

تعیین شرایط بهینه فلوتاسیون کالکوسیت در مقیاس آزمایشگاهی با استفاده از روش تاگوچی در مجتمع مس سرچشمه

سید ضیاءالدین شفاپی*، صمد بنیسی**، محمد کارآموزیان*** و افسر اسلامی***
دانشکده مهندسی معدن و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود
بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان
امور تحقیقات و مطالعات مس سرچشمه

(دریافت مقاله: ۸۱/۲/۲۹ - دریافت نسخه نهایی: ۸۲/۴/۱۷)

چکیده - بهینه‌سازی فرایند یکی از مهمترین فعالیتهای در صنعت پر رقابت امروز است. هزینه بالای پروژه‌های تحقیق و توسعه، بهره‌گیری از روشهای طراحی آزمایش را که با حداقل تعداد آزمایش، عوامل موثر بر فرایندها را مشخص کند ضروری ساخته است. استفاده از روشهای مختلف طراحی آزمایش برای رسیدن به این هدف در دو دهه گذشته گسترش زیادی داشته است. در مقایسه با دیگر روشهای رایج مانند طراحی فاکتوریل کامل، فاکتوریل جزئی، مربعات لاتین و ... روش طراحی آزمایش تاگوچی^۱ ضمن دارا بودن این نقش به دلیل جامعتر بودن در بخشهایی از صنایع کاربرد وسیعتری پیدا کرده است. در مقاله حاضر، با به کارگیری روش طراحی آزمایش تاگوچی در عملیات فلوتاسیون سنگ معدن مسی که در آن کانی کالکوسیت^۱ غالب است، تأثیر عوامل مختلف در مقیاس آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. با مطالعه تأثیر هفت عامل تأثیر گذار بر فلوتاسیون مشخص شد که اگر عوامل قابل کنترل، از جمله میزان مصرف کلکتورهای Z_{11} (سدیم ایزوپروپیل گزنتات) و R_{407} (مرکاپتوبنزوتیازول)، کف سازهای روغن کاج و A_{65} (پلی پروپیلن گلیکول) و میزان خردایش و pH در سطح بالای خود (مقدار بیشینه مورد آزمایش) قرار بگیرند، بالاترین بازایی عملیات (۸۹/۲٪) حاصل خواهد شد. برای این عملیات زمان ماند بهینه یازده دقیقه به دست آمد. در این تحقیق علاوه بر کاهش قابل توجه در هزینه و زمان لازم برای آزمایش نسبت به سایر روشها، بازایی عملیات حداقل به میزان ۵٪ نسبت به مقدار متوسط آزمایشها بهبود پیدا کرد.

واژگان کلیدی: طراحی آزمایشها، روش تاگوچی، آمار در مهندسی، فلوتاسیون کالکوسیت، مس سرچشمه

Laboratory Scale Determination of Optimum Flotation Conditions of Chalcocite at the Sarcheshmeh Copper Complex Using the Taguchi Method

S. Z. Shafaie, S. Banisi, M. Karamozian and A. Islami

Assistant Prof., Mining Eng. Dept., Shahrood University. shafaie@icrc.ac.ir

Associate Prof., Mining Eng. Dept., Shahid Bahonar University of Kerman, Banisi@mail.UK.ac.ir

Research Scientist, R & D Division of Sarcheshmeh, Kerman, Iran

Abstract: Process optimization is one of the most important activities in today's competitive industries. the rather high cost of research and development has necessitated the development of experimental methods by which the factors affecting processes

***_ کارشناسی ارشد

**_ دانشیار

*_ استادیار

could be determined with minimum number of experiments. Over the last two decades, various types of experimental designs have been used. Among the different methods of experimental design such as complete and partial factorial and Latin squares design, the Taguchi method has found wide applications in some industrial divisions because of its comprehensive nature. In this paper, the laboratory scale flotation of the Sarcheshmeh copper ore which mainly consists of chalcocite was studied using the Taguchi method. The effects of seven factors namely collectors, Z_{11} (Xanthate) and R_{407} (Methyl isobutyl carbonyl), frothers, pine oil and A_{65} (Polypropylene glycol), particle size, pH and flotation time were investigated. In addition to a significant reduction in cost and time of experimentation, the results indicated that a 5% increase in copper recovery could be obtained if all the factors are tested at their high experimental levels, as suggested by the Taguchi method. The optimal flotation time was also found to be 11 minutes.

Keywords: Statistical design of experiments, Taguchi, Flotation, Sarcheshmeh, Chalcocite.

۱- مقدمه

بهبود کیفیت و بهره‌وری زمانی مؤثر خواهد بود که به صورت بخشی جدا ناپذیر از چرخه طراحی و توسعه فرایند تولید درآید. استفاده از روشهای طراحی آزمایشها به‌ویژه در مراحل اولیه توسعه، خصوصاً برای طراحی تولید محصولات جدید و یا افزایش کیفیت محصولات موجود از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱].

استفاده صحیح از روشهای آماری طراحی آزمایش می‌تواند علاوه بر سهولت در مراحل تولید محصولات، باعث ارتقای سطح اطمینان از کیفیت محصولات و بهبود عملکرد سیستم شود. این روشها می‌توانند طراحی و توسعه محصول و فعالیتهای مرتبط با حل مشکلات فرایند تولید را به میزان قابل توجهی بهبود بخشند [۲].

بنا به تعریف، آزمایشهای طراحی شده شامل یک‌سری آزمایشهایی است که در آنها به‌طور آگاهانه در متغیرهای ورودی فرایند تغییراتی داده می‌شود، تا از این طریق میزان تغییرات حاصل در پاسخ (خروجی) فرایند مشاهده و شناسایی شود. روشهای طراحی آزمایش را می‌توان در توسعه یا رفع مشکلات فرایند و در نتیجه بهبود عملکرد آن و یا دست یافتن به فرایندی که نسبت به عوامل تأثیر گذار غیر قابل کنترل، فاقد حساسیت باشد (مقاوم بودن)، بکار گرفت. به عبارت دیگر روش طراحی آزمایشها، از جمله روشهای مفیدی است که توسط آن می‌توان متغیرهای کلیدی تأثیر گذار بر مشخصه کیفی مورد نظر فرایند را شناسایی کرد. با به‌کارگیری این روش می‌توان متغیرهای

ورودی قابل کنترل را به طور سیستماتیک تغییر داد و اثرات آنها را بر عوامل خروجی (محصول) ارزیابی کرد. آزمایشهایی که به طور آماری طراحی می‌شوند، می‌توانند میزان تغییرات در مشخصات کیفی را به مقدار قابل توجهی کاهش دهند و همچنین مقادیر (سطوح) بهینه متغیرهای قابل کنترل که باعث بهبود عملکرد فرایند می‌شوند را تعیین کنند [۳].

از آزمایشهای طراحی شده معمولاً برای تخمین یا بررسی اهمیت عوامل خاص بر مبنای پاسخ قابل اندازه‌گیری تحت یک سری شرایط آزمایشی نیز استفاده می‌شود.

۲- طراحی پارامتری روش تاگوچی

هدف از به‌کارگیری روش تاگوچی در طراحی، تعیین پارامترهای مؤثر در طراحی و مطالعه میزان تأثیر پذیری فرایند نسبت به تغییرات این پارامترهاست. در این مرحله، هدف ارائه یک رابطه ریاضی که در محدوده وسیعی از دامنه تغییر عوامل معتبر باشد، نیست. روش تاگوچی وجود تأثیرات متقابل بین پارامترهای طراحی را تشخیص می‌دهد ولی تأثیر آنها را با تأثیرات اصلی در ایجاد ماتریس طراحی (نحوه انجام آزمایشها) ترکیب می‌کند. طبق نظر تاگوچی زمانی که اجرای تعداد آزمایشهای مورد نیاز با محدودیت و مشکل روبروست، بهتر است به‌جای انتخاب تعداد پارامترهای کم در طرح آزمایشی و باقی گذاشتن بقیه ستونها در ماتریس طراحی برای تخمین تأثیرات متقابل، پارامترهای طراحی زیادی در ماتریس طراحی شرکت داده شوند. در این حالت سعی بر آن است که هیچ درجه آزادی (ستون آزاد در ماتریس)، برای تخمین خطای

۳- روند انجام آزمایش‌ها

۳-۱- هدف آزمایش

هدف این طرح، یافتن بهترین شرایط عملیاتی برای روش فلوتاسیون به منظور افزایش بازیابی برای سنگ معدنی است که کانی غالب آن کالکوسیت (Cu_2S) بوده و کانیهای دیگر حاوی مس در آن شامل کولیت (CuS) و کالکوپیریت (CuFeS_2) و بورنیت (Cu_5FeS_4) و کانیهای فلزی دیگر موجود در آن پیریت (FeS_2) و مولیدنیت (MoS_2) لیمونیت (FeOOH) اسفالریت (ZnS) هماتیت (Fe_2O_3) و مگنتیت (Fe_3O_4) هستند. نتایج مطالعات کانی شناسی از طریق بررسی مقاطع صیقلی در زیر میکروسکوپ نوری، تحلیل شیمیایی و گانگ موجود در سنگ معدن کالکوسیتی در جداول (۱) و (۲) ارائه شده است.

منظور از شرایط عملیاتی در این طرح، مقدار مواد شیمیایی مصرفی، ابعاد ماده معدنی خرد شده، زمان ماند و pH عملیات فلوتاسیون در مقیاس آزمایشگاهی است.

هدف از انجام آزمایش تعیین سطوحی (مقداری) از عوامل قابل کنترل برای دستیابی به بیشترین مقدار بازیابی است. به عبارت دیگر هدف تحقیق پیدا کردن شرایط بهینه فلوتاسیون برای یک ماده معدنی مشخص بوده است. شایان ذکر است که چون این بررسی در مرحله پریارکنی اولیه بوده و در مدار کارخانه چند مرحله دیگر برای رسیدن به عیار مطلوب کنسانتره وجود دارد، در نتیجه هدف اصلی افزایش بازیابی قرار داده شد. در مرحله پریارکنی اولیه عیار کنسانتره تولید شده از اهمیت آنچنانی برخوردار نیست. چون در طی مراحل بعدی عیار مطلوب قابل دستیابی است.

۳-۲- شناسایی عوامل و سطوح تأثیرگذار بر عملیات

فلوتاسیون

در این مرحله عوامل تأثیرگذار بر عملیات فلوتاسیون شناسایی و بر اساس تجربیات قبلی و مکانیزم فلوتاسیون انتخاب شدند. در ضمن دامنه تغییرات عوامل مذکور نیز برای انتخاب سطوح، مورد ارزیابی قرار گرفتند. در پژوهشهای قبلی

باقیمانده (واریانس)، بر جای گذاشته نشود. این برای حالتی که تعداد اجرای آزمایشها زیاد و پرهزینه باشند خیلی مناسب است. با افزایش تعداد پارامترهای طراحی، تعداد آزمایشهای لازم، برای تخمین همه تأثیرات اصلی و تأثیرات متقابل دوتایی، به طور چشمگیری افزایش خواهد یافت [۴].

با وجود اینکه این روش، به دلیل عدم تخمین تأثیرات متقابل، مورد انتقاد قرار گرفته است، اما اغلب اوقات نتایج حاصل با واقعیت سازگار بوده چون در اغلب موارد تأثیرات اصلی بر تأثیرات متقابل غالب می‌شوند [۵].

در زمان اعمال شرایط بهینه به دست آمده از روش تاگوچی، بهتر است که متغیرهای محیطی به دقت مطالعه شوند تا فرایندی نا حساس و مقاوم در مقابل عوامل محیطی مضر طراحی شود.

روند طراحی ارائه شده توسط تاگوچی برای تعیین سری پارامترهای طراحی که پاسخ مورد نظر از سیستم را افزایش می‌دهد (مانند بازیابی در این تحقیق) در زیر به طور خلاصه آورده شده است [۱]:

- تعیین پارامترهای طراحی و تعیین عوامل ایجاد کننده اغتشاش مهم و دامنه تغییرات آنها
- تهیه طرح اصلی نحوه انجام آزمایشها، با توجه به عوامل اصلی و عوامل ایجاد کننده اغتشاش
- اجرای آزمایشهای طراحی شده و ارزیابی آماری
- استفاده از مقادیر آماری برای پیش بینی مقادیر جدید ماتریس طراحی (در صورت نیاز)
- انجام آزمایشها برای اعتبار سنجی بر اساس مقادیر پیش بینی شده در مرحله قبل

علی‌رغم اینکه در تحقیق حاضر به طراحی آماری آزمایشها پرداخته شده است ولی برای پرهیز از اتکای مطلق به روشهای آماری، مکانیزم فلوتاسیون و تجربه های قبلی در این خصوص نیز در نظر گرفته شده است و از آمار به عنوان وسیله‌ای برای سرعت دادن و تنظیم داده‌ها استفاده شده است.

جدول ۱- نتایج بررسی درجه آزادی کانیهای حاوی مس موجود در سنگ معدن کالکوسیتی

درصد وزنی	قفل/آزاد	کانیهای فلزی
۱/۴۳۸	CC.FREE	کالکوسیت (Cu ₂ S)
۰/۰۷۴	CC/CV	
۰/۲۶۳	CC/CP	
۰/۰۶۵	CC/PY	
۰/۲۳۰	CC/G	
۰/۳۵۵	CC/POLY	
۲/۴۲۵	CC.TOTAL	
۰/۰۹۳	CV.FREE	کولیت (CuS)
۰/۰۴۳	CV/CC	
۰/۰۷۷	CV/CP	
۰/۰۰۰	CV/PY	
۰/۰۱۹	CV/G	
۰/۰۵۸	CV/POLY	
۰/۲۹۰	CV.TOTAL	
۰/۱۴۵	CP.FREE	کالکوپیریت (CuFeS ₂)
۰/۱۱۱	CP/CC	
۰/۰۴۸	CP/CV	
۰/۰۰۰	CP/PY	
۰/۱۰۰	CP/G	
۰/۲۶۳	CP/POLY	
۰/۶۶۷	CP.TOTAL	

CC: کالکوسیت CV: کولیت CP: کالکوپیریت PY: پیریت
G: گانگ POLY: مجتمع چند کانی با ارزش Free: آزاد

در مواردی می توانست منجر به نتایج غیر دقیق شود. بنابراین نیاز به طرحی بود که برای کسب اطلاعات بیشتر، عوامل را در تعداد سطح زیادتری مورد بررسی قرار دهد. اصولاً هر چه تعداد سطوح انتخابی برای انجام آزمایشها بیشتر باشد دقت تحلیل‌های آماری در محدوده مقادیر آزمایشها بیشتر است. علاوه بر این، انتخاب مقادیر بیش از دوسطح مطالعه وجود انحنا یا وجود مقدار بیشینه یا کمینه در پاسخ مورد مطالعه، که در تحقیق حاضر درصد بازیابی مس به روش فلوتاسیون است، را

جدول ۲- تجزیه شیمیایی سنگ کالکوسیتی

تحلیل شیمیایی		
Cu %	Mo%	Fe %
2.50	0.00	1.50

به انجام رسیده در مرکز تحقیقات مس سرچشمه که عوامل مورد مطالعه تنها در دو سطح (یک مقدار زیاد و یک مقدار کم) مورد بررسی قرار گرفته اند [۹]، این محدودیت باعث شده بود که بعضی عوامل در محدوده نه چندان وسیعی بررسی شوند که

امکان پذیر می‌کند. به همین دلیل در این طرح کلیه عوامل در سه سطح (سه مقدار مختلف) مورد بررسی قرار گرفتند جدول (۳). علی‌رغم اینکه تاگوچی در نظر گرفتن تأثیرات متقابل پارامترها را ضروری نمی‌داند [۸] اما برای اطمینان بیشتر با توجه به تجارب عملی و درک علمی مسئله، به نظر می‌رسید که بین کف سازها و pH و همچنین بین کلکتورها (خصوصاً کلکتور R₄₀₇) و pH تأثیر متقابل وجود داشته باشد، در نتیجه تأثیرات متقابل نیز جزو منابع طرح در نظر گرفته شدند.

۳-۳- انتخاب طرح آزمایشی مناسب

از آنجایی که درجه آزادی هرکدام از عوامل مستقل برابر با دو (تعداد سطح منهای یک) و درجه آزادی تأثیرات متقابل هرکدام چهار است، مجموع درجه آزادی منابع ۲۷ بوده و در نتیجه با توجه به آرایه‌های متعامد استاندارد تاگوچی، آرایه L₂₇ به عنوان طرح مناسب آزمایشی تشخیص داده شد جدول (۴). آرایه L₂₇ طرح آزمایشی با ۲۷ اجراست که در آن می‌توان حداکثر ۱۳ عامل مستقل را مورد بررسی قرار داد. در جدول (۴) آرایه متعامد L₂₇ به همراه نتایج بازیابی مس حاصل از انجام ۲۷ آزمایش مزبور ارائه شده است. باید متذکر شد که انجام ترکیب کامل ۷ پارامتر هر یک در سه مقدار متفاوت نیاز به ۳^۷=۲۱۸۷ آزمایش دارد اما استفاده از طراحی آماری آزمایشها و تحلیل آماری مناسب به مقدار زیادی موجب صرفه جویی در هزینه‌ها و زمان شد.

۴- ارائه یافته‌ها و بحث

نتایج آزمایشهای انجام شده که در آن بازیابی مس پاسخ سیستم است، به همراه شرایط آزمایشی در جدول (۴) آمده است. برای تحلیل منطقی داده‌ها و بررسی تأثیر هر عامل، می‌توان از تحلیل پراش، تحلیل واریانس کمک گرفت.

۴-۱- تحلیل پراش

اختلافهای بین میانگین‌های سطوح عامل مشاهده شده و میانگین کل، حاکی از اختلاف بین سطوح عامل مورد نظر است

در حالی که اختلافهای بین مشاهدات یک سطح عامل مورد نظر از میانگین آن سطح می‌تواند فقط در اثر خطای تصادفی ایجاد شده باشد. بنابر این می‌توان نشان داد که:

$$S_T = S_{\text{Factor}} + S_E \quad (1)$$

در معادله فوق S_T مجموع مربعات کل، S_{Factor} مجموع مربعات عامل مورد مطالعه و S_E مجموع مربعات خطا را نشان می‌دهد. اگر S_{Factor} بزرگ باشد، علت آن وجود پراکندگی زیاد بین میانگینهای سطوح عامل مورد مطالعه است. بنابر این با مقایسه S_{Factor} با S_E می‌توان مشخص کرد که چه مقدار از تغییر پذیری کل، با تغییر پذیری بین سطوح عامل مورد مطالعه و چه میزان از آن در اثر خطای تصادفی قابل توصیف است. این مقایسه موقعی معنای بهتری پیدا می‌کند که ابتدا هر یک از این مجموع مربعات بر درجه آزادی متناظر با آن تقسیم شوند تا مقایسه منطقی امکانپذیر شود.

نسبت مجموع مربعات به درجه آزادی متناظر با آن، میانگین مربعات (MS_{Factor}) یا واریانس (Var) نامیده می‌شود. بنابر این:

$$\text{Var} = \text{MS}_{\text{Factor}} = \frac{S_{\text{Factor}}}{a - 1} \quad (2)$$

$$\text{MS}_E = \frac{S_E}{a(n - 1)} \quad (3)$$

که a تعداد سطح هر عامل و n تعداد تکرار هر سطح‌اند. می‌توان نشان داد که میانگین مربعات خطا، MS_E تخمینی از واریانس خطای آزمایش یا σ^۲ است. به علاوه، MS_{Factor} فقط زمانی σ^۲ را تخمین می‌زند که میانگین‌های مربوط به سطوح عامل مورد نظر یکسان باشند. اگر میانگین‌های مربوط به سطوح عامل مورد مطالعه یکسان نباشند آن‌گاه MS_{Factor} از σ^۲ بزرگتر خواهد بود. با توجه به این واقعیت می‌توان یک آزمون آماری بر اساس توزیع F (فیشر) و آماره زیر به منظور پی بردن به حالت تساوی بین میانگین‌های سطوح عامل مورد مطالعه انجام داد:

$$F_0 = \frac{\text{MS}_{\text{Factor}}}{\text{MS}_E} \quad (4)$$

اگر F_{α,a-1,a(n-1)} بحرانی به دست آمده از جدول توزیع F بزرگتر از F₀ (آزمایشی) باشد آن‌گاه نتیجه گرفته می‌شود که میانگین‌های سطوح عامل مورد نظر با اطمینان (1-α) درصد

جدول ۳- عوامل قابل کنترل مؤثر و سطوح انتخابی آنها

سطوح			علامت	عوامل
۳	۲	۱		
۱۱/۸	۱۱/۳	۱۰/۸	A	pH
۲۵	۱۷	۹	B	میزان مصرف کلکتور R ₄₀₇ (مرکاپتو بنزو تیازول به همراه نمک دی تیوفسفات)(g/t)
۲۲	۱۵	۸	C	میزان مصرف کف ساز (روغن کاج) (g/t)
۲۲	۱۵	۸	D	میزان مصرف کف ساز A ₆₅ (یا Dow Froth25) (پلی پروپیلن گلیکول)(g/t)
۱۵	۱۰	۵	E	میزان مصرف کلکتور Z ₁₁ (سدیم ایزوپروپیل گزنتات)(g/t)
۶۸	۶۴	۶۰	F	میزان خردایش (مقدار مواد کوچکتر از ۷۵ میکرون، %)
۱۲/۵	۱۱	۹/۵	G	زمان ماند (min)

جدول ۴- طرح آزمایشی با آرایه متعامد (L₂₇(3¹³))

بازیابی (%)	G	F	E	AxD	D	AxC	C	AxB	B	A	Run
۷۰/۷	۹/۵	۶۰	۵	۱ ۱	۸	۱ ۱	۸	۱ ۱	۹	۱۰/۸	۱
۸۲/۴	۱۱	۶۴	۱۰	۲ ۲	۱۵	۲ ۲	۱۵	۱ ۱	۹	۱۰/۸	۲
۸۷/۶	۱۲/۵	۶۸	۱۵	۳ ۳	۲۲	۳ ۳	۲۲	۱ ۱	۹	۱۰/۸	۳
۸۴/۲	۱۲/۵	۶۸	۱۵	۲ ۲	۱۵	۱ ۱	۸	۲ ۲	۱۷	۱۰/۸	۴
۸۴/۳	۹/۵	۶۰	۵	۳ ۳	۲۲	۲ ۲	۱۵	۲ ۲	۱۷	۱۰/۸	۵
۸۲/۹	۱۱	۶۴	۱۰	۱ ۱	۸	۳ ۳	۲۲	۲ ۲	۱۷	۱۰/۸	۶
۸۵/۶	۱۱	۶۴	۱۰	۳ ۳	۲۲	۱ ۱	۸	۳ ۳	۲۵	۱۰/۸	۷
۸۶/۸	۱۲/۵	۶۸	۱۵	۱ ۱	۸	۲ ۲	۱۵	۳ ۳	۲۵	۱۰/۸	۸
۸۶/۰	۹/۵	۶۰	۵	۲ ۲	۱۵	۳ ۳	۲۲	۳ ۳	۲۵	۱۰/۸	۹
۸۰/۵	۱۲/۵	۶۴	۵	۳ ۲	۸	۳ ۲	۸	۲ ۳	۹	۱۱/۴	۱۰
۸۴/۹	۹/۵	۶۸	۱۰	۱ ۳	۱۵	۱ ۳	۱۵	۳ ۲	۹	۱۱/۴	۱۱
۸۷/۱	۱۱	۶۰	۱۵	۲ ۱	۲۲	۲ ۱	۲۲	۳ ۲	۹	۱۱/۴	۱۲
۸۵/۵	۱۱	۶۰	۱۵	۱ ۳	۱۵	۳ ۲	۸	۱ ۳	۱۷	۱۱/۴	۱۳
۸۶/۴	۱۲/۵	۶۴	۵	۲ ۱	۲۲	۱ ۳	۱۵	۱ ۳	۱۷	۱۱/۴	۱۴
۸۶/۷	۹/۵	۶۸	۱۰	۳ ۲	۸	۲ ۱	۲۲	۱ ۳	۱۷	۱۱/۴	۱۵
۸۶/۷	۹/۵	۶۸	۱۰	۲ ۱	۲۲	۳ ۲	۸	۲ ۱	۲۵	۱۱/۴	۱۶
۸۲/۳	۱۱	۶۰	۱۵	۳ ۲	۸	۱ ۳	۱۵	۲ ۱	۲۵	۱۱/۴	۱۷
۸۷/۰	۱۲/۵	۶۴	۵	۱ ۳	۱۵	۲ ۱	۲۲	۲ ۱	۲۵	۱۱/۴	۱۸
۸۱/۴	۱۱	۶۸	۵	۲ ۳	۸	۲ ۳	۸	۲ ۳	۹	۱۲	۱۹
۸۳/۱	۱۲/۵	۶۰	۱۰	۳ ۱	۱۵	۳ ۱	۱۵	۲ ۳	۹	۱۲	۲۰
۸۶/۰	۹/۵	۶۴	۱۵	۱ ۲	۲۲	۱ ۲	۲۲	۲ ۳	۹	۱۲	۲۱
۸۴/۵	۹/۵	۶۴	۱۵	۳ ۱	۱۵	۲ ۳	۸	۳ ۱	۱۷	۱۲	۲۲
۸۳/۳	۱۱	۶۸	۵	۱ ۲	۲۲	۳ ۱	۱۵	۳ ۱	۱۷	۱۲	۲۳
۸۵/۸	۱۲/۵	۶۰	۱۰	۲ ۳	۸	۱ ۲	۲۲	۳ ۱	۱۷	۱۲	۲۴
۸۲/۵	۱۲/۵	۶۰	۱۰	۱ ۲	۲۲	۲ ۳	۸	۱ ۲	۲۵	۱۲	۲۵
۸۴/۵	۹/۵	۶۴	۱۵	۲ ۳	۸	۳ ۱	۱۵	۱ ۲	۲۵	۱۲	۲۶
۸۶/۵	۱۱	۶۸	۵	۳ ۱	۱۵	۱ ۲	۲۲	۱ ۲	۲۵	۱۲	۲۷

A= pH, B= R₄₀₇, C = pine oil, D=A₆₅, E =Z₁₁, F= میزان خردایش, G= زمان ماند

A × C: C و A تأثیر متقابل

A × D: D و A تأثیر متقابل

$$\overline{\text{pH}}_1 = \frac{750.67}{9} \pm \sqrt{F_8^2(0.05) \times \text{Var}_e \times \frac{1}{n_e}} =$$

$$83.41 \pm \sqrt{4.46 \times 1.5676 \times \frac{1}{9}} = 83.41 \pm 0.88$$

که در آن n_e تعداد تکرار هر عامل در طرح، F_8^2 مقدار آماره فشر و Var_e واریانس خطا هستند.

مشابه محاسبات بالا برای تمام سطوح عوامل انجام شد و مقادیر میانگین پاسخها تعیین شد جدول (۶).

با توجه به تجربه عملیاتی و به دلیل تأثیر کم زمان فلوتاسیون طبق جدول (۵)، آزمایشی با زمانهای فلوتاسیون متفاوت و بر اساس مقادیر بهینه بر روی سنگ معدن کالکوسیتی انجام شد و بازیابی تجمعی بر حسب زمان رسم شد، شکل (۲). بررسی مقادیر به دست آمده برای بازیابی در شکل (۲) نشان می‌دهد که افزایش بازیابی بعد از یازده دقیقه چشمگیر نیست. نتیجه زمان یازده دقیقه، به عنوان زمان بهینه انتخاب شد.

در مرحله بعد برای تعیین محدوده اطمینان به منظور پاسخ مربوط به آزمایش با عوامل مؤثر از رابطه زیر استفاده شد:

$$\mu = \bar{\mu} \pm \sqrt{F_8^2 \times \text{Var}_e \times \frac{1}{n_e}} \quad (6)$$

از طرفی $\bar{\mu}$ برای سنگ معدن کالکوسیتی (فقط برای عوامل بارز در سطوح مؤثر) برابر است با:

$$\bar{\mu} = \bar{T} + (\bar{B}_3 - \bar{T}) + (\bar{C}_3 - \bar{T}) +$$

$$(\bar{D}_3 - \bar{T}) + (\bar{E}_3 - \bar{T}) + (\bar{F}_3 - \bar{T})$$

$$\bar{\mu} = \bar{B}_3 + \bar{C}_3 + \bar{D}_3 + \bar{E}_3 + \bar{F}_3 - 4\bar{T}$$

که در آن:

$\bar{\mu}$: میانگین واقعی (جمعیت)

\bar{B}_3 : میانگین بازیابی در سطح ۳ از کلکتور R_{407}

\bar{C}_3 : میانگین بازیابی در سطح ۳ از کف ساز روغن کاج

\bar{D}_3 : میانگین بازیابی در سطح ۳ از کف ساز A_{65}

\bar{E}_3 : میانگین بازیابی در سطح ۳ از کلکتور Z_{11}

\bar{F}_3 : میانگین بازیابی در سطح ۳ از خردایش

\bar{T} : میانگین بازیابی کل

یکدیگر تفاوت دارند (α سطح مخاطره و n تعداد آزمایش است). نکته اصلی نوع تحلیل این است که مشخص شود که آیا تغییر در بازیابی (پاسخ سیستم) به دلیل تأثیر عوامل مؤثر در فرایند بوده یا اینکه ناشی از خطای تصادفی است. روش انجام آزمون در جدول تجزیه و تحلیل واریانس نظیر جدول (۵) برای سنگ معدن کالکوسیتی آمده است. برای اعتبار سنجی نتایج تحلیل واریانس با آماره فشر، می‌توان از سهم شرکت‌پذیری هر عامل در طرح کمک گرفت. سهم شرکت‌پذیری هر کدام از منابع در طرح، از تقسیم واریانس خالص (S') هر کدام از منابع بر واریانس خالص کل حاصل می‌شود. واریانس خالص از معادله ۵ به دست می‌آید.

$$S' = S - (f \cdot \text{Var}_e) \quad (5)$$

که در آن f درجه آزادی، S واریانس کل و Var_e واریانس خطاست. همچنین در خصوص آزمایشهای به عمل آمده مقدار آماره F برای سطح مخاطره ۰/۰۵ درجه آزادی صورت ۲ و درجه آزادی مخرج ۸ برابر با ۴/۴۶ است.

در جدول ۵ به دلیل کم بودن بعضی از تأثیرات (اعدادی که در ستون Var زیر آنها خط کشیده شده است)، از آنها به عنوان منبع خطا استفاده شده است و نیز عواملی که در ستون F پر رنگ شده اند، در مقایسه با F بحرانی (۴/۴۶) بارز تشخیص داده شدند.

پس از شناسایی عوامل بارز، باید سطوح بهینه عوامل را پیدا کرد. ساده ترین روش، رسم نمودارهای مقدار متوسط پاسخهای سطوح عوامل است. شکل (۱) تأثیر سطوح عوامل برای آزمایش سنگ معدن کالکوسیتی را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۱) ملاحظه می‌شود، به کارگیری سطح بالای کلیه عوامل (بیشترین مقدار) به جز در مورد تغییرات اسیدیته (pH) بیشترین بازیابی را به همراه دارد.

۴-۲- آزمایشهای اعتبارسنجی نتایج

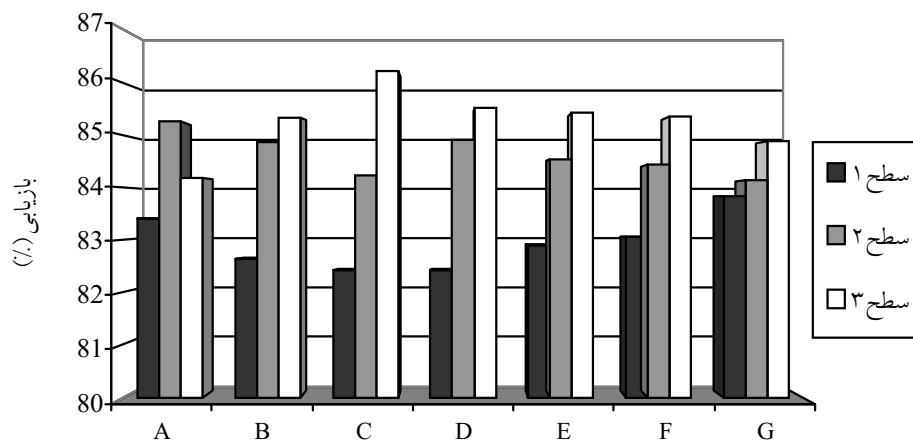
برای پیدا کردن سطوح مؤثر عوامل بارز باید میانگین پاسخ مربوط به هر سطح عامل بارز و محدوده اطمینان آن را به دست آورد که یک مورد آن در زیر آورده شده است.

جدول ۵- تحلیل واریانس سنگ معدن کالکوسیتی

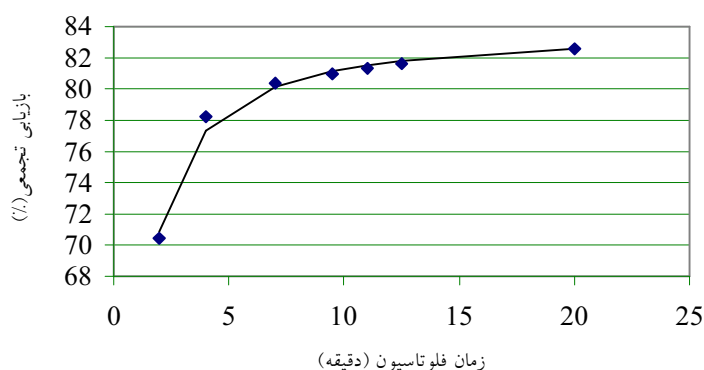
منبع	f	S	Var = S/f	F=Var _i /Var _e	S'	%
A	۲	۱۵/۳۱	۷/۶۶			
B	۲	۳۶/۹۹	۱۸/۴۹	۱۱/۸۰	۳۳/۸۵	۱۲/۸۰
C	۲	۶۴/۳۹	۳۲/۱۹	۲۰/۵۴	۶۱/۲۵	۲۳/۱۵
D	۲	۴۸/۳۷	۲۴/۱۹	۱۵/۴۳	۴۵/۲۴	۱۷/۱۰
E	۲	۲۹/۲۳	۱۴/۶۱	۹/۳۲	۲۶/۰۹	۹/۸۶
F	۲	۲۴/۰۹	۱۲/۰۵	۷/۶۸	۲۰/۹۶	۷/۹۲
G	۲	۵/۲۷	۲/۶۴			
A × B	۴	۲۴/۲۲	۶/۰۵	۳/۸۶	۱۷/۹۵	۶/۷۸
A × C	۴	۱۴/۷۹	۳/۷۰			
A × D	۴	۲۴/۷۲	۶/۱۸	۳/۹۴	۱۸/۴۵	۶/۹۷
e	۰	۰/۰۰				
(e)	۸	۱۲/۵۴	۱/۵۷		۴۰/۷۶	۱۵/۴۱
Total	۲۶	۲۶۴/۵۵			۲۶۴/۵۵	۱۰۰

جدول ۶- تخمین مقادیر سطوح عوامل بر اساس میانگین پاسخها

عامل	PH (A)			R ₄₀₇ (B)			روغن کاج (C)			A ₆₅ (D)			Z ₁₁ (E)			خردایش (F)			زمان فلوتاسیون (G)		
	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳
میانگین (٪)	۳/۳۷	۲/۵۷	۲/۳۷	۱/۲۷	۷/۳۷	۳/۵۷	۳/۸۷	۱/۳۷	۲/۸۷	۱/۳۷	۶/۳۷	۳/۸۷	۵/۵۷	۵/۳۷	۳/۵۷	۰/۸۷	۳/۳۷	۴/۵۷	۷/۳۷	۱/۳۷	۶/۳۷



شکل ۱- تأثیر سطوح هفت عامل در بازیابی سنگ معدن کالکوسیتی



شکل ۲- نمودار مربوط به زمان ماند سنگ معدن کالکوسیتی

جدول ۷- آزمایشهای اطمینان با شرایط پیشنهادی حالت بهینه به دست آمده از روش تاگوچی

بازیابی (%)	زمان فلوتاسیون (min)	خردایش میکرون <math><75</math> (%)	Z ₁₁ (g/t)	A ₆₅ (g/t)	Pine oil (g/t)	R ₄₀₇ (g/t)	pH	نوع سنگ معدن
۸۹/۰	۱۱	۶۸	۱۵	۲۲	۲۲	۲۵	۱۱/۳	کالکوسیتی
۸۹/۲	۱۲/۵	۶۸	۱۵	۲۲	۲۲	۲۵	۱۱/۳	

به عبارت دیگر مقدار بازیابی با به کارگیری عوامل بارز در سطوح مؤثر به مقدار ۸۹/۸٪ برای سنگ معدن کالکوسیتی خواهد رسید. با در نظر گرفتن مقادیر انحراف معیار، پیش بینی می شود که مقدار بازیابی سنگ معدن کالکوسیتی با به کارگیری عوامل مؤثر در سطوح بارز عنوان شده، با اطمینان ۹۵٪ بین ۸۸/۸ تا ۹۰/۷ قرار گیرد.

برای تعیین اعتبار این نتیجه گیری، آزمایشهای اطمینانی با شرایط پیشنهادی حالت بهینه به دست آمده انجام شد. مشخصات آزمایشها به همراه نتایج در جدول (۷) آمده است. با بررسی نتایج مشخص می شود که در حدود ۵٪ افزایش بازیابی نسبت به مقدار میانگین قابل دستیابی است.

۵- نتیجه گیری

۱- به کارگیری روش تاگوچی به همراه تحلیل آماری برای تعیین شرایط بهینه عملیات فلوتاسیون سنگ معدن کالکوسیتی در مقیاس آزمایشگاهی نشان داد که مقدار pH، مقدار R₄₀₇ (کلکتور از نوع تیوفسفات) و کف سازهای روغن کاج و A₆₅

اندیس ۳ اشاره به بالاترین سطح (مقدار) عامل دارد.

چون مقادیر پاسخ بر حسب درصد هستند، بهتر است از روش تبدیل امگا^۹ برای تخمین استفاده شود [۵]. برای این کار مقادیر دی سی بل^۶ هر کدام از اعداد از طریق رابطه ۷ به دست می آیند.

$$-10 \log \left[\frac{1}{p} - 1 \right] = \text{واحد دی سی بل} \quad (۷)$$

که در آن P بازیابی در شرایط معین آزمایشی است که به صورت کسری بیان می شود. شایان ذکر است که تبدیل مقادیر بازیابی به دی سی بل باعث می شود که آنها جمع پذیر شوند.

$$dv \bar{\mu} = dv(85.3\%) + dv(86.2\%) + dv(85.5\%) + dv(85.4\%) + dv(85.3\%) - 4 \cdot dv(84.3\%)$$

$$dv \bar{\mu} = 7.647 + 7.956 + 7.709 + 7.674 + 7.654 - 4(7.292) = 9.445$$

dv: مقدار دی سی بل

$$-10 \log \left[\frac{1}{p} - 1 \right] = 9.445 \Rightarrow p = 89.8 \%$$

۵- در صورتی که شرایط پیشنهادی به اجرا در آید، پیش بینی میشود افزایش ۵ درصدی در بازیابی برای این نوع سنگ معدن خاص قابل دستیابی باشد.

قدردانی

بدین وسیله از مدیریت محترم امور تحقیقات و مطالعات مجتمع مس سرچشمه، سرکار خانم مهندس پرتوآذر و ریاست تحقیقات معدنی و فراوری مواد آن امور، جناب آقای مهندس رضایان و کلیه پرسنل زحمتکش کارخانه نیمه صنعتی مجتمع که فرصت اجرای این تحقیق را فراهم کردند، سپاسگزاری می‌شود.

(نوعی الکل) و میزان خردایش، عوامل موثر در افزایش بازیابی مس هستند.

۲- به‌کارگیری روش تاگوچی در بهینه‌سازی عوامل مؤثر در فلوتاسیون معدن مس سرچشمه تعداد آزمایشهای لازم برای مطالعه کامل هفت عامل و تأثیر متقابل آنها را از ۲۱۸۷ آزمایش به ۲۷ آزمایش، در طراحی آرایه متعامد_{L_{۲۷}}، کاهش داد.

۳- زمان فلوتاسیون مناسب برای عملیات فلوتاسیون این نوع سنگ معدن یازده دقیقه به‌دست آمد و افزایش بازیابی بعد از این زمان چشمگیر نبود.

۴- با به‌کارگیری شرایط بهینه به‌دست آمده از طراحی آزمایش، بیشترین بازیابی ممکن در مورد سنگ معدن کالکوسیتی ۸۹/۲ درصد به‌دست آمد.

واژه‌نامه

1. Taguchi
2. chalcocite
3. pine oil

4. orthogonal arrays
5. Omega
6. decible

مراجع

1. Montgomery, D. C., *Design and Analysis of Experiments*, John Willy & Sons, 1991.
2. Taguchi, G., *System of Experimental Design*, Vol.1, KRAUS International Publication, 1987.
3. Alberto Garsia Dias, A. G., and Philips, D. T., *Principles of Experimental Design and Analysis*, John Willy & Sons, 1986.
4. Yeow Nam Ng, Black, D., and Luu, K., "Taguchi Methods," Curtin University, Australia, Handout Notes for Computer Aided Engineering, 1995.
5. Taguchi, G., "System of Experimental Design," Vol.2, KRAUS International Publication, 1987.
6. G. Geoffery Vining, "Statistical Methods for Engineers," Duxbury Press, 1998.

۷. واینر، ب. ج.، "اصول آماری در طرح آزمایشها"، ترجمه: سرمد، ز. و اسفندیاری، م. مرکز نشر دانشگاهی، تهران، ۱۳۶۹.
8. Dufour, M. Bazin, C. and Labonte, G. "Application of Taguchi's Technique," *Total Quality Research and Development*, Ed. G Pouskouleli, CIM, CANADA, 1993.
۹. کاوه، ح.، "مقدمه‌ای بر طراحی و تحلیل آزمایشهای صنعتی"، پروژه کارشناسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، بخش مهندسی معدن، ۱۳۷۷.