

## بهینه سازی غلظت مواد شیمیایی در فلوتاسیون مس مجتمع شهر بابک با استفاده از طراحی آماری

سعید قدرتی<sup>۱</sup>، محمود عبداللهی<sup>۲\*</sup>، سید محمد جواد کلینی<sup>۳</sup>، محمود حکمتی<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد فراوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس؛ saeed.ghodrati64@gmail.com

۲. استاد فراوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس؛ minmabd@modares.ac.ir

۳. دانشیار فراوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس؛ koleini@modares.ac.ir

۴. سرپرست کنترل فرایند، مجتمع مس شهر بابک؛ hekmati@nicico.com

چکیده	مشخصات مقاله
<p>تاثیر کلکتورهای Z11، Flomin و A3477 به همراه کف‌سازهای A65 و A70 بر بازیابی فلوتاسیون مس مجتمع شهر بابک مورد بررسی قرار گرفت. زمان مناسب برای شناورسازی مس با استفاده از آزمون‌های سینتیکی ۱۰ دقیقه بدست آمد. در ادامه با استفاده از روش‌های آماری غلظت مواد شیمیایی استفاده شده در مدار رمق‌گیر رافر به منظور دستیابی به حداکثر میزان بازیابی در مقیاس آزمایشگاهی بهینه شد. با توجه به نتایج بدست آمده ۸/۹۹ گرم بر تن Z11، ۲۲/۸۰ گرم بر تن Flomin، ۵/۰۵ گرم بر تن A3477، ۱۲/۵۲ گرم بر تن A65 و ۷/۶۸ گرم بر تن A70 به عنوان مقادیر شرایط بهینه جهت رسیدن به حداکثر بازیابی (۹۱/۳۱ درصد) تعیین گردید. مهم‌ترین عامل تاثیرگذار بر بازیابی کف‌ساز A70 بود در حالی که میزان غلظت Z11 و A65 تاثیر چندانی بر بازیابی نداشت.</p>	<p>تاریخچه مقاله: دریافت: ۳ اردیبهشت ۹۱ دریافت پس از اصلاح: ۸ شهریور ۹۱ پذیرش نهایی: ۲۲ شهریور ۹۱</p> <p>کلمات کلیدی: فلوتاسیون بهینه سازی مجتمع مس شهر بابک مواد شیمیایی</p>

## ۱- مقدمه

شدن عیار هر جبهه کار، اختلاط نمونه‌ها با توجه به برنامه خوراک دهی معدن، انجام گرفت و نمونه‌ها به منظور استفاده در آزمون‌های فلوتاسیون، تقسیم و بسته‌بندی شدند.  $d_{80}$  خوراک موردنیاز برای انجام آزمون‌های فلوتاسیون، برابر  $d_{80}$  نمونه‌های سرریز سیکلون‌های اولیه تعیین شد و با استفاده از آزمون‌های خردایش آزمایشگاهی، زمان موردنیاز برای رسیدن به آن بدست آمد. در ادامه برای محاسبه زمان مناسب برای شناورسازی ذرات، آزمون سینتیکی انجام گرفت. برای طراحی آزمون‌های بهینه‌سازی غلظت مواد شیمیایی برای رسیدن به حداکثر بازیابی، نرم‌افزار Design Expert 7 استفاده شد. سلول فلوتاسیون ۵ لیتری دنور برای انجام آزمون‌ها مورد استفاده قرار گرفت. کلکتورهای Z11 (سدیم ایزوپروپیل گزنات)، Flomin (تیونوکربامات) و A3477 (دی‌تیوفسفات) و کفسازهای A65 (پلی پروپیلن گلیکول) و A70 (متیل ایزو بوتیل کربونیل) و آهک به عنوان تنظیم‌کننده pH از مجتمع مس شهربابک تهیه گردید. عیارسنجی نمونه‌های کنسانتره و باطله هر آزمون و تکرار برخی از نتایج، در آزمایشگاه مجتمع مس شهربابک و دانشگاه تربیت مدرس به روش جذب اتمی و تیتراسیون انجام گرفت. در تحلیل نتایج نیز مدل سطح پاسخ (Response Surface) و طرح مرکب مرکزی (Central Composite Design) به کار گرفته شد.

## ۳- نتایج و بحث

## ۳-۱- نمونه‌برداری و آماده سازی نمونه‌ها

نمونه‌های برداشت شده از جبهه کارهای معدن، توسط سنگ شکن فکی آزمایشگاهی خرد شده و از سرند ۴ میلی‌متری عبور داده شد. بخش باقیمانده بر روی سرند، دوباره وارد سنگ‌شکن می‌شود. پس از مشخص شدن عیار هر جبهه کار، اختلاط نمونه‌ها برای تهیه خوراک نهایی با عیار ۰/۹ که عیار معمول خوراک کارخانه تغلیظ است انجام گرفت. عیار ماده معدنی جبهه کارهای نمونه برداری شده و ضرایب اختلاط آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

برای تعیین دانه‌بندی سرریز سیکلون‌های اولیه که خوراک سلول‌های رمق‌گیر رافر محسوب می‌شود، در هر روز پنج نمونه به فاصله ۳۰ دقیقه از هم از سرریز برداشته شد و نمونه‌برداری تا ۱۵ روز ادامه یافت. نمونه هر روز به صورت جداگانه آنالیز سرندی شده و  $d_{80}$  آن محاسبه شد و در انتها میانگین اعداد بدست آمده به عنوان  $d_{80}$  نهایی سرریز در نظر گرفته شد که برابر با ۱۰۰ میکرون بود. بنابراین  $d_{80}$  خوراک مورد نیاز برای

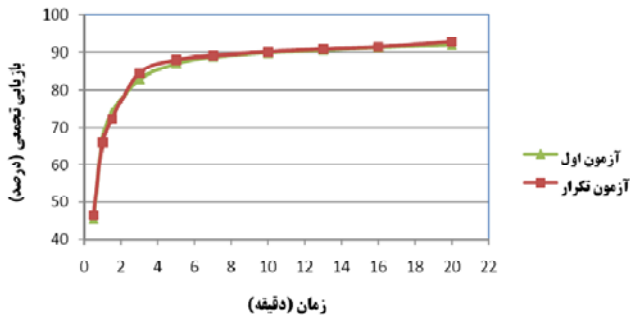
فلوتاسیون فرایندی فیزیکی-شیمیایی می‌باشد که از آن برای جداسازی ذرات با ارزش از باطله با استفاده از اختلاف خواص آبرانی آن‌ها استفاده می‌شود. عوامل مختلفی در کارایی فلوتاسیون تاثیر می‌گذارند که نوع و مقدار مواد شیمیایی از مهم‌ترین این عوامل به شمار می‌روند. نوع مواد شیمیایی مورد استفاده برای فراوری کانه‌های مس پرفیری معمولاً شامل آهک به عنوان تنظیم‌کننده، گزنات به عنوان کلکتور اولیه و یک کلکتور ثانویه که معمولاً از میان دی‌تیوفسفات‌ها، مرکاپتان‌ها، تیونوکربامات‌ها و ... انتخاب می‌شود، می‌باشد. انتخاب کفساز نیز بیشتر به نوع کانی‌های بالارزش و باطله موجود در کانه بر می‌گردد. متیل ایزوبوتیل کربونیل (MIBC) از رایج‌ترین کفسازهایی است که در فلوتاسیون مس پرفیری استفاده می‌شود. افزایش بازیابی فلوتاسیون در کارخانه‌های فراوری حتی به میزان بسیار جزئی، از نظر اقتصادی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در طراحی کارخانه تغلیظ مجتمع مس شهربابک (میدوک) برای مرحله رافر ۵ عدد ستون پیش‌بینی شده بود که طبق طراحی اولیه می‌بایست ۷۵ درصد کنسانتره نهایی را تولید کنند ولی متاسفانه بنا به دلایل مختلف این ستون‌ها به هیچ وجه کارایی نداشته و کفگیری از آن‌ها انجام نمی‌شود. این امر باعث افزایش دبی ورودی مواد با ارزش به سلول‌های رمق‌گیر رافر نسبت به مقدار طراحی شده می‌گردد که کاهش کارایی مدار (بازیابی و عیار) را به دنبال دارد. در طی چند سال گذشته تحقیقاتی در مدار رمق‌گیر رافر انجام شده است ولی متاسفانه تعداد اندکی از این تحقیقات به نوع و غلظت مواد شیمیایی که یکی از مهم‌ترین پارامترهای موثر در فلوتاسیون می‌باشد، پرداخته‌اند. هدف از این تحقیق استفاده از تکنیک‌های آماری برای بهینه‌سازی غلظت کلکتورهای Z11 (گزنات)، Flomin (تیونوکربامات) و A3477 (دی‌تیوفسفات) و همچنین کفسازهای A65 (پلی پروپیلن گلیکول) و A70 (متیل ایزوبوتیل کربونیل) در مدار فلوتاسیون رافر-رمق‌گیر مجتمع مس شهربابک جهت رسیدن به حداکثر بازیابی می‌باشد.

## ۲- مواد، روش و تجهیزات

با توجه به این که خوراک کارخانه تغلیظ مجتمع از شش جبهه کار معدن تامین می‌شود، به منظور شبیه‌سازی خوراک آزمون‌های فلوتاسیون با خوراک کارخانه، نمونه‌های مورد نیاز نیز از شش جبهه کار فعال معدن برداشته شد. پس از مشخص

## بهینه سازی غلظت مواد شیمیایی در فلوتاسیون مس مجتمع شهر بابک با استفاده از طراحی آماری

- زمان‌های کف‌گیری: ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۳، ۵، ۷، ۱۰، ۱۳، ۱۶ و ۲۰ دقیقه  
این آزمون ۲ مرتبه تکرار شد که نتایج مربوط به این آزمون‌ها در شکل ۲ آورده شده است.



شکل (۲) منحنی تغییرات بازیابی نسبت به زمان

با توجه به عیارهای لحظه‌ای بدست آمده، عیار نمونه لحظه‌ای گرفته شده از کنسانتره در زمان ۱۰ دقیقه به عیار خوراک (۰/۹) نزدیک می‌شود که با توجه به معیارهای تعیین زمان ماند مناسب، زمان ۱۰ دقیقه به عنوان زمان مناسب برای فلوتاسیون انتخاب شد.

### ۳-۳- آزمایش‌های بهینه‌سازی غلظت مواد شیمیایی

برای طراحی آزمایش‌ها از روش سطح پاسخ و چیدمان طرح مرکب مرکزی استفاده شده است و ضریب  $\alpha$  در این چیدمان ۱ می‌باشد (Face Center). در جدول ۲ پارامترها و سطوح آن‌ها (۳ سطح) قابل مشاهده است.

جدول (۲) سطوح پارامترهای مربوط به طراحی آزمایش

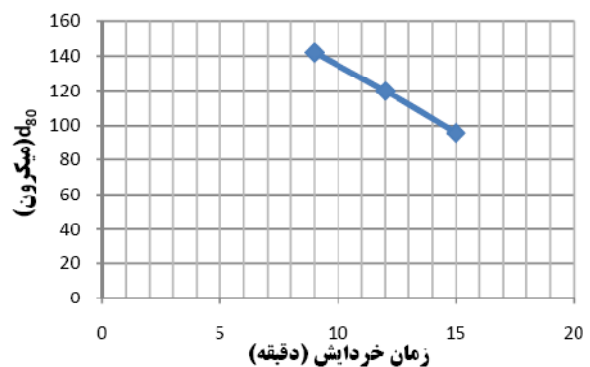
کد	سطح	+۱	۰	-۱
A	غلظت Z11	۹	۵	۱
B	غلظت Flomin	۳۴	۲۴	۱۴
C	غلظت A3477	۱۵	۱۰	۵
D	غلظت A65	۱۵	۱۰	۵
E	غلظت A70	۱۲	۸	۴

سطح مرکزی هر پارامتر با توجه به میانگین غلظت استفاده شده در کارخانه در طی دوره شش ماهه تعیین شده است. سطوح فوقانی و تحتانی نیز بر اساس آزمایش‌های اولیه و محدودیت‌های صنعتی تعیین شده است. با توجه به اینکه این طراحی دارای ۵ پارامتر می‌باشد، ۳۲ اجرای فاکتوری، ۱۰

انجام آزمون‌های فلوتاسیون آزمایشگاهی نیز ۱۰۰ میکرون در نظر گرفته شد. یک سری آزمون خردایش با استفاده از آسیای گلوله‌ای آزمایشگاهی در زمان‌های ۹، ۱۲ و ۱۵ دقیقه طراحی گردید. نتایج بدست آمده در شکل ۱ آورده شده است. با توجه به شکل ۱ زمان لازم برای رسیدن به  $d_{80}$  برابر ۱۰۰ میکرون برای نمونه‌های آزمون‌های آزمایشگاهی ۱۴/۵ دقیقه بدست آمد.

جدول (۱) نسبت اختلاط جبهه کارهای مختلف در خوراک نهایی

شماره جبهه کار	عیار (%)	نسبت وزنی اختلاط (%)
۱	۰/۷۳	۷
۲	۰/۵۵	۱۷
۳	۱/۰۲	۱۴
۴	۰/۴۲	۱۴
۵	۰/۷۵	۷
۶	۱/۲۲	۴۱



شکل (۱) منحنی  $d_{80}$  نسبت به زمان خردایش خوراک نهایی

### ۳-۲- محاسبه زمان شناورسازی

شرایط زیر برای انجام آزمون سینتیکی مورد استفاده قرار گرفت:

- وزن نمونه: ۱۴۵۰ گرم
- درصد جامد داخل سلول فلوتاسیون آزمایشگاهی: ۳۰ درصد
- pH پالپ داخل سلول فلوتاسیون: ۱۱/۵
- مواد شیمیایی: کلکتورها Z11 (۵ گرم بر تن) و A3477 (۱۰ گرم بر تن) و Flomin (۲۲ گرم بر تن) و کف‌سازهای A65 (۱۰ گرم بر تن) و A70 (۸ گرم بر تن)
- زمان آماده‌سازی: ۴ دقیقه برای کلکتور و ۲ دقیقه برای کف‌ساز
- دور همزن: ۱۲۵۰ دور بر دقیقه

خطی با برهم‌کنش دو فاکتور، درجه دو و درجه سه، مدل درجه سه بهترین رگرسیون و کمترین نقص برازش را از میان مدل‌ها داراست. پس از در نظر گرفتن مدل چندجمله‌ای درجه سه برای بازیابی، جدول تحلیل واریانس بررسی شد (جدول ۴). قابل ذکر است که پارامترهایی که مقدار P برای آن‌ها بیشتر از ۰/۰۵ می‌باشد (پارامترهایی که معنی‌دار نمی‌باشند) در جدول ۴ آورده نشده است (مانند پارامترهای A و C).

برای بررسی بیشتر، داده‌های آماری بیشتری در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به این جدول، مقدار Press تقریباً بالا بوده و مطلوب نمی‌باشد. مقدار عبارت Adeq Precision (نسبت سیگنال به اختلال که نشان‌دهنده دقت مدل بوده و باید بیشتر از ۴ باشد) نیز مناسب است. مقدار ضریب تعیین ( $R^2$ ) برابر با ۰/۵۶۵۷ می‌باشد که به هیچ وجه مطلوب نیست (میزان برازش با ضریب تعیین اندازه‌گیری می‌شود که نشان می‌دهد تغییرات داده‌ها به چه میزان با مدل قابل توصیف است). همچنین اختلاف هر یک از مقادیر  $R^2$  Adj و  $R^2$  Pred با یکدیگر باید در حدود ۰/۲ باشد تا نتایج از روند مطلوبی پیروی کند که در اینجا اختلاف کمتر از ۰/۲ است. بنابراین بهبود مدل ضروری می‌باشد.

اجرای محوری و ۶ اجرای مرکزی وجود خواهد داشت و پاسخ‌های طرح میزان بازیابی و عیار مس می‌باشد. از آن جایی که در مرحله رافر-رمق گیر حداکثر بازیابی هدف می‌باشد و عیار اهمیت چندانی ندارد، بهینه‌سازی غلظت‌ها نیز با توجه به بازیابی انجام شده است [۶-۷].

برای انجام آزمون‌ها، ۱۴۵۰ گرم نمونه را داخل سلول فلوتاسیون ریخته و با اضافه کردن آب، درصد جامد به ۳۰ درصد رسانده می‌شود. با استفاده از آهک مقدار pH را به ۱۱/۵ رسانده و کلکتورها بر اساس مقادیر موجود در طراحی به سلول اضافه می‌شوند. پس از ۲ دقیقه آماده‌سازی، کف‌سازها را اضافه کرده و مجدداً ۲ دقیقه زمان آماده‌سازی اعمال می‌شود. دور همزن ۱۲۵۰ دور بر دقیقه و زمان کف‌گیری ۱۰ دقیقه می‌باشد. پس از انجام آزمون‌های فلوتاسیون، بازیابی هر آزمایش محاسبه می‌شود. نتایج آزمون‌ها در جدول ۳ آورده شده است.

### ۳-۴- انتخاب مدل

پس از اتمام آزمون‌ها، نتایج برای ارزیابی اولیه مورد بررسی قرار گرفت. در تحلیل‌های اولیه از بین مدل‌های خطی،

جدول (۳) طرح کامل آزمایش‌ها

عیار	بازیابی	E	D	C	B	A	Run	عیار	بازیابی	E	D	C	B	A	Run
۱۸/۱۸	۸۹/۲۳	۱	۱	-۱	-۱	-۱	۲۵	۱۷/۹۴	۸۴/۹۰	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۱
۷/۷۹	۹۰/۹۲	۱	۱	-۱	-۱	۱	۲۶	۱۰/۷۸	۸۶/۴۰	-۱	-۱	-۱	-۱	۱	۲
۹/۸۳	۹۰/۷۰	۱	۱	-۱	۱	-۱	۲۷	۱۳/۹۸	۸۸/۳۱	-۱	-۱	-۱	۱	-۱	۳
۶/۹۹	۹۰/۰۳	۱	۱	-۱	۱	۱	۲۸	۸/۹۷	۸۷/۶۶	-۱	-۱	-۱	۱	۱	۴
۱۱/۱۱	۸۹/۵۴	۱	۱	۱	-۱	-۱	۲۹	۱۷/۹۴	۸۸/۱۵	-۱	-۱	۱	-۱	-۱	۵
۷/۳۳	۸۸/۹۵	۱	۱	۱	-۱	۱	۳۰	۱۰	۸۶/۴۸	-۱	-۱	۱	-۱	۱	۶
۷/۳۴	۸۹/۹۶	۱	۱	۱	۱	-۱	۳۱	۱۲/۴۷	۸۹/۴۶	-۱	-۱	۱	۱	-۱	۷
۶/۳۰	۸۹/۱۷	۱	۱	۱	۱	۱	۳۲	۷/۶۹	۸۸/۸۸	-۱	-۱	۱	۱	۱	۸
۱۴/۵۶	۹۰/۴۲	.	.	.	.	-۱	۳۳	۱۸/۴۱	۹۰/۳۱	-۱	۱	-۱	-۱	-۱	۹
۸/۵۱	۹۰/۸۳	.	.	.	.	۱	۳۴	۹/۹۵	۸۹/۶۴	-۱	۱	-۱	-۱	۱	۱۰
۱۲/۱۲	۸۷/۳۵	.	.	.	-۱	.	۳۵	۱۱/۰۷	۸۹/۵۵	-۱	۱	-۱	۱	-۱	۱۱
۸/۲۸	۸۹/۸۲	.	.	.	۱	.	۳۶	۷/۸۰	۸۹/۸۹	-۱	۱	-۱	۱	۱	۱۲
۱۳/۵۴	۸۸/۳۳	.	.	-۱	.	.	۳۷	۱۹/۲۲	۸۷/۰۳	-۱	۱	۱	-۱	-۱	۱۳
۱۲/۱۷	۹۰/۵۳	.	.	۱	.	.	۳۸	۱۰/۱۴	۸۸/۵۷	-۱	۱	۱	-۱	۱	۱۴
۱۴/۱۶	۸۸/۳۰	.	-۱	.	.	.	۳۹	۹/۳۹	۸۶/۵۶	-۱	۱	۱	۱	-۱	۱۵
۹/۹۵	۸۸/۵۹	.	۱	.	.	.	۴۰	۶/۸۳	۹۱/۰۶	-۱	۱	۱	۱	۱	۱۶
۱۰/۵۵	۸۸/۵۴	-۱	.	.	.	.	۴۱	۲۰/۹۷	۸۶/۹۸	۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۱۷
۶/۸۱	۹۲/۰۷	۱	.	.	.	.	۴۲	۸/۵۹	۹۰/۸۲	۱	-۱	-۱	-۱	۱	۱۸
۱۰/۷۰	۸۸/۵۲	.	.	.	.	.	۴۳	۱۱/۵۵	۹۰/۵۷	۱	-۱	-۱	۱	-۱	۱۹
۸/۹۸	۸۹/۷۴	.	.	.	.	.	۴۴	۷/۴۸	۸۸/۹۲	۱	-۱	-۱	۱	۱	۲۰
۱۰/۴۹	۸۹/۵۹	.	.	.	.	.	۴۵	۱۳/۸۷	۹۰/۴۵	۱	-۱	۱	-۱	-۱	۲۱
۸/۸۹	۸۹/۷۵	.	.	.	.	.	۴۶	۱۰/۴۰	۸۶/۴۴	۱	-۱	۱	-۱	۱	۲۲
۱۰/۲۸	۸۹/۶۱	.	.	.	.	.	۴۷	۷/۰۷	۸۶/۹۶	۱	-۱	۱	۱	-۱	۲۳
۱۰/۴۳	۸۸/۵۵	.	.	.	.	.	۴۸	۴/۸۳	۸۸/۷۲	۱	-۱	۱	۱	۱	۲۴

جدول (۴) تحلیل واریانس بازیابی مس

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	واریانس	F	P
مدل	۶۱/۰۵	۸	۷/۶۳	۶/۳۵	<۰/۰۰۰۱
B	۵/۰۱	۱	۵/۰۱	۴/۱۷	۰/۰۴۷۹
E	۹/۵۷	۱	۹/۵۷	۷/۹۷	۰/۰۰۷۵
D2	۶/۴۸	۱	۶/۴۸	۵/۳۹	۰/۰۲۵۵
ABC	۹/۷۰	۱	۹/۷۰	۸/۰۷	۰/۰۰۷۱
ACD	۴/۸۸	۱	۴/۸۸	۴/۰۶	۰/۰۵۰۹
ACE	۳/۸۶	۱	۳/۸۶	۳/۲۱	۰/۰۸۰۸
CDE	۶/۴۳	۱	۶/۴۳	۵/۳۵	۰/۰۲۶۱
A2D	۱۵/۱۲	۱	۱۵/۱۲	۱۲/۵۸	۰/۰۰۱
باقی مانده‌ها	۴۶/۸۷	۳۹	۱/۲۰	-	-
نقص برازش	۴۵/۱۲	۳۴	۱/۳۳	۳/۸۰	۰/۰۷۰۰
خطای خالص	۱/۷۵	۵	۰/۳۵	-	-

جدول (۵) مشخصات آماری مدل اولیه برازش شده برای بازیابی مس

انحراف معیار	میان	ضریب تغییرات	Press	R <sup>2</sup>	Adj R <sup>2</sup>	Pred R <sup>2</sup>	Adeq Precision
۱/۱۰	۸۸/۹۷	۱/۲۳	۷۳/۹۵	۰/۵۶۵۷	۰/۴۷۶۶	۰/۳۱۴۷	۱۱/۱۳۹

### ۳-۵- روند بهبود برازش مدل

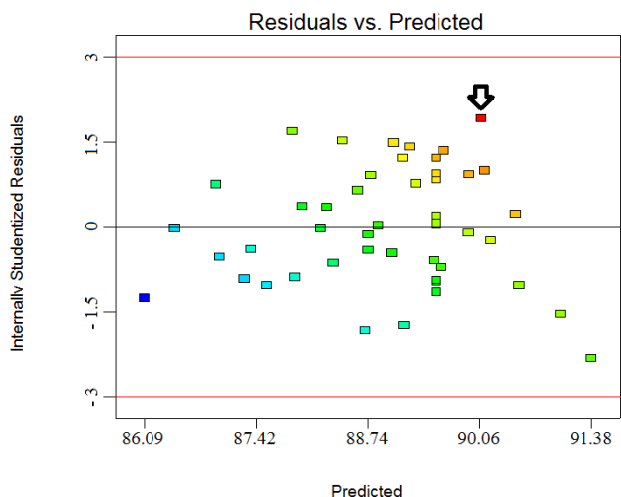
برای بهبود برازش مدل، ابتدا از رسم نمودار احتمال نرمال در برابر باقی مانده‌های استیودنت شده (که از تقسیم باقی مانده‌ها بر انحراف معیار تخمین زده شده برای باقی مانده‌ها بدست می‌آید و نشان‌دهنده این است که آیا باقی مانده‌ها از توزیع نرمال پیروی می‌کنند یا خیر) جهت بررسی نرمال بودن باقی مانده‌ها استفاده می‌شود که در شکل ۳ آورده شده است. با توجه به این شکل مربعی که با فلش مشخص شده است (آزمایش شماره ۴۲)، نسبت به بقیه نقاط فاصله بیشتری از خط پراکندگی دارد که این امر نشان‌دهنده این است که باقی مانده‌های این نقطه از توزیع نرمال پیروی نمی‌کند و باقی مانده‌های آن از سایر نقاط بیشتر است.

در ادامه برای مشخص کردن مقادیر خطای ثابت از نمایش باقی مانده‌های استیودنت شده در برابر مقادیر پیش‌بینی شده کمک گرفته می‌شود که در شکل ۴ قابل مشاهده است. خطوط افقی شکل، مرز واریانس باقی مانده‌های استیودنت شده را نشان می‌دهد. در این قسمت نیز نقطه مربوط به آزمایش ۴۲ (مربع مشخص شده با فلش) فاصله بیشتری نسبت به سایر نقاط از خط وسط دارا می‌باشد.

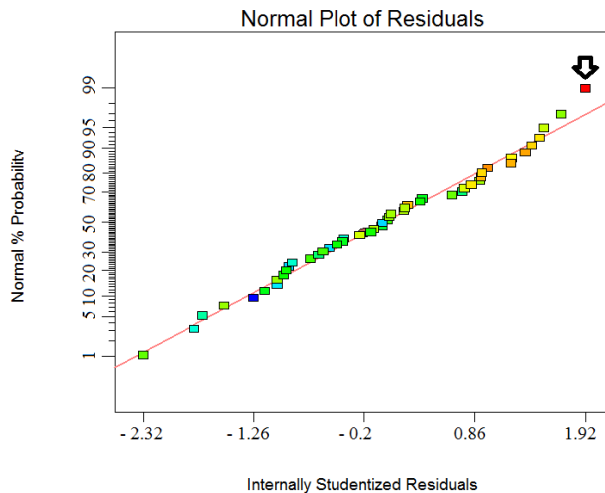
در ادامه با به کارگیری نمودار باقی مانده‌های استیودنت شده خارجی، مشاهده می‌شود که نقطه مربوط به آزمایش

شماره ۴۲ (مربع مشخص شده با فلش) دوباره فاصله بیشتری نسبت به سایر نقاط از خط مبنا دارد. (شکل ۵). به منظور بررسی رگرسیون مدل و مشخص کردن این که هر نقطه تا چه اندازه در کاهش رگرسیون تاثیر دارد، از منحنی فاصله کوک استفاده می‌شود که در شکل ۶ آورده شده است. با توجه به شکل، نقطه شماره ۴۲ تاثیر چندانی در کاهش رگرسیون مدل نداشته است، ولی از آن جایی که این نقطه در نمودارهای قبلی (شکل‌های ۳ تا ۵) پرت بوده، به عنوان عامل افزایش خطا حذف می‌شود.

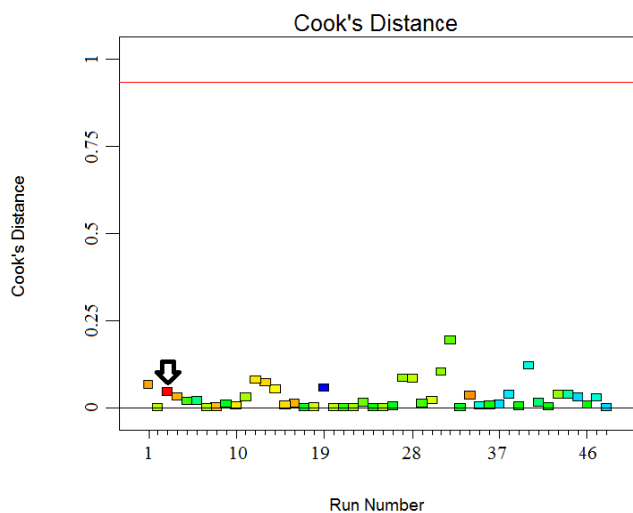
با طی این روند، می‌توان نقاطی را که در برازش مدل تاثیر نامطلوب داشته‌اند شناسایی کرده و حذف کرد. این فرایند برای سه نقطه تکرار شد (نقاط ۴۲، ۷ و ۲۳ به ترتیب حذف شدند) که نتایج آن در جدول ۶ قابل مشاهده است. حالت اولیه مدل که مرحله صفر نام گذاری شده است، نشان دهنده مدل برازش شده بدون هیچ گونه تغییری است. در این مرحله مقدار ضریب تعیین (R<sup>2</sup>) نامطلوب، میزان Press تقریباً بالا و مقدار P برای نقص برازش نسبتاً نامناسب می‌باشد. ملاحظه می‌شود که پس از طی سه مرحله تمامی پارامترها به مقدار مطلوبی رسیده است. تحلیل واریانس نهایی در جدول ۷ ارائه شده است.



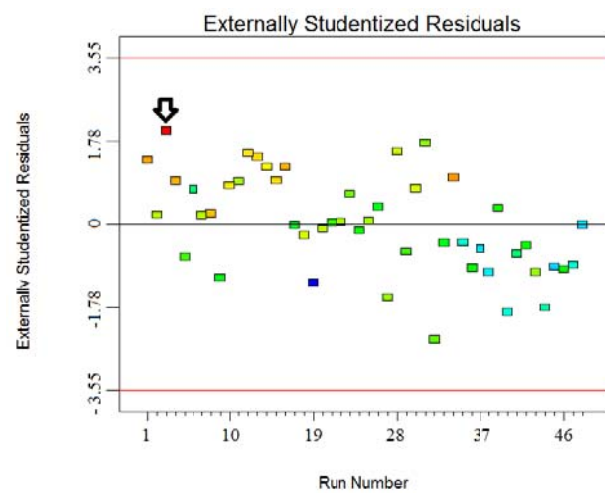
شکل (۴) رسم باقی مانده های استیودنت شده در مقابل مقادیر پیش بینی شده



شکل (۳) رسم باقی مانده های استیودنت شده در مقابل احتمال نرمال



شکل (۶) میزان فاصله کوک برای نقاط آزمایش



شکل (۵) میزان باقی مانده های استیودنت شده خارجی برای هر نقطه آزمایش

جدول (۶) میزان داده های آماری بازیابی مس پس از هر مرحله بهبود مدل

مرحله	صفر	یک	دو	سه
انحراف معیار	۱/۱۰	۱/۰۶	۰/۷۱	۰/۴۳
میانه	۸۸/۹۷	۸۸/۹۱	۸۸/۹۰	۸۸/۹۴
ضریب تغییرات	۱/۲۳	۱/۱۹	۰/۸	۰/۴۸
Press	۷۳/۹۵	۶۸/۶۵	۴۵/۴۷	۱۸/۲۴
R <sup>2</sup>	۰/۵۶۵۷	۰/۵۶۷۴	۰/۸۶۵۸	۰/۹۶۱۱
Adj R <sup>2</sup>	۰/۴۷۶۶	۰/۴۷۶۴	۰/۷۶۷۷	۰/۹۱۴۴
Pred R <sup>2</sup>	۰/۳۱۴۷	۰/۳۰۰۴	۰/۵۳۵۱	۰/۸۰۵۹
نسبت سیگنال به اختلال	۱۱/۱۳۹	۱۱/۱۵۱	۱۱/۹۸۴	۱۷/۹۶۳
مقدار P نقص برازش	۰/۰۷۰۰	۰/۰۸۱۱	۰/۳۳۱۵	۰/۹۴۰۹
مقدار P مدل	<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۱

بهینه سازی غلظت مواد شیمیایی در فلوتاسیون مس مجتمع شهریارک با استفاده از طراحی آماری

جدول (۷) تحلیل واریانس بازیابی مس پس از بهبود برازش

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	واریانس	F	P
مدل	۹۰/۳۲	۲۴	۳/۷۶	۲۰/۵۹	<۰/۰۰۰۱
B	۳/۰۶	۱	۳/۰۶	۱۶/۷۲	۰/۰۰۰۶
C	۲/۴۳	۱	۲/۴۳	۱۳/۲۹	۰/۰۰۱۶
E	۱۳/۲۰	۱	۱۳/۲۰	۷۲/۲۱	<۰/۰۰۰۱
AB	۱/۶۱	۱	۱/۶۱	۸/۸۰	۰/۰۰۷۶
AC	۳/۵۳	۱	۳/۵۳	۱۹/۳۰	۰/۰۰۰۳
AD	۵/۵۰	۱	۵/۵۰	۳۰/۱۰	<۰/۰۰۰۱
AE	۴/۳۶	۱	۴/۳۶	۲۳/۸۵	<۰/۰۰۰۱
BC	۰/۷۹	۱	۰/۷۹	۴/۳۳	۰/۰۵۰۵
BD	۳/۸۳	۱	۳/۸۳	۲۰/۹۷	۰/۰۰۰۲
CD	۶/۶۴	۱	۶/۶۴	۳۶/۳۱	<۰/۰۰۰۱
DE	۲/۴۸	۱	۲/۴۸	۱۳/۵۸	۰/۰۰۱۵
A <sup>2</sup>	۴/۹۰	۱	۴/۹۰	۲۶/۷۸	<۰/۰۰۰۱
B <sup>2</sup>	۱/۵۳	۱	۱/۵۳	۸/۳۵	۰/۰۰۹۱
D <sup>2</sup>	۲/۱۸	۱	۲/۱۸	۱۱/۹۱	۰/۰۰۲۵
ABC	۱/۷۶	۱	۱/۷۶	۹/۶۵	۰/۰۰۵۶
ABD	۲/۸۲	۱	۲/۸۲	۱۵/۴۳	۰/۰۰۰۸
ABE	۴/۶۴	۱	۴/۶۴	۲۵/۳۸	<۰/۰۰۰۱
ACD	۹/۱۴	۱	۹/۱۴	۵۰/۰۳	<۰/۰۰۰۱
ACE	۸/۹۲	۱	۸/۹۲	۴۸/۸۱	<۰/۰۰۰۱
CDE	۱/۷۰	۱	۱/۷۰	۹/۳۲	۰/۰۰۶۳
A <sup>2</sup> B	۰/۷۵	۱	۰/۷۵	۴/۱۳	۰/۰۵۵۷
A <sup>2</sup> C	۲/۳۵	۱	۲/۳۵	۱۲/۸۳	۰/۰۰۱۹
A <sup>2</sup> D	۳/۸۴	۱	۳/۸۴	۲۱/۰۳	۰/۰۰۰۲
AB <sup>2</sup>	۰/۶۴	۱	۰/۶۴	۳/۵۰	۰/۰۷۶۲
باقی مانده‌ها	۳/۶۶	۲۰	۰/۱۸	-	-
نقص برازش	۱/۹۱	۱۵	۰/۱۳	۰/۳۶	۰/۹۴۰۹
خطای خالص	۱/۷۵	۵	۰/۳۵	-	-

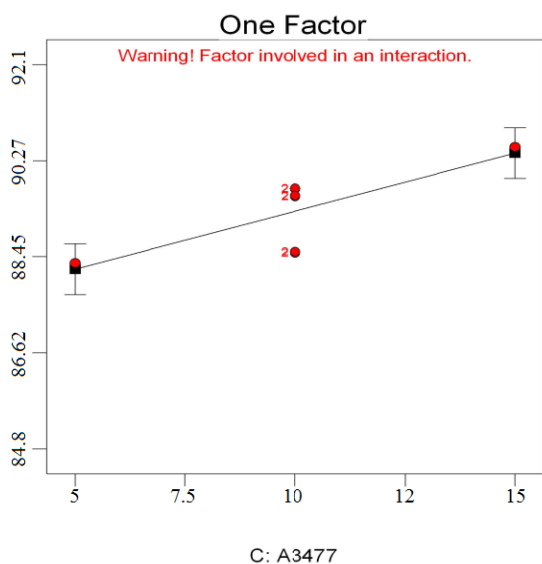
۳-۶- معادله پیشنهادی مدل برای بازیابی

مدل بازیابی مس پس از بهبود برازش بر طبق رابطه ۱ بدست می‌آید.

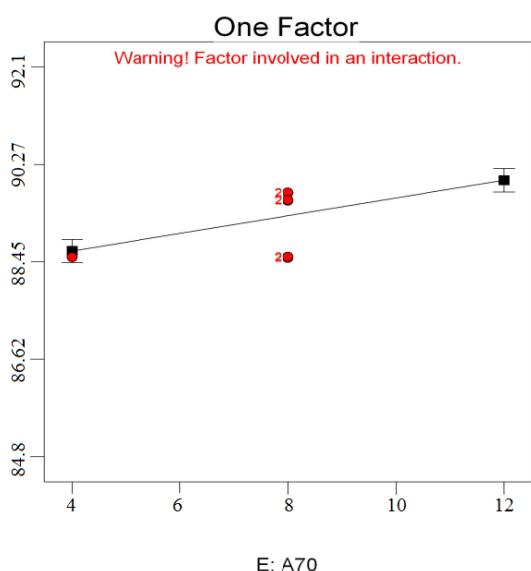
$$R = 89.31 + 1.24B + 1.10C + 0.66E - 0.27AB - 0.41 AC + 0.51AD - 0.39AE + 0.19BC - 0.42BD - 0.56CD - 0.29DE + 1.31A^2 - 0.73B^2 - 0.87D^2 + 0.29ABC + 0.36ABD - 0.40ABE + 0.65ACD - 0.55ACE + 0.24CDE - 0.64A^2B - 1.13A^2C + 0.42A^2D - 0.17AB^2 \quad (1)$$

پارامتر R بیان‌گر بازیابی مس می‌باشد.

با توجه به نتایج بدست آمده از جدول ۷ کف‌ساز A70 (پارامتر E) مهمترین عامل تاثیرگذار در بازیابی می‌باشد (به علت مقدار بالاتر واریانس، ۷۲/۲۱). همچنین کلکتور Z11 (پارامتر A) و کف‌ساز A65 (پارامتر D) به طور مستقیم در بازیابی تاثیر ندارند، ولی برهم‌کنش آن‌ها با سایر پارامترها در بازیابی موثر است.



شکل (۸) تاثیر غلظت A3477 بر بازیابی مس



شکل (۹) تاثیر غلظت A70 بر بازیابی مس

### ۳-۸- بهینه سازی غلظت مواد شیمیایی

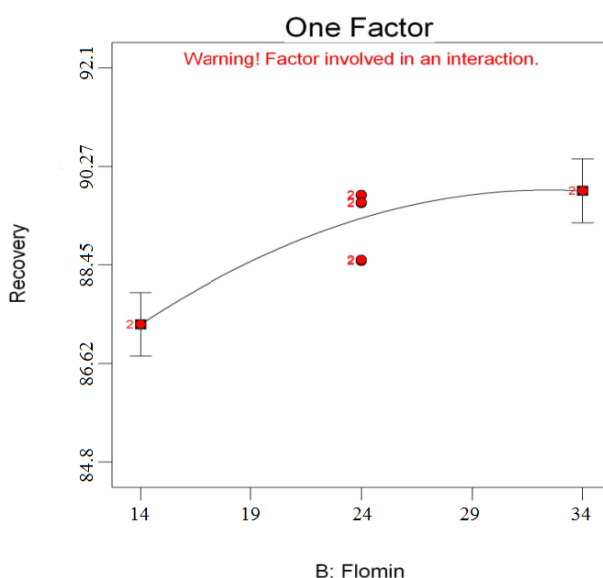
پس از این که اثر پارامترهای مختلف بر بازیابی و عیار فلوتاسیون مشخص گردید، شرایط پیشنهادی نرم افزار برای رسیدن به حداکثر بازیابی مورد بررسی قرار گرفت. تعدادی از شرایط پیشنهادی نرم افزار جهت انجام آزمون‌ها در جدول ۸ آورده شده است.

جهت تعیین شرایط بهینه، آزمون‌های شماره ۱ و ۲ تکرار شدند که نتایج آنها در جدول ۹ آورده شده است. با توجه به جدول ۹ بازیابی بدست آمده برای هر دو آزمون شماره ۱ و ۲ به مقادیر پیش‌بینی شده مدل نزدیک است و در نتیجه مدل انتخابی برای بازیابی مورد تایید می‌باشد.

با توجه به ضرایب پارامترها عبارت  $A^2C$  بیشترین اثر منفی را در بازیابی دارد.

### ۳-۷- اثر پارامترهای موثر مورد بررسی بر روی بازیابی

اثر پارامتر B (کلکتور Flomin) بر روی بازیابی در شکل ۷ قابل مشاهده است. با توجه به شکل با افزایش غلظت Flomin بازیابی نیز زیاد می‌شود ولی باید توجه داشت که این افزایش غلظت تا حد خاصی بر بازیابی موثر بوده و در غلظت‌های بالاتر از ۳۰ گرم بر تن، بازیابی به مقدار تقریباً ثابتی می‌رسد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش غلظت Flomin اغلب کانی‌های مس بازیابی می‌شوند که نیز نشان از توانایی این کلکتور در بازیابی کانی‌های اکسیدی دارد.



شکل (۷) تاثیر غلظت Flomin بر بازیابی مس

با توجه به شکل ۸ با افزایش غلظت A3477 بازیابی به صورت خطی افزایش می‌یابد. همانند کلکتور Flomin این کلکتور نیز توانایی بازیابی اکسیدهای مس را دارا می‌باشد. کلکتور A3477 در کارخانه فراوری مجتمع مس شهربابک برای افزایش بازیابی مس اکسیدی به مدار فلوتاسیون افزوده می‌شود.

تاثیر کف‌ساز A70 بر روی بازیابی در شکل ۹ دیده می‌شود. با توجه به شکل ۹، کف‌ساز A70 اثر خطی بر روی بازیابی داشته و با افزایش غلظت آن بازیابی نیز افزایش می‌یابد که این امر ناشی از تولید حباب‌هایی با توزیع ابعادی کوچک‌تر می‌باشد که در نتیجه راندمان فلوتاسیون و بازیابی را بهبود می‌بخشد.



جدول (۸) شرایط بهینه پیشنهادی نرم افزار برای رسیدن به

حداکثر بازیابی

شماره	غلظت Z11	غلظت Flomin	غلظت A3477	غلظت A65	غلظت A70	بازیابی (%)	عیار (%)
۱	۳/۲۵	۲۸/۹۹	۱۴/۹۰	۹/۰۲	۱۱/۶۳	۹۱/۹۲	۸/۸۴
۲	۸/۹۹	۲۲/۸۰	۵/۰۵	۱۲/۵۲	۷/۶۸	۹۱/۰۷	۱۰/۰۲
۳	۸/۹۶	۲۵/۰۸	۵/۵۶	۱۰/۶۹	۹/۳۲	۹۱/۰۸	۹/۲۹
۴	۵/۷۶	۲۸/۷۲	۱۴/۸۷	۹/۰۴	۱۱/۹۵	۹۱/۰۸	۷/۴۳

جدول (۹) نتایج پیشنهادی نرم افزار در برابر نتایج واقعی

شماره	مقادیر پیش بینی شده		مقادیر آزمایشگاهی	
	بازیابی	عیار	بازیابی	عیار
۱	۹۱/۹۲	۸/۸۴	۹۱/۲۷	۷/۹
۲	۹۱/۰۷	۱۰/۰۲	۹۱/۳۱	۹/۳۵

با توجه به این که مجموع غلظت مواد شیمیایی در آزمون شماره ۲ (۵۷/۰۴ گرم بر تن) کمتر از آزمون شماره ۱ (۶۷/۷۹ گرم بر تن) بوده که باعث کاهش هزینه خرید مواد شیمیایی می شود و از آن جایی که بازیابی بدست آمده در هر دو آزمون به هم نزدیک می باشد، شرایط آزمون شماره ۲ (۸/۹۹ گرم بر تن Z11 ، ۲۲/۸۰ گرم بر تن Flomin ، ۵/۰۵ گرم بر تن A3477 ، ۱۲/۵۲ گرم بر تن A65 و ۷/۶۸ گرم بر تن A70) به عنوان شرایط بهینه جهت رسیدن به بازیابی حداکثر انتخاب گردید.

#### ۴- نتیجه گیری

با توجه به آزمون های سینتیکی انجام گرفته، زمان مناسب برای آزمون های بهینه سازی غلظت مواد شیمیایی در مقیاس آزمایشگاهی ۱۰ دقیقه بدست آمد.

مقدار  $R^2$  بدست آمده برای بازیابی، قبل و پس از بهبود برازش مدل به ترتیب برابر با ۰/۵۶۵۷ و ۰/۹۶۱۱ می باشد.

با توجه به اهمیت بیشتر بازیابی در مرحله رافر، تحلیل نتایج با توجه به پاسخ بازیابی انجام گرفت.

مهم ترین عامل تاثیرگذار بر بازیابی، کف ساز A70 (پارامتر E) می باشد که با افزایش آن بازیابی افزایش می یابد.

کلکتور Z11 فقط کانی های سولفیدی را بازیابی می کند و قادر به بازیابی کانی های اکسیدی نمی باشد.

- افزایش غلظت کلکتور Flomin تا حدود ۳۰ گرم بر تن باعث افزایش بازیابی شده ولی در مقادیر بیشتر از ۳۰ گرم بر تن بازیابی تقریباً ثابت می ماند.
- افزایش غلظت کلکتور A3477 باعث افزایش بازیابی شده و این کلکتور علاوه بر کانی های سولفیدی قادر به بازیابی کانی های اکسیدی نیز می باشد.
- کف ساز A65 (پارامتر D) به تنهایی تاثیر ناچیزی در بازیابی داشته ولی برهم کنش آن با سایر پارامترها در بازیابی موثر است.
- مقادیر بهینه مواد شیمیایی بدست آمده برای رسیدن به حداکثر بازیابی عبارت است از : ۸/۹۹ گرم بر تن Z11 ، ۲۲/۸۰ گرم بر تن Flomin ، ۵/۰۵ گرم بر تن A3477 ، ۱۲/۵۲ گرم بر تن A65 و ۷/۶۸ گرم بر تن A70 که باعث دستیابی به بازیابی ۹۱/۳۱ درصدی با عیار ۹/۳۵ در مقیاس آزمایشگاهی شد.

#### تشکر و قدردانی

بر خود لازم می دانیم تا تشکر خود را از دانشگاه تربیت مدرس و کارخانه تغلیظ مجتمع مس شهربابک که در تمام مراحل تحقیق حامی ما بوده و کمال همکاری را داشتند، ابراز نماییم.

#### مراجع

- [1] L. Evans, B. T. Thalody and J. E. Morgan, (1995) "Ion flotation using carboxylate soaps: Role of surfactant structure and adsorption behavior". *Colloids and surfaces Journal*, 102, 81-89.
- [2] S. M. Bulatovic (2007) *Handbook of flotation reagents chemistry, theory and practice: flotation of sulfide ores*, Elsevier science & technology
- [3] Metso Minerals CISA (2001) *Operation and Maintenance Manual*. Miduk Copper Concentrator Project
- [4] Y. Vazifeh, E. Jorjani and A. Bagherian (2010) "Optimization of reagent dosages for copper flotation using statistical technique" *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 20, 2371-2378.
- [5] G. E. Agar, J. R. Gordon, R. S. Crawley, and T. J. Bruce (1980) "Optimizing the design of flotation circuits". *CIM Bulletin*
- [6] T. Yalsin, (1999) *Evaluation of box-wilson experimental design in flotation research*. Trans inst mine metall: sec c, 108:109-112.
- [7] G. LIU and X. L. Wang (2007) "Optimization of critical medium components using response surface methodology for biomass and extra cellular polysaccharide production

by agaricus blazei” *applied microbial biotechnology*,  
74:78-83.

- [8] D. C. Montgomery (2001) *Design and analysis of experiments*. New York : John Wiley and Sons.

## Optimization of Reagent Dosages for Copper Flotation in Shahr-E-Babak Copper Complex Using Statistical Design

S. Ghodrati <sup>1</sup>, M. Abdollahy <sup>2,\*</sup>, S. M. J. Koleini <sup>3</sup>, M. Hekmati <sup>4</sup>

1. M.Sc Student, Department of Mineral processing, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, (saeed.ghodrati64@gmail.com)
2. Professor, Department of Mineral processing, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, (minmabd@modares.ac.ir)
3. Associate professor, Department of Mineral processing, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, (koleini@modares.ac.ir)
4. Process control senior specialist, Shahr-E-Babak copper complex, Kerman, Iran, (hekmati@nicico.com)

---

### ABSTRACT

The effects of Z11, Flomin and A3477 as collector and A65 and A70 as frother on the copper recovery were investigated for the flotation circuit of Shahr-E-Babak copper complex. The optimum flotation time was obtained 10 minutes by doing kinetic tests. Afterwards using the statistical method, the dosage of reagent in rougher column was optimized in order to reach the maximum recovery in the laboratory scale. According to the obtained data, 8.99 g/t Z11, 22.8 g/t Flomin, 5.05 g/t A3477, 12.52 g/t A65 and 7.68 g/t A70 were determined as optimal conditions to obtain maximum recovery (91.31 percent). The most effective factor on the recovery was found to be frother A70 while the effect of Z11 and A65 on recovery was negligible.

---

### ARTICLE INFO

Article history:  
Received: 22 Apr 2012  
Received in revised form: 29 Aug 2012  
Accepted: 12 Sep 2012

---

Key words:  
Flotation  
Optimization  
Shahr-E-Babak copper complex  
Reagents

---

All right reserved.

---

\* Corresponding author