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

سید ضیاءالدین شفایی* ، صمد بنیسی** ، محمد کارآموزیان*** و افسر اسلامی***
دانشکدهٔ 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: ۸۲/٤/۱۷)

چکیده– بهینه‌سازی فرایند یکی از مهمترین فعالیتها در صنعت پر رقابت امروز است. هزینهٔ 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 دههٔ گذشته گسترش زیادی داشته است. در مقایسه با دیگر روشهای رایج مانند طراحی فاکتوریل کامل، فاکتوریل جزیی، مربعات لاتین و ... روش طراحی آزمایش تاگوچی[1] ضمن دارا بودن این نقش به دلیل جامعتر بودن در بخشهایی از صنایع کاربرد وسیعتری پیدا کرده است. در مقالهٔ حاضر، با به‌کارگیری روش طراحی آزمایش تاگوچی در عملیات فلوتاسیون سنگ معدن مسی که در آن کانی کالکوسیت[2] غالب است، تأثیر عوامل مختلف در مقیاس آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. با مطالعهٔ تأثیر هفت عامل تأثیر گذار بر فلوتاسیون مشخص شد که اگر عوامل قابل کنترل، از جمله میزان مصرف کلکتورهای Z_{11} (سدیم ایزو پروپیل گزنتات)وR_{407} (مرکاپتوبنزوتیازول)، کف سازهای روغن کاج و A_{65} (پلی پروپیلن گلیکول) ومیزان خردایش و pH در سطح بالای خود (مقدار بیشینه مورد آزمایش) قرار بگیرند، بالاترین بازیابی عملیات (۸۹/۲٪) حاصل خواهد شد. برای این عملیات زمان ماند بهینه یازده دقیقه به‌دست آمد. در این تحقیق علاوه بر کاهش قابل توجه در هزینه و زمان لازم برای آزمایش نسبت به سایر روشها، بازیابی 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 .shafaei @ 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*

*ـ استادیار **ـ دانشیار ***ـ کارشناسی ارشد

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-03]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1383.23.1.14.0]

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 isoboutyl 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 چرخهٔ طراحی و توسعهٔ 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 مشخصهٔ 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 معمولا برای تخمین یا بررسی اهمیت عوامل خاص برمبنای 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 موثر در طراحی و مطالعه میزان تأثیر پذیری فرایند نسبت به تغییرات این پارامترهاست. در این مرحله، هدف ارائهٔ یک رابطه ریاضی که در محدودهٔ وسیعی از دامنهٔ 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 (نحوهٔ انجام آزمایشها) ترکیب می‌کند. طبق نظر تاگوچی زمانی که اجرای تعداد آزمایشهای مورد نیاز با محدودیت و مشکل روبروست، بهتر است به‌جای انتخاب تعداد پارامتر های 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

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-03]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1383.23.1.14.0]

باقیمانده (واریانس)، بر جای گذاشته نشود. این برای حالتی که تعداد اجرای آزمایشها زیاد و پر هزینه باشند خیلی مناسب است. با افزایش تعداد پارامترهای طراحی، تعداد آزمایشهای لازم، برای تخمین همه تأثیرات اصلی و تأثیرات متقابل دوتایی، به‌طور چشمگیری افزایش خواهد یافت [٤].

با وجود اینکه این روش، به‌دلیل 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[٥].

در زمان اعمال شرایط بهینه به‌دست 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 به‌طور خلاصه آورده شده است [١]:

- تعیین پارامتر های طراحی و تعیین عوامل ایجاد کنندهٔ اغتشاش مهم و دامنهٔ 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 داده ها استفاده شده است.

٣- روند انجام آزمایش‌ها

٣-١- 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 کوولیت (CuS) وکالکو پیریت ($CuFeS_2$) وبورنیت (Cu_5FeS_4) و کانیهای فلزی دیگر موجود در آن پیریت (FeS_2) ومولیبدنیت (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 (١) و (٢) ارائه شده است.

منظور از شرایط عملیاتی در این طرح، مقدار مواد شیمیائی 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 پرعیارکنی 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 پر عیار کنی اولیه عیار کنسانتره تولید شده از اهمیت آن‌چنانی برخوردار نیست. چون در طی مراحل بعدی عیار مطلوب قابل دستیابی است.

٣-٢- شناسائی 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

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-03]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1383.23.1.14.0]

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

کانیهای فلزی	قفل/آزاد	درصد وزنی
کالکوسیت (Cu_2S)	CC.FREE	۱/٤۳۸
	CC/CV	۰/۰۷٤
	CC/CP	۰/۲٦۳
	CC/PY	۰/۰٦٥
	CC/G	۰/۲۳۰
	CC/POLY	۰/۳٥٥
	CC.TOTAL	۲/٤۲٥
کوولیت (CuS)	CV.FREE	۰/۰۹۳
	CV/CC	۰/۰٤۳
	CV/CP	۰/۰۷۷
	CV/PY	۰/۰۰۰
	CV/G	۰/۰۱۹
	CV/POLY	۰/۰٥۸
	CV.TOTAL	۰/۲۹۰
کالکوپیریت ($CuFeS_2$)	CP.FREE	۰/۱٤٥
	CP/CC	۰/۱۱۱
	CP/CV	۰/۰٤۸
	CP/PY	۰/۰۰۰
	CP/G	۰/۱۰۰
	CP/POLY	۰/۲٦۳
	CP.TOTAL	۰/٦٦۷

CC : کالکوسیت CV : کوولیت CP : کالکوپیریت PY : پیریت

G: گانگ POLY : مجتمع چند کانی با ارزش Free: آزاد

جدول ۲- تجزیه شیمیایی سنگ کالکوسیتی

تحلیل شیمیایی		
Cu %	Mo%	Fe %
2.50	0.00	1.50

بـه انجـام رسـیده در مرکـز تحقیقات مس سرچشمه که عوامل مورد مطالعه تنها در دو سطح (یک مقدار زیاد و یک مقدار کم) مـورد بررسی قرار گرفته اند[۹]، این محدودیت باعث شده بود که بعضی عوامل در محدودهٔ نه چندان وسیعی بررسی شوند که در مـواردی مـی توانست منجر به نتایج غیر دقیق شود. بنابراین نـیاز به طرحی بود که برای کسب اطلاعات بیشتر، عوامل را در تعـداد سـطح زیادتـری مـورد بررسـی قرار دهد. اصولا هر چه تعـداد سـطوح انتخابـی بـرای انجـام آزمایشها بیشتر باشد دقت تحلیلهای آماری در محدودهٔ مقادیر آزمایشها بیشتر است. علاوه بـر ایـن، انـتخاب مقادیر بیش از دوسطح مطالعه وجود انحنا یا وجود مقدار بیشینه یا کمینه در پاسخ مورد مطالعه، که در تحقیق حاضـر درصـد بازیابـی مـس بـه روش فلوتاسـیون اسـت، را

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-03]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1383.23.1.14.0]

امکان‌پذیر 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 نمی داند [۸] اما برای اطمینان بیشتر با توجه به تجارب عملی و درک علمی مسئله، به نظر می رسید که بین کف سازها و pH و همچنین بین کلکتورها (خصوصاً کلکتور R_{407}) 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 آنجایی‌که درجهٔ آزادی هرکدام از عوامل مستقل برابر با دو (تعداد سطح منهای یک) و درجهٔ آزادی تأثیرات متقابل هرکدام چهار است، مجموع درجهٔ آزادی منابع ۲۷ بوده و در نتیجه با توجه به آرایه‌های متعامد[٤] استاندارد تاگوچی، آرایه L_{27} به عنوان طرح مناسب آزمایشی تشخیص داده شد جدول (٤). آرایهL_{27}، طرح آزمایشی با ۲۷ اجراست که در آن می‌توان حداکثر ۱۳ عامل مستقل را مورد بررسی قرار داد. درجدول (٤) آرایه متعامد L_{27} 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 3^7=۲۱۸۷ آزمایش دارد اما استفاده از طراحی آماری آزمایشها و تحلیل آماری مناسب به مقدار زیادی موجب صرفه جویی در هزینه ها و زمان شد.

٤- ارائه یافته‌ها و بحث

نتایج آزمایشهای انجام شده که در آن بازیابی مس پاسخ سیستم است، به همراه شرایط آزمایشی در جدول (٤) آمده است. برای تحلیل منطقی داده ها و بررسی تأثیر هر عامل، می توان از تحلیل پراش، تحلیل واریانس کمک گرفت.

٤-۱- 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 می تواند فقط در اثر خطای تصادفی ایجاد شده باشد. بنابر این می توان نشان داد که:

$$S_T = S_{Factor} + S_E \qquad (۱)$$

در معادلهٔ فوق S_T مجموع مربعات کل، S_{Factor} مجموع مربعات عامل مورد مطالعه و S_E مجموع مربعات خطا را نشان می دهد.

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 می توان 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 می کند 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. بنابراین:

$$Var = MS_{Factor} = \frac{S_{Factor}}{a-1} \qquad (۲)$$

$$MS_E = \frac{S_E}{a(n-1)} \qquad (۳)$$

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^2 است. به‌علاوه، MS_{Factor} فقط زمانی σ^2 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} ازσ^2 بزرگتر خواهد بود. با توجه به این واقعیت می‌توان یک آزمون آماری بر اساس توزیعF (فیشر)و آماره زیر به منظور پی بردن به حالت تساوی بین میانگین های سطوح عامل مورد مطالعه انجام داد:

$$F_0 = \frac{MS_{Factor}}{MS_E} \qquad (٤)$$

اگر $F_{\alpha,a-1,a(n-1)}$ (F بحرانی به‌دست آمده از جدول توزیعF) بزرگتر از F_0 (آزمایشی) باشد آن‌گاه نتیجه گرفته می‌شود که میانگین‌های سطوح عامل مورد نظر با اطمینان(1-α) درصد

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-03]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1383.23.1.14.0]

جدول ۳- عوامل قابل کنترل مؤثر و سطوح انتخابی آنها

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

جدول ٤- طرح آزمایشی با آرایه متعامد ($L_{27}(3^{13})$

Run	A	B	A × B		C	A ×C		D	A×D		E	F	G	بازیابی (٪)
۱	۱۰/۸	۹	۱	۱	۸	۱	۱	۸	۱	۱	۵	۶۰	۹/۵	۷۰/۷
۲	۱۰/۸	۹	۱	۱	۱۵	۲	۲	۱۵	۲	۲	۱۰	۶۴	۱۱	۸۲/٤
۳	۱۰/۸	۹	۱	۱	۲۲	۳	۳	۲۲	۳	۳	۱۵	۶۸	۱۲/۵	۸۷/۶
٤	۱۰/۸	۱۷	۲	۲	۸	۱	۱	۱۵	۲	۲	۱۵	۶۸	۱۲/۵	۸٤/۲
۵	۱۰/۸	۱۷	۲	۲	۱۵	۲	۲	۲۲	۳	۳	۵	۶۰	۹/۵	۸٤/۳
۶	۱۰/۸	۱۷	۲	۲	۲۲	۳	۳	۸	۱	۱	۱۰	۶٤	۱۱	۸۲/۹
۷	۱۰/۸	۲۵	۳	۳	۸	۱	۱	۲۲	۳	۳	۱۰	۶٤	۱۱	۸۵/۶
۸	۱۰/۸	۲۵	۳	۳	۱۵	۲	۲	۸	۱	۱	۱۵	۶۸	۱۲/۵	۸۶/۸
۹	۱۰/۸	۲۵	۳	۳	۲۲	۳	۳	۱۵	۲	۲	۵	۶۰	۹/۵	۸۶/۰
۱۰	۱۱/٤	۹	۲	۳	۸	۲	۳	۸	۲	۳	۵	۶٤	۱۲/۵	۸۰/۵
۱۱	۱۱/٤	۹	۳	۲	۱۵	۳	۱	۱۵	۳	۱	۱۰	۶۸	۹/۵	۸٤/۹
۱۲	۱۱/٤	۹	۳	۲	۲۲	۱	۲	۲۲	۱	۲	۱۵	۶۰	۱۱	۸۷/۱
۱۳	۱۱/٤	۱۷	۱	۳	۸	۲	۳	۱۵	۳	۱	۱۵	۶۰	۱۱	۸۵/۵
۱٤	۱۱/٤	۱۷	۱	۳	۱۵	۳	۱	۲۲	۱	۲	۵	۶٤	۱۲/۵	۸۶/٤
۱۵	۱۱/٤	۱۷	۱	۳	۲۲	۱	۲	۸	۲	۳	۱۰	۶۸	۹/۵	۸۶/۷
۱۶	۱۱/٤	۲۵	۲	۱	۸	۲	۳	۲۲	۱	۲	۱۰	۶۸	۹/۵	۸۶/۷
۱۷	۱۱/٤	۲۵	۲	۱	۱۵	۳	۱	۸	۲	۳	۱۵	۶۰	۱۱	۸۲/۳
۱۸	۱۱/٤	۲۵	۲	۱	۲۲	۱	۲	۱۵	۳	۱	۵	۶٤	۱۲/۵	۸۷/۰
۱۹	۱۲	۹	۲	۳	۸	۳	۲	۸	۳	۲	۵	۶۸	۱۱	۸۱/٤
۲۰	۱۲	۹	۲	۳	۱۵	۱	۳	۱۵	۱	۳	۱۰	۶۰	۱۲/۵	۸۳/۱
۲۱	۱۲	۹	۲	۳	۲۲	۲	۱	۲۲	۲	۱	۱۵	۶٤	۹/۵	۸۶/۰
۲۲	۱۲	۱۷	۳	۱	۸	۳	۲	۱۵	۱	۳	۱۵	۶٤	۹/۵	۸٤/۵
۲۳	۱۲	۱۷	۳	۱	۱۵	۱	۳	۲۲	۲	۱	۵	۶۸	۱۱	۸۳/۳
۲٤	۱۲	۱۷	۳	۱	۲۲	۲	۱	۸	۳	۲	۱۰	۶۰	۱۲/۵	۸۵/۸
۲۵	۱۲	۲۵	۱	۲	۸	۳	۲	۲۲	۲	۱	۱۰	۶۰	۱۲/۵	۸۲/۵
۲۶	۱۲	۲۵	۱	۲	۱۵	۱	۳	۸	۳	۲	۱۵	۶٤	۹/۵	۸٤/۵
۲۷	۱۲	۲۵	۱	۲	۲۲	۲	۱	۱۵	۱	۳	۵	۶۸	۱۱	۸۶/۵

زمان ماند = G , میزان خردایش =F , $E = Z_{11}$, $D = A_{65}$, C = pine oil , $B = R_{407}$, A= pH,

تأثیر متقابل A و C: A × C

تأثیر متقابل A و D: A × D

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-03]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1383.23.1.14.0]

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 موثر 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 فیشر، می‌توان از سهم شرکت‌پذیری هر عامل در طرح کمک گرفت. سهم شرکت پذیری هر کدام از منابع در طرح، از تقسیم واریانس خالص(S′) هر کدام از منابع بر واریانس خالص کل حاصل می شود. واریانس خالص از معادلهٔ ۵ به‌دست می‌آید.

$$S' = S-(f \,.\, Var_e) \qquad (۵)$$

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 درجهٔ آزادی صورت ۲ و درجهٔ آزادی مخرج ۸ برابر با ٤/٤٦ است.

در جدول ۵ به دلیل کم بودن بعضی از تأثیرات (اعدادی که در ستونVar زیر آنها خط کشیده شده است)، از آنها به‌عنوان منبع خطا استفاده شده است و نیز عواملی که در ستون F پر رنگ شده اند، در مقایسه با F بحرانی (٤/٤٦) 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، به‌کارگیری سطح بالای کلیه عوامل (بیشترین مقدار) به جز در مورد تغییرات اسیدیته (pH) بیشترین بازیابی را به همراه دارد.

٤-۲- آزمایشهای اعتبارسنجی نتایج

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

$$\overline{pH_1} = \frac{750.67}{9} \pm \sqrt{F_8^2(0.05) \times Var_e \times \frac{1}{n_e}} =$$

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

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

مشابه محاسبات بالا برای تمام سطوح عوامل انجام شد و مقادیر میانگین پاسخها تعیین شد جدول (٦).

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 به‌دست آمده برای بازیابی در شکل (۲) نشان می‌دهد که افزایش بازیابی بعداز یازده دقیقه چشمگیر نیست. در نتیجه زمان یازده دقیقه، به عنوان زمان بهینه انتخاب شد.

در مرحله بعد برای تعیین محدودهٔ اطمینان به‌منظور پاسخ مربوط به آزمایش با عوامل موثر از رابطه زیر استفاده شد:

$$\mu = \overline{\mu} \pm \sqrt{F_8^2 \times Var_e \times \frac{1}{n_e}} \qquad (٦)$$

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

$$\overline{\mu} = \overline{T} + (\overline{B}_3 - \overline{T}) + (\overline{C_3} - \overline{T}) + (\overline{D}_3 - \overline{T}) + (\overline{E}_3 - \overline{T}) + (\overline{F}_3 - \overline{T})$$

$$\overline{\mu} = \overline{B}_3 + \overline{C_3} + \overline{D}_3 + \overline{E}_3 + \overline{F}_3 - 4\overline{T}$$

که در آن:

$\overline{\mu}$: میانگین واقعی (جمعیت)

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

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

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

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

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

$\overline{T}$: میانگین بازیابی کل

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-03]

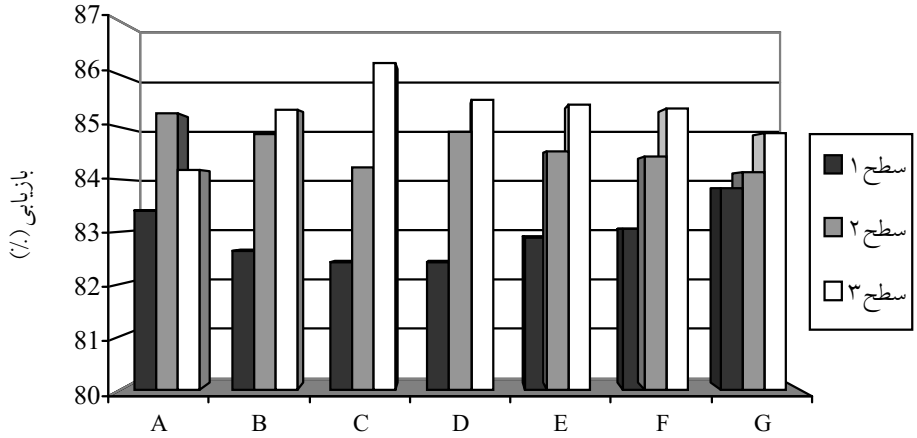
[DOR: 20.1001.1.22287698.1383.23.1.14.0]

جدول ۵- تحلیل واریانس سنگ معدن کالکوسیتی

منبع	f	S	Var =S/f	$F=Var_i/Var_e$	S′	%
A	۲	۱۵/۳۱	۷/٦٦			
B	۲	۳٦/۹۹	۱۸/٤۹	**۱۱/۸۰**	۳۳/۸۵	۱۲/۸۰
C	۲	٦٤/۳۹	۳۲/۱۹	**۲۰/۵٤**	٦۱/۲۵	۲۳/۱۵
D	۲	٤۸/۳۷	۲٤/۱۹	**۱۵/٤۳**	٤۵/۲٤	۱۷/۱۰
E	۲	۲۹/۲۳	۱٤/٦۱	**۹/۳۲**	۲٦/۰۹	۹/۸٦
F	۲	۲٤/۰۹	۱۲/۰۵	**۷/٦۸**	۲۰/۹٦	۷/۹۲
G	۲	۵/۲۷	۲/٦٤			
A × B	٤	۲٤/۲۲	٦/۰۵	۳/۸٦	۱۷/۹۵	٦/۷۸
A × C	٤	۱٤/۷۹	۳/۷۰			
A × D	٤	۲٤/۷۲	٦/۱۸	۳/۹٤	۱۸/٤۵	٦/۹۷
e	۰	۰/۰۰				
(e)	۸	*۱۲/۵٤*	*۱/۵۷*		٤۰/۷٦	۱۵/٤۱
Total	۲٦	۲٦٤/۵۵			۲٦٤/۵۵	۱۰۰

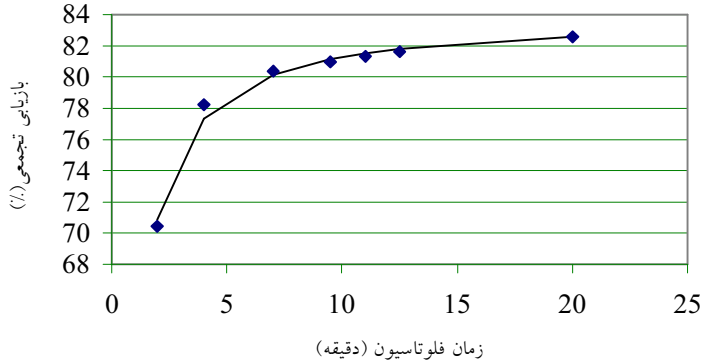
جدول ٦- تخمین مقادیر سطوح عوامل بر اساس میانگین پاسخها

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 بازیابی (٪)	۸۳/٤	۸۵/۲	۸٤/۲	۸۲/٦	۸٤/۸	۸۵/۳	۸۲/٤	۸٤/۲	۸٦/۲	۸۲/٤	۸٤/۹	۸۵/۵	۸۲/۹	۸٤/۵	۸۵/٤	۸۳/۰	۸۳/٤	۸۵/۳	۸۳/۸	۸٤/۱	۸٤/۹



شکل۱- تأثیر سطوح هفت عامل در بازیابی سنگ معدن کالکوسیتی

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-03]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1383.23.1.14.0]



شکل۲- نمودار مربوط به زمان ماند سنگ معدن کالکوسیتی

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

نوع سنگ معدن	pH	R_{407} (g/t)	Pine oil (g/t)	A_{65} (g/t)	Z_{11} (g/t)	خردایش میکرون۷۵>(٪)	زمان فلوتاسیون (min)	بازیابی (٪)
کالکوسیتی	۱۱/۳	۲۵	۲۲	۲۲	۱۵	٦۸	۱۱	۸۹/۰
	۱۱/۳	۲۵	۲۲	۲۲	۱۵	٦۸	۱۲/۵	۸۹/۲

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

چون مقادیر پاسخ بر حسب درصد هستند ،بهتر است از روش تبدیل امگا[۵] برای تخمین استفاده شود[۵]. برای این کار مقادیر دی سی بل[٦] هرکدام از اعداد از طریق رابطه ۷ به‌دست می‌آیند.

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

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

$dv\,\overline{\mu}$ = dv(85.3%) + dv(86.2%) + dv(85.5%) + dv(85.4%)+ dv(85.3%)-4 dv(84.3%) $dv\,\overline{\mu}$ = 7.647+ 7.956 + 7.709+7.674+7.654 - 4 (7.292) = 9.445

dv: مقدار دی سی بل

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

به عبارت دیگر مقدار بازیابی با به‌کارگیری 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 به‌کارگیری عوامل مؤثر در سطوح بارز عنوان شده، با اطمینان ۹۵٪ بین ۸۸/۸ تا ۹۰/۷ قرار گیرد.

برای تعیین اعتبار این نتیجه‌گیری، آزمایشهای اطمینانی با شرایط پیشنهادی حالت بهینه به‌دست آمده انجام شد. مشخصات آزمایشها به همراه نتایج در جدول (۷) آمده است.

با بررسی نتایج مشخص می‌شود که در حدود ۵٪ افزایش بازیابی نسبت به مقدار میانگین قابل دستیابی است.

۵- نتیجه‌گیری

۱- به‌کارگیری روش تاگوچی به همراه تحلیل آماری برای تعیین شرایط بهینه عملیات فلوتاسیون سنگ معدن کالکوسیتی در مقیاس آزمایشگاهی نشان داد که مقدار pH، مقدار R_{407} (کلکتور از نوع تیوفسفات) و کف سازهای روغن کاج و A_{65}

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-03]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1383.23.1.14.0]

(نوعـی الکـل) ومیزان خردایش، عوامل موثر در افزایش بازیابی مس هستند.

۲- بـه‌کارگیـری روش تاگوچی در بهینه سازی عوامل مؤثر در فلوتاسـیون معـدن مس سرچشمه تعداد آزمایشهای لازم برای مطالعـه کامـل هفـت عامـل و تأثیـر مـتقابل آنهـا را از ۲۱۸۷ آزمـایش بـه ۲۷ آزمـایش، در طراحی آرایه متعامد$L_{۲۷}$، کاهش داد.

۳- زمـان فلوتاسـیون مناسـب برای عملیات فلوتاسیون این نوع سـنگ معـدن یـازده دقیقه به‌دست آمد و افزایش بازیابی بعد از این زمان چشمگیر نبود.

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

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

بـدین وسـیله از مدیـریت محترم امور تحقیقات و مطالعات مجـتمع مس سرچشمه، سرکار خانم مهندس پرتوآذر و ریاست تحقـیقات معدنـی و فراوری مواد آن امور، جناب آقای مهندس رضـایان و کلـیه پرسنل زحمتکش کارخانه نیمه صنعتی مجتمع کـه فرصـت اجـرای ایـن تحقـیق را فراهم کردند، سپاسگزاری می‌شود.

واژه‌نامه

4. orthogonal arrays
5. Omega
6. decible

1. Taguchi
2. chalcocite
3. pine oil

مراجع

۷. واینر، ب. ج.، " اصول آماری در طرح آزمایشها "، ترجمه: سرمد، ز. و اسفندیاری، م. مرکز نشر دانشگاهی، تهران، ۱۳٦۹.

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. کـاوه، ح.، "مقدمـه‌ای بـر طراحـی و تحلـیل آزمایشـهای صـنعتی"، پـروژه کارشناسـی، دانشـگاه شهید باهنر کرمان، بخش مهندسی معدن،۱۳۷۷.

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.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-03]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1383.23.1.14.0]