



Imam Khomeini International University
Vol. 7, No. 2, Summer 2022



نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

Research Paper

Effect of Galvanic Interaction Between Grinding Media and Sulfide Minerals on Grinding and Flotation Efficiency

Massinaei M.^{1*}, Namvar F.²

1- Associate Professor, Dept. of Mining Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
2- M.Sc, Dept. of Mining Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

Received: 06 Oct. 2020

Accepted: 21 Nov. 2020

Abstract: Galvanic interaction between sulphide minerals and grinding media has a pronounced impact on grinding (in terms of wear rate of balls and liners, energy consumption, product size and throughput) and flotation (in terms of surface products formed which affect mineral hydrophobicity) performance. The main objective of the current research study is to investigate the influence of electrochemical control on grinding and flotation performance. Laboratory tests were carried out on a representative sample taken from the Miduk copper concentrator plant feed under controlled electrochemical conditions. Laboratory grinding tests with different grinding media indicated that chromium balls not only resulted in the reduced grinding media wear in the mill, but also led to the improved flotation performance. The mass wear rate of steel balls was found to be 1.68 times of high-chromium balls. This is related to more oxidizing and alkaline conditions with higher oxygen concentrations in the presence of high-chromium balls. Addition of lime in the mill caused more oxidizing conditions (increasing the pulp Eh from 55.91 mV to 189.79 mV) with higher oxygen content (increasing the pulp DO from 2.44 ppm to 6.39 ppm) of the pulp which eventually resulted in higher flotation grade and recovery. Maximum copper recovery was observed when xanthate (Z11) and thionocarbamate (X231) collectors were added to the flotation cell, while the highest selectivity was achieved when the both collectors were fed directly into the mill. The more reducing grinding conditions and lower oxygen content of the pulp was related to oxidation of xanthate to dixanthogen when it was added into the mill.

Keywords: Galvanic interactions, Grinding media, Sulfide minerals, Flotation.

How to cite this article

Massinaei, M., and Namvar, F. (2022). "Effect of galvanic interaction between grinding media and sulfide minerals on grinding and flotation efficiency". Journal of Mineral Resources Engineering, 7(2): 123-138.

DOI: [10.30479/JMRE.2021.14294.1452](https://doi.org/10.30479/JMRE.2021.14294.1452)

*Corresponding Author Email: mmassinaei@birjand.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

Grinding is the most energy-intensive operation in mineral processing plants. It has been estimated that about 50% of the energy consumed in the mineral processing plants is used in comminution [1]. Grinding media is one of the major operating costs in mineral processing plants, which can be up to 50% of the overall grinding costs [2].

Galvanic interactions between the grinding media and mineral particles has a significant influence on the grinding media consumption in the grinding mills. When the galvanic interaction occurs in the grinding mill, electrons are transferred from the anode (i.e. grinding media) to the cathode (i.e. cathodic mineral), resulting in the oxidation (corrosion) of grinding media and the reduction of oxygen according to the following reactions [3]:

Anodic oxidation of grinding media:



Cathodic reduction of oxygen:



Thus, the galvanic interactions in the grinding environment change the pulp potential (Eh), dissolved oxygen content (DO) and pH of pulp which may affect the floatability of sulphide ores and the flotation performance. The corrosion of grinding media can reduce the dissolved oxygen content of pulp. The decrease of dissolved oxygen content can also hinder the successful adsorption of xanthate on the surface of sulfide minerals [4-9]. In this study, the effect of galvanic interactions between grinding media and sulfide minerals on the performance of grinding and flotation processes are investigated.

METHODS

The grinding and flotation tests were conducted on SAG mill feed sample of Miduk copper concentrator.

The SAG mill feed sample was first crushed to -2 mm in a jaw crusher and then further ground in a ball mill to $d_{80}=100\mu\text{m}$. Flotation experiments were conducted with Z11 (sodium isopropyl xanthate) and X231 (trithiocarbamate) as collector and A65 (polyglycol ether) and A70 (polyglycol ether) as frother. The froth samples were collected at 0.5, 2, 5 and 10 min time intervals. The feed, concentrate and tailing samples were filtered and dried and their copper content was determined. The pulp potential, dissolved oxygen level and pH were continuously measured during the grinding and flotation tests. The pulp potential was measured using a Ag/AgCl electrode and reported versus the standard hydrogen electrode (SHE). The effect of grinding media type (chromium and steel balls), lime addition strategy (in the mill and in the flotation cell) and distribution of Z11 and X231 collectors in the mill and in the flotation cell on the galvanic interactions between the grinding media and mineral particles as well as the flotation performance was studied.

FINDING AND ARGUMENT

Effect of grinding media type

The effect of grinding media type on ball wear rate during the grinding process is shown in Figure 1. The wear rate of chromium balls is much lower than steel balls especially in longer times. The results presented in Figure 2 indicate that the flotation performance is highly affected by the grinding media type. Higher copper recovery and concentrate grades were obtained after grinding the sample by the chromium balls. This can be related to more oxidizing conditions and higher oxygen level of pulp during the grinding of copper ore with the chromium balls (Figure 3).

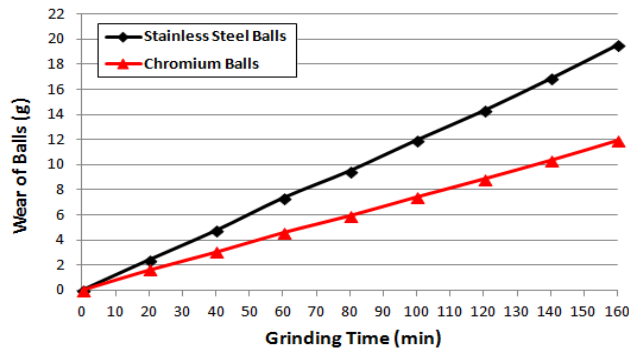


Figure 1. Effect of grinding media type on ball wear rate during grinding process

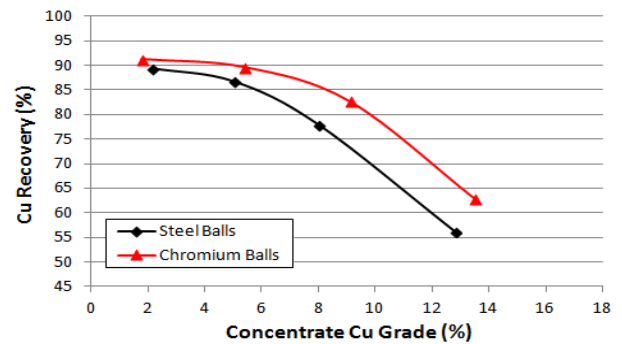


Figure 2. Effect of grinding media type on flotation performance

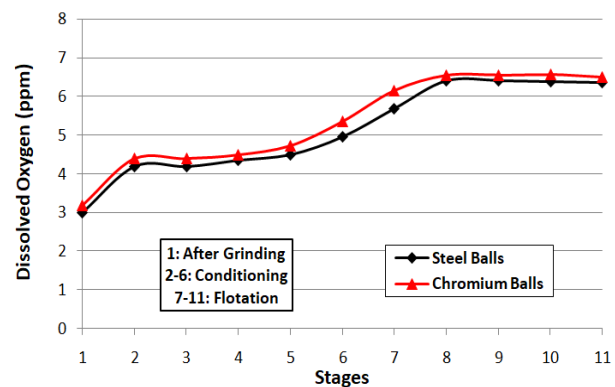
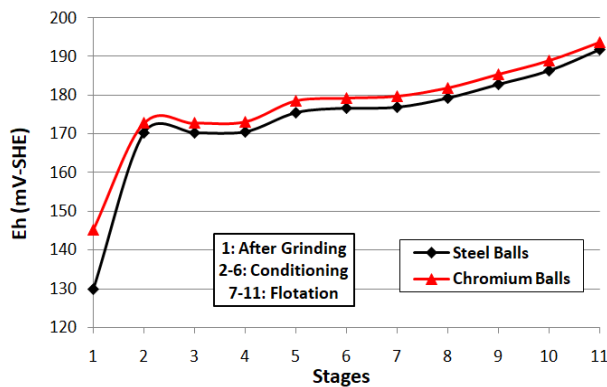


Figure 3. Effect of grinding media type on Eh and DO during grinding and flotation

Effect of lime addition strategy

The effect of lime addition strategy (in the mill and in the flotation cell) on the flotation performance is shown in Figure 4. Lime is a strong depressant for pyrite in flotation of sulfide minerals using xanthate collectors. Interestingly, the copper recovery and concentrate grade were improved substantially when the lime was added directly in the grinding mill to achieve alkaline conditions for the copper flotation. This can be ascribed to the reduced galvanic interactions between sulphide minerals and grinding media in the grinding mill owing to more oxidizing and oxygen-rich environment produced during grinding with lime which promotes the flotation performance (Figure 5).

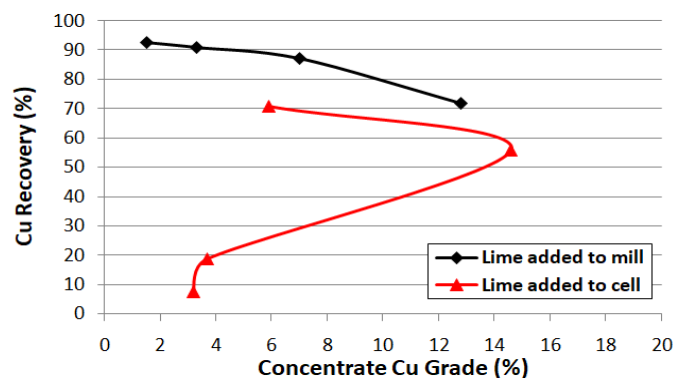


Figure 4. Effect of lime addition strategy on flotation performance

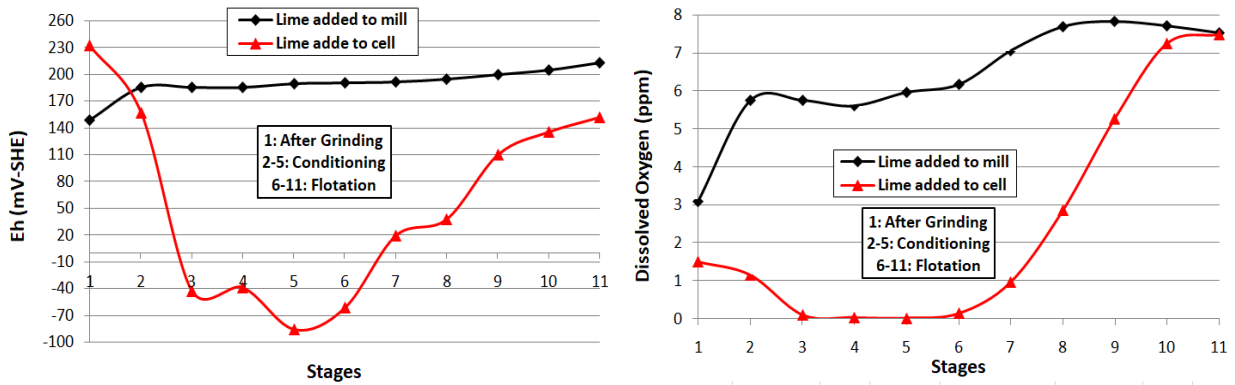


Figure 5. Effect of lime addition strategy on Eh and DO during grinding and flotation

Effect of collector distribution between grinding and flotation

The influence of collector distribution on the flotation performance in terms of the copper recovery and concentrate grade is presented in Figure 6. The variations in the pulp potential and dissolved oxygen content during the grinding and flotation tests are shown in Figure 7. It was found that the higher copper recovery was achieved when Z11 and X231 collectors were added into the flotation cell, while the highest selectivity (now shown) was yielded when the both collectors were fed directly into the mill. The more reducing grinding conditions and lower oxygen content of the pulp was related to oxidation of xanthate to dixanthogen when it was added into the mill.

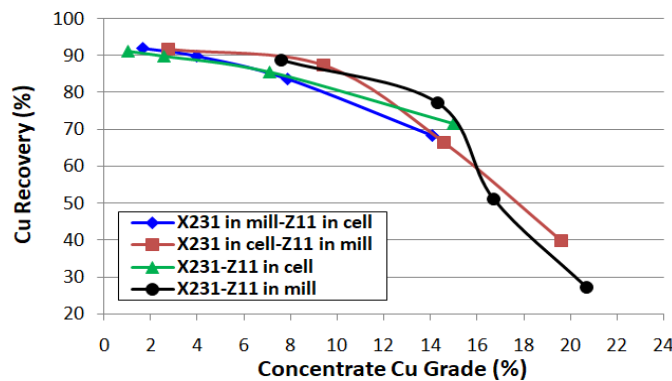


Figure 6. Effect of collector distribution on flotation performance

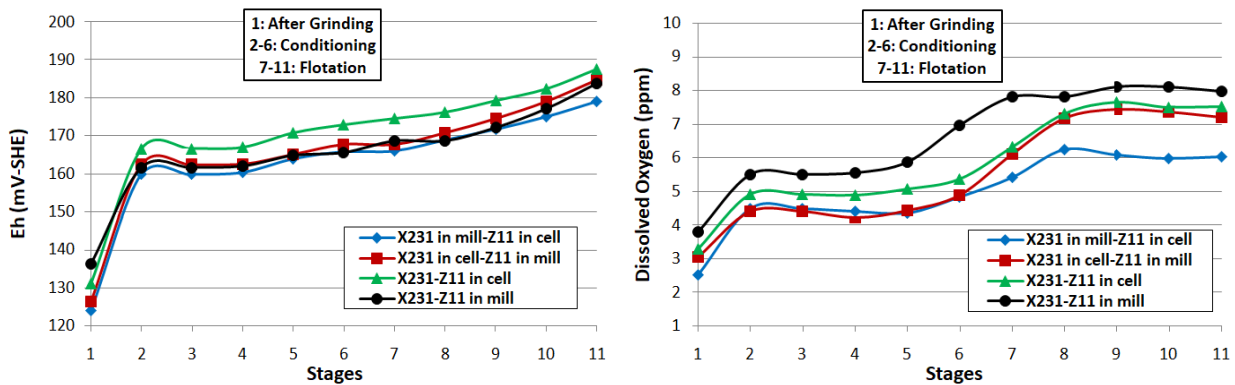


Figure 7. Effect of collector distribution on Eh and DO during grinding and flotation

CONCLUSIONS

The type of grinding media had a strong influence on the ball wear rate and the flotation performance. The wear rate of chromium balls was much lower than steel balls. The flotation performance increased substantially as the chromium balls were added in the grinding mill. Lime added into the mill largely eliminated the galvanic interactions and improved the flotation performance. The optimum copper recovery was obtained when Z11 and X231 collectors were added into the flotation cell, while the highest selectivity was observed when the collectors were fed directly into the mill.

REFERENCES

- [1] Wills, B. A., and Napier-Munn, T. J. (2006). *“Mineral processing technology”*. Elsevier Science & Technology Books.
- [2] Rabieh, A., Albijanic, B., and Eksteen, J. J. (2016). *“A review of the effects of grinding media and chemical conditions on the flotation of pyrite in refractory gold operations”*. Minerals Engineering, 94: 21-28.
- [3] Bruckard, W. J., Sparrow, G. J., and Woodcock, J. T. (2011). *“A review of the effects of the grinding environment on the flotation of copper sulfides”*. International Journal of Mineral Processing, 100(1-2): 1-13.
- [4] Greet, C. J., Small, G. L., Steinier, P., and Grano, S. R. (2004). *“The Magotteaux Mill investigating the effect of grinding media on pulp chemistry and flotation performance”*. Minerals Engineering, 17: 891-896.
- [5] Leppinen, J. O., Kalapudas, R., and Heiskanen, K. (2000). *“Influence of grinding media on the electrochemistry of sulphide ore flotation”*. In: Electrochemistry in Mineral and Metal Processing, Woods, R., and Doyle, F. M. (Eds.), Electrochem. Soc, Pennington, USA, 1-12.
- [6] Peng, Y., and Grano, S. (2010). *“Effect of grinding media on the activation of pyrite flotation”*. Minerals Engineering, 23: 600-605.
- [7] Zanina, M., Lambert, H., and du Plessis, C. A. (2019). *“Lime use and functionality in sulphide mineral flotation: A review”*. Minerals Engineering, 143: 105922.
- [8] Multani, R. S., Williams, H., Johnson, B., Li, R., and Waters, K. E. (2018). *“The effect of superstructure on the zeta potential, xanthate adsorption, and flotation response of pyrrhotite”*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 551: 108-116.
- [9] Yelloji Rao, M. K., and Natarajan, K. A. (1991). *“Factors influencing ball wear and flotation with respect to ore grinding”*. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 7: 137-173.



اثر اندرکنش گالوانیکی بین گلوله و کانی‌های سولفیدی مس بر کارآیی خردایش و شناورسازی

محمد مسینایی^{۱*}، فرشید نامور^۲

۱- دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند

۲- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۰۱

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۵

چکیده

تقابل‌های الکتروشیمیایی به وجود آمده بین کانی‌های سولفیدی و واسطه‌های خردایش تاثیر قابل توجهی بر کارآیی مدارهای خردایش (از نقطه نظر نرخ سایش گلوله‌ها و لاینرها، مصرف انرژی، توزیع دانه‌بندی محصول و ظرفیت مدار) و فلوتاسیون (از نقطه نظر ترکیبات سطحی تشکیل شده موثر در هیدروفوبیسیته ذرات) دارند. هدف از انجام تحقیق حاضر بررسی اثر کنترل الکتروشیمیایی بر کارآیی فرآیندهای خردایش و فلوتاسیون است. آزمون‌های خردایش و فلوتاسیون آزمایشگاهی تحت شرایط کنترل شده الکتروشیمیایی بر روی نمونه معرف گرفته شده از خوراک کارخانه فرآوری مس میدوک انجام شدند. نتایج آزمون‌های تاثیر نوع واسطه خردایش بر نرخ سایش گلوله‌ها و کارآیی فرآیند فلوتاسیون نشان داد که میزان سایش گلوله‌های فولادی ۱/۶۸ برابر گلوله‌های کروم‌دار و کارآیی متالورژیکی فرآیند فلوتاسیون (عیار، بازیابی و انتخاب‌پذیری) نیز در حضور گلوله‌های کروم‌دار به مراتب بیشتر از گلوله‌های فولادی است. افزایش پتانسیل اکسیداسیون-احیاء (Eh)، pH و غلظت اکسیژن محلول (DO) در حضور گلوله‌های کروم‌دار عامل اصلی این تفاوت است. افزودن آهن در ورودی آسیا باعث افزایش Eh (به طور متوسط از ۵۵/۹۱ mV به ۱۸۹/۷۹ mV) و DO (به طور متوسط از ۲/۴۴ ppm به ۶/۳۹ ppm) و در نتیجه بهبود قابل توجه کارآیی متالورژیکی فرآیند فلوتاسیون شد. حداکثر بازیابی مس در فرآیند فلوتاسیون در شرایط افزودن کلکتور گزنتات (Z11) و تیونوکربامات (X231) در سلول فلوتاسیون و حداکثر عیار کنسانتره و انتخاب‌پذیری در شرایط افزودن هر دو کلکتور در آسیا به دست آمد. تغییرات پارامترهای الکتروشیمیایی نشان داد که انتقال کلکتور گزنتات به داخل آسیا باعث کاهش غلظت اکسیژن محیط و احیایی تر شدن پتانسیل پالپ گردید. کاهش غلظت اکسیژن، به دلیل اکسیداسیون گزنتات (به دی‌گزنوژن) و کاهش غلظت آن در محیط است.

کلمات کلیدی

تقابل‌های گالوانیک، واسطه خردایش، کانی‌های سولفیدی، فلوتاسیون.

استناد به این مقاله

احمدی، ف.، آقاجانی، ح.، عابدی، م.؛ ۱۴۰۱؛ "اثر اندرکنش گالوانیکی بین گلوله و کانی‌های سولفیدی مس بر کارآیی خردایش و شناورسازی".
نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره هفتم، شماره ۲، ص ۱۲۳-۱۳۸.

DOI: 10.30479/JMRE.2021.14294.1452



حق مؤلف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

*نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: massinai@birjand.ac.ir

۱- مقدمه

خردایش مهم‌ترین و پرهزینه‌ترین فرآیند در کارخانه‌های فرآوری است. بیش از ۵۰٪ انرژی مصرفی در کارخانه‌های فرآوری در فرآیند آسیابگری مصرف می‌شود. این در حالی است که بخش عمده انرژی در آسیابها به صورت حرارت و صدا هدر رفته و کمتر از ۵٪ از آن، صرف خردایش ذرات می‌شود [۱].

بررسی‌ها نشان داده است که نوع محیط خردایش (گلوله‌ای یا خودشکن) و همچنین جنس واسطه خردایش تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر کارایی فرآیند خردایش (از نقطه نظر نرخ خردایش ذرات، میزان مصرف گلوله و سایش لاینرها) و پرمیارسازی (بازیابی و عیار) دارد. مصرف گلوله از جمله مهم‌ترین هزینه‌های جاری مدار خردایش است [۲-۴].

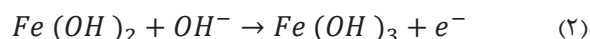
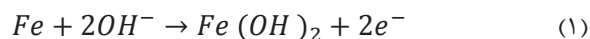
مهم‌ترین مکانیزم‌های مصرف گلوله شامل سایش^۱، برخورد^۲ و خوردگی^۳ است. در حالی که نیروهای مکانیکی عامل سایش و برخورد گلوله‌ها هستند، میزان خوردگی گلوله‌ها تابع غلظت اکسیژن، سختی، یون‌های کلر، کوپریک (Cu²⁺)، سولفور و سولفات و همچنین تقابل‌های گالوانیک موجود در محیط خردایش است [۵].

بررسی‌ها نشان داده است که جدا از هزینه‌های فرآیند خردایش، نوع واسطه خردایش تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر کارایی فرآیند فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی نیز دارد [۶]. علاوه بر نوع واسطه، غلظت مواد شیمیایی، میزان هوادهی، پارامترهای تعلیق گاز، فاکتورهای ماشین، ویژگی‌های کانی‌شناسی ماده معدنی، شیمی آب و استفاده از نیتروزن طی فرآیند خردایش از جمله پارامترهای موثر بر کارایی فرآیند فلوتاسیون اند [۷].

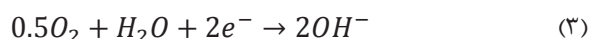
تقابل‌های گالوانیک ترکیبات مختلف، تابع فعالیت الکتروشیمیایی آن‌ها است. معیار فعالیت الکتروشیمیایی یک ماده، پتانسیل استراحت^۴ (E⁰) آن است. پتانسیل استراحت نشان‌دهنده میزان تمایل یک ماده به گرفتن یا از دست دادن الکترون است. مواد با پتانسیل بیشتر (مثبت‌تر) تمایل به گرفتن الکترون یا احیاء شدن و مواد با پتانسیل کمتر (منفی‌تر) تمایل به از دست دادن الکترون و اکسید شدن دارند. فرارگیری کانی‌ها یا فلزات با پتانسیل استراحت مختلف در محلول باعث ایجاد پیل‌های گالوانیک می‌شود. کانی (فلز) با پتانسیل بیشتر در نقش کاتد (گیرنده الکترون) و کانی (فلز) با پتانسیل کمتر (دهنده الکترون) در نقش آند قرار می‌گیرد. میزان انتقال‌های الکترونی در یک واکنش الکتروشیمیایی با پتانسیل اکسیداسیون-احیاء (Eh) کمی می‌شود. با توجه به اینکه امکان

اندازه‌گیری مقدار مطلق Eh فراهم نیست، اختلاف پتانسیل محلول مورد نظر نسبت به یک الکتروود مرجع مانند الکتروود استاندارد هیدروژن (SHE) اندازه‌گیری و گزارش می‌شود [۸]. اختلاف زیاد بین پتانسیل استراحت کانی سولفیدی و واسطه خردایش باعث ایجاد تقابل‌های گالوانیک در فرآیند خردایش می‌شود. در نتیجه تقابل گالوانیک، انتقال الکترون از آند (گلوله) به کاتد (کانی سولفیدی) است. پتانسیل استراحت کمتر واسطه خردایش نسبت به کانی‌های سولفیدی باعث می‌شود که در اثر تقابل گالوانیک، گلوله‌های فولادی به عنوان آند عمل کرده که در سطح آن‌ها اکسیداسیون اتفاق می‌افتد و کانی‌های سولفیدی نقش کاتد را ایفا کرده که احیاء اکسیژن در سطح آن‌ها انجام می‌شود. نتیجه این فرآیند، خوردگی سطح گلوله‌ها، کاهش غلظت اکسیژن در محیط و تشکیل یون هیدروکسید (OH⁻) است [۲].

واکنش اکسیداسیون آندی گلوله‌ها:



واکنش احیاء کاتدی اکسیژن در سطح کانی سولفیدی:



هیدروکسید آهن ایجاد شده از واکنش‌های ۱ و ۲ بر روی سطح کانی‌های سولفیدی رسوب و سطح آن‌ها را آبدوست می‌کند و در نتیجه فلوتاسیون آن‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد، بنابراین جلوگیری از تشکیل این گونه هیدروکسیدهای آهن بر روی کانی‌های سولفیدی اثر مثبتی بر نتیجه فلوتاسیون آن‌ها دارد. با این حال با تغییر واسطه خردایش از گلوله‌های فولادی به گلوله‌های کروم‌دار نرخ خوردگی به طور چشمگیری کاهش می‌یابد و کاهش نرخ خوردگی باعث کاهش محصول خوردگی می‌شود که تاثیر مثبتی بر فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی دارد [۹-۱۱، ۳].

۲- روش تحقیق

در ابتدا نمونه معرفی به وزن ۱۰۰ کیلوگرم از نوار نقاله خوراک ورودی کارخانه فرآوری مس میدوک گرفته شد. نمونه مورد نظر در یک سنگ‌شکن فکی آزمایشگاهی مدار بسته با یک سرند کنترلی ۲ mm تحت فرآیند خردایش قرار گرفت تا تمامی ذرات به ابعاد ریزتر از ۲ mm برسند. از نمونه کلی

کفگیری کنسانتره در زمان‌های ۰/۵، ۲، ۵ و ۱۰ دقیقه انجام شد. نمونه‌های خوراک، کنسانتره و باطله حاصل از هر آزمایش پس از خشک شدن و توزین برای آنالیز مس، مس اکسیدی و آهن به آزمایشگاه شیمی ارسال و پارامترهای الکتروشیمیایی شامل پتانسیل اکسیداسیون-احیاء (Eh) و غلظت اکسیژن محلول (DO) و pH طی فرآیندهای خریداری و فلوتاسیون به طور پیوسته به وسیله سنسورهای مربوطه اندازه‌گیری شدند. پتانسیل اکسیداسیون-احیاء پالپ با الکترود کلرید نقره (Ag/AgCl) اندازه‌گیری و با افزودن ۲۲۲/۳ میلی‌ولت بر اساس الکترود استاندارد هیدروژن (SHE) گزارش شد. پتانسیل اکسیداسیون-احیاء (V) پالپ به وسیله Eh متر مدل 8651AZ، غلظت اکسیژن محلول (ppm) با الکترود اکسیژن متر مدل 8403AZ و pH پالپ به وسیله الکترود pH متر مدل Metrohm 827 اندازه‌گیری شد.

در آزمایش‌های بررسی اثر نوع واسطه خریداری بر نرخ سایش گلوله‌ها و کارآیی فرآیند فلوتاسیون، از دو نوع گلوله یکی فولادی (گلوله‌هایی که در شرایط فعلی در کارخانه استفاده می‌شوند) و دیگری کروم‌دار استفاده شد. ابعاد گلوله‌های استفاده شده در آسیای گلوله‌ای ۲۰، ۲۵ و ۳۰ میلی‌متر بودند. مشخصات شیمیایی و مکانیکی گلوله‌های فولادی و کروم‌دار مصرفی در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

کارآیی گلوله‌های فولادی و کروم‌دار از نقطه‌نظر نرخ سایش (در فرآیند خریداری) و همچنین تاثیر آنها بر کارآیی فرآیند فلوتاسیون در آزمایش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

پس از اختلاط و همگن‌سازی، زیرنمونه‌هایی به وزن ۱۵۲۵ گرم برای آزمون‌های خریداری و فلوتاسیون تهیه شدند. از نمونه کلی همچنین نمونه‌های معرفی برای تجزیه شیمیایی و کانی‌شناسی گرفته شدند. آنالیز مس و آهن نمونه‌ها به روش جذب اتمی و آنالیز کانی‌شناسی به وسیله میکروسکوپ نوری انجام شد. درجه آزادی کانی‌ها با مطالعه میکروسکوپی مقاطع صیقلی به روش شمارش خطی ذرات^۵ با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر تعیین شد.

برای تعیین زمان بهینه خریداری نمونه برای رسیدن به $d_{80}=100\mu m$ (مشابه دانه‌بندی خوراک مدار فلوتاسیون)، آزمون‌های خریداری در داخل آسیای گلوله‌ای آزمایشگاهی متسوه با درصد جامد پالپ ۵۰٪ در زمان‌های مختلف انجام شدند. زمان بهینه خریداری ۱۳ دقیقه تعیین شد.

آزمایش‌های فلوتاسیون در یک سلول فلوتاسیون ۵ لیتری با سرعت اختلاط ۱۱۰۰ دور بر دقیقه و درصد جامد پالپ ۲۸٪ انجام شدند. در اغلب آزمایش‌ها (به جز آزمایش بررسی تاثیر محل افزودن آهک) تنظیم pH پالپ با افزودن آهک در ورودی آسیا انجام شد. پالپ فلوتاسیون با مواد شیمیایی زیر به مدت زمان ۲ دقیقه آماده‌سازی و سپس شیر هوادهی برای آغاز فرآیند شناورسازی باز شد.

Z11 (کلکتور: سدیم ایزوپروپیل زنتات): ۲۰ گرم بر تن
X231 (کلکتور: تیونوکربامات): ۲۰ گرم بر تن
A65 (کفساز: پلی‌گلیکول اتر): ۱۵ گرم بر تن
A70 (کفساز: پلی‌گلیکول اتر): ۱۵ گرم بر تن

جدول ۱: مشخصات گلوله‌های فولادی

اندازه گلوله (mm)	Cr (%)	Fe (%)	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Mo (%)	Ni (%)	Cu (%)	سختی (HRC)
۲۰	۰/۴۱۹	<۹۴/۹	۳/۰۲	۰/۶۲۸	۰/۵۸۳	۰/۰۲۹۵	۰/۰۸۲۸	۰/۰۸۷۹	۰/۰۹۲۳	۰/۱۱۵	۵۳-۵۵
۲۵	۰/۵۱۷	<۹۴/۴۲	۳/۴۳	۰/۶۵۷	۰/۵۱۵	۰/۰۳۱۲	۰/۰۸۱۷	۰/۰۸۰۷	۰/۰۹۳۴	۰/۲۷۴	۵۵-۵۶
۳۰	۰/۵۳۸	<۹۴/۶	۳/۱۹	۰/۶۵۷	۰/۳۱۱	۰/۰۳۲۶	۰/۰۸۵۳	۰/۱۲۲	۰/۳۵	۰/۰۷۷۹	۵۹-۶۰

جدول ۲: مشخصات گلوله‌های کروم‌دار

اندازه گلوله (mm)	Cr (%)	Fe (%)	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Mo (%)	Ni (%)	Cu (%)	سختی (HRC)
۲۰	۱۰/۳۳	<۸۴/۹۲	۳/۰۵	۰/۶۴۴	۰/۴۷۳	۰/۰۱۹۳	۰/۰۸۷۷	۰/۱۰۱	۰/۱۸۷	۰/۱۸۹	۵۸-۶۰
۲۵	۱۱/۰۵	<۸۳/۹۶	۳/۲۹	۰/۴۹۷	۰/۵۱۴	۰/۰۱۰۶	۰/۰۹۳	۰/۰۷۷۶	۰/۳۶۴	۰/۱۵	۵۸-۶۰
۳۰	۱۲/۶۷	<۸۲/۳۸	۲/۸۹	۰/۶۵۳	۰/۶۰۷	۰/۰۱۶۴	۰/۰۸۸۹	۰/۱۱۸	۰/۲۹۴	۰/۲۸۴	۶۰-۶۴

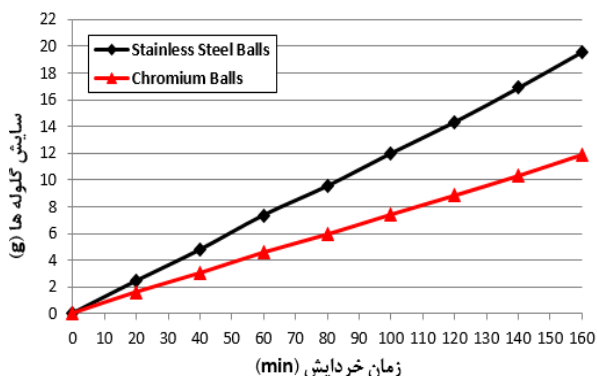
۳-۲- اثر نوع واسطه بر نرخ سایش گلوله‌ها و کارایی فلوتاسیون

شکل ۱ تغییرات میزان سایش گلوله‌های فولادی و کروم‌دار در فرآیند خردایش در بازه زمان را نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری میزان سایش گلوله‌ها، تغییر وزن آن‌ها نسبت به وزن اولیه در زمان‌های مختلف خردایش به طور دقیق اندازه‌گیری شد. شایان ذکر است که وزن اولیه گلوله‌های فولادی و کروم‌دار به ترتیب ۱۱۳۴۵/۱۱ و ۱۲۳۸۴/۹۸ گرم بود که بعد از ۱۶۰ دقیقه خردایش به ترتیب به ۱۱۳۲۵/۵۳ و ۱۲۳۷۳/۰۸ گرم کاهش یافت. مطابق نتایج ارایه شده، میزان سایش گلوله‌های کروم‌دار بسیار کمتر از گلوله‌های فولادی است و با افزایش زمان خردایش این اختلاف بیشتر می‌شود. میزان سایش گلوله‌های فولادی ۱/۶۸ برابر گلوله‌های کروم‌دار بوده است. سختی بیش‌تر گلوله‌های کروم‌دار در مقایسه با گلوله‌های فولادی ممکن است یکی از دلایل سایش کمتر این گلوله‌ها در محیط خردایش باشد.

تقابل‌های الکتروشیمیایی (گالوانیک) بین واسطه خردایش و ماده معدنی در محیط آسیا نیز از جمله عوامل موثر بر نرخ

جدول ۳: شرایط انجام آزمایش‌های توزیع کلکتور

آزمایش	محل تزریق کلکتور	
	X231	Z11
۱	ورودی آسیا	ورودی فلوتاسیون
۲	ورودی فلوتاسیون	ورودی آسیا
۳	ورودی فلوتاسیون	ورودی فلوتاسیون
۴	ورودی آسیا	ورودی آسیا



شکل ۱: تغییرات میزان سایش گلوله‌های فولادی و کروم‌دار در فرآیند خردایش در بازه زمان

شرایط انجام آزمایش‌های خردایش و فلوتاسیون در حضور هر دو نوع گلوله مصرفی کاملاً یکسان در نظر گرفته شد. برای تعیین نرخ سایش گلوله‌های فولادی و کروم‌دار، مقدار کاهش وزن آنها در زمان‌های مختلف خردایش با یک ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم (دو رقم اعشار) اندازه‌گیری شد. آزمایش‌های نرخ سایش چندین بار تکرار شد تا از صحت نتایج به دست آمده اطمینان حاصل شود. همچنین برای مقایسه نرخ سایش واسطه‌های خردایش، از آنالیز غلظت آهن محلول در پالپ خردایش (به عنوان یکی از شاخص‌های نشان‌دهنده میزان اکسیداسیون گلوله‌ها) در حضور گلوله‌های فولادی و کروم‌دار نیز استفاده شد. به گونه‌ای که پس از خردایش با هر نوع واسطه، پالپ حاصل سریعاً برای آنالیز آهن موجود در محلول به آزمایشگاه شیمی ارسال و با توجه میزان آهن موجود در هر محلول، میزان سایش واسطه‌های خردایش مقایسه شد.

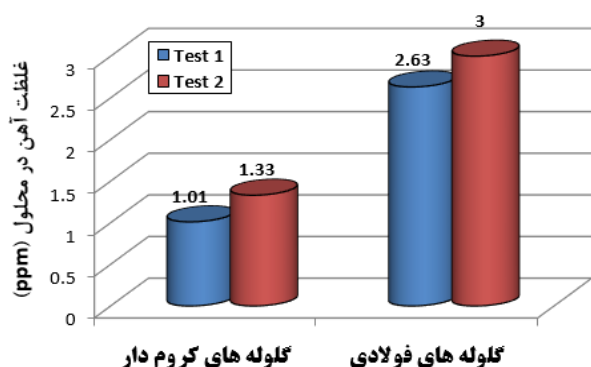
برای بررسی اثر محل افزودن آهک بر کارایی فرآیند فلوتاسیون، دو آزمایش انجام شد. در آزمایش اول، آهک به طور کامل در ورودی آسیا اضافه و فلوتاسیون با $pH=11.5$ انجام شد. در آزمایش دوم، آهک به طور کامل در ورودی فلوتاسیون به سیستم اضافه شده و در این شرایط نیز شناورسازی ذرات در $pH=11.5$ انجام شد.

تأثیر نحوه توزیع کلکتور (در ورودی آسیا و ورودی فلوتاسیون) بر کارایی فرآیند فلوتاسیون و ارتباط آن با شاخص‌های الکتروشیمیایی نیز مورد بررسی قرار گرفت. در این آزمایش‌ها تنها محل تزریق کلکتورها متغیر و بقیه پارامترها ثابت در نظر گرفته شد. شرایط انجام آزمایش‌های توزیع کلکتور در جدول ۳ لیست شده است.

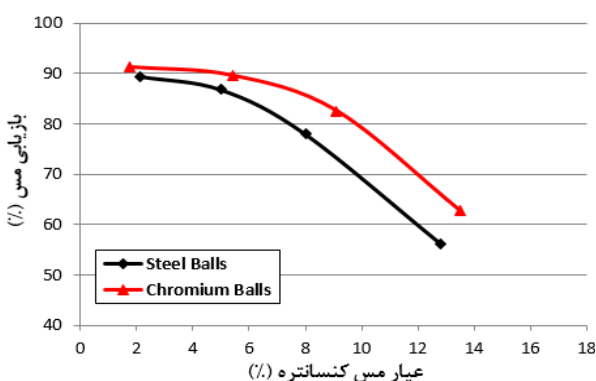
۳- نتایج و بحث

۳-۱- تجزیه شیمیایی و کانی‌شناسی نمونه

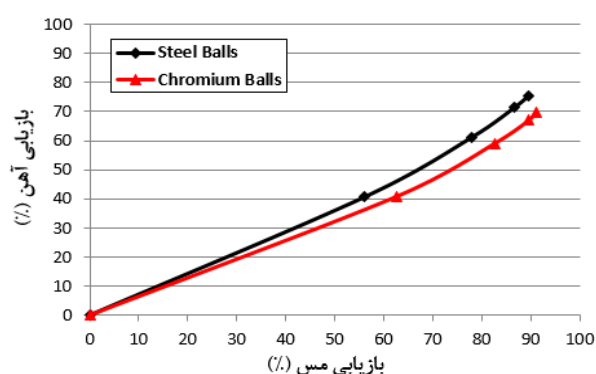
تجزیه شیمیایی نشان داد که متوسط عیار مس، مس اکسیدی و آهن نمونه به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۱۳ و ۳/۴٪ است. آنالیز کانی‌شناسی نشان داد که کانی‌های عمده مس در نمونه مورد نظر به ترتیب کالکوسیت (با عیار ۰/۸۱٪)، کالکوپیریت (با عیار ۰/۳۲٪) و کوولیت (با عیار ۰/۱۴٪) هستند. پیریت با عیار متوسط ۶/۸۲٪ عمده‌ترین باطله سولفیدی است. درجه آزادی کالکوپیریت ۹۴/۴۹٪، کوولیت ۹۴/۱۲٪، کالکوسیت ۴۹/۷۹٪ و پیریت ۶۵/۱۱٪ تعیین شد.



شکل ۲: تغییرات غلظت آهن محلول در پالپ خردایش گلوله‌های فولادی و کروم‌دار در ۱۰ دقیقه



شکل ۳: تغییرات عیار و بازیابی مس فلوتاسیون نمونه‌های خرد شده با گلوله‌های فولادی و کروم‌دار



شکل ۴: تغییرات بازیابی مس و آهن فلوتاسیون نمونه‌های خرد شده با گلوله‌های فولادی و کروم‌دار

سایش گلوله‌ها، ویژگی‌های سطحی ماده معدنی و در نتیجه شناورسازی آن در فرآیند فلوتاسیون است. در نتیجه تقابل محیط خردایش و کانی‌های سولفیدی، گلوله و یا بار خردکننده آسیا به دلیل پتانسیل استراحت کمتر در نقش آند و کانی سولفیدی به دلیل پتانسیل بیشتر در نقش کاتد، ایفای نقش خواهند کرد. در سطح آند اکسیداسیون و در سطح کاتد احیاء اکسیژن رخ خواهد داد (واکنش‌های ۱ تا ۳).

برای بررسی اثرات الکتروشیمیایی بر کارآیی فرآیند در حضور گلوله‌های مختلف، غلظت آهن در محلول (طی خردایش) و همچنین شاخص‌های الکتروشیمیایی (حین فرآیند خردایش و فلوتاسیون) اندازه‌گیری و ثبت شدند.

تغییرات غلظت آهن محلول در پالپ خردایش (به عنوان یکی از شاخص‌های نشان‌دهنده میزان اکسیداسیون گلوله‌ها) در حضور گلوله‌های فولادی و کروم‌دار در دو آزمایش تکراری در شکل ۲ نشان داده شده است. شایان ذکر است که pH پالپ حین انجام این آزمایش ۱۱٫۸-۱۱٫۹ بود. مطابق نتایج، غلظت آهن محلول در حضور گلوله‌های فولادی در حدود ۲٫۵ برابر گلوله‌های کروم‌دار است که این خود نشان‌دهنده نرخ سایش و اکسیداسیون بیشتر این گلوله‌ها است. با توجه به اینکه احتمال اکسیداسیون کانی‌های سولفیدی آهن‌دار مانند کالکوپیریت و پیریت در این شرایط بسیار ضعیف است، بنابراین می‌توان گفت که آهن موجود در محلول عمدتاً در نتیجه اکسیداسیون واسطه‌های خردایش (گلوله‌های فولادی و کروم‌دار) است.

تغییرات عیار و بازیابی مس فلوتاسیون نمونه‌های خرد شده با گلوله‌های فولادی و کروم‌دار در شکل ۳ نشان داده شده است. تغییرات بازیابی آهن بر حسب بازیابی مس به عنوان شاخص انتخاب‌پذیری فرآیند فلوتاسیون نیز در شکل ۴ ارایه شده است. نتایج نشان می‌دهند که کارآیی متالورژیکی فرآیند فلوتاسیون در حضور گلوله‌های کروم‌دار به مراتب بهتر از گلوله‌های فولادی است. شیب کمتر نمودار تغییرات بازیابی آهن بر حسب بازیابی مس در حضور گلوله‌های کروم‌دار نشان‌دهنده بازیابی کمتر آهن و یا به عبارتی انتخاب‌پذیری بیشتر فرآیند در این شرایط است.

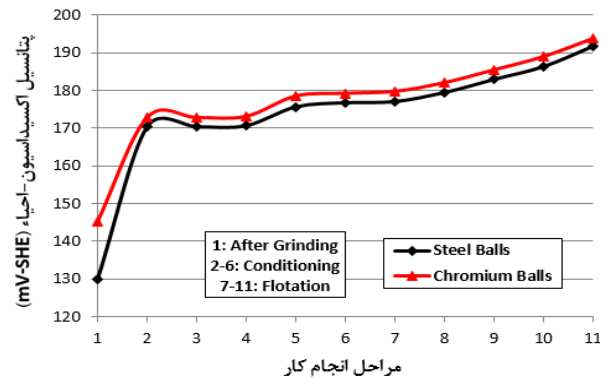
تغییرات Eh، DO و pH پالپ حین فرآیند خردایش و فلوتاسیون در حضور گلوله‌های کروم‌دار و فولادی در شکل‌های ۵ تا ۷ نشان داده شده است. پارامترهای الکتروشیمیایی بعد از خردایش (مرحله ۱)، طی آماده‌سازی فلوتاسیون (مراحل ۲-۶) و حین فلوتاسیون (مراحل ۷-۱۱) اندازه‌گیری شدند.

بر طبق نتایج ارائه شده، پتانسیل اکسیداسیون-احیاء محیط طی فرآیند خردایش و فلوتاسیون در حضور گلوله‌های کروم‌دار بیشتر از گلوله‌های فولادی است. غلظت کمتر اکسیژن موجود در محلول در حضور گلوله‌های فولادی، به دلیل مصرف آن حین فرآیند خردایش (به واسطه احیاء کاتدی اکسیژن به یون هیدروکسید) است. کافی نبودن غلظت اکسیژن محلول در حضور گلوله‌های فولادی باعث می‌شود تا الکترون‌های تولید شده در اثر فرآیند اکسیداسیون و خوردگی گلوله‌ها مصرف نشده و بنابراین پتانسیل اکسیداسیون-احیاء محیط کاهش یابد. شایان ذکر است که پتانسیل استراحت^۷ کانی‌های پیریت، کالکوپیریت و گلوله‌های فولادی در محیط هوا به ترتیب ۰٫۳۹۲، ۰٫۳۵۵ و -۰٫۳۳۵ میلی‌ولت است [۲].

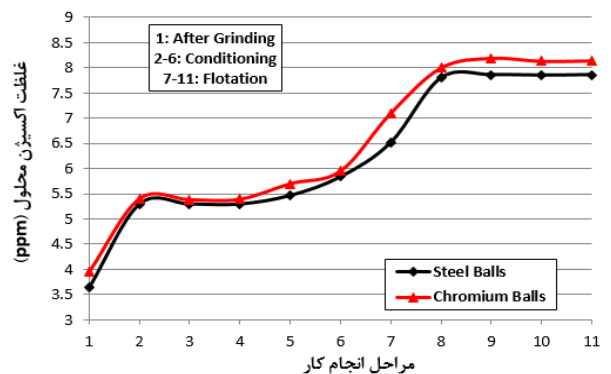
کاهش پتانسیل اکسیداسیون-احیاء محیط در حضور گلوله‌های فولادی همچنین ممکن است شرایط احیاء Cu^{2+} به Cu^+ ، فعال‌سازی سطح ذرات پیریت و در نتیجه کاهش کارایی متالورژیکی فرآیند فلوتاسیون را نیز فراهم سازد [۱۲]. همچنین دافعه الکتروستاتیکی بین ذرات پیریت فعال شده و گونه‌های هیدروکسید آهن (به دلیل بار منفی مشابه)، از جذب این گونه‌ها بر روی سطح ذرات پیریت و بازداشت آن جلوگیری می‌کند [۲].

بالتر بودن pH پالپ خردایش و فلوتاسیون در حضور گلوله‌های کروم‌دار نسبت به گلوله‌های فولادی در ارتباط با غلظت بیشتر اکسیژن محلول در این شرایط بوده که (طبق واکنش احیاء کاتدی اکسیژن) باعث تولید یون‌های هیدروکسید بیشتر و در نتیجه افزایش بیشتر pH محیط می‌شود. به همین دلیل افزایش pH پالپ روشی برای کاهش اثرات گالوانیک بین کانی‌های سولفیدی (به ویژه پیریت) و گلوله‌های فولادی در محیط خردایش است. افزایش pH همچنین به دلیل تشکیل هیدروکسید آهن فریک $\text{Fe}(\text{OH})_3$ بر روی سطح ذرات پیریت باعث بازداشت آن می‌شود [۸].

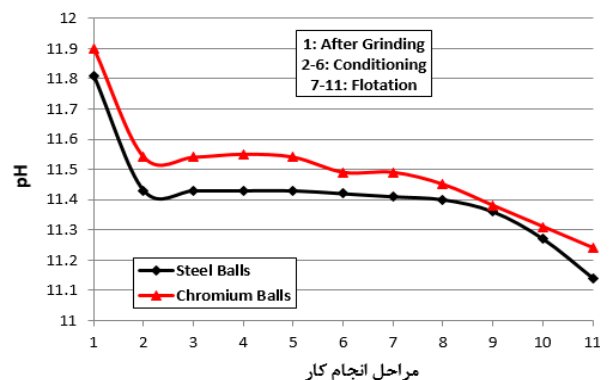
به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که سایش کمتر گلوله‌های کروم‌دار در مقایسه با گلوله‌های فولادی به واسطه سختی بیشتر این گلوله‌ها و کاهش تقابل‌های گالوانیک بین واسطه خردایش و ماده معدنی در حضور این نوع گلوله بوده که شرایط کاهش نرخ اکسیداسیون و سایش این گلوله‌ها را فراهم می‌سازد. نتایج این بخش از پژوهش با سایر تحقیقات مشابه انجام شده در این زمینه مطابقت دارد [۱۲، ۹، ۶، ۴، ۱].



شکل ۵: تغییرات Eh پالپ نمونه‌های خرد شده با گلوله‌های فولادی و کروم‌دار طی خردایش و فلوتاسیون

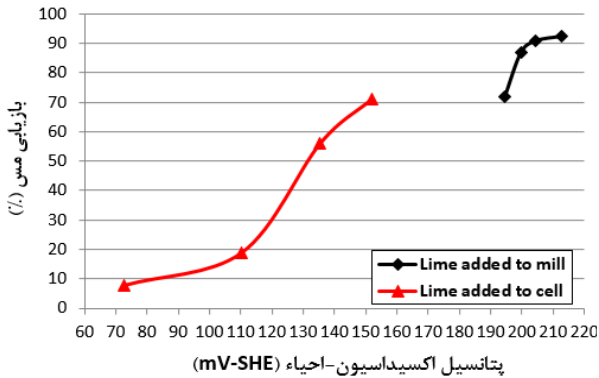


شکل ۶: تغییرات اکسیژن محلول پالپ نمونه‌های خرد شده با گلوله‌های فولادی و کروم‌دار طی خردایش و فلوتاسیون

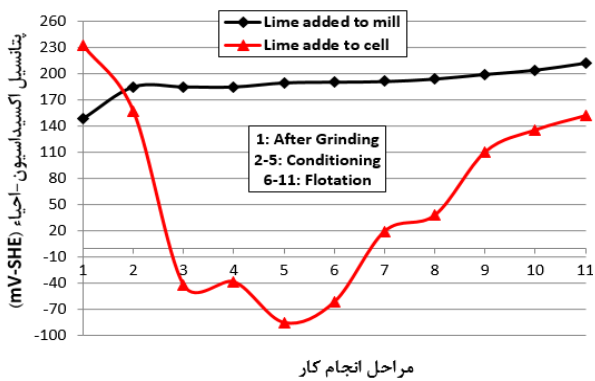


شکل ۷: تغییرات pH پالپ نمونه‌های خرد شده با گلوله‌های فولادی و کروم‌دار طی خردایش و فلوتاسیون

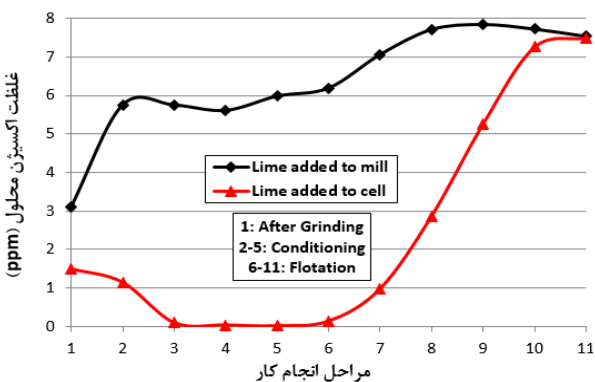
غلظت اکسیژن محیط در شرایط افزودن آهک در ورودی آسیا است.



شکل ۱۰: تغییرات بازیابی مس و Eh پالپ فلوتاسیون در شرایط افزودن آهک در آسیا و سلول فلوتاسیون



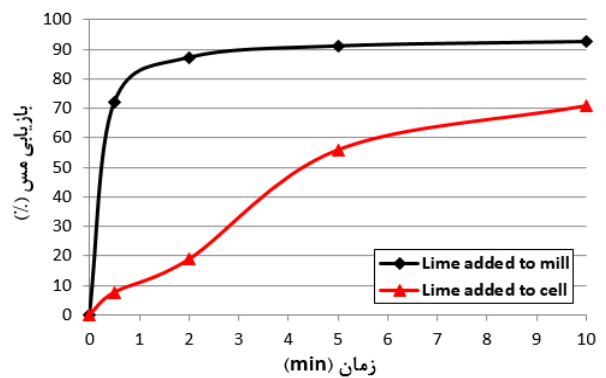
شکل ۱۱: تغییرات Eh پالپ حین خردایش و فلوتاسیون در شرایط افزودن آهک در آسیا و فلوتاسیون



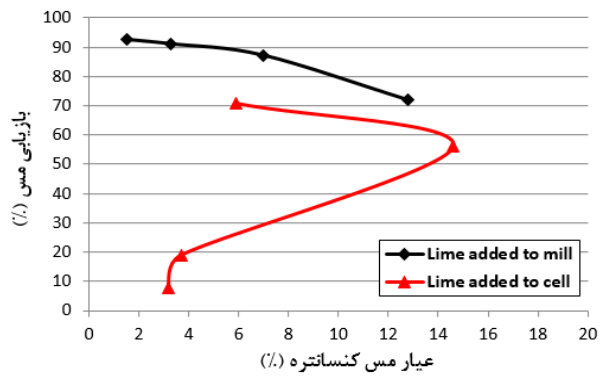
شکل ۱۲: تغییرات اکسیژن محلول حین خردایش و فلوتاسیون در شرایط افزودن آهک در آسیا و فلوتاسیون

۳-۳- اثر محل افزودن آهک بر کارایی فرآیند فلوتاسیون

اثر افزودن آهک در آسیا و در سلول فلوتاسیون بر منحنی تغییرات بازیابی مس و آهن طی فرآیند فلوتاسیون و همچنین تغییرات بازیابی و عیار مس در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. مطابق نتایج ارایه شده، افزودن آهک در ورودی آسیا باعث بهبود قابل ملاحظه کارایی متالورژیکی فرآیند فلوتاسیون (افزایش بازیابی و همچنین عیار مس کنسانتره فلوتاسیون) شده است.



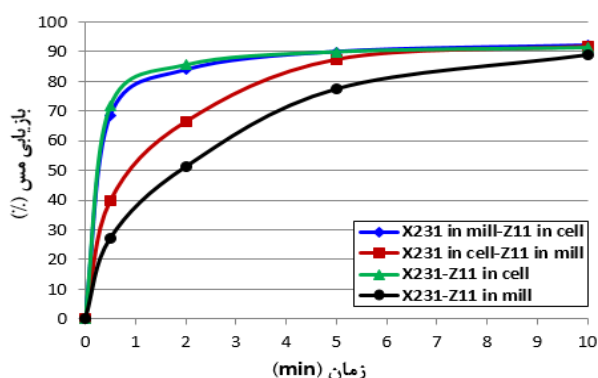
شکل ۸: تاثیر افزودن آهک در آسیا و در سلول فلوتاسیون بر بازیابی مس در فرآیند فلوتاسیون



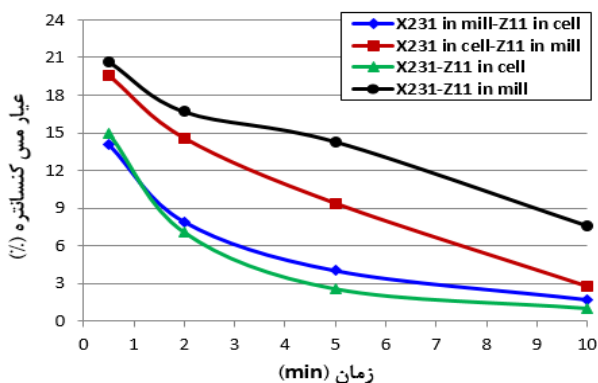
شکل ۹: تاثیر افزودن آهک در آسیا و در سلول فلوتاسیون بر تغییرات بازیابی و عیار مس

تغییرات پارامترهای الکتروشیمیایی طی فرآیند خردایش و فلوتاسیون در شرایط افزودن آهک در ورودی آسیا و سلول فلوتاسیون در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ ارایه شده است. نتایج حاکی از افزایش قابل توجه پتانسیل اکسیداسیون-احیاء و

آسیا به دست آمده است. به نظر می‌رسد کلکتور Z11 برای افزایش بازیابی مس باید در ورودی سلول فلوتاسیون اضافه شود، اما افزودن کلکتور X231 در ورودی آسیا و فلوتاسیون تاثیری بر بازیابی مس نخواهد داشت. علت این امر ممکن است اکسیداسیون سریع کلکتور گزنتات (در شرایط افزودن آن به داخل آسیا) باشد که باعث کاهش غلظت یون گزنتات در محیط و در نتیجه کاهش نرخ شناورسازی ذرات می‌شود. کلکتور X231 یک کلکتور روغنی است که به صورت خالص (بدون رقیق‌سازی) استفاده می‌شود. به نظر می‌رسد دادن زمان ماند بیشتر برای عملکرد بهتر این کلکتور بر روی سطح ذرات، تاثیری بر کارایی آن ندارد؛ به عبارت دیگر، کلکتور گزنتات در مقایسه با تیونوکربامات نقش بسیار کلیدی‌تری در کارایی فرآیند فلوتاسیون و انتقال آن به سلول یا آسیا تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر کارایی فرآیند دارد.



شکل ۱۳: تغییرات بازیابی مس در بازه زمان در آزمایش‌های توزیع کلکتور



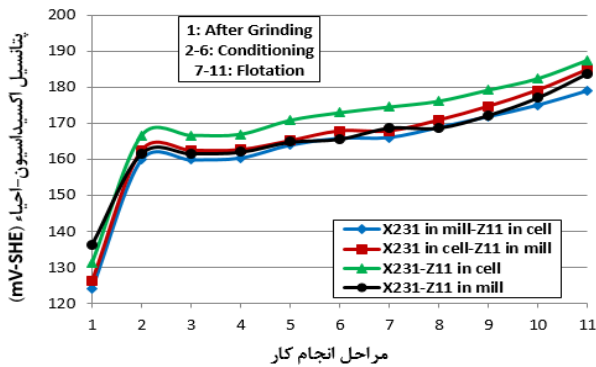
شکل ۱۴: تغییرات عیار مس کنسانتره در بازه زمان در آزمایش‌های توزیع کلکتور

افزودن آهک در ورودی مدار خردایش باعث کاهش تقابل‌های گالوانیک بین واسطه خردایش و ماده معدنی می‌شود. نتیجه تقابل‌های گالوانیک بین کانی‌های سولفیدی و واسطه خردایش، اکسیداسیون واسطه خردایش یعنی گلوله‌ها و احیاء اکسیژن در سطح کانی‌های سولفیدی است، بنابراین با کاهش فعالیت الکتروشیمیایی محیط (در شرایط افزودن آهک در ورودی مدار خردایش)، نرخ اکسیداسیون و سایش گلوله‌ها در داخل آسیا کاهش یافته و همچنین از مصرف اکسیژن محلول به واسطه واکنش احیاء کاتدی جلوگیری به عمل می‌آید.

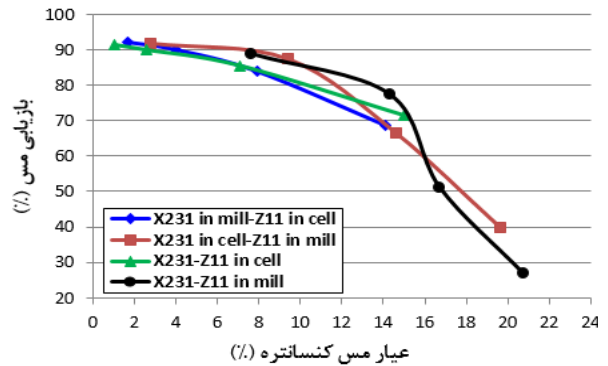
بنابراین مهم‌ترین پیامدهای مثبت افزودن آهک (برای تنظیم pH) در ورودی مدار خردایش شامل (۱) رسوب یون‌های فلزی (Fe^{2+} ، Pb^{2+} ، Cu^{2+}) به صورت هیدروکسید و جلوگیری از تاثیر سوء آن بر فعال‌سازی کانی‌ها و انتخاب‌پذیری فلوتاسیون، (۲) کاهش تقابل‌های الکتروشیمیایی ماده معدنی و واسطه خردایش که باعث افزایش پتانسیل اکسیداسیون-احیاء محیط و کاهش میزان خوردگی گلوله‌ها و لاینرهای آسیا می‌شود و (۳) بازداشت پیریت به دلیل تشکیل هیدروکسیدهای فلزی بر روی سطح آن [۱۴، ۱۳] است. نتایج تحقیقات نشان داده است که افزودن آهک در فرآیند خردایش پیرویت باعث کاهش ۴۰٪ مصرف گلوله آسیا شد [۱۵].

۳-۴- اثر نحوه توزیع کلکتور بر کارایی فرآیند فلوتاسیون

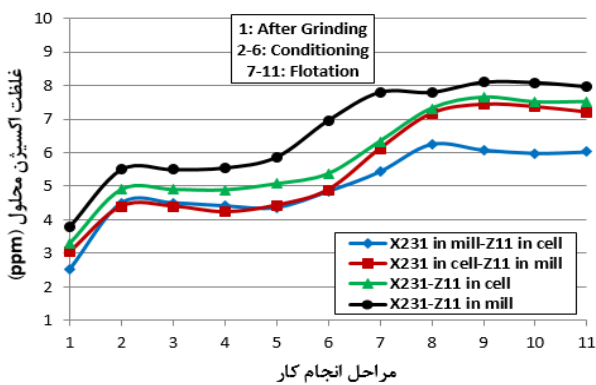
تغییرات پارامترهای متالورژیکی فلوتاسیون در آزمایش‌های توزیع کلکتورهای X231 و Z11 در شکل‌های ۱۳ تا ۱۶ نشان داده شده است. شکل‌های ۱۷ تا ۲۰ روند تغییرات پارامترهای الکتروشیمیایی در آزمایش‌های توزیع کلکتور را نشان می‌دهند. مطابق نتایج، توزیع کلکتورها در مدار خردایش و فلوتاسیون کارایی فرآیند فلوتاسیون را تحت تاثیر قرار می‌دهد. نمودار تغییرات بازیابی مس بر حسب زمان نشان می‌دهد که علی‌رغم اینکه پس از ۱۰ دقیقه بازیابی مس در همه آزمایش‌ها تقریباً مشابه بوده اما سینتیک (سرعت) فرآیند شناورسازی در شرایط افزودن کلکتور X231 و Z11 در سلول و یا X231 در آسیا و Z11 در سلول بسیار بیشتر از دو آزمایش دیگر بوده است. حداکثر بازیابی مس در فلوتاسیون در شرایط افزودن کلکتور X231 و Z11 در سلول و یا X231 در آسیا و Z11 در سلول و حداکثر عیار کنسانتره و انتخاب‌پذیری مس در مقابل آهن (بیشترین بازیابی مس و کمترین بازیابی آهن) در شرایط افزودن هر دو کلکتور (و یا لاقل کلکتور Z11) در



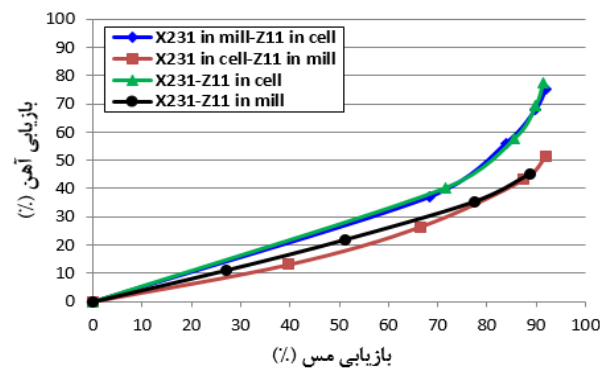
شکل ۱۸: تغییرات Eh پالپ طی خردایش و فلوتاسیون در آزمایش‌های توزیع کلکتور



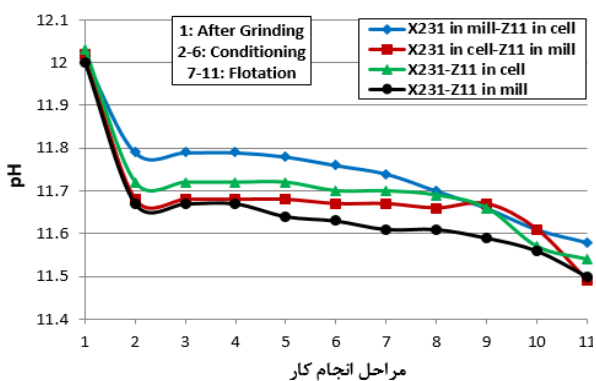
شکل ۱۵: تغییرات عیار کنسانتره و بازیابی مس در آزمایش‌های توزیع کلکتور



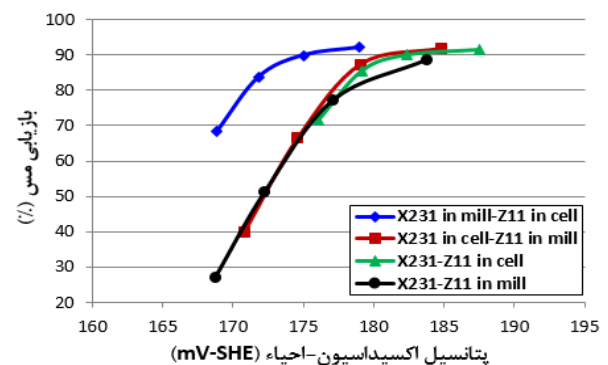
شکل ۱۹: تغییرات غلظت اکسیژن محلول طی خردایش و فلوتاسیون در آزمایش‌های توزیع کلکتور



شکل ۱۶: تغییرات بازیابی مس و آهن (انتخاب پذیری) در آزمایش‌های توزیع کلکتور



شکل ۲۰: تغییرات pH پالپ طی خردایش و فلوتاسیون در آزمایش‌های توزیع کلکتور



شکل ۱۷: تغییرات Eh پالپ فلوتاسیون در آزمایش‌های توزیع کلکتور

فلوتاسیون تأثیری بر بازیابی مس نخواهد داشت. تغییرات پارامترهای الکتروشیمیایی نشان داد که انتقال کلکتور گزنتات به داخل آسیا باعث کاهش غلظت اکسیژن محیط و احیایی تر شدن پتانسیل پالپ گردید. کاهش غلظت اکسیژن به دلیل اکسیداسیون گزنتات و کاهش غلظت آن در محیط است.

۵- مراجع

- [1] Wills, B. A., and Napier-Munn, T. J. (2006). "*Mineral processing technology*". Elsevier Science & Technology Books.
- [2] Rabieh, A., Albijanic, B., and Eksteen, J. J. (2016). "*A review of the effects of grinding media and chemical conditions on the flotation of pyrite in refractory gold operations*". Minerals Engineering, 94: 21-28.
- [3] Aldrich, C. (2013). "*Consumption of steel grinding media in mills-a review*". Minerals Engineering, 49: 77-91.
- [4] Greet, C. J., Small, G. L., Steinier, P., and Grano, S. R. (2004). "*The Magotteaux Mill investigating the effect of grinding media on pulp chemistry and flotation performance*". Minerals Engineering, 17: 891-896.
- [5] Fontana, M. G. (1987). "*Corrosion engineering*". Third ed. McGraw-Hill International Edition, New York.
- [6] Bruckard, W. J., Sparrow, G. J., and Woodcock, J. T. (2011). "*A review of the effects of the grinding environment on the flotation of copper sulfides*". International Journal of Mineral Processing, 100(1-2): 1-13.
- [7] Simmons, G. L., Orlich, J. N., Lenz, J. C., and Cole, J. A. (1999). "*Implementation and start-up of N2TEC flotation at the Lone Tree mine*". In: Parekh, B. K., Miller, J. D. (Eds.), Advances in Flotation Technology. Society of Mining Engineers, Littleton, 183-195.
- [8] Rao, S. R. (2004). "*Surface chemistry of froth flotation*". Plenum Press, New York.
- [9] Leppinen, J. O., Kalapudas, R., and Heiskanen, K. (2000). "*Influence of grinding media on the electrochemistry of sulphide ore flotation*". In: Electrochemistry in Mineral and Metal Processing, Woods, R., and Doyle, F. M. (Eds.), Electrochem. Soc, Pennington, USA, 1-12.
- [10] Azizi, A., Shafaei, S. Z., Noaparast, M., and Karamoozian, M. (2015). "*An investigation of the corrosive wear of steel balls in grinding of sulphide ores*". International Journal of Mining and Geo-Engineering, 49(1): 83-91.
- [11] Azizi, A., Shafaei, S. Z., Noaparast, M., and

تغییرات پارامترهای الکتروشیمیایی نشان می‌دهد که انتقال کلکتور گزنتات به داخل آسیا باعث کاهش غلظت اکسیژن محیط و احیایی تر شدن پتانسیل پالپ شده است. کاهش غلظت اکسیژن به دلیل اکسیداسیون گزنتات و کاهش غلظت آن در محیط است. البته با افزایش تدریجی پتانسیل پالپ طی فرآیند آماده‌سازی و فلوتاسیون، غلظت گزنتات در محیط به تدریج افزایش یافته اما پیامد این پدیده (افزودن گزنتات در آسیا) کاهش سینتیک فرآیند شناورسازی و یا به عبارتی تأخیر در فرآیند فلوتاسیون است. انتقال کلکتور X231 از سلول به آسیا اگرچه باعث کاهش قابل توجه پتانسیل اکسیداسیون-احیاء و غلظت اکسیژن محلول می‌شود، اما تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کارایی متالورژیکی فرآیند فلوتاسیون ندارد.

۴- نتیجه‌گیری

۱- بررسی اثر نوع واسطه خردایش بر کارایی فرآیند خردایش و فلوتاسیون نشان داد که میزان سایش گلوله‌های کروم‌دار بسیار کمتر از گلوله‌های فولادی است. همچنین کارایی متالورژیکی فرآیند فلوتاسیون در حضور گلوله‌های کروم‌دار نیز به مراتب بهتر از گلوله‌های فولادی است. سایش کمتر گلوله‌های کروم‌دار در مقایسه با گلوله‌های فولادی به واسطه سختی بیشتر این گلوله‌ها و به ویژه به دلیل کاهش تقابل‌های گالوانیک بین واسطه خردایش و ماده معدنی در حضور این گلوله بوده که شرایط کاهش نرخ اکسیداسیون (خوردگی) و سایش این گلوله‌ها را فراهم می‌سازد. غلظت کمتر اکسیژن موجود در محلول در حضور گلوله‌های فولادی (به دلیل مصرف آن طی فرآیند خردایش) باعث کاهش نرخ جذب کلکتورها بر روی سطح ذرات و در نتیجه کاهش کارایی متالورژیکی فرآیند شناورسازی نیز می‌شود.

۲- افزودن آهک در ورودی مدار خردایش باعث کاهش تقابل‌های گالوانیک بین واسطه خردایش و ماده معدنی می‌شود. نتیجه کاهش فعالیت الکتروشیمیایی محیط، افزایش پتانسیل اکسیداسیون-احیاء و غلظت اکسیژن در دسترس محلول و در نتیجه بهبود قابل توجه کارایی متالورژیکی فرآیند فلوتاسیون است.

۳- توزیع کلکتورها در مدار خردایش و فلوتاسیون کارایی فرآیند فلوتاسیون را تحت تأثیر قرار می‌دهد. کلکتور Z11 برای افزایش بازیابی مس باید در ورودی مدار فلوتاسیون اضافه شود، اما افزودن کلکتور X231 در ورودی مدار خردایش و

[15] Yelloji Rao, M. K., and Natarajan, K. A. (1991). "Factors influencing ball wear and flotation with respect to ore grinding". *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 7: 137-173.

Karamoozian, M. (2013). "The effect of pH, solid content, water chemistry and ore mineralogy on the galvanic interactions between chalcopyrite and pyrite and steel balls". *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 7(4): 464-471.

[12] Peng, Y., and Grano, S. (2010). "Effect of grinding media on the activation of pyrite flotation". *Minerals Engineering*, 23: 600-605.

[13] Zanina, M., Lambert, H., and du Plessis, C. A. (2019). "Lime use and functionality in sulphide mineral flotation: A review". *Minerals Engineering*, 143: 105922.

[14] Multani, R. S., Williams, H., Johnson, B., Li, R., and Waters, K. E. (2018). "The effect of superstructure on the zeta potential, xanthate adsorption, and flotation response of pyrrhotite". *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 551: 108-116.

¹ Abrasion

² Impact

³ Corrosion

⁴ Rest Potential

⁵ Point Counting

⁶ Metso

⁷ Rest Potential