

## بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی بر سینتیک فلوتاسیون مس در مرحله رافر

سیدهادی شاهچراغی<sup>۱</sup>، محمود عبدالهی<sup>۲\*</sup>، محمدرضا خالصی<sup>۳</sup>

۱- فارغ التحصیل فراوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس

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

۳- استادیار گروه فراوری مواد معدنی دانشگاه تربیت مدرس، mrkhalesi@modares.ac.ir

(دریافت ۲ مرداد ۱۳۹۱، پذیرش ۲۰ اسفند ۱۳۹۱)

### چکیده

چهار پارامتر عملیاتی مقدار کلکتور، مقدار کف ساز، pH و زمان آماده سازی، مهمترین پارامترهای موثر بر عملکرد متالورژیکی و سینتیکی فلوتاسیون مس هستند. تحقیق حاضر در مجتمع مس میدوک واقع در استان کرمان انجام شد. به منظور بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی مذکور بر سینتیک و کارایی جدایش فلوتاسیون مس، توسط روش سطح پاسخ در نرم افزار DX7، ۳۰ آزمایش طراحی شد. برای انجام آزمایش های سینتیکی، کف گیری در فواصل زمانی مختلف انجام شد. سپس با گذراندن مدل مرتبه اول سینتیک فلوتاسیون از نقاط منحنی بازیابی - زمان، مقادیر ثابت سینتیک و بازیابی در زمان طولانی با استفاده از گزینه بهینه سازی نرم افزار اکسل به گونه ای تخمین زده شدند که مجموع مربعات خطای تخمین بازیابی کمینه شد. پس از تحلیل و بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی بر سینتیک و کارایی جدایش فلوتاسیون مس، شرایط بهینه عملیاتی تعیین شد. با اعمال شرایط بهینه عملیاتی (۱۳g/t = مقدار کلکتور X231، ۸g/t = مقدار کف ساز A65، pH= ۱۱/۵۴ و ۴/۱۷min = زمان آماده سازی)، بازیابی فلوتاسیون مس کلی در سطح اعتماد ۹۵ درصد در محدوده (۹۰/۸۷ - ۸۸/۱۸) درصد، ثابت سینتیک فلوتاسیون مس کلی در محدوده (۱/۴۱ - ۱/۳۵) بر دقیقه و کارایی جدایش فلوتاسیون در محدوده (۸۰/۵۳ - ۷۷/۹۸) درصد قرار گرفت. نتایج این تحقیق موجب کاهش مصرف مقادیر کلکتور X231 و کف ساز A65 هر کدام به میزان ۷ تا ۸ گرم بر تن نسبت به شرایط فعلی کارخانه، افزایش ۳ تا ۴ درصدی بازیابی مس کلی و افزایش ۲ تا ۳ درصدی کارایی جدایش مس در مقیاس آزمایشگاهی شد.

### کلمات کلیدی

سینتیک فلوتاسیون مس، کارایی جدایش، مجتمع مس میدوک، بهینه سازی، بازیابی در زمان طولانی

## ۱- مقدمه

بررسی سینتیک و کارایی جدایش فلوتاسیون کانی های مس در مرحله رافر به لحاظ فنی و اقتصادی اهمیت خاصی دارد. تغییرات غلظت مواد داخل سلول فلوتاسیون در واحد زمان، تابع مستقیمی از غلظت آن ماده است [۳-۱]:

$$\frac{dC_{(t)}}{dt} = -kC_{(t)}^n \quad (۱)$$

که در آن،  $k$  ثابت سینتیک،  $C_{(t)}$  غلظت ماده معدنی داخل سلول فلوتاسیون و توان  $n$  درجه واکنش شیمیایی است. بسیاری از محققین، فلوتاسیون را فرایندی از مرتبه اول می دانند [۸-۱]:

$$n = 1 \Rightarrow \frac{dC_{(t)}}{dt} = -kC_{(t)} \quad (۲)$$

در رابطه بالا،  $C_{(t)}$  غلظت مواد داخل سلول فلوتاسیون است که در زمان  $t$  قابل شناور شدن است. با انتگرال گیری از طرفین رابطه (۲)، بازیابی ( $R$ ) از رابطه (۳) قابل محاسبه است [۱۰-۱]:

$$R_{(t)} = R_{\infty}(1 - e^{-kt}) \quad (۳)$$

که در آن  $R_{\infty}$  بازیابی در زمان طولانی،  $R_{(t)}$  بازیابی در زمان  $t$  و  $k$  ثابت سینتیک است. علاوه بر این به منظور تایید نتایج سینتیک فلوتاسیون، کارایی جدایش فلوتاسیون مس برای همه آزمایش های سینتیکی محاسبه شد. اگر  $C$ ،  $F$  و  $T$  به ترتیب وزن های خوراک، کنسانتره و باطله و همچنین  $f$ ،  $c$  و  $t$  به ترتیب عیار فلز در خوراک، کنسانتره و باطله باشند کارایی جدایش عملیات را می توان از رابطه (۴) محاسبه نمود [۴]:

$$S.E = R_A * R_B * 100 \quad (۴)$$

که در آن  $S.E.$  کارایی جدایش،  $R_A$  بازیابی کانی با ارزش به کنسانتره و  $R_B$  بازیابی گانگ به باطله می باشد. رابطه (۴) را می توان به صورت رابطه (۵) نوشت:

$$S.E = \frac{Cc}{Ff} * \frac{T(100-t)}{F(100-f)} * 100 \quad (۵)$$

در موازنه جرمی مواد، روابط (۶) و (۷) برقرار هستند:

$$\frac{C}{F} = \frac{f-t}{c-t} \quad (۶)$$

$$\frac{T}{F} = \frac{c-f}{c-t} \quad (۷)$$

با جایگذاری روابط (۶) و (۷) در رابطه (۵) کارایی جدایش عملیات بر حسب عیارهای فلز در خوراک، کنسانتره و باطله به صورت رابطه (۸) قابل محاسبه است:

$$S.E. = \frac{c(f-t)(c-f)(100-t)}{f(c-t)^2(100-f)} * 100 \quad (۸)$$

سینتیک فلوتاسیون و کارایی جدایش تحت تأثیر پارامترهای زیادی (مانند اندازه حباب، هیدروفوبیسیته ماده معدنی، میکروارگانیزمها، انرژی ورودی، ساختار مولکولی کلکتور، غلظت اکسیژن، زمان ماندگی کف، دما، سرعت چرخش همزن) قرار دارد [۱۴-۱۱]. شناخت این پارامترها و مکانیزم تأثیر آنها بر سینتیک و کارایی جدایش فلوتاسیون، در بهبود کارایی فرایند فلوتاسیون موثر خواهد بود.

کوپانپورتی<sup>۱</sup> و همکارانش [۱۵] در سال ۱۹۹۷، به منظور بررسی تأثیر غلظت اکسیژن بر سینتیک آماد سازی در فلوتاسیون کانی های سولفیدی، مطالعه ای روی نمونه های پیریت و کالکوپیریت انجام دادند. نتایج نشان داد که غلظت اکسیژن حل شده پالپ به طور قوی روی پتانسیل پالپ و سرعت جذب سطحی گزنتات روی بیعی بی کالکوپیریت مؤثر است.

پیک<sup>۲</sup> [۶] در سال ۲۰۰۳ پیرامون تأثیر سرعت چرخش

همزن و توزیع انرژی بر سرعت فلوتاسیون کوارتز، کالکوپیریت و

گالن هیدروفوب شده در یک سلول فلوتاسیون طراحی شده

تحقیقی انجام داد. وی توزیع انرژی آشفته موضعی در سرعت های چرخش همزن مختلف را تعیین کرد. طبق نتایج، در مورد کوارتز هیدروفوب شده (زاویه تماس  $73^{\circ}$ )، افزایش متوسط توزیع انرژی تا  $4/\Delta W/kg$ ، ثابت سرعت فلوتاسیون را در محدوده اندازه ذره زیر  $80$  میکرون افزایش داد. علاوه بر این، سرعت فلوتاسیون ذرات متوسط و درشت گالن با افزایش سرعت چرخش همزن، کاهش یافت.

دیون<sup>۳</sup> و همکاران [۸] در سال ۲۰۰۳ مطالعه ای پیرامون تأثیر اندازه ذره بر ثابت سرعت فلوتاسیون کالکوپیریت انجام دادند. آنها دریافتند که با افزایش اندازه ذره تا  $60$  میکرون، ثابت سرعت فلوتاسیون کالکوپیریت افزایش و بیشتر از  $60$  میکرون ثابت سرعت کاهش می یابد.

پسینا<sup>۴</sup> و همکارانش [۱۲] در سال ۲۰۰۸ در مکزیک، پیرامون تأثیر لپتوسپیریلیوم فرواکسیدان<sup>۵</sup> بر قابلیت فلوتاسیون

کالکوپیریت، اسفالریت و پروتیت با استفاده از گزنتات ها به عنوان کلکتور، مطالعه ای انجام دادند. نتایج نشان می دهد که سرعت فلوتاسیون کالکوپیریت در حضور لپتوسپیریلیوم فرواکسیدان، به

درصد) باشد. پس از ترکیب نمونه‌ها، ۱۲۸ کیلوگرم نمونه معرف با ابعاد کمتر از ۲ میلی‌متر به دست آمد که با استفاده از تقسیم‌کن، دو نمونه ۶۴ کیلوگرمی حاصل شد که یکی برای انجام آزمایش - های فلوتاسیون و دیگری برای انجام مطالعات جانبی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج آنالیز شیمیایی و XRF نمونه معرف در جدول (۱) آورده شده‌اند. لازم به ذکر است که درصد مس کلی در این جدول به روش تیتراسیون، درصد مس اکسیدی به روش جذب اتمی و سایر عناصر به روش XRF آنالیز شده‌اند.

جدول ۱: نتایج آنالیز شیمیایی نمونه معرف

عنصر	درصد	عنصر	درصد
Cu	۱/۱۳	K <sub>2</sub> O	۴/۹۳
oxide copper	۰/۱	SO <sub>3</sub>	۳/۳۷
Fe	۳/۲۹	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲۵/۰۴
Zr	۰/۰۱۵	MgO	۱/۱۱
Sr	۰/۰۲۷	SiO <sub>2</sub>	۵۹/۲۲
TiO <sub>2</sub>	۰/۶۷	Na <sub>2</sub> O	۰/۸۶
CaO	۰/۲۸	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰/۳۲

سپس نمونه ۶۴ کیلوگرمی به نمونه‌های ۱ کیلوگرمی تقسیم شد. هر نمونه به مدت ۲۵ دقیقه تحت آسیای خشک قرار گرفت تا نمونه‌ای با  $d_{80}=122 \mu\text{m}$  برای انجام آزمایش‌های فلوتاسیون به دست آید؛ در این دانه بندی، ۸۰ درصد کانی‌های مس به درجه آزادی می‌رسند. علاوه بر این، بررسی‌ها نشان داد که نتایج دانه بندی خوراک فلوتاسیون مورد استفاده در آزمایش‌های فلوتاسیون مشابه نتایج دانه بندی سر ریز سیکلون است. به منظور شناسایی و تعیین درصد کانی‌های موجود در خوراک فلوتاسیون از مطالعه کمی میکروسکوپی استفاده شد که نتایج آن در جدول (۲) ارائه شده است. علاوه بر این نتایج مطالعه کمی میکروسکوپی نشان داد که درجه آزادی کالکوسیت ۸۵ درصد، کولیت ۹۴ درصد، کالکوپیریت ۸۰ درصد و پیریت ۸۱ درصد است. لازم به ذکر است که نمونه مورد مطالعه حاوی ۹۷ درصد مس سولفیدی و ۳ درصد مس اکسیدی است.

## ۲-۲- روش محاسبه ثابت سینتیک و بازیابی در زمان طولانی

علت تشکلی گونه‌های هیدرو فویی، به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. همچنین باکتری به عنوان یک بازداشت کننده ضعیف برای پیروتیت بعد از زمان آماده سازی ۶۰ دقیقه‌ای عمل می‌کند ناتاراجان<sup>۶</sup> [۱۶] در سال ۲۰۰۹ در کانادا، مطالعه‌ای پیرامون تأثیر ساختار مولکولی کلکتور بر سینتیک فلوتاسیون کانسار حاوی مس و نیکل به وسیله اسیدهای N-arylhydroxamic به عنوان کلکتور انجام داد. نتایج نشان داد که کلکتور PANXHA بالاترین سرعت مرتبه اول را برای سینتیک فلوتاسیون پنتلانیدیت به دنبال دارد. لذا در میان هفت نوع اسید N-arylhydroxamic، PANXHA بالاترین قابلیت انتخابی را برای پنتلانیدیت در پی داشت.

هستن<sup>۷</sup> و تزکان<sup>۸</sup> [۱۷] در سال ۱۹۹۰ تحقیقی در مورد تأثیر سه نوع کف‌ساز پلی پروپیلن گلیکول (Dowfroth250)، روغن کاج<sup>۹</sup> و متیل‌ایزوبوتیل کربینول<sup>۱۰</sup> بر سینتیک فلوتاسیون مس سولفیدی انجام دادند. آنها در مطالعات خود دریافتند که استفاده از کف‌ساز پلی پروپیلن گلیکول به همراه کلکتور دی‌تئوفسفات ثابت سرعت و بازیابی فلوتاسیون مس سولفیدی را افزایش می‌دهد. جیانپینگ<sup>۱۱</sup> و همکارانش [۱۴] در سال ۲۰۱۱ در مطالعه خود پیرامون تأثیر دانه‌بندی بر سینتیک فلوتاسیون کالکوپیریت دریافتند که اندازه ذره تأثیر مهمی بر ثابت سینتیک و بازیابی (R<sub>∞</sub>) کالکوپیریت دارد و محدوده ابعاد بین ۵۴ تا ۷۴ میکرون بیشترین ثابت سینتیک و بازیابی کالکوپیریت را به دنبال دارد. در این تحقیق سعی شده است تا در ابتدا تأثیر مقدار کلکتور X231 (نئونوکربامات)، مقدار کف‌ساز A65 (پلی پروپیلن - گلیکول)، زمان آماده‌سازی کلکتور و pH بر سینتیک فلوتاسیون و کارایی جدایش مس (به منظور تایید نتایج سینتیک فلوتاسیون) بررسی شود. سپس با توجه به تأثیر هر یک از این پارامترها، شرایط بهینه فرایند، به دست آمده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- شناسایی و آماده‌سازی نمونه

نمونه مورد استفاده در این تحقیق از ۵ جبهه کار مختلف معدن (خوراک کارخانه) مس میدوک در استان کرمان تهیه شد. پس از انجام خردایش نمونه هر جبهه کار، نمونه‌ها باید به گونه‌ای با هم ترکیب می‌شدند که عیار نمونه معرف، معادل عیار خوراک ورودی به کارخانه تغلیظ مجتمع مس میدوک (در محدوده ۱/۰۱ تا ۱/۲

شیر هوا باز شده و کف گیری آغاز شد. کف گیری در زمان های ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۷ دقیقه انجام شد. پس از خشک شدن کنسانتره-ها و باطله، عیارسنجی انجام شد و نمودار بازیابی در مقابل زمان برای هر آزمایش رسم شد.

#### ۲-۴- روش طراحی آماری آزمایش های فلوتاسیون

در این پروژه از نرم افزار طراحی آزمایش DX7 استفاده شده است. این نرم افزار چند روش آماری را برای طراحی آزمایش ارائه می دهد. یکی از مناسب ترین روش هایی که در این نرم افزار وجود دارد و آزمایش های فلوتاسیون این تحقیق نیز بر آن استوار است روش سطح پاسخ<sup>۱۲</sup> و طرح نقطه مرکزی<sup>۱۳</sup> موجود در روش سطح پاسخ است. از آنجا که در این تحقیق، پاسخ ها غنی خطی هستند و هدف، بررسی پاسخ هاست، با استفاده از روش سطح پاسخ به طور تخصصی می توان این عمل را انجام داد [۱۸].

متغیرها یا پارامترهای ورودی عبارتند از: میزان کلکتور (g/t)، میزان کف ساز (g/t)، pH و زمان آماده سازی (minute). پاسخ ها یا پارامترهای خروجی عبارتند از: بازیابی در زمان طولانی (%)، ثابت سینتیک ( $\text{min}^{-1}$ ) و کارایی جدایش (%). فلوتاسیون مس. سطوح پارامترهای ورودی به گونه ای تعیین شدند که شرایط فعلی کارخانه را پوشش دهد (جدول ۳). در جدول (۳)،  $\alpha$  فاصله از نقطه مرکزی است که مقدار آن از رابطه  $\alpha = \sqrt{a_F}$  به دست می آید [۱۸].  $a_F$  تعداد فاکتورها یا پارامترهای ورودی می باشد که در این تحقیق تعداد فاکتورها ۴ تا است. بنابراین مقدار  $\alpha$  برابر ۲ می باشد. علاوه بر این هدف از انتخاب  $\alpha$  این است که واریانس نقاط، برابر شده و نقاط آزمایش، چرخش پذیر باشند. طرح آماری آزمایش های فلوتاسیون و مقادیر ثابت سینتیک، بازیابی در زمان طولانی و کارایی جدایش مس در جدول (۴) آمده است.

جدول ۳: سطوح پارامترهای ورودی

پارامتر	مقدار		pH	زمان آماده سازی (min)
	کلکتور X231 (g/t)	کف ساز A65 (g/t)		
علامت	A	B	C	D
سطوح	$-\alpha$	۰	۶	۱
	-۱	۱۲	۸	۴
	۰	۲۴	۱۰	۷
	+۱	۳۶	۱۲	۱۰
	$+\alpha$	۴۸	۳۲	۱۴

برای محاسبه ثابت سینتیک فلوتاسیون، از گزینه solver در نرم افزار اکسل و گذراندن بهترین خط از نقاط استفاده شده است. در این روش با استفاده از مدل مرتبه اول سینتیک، ثابت سینتیک فلوتاسیون و مقدار بازیابی در زمان طولانی به گونه ای به دست می آید که مجموع کمترین مربعات خطا حداقل شود.

جدول ۲: نتایج کانی شناسی نمونه معرف با استفاده از مطالعه کمی

میکروسکوپی		
کانی	فرمول شیمیایی	درصد وزنی
کالکوسیت	Cu <sub>2</sub> S	۰/۹۷
کولیت	CuS	۰/۰۷
کالکوپیریت	CuFeS <sub>2</sub>	۰/۶۰
پیریت	FeS <sub>2</sub>	۶/۲۹
لیمونیت	FeOOH	۰/۱۴
اسفالریت	ZnS	۰/۰۶
هماتیت	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۰۴
مگنتیت	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	۰/۰۸
سایر کانی ها (کوارتز، مالاکیت، آزوریت، کوپریت، مسکویت و ...)		
		۹۱/۷۵

#### ۲-۳- روش انجام آزمایش های فلوتاسیون

در مجتمع مس میدوک از سه کلکتور Z11 (سدیم ایزوبوتیل گزنتات)، A3477 (سدیم دی ایزوبوتیل دی تیوفسفات) و X231 (O- ایزوپروپیل -N- اتیل تیونوکربامات) به ترتیب به مقدار ۴، ۹ و ۲۰ گرم بر تن به طور همزمان استفاده می شود. همچنین از دو کف ساز A65 (پلی پروپیلن گلیکول) و A70 (متیل ایزوبوتیل کریبنول) به ترتیب به مقدار ۱۲ و ۸/۵ گرم بر تن استفاده می شود. در این تحقیق، مقادیر کلکتور A3477 و Z11 به ترتیب ۹ و ۴ گرم بر تن و مقدار کف ساز A70 برابر ۸/۵ گرم بر تن استفاده شده و مقادیر کلکتور X231 و کف ساز A65 متغیر در نظر گرفته شده است. علاوه بر این در این تحقیق، زمان آماده سازی برای کف ساز ۱ دقیقه، دور همزن ۱۱۰۰ دور بر دقیقه و درصد جامد پالپ ۲۸ درصد در نظر گرفته شده است. همچنین آزمایش ها در یک سلول ۳ لیتری دنور انجام شد.

در این تحقیق، برای انجام آزمایش های فلوتاسیون، پس از تنظیم pH با آهک، کلکتورها به پالپ افزوده شدند. پس از زمان آماده سازی، کف سازها به پالپ اضافه شدند و پس از یک دقیقه

مدل مناسب با کمترین خطا و بهترین انطباق، از تابع انتقال<sup>۱۶</sup> با توان  $\lambda$  استفاده شد که  $y$  مقدار پاسخ (در اینجا پاسخ یعنی بازبایی در زمان طولانی، ثابت سینتیک و کارایی جدایش فلوتاسیون مس) است. بهترین مقادیر برای  $\lambda$  با استفاده از نمودار Box - Cox موجود در نرم افزار DX7 به دست آمد. مقادیر  $\lambda$  برای مدل های ریاضی بازبایی، ثابت سینتیک و کارایی جدایش فلوتاسیون مس به ترتیب ۰/۱، ۱/۰۴ و ۰/۷ است. روابط ریاضی برای بازبایی در زمان طولانی، ثابت سینتیک و کارایی جدایش فلوتاسیون مس به صورت زیر می باشند:

$$(R_{\infty})^{0.1} = 1.56 + 0.0029A + 0.0016B + 0.016C + 0.0057AB + 0.0027AC - 0.0056BC + 0.0025BD - 0.005A^2 - 0.002B^2 - 0.012C^2 - 0.0026D^2 \quad (9)$$

$$(K)^{1.04} = 1.41 + 0.023A + 0.021B + 0.2C + 0.048D - 0.016AC - 0.07AD - 0.067BC + 0.054BD - 0.066CD - 0.04A^2 - 0.044B^2 - 0.23C^2 - 0.017BCD - 0.027ACD - 0.046A^2D - 0.036AB^2 \quad (10)$$

$$(S.E)^{0.7} = 20.21 + 0.21A + 1.07C + 0.56AB + 0.2AC - 0.55BC + 0.41BD - 0.38A^2 - 0.73C^2 \quad (11)$$

با توجه به نتایج آنالیز واریانس مربوط به مدل های ریاضی بازبایی در زمان طولانی، ثابت سینتیک و کارایی جدایش فلوتاسیون مس، تأثیر زمان آماده سازی کلکتور بر بازبایی در زمان طولانی و همچنین تأثیر مقدار کف ساز و زمان آماده سازی کلکتور بر کارایی جدایش فلوتاسیون مس در سطح اعتماد ۹۵ درصد، معنادار نیست.

لازم به ذکر است که در سطح اعتماد ۹۵ درصد، پارامترهایی که مقدار P آنها کمتر از ۰/۰۵ است، معنادارند. مقدار F هر پارامتر، بیانگر درجه اهمیت و مقدار تأثیر آن پارامتر است. علاوه بر این مدل باید معنادار باشد و نقصان در برآزش<sup>۱۷</sup> مدل معنادار نباشد [۱۸]. همچنین با استفاده از شش آزمایش تکرار (که با رنگ زرد در جدول ۴ مشخص شده است)، خطای خالص محاسبه شد. طبق نتایج آنالیز واریانس:

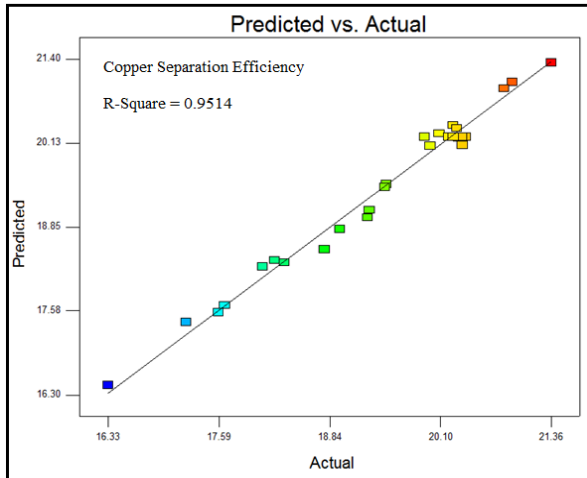
جدول ۴: طرح آماری آزمایش های فلوتاسیون و مقادیر پارامترهای سینتیکی و کارایی جدایش فلوتاسیون مس

Run	A	B	C	D	$R_{\infty}$	K	S.E
۱	-۱	+۱	+۱	-۱	۷۴/۹۱	۱/۱۹	۶۳/۷۴
۲	۰	۰	- $\alpha$	۰	۶۸/۹۵	۰/۸۲	۶۳/۵۶
۳	+۱	-۱	+۱	-۱	۸۷/۶۸	۱/۴۸	۷۶/۹۵
۴	۰	+ $\alpha$	۰	۰	۸۵/۵۱	۱/۲۶	۷۳/۸۲
۵	۰	۰	۰	۰	۸۷/۱۹	۱/۳۹	۷۱/۷۹
۶	۰	۰	۰	۰	۸۷/۲۸	۱/۳۵	۷۱/۱۷
۷	-۱	-۱	-۱	-۱	۷۰/۰۰	۰/۷۸	۶۶/۰۲
۸	۰	۰	+ $\alpha$	۰	۷۹/۴۴	۰/۹۱	۶۹/۴۸
۹	+۱	+۱	+۱	-۱	۸۸/۷۱	۱/۳۳	۷۲/۶۴
۱۰	-۱	-۱	+۱	+۱	۸۳/۹۲	۱/۳۵	۷۳/۴۴
۱۱	+ $\alpha$	۰	۰	۰	۸۰/۰۴	۱/۲۸	۶۸/۵۹
۱۲	- $\alpha$	۰	۰	۰	۷۴/۴۹	۱/۱۹	۶۲/۵۲
۱۳	۰	۰	۰	۰	۸۸/۲۵	۱/۳۸	۷۳/۴۸
۱۴	-۱	+۱	-۱	+۱	۷۰/۱۴	۱/۱۳	۶۳/۲۰
۱۵	+۱	+۱	+۱	+۱	۸۸/۳۶	۱/۰۹	۷۶/۴۶
۱۶	۰	۰	۰	۰	۸۶/۰۲	۱/۳۷	۷۴/۲۱
۱۷	-۱	-۱	+۱	-۱	۸۹/۵۲	۱/۳۶	۷۹/۳۱
۱۸	+۱	+۱	-۱	+۱	۷۶/۱۸	۱/۱۰	۶۹/۵۸
۱۹	۰	- $\alpha$	۰	۰	۸۱/۵۶	۱/۱۷	۷۳/۷۵
۲۰	۰	۰	۰	۰	۸۸/۷۶	۱/۳۸	۷۳/۱۹
۲۱	-۱	+۱	+۱	+۱	۷۷/۸۷	۱/۳۳	۶۸/۴۷
۲۲	۰	۰	۰	+ $\alpha$	۸۱/۴۰	۱/۴۹	۷۲/۱۲
۲۳	-۱	-۱	-۱	+۱	۶۵/۹۷	۰/۸۸	۶۰/۰۴
۲۴	۰	۰	۰	- $\alpha$	۸۲/۹۹	۱/۳۱	۷۳/۶۸
۲۵	۰	۰	۰	۰	۸۷/۵۹	۱/۳۹	۷۳/۹۸
۲۶	-۱	+۱	-۱	-۱	۶۷/۹۵	۰/۸۲	۶۰/۴۱
۲۷	+۱	+۱	-۱	-۱	۷۳/۶۶	۰/۸۸	۶۶/۸۹
۲۸	+۱	-۱	-۱	-۱	۶۳/۸۰	۰/۸۷	۵۸/۲۹
۲۹	+۱	-۱	+۱	+۱	۸۵/۷۴	۱/۱۱	۷۴/۰۱
۳۰	+۱	-۱	-۱	+۱	۶۲/۶۰	۰/۷۶	۵۴/۰۶

### ۳- بررسی و تحلیل نتایج

#### ۳-۱- روابط ریاضی میان پارامترهای ورودی و پاسخها

مدلی که انطباق بسیار مناسبی بر داده های بازبایی و ثابت سینتیک فلوتاسیون مس دارد به ترتیب مدل درجه دوم<sup>۱۴</sup> و مدل درجه سوم<sup>۱۵</sup> است. همچنین مدل مناسب برای کارایی جدایش در این تحقیق، مدل درجه دوم است. به منظور دستیابی به یک



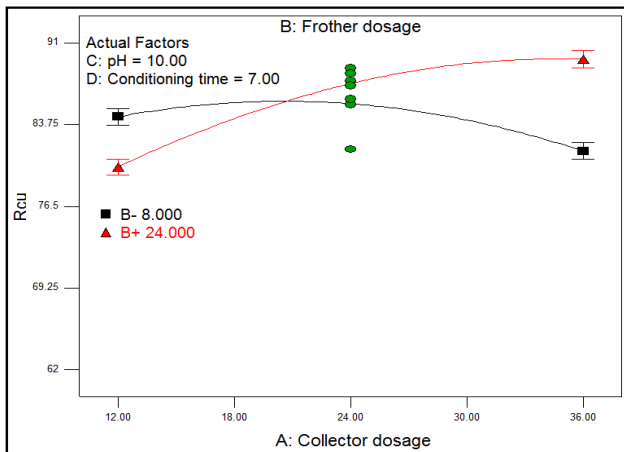
شکل ۳: نمودار مقادیر واقعی در مقابل مقادیر تخمینی مدل کارایی

جدایش فلوتاسیون مس

۳-۲- تأثیر پارامترهای عملیاتی بر بازیابی مس ( $R_m$ )

۳-۲-۱- تأثیر مقدار کلکتور X231 و کف‌ساز A65

همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود در مقادیر پایین کف‌ساز، افزایش مقدار کلکتور تا ۲۴ گرم بر تن، افزایش بازیابی را به دنبال دارد و برای بیشتر از آن، کاهش بازیابی را در پی خواهد داشت؛ این پدیده می‌تواند ناشی از اثر میسلیزاسیون<sup>۱۸</sup> برای مقادیر اضافی کلکتور باشد [۱۹]. در مقادیر بالای کف‌ساز نیز این روند وجود دارد. نکته دیگری که از شکل (۴) برداشت می‌شود این است که در مقادیر بالای مصرف کف‌ساز، افزایش مقدار کلکتور X231 تا ۳۶ گرم بر تن، منجر به افزایش بازیابی فلوتاسیون مس می‌شود که این پدیده را می‌توان به اثر مثبت و مشترک مقادیر بالای کف‌ساز و کلکتور نسبت داد.



شکل ۴: نمودار تأثیر مقدار کلکتور X231 بر بازیابی مس به ازای دو

مقدار مختلف کف‌ساز A65

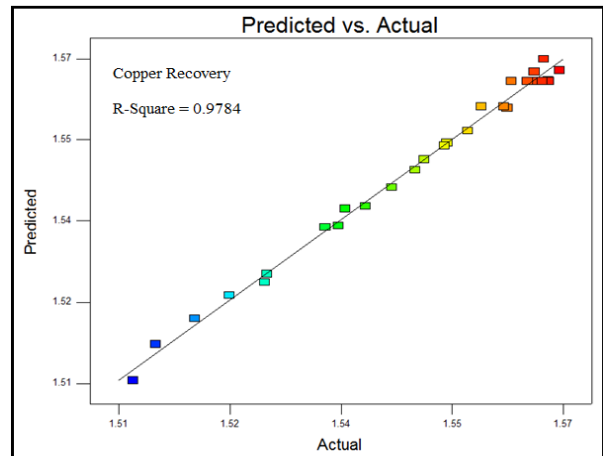
۳-۲-۲- تأثیر برهم کنش pH و مقدار کلکتور

✓ pH و زمان آماده سازی به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر بر بازیابی دارند،

✓ pH و مقدار کلکتور به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر بر ثابت سینتیک دارند،

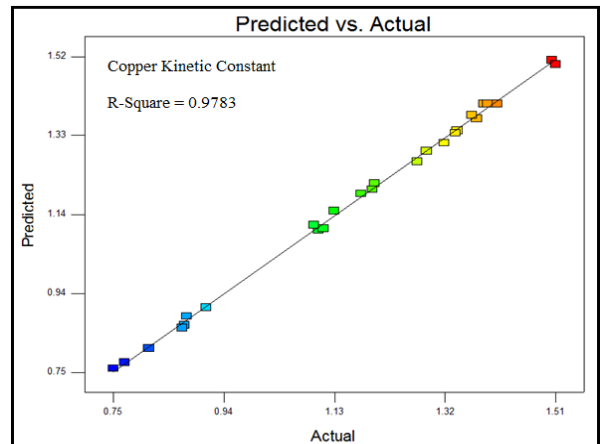
✓ و pH و مقدار کف‌ساز به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر بر زمان آماده سازی دارند.

همچنین نمودار مقادیر واقعی پارامترهای سینتیکی و کارایی جدایش فلوتاسیون مس در مقابل مقادیر حاصل از مدل در شکل-های (۱) تا (۳) آورده شده است.



شکل ۱: نمودار مقادیر واقعی در مقابل مقادیر تخمینی مدل بازیابی در

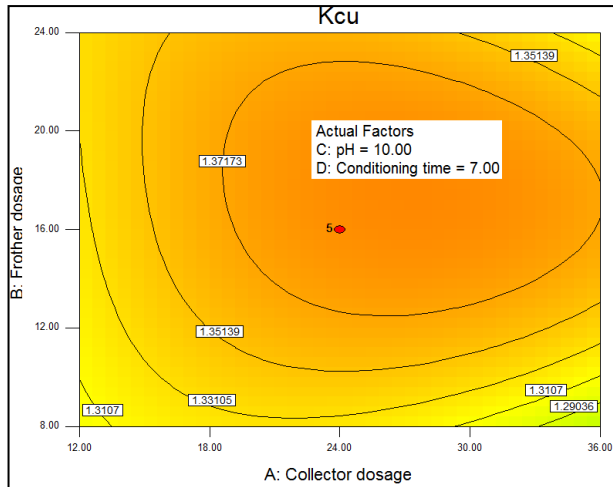
زمان طولانی فلوتاسیون مس



شکل ۲: نمودار مقادیر واقعی در مقابل مقادیر تخمینی مدل ثابت

سینتیک فلوتاسیون مس

حال آنکه در مقادیر بالای کلکتور افزایش مقدار کف ساز از ۸ تا ۱۶ گرم بر تن، افزایش ثابت سینتیک و بیشتر از ۱۶ گرم بر تن، کاهش ثابت سینتیک فلوتاسیون مس را در پی دارد. این پدیده می تواند ناشی از اثر میسلیزاسیون باشد [۱۹].



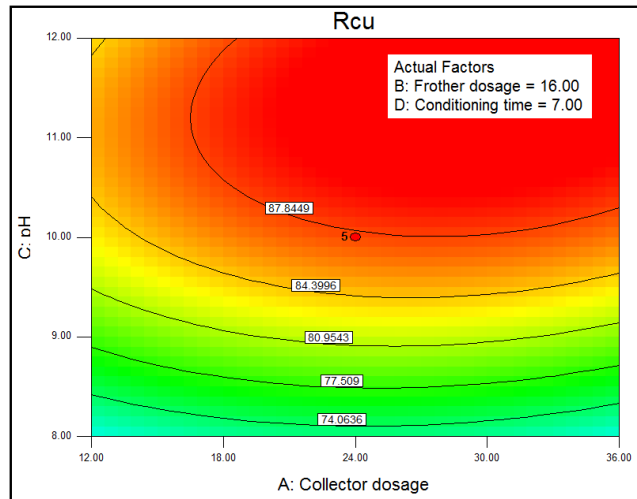
شکل ۶: نمودار تأثیر مقدار کف ساز A65 بر ثابت سینتیک مس سولفیدی در دو مقدار کلکتور X231

### ۳-۳-۲- تأثیر pH

در مقادیر پایین کلکتور، افزایش pH از ۸ تا ۱۱/۷، افزایش چشمگیر ثابت سینتیک را در پی دارد و بیشتر از آن ثابت سینتیک کاهش می یابد (شکل ۷). بدیهی است که در pHهای بالا به دلیل پایداری کف و بیشتر بودن قدرت حمل ذرات توسط حبابها نرخ فلوتاسیون مس سولفیدی افزایش می یابد و بیشتر از pH = ۱۱/۷ به دلیل تشکیل و رسوب احتمالی گونه های پایدار هیدروکسید مس روی سطح کانی و هیدروفیل شدن سطح، کاهش نرخ فلوتاسیون رخ می دهد [۲۱]. این در حالی است که در مقادیر مختلف کلکتور در pHهای ۱۱ تا ۱۱/۷ بیشترین ثابت سینتیک فلوتاسیون مس سولفیدی و بیشتر از pH=۱۱/۷ کاهش ثابت سینتیک فلوتاسیون رخ می دهد.

شکل (۵) نشان می دهد که در مقادیر پایین کلکتور، افزایش pH از ۸ تا ۱۱/۵، افزایش چشمگیر بازیابی و بیشتر از آن کاهش بازیابی را در پی دارد. اما در مقادیر بالای کلکتور، افزایش pH از ۸ تا ۱۲ افزایش بازیابی را در پی دارد. این در حالی است که در pHهای ۱۱ تا ۱۲ بیشترین بازیابی مس در مقادیر مختلف کلکتور رخ می دهد. علت این پدیده را می توان مربوط به نحوه عملکرد کلکتورها در pHهای مختلف دانست.

در مورد کلکتور گزنتات، گونه های مسئول آبرانی مس، گونه های گزنتات - فلز و دی گزنتوژن هستند و برای کلکتور دی تیوفسفات، گونه ای دی تیوفسفات - فلز و دی تیوفسفاتوژن هستند. در مورد این دو کلکتور، به طور قطع گونه دی تیوفسفاتوژن در pHهای بیشتر از ۸ و گونه دی گزنتوژن در pHهای بیشتر از ۱۰/۵ پایدار نیست اما در مورد کلکتور X231 که یک کلکتور از گروه تیونوکربامات ها است، گونه تیونوکربامات فلزی در محدوده وسیعی از pH پایدار است و می تواند بازیابی های بالای مس در pHهای بالا را سبب شود. علاوه بر این در pHهای بالاتر از ۱۲، کاتیون های  $Fe^{2+}$  و  $Cu^{2+}$  موجود در پالپ به صورت گونه های پایدار هیدروکسید مس و آهن روی سطح کانی رسوب می کنند و سطح را هیدروفیل می کنند [۲۰].



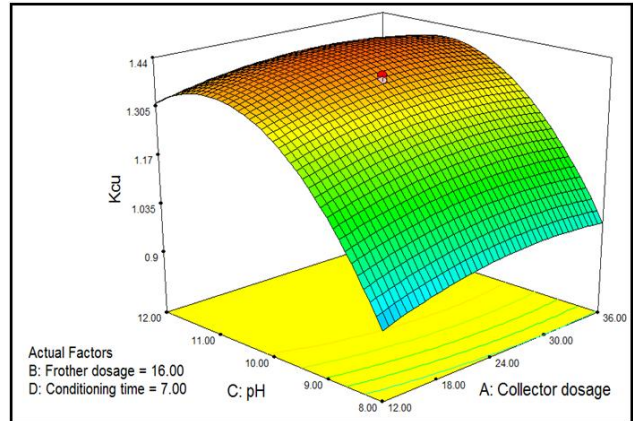
شکل ۵: نمودار تأثیر مقدار کلکتور X231 و pH بر بازیابی مس

### ۳-۳-۳- تأثیر پارامترهای عملیاتی بر ثابت سینتیک مس

#### ۳-۳-۱- تأثیر مقدار کلکتور X231 و کف ساز A65

شکل (۶) نشان می دهد در مقادیر پایین کلکتور، تغییرات مقدار کف ساز، تأثیر چندانی بر ثابت سینتیک فلوتاسیون مس ندارد.

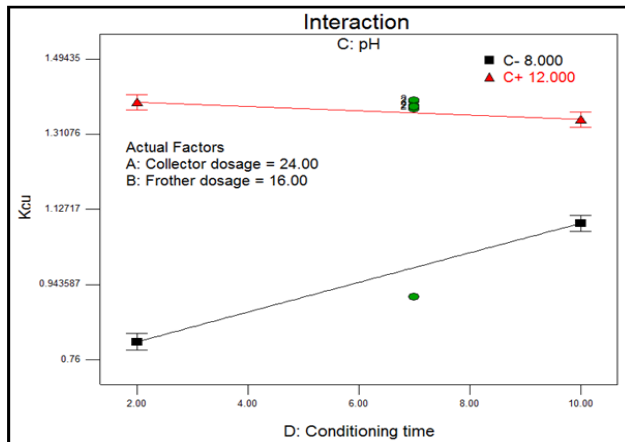
علاوه بر این شکل (۹) نشان می دهد که در سطح پایین pH، افزایش زمان آماده سازی کلکتور باعث افزایش ثابت سینتیک فلوتاسیون مس سولفیدی می شود. این پدیده می تواند به دلیل پایداری گونه های دی گزنتوزن، دی تیوفسفاتوزن، گزنتات - فلز، دی تیوفسفات - فلز و تیونوکربامات - فلز در سطح پایین pH باشد و لذا افزایش زمان آماده سازی می تواند فرصت کافی را برای تشکیل گونه های مذکور روی سطح کانی فراهم کند و در نتیجه نرخ فلوتاسیون را افزایش دهد. اما در سطح بالای pH، افزایش زمان آماده سازی کلکتور کاهش ناچیز ثابت سینتیک فلوتاسیون مس سولفیدی را به دنبال دارد که می تواند ناشی از اثر منفی مقادیر بالای pH بر ثابت سینتیک فلوتاسیون مس سولفیدی باشد.



شکل ۷: نمودار تأثیر pH و مقدار کلکتور X231 بر ثابت سینتیک فلوتاسیون مس

### ۳-۳-۳- تأثیر زمان آماده سازی کلکتور

همانطور که در شکل (۸) مشاهده می شود، در مقادیر پایین کلکتور، افزایش زمان آماده سازی، افزایش ثابت سینتیک را در پی دارد که این امر می تواند به دلیل وجود فرصت کافی برای جذب مقدار بیشتری از کلکتور روی سطح کانی باشد. این در حالی است که در مقادیر بالاتر کلکتور، افزایش زمان آماده سازی، کاهش ثابت سینتیک را در پی دارد. که ناشی از اثر منفی مقادیر بالای کلکتور و زمان آماده سازی بر ثابت سینتیک فلوتاسیون مس سولفیدی است.

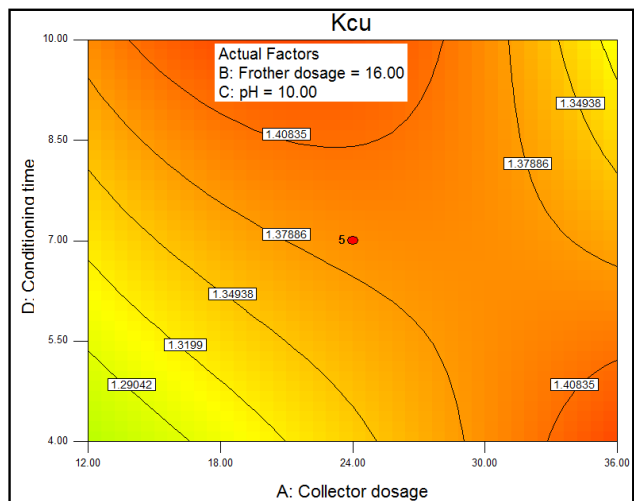


شکل ۹: نمودار تأثیر زمان آماده سازی بر ثابت سینتیک مس سولفیدی در دو سطح مختلف pH

### ۳-۴-۳- تأثیر پارامترهای عملیاتی بر کارایی جدایش مس

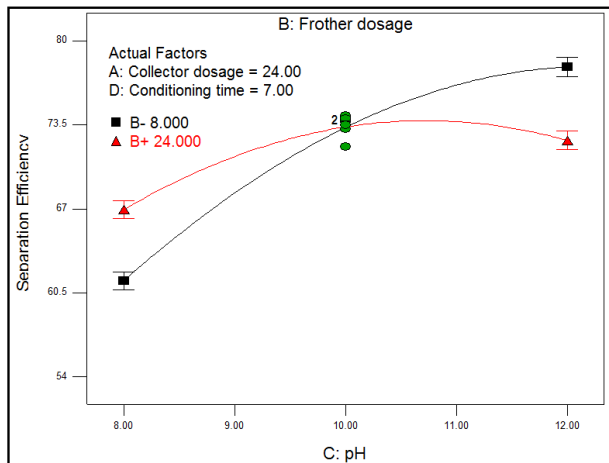
#### ۳-۴-۳-۱- تأثیر مقدار کلکتور X231 و کف ساز A65

شکل (۱۰) نشان می دهد در مقادیر پایین کف ساز، افزایش مقدار کلکتور تا ۲۴ گرم بر تن، افزایش ناچیز کارایی جدایش را به دنبال دارد و بیشتر از آن، کارایی جدایش کاهش می یابد. این پدیده می تواند ناشی از اثر میسلیزاسیون برای مقادیر اضافی کلکتور باشد [۱۹]. در مقادیر بالای کف ساز، افزایش مقدار کلکتور تا ۳۶ گرم بر تن، افزایش کارایی جدایش را به دنبال دارد که می تواند ناشی از اثر مثبت مقادیر بالای کلکتور و کف ساز باشد.



شکل ۸: نمودار تأثیر زمان آماده سازی کلکتور و مقدار کلکتور X231 بر ثابت سینتیک فلوتاسیون مس

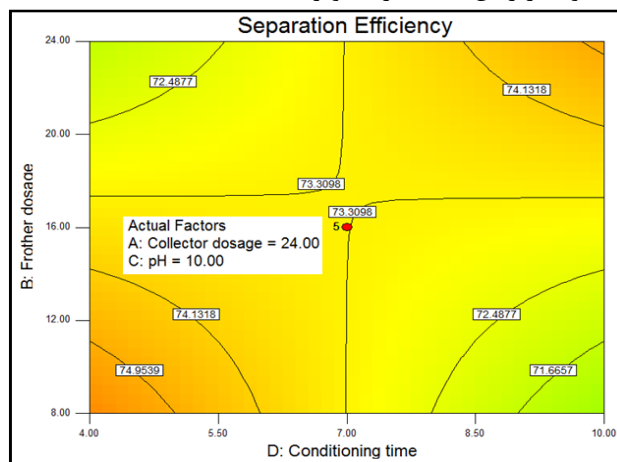




شکل ۱۲: تأثیر مقدار کف‌ساز A65 و pH بر کارایی جدایش مس

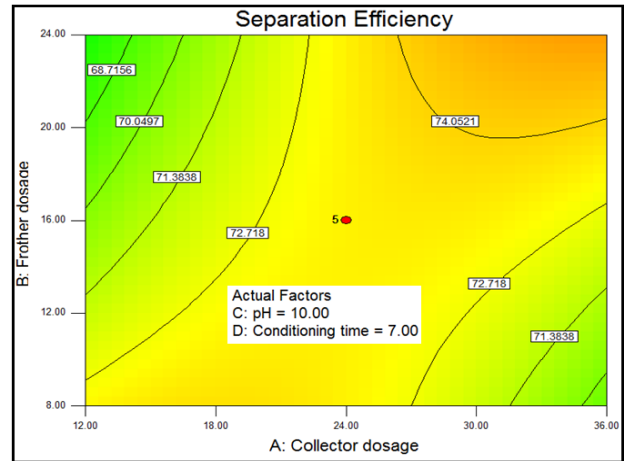
### ۳-۴-۳- تأثیر زمان آماده‌سازی کلکتور

شکل (۱۳) نشان می‌دهد که در مقادیر پایین کف‌ساز A65، افزایش زمان آماده‌سازی از ۴ تا ۱۰ دقیقه، کاهش کارایی جدایش و در مقادیر بالای کف‌ساز A65، افزایش زمان آماده‌سازی از ۴ تا ۱۰ دقیقه، افزایش کارایی جدایش فلوتاسیون مس را در پی دارد که می‌تواند ناشی از افزایش پایداری حباب‌ها در مقادیر بالای کف‌ساز باشد. لازم به ذکر است که مقادیر زیاد کف‌ساز A65 باعث ایجاد حباب‌های ریز و در نتیجه افزایش شار سطحی حباب می‌شود که می‌تواند در انتقال بیشتر کانی هیدروفوب شده در این محدوده از زمان آماده‌سازی موثر باشد [۲۱].



شکل ۱۳: نمودار تأثیر زمان آماده‌سازی و مقدار کف‌ساز A65 بر کارایی جدایش مس

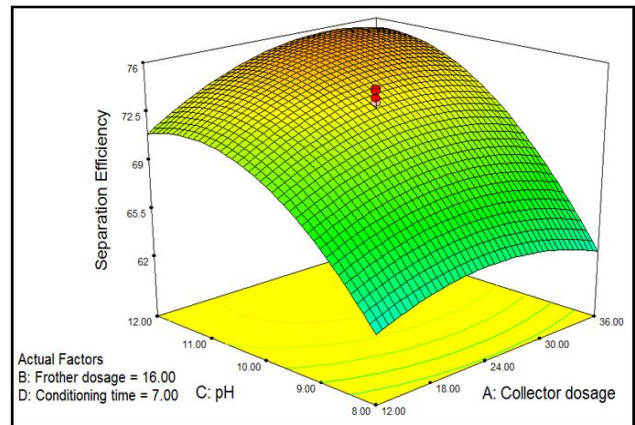
### ۳-۵- تعیین شرایط بهینه عملیاتی



شکل ۱۰: نمودار تأثیر مقدار کلکتور X231 و کف‌ساز A65 بر کارایی جدایش مس

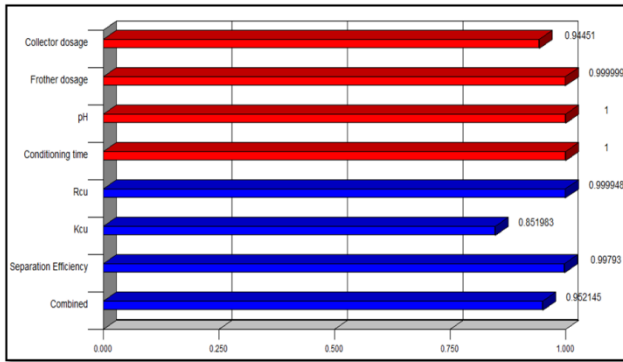
### ۳-۴-۲- تأثیر برهم‌کنش pH و مقدار کلکتور

شکل (۱۱) نشان می‌دهد که در مقادیر پایین کلکتور X231، افزایش pH از ۸ تا ۱۱/۵، افزایش چشمگیر کارایی جدایش و بیشتر از آن کاهش ناچیز کارایی جدایش فلوتاسیون مس را در پی دارد که می‌تواند به دلیل رسوب کاتیون‌های  $Fe^{2+}$  و  $Cu^{2+}$  به صورت گونه‌های هیدروکسید در pH‌های بالا باشد [۲۰].



شکل ۱۱: نمودار تأثیر مقدار کلکتور X231 و pH بر کارایی جدایش فلوتاسیون مس

همچنین همانطور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود در مقادیر پایین کف‌ساز، افزایش pH از ۸ تا ۱۲، افزایش زیاد کارایی جدایش را به دنبال دارد. اما در مقادیر بالاتر کف‌ساز، افزایش pH از ۸ تا ۱۰/۷، افزایش و بیشتر از  $pH=10/7$  کاهش کارایی جدایش مس را در پی دارد که می‌تواند ناشی از اثر منفی مقادیر بالای کف‌ساز و pH بر کارایی جدایش مس باشد.



شکل ۱۴: نمودار درجه مطلوبیت بهینه‌سازی برای شرایط بهینه عملیاتی فلوتاسیون مس

به منظور تایید نتایج حاصل از نرم افزار، دو آزمایش تکرار با شرایط بهینه انجام شد که نتایج آن در جدول (۶) آمده است.

جدول ۶: نتایج دو آزمایش تکرار برای سینتیک فلوتاسیون مس در شرایط بهینه عملیاتی

Separation Efficiency (%)	K (min <sup>-1</sup> )	R <sub>∞</sub> (%)	شماره آزمایش تکرار
۷۹/۶۸	۱/۳۶	۸۸/۶۹	۱
۷۸/۹۴	۱/۳۹	۸۹/۸۶	۲

#### ۴- نتیجه‌گیری

به طور خلاصه نتایج این تحقیق عبارتند از:

- ❖ طبق نتایج به دست آمده، pH و مقدار کف‌ساز A65 به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر بر بازیابی فلوتاسیون مس دارند.
- ❖ در مقادیر پایین کلکتور، افزایش مقدار کف‌ساز، کاهش بازیابی مس را به دنبال دارد. حال آنکه در مقادیر بالای کلکتور، عکس این مطلب رخ می‌دهد؛ یعنی افزایش مقدار کف‌ساز موجب افزایش چشمگیر بازیابی مس می‌شود. این پدیده می‌تواند ناشی از اثر مثبت مقادیر بالای کف‌ساز و کلکتور باشد.
- ❖ pH و مقدار کلکتور X231 به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر بر ثابت سینتیک فلوتاسیون مس دارند.
- ❖ در مقادیر مختلف pH، افزایش مقدار کلکتور X231 از ۱۲ تا ۳۶ گرم بر تن تأثیر چندانی بر ثابت سینتیک فلوتاسیون مس ندارد.

با استفاده از گزینه Optimization موجود در نرم افزار DX7 بهینه‌سازی انجام شد. برای رسیدن به هدف یعنی ماکزیمم ثابت سرعت، بازیابی در زمان طولانی و کارایی جدایش مس، مقادیر پارامترهای عملیاتی باید به گونه‌ای تعیین شود که به لحاظ اقتصادی به صرفه باشد و از آنجا که مهمترین مسئله در صنعت مس، کاهش مصرف مواد شیمیایی است، برای بهینه‌سازی، باید مقادیر مصرف کلکتور X231 و کف‌ساز A65 مینیمم شود.

شرایط بهینه عملیاتی برای سینتیک فلوتاسیون و کارایی جدایش مس در جدول (۵) آورده شده است. همچنین نمودار درجه مطلوبیت برای شرایط بهینه عملیاتی، در شکل (۱۴) نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که بهینه‌سازی برای کاهش مصرف کلکتور X231 و کاهش مصرف مقدار کف‌ساز A65، به ترتیب ۹۴ و ۹۹ درصد موفق عمل کرده است. همچنین در این بهینه‌سازی به طور کلی، ۹۵ درصد موفق عمل شده است. طبق نتایج به دست آمده از این بهینه‌سازی، مشخص شد که با اعمال شرایط عملیاتی انتخابی (مقدار کلکتور X231 = ۱۳/۳۳g/t، مقدار کف‌ساز A65 = ۴/۱۷min و pH = ۱۱/۵۴)، زمان آماده‌سازی، بازیابی فلوتاسیون مس کلی در سطح اعتماد ۹۵ درصد در محدوده (۹۰/۸۷ - ۸۸/۱۸) درصد، ثابت سینتیک فلوتاسیون مس کلی در محدوده (۱/۴۱ - ۱/۳۵) بر دقیقه و کارایی جدایش فلوتاسیون در محدوده (۸۰/۵۳ - ۷۷/۹۸) درصد قرار می‌گیرد.

جدول ۵: شرایط بهینه عملیاتی پیشنهادی توسط نرم افزار DX7 برای سینتیک فلوتاسیون مس و کارایی جدایش

Number	A	B	C	D	R <sub>Cu</sub>	K <sub>Cu</sub>	S.E <sub>Cu</sub>	Desirability
1	12.99	8.00	11.52	4.00	89.3207	1.37848	79.3034	0.952
2	12.89	8.00	11.56	4.00	89.2857	1.37729	79.3097	0.952
3	13.33	8.00	11.54	4.17	89.5184	1.38005	79.2548	0.952 Selected
4	12.38	8.00	11.51	4.04	89.0743	1.37597	79.1215	0.952
5	12.03	8.00	11.59	4.00	88.9173	1.37273	79.1244	0.952
6	12.39	8.01	11.70	4.00	89.0522	1.37054	79.2802	0.951
7	12.03	8.00	11.58	4.38	89.0327	1.3739	78.7988	0.951
8	13.31	8.00	11.72	4.24	89.52	1.3744	79.3101	0.951
9	13.85	8.00	11.50	6.56	89.5191	1.38867	77.3159	0.938
10	12.07	8.00	11.96	5.78	88.8423	1.35794	77.7698	0.935

درصدی کارایی جدایش مس در مقیاس آزمایشگاهی شد. لازم به ذکر است که نتایج به دست آمده برای اجرا در مجتمع مس شهربابک، در دست بررسی است.

## منابع

[۱]. رضایی، بهرام، ۱۳۷۸، *فلوتاسیون*، تهران، انتشارات دانشگاه هرمزگان.

[۲]. شاهچراغی، سید هادی، ۱۳۹۰، *بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی بر سینتیک فلوتاسیون کانی های سولفیدی مس*، پایان-نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

[3]. Brozek, M., & Mlynarczykowska, A, 2006, "Application of the stochastic model for analysis of flotation kinetics with coal as an example", *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 40, 31-44.

[۴]. بنیسی، صمد، ۱۳۸۸، *مسائل کاربردی فراوری مواد معدنی*، انتشارات دانشگاه هرمزگان.

[5]. Wills, B.A., & Napier – Munn, T, 2005, "Mineral Processing Technology", Elsevier Science & Technology Books, Seventh ed., 284 – 316.

[6]. Pyke, B., Fornasiero, D., Ralston, J, 2003, "Bubble particle heterocoagulation under turbulent conditions", *Journal of Colloid Interface Science*, 265, 141–151.

[7]. Sherrell, I.M, 2004, "Development of a flotation rate equation from first principles under turbulent flow conditions", *Mining and Minerals Engineering. Virginia Polytechnic Institute and State University. Int. J. Miner. Process*, 58, 35-43.

[8]. Duan, J., Fornasiero, D., Ralston, J, 2003, "Calculation of the flotation rate constant of chalcopyrite particles in an ore", *Int. J. Miner. Process*, 72, 227–237.

[9]. Cilek, E.C, 2004, "Estimation of flotation kinetic parameters by considering interactions of the operating variables", *Technical note, Minerals Engineering*, 17, 81-85.

❖ در مقادیر بالای کلکتور افزایش مقدار کف ساز از ۸ تا ۱۸ گرم بر تن، افزایش ثابت سینتیک و بیشتر از ۱۶ گرم بر تن، کاهش ثابت سینتیک فلوتاسیون مس را در پی دارد. این پدیده می تواند ناشی از اثر میسلیزاسیون باشد.

❖ در مقادیر بالای کف ساز، افزایش مقدار کلکتور تا ۳۶ گرم بر تن، افزایش کارایی جدایش را به دنبال دارد که می تواند ناشی از اثر مشترک مقادیر بالای کلکتور و کف ساز باشد.

❖ طبق نتایج به دست آمده، فقط pH و مقدار کلکتور X231 بر کارایی جدایش مس موثر هستند.

❖ در مقادیر پایین کلکتور X231، افزایش pH از ۸ تا ۱۱/۵، افزایش چشمگیر کارایی جدایش و بیشتر از آن کاهش ناچیز کارایی جدایش فلوتاسیون مس را در پی دارد که می تواند به دلیل رسوب کاتیون های  $Cu^{2+}$  و  $Fe^{2+}$  به صورت گونه های هیدروکسید مس و آهن در pHهای بالا باشد.

❖ در مقادیر بالاتر کف ساز، افزایش pH از ۸ تا ۱۰/۷ افزایش و بیشتر از  $pH=10/7$  کاهش کارایی جدایش مس را در پی دارد که می تواند ناشی از اثر منفی مقادیر زیاد pH بر کارایی جدایش مس باشد.

❖ در مقادیر پایین کف ساز A65، افزایش زمان آماده سازی از ۴ تا ۱۰ دقیقه، کاهش کارایی جدایش و در مقادیر بالای کف ساز A65، افزایش زمان آماده سازی از ۴ تا ۱۰ دقیقه، افزایش کارایی جدایش فلوتاسیون مس را در پی دارد که می تواند ناشی از اثر مشترک مقادیر بالای کف ساز و زمان آماده سازی باشد.

❖ با اعمال شرایط بهینه عملیاتی، بازیابی فلوتاسیون مس کلی در سطح اعتماد ۹۵ درصد در محدوده (۹۰/۸۷ - ۸۸/۱۸) درصد، ثابت سینتیک فلوتاسیون مس کلی در محدوده (۱/۴۱ - ۱/۳۵) بر دقیقه و کارایی جدایش فلوتاسیون در محدوده (۸۰/۵۳ - ۷۷/۹۸) درصد قرار گرفت. نتایج این تحقیق موجب کاهش مصرف مقادیر کلکتور X231 و کف ساز A65 هر کدام به میزان ۷ تا ۸ گرم بر تن نسبت به شرایط فعلی کارخانه، افزایش ۳ تا ۴ درصدی بازیابی مس کلی و افزایش ۲ تا ۳

[20]. Chandra, A., Gerson, A, 2009, "A review of the fundamental studies of the copper activation mechanisms for selective flotation of the sulfide minerals, sphalerite and pyrite", *Advances in colloid and interface science*, 145, 97-110.

[21]. Bulatovic, S.M, 2007, "*Handbook of Flotation Reagents*", Elsevier Science & Technology Books.

[10].Sripriya, R., Rao, P.V., Choudhury, B.R, 2003,"*Optimisation of operating variables of fine coal flotation using a combination of modified flotation parameters and statistical techniques*", *Int. J. Miner.Process.*68, 109– 127.

[11]. Suazo, C.J., Kracht, W., Alruiz, O.M, 2010,"*Geometallurgical modeling of the Collahuasi flotation circuit*", *Minerals Engineering*, 23, 137 – 142.

[12]. Pecina, E.T., Rodriguez, M., Castillo, P., Diaz, V., & Orrantia, E, 2009,"*Effect of Leptospirillum ferrooxidans on the flotation kinetics of sulphide ores*", *Minerals Engineering*, 22, 462–468.

[13].Changunda, K., Harris, M., & Deglon, D.A, 2008,"*Investigating the effect of energy input on flotation kinetics in an oscillating grid flotation cell*", *Minerals Engineering*, 21, 924–929.

[14]. Xian – Ping, L., & Xue - Kun, T, 2011,"*Effect of size distribution of flotation kinetics of chalcopyrite*", *International Conference on Environment Science and Engineering - IACSIT Press, Singapore*, 8, 81-85.

[15]. Kuopanportti, H., Suorsa, T., Pollanen, E, 1997, "*Effects of oxygen on kinetics of conditioning in sulphide ore flotation*", *Minerals Engineering*, Vol.10, No.11, pp.1193-1205.

[16]. Natarajan, R., Nirdosh, I, 2009, "*Effect of molecular structure on the kinetics of flotation of a Canadian nickel ore by N-arylhydroxamic acids*", *Int. J. Miner. Process*, 93, 284–288.

[17]. Hosten, C., Tezcan, A, 1990, "*The influence of frother type on the flotation kinetics of a massive copper sulphide ore*", *Minerals Engineering*, 3, 637-640.

[18]. Lazic, Z.R, 2004, "*Design of Experiments in Chemical Engineering*", WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

[۱۹]. فورستینو و همکاران، ۱۳۸۲، *شیمی فلوتاسیون*، ترجمه محمود عبداللهی، تهران، جهاد دانشگاهی تربیت مدرس و امیرکبیر.

### پی‌نوشت

<sup>۱</sup>Kuopanportti

<sup>۲</sup>Pyke

<sup>۳</sup>Duan

<sup>۴</sup>Pecina

<sup>۵</sup>Leptospirillum ferrooxidans

<sup>۶</sup>Natarajan

<sup>۷</sup>Hosten

<sup>۸</sup>Tezcan

<sup>۹</sup>Pine Oil

<sup>۱۰</sup>MIBC

<sup>۱۱</sup>Xian - ping

<sup>۱۲</sup>Response Surface

<sup>۱۳</sup>Central Composite

<sup>۱۴</sup>Quadratic

<sup>۱۵</sup>Cubic

<sup>۱۶</sup>Transform

<sup>۱۷</sup>Lack of Fit

<sup>۱۸</sup>Micellization