

بررسی اثر مشخصات فیزیکی سلول در فلوتاسیون ذرات دانه درشت

بهرام رضایی^۱، سید محمد جواد کلینی^۲ و بهزاد شهبازی^۳

۱- استاد، گروه فرآوری مواد معدنی، دانشگاه امیر کبیر تهران، brezai1@yahoo.com

۲- استادیار، گروه فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس تهران، javadkoleini@yahoo.com

۳- کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس تهران، bzshahbazi@yahoo.com

چکیده

دو پارامتر خیلی مهم فیزیکی و تکنولوژیکی توانایی شناور شدن ذرات، محدوده فوقانی و پایینی ابعاد آنها است. ذراتی که انرژی جنبشی بیشتری نسبت به انرژی جدایش خود از حباب دارند، نمی توانند شناور شوند. بنابراین با توجه به انرژی داده شده به سیستم و دانسیته ذرات، حداکثر اندازه ای را برای توانایی شناور شدن یک ذره می توان در نظر گرفت. در این تحقیق با استفاده از ذرات درشت کوارتز، نقش پارامترهای هندسی سلول فلوتاسیون در بازیابی ذرات درشت بررسی شد. برای بررسی پارامترهای هندسی دستگاه فلوتاسیون از روش تاگوچی استفاده گردید تا تاثیر چهار عامل طول ضلع سلول، ارتفاع سلول، فاصله همزن از کف سلول و درصد وزنی جامد در پالپ در توانایی فلوتاسیون ذرات درشت معین گردد. بر طبق مطالعات، در شرایطی که طول ضلع سلول ۰/۱۵ متر، ارتفاع سلول ۰/۱۰ متر، فاصله همزن از کف سلول ۱/۲۵ متر و درصد وزنی جامد در پالپ ۲۰ بود، بیشترین بازیابی برای ذرات درشت کوارتز برابر با ۳۷/۹۹٪ بدست آمد.

کلمات کلیدی: فلوتاسیون، ذرات درشت، پارامترهای هندسی، کوارتز و طراحی آزمایش

The Effect Of Flotation Cell On Flotability Of Coarse Particles

Abstract

The earliest possible recovery of valuable material from a mineral processing circuit could have numerous advantages, such as preventing over-grinding of minerals, reducing flotation time and increasing the recovery of valuable minerals. It is well known that coarse particles are difficult to recover with conventional flotation techniques and several modifications have been made to conventional flotation systems in an attempt to float coarse particles of coal, precious metals and industrial minerals with little success. In this research, the effect of impeller speed and air flow rate on flotation response of quartz coarse particles was investigated. Furthermore, using Taguchi method the effect of parameters such as lengthen of cell, height of cell, distance between impeller and floor and pulp density was obtained. Maximum recovery was obtained 37.99% at lengthen of 0.15 meter, height of 0.1 meter, distance between impeller and floor of 1.25 meter and pulp density of 20%.

Key words: flotation, coarse particles, quartz and Taguchi.

۱- مقدمه

در شرایط متلاطم، با آنکه انرژی ورودی در کارآیی مجموعه حباب و ذره و توانایی تشکیل فاز حباب- ذره کاملاً موثر است، ولی تا کنون ملاحظات هیدرودینامیکی در سلولهای فلوتاسیون مکانیکی نادیده گرفته شده است، لذا اطلاعات دقیقی درباره بهینه سازی طرح هندسی سلول بر اساس اصول هیدرودینامیکی موجود نیست [۱ و ۲].

شوبرت^۱ و بایکوف برگر^۲، اصول هیدرودینامیکی حاکم بر فلوتاسیون ذرات در یک سلول مکانیکی (همزن دار) را مورد مطالعه قرار دادند. با استفاده از کانسنگ سیلویت با محدوده وسیع دانه بندی (بالای ۱/۲۵ میلیمتر)، آنها یافتند استفاده از پره هایی که عمل معلق نگه داشتن ذرات جامد را با توان ورودی کمتری انجام می دهند، بازیابی بالاتری بدست می آید. برای یک پره خاص، با کاهش فاصله همزن از انتهای ظرف، توان ورودی برای معلق نگهداشتن ذرات جامد عملاً کاهش یافته، در نتیجه بازیابی بهبود می یابد [۳ و ۴].

های^۳ و احمد^۴، اثر فاصله تیغه های پره همزن روشتون^۵ را در عملکرد فلوتاسیون مطالعه کردند. آنها یافتند که با قرار دادن پره ها در فاصله ای برابر با یک چهارم قطر ظرف از انتهای ظرف، توان لازم برای معلق نگه داشتن ذرات کاهش یافته، در نتیجه بازیابی بالایی برای فلوتاسیون ذرات درشت بدست می آید [۵].

در این تحقیق، نقش پارامترهای هندسی سلول فلوتاسیون در بازیابی ذرات درشت بررسی می گردد. برای بررسی پارامترهای هندسی دستگاه فلوتاسیون از روش تاگوچی استفاده گردید تا تاثیر چهار عامل طول ضلع سلول، ارتفاع سلول، فاصله همزن از کف سلول و درصد وزنی جامد در پالپ در توانایی فلوتاسیون ذرات درشت معین گردد.

۱- نحوه انجام آزمایشها

برای انجام آزمایشها از نمونه کوارتز در چهار محدوده دانه بندی ۲۱۲+۳۰۰-، ۳۰۰+۴۲۰-، ۴۲۰+۵۰۰- و ۵۰۰+۵۹۰- میکرون استفاده گردید. آزمایشهای فلوتاسیون در $pH = 12.5$ و توسط ۱۰۰۰ گرم بر تن اسید اولئیک و ۷۵ گرم بر تن MIBC انجام گردید، بطوری که درصد وزنی جامد در پالپ ۱۵٪ در نظر گرفته شد. فلوتاسیون آنیونی نمونه کوارتز در $pH = 12.5$ را می توان به حضور یون کلسیم و فعال شدن سطح کوارتز در حضور این یون هیدروکسی نسبت داد.

۲- طراحی آزمایش

جهت بررسی عوامل هندسی موثر در افزایش بازیابی فلوتاسیون ذرات درشت، تعداد ۹ آزمایش به روش تاگوچی (جدول ۱) طراحی گردید تا با انجام آنها تاثیر فاکتورهای طول ضلع سلول، ارتفاع سلول، فاصله همزن از کف سلول و درصد وزنی جامد در پالپ مورد بررسی قرار گیرد. در این طراحی برای هر فاکتور سه سطح مختلف مورد نظر می باشد [۶ و ۷]. این آزمایشها در شرایطی انجام شد که سرعت همزن ۱۱۰۰ دور در دقیقه و میزان هوای ورودی ۱۵ لیتر در ساعت بود.

جدول ۱- طراحی آزمایش به روش تاگوچی (L_9)

شماره آزمایش	طول ضلع (متر)	ارتفاع سلول (متر)	فاصله همزن از کف سلول (متر)	درصد وزنی جامد در پالپ
۱	۰/۱۲	۰/۱۰	۰/۰۰۵	۱۰
۲	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۰۱۲۵	۱۵
۳	۰/۱۲	۰/۲۰	۰/۰۲۰	۲۰
۴	۰/۱۵	۰/۱۰	۰/۰۱۲۵	۲۰
۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۰۲۰	۱۰
۶	۰/۱۵	۰/۲۰	۰/۰۰۵	۱۵
۷	۰/۱۹	۰/۱۰	۰/۰۲۰	۱۵
۸	۰/۱۹	۰/۱۵	۰/۰۰۵	۲۰
۹	۰/۱۹	۰/۲۰	۰/۰۱۲۵	۱۰

۳- نتایج و بحث

پس از انجام آزمایشهای فلوتاسیون بر روی نمونه کوارتز، میزان بازیابی کوارتز در چهار محدوده دانه بندی ۲۱۲+۳۰۰-، ۳۰۰+۴۲۰-، ۴۲۰+۵۰۰- و ۵۰۰+۵۹۰- میکرون طبق جدول ۲ تعیین گردید. همانطور که ملاحظه می شود، در آزمایش چهارم در شرایطی که طول ضلع سلول ۰/۱۵ متر، ارتفاع سلول ۰/۱۰ متر، فاصله همزن از کف سلول ۱/۲۵ متر و درصد وزنی جامد در پالپ ۲۰ بوده است، بیشترین بازیابی کل برابر با ۳۷/۹۹٪ بدست آمد. جهت تحلیل بهتر نتایجی که در جدول ۲ آمده، موارد زیر توسط نرم افزار 4- Qualitek برای هر یک از محدوده های دانه بندی بطور جداگانه مورد بررسی قرار می گیرد:

- متوسط میزان بازیابی در سطوح مختلف
- تعیین بهترین سطح در مورد هر فاکتور
- شرایط بهینه انجام آزمایش و پیش بینی میزان بازیابی در این شرایط
- میزان تاثیر هر فاکتور در بازیابی ذرات درشت کوارتز

جدول ۲- بازیابی وزنی ذرات کوارتز در محدوده های مختلف دانه بندی (%)

جمع بازیابی	محدوده دانه بندی (میکرون)				ردیف
	۲۱۲+۳۰۰-	۳۰۰+۴۲۰-	۴۲۰+۵۰۰-	۵۰۰+۵۹۰-	
۳۳/۴۲	۴۲/۷۲	۳۹/۷۴	۴۴/۶۴	۲۹/۲۴	۱
۳/۹۵	۲۱/۱۱	۴/۵۲	۳/۱۴	۰/۸۶	۲
۰	۰	۰	۰	۰	۳
۳۷/۹۹	۴۸/۱۲	۳۸/۵۳	۴۶/۸۱	۳۳/۶۹	۴
۲/۷۴	۱۳/۳۷	۲/۹۷	۲/۴۴	۰/۸۸	۵
۱۹/۵۲	۱۰۰	۲۸/۸۸	۱۵/۶	۲/۱۵	۶
۰	۰	۰	۰	۰	۷
۳/۰۴	۴/۳۴	۳/۴۱	۳/۸۸	۲/۳۴	۸
۰	۰	۰	۰	۰	۹

۳-۱- شرایط بهینه بازیابی ذرات در محدوده های مختلف دانه بندی

برای بدست آوردن شرایط بهینه بازیابی باید در مورد هر فاکتور، سطحی را در نظر گرفت که متوسط بازیابی بیشترین مقدار را داشته باشد. جدول ۳ شرایط بهینه بازیابی را در محدوده های مختلف دانه بندی نشان می دهد.

جدول ۳- شرایط بهینه بازیابی ذرات کوارتز

محدوده دانه بندی (میکرون)				فاکتور
-۵۹۰+۵۰۰	-۵۰۰+۴۲۰	-۴۲۰+۳۰۰	-۳۰۰+۲۱۲	
۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	طول ضلع (متر)
۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۲۰	ارتفاع سلول (متر)
۰/۰۱۲۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	فاصله همزن از کف سلول (متر)
۲۰	۲۰	۱۰	۱۵	درصد وزنی جامد در پالپ
۳۳/۶۹	۴۸/۳۸	۴۸/۴۵	۱۰۰	پیش بینی بازیابی در شرایط بهینه(%)

۳-۲- میزان تاثیر هر فاکتور در بازیابی ذرات درشت کوارتز

در جدول ۴ میزان تاثیر عوامل اصلی موثر در بازیابی ذرات کوارتز در محدوده های مختلف دانه بندی آورده شده است. همچنین در جدول ۵ می توان میزان تاثیر متقابل عوامل مختلف را ملاحظه نمود، بنابراین با استفاده از این اطلاعات می توان به تحلیل عوامل موثر در بازیابی ذرات درشت کوارتز به روش فلوتاسیون پرداخت.

جدول ۴- درصد تاثیر عوامل اصلی در بازیابی فلوتاسیون

محدوده دانه بندی (میکرون)				فاکتور
-۵۹۰+۵۰۰	-۵۰۰+۴۲۰	-۴۲۰+۳۰۰	-۳۰۰+۲۱۲	
۱۵/۹۶	۱۷/۳۰	۳۱/۷۸	۴۷/۰۳	طول ضلع
۵۲/۳۷	۵۲/۲۵	۳۳/۹۴	۸/۱۳	ارتفاع سلول
۱۶/۹۱	۱۸/۶۸	۳۳/۵۴	۳۳/۶۸	فاصله همزن از کف سلول
۱۴/۷۷	۱۱/۷۷	۰/۷۴	۱۱/۱۵	درصد وزنی جامد در پالپ

جدول ۵- درصد تاثیرات متقابل در بازیابی فلوتاسیون

محدوده دانه بندی (میکرون)				فاکتور
-۵۹۰+۵۰۰	-۵۰۰+۴۲۰	-۴۲۰+۳۰۰	-۳۰۰+۲۱۲	
۳۶/۶۵	۸۷/۷۵	۷۶/۹۱	۵۴/۱۳	A*D
۸۱/۵۸	۴۸/۴۲	۵۶/۴۵	۱۵/۱۲	A*C
۳۶/۰۱	۴۸/۲۹	۵۱/۹۵	۲۵/۲۳	B*D
۳۴/۱۳	۴۴/۴۶	۱۹/۳۵	۱۸/۰۷	C*D

• نقش طول ضلع

طول ضلع سلول فلوتاسیون نقش موثری در نتیجه آزمایشها داشته است بطوری که با افزایش اندازه ذرات میزان تاثیر آن به ترتیب از ۰.۳۱/۷۸٪، ۰.۱۷/۳۰٪ و ۰.۱۵/۹۶٪ کاهش یافته است. این عامل تاثیر متقابل بالایی را با دو عامل فاصله همزن از کف سلول و درصد وزنی جامد در پالپ از خود نشان داده است. میزان بهینه این عامل در مورد همه محدوده های دانه بندی برابر با ۰/۱۵ متر بدست آمده است. هرچه طول ضلع سلول فلوتاسیون بزرگتر باشد احتمال ته نشین شدن ذرات کوارتز مخصوصاً در دانه بندیهای درشت تر بیشتر فراهم شده و از بازیابی آن به شدت کاسته خواهد شد ولی با کاهش اندازه اضلاع سلول فلوتاسیون از یک مقدار بهینه، اغتشاش محیط پالپ بسیار بالا می رود بطوریکه دیگر ناحیه ای آرام برای متصل باقی ماندن ذرات به حبابهای هوا و انتقال آنها به کنسانتره به وجود نیامده و بازیابی ذرات کوارتز کاهش خواهد یافت.

• نقش ارتفاع سلول

یکی از عواملی که تاثیر بالایی در نتیجه فلوتاسیون داشته است ارتفاع سلول فلوتاسیون می باشد که میزان تاثیر آن با افزایش دانه بندی ذرات از ۰.۸/۱۳٪ به ۰.۳۳/۹۴٪، ۰.۵۲/۲۵٪ و ۰.۵۲/۳۷٪ افزایش یافته است. این عامل تاثیر متقابل بالایی را با درصد وزنی جامد در پالپ از خود نشان داده است. میزان بهینه این عامل در مورد ذرات دانه ریز (۲۱۲+۳۰۰ میکرون) برابر با ۰/۲ متر بدست آمده است ولی برای سایر ذرات که دانه درشت تر هستند میزان بهینه آن به ۰/۱ متر کاهش یافته است. به نظر می رسد که با افزایش دانه بندی ذرات باید میزان ارتفاع سلول فلوتاسیون کاهش یابد تا ذرات در زمان کوتاهیتری از سلول فلوتاسیون خارج شده و احتمال انفصال ذرات از حبابهای هوا کاهش یابد.

• نقش فاصله همزن از کف سلول

فاصله همزن از کف سلول دارای تاثیر کمتری در نتیجه آزمایشها نسبت به دو عامل قبلی می باشد و میزان تاثیر آن بطور کلی با افزایش دانه بندی ذرات روندی نزولی داشته و به ترتیب از ۰.۳۳/۶۸٪ به ۰.۳۵/۵۴٪، ۰.۱۸/۶۸٪ و ۰.۱۶/۹۱٪ تغییر نموده است. میزان بهینه این عامل برای درشت ترین محدوده دانه بندی (۵۰۰+۵۹۰ میکرون)، برابر با ۰/۱۲۵ متر و برای سایر محدوده های دانه بندی برابر با ۰/۰۰۵ متر تعیین شده است. در مورد درشت ترین محدوده دانه بندی، با توجه به اینکه متوسط میزان بازیابی در سطوح دوم و سوم نزدیک به یکدیگر می باشند در مورد این محدوده دانه بندی هم می توان فاصله همزن از کف سلول را برابر با ۰/۰۰۵ متر در نظر گرفت، بنابراین می توان گفت که در مورد ذرات درشت هرچه فاصله همزن از کف سلول کمتر باشد میزان بازیابی آن افزایش خواهد یافت زیرا با کاهش میزان فاصله همزن از کف سلول امکان ته نشین شدن ذرات درشت به شدت کاهش می یابد. بنابراین با کاهش فاصله همزن از کف سلول فلوتاسیون، سرعت لازم برای معلق نگه داشتن ذرات درشت کاهش می یابد و با ورود انرژی کمتر به سیستم امکان دستیابی به بازیابیهای بالاتر نیز فراهم خواهد شد. تحقیقات سایر مولفین نشان داده است که در فلوتاسیون ذرات درشت هر چه عمل معلق نگه داشتن ذرات با انرژی کمتری انجام گردد میزان بازیابی ذرات افزایش می یابد که نتایج این آزمایشها نیز بیانگر این مفهوم می باشد. فاصله همزن از کف سلول با طول اضلاع سلول دارای تاثیر متقابل بالایی است.

• نقش درصد وزنی جامد در پالپ

درصد وزنی جامد در پالپ کمترین تاثیر را در نتیجه آزمایشها داشته است و بطور کلی با افزایش دانه بندی ذرات میزان تاثیر آن روندی نزولی داشته، به ترتیب از ۰.۱۸/۷۰٪ به ۰.۱۴/۲۴٪، ۰.۱۵/۶۹٪ و ۰.۸/۳۹٪ تغییر نموده است. این عامل با کلیه عوامل دارای تاثیر متقابل قابل توجهی می باشد. سه پارامتری که در قسمتهای قبل مورد بحث قرار گرفتند از جمله پارامترهای هندسی سلول فلوتاسیون، ولی درصد وزنی جامد در پالپ از پارامترهای عملیاتی فرایند فلوتاسیون محسوب می گردد، بنابراین نتایج این آزمایشها بیانگر تاثیر بسیار بالاتر پارامترهای هندسی سلول فلوتاسیون نسبت به پارامترهای عملیاتی آن می باشد.

۴- نتیجه گیری

- جهت بررسی عوامل هندسی موثر در افزایش بازیابی فلوتاسیون ذرات درشت، تعداد ۹ آزمایش به روش تاگوچی طراحی گردید تا با انجام آنها تاثیر فاکتورهای طول ضلع سلول، ارتفاع سلول، فاصله همزن از کف سلول و درصد وزنی جامد در پالپ مورد بررسی قرار گیرد.
- در شرایطی که طول ضلع سلول ۰/۱۵ متر، ارتفاع سلول ۰/۱۰ متر، فاصله همزن از کف سلول ۱/۲۵ متر و درصد وزنی جامد در پالپ ۲۰ بوده است، بیشترین بازیابی کل برابر با ۳۷/۹۹٪ بدست آمد. طول ضلع سلول فلوتاسیون نقش موثری در نتیجه آزمایشها داشته است بطوری که با افزایش اندازه ذرات میزان تاثیر آن به ترتیب از ۴۷/۰۳٪ به ۳۱/۷۸٪، ۱۷/۳۰٪ و ۱۵/۹۶٪ کاهش یافته است. میزان بهینه این عامل در مورد همه محدوده های دانه بندی برابر با ۰/۱۵ متر بدست آمده است.
- یکی از عواملی که تاثیر بالایی در نتیجه فلوتاسیون داشته است ارتفاع سلول فلوتاسیون می باشد که میزان تاثیر آن با افزایش دانه بندی ذرات از ۸/۱۳٪ به ۳۳/۹۴٪، ۵۲/۲۵٪ و ۵۲/۳۷٪ افزایش یافته است.
- فاصله همزن از کف سلول دارای تاثیر کمتری در نتیجه آزمایشها نسبت به دو عامل قبلی می باشد و میزان تاثیر آن بطور کلی با افزایش دانه بندی ذرات روندی نزولی داشته و به ترتیب از ۳۳/۶۸٪ به ۳۵/۵۴٪، ۱۸/۶۸٪ و ۱۶/۹۱٪ تغییر نموده است.
- درصد وزنی جامد در پالپ کمترین تاثیر را در نتیجه آزمایشها داشته است و بطور کلی با افزایش دانه بندی ذرات میزان تاثیر آن روندی نزولی داشته، به ترتیب از ۱۸/۷۰٪ به ۱۴/۲۴٪، ۱۵/۶۹٪ و ۸/۳۹٪ تغییر نموده است.

۵- مراجع

- [1] Mao L and Yoon R.H, (1997), *predicating flotation rates using a rate equation derived from first principles*, International journal of mineral processing, , pp: 171-181.
- [2] Yoon R.H and Luttrell G. H, (1989), *the effect of bubble size on fine particle flotation*, Mineral processing and Extractive metallurgy review, pp: 101-122.
- [3] Schubert H, Bischofberger C, (1981), *on the optimization of hydrodynamics in flotation processes*, Mineral processing, Proceed, Thirteenth Int. Miner. Process. Congr. Warsaw.
- [4] Schubert H, Bischofberger C and Koch P, (1982), *on the influence of the hydrodynamics in flotation processes*, Aufbereitungs-Technik, pp: 306-315.
- [5] Hui, S and Ahmed N, (1998), *The effect of energy dissipation on coarse particle flotation*, in Innovations in Mineral and Coal Processing, pp: 113-118.
- [6] Taguchi G, 1987- *System of Experimental Design*, KRAVS International Publication, 1.
- [7] Taguchi G, 1987- *System of Experimental Design*, KRAVS International Publication, 2.

۶- زیر نویسها

- ¹ Schubert
² Bischofberger
³ Hui
⁴ Ahmed
⁵ Rushton (RT)