

تعیین نوع و میزان مواد شیمیایی مصرفی در فلوتاسیون ستونی هماتیت معدن چادرملو

محمود عبدالمهی

دانشیار گروه فرآوری مواد معدنی - دانشکده فنی - دانشگاه تربیت مدرس
minmabd@modares.ac.ir

سید محمد جواد کلینی

استادیار گروه فرآوری مواد معدنی - دانشکده فنی - دانشگاه تربیت مدرس

حسین پاگرد مقنی

دانشجوی کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی - دانشکده فنی - دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت ۸۳/۹/۲۸، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۴/۹/۱۳، تاریخ تصویب ۸۴/۹/۲۶)

چکیده

در کارخانه فرآوری مجتمع صنعتی- معدنی چادرملو با سه خط تولید موازی و مشابه، دونوع کنسانتره منبیتی و هماتیتی تولید می شود. در این معدن، کانی آپاتیت به عنوان باطله همراه کانسنگ آهن می باشد که حذف فسفر از آهن و تولید کنسانتره هماتیت، به روش فلوتاسیون معمولی و توسط سلولهای مکانیکی نوع سالا انجام می گیرد. وجود بیش از حد مجاز فسفر در سلولهای فلوتاسیون هماتیت، زمینه انجام تحقیقات در خصوص استفاده و یا جانشینی فلوتاسیون ستونی در صنعت را فراهم نموده است. در این مقاله حذف آپاتیت از هماتیت با ستونی در مقیاس آزمایشگاهی با ارتفاع ۱۵۳۵ و قطر ۷۴ میلی متر مورد مطالعه قرار گرفته است. در این بررسی، جهت تعیین نوع مواد شیمیایی مصرفی (کلکتور- کف ساز، بازداشت کننده) در فلوتاسیون ستونی هماتیت، در مرحله رافر، از بین کلکتور- کف سازهای مورد آزمایش (آسام، اتراک، ترکیب آسام و اتراک و کوپلیمر) کلکتور نوع آسام+ اتراک به عنوان کلکتور- کف ساز موثر و از بین بازداشت کننده های سیلیکات سدیم و نشاسته+ دکستروز، سیلیکات سدیم به عنوان بازداشت کننده مناسب انتخاب گردید. در مرحله بعد، مقادیر بهینه کلکتور- کف ساز (آسام- اتراک)، ۱۵۰ گرم بر تن با نسبت ۷۰ به ۳۰ و بازداشت کننده سیلیکات سدیم، ۸۰۰ گرم بر تن تعیین گردید که در این شرایط بهترین راندمان جدایش حدود ۵۶ درصد بدست آمد.

واژه های کلیدی: هماتیت، فلوتاسیون ستونی، معدن چادرملو، روش تاگوچی

مقدمه

میزان سرمایه گذاری اولیه نیز تا حد زیادی می کاهد. در ضمن قابلیت کنترل و اتوماسیون بهتری را ایجاد می کند. کاربرد انواع مختلف ستون در جهان، در فرآوری کانه های آهن متنوع بوده است [۱].

اولین آزمایشها در ستون نوع کانادایی برای جدایش سیلیس از آهن به روش فلوتاسیون معکوس انجام شده است. کنسانتره آهن تولیدی از این ستون نسبت به کنسانتره بدست آمده در مراحل اولیه- رمق گیر در سلولهای معمولی بهتر بوده و سرریز حاصله نیز بهتر از سرریز تولید شده در چند مرحله از سلولهای شستشو بوده است [۲].

فلوتاسیون معکوس، به منظور تولید کنسانتره پر عیار

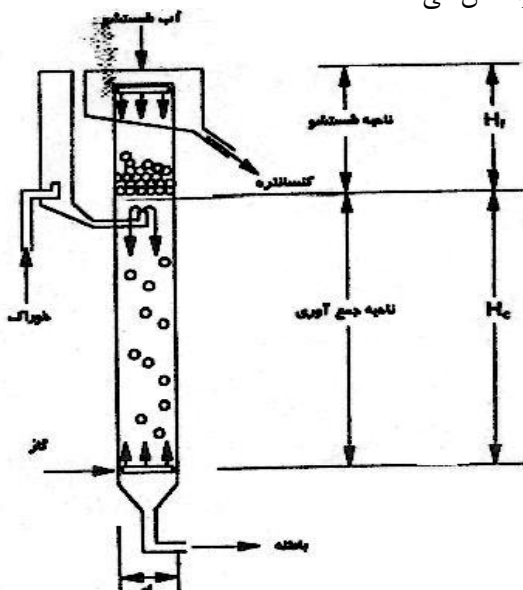
صنعت فرآوری مواد معدنی در بیست سال گذشته شاهد پیشرفت های چشمگیری بوده است که بدون تردید، سلول فلوتاسیون ستونی یکی از بارزترین آنها می باشد. فلوتاسیون ستونی یکی از مدرنترین انواع ماشینهای فلوتاسیون می باشد که در چند دهه اخیر، از آن در صنایع فرآوری مواد معدنی استفاده می شود. این سلولها برای به هم زدن پالپ و متفرق کردن ذرات و حبابهای هوا وسیله مکانیکی ندارند و معمولاً از ستونهایی با مقاطع دایره ای و چهارگوش ساخته می شوند. امروزه انواع مختلف سلول ستونی به بازار عرضه شده است که هر کدام از آنها می تواند جایگزین چند سلول مکانیکی معمولی شود و درحالی که کارایی کارخانه فلوتاسیون را بالا میبرد، از

آهن، از روش سوم استفاده می-شود. عیار مجاز فسفر در کنسانتره باید در حدود ۰/۰۵۲ درصد باشد (مطابق با استاندارد شرکت فولاد) ضمناً عیار آهن محصول حدود ۶۵ درصد است.

بهترین معیار برای ارزیابی عملکرد یک سلول ستونی، کارایی متالورژیکی (عیار و بازیابی) آن است. برای افزایش کارایی متالورژیکی یک ستون، امکان اعمال تغییر در چهار پارامتر، نرخ آب شستشو، نرخ گاز ورودی به اسپارجر، نرخ خوراک ورودی با شرایط آماده سازی متغیرو نرخ ته ریز وجود دارد. پارامترهای مذکور پارامترهای عملیاتی ستون، نامیده می شوند. در این مقاله سعی شده تا با انتخاب مواد شیمیایی مناسب و مقدار بهینه آن حداکثر مقدار آپاتیت از کانه آهن حذف شود.

روشها و مواد

ستون آزمایشگاهی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است، دارای ارتفاع ۱۵۳۵ میلیمتر است که ۴۶۵ میلیمتر از آن، ناحیه شستشو و ۱۰۷۰ میلیمتر از آن، ناحیه بازیابی است. قطر ستون ۷۴ میلیمتر می باشد. بنابراین ستون مذکور، دارای سطح مقطع ۰/۴۳ متر مربع و حجم ۰/۶۶ مترمکعب است. جنس ستون از پلکسی گلاس انتخاب شده است زیرا علاوه بر اینکه سبک و مستحکم است، شفافیت آن امکان مشاهده عملکرد سیستم را فراهم می کند. شکل (۱) شمایی از این ستون را نشان می دهد.



شکل ۱: شمایی از ستون آزمایشگاهی.

آهن تاکنونیت، یک کاربرد غیر معمول از فلوتاسیون ستونی است که در Sydvaranger در شمال نروژ نزدیک به مرز روسیه، انجام می گیرد [۳]. کارخانه سامارکو در برزیل برای جدایش کانه آهن از فرایند فلوتاسیون معکوس استفاده می کند. در این کارخانه با اضافه شدن یک خط فلوتاسیون ستونی به موازات خطوط فلوتاسیون قبلی، بازیابی آهن در کنسانتره وقتی که با مدار معمولی مقایسه می شود، ۴ درصد افزایش می یابد [۴]. در شرکت Siderugica Nacional در برزیل در سال ۱۹۹۳ سه ستون به ابعاد ۴*۱۰ متر در مرحله سلولهای اولیه کانه آهن و یک ستون دیگر به همان ابعاد در مرحله شستشوی کانه آهن، مورد استفاده قرار گرفته است [۵].

اولین کاربرد موفقیت آمیز ماشین ستونی نوع پر شده (Packed column)، برای فراوری کانه تاکنونیت غیر مغناطیسی میشیگان در یک مرحله و بدون نرمه گیری استفاده شده است و کارایی متالورژیکی را بالا برده است. کنسانتره آهن که در آزمایشگاه تولید می شود، بیش از ۶۶ درصد آهن دارد که دارای بازیابی بیش از ۸۵ درصد است [۶].

درمورد جدایش هماتیت از ناخالصیهای همراه با استفاده از فلوتاسیون، توسط محققین مختلف، سه روش پیشنهاد شده است:

- ۱- فلوتاسیون معکوس آپاتیت در pH های ۶ تا ۷ به کمک انواع آمینها
- ۲- فلوتاسیون معکوس آپاتیت در pH های ۱۱ تا ۱۲ به طریق غیر مستقیم توسط کلکتورهای آنیونی (اسید کربوکسیلیک) پس از فعال کردن سطح آن توسط کاتیونهای دو ظرفیتی مانند Ca^{+2}
- ۳- فلوتاسیون معکوس آپاتیت در pH های قلیایی توسط کلکتورهای آنیونی (اسید کربوکسیلیک) و بازداشت همزمان کانیهای آهن به وسیله نشاسته، کبراکو، دکستروزین، سیلیکات سدیم و غیره [۷].

در کارخانه فرآوری مجتمع صنعتی- معدنی چادرملو با سه خط تولید موازی و مشابه، دوز کنسانتره منیتیتی و هماتیتی تولید می شود. تولید کنسانتره هماتیت از این معدن، به روش فلوتاسیون معمولی و توسط سلولهای مکانیکی نوع سالا انجام می گیرد. باتوجه به اینکه در معدن آهن چادرملو، کانی آپاتیت به عنوان باطله همراه کانسنگ آهن می باشد، لذا عملاً برای حذف فسفر از

(محصول شرکت کولپلیم اصفهان) و بازداشت کننده- های سیلیکات سدیم و مخلوط نشاسته و دکسترین بدست آمده است. لازم به توضیح است که کلکتورهای نامبرده خاصیت کف سازی نیز دارند و به کف ساز نیاز ندارند. فقط به کلکتورآسام، کف ساز به میزان کم (۱۵ گرم بر تن درآزمایشات اولیه) افزوده می شود. بنابر این آزمایشهای فلوتاسیون ستونی را با همین مواد شیمیایی انجام می گیرد و نوع مناسب مواد شیمیایی بدست خواهد آمد.

کلکتور آتراک (ATRAC 1580) معروف به برول (نام شرکت سازنده)، جزء کلکتورهای آمفوتر بوده و از نظر خواص شیمیایی تشابه زیادی به کلکتورهای اسیدهای چرب دارد. این کلکتور علاوه بر خاصیت کلکتوری، خاصیت کف سازی نیز دارد [۸]. در ذیل خواص فیزیکی شیمیایی آن آمده است:

- در دمای 20°C مایع است.
- دانسیته آن در 20°C تقریباً برابر 1080 kg/m^3 است.
- نقطه اشتعال آن بالاتر از 100°C است.
- مقدار یک درصد آن در آب pH ی معادل ۱۱ ایجاد می کند.

- ویسکوزیته (گرانروی) آن در 20°C برابر 3000 mpa/s است.

Berol در آب بفرم امولسیون است و در شرایط عملیاتی عادی خواص شیمیایی پایداری دارد لیکن در شرایط اکسیدی یا احیایی به آهستگی تجزیه می شود. جهت استفاده از آن در فلوتاسیون بایستی با شرایط آماده سازی ۳ تا ۱۵ دقیقه قبل از فلوتاسیون بکار رود. در مقیاس صنعتی نسبت به سایر مواد مشابه ارجحیت دارد و در شرایط آزمایشگاهی با امولسیون ۱ درصد آزمایش صورت می گیرد. مقدار مصرفی آن به شرایط بستگی دارد اما معمولاً مقدار مصرف آن ۲۰۰-۱۵۰ گرم بر تن خوراک خط است. خواص سمی ضعیفی دارد و باعث سوزش پوست می شود [۱۲ و ۱۱]. در حال حاضر ترکیبی از Berol و Asam بعنوان کلکتور استفاده می شود. در فلوتاسیون معکوس هماتیت، بیشتر از کلکتورهای آنیونی بویژه از اسیدهای کربوکسیلیک (اسیدهای چرب) استفاده می شود. این کلکتورها دارای طول زنجیره هیدروکربنی ۹ تا ۱۸ بوده و با کاهش طول این زنجیره، قدرت انتخابی کلکتور افزایش می یابد. در اسیدهای چرب، یون

برای انجام آزمایشها، خوراک از تانکی که قبل از تانکهای آماده سازی خوراک خط فلوتاسیون هماتیت قرار دارد و هنوز هیچ نوع ماده شیمیایی به آن افزوده نشده است، تهیه می شود. این تانک حاوی کنسانتره HGMS (جدایش مغناطیسی با گرادیان بالا) است که به درجه آزادی مناسب جهت فلوتاسیون رسیده است.

به علت وجود کانی آپاتیت (به عنوان باطله) در نمونه تهیه شده، آزمایشهای ستونی که شامل فلوتاسیون معکوس آپاتیت و بازداشت همزمان کانی های آهن می باشد، انجام می گیرد [۸]. نتایج آنالیزی که جهت شناسایی کانی های تشکیل دهنده نمونه صورت پذیرفته است، نشان می دهد که نمونه مورد آزمایش از کانی های هماتیت، مگنتیت، گوتیت و آپاتیت تشکیل یافته است. کلیه آزمایشات به روش پیوسته انجام شده است. در این روش، پالپ از قسمت انتهایی ستون مجدداً به ستون بازگردانده نمی شود [۹]. آزمایشها در شرایط بهینه ستون که در آن پارامترهای عملیاتی ستون بهینه سازی شده است، انجام می شود. در جدول ۱ میزان بهینه پارامترهای عملیاتی ستون آورده شده است [۱۰].

جدول ۱: بهینه پارامترهای عملیاتی ستون.

پارامتر	نرخ (سانتی متر بر ثانیه)	دبی (لیتر بر دقیقه)
آب شستشو	۰/۳۹	۱
تهریز	۰/۶	۱/۶
هوا	۰/۵۴۶	۱/۴
خوراک	۰/۴۶۵	۱/۲

مقادیر بهینه مذکور در شرایط ثابت زیر حاصل شده است: درصد جامد خوراک: ۲۵ درصد
pH: ۱۰-۱۰/۵ (برای تنظیم pH، کربنات سدیم با سود به نسبت ۱۰ به ۱ افزوده می شود)
زمان آماده سازی خوراک: ۱۵ دقیقه (۸ دقیقه بازداشت کننده و ۷ دقیقه کلکتور).

تاکنون آزمایشهای زیادی چه در مقیاس آزمایشگاهی و چه در مقیاس صنعتی، برای بهینه سازی نوع کلکتور و بازداشت کننده به روش فلوتاسیون معمولی در کارخانه فرآوری چادرملو انجام گرفته است. تجارب علمی و عملی نشان می دهد که بهترین نتایج با کلکتورهای ASAME و ATRAC 1580 و ترکیب آن دو کلکتور و FLO_G30

پنج سطح متفاوت از نظر مقدار به روش معمولی (غیر آماری) بررسی شد تا نوع کلکتور- کف ساز مناسب شناخته شود. به عبارت دیگر در حالی که کلیه پارامترها ثابت بودند اثر هر یک از کلکتورها بطور جداگانه و در پنج سطح از نظر مقدار بررسی شدند. چون کلیه آزمایشها بر روی خوراک مرحله رافر فلوتاسیون معمولی انجام می شود، برای انتخاب سطوح مقدار کلکتور- کف ساز براساس مقدارهای استفاده شده در کارخانه فرآوری چادرملو عمل می شود. جدول (۲) مقادیر سطوح انتخاب شده برای کلکتور- کف سازها را نشان می دهند. بعد از تهیه پالپ، آنرا در داخل ظرف آماده سازی ریخته و به مقدار کافی مخلوط کربنات سدیم و سود برای تنظیم pH در حد ۱۰/۵ - ۱۰ اضافه شد. سپس برای بازداشت کانی های آهن، سیلیکات سدیم و ۸ دقیقه بعد از آن (زمان آماده سازی بازداشت کننده)، برای فلوته کردن کانه آپاتیت، کلکتور افزوده شد.

در پایان زمان آماده سازی کلکتور (۷ دقیقه) و پس از تنظیم دبی آب شستشو و هوا و خوراک، بر مبنای مقادیر بهینه پارامترهای عملیاتی ستون، خوراک آماده سازی شده، بوسیله پمپ وارد ستون شد و به سیستم اجازه داده شد تا به شرایط پایدار برسد. پانزده دقیقه پس از ایجاد شرایط پایدار، از سرریز تهریز ستون نمونه گیری صورت گرفت. بعد از آنالیز شیمیایی نمونه های سرریز و ته ریز، برای محاسبه بازیابی آهن و فسفر و بازدهی جدایش فسفر از روابط زیر استفاده گردید.

$$R = \frac{c(f-t)}{f(c-t)} \times 100 \quad (1)$$

$$SE = \frac{m(c-f)(f-t)}{f(m-f)(c-t)} \times 100 \quad (2)$$

در روابط فوق، R بازیابی، f عیار خوراک، c عیار کنسانتره، t عیار باطله و m حداکثر عیار فسفر در کانی آپاتیت است که برابر ۱۵/۲۲ درصد می باشد. اشکال و جداول (۳) تا (۶) نتایج آزمایشهای مربوط را نشان می دهد. در ضمن عیار آهن و فسفر در خوراک برای آزمایشهای مربوط به کلکتورهای اتراک و آسام + اتراک و بازداشت کننده سیلیکات سدیم به ترتیب ۶۲/۳۷ و ۰/۴۹۶ و برای کلکتورهای آسام و کوپلیمر بازداشت کننده نشاسته + دکسترین ۵۸/۷۷ و ۰/۴۶۹ درصد می باشد. با افزایش

کربوکسیلات ضمن واکنش با کانیهای مختلف در شرایط مناسب بصورت الکترواستاتیکی بر روی کانیهای ناخواسته جذب می گردد. بدیهی است که به منظور انتخابی بودن فرآیند جذب می توان از مواد فعال کننده و بازداشت کننده مناسب جهت تعدیل شرایط و افزایش تفاوت ترشوندگی سطوح کانیها استفاده نمود. کلکتور آلکنیل ساکسینیک اسید مونو استر معروف به آسام (ASAME)، نیز یک کلکتور اسید چرب اصلاح شده است که به همراه کلکتور اتراک در مدار فلوتاسیون کارخانه تولید کنسانتره آهن چادرملو استفاده می شود. استفاده از این کلکتور مانع از پایداری بیش از حد کف و مشکلات مربوطه در حالتی می شود که تنها از برول بعنوان کلکتور آپاتیت استفاده می شود [۸]. برای تنظیم pH از مخلوط کربنات سدیم و سود با نسبتهای ۱۰ به ۱ استفاده می شود. زیرا در صورت استفاده از آهک، یونهای کلسیم باعث فعال شدن کانیهای سیلیکاته شده و جذب کلکتور بر روی سیلیکاتها را افزایش داده و مکانیزم جذب را غیر انتخابی می کند. شایان ذکر است که افزایش نسبت مذکور، کاهش مصرف کربنات سدیم را در پی داشته ولی معمولاً محتوای فسفر کنسانتره فلوتاسیون را افزایش می دهد و در نتیجه باعث افزایش مصرف کلکتور و سیلیکات سدیم جهت کاهش فسفر می شود. کربنات سدیم که یک نمک با قابلیت انحلال کم است علاوه بر کنترل pH، بعنوان متفرق کننده نرمه ها در فلوتاسیون نیز بکار می رود و در انتخابی بودن فلوتاسیون نقش بسزایی دارد. از سیلیکات سدیم بعنوان بازداشت کننده و متفرق کننده هماتیت با غلظت ۱۱/۵ درصد استفاده می شود. سیلیکات سدیم در حقیقت خانواده ای از ترکیبات شیمیایی با فرمول عمومی $mSiO_2$ ، Na_2O است که در آن m، مدول سیلیکات سدیم می باشد. از جمله بازدارنده های دیگر بکار رفته اکسید های آهن در فلوتاسیون معکوس هماتیت، می توان به نشاسته ها اشاره کرد. ترکیب نشاسته به صورت $(C_6H_{10}O_5)_n$ است که n تعداد واحد های دی گلوکز است [۸].

بحث و نتایج

الف- تعیین نوع کلکتور مناسب

در طراحی بعمل آمده جهت انجام آزمایشها، برای تعیین نوع کلکتور مناسب، چهار نوع کلکتور موجود در

مقدار کلکتور-کف ساز تا حد معینی (۱۰۰ گرم بر تن)، حبابهای کوچکتری ایجاد می شود و بنابر این در یک نرخ هوادهی معین تعداد حبابها افزایش یافته و در نتیجه نرخ حمل افزایش می یابد و بازیابی فسفر در سر ریز زیاد می شود (شکل (۲)). اگر مقدار کلکتور-کف ساز همچنان زیاد شود (۱۵۰ گرم بر تن)، احتمالاً کلکتورها تشکیل همی میسل داده و از سیستم فلوتاسیون خارج می شوند و در نتیجه بازیابی فسفر کاهش می یابد. باتوجه به شکل (۲)

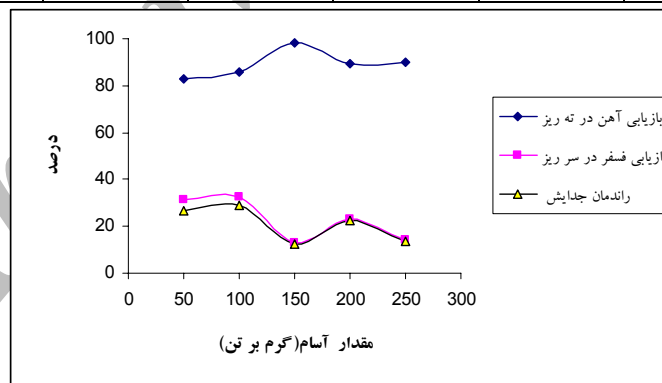
که تاثیر مقدار آسام را بر بازیابی آهن در ته ریز و بازیابی فسفر در سر ریز و بازدهی جدایش فسفر را نشان می دهد، بهترین مقدار آسام، ۱۰۰ گرم بر تن می باشد. (مقدار مصرف سیلیکات ۸۰۰ گرم بر تن می باشد) زیرا در عین اینکه راندمان جدایش و بازیابی فسفر در سر ریز در این مقدار ماکزیمم است، بازیابی آهن در ته ریز نیز قابل قبول است.

جدول ۲: مقادیر سطوح انتخاب شده برای کلکتور- کف ساز.

نوع مواد شیمیایی	سطح اول (g/t)	سطح دوم (g/t)	سطح سوم (g/t)	سطح چهارم (g/t)	سطح پنجم (g/t)
آسام	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰
اتراک	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰
آسام+ اتراک	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰
کوپلیمر	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰	۳۵۰	۴۰۰

جدول ۳: نتایج آزمایش های مربوط به آسام.

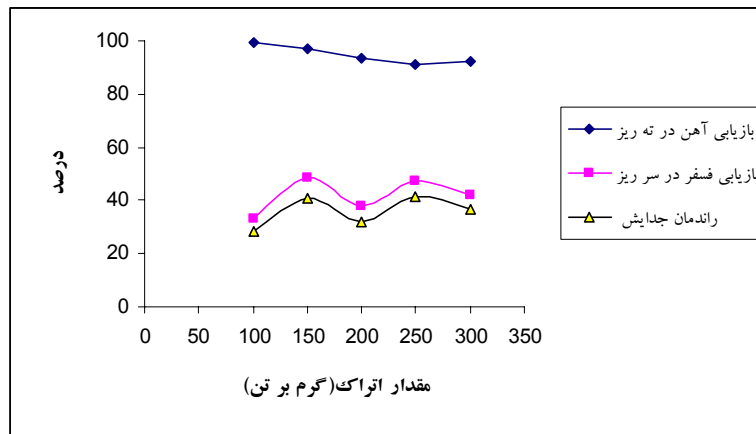
شماره آزمایش	عیار آهن ته ریز (%)	عیار فسفر ته ریز (%)	عیار آهن سر ریز (%)	عیار فسفر سر ریز (%)	بازیابی آهن ته ریز (%)	بازیابی فسفر سر ریز (%)	راندمان جدایش فسفر (%)
۱	۶۲/۹۶	۰/۳۴	۴۴/۳۴	۲/۷۵۷	۸۳/۰۲	۳۱/۳۷	۲۶/۸۹
۲	۶۲/۹۶	۰/۳۳۱	۴۲/۱۳	۳/۶۷۴	۸۵/۵۸	۳۲/۳۴	۲۹/۱۱
۳	۶۳/۷۷	۰/۳۱	۴۱/۸۷	۴/۸۳۸	۹۸/۱۸	۱۳/۰۲	۱۲/۳۵
۴	۶۳/۷۴	۰/۳۶۶	۳۵/۶۲	۷/۰۷۵	۸۹/۲۹	۲۳/۱۶	۲۲/۳۱
۵	۶۲/۹۸	۰/۴۰۶	۳۶/۹۲	۵/۷۲۵	۸۹/۸۵	۱۴/۴۶	۱۳/۰۷



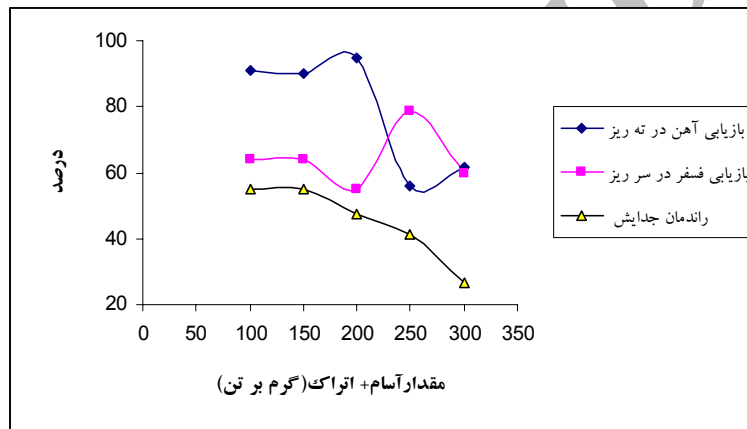
شکل ۲: تاثیر مقدار آسام بر بازیابی آهن و فسفر و راندمان جدایش آپاتیت.

جدول ۴: نتایج آزمایش های مربوط به اتراک.

شماره آزمایش	عیار آهن ته ریز (%)	عیار فسفر ته ریز (%)	عیار آهن سر ریز (%)	عیار فسفر سر ریز (%)	بازیابی آهن ته ریز (%)	بازیابی فسفر سر ریز (%)	راندمان جدایش فسفر (%)
۱	۶۲/۵	۰/۳۵۱	۴۴/۴۶	۲/۹۵۹	۹۹/۴۹	۳۳/۱۷	۲۸/۵۴
۲	۶۲/۹۱	۰/۲۸۱	۴۹/۱۹	۲/۶۳۱	۹۶/۹	۴۸/۵۳	۴۰/۷۱
۳	۶۳/۳۶	۰/۳۳۱	۵۰/۷۹	۲/۷۱	۹۳/۵۹	۳۷/۸۹	۳۲
۴	۶۳/۶۷	۰/۲۸۱	۵۱/۵	۳/۲۳۸	۹۱/۱۸	۴۷/۴۷	۴۱/۵۵
۵	۶۳/۵۱	۰/۳۰۷	۵۱/۵۶	۳/۲۴	۹۲/۱۱	۴۲/۰۹	۳۶/۸۵



شکل ۳: تاثیر مقدار اتراک بر بازیابی آهن و فسفر و راندمان جدایش آپاتیت.



شکل ۴: تاثیر مقدار آسام + اتراک بر بازیابی آهن و فسفر و راندمان جدایش آپاتیت.

جدول ۵: نتایج آزمایش های مربوط به آسام + اتراک.

شماره آزمایش	عیار آهن ته ریز (%)	عیار فسفر ته ریز (%)	عیار آهن سر ریز (%)	عیار فسفر سر ریز (%)	بازیابی آهن ته ریز (%)	بازیابی فسفر سر ریز (%)	راندمان جدایش فسفر (%)
۱	۶۴/۷۱	۰/۱۹۹	۴۵/۶۹	۲/۹۳۹	۸۹/۹۱	۶۴/۳۳	۵۵/۱۹
۲	۶۴/۱	۰/۱۹۹	۵۰/۲۸	۲/۹۳۹	۹۰/۹۹	۶۴/۳۳	۵۵/۱۹
۳	۶۳/۵	۰/۲۴۵	۴۷/۴۱	۲/۶۴۹	۹۴/۶۶	۵۵/۱۹	۴۷/۴۵
۴	۶۴/۰۷	۰/۳۰۳	۵۹/۸۲	۰/۸۷۳	۶۱/۶۳	۵۹/۶۰	۲۶/۶
۵	۶۴/۳۵	۰/۱۷۳	۶۰/۰۴	۱/۰۱	۵۵/۷۸	۷۸/۳۸	۴۱/۳۴

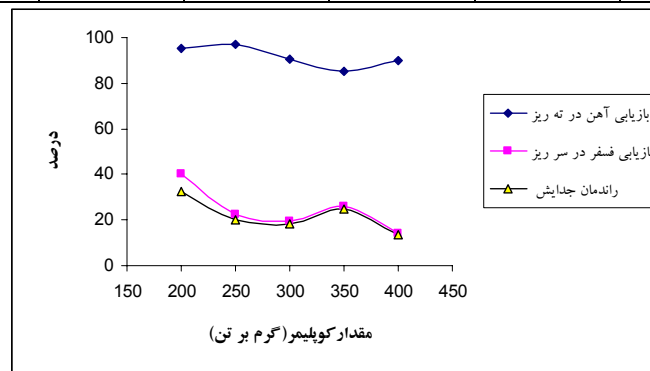
مقادیر ۲۵۰ و ۳۰۰ گرم بر تن بازیابی آهن در ته ریز بسیار پایین می باشد و بازیابی فسفر در سر ریز نیز در مقادیر ۱۰۰ و ۲۰۰ گرم بر تن اتراک + آسام، نسبت به مقدار ۱۵۰ گرم بر تن پایینتر می باشد. شکل (۵) تاثیر مقدار کوپلیمر را بر بازیابی آهن در ته ریز و بازیابی فسفر در سر ریز و راندمان جدایش فسفر نشان می دهد. با توجه به اشکال مزبور، بهترین مقدار کوپلیمر، مقدار ۲۰۰ گرم بر تن است.

شکل (۳) تاثیر مقدار اتراک را بر بازیابی آهن در ته ریز و بازیابی فسفر در سر ریز و راندمان جدایش فسفر نشان می دهد. به همین ترتیب با توجه به نمودار زیر بهترین مقدار اتراک ۱۵۰ گرم بر تن می باشد.

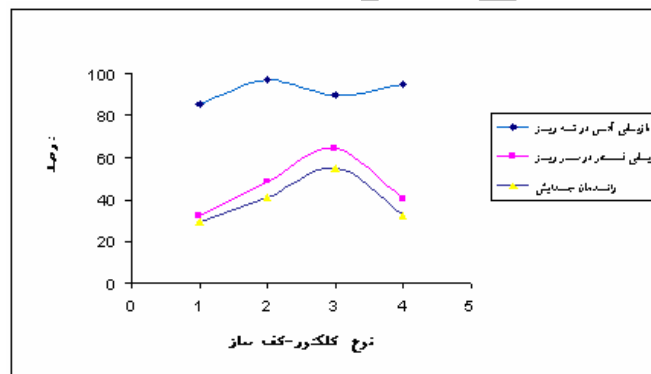
شکل (۴) تاثیر مقدار اتراک + آسام را بر بازیابی آهن در ته ریز و بازیابی فسفر در سر ریز و راندمان جدایش فسفر نشان می دهد که با توجه به نمودارهای مربوط بهترین مقدار اتراک + آسام ۱۵۰ گرم بر تن می باشد. زیرا در

جدول ۶: نتایج آزمایش های مربوط به کوپلیمر.

شماره آزمایش	عیار آهن ته ریز (%)	عیار فسفر ته ریز (%)	عیار آهن سر ریز (%)	عیار فسفر سر ریز (%)	بازیابی آهن ته ریز (%)	بازیابی فسفر سر ریز (%)	راندمان جدایش (%)
۱	۶۳/۱۳	۰/۳۲۴	۵۰/۸۱	۲/۳۳۱	۹۴/۹۷	۴۰/۲۸	۳۲/۷۷
۲	۵۹/۶۷	۰/۳۷۴	۴۰/۰۳	۳/۹۶۱	۹۶/۸۸	۲۲/۳۷	۲۰/۳۵
۳	۶۲/۰۳	۰/۳۸۵	۳۸/۶۹	۴/۷۸۱	۹۰/۸۰	۱۹/۴۸	۱۸/۱۳
۴	۶۳/۱۹	۰/۳۵۵	۴۱/۸۴	۶/۲۰۶	۸۵/۲۶	۲۵/۷۸	۲۴/۵۹
۵	۶۲/۹۸	۰/۴۰۶	۳۶/۹۲	۵/۷۲۵	۸۹/۸۵	۸۹/۸۵	۱۳/۷۰



شکل ۵: تاثیر مقدار کوپلیمر بر بازیابی آهن و فسفر و راندمان جدایش آپاتیت.



شکل ۶: مقایسه ای بین انواع کلکتورها.

ساز، آسام-اتراکمی باشد.

ب- تعیین نوع بازداشت کننده مناسب

بازداشت کننده های موجود در سه سطح متفاوت با مقدار ثابت کلکتور آسام+اتراک (۱۵۰ گرم بر تن) آزمایش می شوند تا نوع مناسب بازداشت کننده نیز شناسایی شود. جدول (۷) سطوح بازداشت کننده های موجود برای تعیین نوع بهینه بازداشت کننده را نشان می دهد. با توجه به شکل (۷) که تاثیر مقدار سیلیکات را بر بازیابی آهن در ته ریز و بازیابی فسفر در سر ریز و راندمان جدایش فسفر نشان می دهد، بهترین مقدار سیلیکات، در صورتی که از ۱۵۰ گرم بر تن آسام-اتراک استفاده شود، ۸۰۰ گرم بر تن بدست می آید.

با توجه به جداول فوق، بهترین مقدار آسام ۱۰۰ گرم بر تن، اتراک ۱۵۰ گرم بر تن، آسام + اتراک ۱۵۰ گرم بر تن و کوپلیمر نیز ۲۰۰ گرم بر تن می باشد. برای تعیین نوع بهینه کلکتور- کف ساز، در شکل (۶) مقایسه ای بین چهار نوع کلکتور در مقادیری که بهترین نتایج را نتیجه داده اند، انجام می شود. در شکل برای سادگی، از شماره های ۱ و ۲ و ۳ و ۴ به ترتیب برای کلکتورهای آسام، اتراک، اتراک + آسام و کوپلیمر استفاده شده است. با توجه به شکل (۶)، بازیابی فسفر در سر ریز و راندمان جدایش فسفر برای کلکتور نوع ۳ بیشتر از انواع دیگر کلکتور است و بازیابی آهن در ته ریز نیز برای کلکتور نوع ۳ هر چند کمتر از کلکتورهای نوع ۲ و ۴ می باشد، ولی تفاوت مقادیر آنها خیلی کم است. در نتیجه، نوع مناسب کلکتور- کف

فسفر کاهش می یابد، یعنی افزایش مقدار بازداشت کننده اثر منفی بر فلوتاسیون دارد. بنابراین بهترین مقدار نشاسته + دکسترین، در صورتی که از ۱۵۰ گرم بر تن آسام-اتراک استفاده شود، ۳۰۰ گرم بر تن بدست می آید.

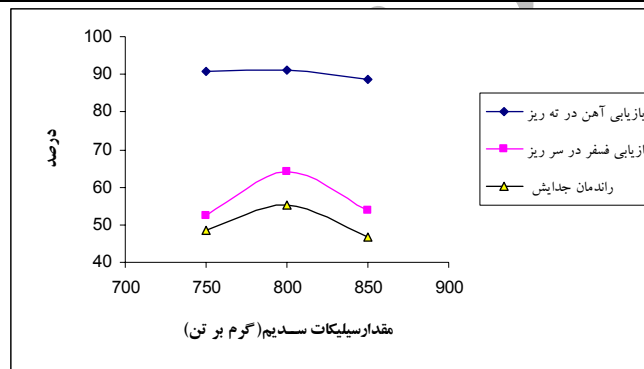
باتوجه به شکل (۸) که تاثیر مقدار نشاسته + دکسترین را بر بازیابی آهن در ته ریز و بازیابی فسفر در سر ریز و راندمان جدایش فسفر نشان می دهد، با افزایش میزان بازداشت کننده، بازیابی فسفر در سر ریز و راندمان جدایش

جدول ۷: مقادیر سطوح انتخاب شده برای بازداشت کننده.

نوع مواد شیمیایی	سطح اول (g/t)	سطح دوم (g/t)	سطح سوم (g/t)
سیلیکات سدیم	۷۵۰	۸۰۰	۸۵۰
نشاسته + دکسترین	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰

جدول ۸: نتایج آزمایش های مربوط به سیلیکات سدیم.

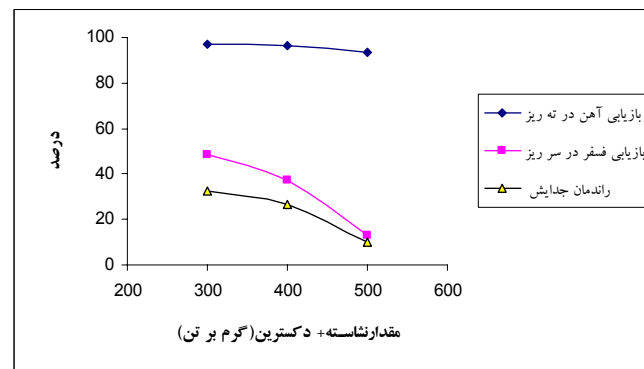
شماره آزمایش	عیار آهن ته ریز (%)	عیار فسفر ته ریز (%)	عیار آهن سر ریز (%)	عیار فسفر سر ریز (%)	بازیابی آهن سر ریز (%)	بازیابی فسفر سر ریز (%)	راندمان جدایش فسفر (%)
۱	۶۳/۹۵	۰/۱۵۹	۵۱/۳	۳/۲۲	۹۰/۷۲	۵۲/۶	۴۸/۴۱
۲	۶۴/۷۱	۰/۱۹۹	۴۵/۶۹	۲/۹۳۹	۹۰/۹۹	۶۴/۳۳	۵۵/۱۹
۳	۶۳/۸	۰/۱۶	۵۴/۱۸	۲/۱۱۳	۸۸/۴۷	۵۳/۷۶	۴۶/۶۴



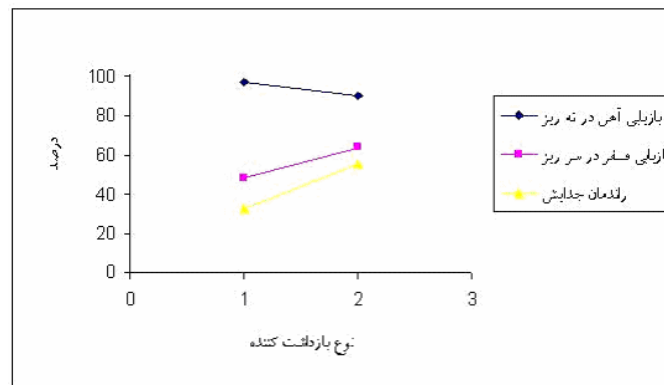
شکل ۷: تاثیر مقدار سیلیکات سدیم بر بازیابی آهن و فسفر و راندمان جدایش آپاتیت.

جدول ۹: نتایج آزمایش های مربوط به ترکیب نشاسته + دکسترین.

شماره آزمایش	عیار آهن ته ریز (%)	عیار فسفر ته ریز (%)	عیار آهن سر ریز (%)	عیار فسفر سر ریز (%)	بازیابی آهن سر ریز (%)	بازیابی فسفر سر ریز (%)	راندمان جدایش فسفر (%)
۱	۶۲/۶۵	۰/۲۹۸	۵۵/۳۱	۱/۳۸۳	۹۷/۲۲	۴۸/۴۹	۳۲/۶۶
۲	۶۲/۹۵	۰/۳۴	۵۱/۵۶	۱/۵۵۶	۹۶/۱۶	۳۷/۵۱	۲۶/۷۶
۳	۶۳/۰۷	۰/۲۸۵	۵۵/۴۵	۱/۴۶۶	۹۳/۶	۱۲/۸۸	۱۰/۳



شکل ۸: تاثیر مقدار نشاسته + دکسترین بر بازیابی آهن و فسفر و راندمان جدایش آپاتیت.



شکل ۹: مقایسه ای بین دو نوع بازدهت کننده.

جدول ۱۰: سطوح انتخاب شده برای روش تاگوچی.

۸۵۰	۸۰۰	۷۵۰	میزان سیلیکات (گرم بر تن)
۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰	میزان آسام-اتراک (گرم بر تن)
۷۰/۳۰	۵۰/۵۰	۳۰/۷۰	نسبت آسام به اتراک

جدول ۱۱: نتایج نهایی بهینه سازی.

شماره	میزان سیلیکات (گرم بر تن)	میزان آسام-اتراک (گرم بر تن)	نسبت آسام به اتراک	عیار فسفر خوراک (%)	عیار فسفرته ریز (%)	عیار فسفر سر ریز (%)	راندمان جدایش (%)
۱	۷۵۰	۱۰۰	۳۰/۷۰	۰/۳۱۸	۰/۲۹۱	۲/۹۴۵	۸/۵۸
۲	۷۵۰	۱۵۰	۵۰/۵۰	۰/۳۴۱	۰/۲۹۷	۱/۲۰۷	۱۲/۵۶
۳	۷۵۰	۲۰۰	۷۰/۳۰	۰/۴۶۹	۰/۳۵۵	۶/۲۰۶	۲۴/۵۹
۴	۸۰۰	۱۰۰	۵۰/۵۰	۰/۴۹۶	۰/۱۹۹	۲/۹۳۹	۵۵/۱۹
۵	۸۰۰	۱۵۰	۷۰/۳۰	۰/۳۱۸	۰/۱۸۹	۲/۹۴۲	۳۹/۴۹
۶	۸۰۰	۲۰۰	۳۰/۷۰	۰/۳۴۱	۰/۲۴	۲/۹۳	۲۹/۱۶
۷	۸۵۰	۱۰۰	۷۰/۳۰	۰/۳۴۱	۰/۱۷۸	۲/۴۵۶	۴۵/۴
۸	۸۵۰	۱۵۰	۳۰/۷۰	۰/۳۱۸	۰/۲۸۱	۱/۵۰۳	۱۱/۵۲
۹	۸۵۰	۲۰۰	۵۰/۵۰	۰/۳۴۱	۰/۲۲۴	۲/۹۳۹	۳۳/۵۸

ج- بهینه سازی میزان مصرف مواد شیمیایی

برای طراحی آزمایشات در مرحله بهینه سازی مقدار مواد شیمیایی از روش طراحی آماری تاگوچی استفاده شده است که در این روش، ابتدا باید عوامل موثر بر متغیر پاسخ که در این مقاله راندمان جدایش آپاتیت است، تعیین شود. با توجه به پیشینه تحقیق، عوامل موثر بر راندمان جدایش شامل میزان مصرف آسام-اتراک و نسبت آنها، میزان مصرف سیلیکات سدیم، درصد جامد در پالپ، زمان آماده سازی و pH است. همانطور که قبلا نیز ذکر شد، درصد جامد، pH و زمان آماده سازی خوراک ثابت است. بنابراین عوامل موثر باقی مانده بر راندمان جدایش، ۳ عامل میزان مصرف آسام-اتراک و نسبت آنها و میزان مصرف سیلیکات سدیم خواهد بود. در ضمن بین این عوامل هیچ گونه اثر متقابلی نیز وجود ندارد [۱۳]. جدول (۱۰)

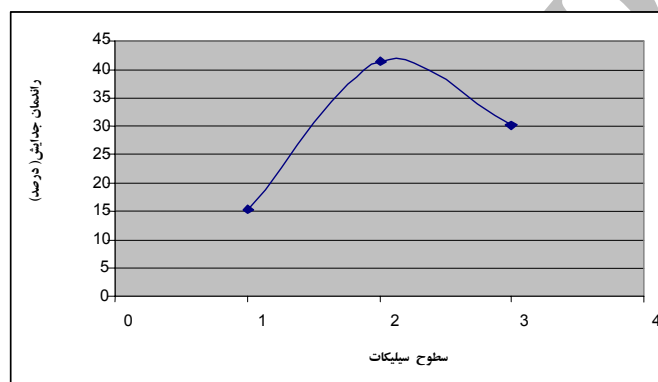
برای تعیین نوع بهینه بازدهت کننده، در شکل (۹) مقایسه ای بین دو نوع بازدهت کننده انجام می شود. در شکل مذکور برای سادگی، از شماره های ۱ و ۲ به ترتیب برای بازدهت کننده های نشاسته+دکسترین و سیلیکات سدیم استفاده شده است. با توجه به شکل نوع مناسب بازدهت کننده، سیلیکات سدیم می باشد. زیرا میزان بازیابی فسفر در سر ریز و راندمان جدایش فسفر در هنگام استفاده از سیلیکات، به مراتب بیش از میزان آنها در هنگام استفاده از نشاسته+دکسترین است و بازیابی آهن در ته ریز نیز اگر چه در هنگام استفاده از سیلیکات کمتر است، ولی چون بازیابی جرمی آهن در ته ریز بالا می باشد (در هنگام آزمایش، جرم مواد در درون ظرف سر ریز نسبت به ظرف ته ریز ناچیز می باشد)، بازیابی عیاری تاثیر چندانی ندارد.

میزان سیلیکات سدیم: ۸۰۰ گرم بر تن (سطح دوم)
 میزان آسام - اتراک: ۱۰۰ گرم بر تن (سطح اول)
 نسبت آسام به اتراک: ۷۰/۳۰ (سطح سوم)

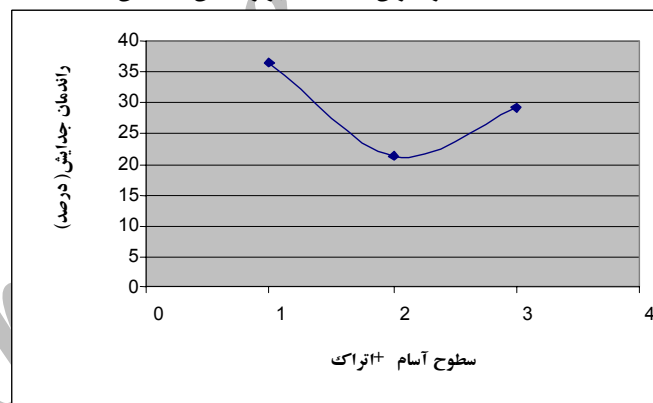
که در این شرایط، راندمان جدایش در شرایط بهینه حدود ۵۶ درصد بدست می آید. فاصله اطمینان پاسخ نیز با استفاده از نرم افزار ۴/۶۱ +/- بدست آمد. در شرایط بهینه آزمایش تاییدی انجام شد و با توجه به اینکه راندمان جدایش بدست آمده از آزمایش (۵۶/۱۷) در بازه ارائه شده قرار گرفت، می توان به صحت طراحی و نتایج آنالیزها پی برد.

سطوح انتخاب شده برای طراحی آزمایش با روش تاگوچی را نشان می دهد [۱۴]. جدول (۱۱) شرایط و نتایج آزمایشها را نشان می دهد. همچنین اشکال (۱۰) و (۱۱) و (۱۲) تاثیر عوامل سه گانه را بر راندمان جدایش نشان می دهد.

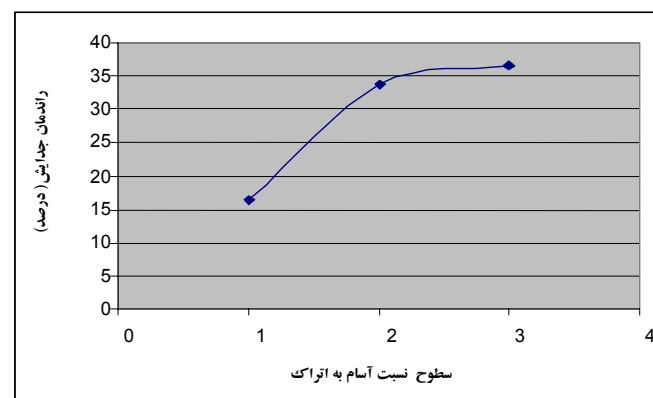
درصد تاثیر هر یک از عوامل بر راندمان جدایش و آنالیز واریانس، با بکارگیری نرم افزار Qualitek-4 محاسبه شده است. نتایج حاصل از این آنالیز در جدول (۱۲) آمده است. با توجه به نمودارها و نتایج آنالیز واریانس، شرایط بهینه به صورت زیر انتخاب می شود:



شکل ۱۰: تاثیر میزان سیلیکات بر راندمان جدایش.



شکل ۱۱: تاثیر میزان آسام + اتراک بر راندمان جدایش.



شکل ۱۲: تاثیر نسبت آسام به اتراک بر راندمان جدایش.

جدول ۱۲: نتایج آنالیز واریانس با استفاده از نرم افزار.

فاکتور	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	نسبت F	مجموع خالص	درصد تاثیر عوامل
سیلیکات	۲	۱۰۲۴/۱۱۹	۵۱۲/۰۵۹	۶۵/۵۹۳	۱۰۰۸/۵۰۶	۴۸/۰۶۸
آسام + اتراک	۲	۳۴۶/۷۴۶	۱۷۳/۳۸۲	۲۲/۲۰۹	۳۳۱/۱۵۱	۱۵/۷۸۳
نسبت آسام به اتراک	۲	۷۱۱/۵۷۳	۳۵۵/۷۸۶	۴۵/۵۷۵	۶۹۵/۹۶	۳۳/۱۷۱
خطا	۲	۱۵/۶۱۲	۷/۸۰۶	-	-	۲/۹۷۸
مجموع	۸	۲۰۹۸/۰۷	-	-	-	۱۰۰

جدول ۱۳: مقایسه نتایج فلوتاسیون هماتیت به روش معمولی (آزمایشگاهی صنعتی) و ستونی (آزمایشگاهی).

نوع فلوتاسیون	فلوتاسیون مکانیکی آزمایشگاهی	فلوتاسیون ستونی آزمایشگاهی	فلوتاسیون مکانیکی صنعتی (چادر ملو) رافر
بازیابی آهن در ته ریز (%)	۹۳/۹۴	۹۷/۳۷	۹۵/۸۸
بازیابی فسفر در سر ریز (%)	۵۶/۴۶	۵۸/۳۹	۵۶
عیار فسفر در ته ریز (درصد)	۰/۱۹۶	۰/۱۴۷	۰/۱۵۵

مقایسه بین عملکرد متالورژیکی کارخانه

فرآوری چادرملو و ستون آزمایشگاهی

فلوتاسیون نمونه مورد نظر با سلولهای مکانیکی آزمایشگاهی نیز انجام گرفته است. اگر ستون در یک شرایط مشخص، نتایج بهتری را نسبت به سلولهای آزمایشگاهی ارائه دهد، بمفهوم این است که برای این شرایط ستون برتر از سلولهای مکانیکی معمولی است.

به منظور مقایسه نتایج فلوتاسیون ستونی با فلوتاسیون معمولی، یک آزمایش توسط ماشین فلوتاسیون معمولی مدل دنور نیز انجام شد. در این آزمایش شرایط آماده سازی خوراک مشابه شرایط آماده سازی نمونه برای ستون در نظر گرفته شده تا نتایج این آزمایشها با نتایج آزمایشهای روش ستونی قابل مقایسه باشند. نتایج حاصل از این آزمایش با شرایط بهینه در روش فلوتاسیون ستونی به همراه نتایج صنعتی (کارخانه چادرملو) در جدول (۱۳) با یکدیگر از لحاظ شرایط متالورژیکی مقایسه شده اند.

همانطور که از نتایج مندرج در جدول (۱۳) پیداست سلول ستونی آزمایشگاهی عیار و بازیابی بیشتری نسبت به سلول مکانیکی آزمایشگاهی و صنعتی از خود نشان میدهد هر چند عیار فسفر کنسانتره آهن حاصل هنوز بیشتر از حد مجاز است ولی در مجموع عملکرد آن بهتر

از روش معمولی است.

البته بدیهی است که بزرگ مقیاس نمودن ستون آزمایشگاهی و بدست آوردن نتایج مشابه در صنعت مستلزم وقت و هزینه زیادی است که باید در تبدیل روش فلوتاسیون معمولی به ستونی مد نظر قرار گیرد.

نتیجه گیری

در این مقاله، نوع و مقدار موادشیمیایی مصرفی در فلوتاسیون ستونی هماتیت در معدن چادرملو بهینه شد. در بهینه سازی نوع کلکتور از بین کلکتورهای موجود (آسام، اتراک، ترکیب آسام و اتراک و کوپلیمر)، کلکتور آسام + اتراک و در بهینه سازی نوع بازداشت کننده از بین بازداشت کننده های موجود (سیلیکات سدیم و ترکیب دکسترین و نشاسته) سیلیکات سدیم انتخاب شد. در مرحله بعد برای بهینه سازی مقدار مواد مصرفی و تجزیه و تحلیل نتایج از روش طراحی آزمایش تاکوچی استفاده گردید. در زیر شرایط بهینه پارامترهای بدست آمده، آورده شده است:

میزان سیلیکات سدیم: ۸۰۰ گرم بر تن

میزان آسام - اتراک: ۱۵۰ گرم بر تن

نسبت آسام به اتراک: ۷۰/۳۰

درصد جامد خوراک: ۲۵ درصد

و بدست آوردن نتایج مشابه در صنعت مستلزم وقت و هزینه زیادی است که باید به آن توجه شود. در آزمونهای انجام گرفته، تاثیر بازداشت کننده سیلیکات سدیم با میزان ۴۸ درصد برتر از سایر عوامل تشخیص داده شد. میزان تاثیر نسبت آسام به اتراک با ۳۳ درصد و مقدار آسام - اتراک با ۱۵ درصد در مراحل بعدی قرار دارند.

تقدیر و تشکر

از دانشگاه تربیت مدرس، مجتمع صنعتی- معدنی چادرملو و مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی یزد به جهت فراهم آوری امکان انجام این تحقیق تقدیر و تشکر می گردد.

pH : ۱۰-۱۰/۵
زمان آماده سازی خوراک: ۱۵ دقیقه
در این شرایط، عیار آهن و فسفر در ته ریز (کنسانتره) به ترتیب، ۶۵/۰۵ و ۰/۱۴۷ درصد، و در سرریز به ترتیب، ۳۱/۸۹ و ۵/۷۲۵ درصد بدست آمد که در چنین شرایطی، بازیابی آهن در ته ریز برابر ۹۷/۳۷ درصد و بازیابی فسفر در سرریز برابر ۵۸/۳۹ درصد و راندمان جدایش آپاتیت حدود ۵۶ درصد محاسبه شد.

هر چند نتایج فلوتاسیون ستونی (عیار فسفر در ته ریز برابر ۰/۱۴۷ درصد) در مقایسه با روش فلوتاسیون معمولی بهتر است (عیار فسفر در ته ریز ۰/۱۹۶ درصد) ولی هنوز میزان آن از حد مجاز بیشتر است و نیاز به تحقیق بیشتری دارد. علاوه بر آن بزرگ مقیاس نمودن ستون آزمایشگاهی

مراجع

- 1 - Finch, J. A. (1990). *Column Flotation*, Pergamon Press, New York.
- 2 - Wheeler, D. A. (1988). "Historical view of column flotation development, in column flotation 88." *SME Annual Meeting*, Phoenix, Arizona, USA.
- 3 - Sandvik, K. L. and Nybo, A. S. (1990). "Reverse flotation to low impurity levels by column flotation." *Mineral processing Engineer*, Norway.
- 4 - Viana, P. R. M. and Rabelo, P. J. B. (1991). "Column flotation for the expansion of the flotation circuit at Samarco, Mineracao, Brazil." *Flotation 91*, PP. 89-99.
- 5 - Mohanty, M. K. and Honaker, R. Q. (1999). "A comparative evaluation of the leading advanced flotation technologies." *Mineral Engineering*, Vol. 12, No. 1, PP.1-13.
- 6 - Uang, D. C. (1988). "New packed column flotation development." *In Column flotation 88, SME Annual Meeting*, Phoenix, Arizona.
- ۷- رضایی، ب. "فلوتاسیون." دانشگاه هرمزگان، چاپ دوم، (۱۳۷۸).
- ۸- معاونت مهندسی و بهره وری مجتمع چادرملو، "گزارش شرح فرایند و تجهیزات خطوط تولید مجتمع." (۱۳۷۴).
- 9 - Xu, M., Quinn, P. and Stratton-Crawley, M. (1996). "A feed-line aerated flotation column." *Minerals Engineering*, Vol. 9, No. 5, PP.499-507.
- ۱۰- بارانی بیرانوند، ک. "بررسی عوامل موثر بر فلوتاسیون ستونی هماتیت کارخانه فرآوری چادرملو." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۸۲).
- 11 - Kobe Steel Ltd. (2000). *Technical Specification for sodium hydroxide*.
- 12 - Kobe Steel Ltd. (2000). *Technical Specification for collector and frother*.
- ۱۳- شفاغی، س. ض. "مطالعه و بررسی نحوه کاهش در صد سیلیس در کنسانتره آهن چادرملو." گزارش کارتحقیقاتی ارائه شده به کارخانه فرآوری چادرملو، (۱۳۸۲).
- 14 - Taguchi, G. (1987). *System of Experimental Design*, Vol. 1, 2 KRAVS International Publication.