

شبیه سازی و بزرگ مقیاس نمایی ستون فلو تاسیون در کارخانه فرآوری مولیبدنیت مجتمع مس سرچشمه

محمد کلاهدوزان
استادیار
گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

سید مصطفی وزیری
دانشجوی کارشناسی ارشد
فرآوری مواد معدنی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

محمد رضا یار احمدی
کارشناس کانه آری، کارخانه آزمایشی تغلیظ، مجتمع مس سرچشمه

چکیده

در شبیه سازی و بزرگ مقیاس نمایی (Scale up) ستون های فلو تاسیون، مدل فینچ و دابی کاربرد بسیار گسترده ای دارد به گونه ای که اکثر تأسیسات ستونی در دنیا با همین مدل طراحی شده اند. این مدل، بر اساس شباهت فرآیند فلو تاسیون با سنتیک شیمیایی درجه اول بنا شده است. صحت قیاس فرآیند فلو تاسیون ستونی با سنتیک شیمیایی توسط برخی از کارشناسان مورد تردید قرار گرفته است، ولی به دلیل نبود یک مدل جامع تر و مناسب تر و نیز ناشناخته بودن بسیاری از پارامترهای درگیر در فرآیند جمع آوری ذرات، این مدل هنوز اعتبار خود را حفظ کرده است. مدل دیگری که برای بزرگ مقیاس نمایی ستونها استفاده می شود، مدل انتقال جرم است که ارتفاع زون بازیابی را مهم ترین پارامتر در فرآیند جمع آوری ذرات متری می کند. صحت این مدل توسط محققین و کارشناسان فلو تاسیون ستونی تایید شده است.

برای کاربرد مدل فینچ و دابی ابتدا باید پارامترهای سنتیکی مربوط به ماده معدنی با آزمایش تخمین زده شوند. با استفاده از ثابت سنتیکی تخمین زده شده و مدل سنتیکی فلو تاسیون می توان عملکرد ستون را شبیه سازی کرد. در طراحی و بزرگ مقیاس نمایی ستون فلو تاسیون برای تمیز کاری مولیبدنیت در کارخانه فرآوری مولیبدنیت مجتمع مس سرچشمه، مراحل تخمین پارامترهای سنتیکی و شبیه سازی فرآیند فلو تاسیون ستونی اجرا شده است. پس از اجرا شبیه سازی های مختلف، پیش بینی شده است که با استفاده از یک ستون ۱۱ متری بقطر ۱/۱ متر، عملکرد فلو تاسیون نسبت به مدار فعلی بهبود می یابد.

کلمات کلیدی

فلو تاسیون ستونی، مدل سنتیکی درجه اول، شبیه سازی، بزرگ مقیاس نمایی.

Simulation and Scale up for Flotation Column in Molybdenite Plant of Sarcheshmeh Copper Complex

S.M.Vaziri
M.Sc. Student
Tehran University

M. Kolahdoozan
Associate Professor
Tehran University

M.R.Yarahmadi
Mineral Processing Expert
Sarcheshmeh Copper Complex

Abstract

The model introduced by Finch and Dobby is widely used in simulation and scale up of flotation columns and many column processing plants have been design based on the application of this model. It works by simulating a flotation process with a first order kinetics although the degree of accuracy for this assumption is being doubted by some experts. However as a more comprehensive alternative is lacking and also many parameters in collection process are unknown, this model still seems the most credible.

An alternative is the mass transfer model which identifies the froth zone height as the most important parameters in scale up. The accuracy of this model has been accepted by flotation experts. To apply Finch and Dobby's model first kinetic parameters for the mineral have to be evaluated experimentally. Then using rate constant and a model for flotation process the column performance can be simulated.

In design and scale up process for cleaning stage of molybdenite in Sarchesmeh copper complex procedure has been followed. After simulation results indicates that using a column with 11 meter height and 1.1 meter diameter flotation performance will be improved compared with the present circuit.

مقدمه

به طور کلی ستون های فلوتاسیون دارای دو بخش مجزای جمع آوری (Collection Zone) و کف (Froth Zone) هستند. رفتار ذرات جامد در زون جمع آوری معمولاً با مدل پراکندگی - ته نشینی (Sedimentation-Dispersion Model) توضیح داده می شود. با استفاده از این مدل و مدل سنتیکی درجه اول، بازیابی فرآیند جمع آوری ذرات به صورت تابعی از سه عامل زیر معرفی می شود:

۱- زمان ماند ذرات در زون جمع آوری.

۲- شدت اختلاط ذرات در زون جمع آوری.

۳- ثابت سنتیکی جمع آوری.

از نظر شدت اختلاط ذرات در زون جمع آوری، ستون ها دارای دو حد انتهایی هستند. اگر شدت اختلاط حداقل باشد ($N_h \rightarrow 0$)، ستون با جریان پیستونی (Plug Flow) کار می کند و اگر حداکثر باشد ($N_h \rightarrow \infty$)، جریان داخلی ستون از نوع مخلوطی کامل (Perfect Mixed) خواهد بود.

بازیابی کلی ستون های فلوتاسیون در دو حالت انتهایی جریان مخلوطی کامل و جریان پیستونی از روابط (۱) و (۲) به دست می آید. نکته قابل توجه در این روابط این است که وقتی زمان ماند ذرات در ستون به سمت بی نهایت میل می کند، بازیابی ذرات قابل فلوته شدن به سمت ۱۰۰٪ میل نمی کند زیرا در عمل نمی توان زمان ماند ذرات را به بی نهایت رساند و به این ترتیب بازدهی ۱۰۰٪ قابل تعریف نیست. بنابراین برای نزدیکتر شدن دو رابطه مذکور به واقعیت، طرف راست آنها در فاکتور بازیابی حداکثر که با افزایش زمان ماند ذرات در ستون بدست می آید، ضرب شده است. برای این بازیابی تنها به صورت ضربی از بازیابی حداکثر تعریف می شود و در دو حالت انتهایی جریان پیستونی و مخلوطی کامل به ترتیب به صورت زیر بیان می شود [4]:

$$R_c = R_\infty \times [1 - \exp(-k_c t_p)] \quad (1)$$

$$R_c = R_\infty \times [1 - (1 + k_c \tau_p)^{-1}] \quad (2)$$

در حالت کلی، ستونهای فلوتاسیون در شرایط بین دو حد انتهایی کار می کنند؛ یعنی، شدت اختلاط در آنها نه خیلی زیاد است و نه خیلی کم. برای معادله کلی بازیابی نیز باید میزان بازیابی حداکثر را تأثیر داد و آنرا به صورت زیر درآورد [2]:



$$R_c = R_\infty \times \left[1 - \frac{4A \times \exp\left(\frac{Pe_p}{2}\right)}{(1+A)^2 \times \exp\left(\frac{A \cdot Pe_p}{2}\right) - (1-A)^2 \times \exp\left(\frac{-A \cdot Pe_p}{2}\right)} \right] \quad (3)$$

که در آن مقدار A به صورت زیر تعریف می‌شود [2]:

$$A = \left(1 + 4 \frac{Da}{Pe_p}\right)^{0.5} \quad (4)$$

در رابطه فوق Da معرف عدد بی بعد دامکولر است که به صورت زیر به دست می‌آید [2]:

$$Da = k \times \tau_p \quad (5)$$

Pe_p عدد بی بعد پکلت و معرف یکنواختی ذرات (عدم پراکندگی) است و به صورت زیر محاسبه می‌شود [2]:

$$Pe_p = \frac{1}{N_d} \quad (6)$$

در حالت کلی برای به دست آوردن عدد پراکندگی (N_d) از مدل زیر استفاده می‌شود [1]:

$$N_d = \frac{E}{u \times H_c} \quad (7)$$

E ضریب تفرق محوری ذره است که از مدل تجربی زیر حاصل می‌شود [1]:

$$E = 0.063 d_c \left[\frac{j_g}{1.6} \right]^{0.3} \quad (8)$$

U سرعت ذره است که برابر است با مجموع سرعت سیال و سرعت ذره نسبت به سیال و به صورت زیر بیان می‌شود [3]:

$$u = u_1 + u_{sp} \quad (9)$$

سرعت سیال (u₁) را می‌توان از سرعت پالپ با تأثیر دادن مقدار هوای موجود در پالپ به دست آورد [1]:

$$u_1 = \frac{j_{sl}}{(1 - \varepsilon_g)} \quad (10)$$

سرعت ذره نسبت به سیال، تابعی از ماندگی ذرات و عدد رینولدز ذرات است. ماندگی جامد، حاصل تقسیم حجم کل ذرات بر کل حجم ستون است و برحسب درصد بیان می‌شود. این مقدار را می‌توان از روی درصد وزنی جامد پالپ به دست آورد:

$$\phi_s = \chi_s \times \frac{\rho_{sl}}{\rho_p} \quad (11)$$

عدد رینولدز ذره نیز از رابطه زیر حاصل می شود [1]:

$$Re_p = \frac{d_p u_{sp} \rho_l (1 - \phi_s)}{\mu_f} \quad (12)$$

با توجه به روابط فوق، سرعت ذره نسبت به سیال به صورت زیر خواهد بود [1]:

$$u_{sp} = \frac{gd_p^2 (\rho_p - \rho_{sl})(1 - \phi_s)^{2.7}}{18\mu_f (1 + 0.15 Re_p)^{0.687}} \quad (13)$$

از سوی دیگر زمان ماند سیال با استفاده از رابطه (۱۰) و مفهوم فیزیکی سرعت به صورت زیر به دست می آید [4]:

$$\tau_l = \frac{H_c (1 - \varepsilon_g)}{j_{sl}} \quad (14)$$

در اینجا H_c ارتفاع زون جمع آوری و مسافت طی شده توسط سیال را نشان می دهد. مسافت طی شده توسط سیال و ذرات یکسان است. بنابراین می توان برای محاسبه زمان ماند متوسط ذرات در ستون، با توجه به مفهوم فیزیکی سرعت، از رابطه زیر استفاده کرد [4]:

$$\tau_p = \tau_l \times \left[\frac{\frac{j_{sl}}{(1 - \varepsilon_g)}}{\frac{j_{sl}}{(1 - \varepsilon_g)} + u_{sp}} \right] \quad (15)$$

با استفاده از این مدل می توان قطر بهینه ستون را برای رسیدن به بازایی مطلوب تعیین کرد. روش محاسبات به صورت سعی و خطاست. محاسبات با فرض یک قطر پایه برای ستون و دانستن پارامترهای مربوط به ماده معدنی، مانند چگالی ذره، چگالی پالپ، ویسکوزیته پالپ و ابعاد ذره و نیز پارامترهای عملیاتی مثل سرعت آب شست و شو، دبی خوراک، دبی باطله، ماندگی گاز و سرعت ظاهری گاز در ستون، از رابطه (۳) شروع می شوند و آنقدر تکرار می شوند تا بازایی به حد مورد نظر برسد یادآور می شود که برای تعیین بازایی، باید ثابت سرعت سنتیکی ذرات در زون جمع آوری مشخص باشد. برای این منظور این مقدار توسط آزمایش فلوتاسیون و بر اساس تعیین شیب خط تغییرات راندمان مقدار فلوته نشده - زمان در محدوده سینتیک مرتبه اول تعیین شده است. جدول (۲):

عنصر	آهن	مولیبدن	مس
$k_c (\text{min}^{-1})$	0.462	0.4572	0.0768

بازایی حاصله از رابطه (۳) فقط مربوط به زون جمع آوری است و بازایی کلی ستون (R_{fc}) با داشتن مقدار R_f بارابله فرمول زیر محاسبه می شود [3]:

$$R_{fc} = \frac{R_f R_c}{R_f R_c + 1 - R_c} \quad (16)$$

نمای کلی مدار فرآوری مولیبدنیت در مجتمع مس سرچشمه

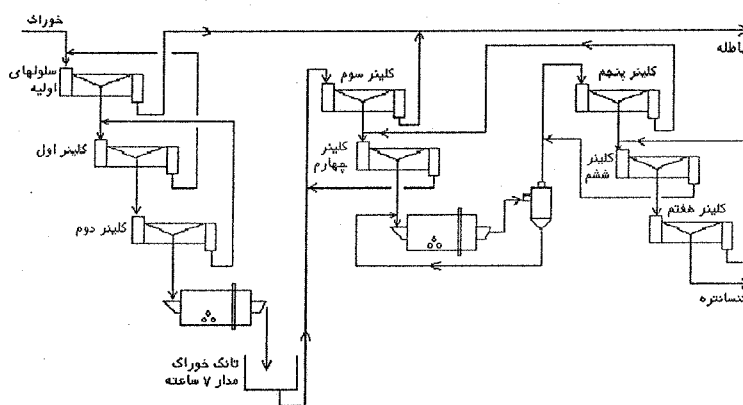
خوراک ورودی به کارخانه فرآوری مولیبدنیت، محصول کارخانه تغلیظ است که به طور متوسط دارای ۳۰ درصد مس و ۰/۷ درصد مولیبدن است. این خوراک پس از طی مدار فرآوری مولیبدنیت، تبدیل به دو محصول می‌شود. محصول اول که در حقیقت کنسانتره کارخانه فرآوری مولیبدنیت است. به طور متوسط دارای ۵۵ درصد مولیبدن و ۰/۰۸ درصد مس است و پس از خشک شدن در بشکه‌های ۲۲۰ لیتری بارگیری می‌شود. محصول دوم نیز باطله نهایی کارخانه فرآوری مولیبدنیت و متشکل از مس بدون مولیبدنیت است که به کارخانه ذوب ارسال می‌شود. مدار فرآوری مولیبدنیت دارای دو بخش ۲۴ ساعته و ۷ ساعته است که هر کدام متشکل از دو مدار موازی کاملاً مشابه هستند. مدار ۲۴ ساعته شامل سلول‌های اولیه، فلوتاسیون و تمیز کننده‌های ۱ و ۲ است. سلولهای ستونی بر اساس مدل جریان متقابل (Counter Current) کار می‌کنند و باطله هر سلول، بخشی از خوراک سلول قبلی است. باطله سلولهای اولیه باطله نهایی کارخانه فرآوری مولیبدنیت است. در انتهای مدار ۲۴ ساعته آسیای گلوله‌ای مدار باز قرار دارد و مواد پس از آن وارد تانک خوراک مدار ۷ ساعته می‌شوند. مدار ۷ ساعته شامل کلیرهای ۳ و ۴ است که بعد از آنها یک آسیای مدار بسته قرار گرفته است. سرریز هیدروسیکلون وارد تمیز کننده ۵ می‌شود. این تمیز کننده نیز با تمیز کننده‌های ۶ و ۷ به صورت جریان متقابل کار می‌کند.

در طرح توسعه کارخانه فرآوری مولیبدنیت، به دلیل عملکرد متالورژیکی مطلوب‌تر، سلول‌های ستونی در مدارهای مشابه در نقاط دیگر دنیا و مزیت ستون‌ها در صرفه جویی در مکان تمیز کننده‌های ۵، ۶ و ۷ با ستون فلوتاسیون جایگزین خواهند شد. نمای کلی مدار فعلی فرآوری مولیبدنیت و مدار توسعه یافته آن در شکل ۱ و ۲ نشان داده شده است.

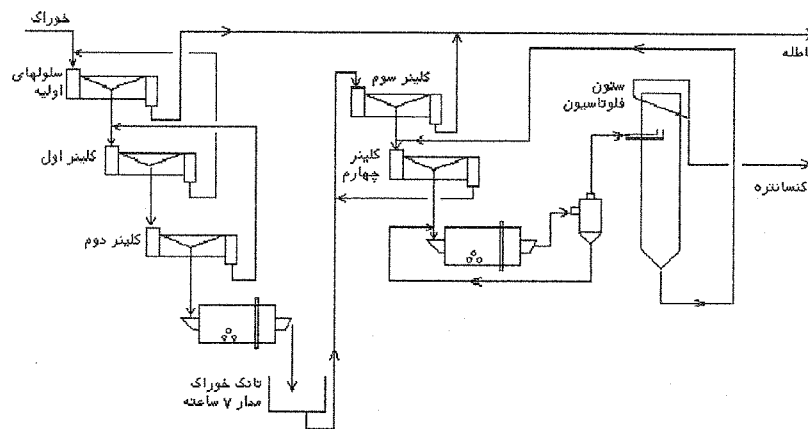
شبیه‌سازی و بزرگ مقیاس نمایی

یکی از پارامترهای عملیاتی مهم در عملکرد ستون فلوتاسیون، درصد وزنی جامد در پالپ خوراک است. در مدار فعلی کارخانه فرآوری مولیبدنیت، کنسانتره تمیز کننده چهارم دارای ۵۲/۹ متر مکعب آب در ساعت است که با افزودن آب به آن، این مقدار به حد ۸۲/۵۵ متر مکعب در ساعت می‌رسد. عملیات شبیه‌سازی و بزرگ مقیاس نمایی با استفاده از ستون نیمه صنعتی موجود در کارخانه پایلوت مجتمع مس سرچشمه انجام شد. شبیه‌سازی طوری صورت گرفته است که تأثیر آب افزودنی به خوراک ستون فلوتاسیون، بررسی گردد. طراحی باید طوری صورت گیرد که عیار مولیبدن در کنسانتره ستون (کنسانتره نهایی کارخانه فرآوری مولیبدنیت) بالغ بر ۵۴ درصد باشد و عیار مس و آهن نیز به ترتیب از ۰/۱۵ و ۱/۵ درصد تجاوز نکنند. با استفاده از مدل، میزان بازیابی برای مولیبدن، آهن و مس محاسبه می‌شود و با استفاده از رابطه زیر عیار کنسانتره پیش‌بینی می‌گردد:

$$R = \frac{C.c}{F.f} \quad (17)$$



شکل (۱) نمای کلی مدار فعلی فرآوری مولیبدنیت [5].



شکل (۲) نمای کلی مدار فرآوری مولیبدنیت پس از جایگزین شدن ستون فلوتاسیون بجای تمیز کننده‌ای ۵، ۶ و ۷ [5].

F نرخ جامد خوراک است که معادل ۴/۱۱ تن در ساعت است عیار خوراک نیز با توجه به آنالیزهای شیمیایی صورت گرفته مشخص است. برای شبیه‌سازی نرخ جامد کنسانتره، باید بخشی از خوراک که توسط کانی‌های مولیبدن، مس و آهن اشغال شده است، مشخص باشد. آنالیزهای مینرالوژی اجرا شده، درصد کانی‌های مذکور را به در جدول (۲) نشان می‌دهد:

Fe	Cu	Mo	عناصر	سایر
کانی	3.434	2.489	87.089	6.988
عنصر	52.21	2.08	2.2	---

با توجه به جدول فوق و میزان بازیابی پیش‌بینی شده هر کانی، یک بازیابی کلی برای ستون به دست می‌آید که نرخ وزنی کنسانتره با استفاده از آن محاسبه می‌شود:

$$R_{Tot} = 87.089R_{Mo} + 2.489R_{Cu} + 3.434R_{Fe} \quad (18)$$

$$C = (R_{Tot} + c') \times F \quad (19)$$

فاکتور c' از آن جهت آمده است که افزون بر کانی‌های مولیبدن، مس و آهن کانی‌های دیگری هم در خوراک و کنسانتره وجود دارند که به دلیل نبود ثابت سنتیکی برای آنها، مقدار بازیابی آنها پیش‌بینی نشده است. مقدار این فاکتور با توجه به بررسی‌های صورت گرفته روی کنسانتره مدار فعلی، معادل ۰/۹۶ تخمین زده شده است.

سرعت ظاهری گاز و سرعت ظاهری آب بایاس تأثیر بسیار زیادی بر عملکرد ستون دارند. تأثیر این پارامترها روی پارامترهای متالورژیکی بررسی شده است. در جدول (۳) شرایط عملیاتی شبیه‌سازی شده را می‌بینید:

پارامترهای متالورژیکی (عیار و بازیابی) نیز با استفاده از روابط (۱۷) تا (۱۹) برای هر یک از حالات فوق شبیه‌سازی شده است. افزون بر این نرخ جامد کنسانتره نیز با استفاده از بازیابی پیش‌بینی شده برای هر یک از اجزای خوراک شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی‌های ذکر شده در جدول (۴) آورده شده است. با توجه به شبیه‌سازی‌های فوق می‌توان پیش‌بینی کرد که برای رسیدن به عیار و بازیابی مورد نظر در کارخانه فرآوری مولیبدنیت، استفاده از یک ستون به قطر ۱/۱ متر الزامی است. ارتفاع زون جمع‌آوری در این ستون باید ۸ متر باشد که با احتساب ۳ متر برای زون کف و حبابسازها، این ارتفاع به ۱۱ متر خواهد رسید. با استفاده از چنین ستونی در کارخانه فرآوری مولیبدنیت، میزان تولید تا حد قابل توجهی افزایش خواهد یافت.

نرخ وزنی شبیه‌سازی شده کنسانتره، ۱/۷۷ تا ۲/۶۴ تن در ساعت است که در مقایسه با مدار فعلی که این مقدار ۰/۷ تن در ساعت است، بسیار زیاد است.

با توجه به اینکه باطله تمیز کار پنجم، بخشی از خوراک تمیز کار چهارم است، کاهش نرخ باطله با استفاده از ستون فلوتاسیون باعث افزایش ظرفیت و راندمان کلی مدار می‌شود.

جدول (۳) شرایط عملیاتی شبیه سازی شده.

حالت	R_f (%)	$Q_{F,W}$ (m^3/h)	χ_s (%)	ϕ_s (%)	J_B (m)	J_g (m)	Da			Pe_p	d_c (m)	H_c (m)
							Mo	Cu	Fe			
A	20	52.9	7.2	1.75	0.2	1.2	1.69	0.17	0.28	34.13	1.1	8
B	35	52.9	7.2	1.75	0.2	1.2	1.69	0.17	0.28	34.13	1.1	8
C	50	52.9	7.2	1.75	0.2	1.2	1.69	0.17	0.28	34.13	1.1	8
D	20	62.55	6.2	1.49	0.2	1.2	1.77	0.18	0.3	34.89	1.15	9
E	35	62.55	6.2	1.49	0.2	1.2	1.77	0.18	0.3	34.89	1.15	9
F	50	62.55	6.2	1.49	0.2	1.2	1.77	0.18	0.3	34.89	1.15	9
G	20	72.55	5.4	1.29	0.2	1.2	1.28	0.13	0.22	44.79	1.1	8
H	35	72.55	5.4	1.29	0.2	1.2	1.28	0.13	0.22	44.79	1.1	8
I	50	72.55	5.4	1.29	0.2	1.2	1.28	0.13	0.22	44.79	1.1	8
J	20	82.55	4.74	1.13	0.1	1.6	1.67	0.17	0.28	39.46	1.2	10
K	35	82.55	4.74	1.13	0.1	1.6	1.67	0.17	0.28	39.46	1.2	10
L	50	82.55	4.74	1.13	0.1	1.6	1.67	0.17	0.28	39.46	1.2	10

جدول (۴) پارامترهای متالورژیکی شبیه سازی شده.

حالت	نرخ کنسانتره (t/h)	بازیابی پیش بینی شده (%)			عیار پیش بینی شده (%)		
		Mo	Cu	Fe	Mo	Cu	Fe
A	1.77	44.5	6	3.6	54.13	0.29	0.18
B	2.31	58.4	10	6.1	54.31	0.38	0.24
C	2.64	66.7	13.9	8.5	54.33	0.45	0.29
D	1.86	47	6	4	54.19	0.29	0.18
E	2.40	61	11	5	54.35	0.38	0.24
F	2.72	62.3	15.1	9.1	54.36	0.46	0.29
G	1.33	33.7	4.6	2.8	53.72	0.29	0.18
H	1.85	46.7	7.7	4.6	54.10	0.36	0.23
I	2.20	55.5	10.7	6.4	54.20	0.42	0.27
J	1.76	44.4	6.0	3.5	54.13	0.29	0.18
K	2.30	58.3	10.1	6.0	54.31	0.37	0.24
L	2.63	66.6	13.8	8.4	54.33	0.45	0.29

نتیجه گیری

- شبیه سازی های انجام شده، استفاده از یک ستون فلوتاسیون با قطر ۱/۱ متر و ارتفاع کلی ۱۱ متر را برای طرح توسعه کارخانه فرآوری مولیبدنیت پیشنهاد می کنند. این ابعاد در محدوده ستون های فلوتاسیون مرسوم است که تا اکنون توسط تولیدکنندگان تولید، و به دست متخصصین فرآوری نصب و راه اندازی شده است. از طرفی به دلیل لحاظ کردن همه متغیرهای کلیدی عملیاتی، ابعاد فوق الذکر از دقت کافی برخوردارند.
- با انتخاب ستون فلوتاسیون مذکور، نرخ کنسانتره افزایش خواهد یافت و این باعث افزایش ظرفیت و راندمان کلی کارخانه می شود.
- بهترین شرایط عملیاتی برای ستون فلوتاسیون مذکور، با شبیه سازی، پیش بینی شده اند. اگر مقدار دبی آب خوراک ۵۲/۹ متر مکعب در ساعت باشد، بهترین راندمان حاصل می شود. بنابراین آب مصرفی کارخانه نیز تا حدی کاهش خواهد یافت.

تشکر و قدردانی

لازم است از همه کسانی که مؤلفین را در اجرای این تحقیق یاری کردند تشکر و قدر دانی به عمل آید. کارکنان محترم امور تحقیقات و مطالعات مجتمع مس سرچشمه، به ویژه سرکار خانم مهندس پرتوآذر، مدیر محترم امور، جناب آقای مهندس رضایان رئیس محترم بخش تحقیقات معدنی و فرآوری مواد، سرکار خانم مهندس زیدآبادی سرپرست کارخانه آزمایشی تغلیظ

و آقایان مهندس خیامی و مهندس شاه رحمانی کارشناسان محترم کارخانه آزمایشی تغلیظ در تمام مراحل شرایط لازم را برای اجرای آزمایش ها فراهم کردند. و همچنین با تشکر از آقایان مهندس مؤمن آبادی سرپرست محترم کارخانه فرآوری مولیبدنیت و مهندس یونسیان کارشناس محترم امور تغلیظ و سرپرست کارخانه سنگ شکنی و سایر کارشناسان آن امور که با مساعدت های فکری و عملی مؤلفین را در این تحقیق یاری کردند.

فهرست علائم

M_{CS}	نرخ جامد کنسانتره بر حسب g/min	A_C	سطح مقطع ستون بر حسب cm^2
N_d	عدد پراکنندگی، بدون بعد	d_p	قطر ذره بر حسب میکرون
Pe_p	عدد پکلت ذرات، بدون بعد	Da	عدد دامکولر، بدون بعد
R	کسر بازیابی	E_p	ضریب تفرق محوری ذرات بر حسب m^2/s
R_{∞}	حداکثر بازیابی	g	شتاب جاذبه بر حسب cm/s^2
R_c	کسر بازیابی ذرات در زون جمع آوری	H_C	ارتفاع ناحیه جمع آوری
R_{fc}	کسر بازیابی ذرات در کل ستون	J_g	سرعت ظاهری گاز بر حسب cm/s
R_f	کسر بازیابی ذرات در زون کف	J_B	سرعت ظاهری آب بایاس بر حسب cm/s
R_{Tot}	بازیابی کلی	J_{sl}	سرعت ظاهری پالپ بر حسب cm/s
Re_p	عدد رینولدز ذره، بدون بعد	k_c	ثابت سنتیکی ذرات در ناحیه جمع آوری بر حسب min^{-1}
t_p	زمان ماند ذره بر حسب min	k_{fc}	ثابت سنتیکی ذرات در کل ستون min^{-1}
		$M_{F,S}$	نرخ جامد خوراک بر حسب g/min
		ρ_p	چگالی ذرات بر حسب g/cm^3
		ρ_l	چگالی سیال بر حسب g/cm^3
		ρ_{sl}	چگالی پالپ بر حسب g/cm^3
		Φ_s	ماندگی ذرات جامد در ستون بر حسب درصد
		μ_f	ویسکوزیته سیال بر حسب $Pa.s$

مراجع

- [1] Finch.J.A ,and Dobby.G.S, "Column flotation",Pergamon press, 1989.
- [2] Ityokombul.Mku T, "A mass transfer approach to flotation column design", Chemical Engineering Science,Vol 47, No 13/14, pp 3605-3612. 1992.
- [3] Huls.B.J,Hyma.D.B,Dobby.G.S ,and Lachance.C.D, "Scale up and installation of flotation columns at Falconbridge Limited", Proceedings of an International Conference on Column Flotation, Canada,Vol 1, pp 198-209. 1991.
- [4] Dobby.G.S, "A fundamental flotation model and flotation column scale up", Ph.D. Thesis,McGill University, Montral, Canada, 1984.
- [5] Jordan. Parsons, "Sarcheshmeh Consentration Operation Manual", section 6, 1997.

