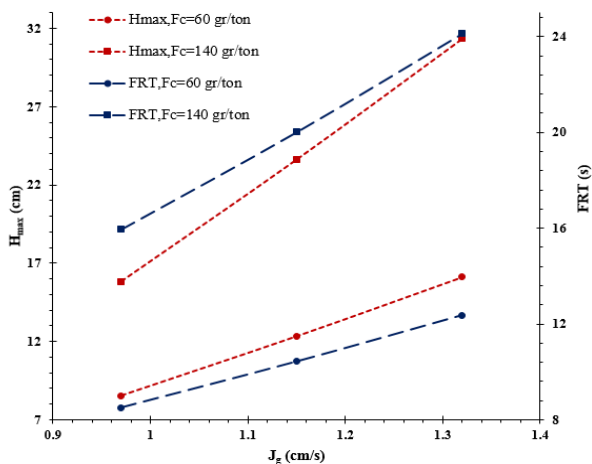
افزایش کف ساز باعث می شود قطر حبابها کاهش یابد [۳۲، ۳۱] و حبابهای با پایداری بیشتر تشکیل دهد؛ همچنین احتمال برخورد و اتصال ذره به حباب افزایش می یابد [۳۳].

حبابها^{۳۰} شده و تاثیر منفی بر ظرفیت حمل حبابها خواهد داشت [۳۰، ۲۹]. پدیده خوشه‌ای شدن، مجموع حبابهایی است که وقتی غلظت کلکتور افزایش می یابد از طریق ذرات هیدروفوب در کنار هم قرار می گیرند. به عبارتی ذرات با هیدروفوبیسته بالا به چند حباب ریز متصل می شوند [۳۰]. بنابراین در شکل ۵ مشاهده می شود هنگامی که غلظت

اندازه حباب منجر می‌شود [۳۴]. دلایل بیان شده نشان می‌دهد کاهش اندازه ذرات باعث افزایش پایداری کف خواهد شد. البته هنگامی که ذرات خیلی ریز باشد احتمال افزایش دنباله‌روی وجود دارد [۳۶،۳۵] و در نتیجه در بی‌ثباتی کف ممکن است موثر باشد. در شکل ۵ مشاهده می‌شود که با افزایش اندازه ذرات زمان ماند کف به شدت کاهش می‌یابد اگر چه هنگامی که ذرات خیلی ریز باشد سرعت افزایش زمان ماند کف کاهش یافته است.

۳-۱-۵- تاثیر متقابل

به نظر می‌رسد سرعت ظاهری هوا با غلظت کف‌ساز برهمکنش دارد به طوری که در تشکیل کف افزایش کف‌ساز تاثیر سرعت ظاهری هوا را مضاعف می‌کند (شکل ۶). برای مثال هنگامی که غلظت کف‌ساز از ۶۰ به ۱۴۰ گرم بر تن افزایش می‌یابد، حداکثر ارتفاع کف در سرعت ظاهری هوا ۰٫۹۷ و ۱٫۳۲ سانتی‌متر بر ثانیه به ترتیب حدود ۷٫۳ و ۱۵٫۲ سانتی‌متر بیشتر شده است. در مورد زمان ماند کف نیز به همین شکل است. افزایش سرعت ظاهری هوا همراه با افزایش کف‌ساز به تشکیل حباب‌های زیاد با پایداری مناسب منجر می‌شود و همچنین افزایش حضور ذرات جامد در کف بیشتر می‌شود که این دو عامل باعث افزایش پایداری کف می‌شود. یکی از نکات قابل توجه زمانی که d_{50} و غلظت کف‌ساز مقدار بیشینه را داشت. حداکثر ارتفاع اولیه با ارتفاع تثبیت شده تفاوت قابل توجهی را نشان داد (شکل ۷). هنگامی که



شکل ۶: برهمکنش سرعت ظاهری هوا (J_g) و غلظت کف‌ساز (F_c) بر تشکیل کف

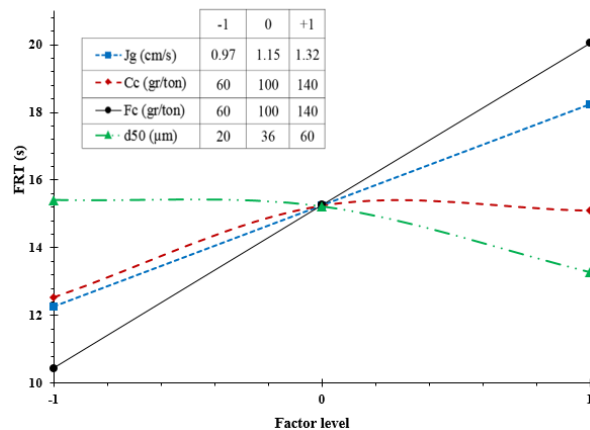
بنابراین ظرفیت حمل حباب و یا به عبارتی مقدار ذراتی که به وسیله حباب‌ها وارد فاز کف می‌شود افزایش خواهد یافت که باعث پایداری کف می‌گردد [۱۸].

۳-۱-۴- اندازه ذرات

کاهش اندازه ذرات امکان افزایش حضور ذرات و در نتیجه افزایش ویسکوزیته را به همراه دارد [۳۱،۱۲،۱۰]؛ و باعث می‌شود زهکشی سیال به تاخیر افتد [۸]. از طرفی کاهش اندازه ذرات به کاهش سرعت به هم پیوستن حباب‌ها و کاهش

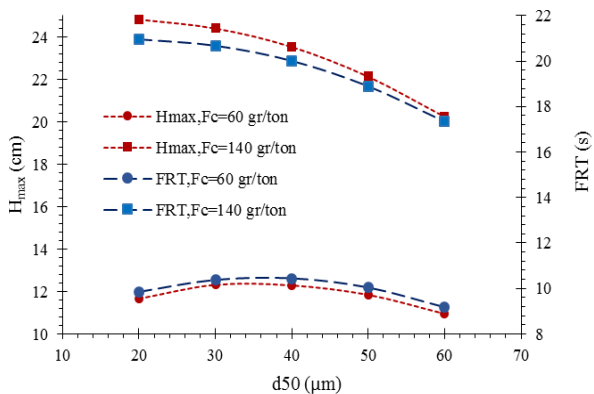
جدول ۴: نتایج تحلیل واریانس بررسی تاثیر پارامترهای موثر بر حداکثر ارتفاع کف

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F Value	p-value
مدل	۱۸۳۷٫۸۷	۸	۲۲۹٫۷۳	۷۶٫۲۳	<۰٫۰۰۰۱
J_g	۷۹۹٫۴۰	۱	۷۹۹٫۴۰	۲۶۵٫۲۵	<۰٫۰۰۰۱
(C_c)	۴۹٫۵۹	۱	۴۹٫۵۹	۱۶٫۴۶	<۰٫۰۰۰۶
(F_c)	۷۵۸٫۷۸	۱	۷۵۸٫۷۸	۲۵۱٫۷۷	<۰٫۰۰۰۱
(d_{50})	۲۹٫۶۰	۱	۲۹٫۶۰	۹٫۸۲	۰٫۰۰۵۲
J_g-C_F	۶۳٫۶۸	۱	۶۳٫۶۸	۲۱٫۱۳	۰٫۰۰۰۲
F_c-d_{50}	۱۵٫۰۲	۱	۱۵٫۰۲	۴٫۹۸	۰٫۰۳۷۲
C_c^2	۸۰٫۱۲	۱	۸۰٫۱۲	۲۶٫۵۹	<۰٫۰۰۰۱
d_{50}^2	۱۹٫۷۳	۱	۱۹٫۷۳	۶٫۵۵	۰٫۰۱۸۷
Residual	۶۰٫۲۷	۲۰	۳٫۰۱		
Lack of Fit	۴۹٫۱۱	۱۵	۳٫۲۷		۰٫۳۵۵۷
Pure Error	۱۱٫۱۶	۵	۲٫۲۳		
Cor Total	۱۸۹۸٫۱۴	۲۸			



شکل ۵: تاثیر عوامل مختلف بر تشکیل کف

مثبت دارد ولی در غلظت پایین عکس آن اتفاق افتاده است. با توجه به اینکه ذرات ریز سطح تماس بیشتری دارند، کف‌ساز بیشتری را جذب و باعث مصرف کف‌ساز در سلول فلوتاسیون می‌شود [۳۴]، بنابراین ممکن است در غلظت کم کف‌ساز، تاثیر منفی بر پایداری کف داشته باشد زیرا غلظت کف‌ساز در محیط به شدت کم می‌شود ولی هنگامی که غلظت کف‌ساز زیاد باشد این مشکل به وجود نیامده و ذرات ریز با افزایش ویسکوزیته به تشکیل کف کمک خواهند کرد.



شکل ۹: برهمکنش اندازه ذرات نمونه (d_{50}) و غلظت کف‌ساز (F_c) بر تشکیل کف

۲-۳- فروپاشی کف

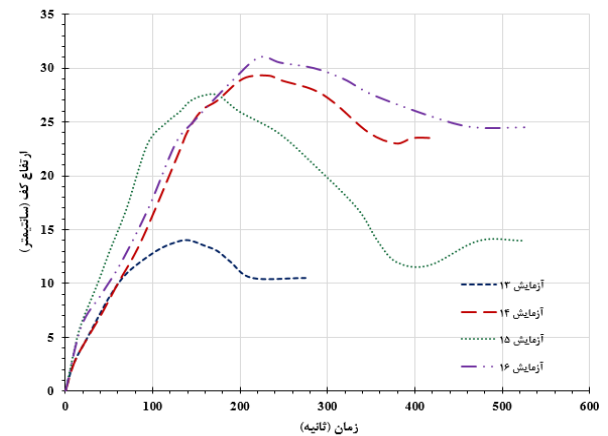
نتایج تحلیل واریانس نشان می‌دهد تاثیر متغیرهای مستقل بررسی شده در سطح اعتماد ۹۵٪ از لحاظ آماری است و از برهمکنش‌ها تنها غلظت کف‌ساز و غلظت کف‌ساز- d_{50} در سطح اعتماد ۹۰٪ قرار دارد (جدول ۵).

شکل ۱۰ نشان می‌دهد، نیمه عمر کف با افزایش سرعت ظاهری هوا، غلظت کلکتور، غلظت کف‌ساز و اندازه d_{50} ذرات افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است تاثیر سرعت ظاهری هوا، غلظت کلکتور و کف‌ساز شبیه تشکیل کف است و با توجه به دلایل یکسانی که دارد از بیان آنها در این بخش صرفنظر می‌شود.

۳-۲-۱- ابعاد ذرات

هنگامی که کف در حال از بین رفتن است، افزایش ذرات ریز فرآیند از بین رفتن کف را تسریع می‌دهد شاید به دلیل حضور مقدار بیشتر آب به همراه ذرات ریز باشد که باعث

کف‌ساز افزایش می‌یابد، قطر ذرات کاهش و در نتیجه تعداد حباب‌ها بیشتر می‌شود از طرفی این احتمال وجود دارد که حباب‌های ریز، توانایی کمتری برای حمل ذرات درشت داشته باشد، بنابراین این بخش از حباب‌ها به دلیل عدم اتصال ذرات به آن یا به عبارتی پایین بودن ظرفیت حمل ممکن است پس از مدتی از بین برود که به کاهش ارتفاع و پدیده رئولوژی^{۳۱} به دلیل حرکت لایه نازک آب منجر شود. در شکل (۸-الف) مشاهده می‌شود که بخش قابل توجهی از حباب‌ها به دلیل پایین بودن ظرفیت حمل به رنگ سفید است.



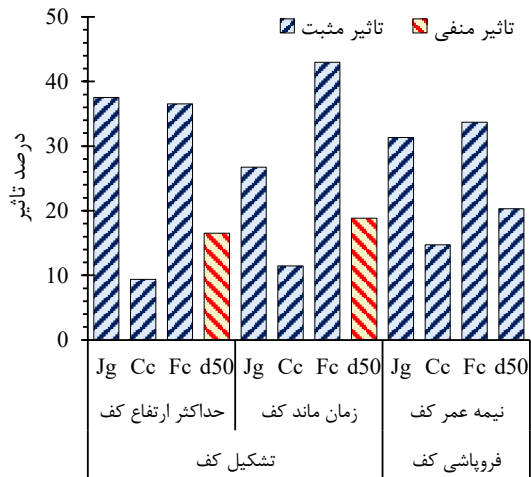
شکل ۷: تغییرات ارتفاع کف در آزمایش‌های ۱۳ الی ۱۶



شکل ۸: رنگ کف در شرایط آزمایش با مقدار d_{50} و کف‌ساز بیشینه

شکل ۹ تاثیر متقابل غلظت کف‌ساز و d_{50} ذرات را بر تشکیل کف (حداکثر ارتفاع و زمان ماند کف) نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود هنگامی که اندازه ذرات خیلی ریز باشد ($d_{50}=20 \mu\text{m}$) رفتار تشکیل کف در غلظت بالا و پایین کف‌ساز متفاوت است. به طوری که در غلظت بالای کف‌ساز ذرات خیلی ریز تاثیر

متفاوت اندازه ذرات بر پایداری کف بود. به طوری که افزایش اندازه ذرات در شکل‌گیری کف تاثیر منفی ولی در افزایش زمان از بین رفتن کف تاثیر مثبت داشت.



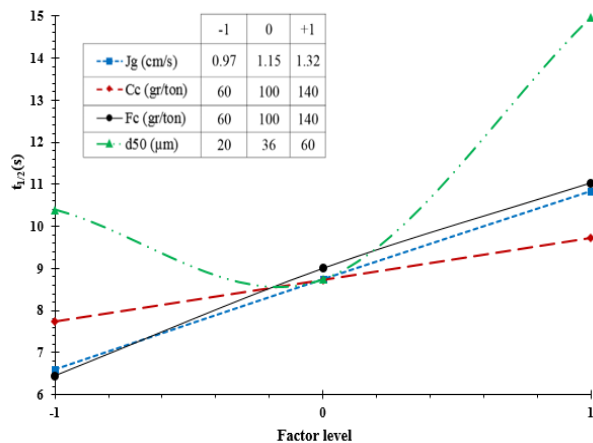
شکل ۱۱: درصد تاثیر افزایش پارامترهای بررسی شده در پایداری کف

۴- نتیجه‌گیری

افزایش سرعت ظاهری هوا، افزایش غلظت کلکتور و کف‌ساز در افزایش تشکیل کف (حداکثر ارتفاع کف و زمان ماند کف) و افزایش زمان فروپاشی کف (نیمه عمر کف) تاثیر مثبتی دارد. در مورد اندازه ذرات نمونه رفتار متفاوت بود. به طوری که ارتفاع کف با کاهش اندازه ذرات (d_{50}) افزایش می‌یابد که این نشان می‌دهد افزایش ذرات ریز به دلیل افزایش ویسکوزیته در شکل‌گیری کف تاثیر مثبت دارد ولی هنگامی که کف در حال از بین رفتن است، افزایش ذرات ریز فرآیند از بین رفتن کف را تسریع می‌دهد شاید به دلیل حضور مقدار بیشتر آب به همراه ذرات ریز باشد که باعث حرکت کف می‌شود. همچنین مقدار سرعت ظاهری هوا و غلظت کف‌ساز بر هم تاثیر دارد، به طوری که در تشکیل کف افزایش کف‌ساز تاثیر سرعت ظاهری هوا را افزایش می‌دهد. برای مثال هنگامی شدت افزایش زمان ماند کف هنگامی که سرعت ظاهری هوا از ۰٫۹۷ و ۱٫۳۲ سانتی‌متر بر ثانیه افزایش می‌یابد در غلظت کف‌ساز ۶۰ و ۱۴۰ گرم بر تن به ترتیب ۴۶ و ۵۱ درصد شد. دلیل آن احتمالاً افزایش حضور ذرات در فاز کف و همچنین مرتبط با تشکیل حباب‌های بیشتر و پایدارتر باشد. حداکثر زمان ماند کف، ارتفاع کف و

جدول ۵: نتایج تحلیل واریانس بررسی تاثیر پارامترهای موثر بر نیمه عمر کف

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F Value	p-value
مدل	۴۶۸٫۳۷	۶	۷۸٫۰۶	۲۴٫۱۹	<۰٫۰۰۰۱
(Jg)	۱۰۵٫۸۰	۱	۱۰۵٫۸۰	۳۲٫۷۹	<۰٫۰۰۰۱
(Cc)	۲۴٫۰۰	۱	۲۴٫۰۰	۷٫۴۴	۰٫۰۱۲۶
(Fc)	۱۲۶٫۰۴	۱	۱۲۶٫۰۴	۳۹٫۰۶	<۰٫۰۰۰۱
(d50)	۸۵٫۳۳	۱	۸۵٫۳۳	۲۶٫۴۴	<۰٫۰۰۰۱
Fc-d50	۹٫۹۲	۱	۹٫۹۲	۳٫۰۷	۰٫۰۹۴۱
d50 ²	۱۰۱٫۴۱	۱	۱۰۱٫۴۱	۳۱٫۴۳	<۰٫۰۰۰۱
Residual	۶۷٫۷۷	۲۱	۳٫۲۳		
Lack of Fit	۵۹٫۷۴	۱۶	۳٫۷۳	۲٫۳۳	۰٫۱۷۸۹
Pure Error	۸٫۰۳	۵	۱٫۶۱		
Cor Total	۵۳۶٫۱۴	۲۷			



شکل ۱۰: تاثیر سرعت ظاهری (J_g) بر نیمه عمر کف ($t_{1/2}$)

حرکت کف می‌شود [۱۲] و وقتی درصد حضور ذرات ریز بسیار زیاد شود به دلیل حضور بیشتر ذرات در فاز کف، مانع از فروپاشی سریع کف می‌شود.

۳-۳- مقایسه تاثیر عوامل در پایداری کف

در شکل ۱۱ شدت تاثیر پارامترها با صرفنظر از تاثیر متقابل آنها در پایداری کف بررسی شده است. مشاهده می‌شود سهم غلظت کف‌ساز در افزایش زمان ماند کف بیش از ۴۰٪ بود. همچنین غلظت کلکتور در تشکیل کف (حداکثر ارتفاع کف و زمان ماند کف) و فروپاشی کف (نیمه عمر کف) در بین عوامل بررسی شده کمترین تاثیر را داشت. از نکات جالب تاثیر

48: 93-120.

- [12] Long Liang, L., Li. Z., Peng, Y., Tan, J., and Xie, G. (2015). "Influence of coal particles on froth stability and flotation performance". Minerals Engineering, 81: 10-96.
- [13] Ata, S., Ahmed, N., and Jameson, G. J. (2004). "The effect of hydrophobicity on the drainage of gangue minerals in flotation froths". Minerals Engineering, 17: 897-901.
- [14] Pugh, R. J. (2005). "Experimental techniques for studying the structure of foams and froths". Advances in Colloid and Interface Science, 114(115): 239-251.
- [15] Mackay, I., Videla, A. R., and Brito-Parada, P. R. (2020). "The link between particle size and froth stability Implications for reprocessing of flotation tailings". Journal of Cleaner Production, 242: 118436.
- [16] Li, Ch., Cao, Y., Peng, W., and Shi., F. (2020). "On the correlation between froth stability and viscosity in flotation". Minerals Engineering, 149: 106269.
- [17] Fang, J., Ge, Y., and Yu, J. (2021). "Effects of particle size and wettability on froth stability in a colophane flotation system". Powder Technology, 379: 576-584.
- [18] Ata, S. (2009). "The detachment of particles from coalescing bubble pairs". Journal of Colloid and Interface Science, 338: 558-565.
- [19] Gupta, A. K., Banerjee, P. K., Mishra, A., Satish, P. (2007). "Effect of alcohol and polyglycol ether frothers on foam stability". International Journal of Mineral Processing, 82: 126-137.
- [20] McFadzean, B., Marozva, T., and Wiese, J. (2015). "Flotation frother mixtures: Decoupling the sub-processes of froth stability, froth recovery and entrainment". Minerals Engineering, 85: 72-79.
- [21] Manoli, S., and Avranas, A. (2013). "Aqueous solutions of the double chain cationic surfactants didodecyl-dimethylammonium bromide and ditetradecyl-dimethylammonium bromide with Pluronic F68: dynamic surface tension measurements". Colloids and Surfaces A, 436: 1060-1068.
- [22] Farrokhpay, S., and Zanin, M. (2012). "An investigation into the effect of water quality on froth stability". Advanced Powder Technology, 23: 493-497.
- [23] Sheni, N., Corin, K., and Wiese, J. (2018). "Considering the effect of pulp chemistry during flotation on froth stability". Minerals Engineering, 116: 15-23.
- [24] Manono, M. S., Corin, K. C., and Wiese, J. G. (2012).

نیمه عمر کف به ترتیب برابر ۲۵٫۱ ثانیه، ۳۲٫۵ سانتی‌متر و ۱۹٫۶ ثانیه شد.

۵- مراجع

- [1] Farrokhpay, S. (2011). "The significance of froth stability in mineral flotation - A review". Advances in Colloid and Interface Science, 166: 1-7.
- [2] Aktas, Z., Cilliers, J. J., and Banford, A. W. (2008). "Dynamic froth stability: Particle size, airflow rate and conditioning time effects". International Journal of Mineral Processing, 87: 65-71.
- [3] Tsatouhas, G., Grano, S., and Vera, M. (2006). "Case studies on the performance and characterisation of the froth phase in industrial flotation circuits". Minerals Engineering, 19: 774-783.
- [4] Barbian, N., Cilliers, J. J., Morar, S. H., and Bradshaw, D. J. (2007). "Froth imaging, air recovery and bubble loading to describe flotation bank performance". International Journal of Mineral Processing, 84: 81-88.
- [5] Zheng, X., Franzidis, J-P., and Johnson, N. W. (2006). "An evaluation of different models of water recovery in flotation". Minerals Engineering, 19: 871-882.
- [6] Zanin, M., Wightman, E., Grano. S. R., and Franzidis, J-P. (2009). "Quantifying contributions to froth stability in porphyry copper plants". International Journal of Mineral Processing, 91: 19-27.
- [7] Gorain, B., Oravainen, H., Allenius, H., Peaker, R., Weber, A., and Traczyk, F. (2009). "Mechanical froth flotation cells". In "Froth flotation, a century of innovation", Edited Fuerstenau, M. C., Jameson, G. J., and Yoon, R.-H., Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, SME, Colorado, 709-710.
- [8] Achaye, I. (2018). "Effect of particle properties on froth stability". Ph.D Thesis, University of Cape Town, South Africa, Cape Town, 59-119.
- [9] Norori-McCormac, A., Brito-Parada, P. R., Hadler, C. K., and Cilliers, J. J. (2017). "The effect of particle size distribution on froth stability in flotation". Separation and Purification Technology, 184: 240-247.
- [10] Cilek, E. C., and Uysal, K. (2018). "Froth stabilization using nanoparticles in mineral flotation". Physicochemical Problems of Mineral Processing, 54(3): 878-889.
- [11] Aveyard, R., Binks, B. P., Fletcher, P. D. I., Peck, T. G., and Rutherford, C. E. (1994). "Aspects of aqueous foam stability in the presence of hydrocarbon oils and solid particles". Advances in Colloid and Interface Science,

- [36] Wang, L., Peng, Y., Runge, K., and Bradshaw, D. (2015). "A review of entrainment: Mechanisms, contributing factors and modelling in flotation". *Minerals Engineering*, 70: 77-91.
- "An investigation into the effect of various ions and their ionic strength on the flotation performance of a platinum bearing ore from the Merensky reef". *Minerals Engineering*, 36-38: 231-236.
- [25] Montgomery, D. (2012). "*Design and analysis of experiments (8th ed.)*". Hoboken, N. J., John Wiley & Sons, Inc.
- [26] Pérez-Garibay, R., Ramirez-Aguilera, N., Bouchard, J., and Rubio, J. (2014). "Froth flotation of sphalerite: Collector concentration, gas dispersion and particle size effects". *Minerals Engineering*, 57: 72-78.
- [27] James noel, L., Prokop, A., and Tanner, R. D. (2002). "Foam fractionation of a dilute solution of bovine lactoferrin". *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 98-100: 395-402.
- [28] Al-Fariss, T. F., El-Aleem, F. A., and El-Nagdy, K. A. (2013). "Beneficiation of Saudi phosphate ores by column flotation technology". *Journal of King Saud University Engineering Sciences*, 25: 113-117.
- [29] Eskanlou, A., Khalesi, M. R., Abdollahy, M., and Hemmati, C. M. (2018). "Interactional effects of bubble size, particle size, and collector dosage on bubble loading in column flotation". *Journal of Mining and Environment*, 9: 107-116.
- [30] Ata, S., and Jameson, G. J. (2005). "The formation of bubble clusters in flotation cells". *International Journal of Mineral Processing*, 76: 123-139.
- [31] Wei, Z., Finch, J. A. (2014). "Effect of solids on pulp and froth properties in flotation". *Journal of Central South University*, 21: 1461-1469.
- [32] Zhu, H., Valdivieso, A. L., Zhu, J., Min, F., Song, Sh., and A-C-Arroyo, M. (2019). "Air dispersion and bubble characteristics in a downflow flotation column". *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 40(3): 224-229.
- [33] Reis, A. S., Reis Filho, A. M., Demuner, L. R., and Barrozo, M. A. S. (2019). "Effect of bubble size on the performance flotation of fine particles of a low-grade Brazilian apatite ore". *Powder Technology*, 356: 884-891.
- [34] Li, Ch., Farrokhpay, S., Runge, K., and Shi, F. (2016). "Determining the significance of flotation variables on froth rheology using a central composite rotatable design". *Powder Technology*, 287: 216-225.
- [35] Cilek, E. C., and Umuka, Y. (2001). "A statistical model for gangue entrainment into froths flotation of supplied ores". *Minerals Engineering*, 14(9): 1055-1066.

- ¹ Half life time
- ² Dynamic tests
- ³ Static tests
- ⁴ Froth retention time (FRT)
- ⁵ Zheng
- ⁶ Cleaner
- ⁷ Rougher
- ⁸ Scavenger
- ⁹ Lamella
- ¹⁰ Plateau borders
- ¹¹ . Norori-McCormac
- ¹² Mackay
- ¹³ Li
- ¹⁴ Fang
- ¹⁵ Ata
- ¹⁶ Gupta
- ¹⁷ Polyglycol ether frother (DF-1012)
- ¹⁸ Methyl isobutyl carbinol (MIBC)
- ¹⁹ McFadzean
- ²⁰ Dissolved oxygen
- ²¹ Ionic strength
- ²² McFadzean et al (2016)
- ²³ Sparger
- ²⁴ Rota meter
- ²⁵ Central composite design (CCD)
- ²⁶ Design Expert10
- ²⁷ Scanning Elecron Microscope (SEM)
- ²⁸ Cyclosizer
- ²⁹ Potassium Amyl Xanthate
- ³⁰ Bubble-clustering phenomenon
- ³¹ Rheology