

بررسی تاثیر مصرف آهن و اکسیدکننده بر انحلال کنسانتره گالن در محیط فلوئوروبوریک اسید

حمیدرضا نیازی^۱، غلامرضا کریمی^۲، داوود مرادخانی^۳

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)
۲- استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)
۳- دانشیار گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان

(دریافت ۱۳۹۵/۱۱/۱۳، پذیرش ۱۳۹۶/۰۵/۱۱)

چکیده

استخراج سرب از کنسانتره فلوتاسیون سرب با استفاده از فلوئوروبوریک اسید مورد مطالعه قرار گرفت و به عنوان یک فرآیند بالقوه و امیدوارکننده برای جایگزینی روش‌های تولید پیرومتالورژیکی سرب بهینه‌سازی شد. محتوای سرب، روی و آهن کنسانتره با استفاده از روش XRF به ترتیب ۵۷٫۶۶، ۵/۵۰ و ۱/۵۵ درصد بود. پنج عامل کنترلی شامل غلظت اولیه HBF₄، مقدار آهن افزودنی، میزان اکسیدکننده مصرفی، دمای واکنش و زمان واکنش هر کدام در چهار سطح با استفاده از روش تاگوچی در نظر گرفته شد. آرایه متعامد L16 و آنالیز واریانس (ANOVA) برای تعیین شرایط بهینه و مهم‌ترین عامل‌های موثر بر استخراج روی از کنسانتره گالن به کار گرفته شد. آنالیز واریانس مشخص کرد که مقدار عامل اکسیدکننده و مقدار افزودنی مصرف شده به ترتیب موثرترین پارامترهای فروشویی‌اند. بنا به مطالعات گذشته این نتیجه می‌تواند مرتبط با لزوم تشکیل و حضور فلوئورورات فریک و همچنین اکسایش یون فروس به فریک در سیستم باشد. نتایج آزمایشات نشان داد که بیشینه استخراج سرب در شرایط بهینه غلظت اسید ۵ مولار، آهن مصرفی ۴۶/۸ گرم بر لیتر، مصرف عامل اکسیدکننده ۳۳/۳ گرم در لیتر و در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان انحلال ۶ ساعت حاصل می‌شود. راندمان بازیابی سرب در شرایط بهینه که با روش تاگوچی پیش‌بینی شده بود، با موفقیت به میزان ۹۴/۶۵ درصد رسید.

کلمات کلیدی

هیدرومتالورژی، کنسانتره گالن، فلوئوروبوریک اسید، فلوئورورات فریک، بهینه‌سازی.

۱- مقدمه

بنا به آمار گروه بین‌المللی مطالعات سرب و روی (ILZSG) تولید سرب بازیابی شده از ۹,۲۴ میلیون تن در سال ۲۰۰۹ به ۱۱,۱۴ میلیون تن در سال ۲۰۱۳ رسیده است و این موضوع تایید بر حیاتی بودن عنصر سرب دارد [۱-۲]. امروزه سرب اغلب به طور انحصاری با فرآیندهای پیرومتالورژیکی تولید می‌شود. این فرآیندها به دلیل فراوانی انتشار گازهایی که شامل ترکیبات سولفیدی‌اند، از نظر زیست‌محیطی ایمن نیستند. این گازها به سادگی تبدیل به H_2SO_4 یا دیگر محصولات نمی‌شوند زیرا غلظت گوگرد در آن‌ها کافی نیست و همچنین سموم کاتالیزوری دارند. افزون بر این در مرحله ذوب، بخش قابل توجهی از مواد خام (تا ده درصد) به شکل گرد و غبار از دست می‌رود، در نتیجه سیستم‌های جدایش پیچیده و پرهزینه‌ای مورد نیاز است. فرآیندهای پیرومتالورژیکی به ویژه برای تولید سرب، در افکار عمومی وجهه مطلوبی ندارند. در طی چندین دهه و به طور فزاینده در سال‌های اخیر نگرانی بابت مشکلات زیست‌محیطی (شامل هوا، آب، زمین و آلودگی محیط کارخانه) اهمیت زیادی یافته است. بازنگری مستمر در این فرآیند به طور قابل توجهی تاثیرات زیست‌محیطی و شرایط محیط کار را بهبود بخشیده است اما برای قانون‌گزاران محیط زیست کافی نیست. با وجود پیشرفت‌های زیاد انجام گرفته در صنعت سرب در سال‌های اخیر از جمله کاهش شدید آلودگی‌ها، سرب همچنان یک وجهه نامطلوب دارد که صنعت نتوانسته آن را تغییر بدهد. حقایق فوق، اهمیت طراحی روش‌های جایگزین را برجسته می‌کند. به طور مشخص طرح‌های هیدرومتالورژیکی سرب و ترکیب‌های آن مزیت‌های زیست‌محیطی مهمی دارند. ملاحظات محیط زیستی و مزیت‌های اقتصادی ضرورت تحقیق در مورد روش‌های هیدرومتالورژیکی برای تولید سرب توجیه می‌کند. فرآیندهای الکترولیتی مزیت‌های مختلفی مانند سادگی، بهینه‌سازی آسان، کاهش شدید سطح دما (دمای عملیاتی در بازه ۱۰۰-۳۰۰ درجه سانتی‌گراد)، مخاطرات کمتر برای کارکنان کارخانه و نظایر آن دارند. همچنین سرب فلزی است که مشخصات الکتروشیمیایی بسیار خوبی دارد و خارج از محیط‌های آبی آبکاری می‌شود. امروزه فرآیندهای الکترولیتی در حوزه بازیابی فلزات به عنوان یک جایگزین برای فرآیندهای دما بالا شناخته می‌شوند، برای مثال در تولید مس، روی، کبالت، نیکل و کادمیم، سرب یکی از بالاترین اکیوالانت‌های الکتروشیمیایی را دارد و به عنوان مثال مصرف انرژی به ازای

هر تن سرب حدود ۳۰ درصد مقدار مورد نیاز برای تولید مس و روی است. علاوه بر این با الکترولیت مناسب، خلوص بالای سرب حاصل می‌شود که پاسخگوی دقیق‌ترین و سخت‌گیرترین تقاضاهای بازار است [۳-۵]. مطالعات و پژوهش‌ها برای طراحی یک فرآیند الکترولیتی در تولید سرب از گالن قابل توجه است [۶-۱۱] و محققان کارهای بیشماری در زمینه فرآیند تولید هیدرومتالورژیکی سرب انجام داده‌اند. فروشویی گالن با کلرید فریک توجه زیادی در ۲۰ سال گذشته و پیش از آن به خود جلب کرده است [۱۶-۱۲]. کاربرد هیدرومتالورژی با فروشویی کلریدی مشکلاتی دارد که ناشی از ویژگی‌های خاص یون کلرین است [۱۷]. در نتیجه تلاش‌ها به سمت تعریف فرآیندی سوق پیدا کردند که مزیت کاهش جفت Fe^{2+}/Fe^{3+} را به عنوان اکسیدکننده سولفید به سولفور، بدون مضرات منتج از استفاده یون Cl داشته باشد. آنیون‌های ممکن که می‌توانند به عنوان جایگزین استفاده شوند شامل SiF_4^- ، $NH_2.SO_3^-$ و BF_4^- هستند. برخی از آزمایش‌های فروشویی طراحی شده باید در دمای بالاتر از ۸۰ درجه سانتی‌گراد انجام گیرد، در نتیجه تنها فلوئوبورات امکان این را دارد که در آن دما به خوبی پایدار بماند (این یون در دمای بالای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد تجزیه می‌شود). در نتیجه فرآیند جدیدی که از نمک‌های فلوئوبورات استفاده می‌کند، در مقایسه با فرآیندهای الکترووینینگ فعلی یک نوآوری است [۵]. پژوهش حاضر تحلیل اثر عامل‌های مختلف را شامل می‌شود. روش تاگوچی [۱۸] برای غربال‌گری متغیرهای فرآیند و انتخاب موثرترین پارامترها و اثر آن‌ها بر بازیابی سرب به کار گرفته شده است. پنج پارامتر شامل غلظت اولیه فلوئوروبوریک اسید، آهن مصرف شده، مقدار مصرف اکسیدکننده، دما و زمان انتخاب شده است و در چهار سطح مختلف تغییر کردند. طراحی فاکتوریل کامل [۱۹] برای بهینه‌سازی چنین سیستم پیچیده‌ای مناسب نیست زیرا شامل آزمایش‌های زیادی می‌شود، در حالی که روش تاگوچی اجازه می‌دهد که تنها شانزده آزمایش برای رسیدن به همین اطلاعات انجام گیرد. با استفاده از این شانزده آزمایش، در این مقاله پارامترهای فروشویی بهینه‌سازی شده و مورد بحث قرار گرفت و اثر پارامترهای مختلف بررسی شد.

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- روش ناگوچی

روش تعریف و بررسی تمام شرایط ممکن در یک آزمایش که شامل چندین عامل است با عنوان طراحی آزمایش شناخته می‌شود. اساسا طراحی پارامتر کلاسیک که در اصل توسط فیشر طراحی شده، پیچیده است و استفاده از آن آسان نیست. به ویژه وقتی که تعداد پارامترهای فرآیند زیاد می‌شود، تعداد زیادی آزمایش باید انجام شود. برای حل مشکل، روش ناگوچی از یک طراحی خاص آرایه‌های متعامد برای مطالعه تمام فضای پارامترها با تعداد کمی از آزمایش‌ها استفاده می‌کند [۲۰]. طراحی ناگوچی می‌تواند تاثیر عامل‌ها را بر روی موارد مشخص و شرایط بهینه عامل‌ها را تعیین کند [۲۱]. این روش یک روش ساده و نظام مند در بهینه‌سازی طراحی برای کارایی، کیفیت و هزینه محصولات فرآیند است [۲۲]. به علاوه، این روش دو تمایز نسبت به دیگر روش‌های طراحی آماری دارد، اول این که پارامترهای موثر بر یک آزمایش می‌توانند به صورت کنترلی و غیر کنترلی (عامل بی‌نظمی) مورد بررسی قرار گیرند. دوم این که این روش می‌تواند برای بررسی پارامترها در بیش از دو سطح استفاده شود [۲۳]. آرایه‌های متعامد یک مجموعه متعادل از حداقل تعداد آزمایش‌ها و نسبت‌های سیگنال به نویز (S/N) را تامین می‌کند. نسبت‌های سیگنال به نویز تابع‌های لگاریتمی خروجی مورد نظر است و به عنوان تابع‌های هدف برای بهینه‌سازی در تحلیل اطلاعات و پیش‌بینی نتایج بهینه عمل می‌کند. خروجی آرایه متعامد که تاثیرات نسبی پارامترهای مختلف را بر محصول مورد نظر نمایان می‌کند، برای بهینه‌سازی تابع هدف استفاده می‌شود. سه نوع تابع هدف بیشینه بهتر، کمینه بهتر و اسمی بهترین وجود دارد. تاثیرات عموما به شرایط نسبت سیگنال به نویز (S/N) ارجاع دارند. در این مقاله هدف بیشینه کردن بازیابی سرب از کنسانتره گالن بود و به این منظور نوع «بیشینه بهتر» تابع هدف مورد استفاده قرار گرفت. رابطه دقیق بین S/N و سیگنال از رابطه ۱ به دست می‌آید:

$$S/N = -10 \log \left\{ \left(\frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{y_i^2} \right) \right\} \quad (1)$$

که در آن y_i سیگنال (درصد بازیابی) اندازه گرفته شده در هر آزمایش است که طی n بار تکرار مقدار میانگین آن به

دست آمده است. تاثیر یک سطح پارامتر روی نسبت سیگنال به نویز، به طور مثال انحرافی که از میانگین کلی سیگنال سبب می‌شود با استفاده از آنالیز میانگین به دست می‌آید. تاثیر نسبی پارامترهای فرآیند از آنالیز واریانس نسبت‌های سیگنال به نویز به دست می‌آید. محاسبه آنالیز میانگین و آنالیز واریانس با استفاده رابطه‌های ۲ و ۳ انجام می‌گیرد:

$$m_i = \left(\frac{1}{N_i} \right) \sum \frac{S}{N} \quad (2)$$

$$NI \text{ مجموع مربعات} = N_i \sum_{i=1}^j (m_i - (m_i))^2 \quad (3)$$

که در آن:

m_i سهم هر سطح پارامتر در نسبت سیگنال به نویز (m_i) متوسط m_i ها برای یک پارامتر مشخص
NI تعداد دفعاتی که آزمایش با یک سطح عاملی در کل فضای آزمایش انجام گرفته است.

مجموع مربعات با استفاده از آنالیز واریانس به دست آمده است. این جمله به درجه‌های آزادی متناظر (تعداد سطح‌های پارامترها منهای یک) برای نتیجه گرفتن اهمیت نسبی پارامترهای آزمایشگاهی مختلف با استفاده از معادله ۴ تقسیم می‌شود.

$$\text{تاثیر پارامتر} = \frac{\text{مجموع مربعات}}{\left\{ \left(\frac{\text{مجموع مربعات}}{\text{درجه آزادی}} \right) \times \text{درجه آزادی} \right\}} \quad (4)$$

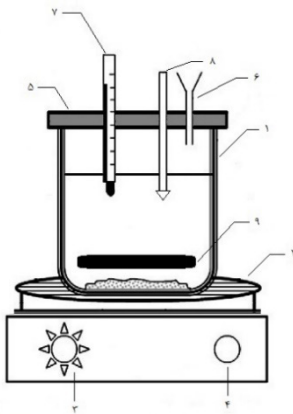
محققان مختلفی [۲۴-۲۹] به طور وسیع از این روش برای بهینه‌سازی پارامترها در حوزه استخراج فلزات یا فروشویی استفاده کرده‌اند.

۲-۲- مواد

کنسانتره گالن از کارخانه فلوتاسیون واقع در شهرک صنعتی در کیلومتر ۵ جاده زنجان - بیجار تهیه شد. کنسانتره در فلوتوروبوریک اسید با عیار صنعتی ۴۸-۵۰ درصد حل شد. فلوتوروبوریک اسید استفاده شده و دیگر مواد مانند اکسیدکننده (با عیار صنعتی ۳۳-۳۵ درصد) و پودر آهن (با خلوص ۹۹/۹۹ درصد) تهیه شد، ترکیب کنسانتره گالن حاصل از آنالیز XRF در جدول ۱ ارایه شده است.

هرکدام در زمان معین انجام گرفت. در پایان زمان واکنش، محتوای رآکتور فیلتر شده و محلول برای تعیین مقدار سرب آن مورد آنالیز جذب اتمی قرار گرفت. درصد بازیابی با استفاده از رابطه ۵ محاسبه شد:

$$(5) \quad \frac{(L) \text{ حجم محلول نهایی} \times \text{غلظت سرب } \left(\frac{g}{l}\right)}{(gr) \text{ وزن خشک جامد اولیه} \times \text{عیار سرب } (\%)}$$



شکل ۱: شماتیکی از رآکتور فروشویی

۲-۵- انتخاب پارامترها

برای طراحی تاگوچی و آنالیز متعاقب آن، از نرم افزارهای آماری Minitab-17 و Qualitek-4 استفاده شد. آرایه متعامد مناسب برای آزمایش‌ها با استفاده از طراحی فاکتوریل ناقص تاگوچی انتخاب شد. روش تاگوچی از آرایه‌های متعامد برای کاهش تعداد آزمایش‌ها و در عین حال رسیدن به نتیجه‌های آماری معنی‌دار استفاده می‌کند. انتخاب آرایه متعامد مناسب بستگی به تعداد عامل‌های کنترلی و سطح‌هایشان دارد. با بررسی نتایج مطالعات گذشته و مشاهدات آزمایش‌های مقدماتی، پنج عامل کنترلی در چهار سطح برای این پژوهش به کار گرفته شد. هدف بیشینه کردن بازیابی سرب در محلول فروشویی و همچنین تعیین موثرترین عامل‌ها بر پاسخ بود. در طراحی آزمایش کلاسیک با استفاده از روش فاکتوریل کامل، تعداد آزمایش‌ها برای مطالعه فضای فرآیند انتخاب شده $4^5 = 1024$ است. با انتخاب آرایه متعامد L16 (4^5) تعداد آزمایش‌های مورد نیاز به ۱۶ کاهش پیدا می‌کند؛ البته در این روش با در نظر گرفتن نسبت سیگنال به نویز، دیگر به بررسی اثرهای متقابل بین عوامل کنترلی و عوامل بی‌نظمی پرداخته نمی‌شود

جدول ۱: ترکیب اجزای کنسانتره گالن

ترکیب	درصد
سرب (Pb)	۵۷٫۶۶
روی (Zn)	۵٫۵۰
آهن (Fe)	۱٫۵۵
سدیم اکسید (Na ₂ O)	۶٫۲۶۹
منیزیم اکسید (MgO)	۲٫۲۸۹
سیلیسیم دی اکسید (SiO ₂)	۶٫۶۹۳
گوگرد تری اکسید (SO ₃)	۱۲٫۸۱
کلسیم اکسید (CaO)	۱٫۰۶۹

۲-۳- آنالیز نمونه‌ها

کنسانتره گالن در محلول HCl:HNO₃ با نسبت ۳:۱ در دمای ۱۸۰-۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۵ دقیقه حل شد و محلول حاصل برای محتوای سرب کنسانتره مورد آنالیز قرار گرفت. محلول‌های حاصل از فروشویی برای محاسبه مقدار سرب‌شان با دستگاه جذب اتمی Perkin Elmer مدل AA300 آنالیز شدند.

۲-۴- آزمایش‌های فروشویی

آزمایش‌های فروشویی مستقیم اتمسفری در یک رآکتور شیشه‌ای ۶۰۰ میلی‌لیتری در بسته (شماره ۱ در شکل ۱) انجام گرفت. یک همزن حرارتی مغناطیسی (IKA، آلمان) مورد استفاده قرار گرفت (شماره ۲ در شکل ۱). دما (شماره ۳ در شکل ۱) و آهنک همزنی محلول (شماره ۴ در شکل ۱) قابل تنظیم بود. رآکتور با فویل آلومینومی (شماره ۵ در شکل ۱) پوشیده شده و سه ورودی برای خوراک (شماره ۶ در شکل ۱)، دماسنج (شماره ۷ در شکل ۱) و اندازه‌گیری pH (شماره ۸ در شکل ۱) در نظر گرفته شد. یک آهنربا (شماره ۹ در شکل ۱) که به وسیله نیروی مغناطیسی حرکت می‌کرد به عنوان همزن محلول به کار گرفته شد. طرح دستگاه آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است. در آزمایش‌های فروشویی، بعد از رسیدن رآکتور به دمای مورد نظر، ۲۰ گرم از کنسانتره گالن (در تمام آزمایش‌ها) به ۲۰۰ میلی‌لیتر از محلول فروشویی با توجه به چگالی پالپ مورد نیاز افزوده شد. سرعت همزنی در تمام آزمایش‌های فروشویی ۹۰۰ دور در دقیقه بود که در آن تمام ذرات جامد به خوبی در محلول به حالت تعلیق درمی‌آمد. محلول فروشویی با استفاده از آب مقطر و اسید و دیگر مواد با مقدارهای از پیش تعیین شده آماده‌سازی شد. آزمایش‌ها

و اثرهای متقابل دوعاملی در نظر گرفته نمی‌شوند. جدول ۲ تمام پارامترها، یعنی میزان مصرف فلوتوروبوریک اسید، مصرف آهن، مصرف اکسیدکننده، دما، زمان و سطح‌هایشان را نشان می‌دهد.

روی پارامترهایی که موثرتر و مهم‌تر بودند در بازه گسترده‌تری (چهار سطح) میسر بود. دلایل کنار گذاشتن این سه پارامتر در زیر توضیح داده شده‌اند:

جدول ۳: آزمایش‌های طراحی شده

شماره آزمایش	مصرف اسید	مصرف آهن	مصرف اکسیدکننده	دما	زمان
۱	۱,۵	۰	۰	۲۵	۱
۲	۱,۵	۳۱,۲	۱۱,۱	۵۰	۲
۳	۱,۵	۴۶,۸	۲۲,۲	۷۵	۴
۴	۱,۵	۶۲,۴	۳۳,۳	۹۰	۶
۵	۳	۰	۰	۲۵	۱
۶	۳	۳۱,۲	۱۱,۱	۵۰	۲
۷	۳	۴۶,۸	۲۲,۲	۷۵	۴
۸	۳	۶۲,۴	۳۳,۳	۹۰	۶
۹	۴	۰	۰	۲۵	۱
۱۰	۴	۳۱,۲	۱۱,۱	۵۰	۲
۱۱	۴	۴۶,۸	۲۲,۲	۷۵	۴
۱۲	۴	۶۲,۴	۳۳,۳	۹۰	۶
۱۳	۵	۰	۰	۲۵	۱
۱۴	۵	۳۱,۲	۱۱,۱	۵۰	۲
۱۵	۵	۴۶,۸	۲۲,۲	۷۵	۴
۱۶	۵	۶۲,۴	۳۳,۳	۹۰	۶

جدول ۲: سطوح پارامترهای انتخابی در طراحی آزمایش

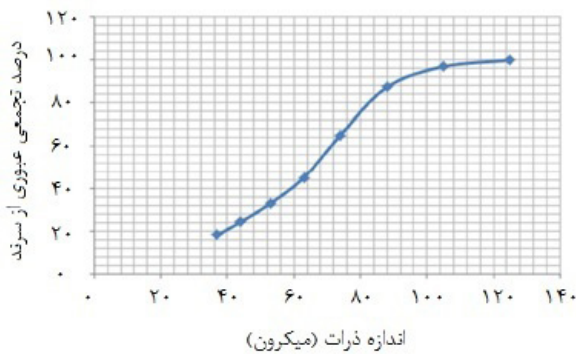
پارامتر	واحد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
مصرف اسید	مولار	۱,۵	۳	۴	۵
مصرف آهن	گرم بر لیتر	۰	۳۱,۲	۴۶,۸	۶۲,۴
مصرف اکسیدکننده	گرم بر لیتر	۰	۱۱,۱	۲۲,۲	۳۳,۳
دما	درجه سانتی‌گراد	۲۵	۵۰	۷۵	۹۰
زمان	ساعت	۱	۲	۴	۶

جزئیات آزمایش‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است. سطح نخست پارامتر غلظت اسید با توجه به میزانی که برای رسیدن pH محیط به عدد مورد نظر (1 = pH) و ثابت ماندن آن در طول فرآیندها لازم بود تعریف شد و سه سطح دیگر هم به عنوان ضرایبی از این مقدار در نظر گرفته شدند. برای پارامترهای میزان مصرف آهن و اکسیدانت هم اعداد محاسبه شده از معادلات استوکیومتری به عنوان یکی از سطوحها و دو سطح دیگر هم به عنوان ضریبی از آن اعمال شدند. سطح نخست این پارامترها هم مقدار صفر در نظر گرفته شد تا تاثیر آن‌ها در حالتی که در سیستم حضور ندارند عیان شود. برای پارامتر دما، سطح بالایی ۹۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شد زیرا در این دما آب در محیط آزمایشگاه شروع به جوشیدن می‌کند و بخار اسید مشاهده می‌شود. سطح پایینی هم ۲۵ درجه سلسیوس به عنوان حداقل دما (دمای استاندارد محیط آزمایشگاه) تعیین شد. برای پارامتر زمان هم مقدار سطح پایین ۱ ساعت با توجه به اعداد پیشنهاد شده و مشاهده شده در کارهای قبل تعیین شد و سطح بالایی ۶ ساعت هم با توجه به آزمایش‌های مقدماتی لحاظ شد. بر اساس مطالعات مشابه [۳۳] و آزمایش‌های مقدماتی تصمیم گرفته شد که مقدارهایی ثابت برای پارامترهایی که اثرات کمتری روی بازیابی سرب دارند (سرعت همزنی، اندازه ذرات کنسانتره فلوتاسیون و نسبت جامد: مایع) در نظر گرفته شده و آن‌ها از طراحی آزمایش حذف شوند. در نتیجه امکان مطالعه بر

۲-۵-۱- سرعت همزنی

سرعت همزنی یکی از مهم‌ترین پارامترهاست که نقشی اساسی در سینتیک واکنش دارد. سرعت همزنی بالاتر یعنی برهم‌کنش و واکنش بیشتر. در مطالعات گذشته نشان داده شده که با افزایش سرعت همزنی تا حدود ۴۰۰ دور در دقیقه، بازیابی سرب افزایش پیدا می‌کند و وقتی سرعت همزنی بیشتر می‌شود تاثیر قابل توجهی وجود ندارد [۳۳]. در آزمایش‌های مقدماتی برای پژوهش حاضر مقادیر مختلف سرعت همزنی مورد مطالعه قرار گرفت و مشاهده شد که تاثیر قابل توجهی بر بازیابی سرب حتی در آهنگ بیشینه (۱۵۰۰ دور در دقیقه) وجود ندارد. در نتیجه ۹۰۰ دور در دقیقه به عنوان یک مقدار رضایت‌بخش و ثابت برای دستیابی به بیشینه ممکن برای فروشویی سرب از کنسانتره گالن تحت شرایط بهینه پارامترهای دیگر انتخاب شد. در این مقدار ذرات جامد به طور کامل در پالپ به تعلیق در می‌آیند.

۲-۵-۲- چگالی پالپ



شکل ۲: آنالیز ابعادی کنسانتره گالن

هرچند در آزمایش‌های مقدماتی قسمتی از کنسانتره با استفاده از هاون دیسکی خردایش شد و به زیر ۳۰ میکرون رسید. مشاهده شد که وقتی دیگر پارامترها در شرایط یکسان هستند خردایش بیشتر تاثیر قابل توجهی بر بازیابی سرب ندارد.

۳- بحث و نتایج

روش تاگوچی برای تعیین شرایط بهینه پنج پارامتر از طریق مجموعه‌ای از حداقل تعداد آزمایش‌ها اتخاذ شد. نتایج آزمایش‌ها و نسبت‌های سیگنال به نویز متناظر با درصد بازیابی فروشویی در جدول ۵ (با استفاده از نرم‌افزار Minitab) نشان داده شد. اثر هر پارامتر روی بازیابی نهایی که به وسیله معادله‌های ۱ تا ۴ محاسبه شده در جدول ۶ (با استفاده از نرم‌افزار Qualitek) به نمایش درآمده است. از جدول ۶ قابل مشاهده است که عامل اکسیدکننده، بیشینه تاثیر را روی بازیابی سرب از طریق فروشویی دارد. ترتیب پارامترهای موثر بنا به درصد تاثیر عامل‌ها چنین است: مصرف عامل اکسیدکننده (۵۳٫۴۹۹ درصد) مقدار پودر آهن (۱۸٫۶۱۰ درصد) دما (۱۳٫۲۲۲ درصد) زمان (۹٫۸۵۰ درصد) غلظت اسید (۵٫۰۸۸ درصد). این نتیجه منطقی است زیرا قبلاً اشاره شد که حضور فلوئوبورات فریک در محیط ضروری است و پارامترهای مصرف افزودنی و مقدار عامل اکسیدکننده به این حقیقت مرتبط‌اند. از سوی دیگر مقدار مصرف اسید کمترین تاثیر را روی پاسخ دارد. در تمام آزمایش‌ها حداقل مقدار مورد نیاز اسید برای دستیابی به pH مورد نیاز در نظر گرفته شده بود. در آزمایش‌های مقدماتی مشاهده شد که یک حد بیشینه برای بازیابی سرب (برابر با ۵۰ درصد) در حالتی که اسید به تنهایی و بدون مصرف آهن و اکسیدکننده برای فروشویی

چگالی پالپ یا درصد جامد یا نسبت جامد: مایع (S:L) تاثیر خود را بر رفتار رئولوژیکی پالپ دارد و یک نقش عمده در تعیین الگوی فروشویی فلزات در شرایط هیدرومتالورژیکی ایفا می‌کند. نتایج مطالعه‌های گذشته نشان می‌دهد که وقتی چگالی پالپ کاهش می‌یابد، بازیابی سرب زیاد می‌شود [۳۳]. بنا به نتایج مقدار بهینه ۱:۵ یا ۲۰۰ گرم در لیتر است اما وقتی نسبت ۱:۱۰ یا ۱:۷ باشد تفاوت آشکاری وجود ندارد. در نتیجه در پژوهش حاضر تصمیم بر این شد که این مقدار برابر با ۱:۱۰ باشد. در حالی که در آزمایش‌های مقدماتی هم نسبت ۱:۲۰ بررسی و مشاهده شد که بازیابی سرب وقتی دیگر پارامترها در شرایط یکسان باشند تحت تاثیر قرار نمی‌گیرد.

۲-۵-۳- اندازه ذرات

اندازه ذرات جامد خوراک در فروشویی یک عامل اساسی است، زیرا مسایل اقتصادی فرآیند به مقدار زیادی بسته به هزینه‌های خردایش است. عموماً اندازه ذرات ریزتر به دلیل مساحت سطح بیشتری از ذرات کانسار که در معرض محیط فروشویی قرار دارد سینتیک فروشویی سریع‌تری به دست می‌دهد. در پژوهش حاضر نمونه همگن شده و برای آنالیز ابعادی تقسیم شد. نتایج آن در جدول ۴ و شکل ۲ نشان داده شده‌اند. نتایج نشان داد که بیشتر خوراک زیر ۱۲۰ میکرون قرار دارد که اندازه مناسبی برای فروشویی است در نتیجه نیاز به خردایش بیشتر نیست و این هزینه‌ها را کاهش می‌دهد. به علاوه عیار سرب در خوراک که کنسانتره کارخانه فلوتاسیون است توزیع یکسانی در اندازه‌های مختلف دارد.

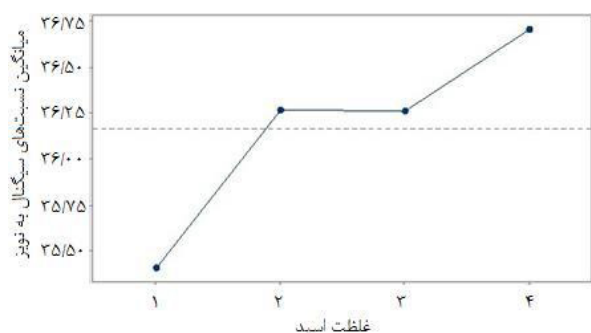
جدول ۴: آنالیز ابعادی کنسانتره گالن

اندازه سرنده (میکرون)	وزن خوراک مانده روی سرنده (گرم)	درصد خوراک مانده بر روی سرنده	درصد تجمعی خوراک مانده بر روی سرنده	درصد عبوری خوراک
۲۵۰	۰	۰	۰	۱۰۰
۱۵۰	۰	۰	۰	۱۰۰
۱۰۶	۴۰٫۶	۳	۳	۹۷
۹۰	۱۲۹	۹٫۶	۱۲٫۶	۸۷٫۴
۷۵	۲۹۸٫۱۷	۲۲٫۲	۳۴٫۸	۶۵٫۲
۶۳	۲۷۰٫۳	۲۰٫۱	۵۴٫۹	۴۵٫۱

۳-۱-۱- اثر پارامترهای مختلف

۳-۱-۱-۱- غلظت فلوتوروبوریک اسید

فلوتوروبوریک اسید در پژوهش حاضر عامل فروشویی است و از سوی دیگر pH یک پارامتر مهم تاثیرگذار بر بازیابی سرب است [۳۳]. چون عامل فروشویی اسیدی است این دو پارامتر (مقدار عامل فروشویی و pH) همپوشانی دارند. از این رو تصمیم‌گیری در مورد مصرف اسید بر اساس رسیدن به pH مناسب برای فروشویی سرب بود. مطالعات گذشته نشان داد که انجام آزمایش فروشویی در یک مقدار بهینه pH برای بیشینه بازیابی سرب ضروری است [۳۳]. در نتیجه اولین سطح از این پارامتر در طراحی آزمایش‌ها کمینه مقدار اسید مورد نیاز برای رسیدن به مقدار بهینه pH بود و سایر سطح‌ها ضریب‌هایی از این مقدار بودند؛ در نتیجه pH همواره مقدار مورد نیاز را داشت. شکل ۳ تغییرات مقدارهای تابع هدف تاگوچی را در سطح‌های مختلف اسید نشان می‌دهد. بنا به شکل ۳، ۵ مولار مقدار بهینه برای بیشینه پاسخ است.



شکل ۳: تاثیر غلظت اسید بر تابع هدف

۳-۱-۲- مصرف پودر آهن

قبلا تلاش‌هایی برای بهبود بازیابی سرب از کنسانتره گالن در انحلال با فلوتوروبوریک اسید انجام گرفته و ثابت شده که حضور کمپلکس فلوتوبورات فریک برای افزایش بازیابی ضروری است زیرا فرآیند بر اساس الکترولیت فلوتوبورات است [۵، ۴]. در همین راستا ایده خوراک‌دهی کنسانتره به رآکتور همزنی-جایی که با یک محلول اکسیدکننده بر اساس فلوتوبورات فریک در تماس است- به اجرا درآمده است [۴] (رابطه ۶). در این پژوهش آنالیز آزمایش‌های مقدماتی نشان داد که فرآیند انحلال کنسانتره گالن در اسید، بدون انحلال پودر آهن در سیستم بازیابی مطلوبی ندارد (حدود ۵۰ درصد بازیابی برای

استفاده می‌شود وجود دارد و نتیجه گرفته شد که افزایش مصرف اسید تاثیری روی بازیابی سرب از کنسانتره گالن در غیاب آهن و اکسیدکننده ندارد. آنالیز تاگوچی بر نسبت‌های S/N برای عامل‌های مختلف در سطح‌های مختلف در ادامه بحث شده است. بهینه‌سازی پارامترها از طریق روش «بیشینه بهتر» به دست آمد. این کار با استفاده از نرم‌افزار Minitab 17 (شکل‌های ۳ تا ۷) انجام گرفت. روش تاگوچی برای بیشینه کردن درصد بازیابی فروشویی سرب با شرایط بهینه پارامترها به کار برده شد. آنالیز تاگوچی بر نسبت‌های S/N برای عامل‌های مختلف در سطح‌های مختلف با جزییات در زیر بحث شده:

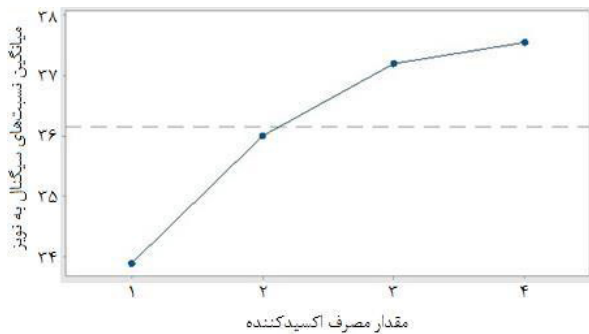
جدول ۵: درصد‌های بازیابی و نسبت‌های S/N مرتبط

شماره آزمایش	درصد بازیابی	نسبت S/N
۱	۳۶,۲۲	۳۱,۱۷۹۰
۲	۶۲,۸۷	۳۵,۹۶۸۹
۳	۷۴,۹۶	۳۷,۴۹۶۶
۴	۷۰,۸۳	۳۷,۰۰۴۳
۵	۶۳,۹۲	۳۶,۱۱۲۷
۶	۴۶,۴۲	۳۳,۳۳۴۱
۷	۸۱,۹۵	۳۸,۲۷۱۰
۸	۷۳,۷۲	۳۷,۳۵۱۷
۹	۵۳,۲۰	۳۴,۵۱۸۲
۱۰	۷۹,۲۱	۳۷,۹۷۵۶
۱۱	۶۳,۵۰	۳۶,۰۵۵۵
۱۲	۶۶,۹	۳۶,۵۰۸۵
۱۳	۷۰,۳۰	۳۶,۹۳۹۱
۱۴	۹۳,۳۸	۳۹,۴۰۵۱
۱۵	۵۸,۹۲	۳۵,۴۰۵۳
۱۶	۵۶,۶۴	۳۵,۰۶۲۵

جدول ۶: تاثیر پارامترها بر روی بازیابی سرب

پارامتر	DoF	SoS	درصد تاثیر
غلظت اسید	۳	۱۵۰,۲۳۵	۵,۰۸۸
مصرف پودر آهن	۳	۵۴۹,۵۱۲	۱۸,۶۱۰
مصرف اکسیدکننده	۳	۱۵۷۹,۶۴۲	۵۳,۴۹۹
دما	۳	۳۹۰,۴۱۶	۱۳,۲۲۲
زمان	۳	۲۸۲,۸۶۴	۹,۵۸۰
بقیه / خطا	۰	-	-
مجموع	۱۵	۲۹۵۲,۶۷۱	۱۰۰

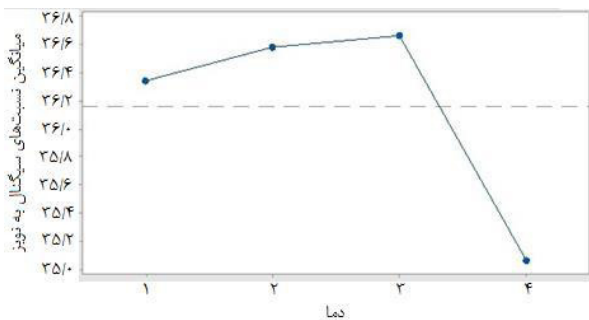
فروس به فریک انجام گرفت. مقادارها بین صفر، ۱۱/۱، ۲۲/۲ و ۳۳/۳ گرم بر لیتر متغیر بود. اثر عامل اکسیدکننده استفاده شده بر تابع هدف تاگوچی در شکل ۵ به نمایش درآمده است. شکل ۵ نشان می‌دهد که سطح چهارم مقدار بهینه از عامل اکسیدکننده برای بیشینه بازیابی سرب است.



شکل ۵: تاثیر مصرف اکسیدکننده بر بازیابی سرب

۳-۱-۴-۲ دما

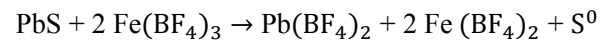
آزمایش‌های فروشویی در پژوهش حاضر در دماهای مختلفی از ۲۵ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت. نتیجه‌ها نشان داد که وقتی دما از ۸۰ درجه سانتی‌گراد بالاتر رفت، آهنگ بازیابی سرب به طور قابل توجهی کاهش یافت. اثر دما در محدوده اشاره شده بر تابع هدف تاگوچی در شکل ۶ نشان داده شده است. می‌توان از مشاهدات پژوهش حاضر استنباط کرد که واکنش فروشویی در دماهای پایین‌تر موفق‌تر است. ۸۰ درجه سانتی‌گراد به عنوان دمای بهینه برای بیشینه کردن بازیابی سرب انتخاب شد. مقادارهای مشابه در جاهای دیگر گزارش شده است [۴-۵].



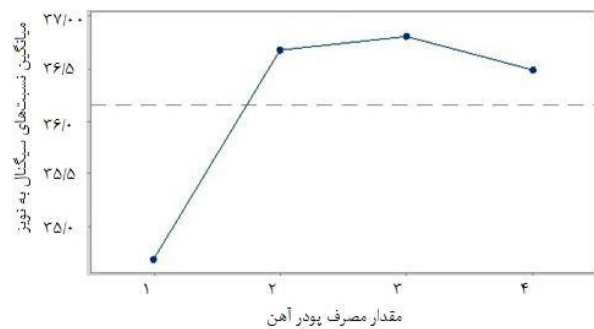
شکل ۶: تاثیر دما بر بازیابی سرب

سرب)، در حالی که با انحلال آهن و در حضور سایر پارامترها این مقدار افزایش می‌یابد.

(۶)



تصمیم در مورد سطح‌های مصرف پودر آهن بر اساس مقادارهای استوکیومتری معادله ۵ گرفته شد. مقدار پودر آهن بین صفر، ۳۱/۲، ۴۶/۸ و ۶۲/۴ گرم بر لیتر تغییر می‌کرد. اثر پودر آهن استفاده شده بر تابع هدف تاگوچی در شکل ۴ نشان داده شده است. شکل ۴ نشان می‌دهد که در سطح اول (صفر) بازیابی قابل قبولی برای سرب وجود ندارد و با افزایش مقدار آهن، بازیابی سرب زیاد می‌شود. بنا به شکل ۴، سومین سطح به عنوان مقدار بهینه آهن انتخاب شد.



شکل ۴: تاثیر مقدار آهن بر بازیابی سرب

۳-۱-۳-۳ عامل اکسیدکننده

در پژوهش حاضر از اکسیدکننده برای تاثیر گذاشتن بر فروشویی سرب و افزایش بازیابی آن از کنسانتره گالن استفاده شده است. در آزمایش‌های مقدماتی پیش از مرحله طراحی آزمایش تاثیر چند عامل اکسیدکننده بر بازیابی سرب مورد بررسی قرار گرفت. مشخص شد که استفاده از عامل اکسیدکننده بعد از اضافه کردن آهن، برای تشکیل فلئوئوبورات فریک در سیستم و داشتن بازیابی مطلوب برای سرب مورد نیاز است. در منابع مربوط اشاره شده که پتانسیل اکسیداسیون بالا برای انحلال سولفیدها لازم است [۳۰-۳۲] و اکسیداسیون یون فروس به فریک در محیط فروشویی اتفاق می‌افتد [۴]. پژوهش حاضر با تخمین مقدار لازم برای اکسیدکننده بر اساس محاسبات استوکیومتری و با توجه به معادله اکسیداسیون یون

۳-۱-۵- زمان

اسید در یک بازه گسترده از شرایط آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت. تأثیر پارامترهای فرآیند شامل غلظت ابتدایی اسید، میزان مصرف پودر آهن، مقدار مصرف عامل اکسیدکننده، دمای واکنش و زمان واکنش هر کدام در چهار سطح با روش تاگوچی و با استفاده از آرایه متعامد L16 (۴^۵) مورد مطالعه قرار گرفت. درصد بازیابی سرب در محلول بهینه شد. پس از تجزیه و تحلیل کامل، شرایط بهینه‌سازی شده نهایی برای پارامترهای فروشویی به دست آمد. شرایط بهینه‌سازی شده برای پارامترهای موثر بر فروشویی سرب با فلوتوروبوریک اسید به این ترتیب عبارتند از: فلوتوروبوریک اسید = ۵ مولار؛ پودر آهن = ۴۶/۸ گرم بر لیتر؛ عامل اکسیدکننده = ۳۳/۳ گرم بر لیتر؛ دما = ۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان = ۶ ساعت. آزمایش تایید بعد از اتخاذ مقدارهای بهینه پارامترها انجام گرفت. درصد بازیابی سرب در آزمایش تایید ۹۴/۶۵۱ درصد بود. چنین نتیجه گرفته شد که روش تاگوچی می‌تواند با موفقیت برای تعیین شرایط انحلال کنسانتره سرب به جهت بیشینه کردن استخراج سرب در محلول فروشویی به کار رود. مدل آماری به دست آمده با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، برای بخش‌های مختلف فضای طراحی کارایی دارد.

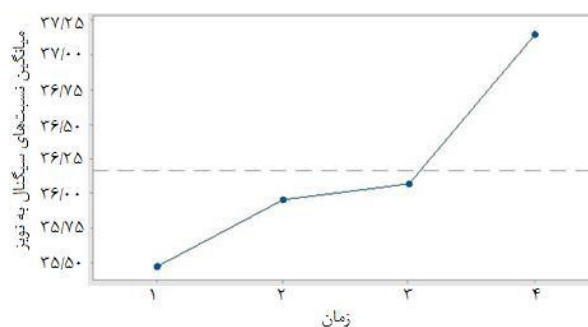
۵- سپاس‌گزاری

نویسندگان مقاله تشکر صمیمانه خود را از مهندس بهزاد صداقت، مدیریت محترم واحد تحقیقات شرکت مهندسی و تحقیقاتی فلزات غیرآهنی و کارشناسان آزمایشگاه این مجموعه به دلیل همکاری صمیمانه‌شان ابراز می‌دارند.

۶- مراجع

- [1] International Lead and Zinc Study Group. (2016). "Lead and Zinc Statistics". 61th Session, Press Release, ILZSG, 27-28 Oct, Lisbon, Portugal, 9-17.
- [2] Pecharrómán, E., Álvarez, C., Frades, M., Pinedo, M.T., Díaz, G., Staley, A., Pusateri, J., and Johnson, E. (2015). "ECOLEAD™ process: a clean technology to recover Lead and Silver from residues". Proceedings of Pb-Zn, Düsseldorf, Germany, 1: 177-184.
- [3] Strunnikov, S. G., and Koz'min, YU. A. (2005). "Hydrometallurgical Schemes of Lead Concentrate Processing". Chemistry for Sustainable Development, 13: 483-490.
- [4] Maccagni, M., Nielsen, J., and Hymer, T. (2015). "The FLUBOR® Process: Pilot Tests Results". Proceedings of

مدت زمان هر واکنش شیمیایی نقش مهمی در سینتیک فرآیند ایفا می‌کند. برای بهینه کردن مدت زمان فروشویی و تکمیل واکنش، در کار حاضر سطح‌های مختلف زمان در بازه ۱ تا ۶ ساعت برای آزمایش‌ها انتخاب شد. نتیجه‌های به دست آمده با تجزیه و تحلیل تاگوچی، به طور آشکار نشان داد که بازیابی سرب با افزایش زمان زیاد می‌شود. تأثیر زمان بر تابع هدف تاگوچی در شکل ۷ نشان داده شده است. بر این اساس ۶ ساعت به عنوان مقدار بهینه زمان در آزمایش اعتبارسنجی برای بررسی شرایط بهینه پارامترها برگزیده شد.



شکل ۷: تأثیر زمان بر بازیابی سرب

۳-۲- آزمایش تایید

بیشینه مقدار پاسخ در نقطه پیش‌بینی شده با قسمت بهینه‌سازی نرم‌افزار مشخص شد. به بیان دیگر این مورد شامل ترکیب سطح‌های پارامترهاست که در آن مقدار بازیابی سرب به وسیله مدل پیشنهاد شده است. شرایط بهینه برای پارامترهای موثر بر فروشویی سرب با فلوتوروبوریک اسید به این ترتیب عبارتند از: فلوتوروبوریک اسید = ۵ مولار؛ پودر آهن = ۴۶/۸ گرم بر لیتر؛ عامل اکسیدکننده = ۳۳/۳ گرم بر لیتر؛ دما = ۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان = ۶ ساعت. نتیجه‌های آزمایشگاهی تحت این شرایط برابر با مقدار ۹۴/۶۵۱ درصد برای بازیابی سرب بود. مقدار پیش‌بینی شده استخراج سرب که با نرم‌افزار تحت این شرایط آرایه شده برابر با ۹۵/۱۳۴ درصد بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین مقدارهای پیش‌بینی شده و مشاهده شده وجود دارد.

۴- نتیجه‌گیری

فروشویی مستقیم اتمسفری کنسانتره گالن در فلوتوروبوریک

- [17] Olper, M., and Maccagni, M. (1993). "The Production of Electrolytic Lead and Elemental Sulphur from Lead Sulphide Concentrates". Proceedings of the Milton E. Woodworth (IV) International Symposium on Hydrometallurgy, Salt Lake City, UT, 1-5 August, USA, pp. 3.
- [18] Yadav, K. K., Singh, D. K., Anitha, M., Varshaney, L., and Singh, H. (2013). "Studies on separation of rare earths from aqueous media by polyethersulfone beads containing D2EHPA as extractant". Separation and Purification Technology, 118: 350-358.
- [19] Adler, Y. P., Markova, E. V., and Granovsky, Y. V. (1975). "The Design of Experiments to Find Optimal Conditions". Mir Publication, Moscow, pp. 287.
- [20] Nian, C. Y., Yang, W. H., and Trang, Y. S. (1999). "Optimization of turning operations with multiple performance characteristics". Journal of Materials Processing Technology, 95: 90-96.
- [21] Taguchi, G., Yokoyama, Y., and Wu, Y. (1993). "Taguchi methods-design of experiments". American Supplier Institute Press, Tokyo, Japan, pp. 330.
- [22] Roy, R. K. (1990). "A primer on the taguchi method". Van Nostrand Reinhold, New York, 7-17.
- [23] Abali, Y., Colak, S., and Yapici, S. (1997). "The optimization dissolution of phosphate rock with Cl_2-SO_2 gas mixture in aqueous medium". Hydrometallurgy, 46: 27-35.
- [24] Chee, K. K., Wong, M. K., and Lee, H. K. (1996). "Optimization of microwave-assisted solvent extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons in marine sediments using a microwave extraction system with high-performance liquid chromatography-fluorescence detection and gas chromatography-mass spectrometry". Journal of Chromatography A, 723: 259-271.
- [25] Dasgupta, K., Singh, D. K., Sahoo, D. K., Anitha, M., Awasthi, A., and Singh, H. (2014). "Application of Taguchi method for optimization of process parameters in decalcification of samarium-cobalt intermetallic powder". Separation and Purification Technology, 124: 74-80.
- [26] Nasab, M. E., Sam, A., and Milani, S. A. (2011). "Determination of optimum process conditions for the separation of thorium and rare earth elements by solvent extraction". Hydrometallurgy, 106: 141-147.
- [27] Taghizadeh, M., Ghasemzadeh, R., Ashrafzadeh, S. N., Saberyan, K., and Ghanadi, M. (2008). "Determination of optimum process conditions for the extraction and separation of zirconium and hafnium by solvent extraction". Hydrometallurgy, 90: 115-120.
- Pb-Zn, Düsseldorf, 14-17 July, Germany, 399-406.
- [5] Bozzano, G., Dente, M., Pierucci, S., and Maccagni, M. (2011). "Modeling and Simulation of the Production of Lead and Elementary Sulphur from Lead Sulphide Concentrates". 21st European Symposium on Computer Aided Process Engineering, 1733-1737.
- [6] Demarthe, J. M., and Georgeaux, A. (1980). "Hydrometallurgical treatment of lead concentrates". Proceedings of World Symposium on Metals and Environment Control, Las Vegas, Nevada, 426-444.
- [7] Lee, A. Y., Wethington, A. M., and Cole, E. R. (1986). "Hydrometallurgical process for producing Lead and Elemental Sulphur from Galena concentrates". BU Mines RI 9055, pp. 13.
- [8] Girgis, M., Ghali, E., and Wieckowski, A. (1986). "Electrochemical studies of lead deposition from acidic ammonium acetate solutions on different substrates". Electrochimica Acta, 31: 681-689.
- [9] Paramguru, R. K., and Kammel, R. (1998). "Bed performance in the direct electrowinning of lead from suspension galena anodes". Metallurgical Transactions B, 19 (1): 67-72.
- [10] González-Domínguez, J. A., Peters, E., and Dreisinger, D. B. (1991). "The Refining of Lead by the Betts Process". Journal of Applied Electrochemistry, 21: 189-202.
- [11] Expósito, E., Iniesta, J., Gonzáles-García, J., Montiel, V., and Aldaz, A. (2001). "Lead electrowinning in an acid chloride medium". Journal of Power Sources: 92: 260-266.
- [12] Wang, S., Fang, Z., Wang, Y., and Chen, Y. (2003). "Electrogenerative leaching of galena with ferric chloride". Minerals Engineering, 16 (9): 869-872.
- [13] Balaz, P. (1996). "Influence of solid state properties on ferric chloride leaching of mechanically activated galena". Hydrometallurgy, 40 (3): 359-368.
- [14] Bastl, Z., and Balaz, P. (1993). "X-ray photoelectron spectroscopy study of galena dissolution in ferric chloride media". Journal of Materials Science Letters, 12: 789-790.
- [15] Luengos, M. A., Ambrosio, E., Bohe, A. E., and Pasquevich, D. M. (2000). "Thermal behavior of galena ore in the chloride atmosphere". Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 59: 775-789.
- [16] Dutrizac, J. E., and Chen, T. T. (1990). "The effect of the element sulphur reaction product on the leaching of galena in ferric chloride media". Metallurgical Transactions B, 21: 935-943.

- York, 16-29.
- [31] Biswas, A. K. (1991). "*Frontiers in applied chemistry (2nd edition.)*". Narosa Publishing House, New Delhi, 39.
- [32] Gosh, A., and Ray, H. S. (1991). "*Principle of Extractive Metallurgy (2nd edition)*". Wiley Eastern Ltd. New Delhi, 270.
- [33] Zarei, H., Safari, M., Abdi, M., and Heydari, M. (2015). "*The effects of present ions in lead sulfate halide leaching from zinc leaching plant residual cake*". Proceedings of Pb-Zn, Düsseldorf, Germany, 2: 667-686.
- [28] Mondal, S., Paul, B., Kumar, V., Singh, D. K., and Chakravarty, J. K. (2015). "*Parametric optimization for leaching of cobalt from Sukinda ore of lateritic origin – A Taguchi approach*". Separation and Purification Technology, 156: 827-834.
- [29] Safarzadeh, M. S., Moradkhani, D., Ojaghi Ilkhchi, M., and Hamedani Golshan, N. (2008). "*Determination of the optimum conditions for the leaching of Cd-Ni residues from electrolytic zinc plant using statistical design of experiments*". Separation and Purification Technology, 58: 367-376.
- [30] Habashi, F. (1978). "*Chalcopyrite*". McGraw-Hill, New