

بهینه‌سازی فرایند لیچینگ سیانیدی در کارخانه فرآوری پویازرکان آق‌دره به منظور افزایش بازیابی طلا، نقره و جیوه

محمود عبدالمهدی^{۱*}، سید محمد جواد کلینی^۱ و علی غفاری^۱

^۱ گروه فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۱۱/۱۲ تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۰۶/۱۱

چکیده

فرایند سیانیداسیون از مهم‌ترین و گسترده‌ترین فناوری‌های هیدرومتالورژی مورد استفاده در استخراج طلا و نقره از کانسنگ و کنسانتره آنها است. از متغیرهای مؤثر بر لیچینگ سیانیدی، غلظت سیانید سدیم و اکسیژن محلول، درصد جامد، pH، ابعاد کانسنگ، زمان ماند و سرعت همزدن است. در این نوشتار، تأثیر این متغیرها بر روی بازیابی طلا، نقره و جیوه از کانسنگ خوراک پویازرکان آق‌دره، با استفاده از طراحی آزمایش به روش تاگوچی بررسی و سطوح بهینه آن تعیین شد. در مرحله غربال کردن با آزمایش‌های انجام شده طبق آرایه L16 مشخص شد که میزان متغیرهای مؤثر سیانید سدیم، pH، درصد وزنی جامد در پالپ (Pulp)، محدوده دانه‌بندی کانسنگ و زمان ماند در بازیابی طلا، نقره و جیوه به ترتیب برابر ۹۰۰ g/t، ۱۰، ۴۲٪، ۵۳ μm و ۳۰ ساعت است. در مرحله بهینه‌سازی با آزمایش‌های انجام شده طبق آرایه L18 مشخص شد که مؤثرترین متغیر در بازیابی طلا، محدوده دانه‌بندی کانسنگ و در بازیابی نقره و جیوه، زمان ماند است. در این مرحله شرایط بهینه در بازیابی طلا، نقره و جیوه برای متغیرهای سیانید سدیم، pH، درصد جامد در پالپ، d_{80} کانسنگ و زمان ماند به ترتیب برابر ۱۰۰۰ g/t، ۱۰/۳، ۴۶٪، ۳۷ μm و ۴۰ ساعت به دست آمد. در این شرایط بازیابی طلا، نقره و جیوه به ترتیب برابر ۹۱/۴۲±۱/۰۲، ۵۴/۳۱±۱/۲۴ و ۵۰/۶۶±۱۹/۵۰ درصد است.

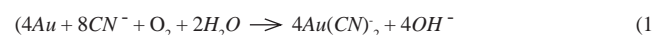
کلید واژه‌ها: بهینه‌سازی لیچینگ، سیانیداسیون، طلا، نقره، جیوه، طراحی آزمایش، تاگوچی

E-mail: minmabd@modares.ac.ir

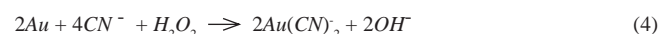
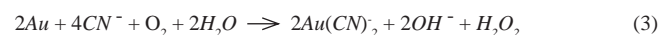
*نویسنده مسئول: محمود عبدالمهدی

۱- مقدمه

فرایند سیانیداسیون هنوز از مهم‌ترین و گسترده‌ترین فن‌آوری‌های هیدرومتالورژی مورد استفاده در استخراج طلا و نقره از کانسنگ و کنسانتره آنها است. رایج بودن استفاده از این روش پس از ۱۰۰ سال، به خاطر سادگی فرایند آن است (Luna & Lapidus, 2000; Sandenbergh & Miller, 2001; Bayat et al., 2003) (Dai et al., 2005; Gamini Senanayake, 2006). اولین کاربرد روش سیانیداسیون در سال ۱۸۸۹ در Crown mine زلاند نو بود (Costa, 1997). (Elsener (1846). نخستین بار بیان کرد که طلا و نقره در محلول سیانیدی و فقط در حضور اکسیژن حل می‌شود (Gupta & Mukherjee, 2000):



واکنش سیانیداسیون در دو مرحله انجام می‌شود (Gupta & Mukherjee, 2000; Senanayake, 2006):



معادله‌های مشابهی را می‌توان برای نقره نیز نوشت. جیوه نیز دقیقاً از شیمی و سازوکار سیانیدی شدن طلا پیروی می‌کند و طبق معادله زیر در حضور سیانید به کمپلکس دی یا تترا- سیانید جیوه خیلی محلول در آب تبدیل می‌شود (Jones & Miller, 2005):



کمپلکس سیانیدی جیوه $Hg(CN)_2$ به‌طور مستقیم با $Au(CN)_2^-$ برای جذب بر روی کربن فعال رقابت می‌کند و می‌تواند حتی جایگزین برخی از یون‌های سیانید طلا بر روی کربن فعال شود (Marsden et al., 1992).

۲- متغیرهای لیچینگ سیانیدی

۲-۱. غلظت سیانید و اکسیژن

با توجه به این که سیانید و اکسیژن برای واکنش انحلال طلا و نقره در فرایند سیانیداسیون مورد نیاز است بنابراین سرعت انحلال به غلظت این دو بستگی خواهد داشت (De Andrade Lima & Hodouin, 2005; شفایی و عبدالمهدی، ۱۳۷۸). می‌توان گفت از میان متغیرهای لیچینگ سیانیدی، غلظت یون سیانید اهمیت زیادی دارد (Gupta & Mukherjee, 2000; Wadsworth & Zhu, 2003).

۲-۲. pH لیچینگ

حفظ شرایط قلیایی محلول لیچینگ برای جلوگیری از تشکیل HCN که گازی بسیار سمی است، مسئله‌ای اساسی است و با افزایش pH، غلظت HCN موجود در محلول کاهش و غلظت CN- افزایش می‌یابد (Marsden et al., 1992; شفایی و عبدالمهدی، ۱۳۷۸). برای کنترل pH محیط واکنش باید از قلیاها مانند آهک، شیر آهک یا سود سوز آور استفاده شود (De Andrade Lima & Hodouin, 2005). در pHهای بالا (بین ۱۲ تا ۱۳) سطح نقره توسط لایه به‌نسبت سفید رنگ CaO_2 پوشیده می‌شود. این لایه مانع از واکنش شده و در نتیجه فرایند لیچینگ را کند می‌سازد (Gupta & Mukherjee, 2000; شفایی و عبدالمهدی، ۱۳۷۸). همچنین در pHهای بیشتر از ۱۲، سرعت انحلال طلا به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (Guzmana et al., 1999).

۲-۳. خردایش و ابعاد ذرات کانسنگ

با خرد کردن سنگ تا حدود چند میکرون، ذرات طلا آزاد شده و سطح آن در معرض سیانید قرار می‌گیرد و بازیابی طلا افزایش می‌یابد. سطح آزاد به توزیع ابعادی ذرات و ویژگی‌های درجه آزادی ذرات کانسنگ بستگی دارد (Marsden et al., 1992).

۲-۴. حرارت

افزایش درجه حرارت باعث افزایش قدرت فعالیت محلول و سرعت نفوذ ترکیبات واکنش دهنده و در نتیجه افزایش انحلال طلا می‌شود. این در حالی است که حلالیت اکسیژن با افزایش حرارت کاهش می‌یابد (Gupta & Mukherjee, 2000; شفایی و عبدالمهدی، ۱۳۷۸).

۲-۵. هم زدن محلول (Pulp)

سرعت انحلال، با افزایش هم زدن محلول لیچینگ افزایش می‌یابد که از ویژگی‌های واکنش‌های با کنترل نفوذی است (Gupta & Mukherjee, 2000; شفایی و عبدالهی، ۱۳۷۸؛ Wadsworth, 2000). البته افزایش بیش از اندازه هم زدن هم مفید نیست (Marsden et al., 1992).

۲-۶. زمان ماند

زمان ماند مورد نیاز برای فرایند سیانیداسیون با توجه به ویژگی‌های کانسنگ از چند ساعت تا چند روز متغیر است. به‌طور معمول لیچینگ در ۴ تا ۱۰ مرحله انجام می‌شود (Marsden et al., 1992).

۲-۷. فعال‌کننده‌ها

حضور حتی مقدار کمی سولفید می‌تواند سرعت فرایند لیچینگ را به‌طور قابل توجهی توسط تشکیل لایه‌ای از سولفید حاوی طلا به‌صورت AuSx بر روی سطح، کاهش دهد (Gupta & Mukherjee, 2000; Dai & Jeffrey, 2006). حضور فلزات سنگین همچون سرب، بیسموت، تالمیم و جیوه در محلول سیانیدی بر روی سیانیداسیون طلا و کاهش اکسیژن تأثیر کاتالیستی دارد (Cerovic, 2005; Wadsworth & Zhu, 2003). افزودن مقداری نقره (I) به محلول سیانیدی سرعت انحلال طلا را افزایش می‌دهد (Wadsworth & Zhu, 2003). فعال‌سازهای آلی نیز سرعت انحلال طلا را افزایش می‌دهند اما در مقایسه با سرب و نقره تأثیر کمتری دارند (Deschenes, 2000).

۳- مواد و روش‌ها

کانسنگ خوراک کارخانه فرآوری طلای پویازکان آق‌دره که در ۳۲ کیلومتری شمال شهرستان تکاب در استان آذربایجان غربی واقع شده است، حاوی فلزات گرانبهای طلا، نقره و جیوه است. در این کارخانه برای بازیابی این فلزات از فرایند سیانیداسیون و کربن در پالپ استفاده می‌شود.

از دپوهای کانسنگ این کارخانه، ۵۶۰ kg نمونه تهیه شد که بزرگ‌ترین ابعاد کانسنگ‌های این دپوها برابر ۱۰ cm است. نمونه‌های تهیه شده توسط سنگ‌شکن فکی و استوانه‌ای تا ابعاد ۱ mm خرد، با هم مخلوط و سپس توسط آسیای گلوله‌ای آزمایشگاهی تا ابعاد مورد نیاز (مندرج در طراحی آزمایش‌ها) خرد شدند. عیار طلا، نقره و جیوه کانسنگ به ترتیب ۳، ۹/۷ و ۱۸۸ گرم بر تن است. آزمایش‌های سیانیداسیون توسط دستگاه هم‌زن و در حجم ۱ لیتر انجام شد. برای تنظیم pH در طول آزمایش‌ها از آهک و برای کاهش آن (در صورت نیاز) از اسید سولفوریک رقیق استفاده شد (Bayat et al., 2003; Deschenes et al., 2005; Curreli et al., 2005). سیانید سدیم استفاده شده ساخت شرکت MERCK بوده و در هر آزمایش پس از تنظیم pH به‌صورت جامد به پالپ اضافه شد. عیار سنجی طلا و نقره پس از استخراج آن در حلال آلی DIBK، توسط دستگاه جذب اتمی PerkinElmer 200 انجام شد. برای عیار سنجی جیوه از دستگاه UV (ultraviolet) استفاده شد. اندازه‌گیری اکسیژن محلول در پالپ (Pulp) توسط دستگاه اکسیژن متر HANNA 100 انجام شد. پس از پایان هر آزمایش پالپ باقی‌مانده فیلتر و فاز محلول برای تعیین عیار فلزات طلا، نقره و جیوه استفاده شد (به خاطر پایین بودن عیار طلا و نقره در نمونه‌های جامد باقیمانده و متفاوت بودن روش عیارسنجی آن، تعیین عیار طلا در نمونه جامد دارای دقت کمتری است، بنابراین از نمونه محلول برای عیارسنجی استفاده می‌شود).

۴- مطالعات کانی‌شناسی

طبق آنالیز XRD انجام شده بر روی نمونه کانسنگ مشخص شد که کانی‌های تشکیل‌دهنده آن، کوآرتز، کلسیت، باریت، مسکوویت، کائولینیت و جاروسیت

هستند. همچنین نتیجه حاصل از آنالیز نیمه‌کمی XRF بر روی نمونه کانسنگ در جدول ۱ آورده شده است. مطالعات کانی‌شناسی بیانگر این است که درجه آزادی طلا و نقره شبیه به هم و $30-20 \mu\text{m}$ است و میزبان طلا، کانی‌های اکسیدی و هیدروکسیدی آهن (گوتیت) و منگنز، کانی‌های سیلیکاتی و در برخی موارد آرسناتی و سولفیدی است. درجه آزادی جیوه (سینابر) بسیار کوچک است و در حد تشخیص میکروسکوپ (ابعاد بزرگ‌تر از $10 \mu\text{m}$) نیست. در شکل ۱ تصاویر میکروسکوپی طلا و نقره در مقاطع صیقلی تهیه شده از کانسنگ آورده شده است.

۵- نتایج و بحث

۵-۱. غربال کردن متغیرها

همان‌گونه که بیان شد متغیرهای اصلی مؤثر در لیچینگ سیانیدی فلزات طلا، نقره و جیوه، سیانید سدیم، اکسیژن، pH، ابعاد و دانه‌بندی کانسنگ، درصد جامد در پالپ و زمان ماند هستند. مقادیر عملیاتی این متغیرها در کارخانه فرآوری پویازکان در جدول ۲ ارائه شده است. بازیابی طلا، نقره و جیوه در این کارخانه به ترتیب $86/50 \pm 1/5$ ، $37/50 \pm 2/50$ و $14/50 \pm 1/50$ درصد است که هدف بررسی، افزایش این مقادیر با انتخاب میزان مناسب از متغیرهای مختلف است.

با توجه به مقادیر متغیرهای اصلی در کارخانه و نیز پژوهش‌های انجام شده در این زمینه (Marsden et al., 1992; Brwner, 1995; Luna & Lapidus, 2000; Sandenbergh & Miller, 2001; Bayat et al., 2003; Deschenes et al., 2005) عوامل مؤثر بر لیچینگ سیانیدی طلا، نقره و جیوه، شامل سیانید سدیم، pH، درصد جامد در پالپ، d_p کانسنگ، زمان ماند و دور هم‌زن در دو سطح در نظر گرفته (جدول ۲) و تأثیر آنها بر روی بازیابی به روش آماری (Roy, 1995) بررسی شد. تأثیر پنج اثر متقابل سیانید سدیم و pH، سیانید سدیم و درصد جامد، سیانید سدیم و d_p ، سیانید سدیم و زمان ماند و سیانید سدیم و دور هم‌زن نیز در نظر گرفته شد. به دلیل تأثیر ناچیز سیانید سدیم بر روی pH پالپ، این دو متغیر نسبت به هم مستقل در نظر گرفته می‌شوند. برای متغیر غلظت اکسیژن محلول در پالپ (طبق اندازه‌گیری توسط دستگاه اکسیژن‌متر) مقدار میانگین 6 mg/l به دست آمد که این مقدار با توجه به نحوه هم زدن پالپ، سرعت هم‌زن، کم بودن حجم آزمایش‌ها و حل شدن اکسیژن در هنگام هم زدن پالپ در محلول در مقیاس آزمایشگاهی است، در صورتی که در مقیاس صنعتی با توجه به بالا بودن حجم تانک‌ها و نحوه هم زدن آن (با سرعت کم) افزودن اکسیژن (در تانک‌های نهایی هوا دمیده می‌شود) به تانک ضروری است. با توجه به تعداد عوامل مؤثر (۶ عامل اصلی و ۵ اثر متقابل) و تعداد سطح‌های این عوامل، آرایه مناسب برای بررسی تأثیر متغیرها، آرایه L_{16} تشخیص داده شد. با توجه به آرایه طرح‌ریزی شده، آزمایش‌های لازم انجام شد و محلول‌های حاصل از آزمایش‌ها برای عناصر طلا، نقره و جیوه عیار سنجی شد. جدول ۳، سطوح عوامل و نتایج مربوط به بازیابی این عناصر را در این آزمایش‌ها نشان می‌دهد. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها توسط روش تجزیه واریانس (ANOVA) در محیط Excel تحلیل شد که نتایج آن در جدول‌های ۵ تا ۱۰، آمده است.

پس از مقایسه F استاندارد (F استاندارد با درجه آزادی $V_1 = 1$ و $V_2 = 10$ در سطح اعتماد ۹۰٪ برابر $3/285$ است) سطح اعتماد ۹۰٪ در نظر گرفته شد تا در این مرحله متغیرهای کمتری Pool و حذف شوند و در مرحله بهینه‌سازی تعداد متغیرهای بیشتری مورد بررسی قرار گیرند. با F محاسبه شده در جدول ۴ برای هر عامل، می‌توان نتیجه گرفت که متغیرهای معنی‌دار در بازیابی طلا، نقره و جیوه، سیانید سدیم، pH، درصد جامد، d_p کانسنگ و زمان ماند هستند و متغیر دور هم‌زن و

که از میان این متغیرها، بیشترین درصد تأثیر مربوط به زمان ماند است و متغیر درصد جامد در پالپ کمترین تأثیر را دارد. متغیر d_{90} به دلیل کمتر بودن نسبت F آن در برابر F استاندارد محاسبه شده، از میان متغیرهای مؤثر در بازیابی جیوه $Pool$ شده است (جدول ۱۱)، در حالی که این متغیر در بازیابی طلا، مؤثرترین متغیر و در بازیابی نقره از متغیرهای معنی دار است و نمی توان آن را از میان متغیرهای لیچینگ سیانیدی حذف کرد. در نهایت با توجه به درصد تأثیر متغیرهای انتخابی بر روی بازیابی طلا، نقره و جیوه مشاهده می شود که متغیرهای d_{90} (در بازیابی طلا) و زمان ماند (در بازیابی نقره و جیوه) بیشترین درصد تأثیر را در بازیابی این فلزات دارند و با توجه به مؤثر بودن همه متغیرها، نمی توان هیچ متغیری را از بین متغیرهای انتخابی مؤثر در لیچینگ سیانیدی طلا، نقره و جیوه حذف کرد.

پس از تعیین مقدار بازیابی میانگین طلا، نقره و جیوه برای سطوح عوامل مؤثر و نیز Pooling متغیرهای غیر مؤثر در بازیابی، سطوح بهینه متغیرهای مؤثر در بازیابی این فلزات تعیین شد (جدول ۱۲). سطوح متغیرهای بهینه برای هر سه فلز بجز متغیر pH یکسان است. pH بهینه در بازیابی طلا و نقره در سطح 10.3 و در بازیابی جیوه در سطح 9.8 است. بنابراین با توجه به این که آزمایشی با سطح متغیرهای بهینه به دست آمده در بین آزمایش های $L18$ وجود ندارد، دو آزمایش در شرایط بهینه و با $pH=9.8$ و $pH=10.3$ انجام شد. مقادیر بازیابی های پیش بینی شده در شرایط بهینه متغیرها، پس از Pooling، در سطح اعتماد 90% محاسبه شد. در جدول ۱۳، مقادیر بازیابی پیش بینی شده و نتایج دو آزمایش انجام شده در شرایط بهینه متغیرها و انحراف معیار استاندارد آن آورده شده است. با مقایسه بازیابی به دست آمده از این دو آزمایش و بازیابی پیش بینی شده مشاهده می شود که در شرایط بهینه انتخابی برای هر فلز، بازیابی آن فلز بیشترین مقدار را دارد و همچنین بازیابی به دست آمده در محدوده اطمینان بازیابی پیش بینی شده است.

با توجه به این که با کاهش pH از 10.3 به 9.8 ، بازیابی جیوه افزایش و بازیابی طلا و نقره کاهش می یابد، به دلیل ارزش خیلی بالای طلا و نقره در برابر جیوه، سطح متغیر pH برابر 10.3 انتخاب می شود و با توجه به نمودار تأثیر pH بر روی بازیابی طلا (شکل ۵)، کاهش pH از 10.3 به 9.8 تأثیر کمتری نسبت به افزایش آن از 10.3 به 10.8 بر بازیابی طلا دارد زیرا شیب نمودار در پیش از 10.3 کمتر از پس از آن و در بازیابی نقره برعکس است و شیب نمودار در پیش از 10.3 بیشتر از پس از آن است. در نتیجه به دلیل ارزش بالای طلا، بهتر است pH در 10.3 تنظیم و سعی شود از این مقدار بالاتر نرود، زیرا در pH های بالاتر از این مقدار، بازیابی هر سه فلز کاهش می یابد.

۳-۵. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و خط تولید کارخانه

در جدول ۱۴، شرایط فعلی خط تولید کارخانه و شرایط بهینه به دست آمده در این پژوهش ارائه شده است. با توجه به جدول ۱۴، مشاهده می شود که متغیرهای سیانید سدیم، درصد جامد در پالپ و زمان ماند در مقایسه با شرایط فعلی کارخانه به ترتیب به مقادیر 1000 g/t ، 46% و 40 ساعت افزایش و متغیرهای pH محلول و d_{90} کانسنگ به ترتیب به مقادیر 10.3 و $37\ \mu\text{m}$ کاهش یافته اند. همچنین در جدول ۱۴، بازیابی حاصل از این پژوهش و فرایند لیچینگ سیانیدی خط تولید کارخانه با یکدیگر مقایسه شده است و مشاهده می شود که بازیابی به دست آمده در پژوهش نسبت به بازیابی خط تولید برای طلا، نقره و جیوه به ترتیب $4/92 \pm 2/52$ ، $3/74 \pm 1/81$ و $2/16 \pm 5/00$ درصد افزایش یافته است.

۶- نتیجه گیری

با توجه به آزمایش های انجام شده بر روی کانسنگ طلای خوراک کارخانه پویازرکان آق دره نتایج زیر به دست آمد:

- مطالعات میکروسکوپی نشان داد که درجه آزادی طلا و نقره در ابعاد یکسان و

اثرات متقابل انتخاب شده به دلیل کمتر بودن نسبت F آنها از F استاندارد به دست آمده از میان متغیرهای انتخابی، $Pool$ و حذف شدند که نتایج جدول ANOVA برای هر عنصر پس از Pooling در جدول ۵ ارائه شده است.

شکل های ۲ تا ۴، تأثیر متغیرهای اصلی را به ترتیب بر روی بازیابی طلا، نقره و جیوه نشان می دهد. با توجه به نمودارهای ارائه شده، با افزایش سیانید سدیم، درصد جامد، زمان ماند و دور هم زن از سطح ۱ به سطح ۲، بازیابی افزایش می یابد. در حالی که با افزایش d_{90} کانسنگ و pH از سطح ۱ به ۲، بازیابی کاهش می یابد. در بررسی اثر متقابل عوامل انتخابی، مشاهده شد که در بازیابی طلا، نقره و جیوه فقط میان دو عامل سیانید سدیم و دور هم زن اثر متقابل وجود دارد.

با توجه به شرایط بهینه به دست آمده در جدول ۶ و آرایه $L16$ ارائه شده در جدول ۳، ملاحظه می شود که آزمایشی با شرایط بالا در مجموعه $L16$ انجام نشده است. بنابراین، با توجه به عوامل مؤثر آشکار، بیشینه بازیابی و دامنه اطمینان پاسخ، در مقیاس دسی بل و با شرایط بهینه به دست آمده محاسبه می شود که این مقدار با سطح اعتماد 90% در جدول ۷ آمده است. خطای محاسبه شده در بازیابی آزمایش های انجام شده با توجه به خطاهای آنالیز و سایر خطاهای دستگاه های اندازه گیری مؤثر در محاسبه بازیابی، تعیین شده است.

۵-۲. مرحله بهینه سازی

در این مرحله، برای تعیین شرایط بیشینه بازیابی لیچینگ طلا، نقره و جیوه به روش تاگوچی، میزان متغیرهای مؤثر به دست آمده از مرحله غربال کردن در سه سطح طبق جدول ۸ تعیین شد و با توجه به تأثیر اندک دور هم زن بر روی بازیابی مقدار آن بر روی 200 rpm (سطح اول) ثابت نگاه داشته شد. با توجه به تعداد متغیرها، آرایه مناسب برای بهینه سازی فرایند لیچینگ سیانیدی، آرایه $L18$ است. با توجه به آرایه طرح ریزی شده، آزمایش های لازم انجام شد و محلول های حاصل از آزمایش ها برای عناصر طلا، نقره و جیوه عیارسنجی شد. جدول ۹، سطوح عوامل و نتایج مربوط به بازیابی این عناصر را در این آزمایش ها نشان می دهد. نتایج حاصل از این آزمایش ها نیز همانند مرحله پیش تحلیل شد که نتایج آن در جدول ۱۰ آمده است.

در شکل های ۵، ۶ و ۷ به ترتیب تأثیر عوامل اصلی بر روی بازیابی طلا، نقره و جیوه ارائه شده است. این نمودارها بر اساس محاسبه میانگین بازیابی آزمایش های آرایه $L18$ که در جدول ۹ آورده شده است، برای هر متغیر رسم شده است.

در مورد تعیین متغیرهای معنی دار در بازیابی طلا، پس از مقایسه F استاندارد (F استاندارد با درجه آزادی $V_1=2$ و $V_2=7$ در سطح اعتماد 90% برابر $3/2574$ است) با F محاسبه شده در جدول ۱۰ برای هر عامل، می توان نتیجه گرفت که متغیرهای معنی دار در بازیابی طلا، سیانید سدیم، درصد جامد در پالپ، d_{90} کانسنگ و زمان ماند هستند که از میان این متغیرها، بیشترین درصد تأثیر، مربوط به d_{90} کانسنگ است و متغیر سیانید سدیم با توجه به سطوح انتخابی آن، کمترین تأثیر را دارد. متغیر pH به دلیل کمتر بودن نسبت F آن از F استاندارد محاسبه شده، از میان متغیرهای مؤثر در بازیابی طلا $Pool$ و حذف شده است (جدول ۱۱)، در حالی که این متغیر در بازیابی نقره و جیوه از متغیرهای معنی دار است و نمی توان آن را از میان متغیرهای لیچینگ سیانیدی حذف کرد.

در مورد تعیین متغیرهای معنی دار در بازیابی نقره، پس از مقایسه F استاندارد با F محاسبه شده در جدول ۱۰ برای هر عامل، می توان نتیجه گرفت که تمامی متغیرهای انتخابی، معنی دار هستند که از میان این متغیرها، بیشترین درصد تأثیر مربوط به زمان ماند و کمترین تأثیر مربوط به متغیر درصد جامد در پالپ در محدوده مورد مطالعه است.

در مورد تعیین متغیرهای معنی دار در بازیابی جیوه، پس از مقایسه F استاندارد با F محاسبه شده در جدول ۱۰ برای هر عامل، می توان نتیجه گرفت که، متغیرهای سیانید سدیم، pH ، درصد جامد در پالپ و زمان ماند، در بازیابی جیوه معنی دار هستند

شده و در نتیجه فرایند لیچینگ را کند می‌سازد (Gupta & Mukherjee, 2000) و شفایی و عبدالمهی، (۱۳۷۸). همچنین بازیابی نقره با کاهش d_{L} کانسنگ افزایش می‌یابد. در بازیابی لیچینگ جیوه مشخص شد که بیشترین درصد تأثیر مربوط به زمان ماند است. متغیر محدوده دانه‌بندی کانسنگ کمترین درصد تأثیر را دارد که این امر به خاطر سولفیدی بودن کانی آن و پایین‌تر بودن درجه آزادی آن ($< 10 \mu\text{m}$) از محدوده دانه‌بندی مورد استفاده در این آزمایش‌ها (ریزترین ابعاد مورد استفاده $d_{\text{L}} = 37 \mu\text{m}$ می‌باشد) است. همچنین بازیابی جیوه با افزایش سیانید سدیم، درصد جامد در محلول و زمان ماند افزایش می‌یابد و با افزایش d_{L} کانسنگ کاهش یافته و در سطح دوم و سوم آن تقریباً ثابت است. همچنین بازیابی جیوه با کاهش pH افزایش می‌یابد. سطوح بهینه عوامل مؤثر در بازیابی طلا، نقره و جیوه برای عوامل سیانید سدیم، pH، درصد جامد در پالپ، d_{L} و زمان ماند به ترتیب برابر 1000 g/t کانسنگ، $10/3$ ، 46% ، $37 \mu\text{m}$ و 40 ساعت می‌باشد.

بازیابی به‌دست آمده در شرایط بهینه این مرحله برای طلا، نقره و جیوه به ترتیب برابر $91/42 \pm 1/02$ ، $54/31 \pm 1/24$ و $19/50 \pm 0/66$ درصد است که میزان افزایش بازیابی به‌دست آمده در شرایط بهینه برای طلا، نقره و جیوه نسبت به نتایج کارخانه به ترتیب $4/92 \pm 2/52$ ، $4/92 \pm 2/52$ و $16/81 \pm 2/16$ و $5/00 \pm 2/16$ درصد است.

سپاسگزاری

لازم است از دانشگاه تربیت مدرس و شرکت فرآوری پویازرکان آق‌دره به خاطر فراهم کردن این فرصت پژوهشی تشکر و سپاسگزاری شود.

جدول ۲- سطوح انتخابی برای متغیرهای اصلی مؤثر بر بازیابی طلا، نقره و جیوه در آرایه L16 و مقدار آن در خط تولید.

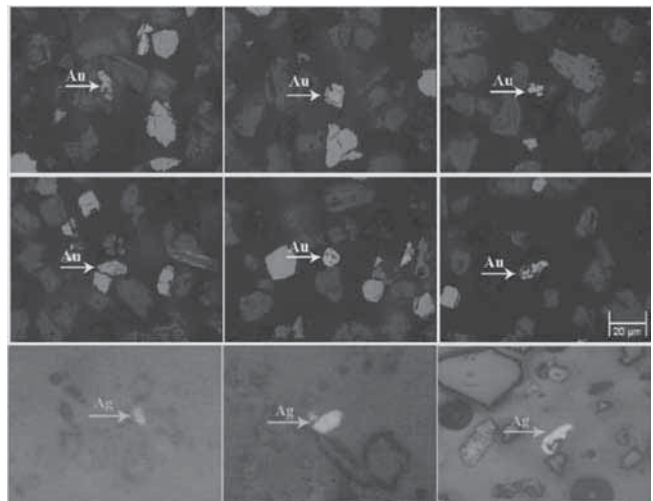
متغیر اصلی	واحد	علامت اختصاری	سطح اول	سطح دوم	مقدار میانگین در کارخانه
سیانید سدیم	گرم بر تن کانسنگ	CN	۷۰۰	۹۰۰	۶۵۰
pH پالپ	---	pH	۱۰	۱۱	۱۰/۲۵
درصد جامد در پالپ	%	S	۳۴	۴۲	۳۸
d_{L} کانسنگ	میکرومتر	d_{L}	۵۳	۷۵	۶۵
زمان ماند	ساعت	T	۲۰	۳۰	۳۰
دور همزن	دور بر دقیقه	RPM	۲۰۰	۳۰۰	---
اکسیژن محلول	میلی‌گرم بر لیتر	Oxy	---	---	۵

برابر $30-20 \mu\text{m}$ است و درجه آزادی کانی‌های جیوه در ابعادی بسیار ریز و کمتر از $10 \mu\text{m}$ است.

- آزمایش‌های مرحله غربال‌سازی نشان داد که متغیرهای سیانید سدیم، pH، درصد جامد در پالپ، d_{L} کانسنگ و زمان ماند در بازیابی طلا، نقره و جیوه، معنی‌دار هستند. بازیابی طلا، نقره و جیوه با افزایش سیانید سدیم، درصد جامد در پالپ، زمان ماند و دور هم‌زن و با کاهش pH و d_{L} کانسنگ، افزایش می‌یابد. میزان عوامل بهینه به‌دست آمده در این مرحله برای بازیابی طلا، نقره و جیوه برای عوامل سیانید سدیم، pH، درصد جامد در پالپ، d_{L} و زمان ماند به ترتیب 900 g/t کانسنگ، 10 ، 42% ، $37 \mu\text{m}$ و 30 ساعت است که بازیابی به‌دست آمده در این شرایط برای طلا، نقره و جیوه به ترتیب برابر $89/25$ ، $47/85$ و $17/18$ درصد است.

- آزمایش‌های مرحله بهینه‌سازی نشان داد که در بازیابی لیچینگ طلا بیشترین درصد تأثیر مربوط به d_{L} کانسنگ و کمترین درصد تأثیر مربوط به متغیر pH است. همچنین بازیابی طلا با افزایش سیانید سدیم، درصد جامد در پالپ و زمان ماند افزایش و با افزایش pH ابتدا افزایش و در سطح سوم آن کاهش می‌یابد و به کم‌تر از مقدار بازیابی در سطح اول می‌رسد. همچنین بازیابی طلا با کاهش d_{L} کانسنگ افزایش می‌یابد زیرا سرعت انحلال معمولاً با کاهش ابعاد ذرات به دلیل افزایش سطح طلای آزاد و یا ذرات آزاد طلا، افزایش می‌یابد.

در بازیابی لیچینگ نقره مشخص شد که بیشترین درصد تأثیر مربوط به زمان ماند است و متغیر درصد جامد در پالپ کمترین درصد تأثیر را دارد. همچنین بازیابی نقره با افزایش سیانید سدیم، درصد جامد در پالپ و زمان ماند افزایش و با افزایش pH ابتدا افزایش می‌یابد و در سطح دوم و سوم آن تقریباً ثابت است. زیرا در pH‌های بالا، سطح نقره توسط لایه به‌نسبت سفید رنگ CaO_2 پوشیده می‌شود. که این لایه مانع از واکنش



شکل ۱- تصاویر میکروسکوپی ذرات طلا و نقره در مقاطع صیقلی از کانسنگ.

جدول ۱- نتایج تجزیه XRF نیمه کمی نمونه کانسنگ.

بر حسب درصد وزنی									
Fe_2O_3	MnO	TiO_2	CaO	K_2O	SO_3	P_2O_5	SiO_2	Al_2O_3	
۱۰/۲۶	۱/۶۱	۰/۴۱	۱۱/۵۲	۱/۸۱	۱/۸۰	$< 0/01$	۴۹/۵۹	۱۱/۳۸	
L.O.I	MgO	Cl	PbO	BaO	Sb_2O_3	SrO	As_2O_3	ZnO	
۴/۸۵	$< 0/01$	۰/۱۰	۰/۷۵	۲/۴۳	۰/۳۰	۰/۱۰	۲/۵۳	۰/۵۴	

جدول ۳- آرایه L16 طراحی شده برای غربال کردن متغیرها و بازیابی طلا، نقره و جیوه در هر آزمایش.

آزمایش	CN	pH	CN × pH	S	CN × S	CN × S	d_{50}	CN × d_{50}	T	CN × T	RPM	بازیابی طلا (%)	بازیابی نقره (%)	بازیابی جیوه (%)
۱	۷۰۰	۱۰	۱	۳۴	۱	۱	۵۳	۱	۲۰	۱	۲۰۰	۸۶/۲۴	۴۴/۰۷	۱۳/۳۱
۲	۷۰۰	۱۰	۱	۳۴	۱	۱	۵۳	۱	۳۰	۲	۳۰۰	۸۷/۳۹	۴۵/۵۴	۱۳/۸۰
۳	۷۰۰	۱۰	۱	۴۲	۱	۲	۷۵	۲	۲۰	۱	۳۰۰	۸۴/۴۸	۴۳/۵۹	۱۳/۸۳
۴	۷۰۰	۱۰	۱	۴۲	۱	۲	۷۵	۲	۳۰	۲	۲۰۰	۸۶/۵۱	۴۳/۴۵	۱۴/۴۹
۵	۷۰۰	۱۱	۲	۳۴	۲	۱	۷۵	۲	۳۰	۲	۲۰۰	۸۳/۳۹	۴۲/۰۰	۱۲/۰۰
۶	۷۰۰	۱۱	۲	۳۴	۲	۱	۷۵	۲	۲۰	۱	۳۰۰	۸۲/۸۱	۴۲/۰۰	۱۱/۵۰
۷	۷۰۰	۱۱	۲	۴۲	۲	۲	۵۳	۱	۳۰	۲	۳۰۰	۸۶/۱۱	۴۵/۰۹	۱۳/۱۲
۸	۷۰۰	۱۱	۲	۴۲	۲	۲	۵۳	۱	۲۰	۱	۲۰۰	۸۴/۸۹	۴۳/۶۳	۱۲/۷۱
۹	۹۰۰	۱۰	۲	۳۴	۲	۲	۷۵	۱	۲۰	۱	۲۰۰	۸۵/۸۷	۴۳/۵۶	۱۵/۹۶
۱۰	۹۰۰	۱۰	۲	۳۴	۲	۲	۷۵	۱	۳۰	۲	۳۰۰	۸۳/۹۶	۴۲/۲۰	۱۳/۷۱
۱۱	۹۰۰	۱۰	۲	۴۲	۲	۱	۵۳	۲	۲۰	۱	۳۰۰	۸۹/۳۶	۴۷/۱۳	۱۶/۰۰
۱۲	۹۰۰	۱۰	۲	۴۲	۲	۱	۵۳	۲	۳۰	۲	۲۰۰	۸۸/۱۴	۴۶/۵۵	۱۶/۰۰
۱۳	۹۰۰	۱۱	۱	۳۴	۱	۲	۵۳	۲	۳۰	۲	۲۰۰	۸۵/۶۷	۴۴/۰۰	۱۳/۹۷
۱۴	۹۰۰	۱۱	۱	۳۴	۱	۲	۵۳	۲	۲۰	۱	۳۰۰	۸۶/۸۱	۴۶/۶۱	۱۵/۱۱
۱۵	۹۰۰	۱۱	۱	۴۲	۱	۱	۷۵	۱	۳۰	۲	۳۰۰	۸۳/۲۶	۴۳/۰۶	۱۳/۵۴
۱۶	۹۰۰	۱۱	۱	۴۲	۱	۱	۷۵	۱	۲۰	۱	۲۰۰	۸۷/۳۲	۴۴/۷۵	۱۴/۵۵

جدول ۴- نتایج تحلیل واریانس برای مقادیر بازیابی طلا، نقره و جیوه.

متغیر	طلا		نقره		جیوه	
	نسبت واریانس $F=(V/V_e)$	درصد تأثیر $100 \times (S'/S_p)$	نسبت واریانس $F=(V/V_e)$	درصد تأثیر $100 \times (S'/S_p)$	نسبت واریانس $F=(V/V_e)$	درصد تأثیر $100 \times (S'/S_p)$
سیانید سدیم	۹/۱۷	۷/۵۳	۱۷/۰۵	۱۰/۷۰	۶۸/۵۳	۴۴/۹۹
pH پالپ	۱۷/۱۹	۱۴/۹۳	۵/۸۱	۳/۲۰	۳۸/۹۲	۲۵/۵۶
سیانید سدیم × pH	۱/۴۹	۰/۴۵	۲/۰۰	۰/۶۷	۰/۸۹	۰/۰۷
درصد جامد در پالپ	۸/۶۴	۷/۰۵	۱۲/۵۵	۷/۷۰	۸/۲۲	۴/۸۱
سیانید سدیم × درصد جامد	۱/۸۹	۰/۸۲	۲/۰۹	۰/۷۳	۱/۶۶	۰/۴۴
سیانید سدیم × d_{50}	۰/۷۱	۰/۲۷	۲/۸۲	۱/۲۱	۱/۶۶	۰/۴۴
d_{50} کانستنگ	۳۸/۵۷	۳۴/۶۴	۷۷/۰۷	۵۰/۷۱	۶/۸۱	۳/۸۷
سیانید سدیم × زمان ماند	۰/۶۳	۰/۲۹	۲/۸۱	۱/۲۱	۱/۸۷	۰/۵۸
زمان ماند	۱۰/۷۲	۱۹/۷۴	۱۹/۳۱	۱۲/۲۱	۱۴/۴۶	۸/۹۶
سیانید سدیم × دور همزن	۰/۸۴	۰/۶۹	۲/۴۶	۰/۹۷	۱/۹۱	۰/۶۱
دور همزن	۰/۶۳	۰/۲۹	۲/۰۵	۰/۷۰	۱/۱۸	۰/۱۲
خطا (e)	---	۱۳/۸۳	---	۱۰/۰۰	---	۹/۹۹
جمع	---	۱۰۰	---	۱۰۰	---	۱۰۰

جدول ۵- نتایج تحلیل واریانس برای مقادیر بازیابی طلا، نقره و جیوه بعد از pooling.

جیوه		نقره		طلا		فلز
درصد تأثیر $100 \times (S'/S_T)$	نسبت واریانس $F=(V/V_e)$	درصد تأثیر $100 \times (S'/S_T)$	نسبت واریانس $F=(V/V_e)$	درصد تأثیر $100 \times (S'/S_T)$	نسبت واریانس $F=(V/V_e)$	متغیر
۴۴/۷۷	۵۲/۰۱	۱۰/۱۵	۹/۳۵	۷/۳۰	۷/۳۵	سیانید سدیم
۲۵/۰۵	۲۹/۵۴	۲/۶۶	۳/۱۹	۱۴/۷۰	۱۳/۷۹	pH پالپ
POOLED	POOLED	POOLED	POOLED	POOLED	POOLED	سیانید سدیم × pH
۴/۶۰	۶/۲۴	۷/۱۵	۶/۸۸	۶/۸۲	۳/۵۴	درصد جامد در پالپ
POOLED	POOLED	POOLED	POOLED	POOLED	POOLED	سیانید سدیم × درصد جامد
POOLED	POOLED	POOLED	POOLED	POOLED	POOLED	سیانید سدیم × d_{80}
۳/۶۶	۵/۱۷	۵۰/۱۶	۴۲/۲۸	۳۴/۴۲	۳۰/۹۳	d_{80} کانسنگ
POOLED	POOLED	POOLED	POOLED	POOLED	POOLED	سیانید سدیم × زمان ماند
۸/۷۵	۱۰/۹۷	۱۱/۶۶	۱۰/۵۹	۱۹/۵۱	۱۷/۹۷	زمان ماند
POOLED	POOLED	POOLED	POOLED	POOLED	POOLED	سیانید سدیم × دور همزن
POOLED	POOLED	POOLED	POOLED	POOLED	POOLED	دور همزن
۱۳/۱۷	---	۱۸/۲۳	---	۱۷/۲۵	---	خطا (e)
۱۰۰		۱۰۰		۱۰۰		جمع

جدول ۶- سطوح مؤثر متغیرها.

جدول ۷- بازیابی پیش‌بینی شده و بازیابی آزمایش‌های انجام شده در شرایط به‌دست آمده.

بازیابی پیش‌بینی شده (%)	بازیابی آزمایش انجام شده در شرایط بهینه (%)	فلز
۸۹/۱۶ ± ۰/۷۹	۸۹/۲۵ ± ۱/۱۲	طلا
۴۷/۲۰ ± ۰/۶۵	۴۷/۸۵ ± ۱/۱۶	نقره
۱۶/۶۷ ± ۰/۵۳	۱۷/۱۸ ± ۰/۷۶	جیوه

مقدار متغیر	شماره سطح	متغیر
۹۰۰ g/ton	۲	CN
۱۰	۱	pH
%۴۲	۲	S
۵۳ μm	۱	d_{80}
۳۰ ساعت	۲	T

جدول ۸- سطوح انتخابی برای متغیرهای اصلی مؤثر بر بازیابی طلا، نقره و جیوه در آرایه L18.

سطح سوم	سطح دوم	سطح اول	علامت اختصاری	واحد	متغیر اصلی
۱۰۰۰	۸۰۰	۶۰۰	CN	گرم بر تن کانسنگ	سیانید سدیم
۱۰/۸	۱۰/۳	۹/۸	pH	-	pH پالپ
۴۶	۴۰	۳۴	S	%	درصد جامد در پالپ
۶۹	۵۳	۳۷	d_{80}	میکرومتر	d_{80} کانسنگ
۴۰	۳۰	۲۰	T	ساعت	زمان ماند

جدول ۹- آرایه L18 طراحی شده برای تعیین مقادیر بهینه و بازیابی طلا، نقره و جیوه در هر آزمایش.

آزمایش	CN	pH	S	d _{۸۰}	T	بازیابی طلا (%)	بازیابی نقره (%)	بازیابی جیوه (%)
۱	۶۰۰	۹/۸	۳۴	۳۷	۲۰	۸۶/۸۱	۵۰/۴۵	۱۱/۶۴
۲	۶۰۰	۱۰/۳	۴۰	۵۳	۳۰	۸۶/۸۶	۵۱/۰۰	۱۳/۱۹
۳	۶۰۰	۱۰/۸	۴۶	۶۹	۴۰	۸۷/۲۸	۵۲/۹۱	۱۳/۹۸
۴	۸۰۰	۹/۸	۳۴	۵۳	۲۰	۸۵/۶۷	۴۹/۸۱	۱۴/۵۲
۵	۸۰۰	۱۰/۳	۴۰	۶۹	۴۰	۸۷/۷۴	۵۱/۸۲	۱۵/۹۷
۶	۸۰۰	۱۰/۸	۴۶	۳۷	۲۰	۸۸/۶۶	۵۱/۸۹	۱۲/۶۵
۷	۱۰۰۰	۹/۸	۴۰	۳۷	۴۰	۹۰/۳۸	۵۲/۶۳	۲۲/۰۹
۸	۱۰۰۰	۱۰/۳	۴۶	۵۳	۲۰	۸۹/۰۰	۵۲/۰۲	۱۴/۷۸
۹	۱۰۰۰	۱۰/۸	۳۴	۶۹	۳۰	۸۳/۹۶	۵۱/۵۰	۱۳/۷۰
۱۰	۶۰۰	۹/۸	۴۶	۶۹	۳۰	۸۴/۸۶	۴۹/۴۷	۱۵/۴۷
۱۱	۶۰۰	۱۰/۳	۳۴	۳۷	۴۰	۸۶/۸۱	۵۲/۷۷	۱۶/۰۰
۱۲	۶۰۰	۱۰/۸	۴۰	۵۳	۲۰	۸۴/۲۱	۵۰/۰۲	۱۰/۰۳
۱۳	۸۰۰	۹/۸	۴۰	۶۹	۲۰	۸۵/۰۹	۴۸/۸۸	۱۵/۲۰
۱۴	۸۰۰	۱۰/۳	۴۶	۳۷	۳۰	۹۱/۰۷	۵۲/۷۸	۱۶/۶۶
۱۵	۸۰۰	۱۰/۸	۳۴	۵۳	۴۰	۸۵/۶۷	۵۱/۲۹	۱۴/۴۰
۱۶	۱۰۰۰	۹/۸	۴۶	۵۳	۴۰	۸۹/۶۹	۵۳/۰۴	۲۱/۶۱
۱۷	۱۰۰۰	۱۰/۳	۳۴	۶۹	۲۰	۸۳/۹۶	۵۰/۲۴	۱۴/۳۶
۱۸	۱۰۰۰	۱۰/۸	۴۰	۳۷	۳۰	۸۸/۱۸	۵۲/۹۶	۱۴/۲۳

جدول ۱۰- نتایج تحلیل واریانس برای مقادیر بازیابی طلا، نقره و جیوه.

متغیر	طلا		نقره		جیوه	
	نسبت واریانس $F=(V/V_e)$	درصد تأثیر $۱۰۰ \times (S^2/S_T)$	نسبت واریانس $F=(V/V_e)$	درصد تأثیر $۱۰۰ \times (S^2/S_T)$	نسبت واریانس $F=(V/V_e)$	درصد تأثیر $۱۰۰ \times (S^2/S_T)$
سیانید سدیم	۴/۱۵	۶/۲۲	۷/۰۸	۱۰/۶۹	۱۶/۷۷	۲۲/۲۸
pH پالپ	۲/۹۳	۳/۸۰	۸/۳۱	۱۲/۸۴	۱۸/۵۵	۲۴/۸۰
درصد جامد در پالپ	۱۶/۱۳	۲۹/۸۲	۶/۳۴	۹/۳۸	۴/۴۳	۴/۸۵
d _{۸۰} کانسنگ	۱۸/۷۵	۳۴/۹۹	۱۲/۵۱	۲۰/۲۲	۱/۱۶	۰/۲۲
زمان ماند	۵/۲۷	۸/۴۲	۱۹/۱۸	۳۱/۹۴	۲۶/۳۶	۳۵/۸۳
خطا (e)	---	۱۶/۷۵	---	۱۴/۹۴	---	۱۲/۰۱
جمع		۱۰۰		۱۰۰		۱۰۰

جدول ۱۲- سطوح بهینه متغیرهای مؤثر در بازیابی طلا، نقره و جیوه.

متغیر	طلا و نقره	جیوه
مقدار متغیر	مقدار متغیر	مقدار متغیر
CN	۱۰۰۰g/ton	۱۰۰۰g/ton
pH	۱۰/۳	۹/۸
S	%۴۶	%۴۶
d ₈₀	۳۷μm	۳۷μm
T	۴۰ ساعت	۴۰ ساعت

جدول ۱۴- مقایسه بازیابی فعلی کارخانه و بازیابی به‌دست آمده در این پژوهش.

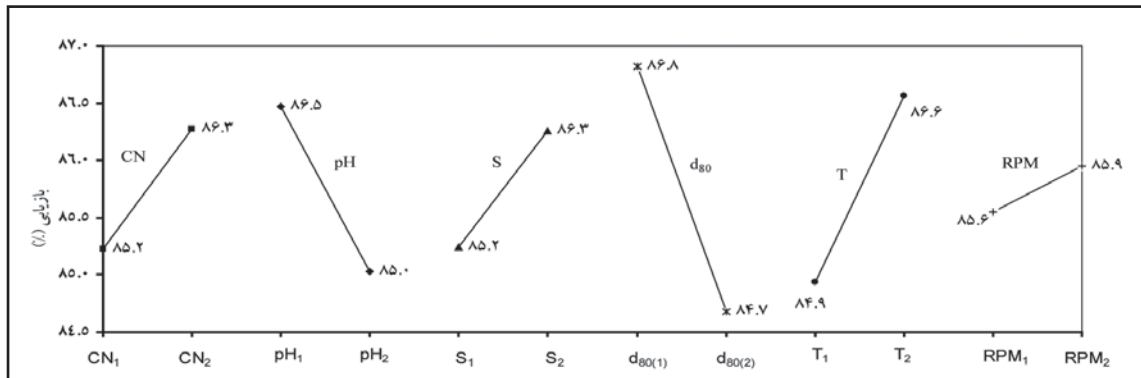
فلز	بازیابی خط تولید کارخانه (%)	بازیابی به دست آمده از پژوهش	میزان افزایش
طلا	۸۶/۵۰ ± ۱/۵	۹۱/۴۲ ± ۱/۰۲	۴/۹۲ ± ۲/۵۲
نقره	۳۷/۵۰ ± ۲/۵۰	۵۴/۳۱ ± ۱/۲۴	۱۶/۸۱ ± ۳/۷۴
جیوه	۱۴/۵۰ ± ۱/۵۰	۱۹/۵۰ ± ۰/۶۶	۵/۰۰ ± ۲/۱۶

جدول ۱۱- نتایج تحلیل واریانس برای مقادیر بازیابی طلا و جیوه، بعد از pooling (با سطح اعتماد ۹۰٪).

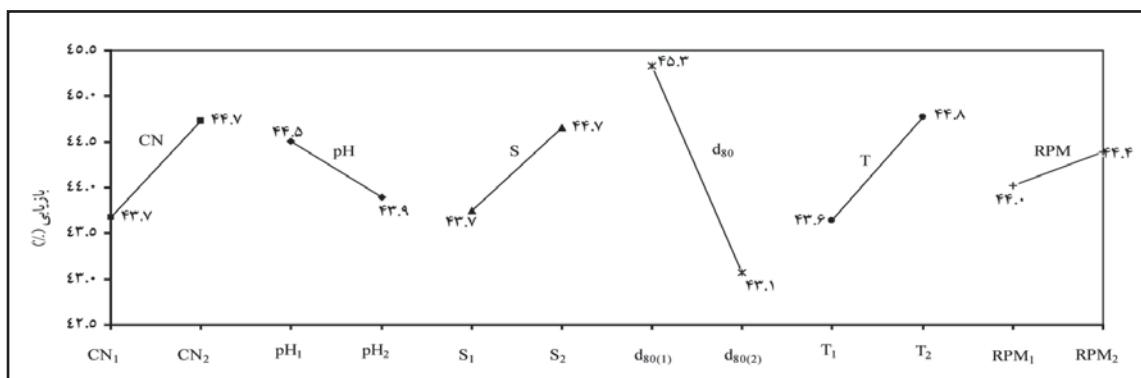
متغیر	طلا		جیوه	
	نسبت واریانس	درصد تأثیر	نسبت واریانس	درصد تأثیر
سیانید سدیم	F=(V/V _p)	۲/۹۱	F=(V/V _p)	۱۶/۲۰
pH پالپ	F=(V/V _p)	۲/۹۱	F=(V/V _p)	۱۶/۲۰
درصد جامد در پالپ	F=(V/V _p)	۱۱/۲۹	F=(V/V _p)	۲۸/۹۷
d80 کانسنگ	F=(V/V _p)	۱۳/۱۲	F=(V/V _p)	۳۴/۱۴
زمان ماند	F=(V/V _p)	۳/۶۹	F=(V/V _p)	۷/۵۸
خطا (e)	---	---	---	---
جمع				

جدول ۱۳- بازیابی پیش‌بینی شده و به دست آمده در شرایط بهینه.

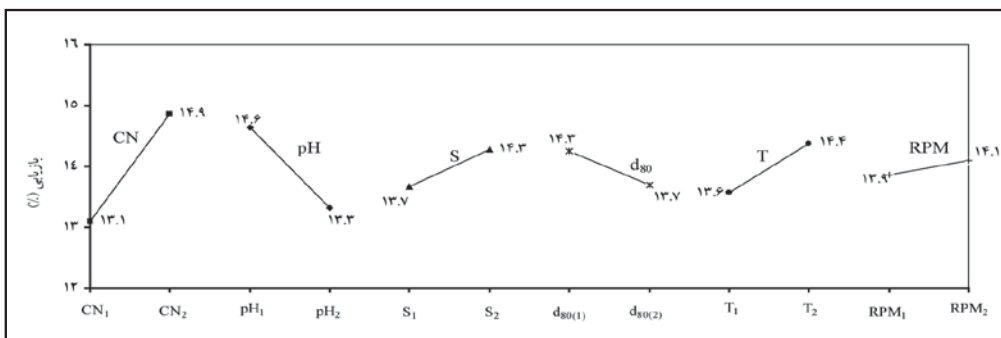
فلز	بازیابی پیش‌بینی شده (%)	بازیابی آزمایش انجام شده (%)	بازیابی پیش‌بینی شده و به دست آمده در شرایط بهینه (pH=۹/۸) (۱)	بازیابی آزمایش انجام شده (pH=۱۰/۳) (۲)
طلا	۹۱/۱۷ ± ۱/۱۶	۹۰/۳۸ ± ۱/۰۱	۹۰/۳۸ ± ۱/۰۱	۹۱/۴۲ ± ۱/۰۲
نقره	۵۴/۸۳ ± ۰/۵۶	۵۲/۹۱ ± ۱/۲۱	۵۲/۹۱ ± ۱/۲۱	۵۴/۳۱ ± ۱/۲۴
جیوه	۲۲/۰۵ ± ۱/۱۱	۲۲/۳۲ ± ۰/۶۷	۲۲/۳۲ ± ۰/۶۷	۱۹/۵۰ ± ۰/۶۶



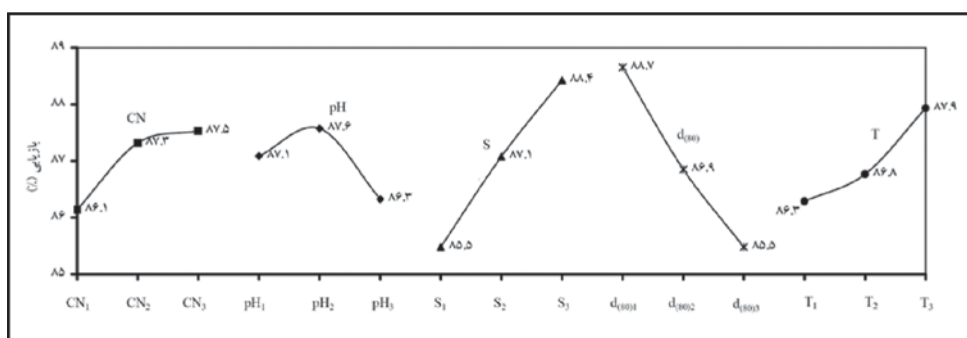
شکل ۲- تأثیر متغیرهای اصلی بر روی بازیابی طلا.



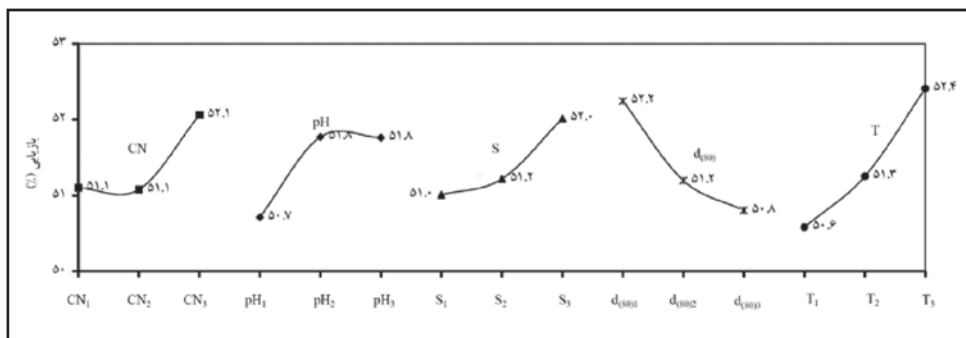
شکل ۳- تأثیر متغیرهای اصلی بر روی بازیابی نقره.



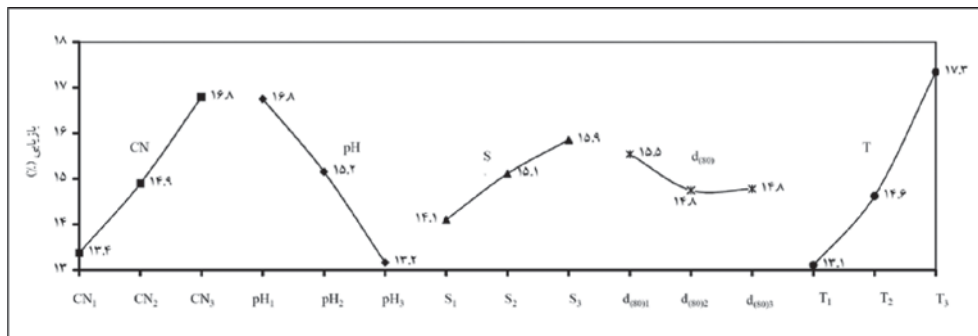
شکل ۴- تأثیر متغیرهای اصلی بر روی بازیابی جیوه.



شکل ۵- تأثیر متغیرهای اصلی بر روی بازیابی طلا در مرحله بهینه‌سازی.



شکل ۶- تأثیر متغیرهای اصلی بر روی بازیابی نقره در مرحله بهینه‌سازی.



شکل ۷- تأثیر متغیرهای اصلی بر روی بازیابی جیوه در مرحله بهینه‌سازی.

کتابنگاری

شفایی، س. ض. و عبدالمهی، م.، ۱۳۷۸- هیدرومتالورژی، جلد اول، چاپ اول، انتشارات دانشگاه شاهرود.

References

- Bayat, O., Vapur, H., Akyol, F., Poole, C., 2003- Effects of oxidising agents on dissolution of Gumuskoy silver ore in cyanide solution, *Minerals Engineering*, Vol. 16, pp: 395-398
- Brwner, R. E., 1995- The use of bauxite waste mud in the treatment of gold ores, *Hydrometallurgy*, Vol. 37, pp: 339-348
- Cerovic, K., Hutchison, H. & Sandenbergh, R. F., 2005- Kinetics of gold and a gold-10% silver alloy dissolution in aqueous cyanide in the presence of lead, *Minerals Engineering*, Vol. 18, pp: 585-590
- Costa, M. C., 1997- Hydrometallurgy of gold: New perspectives and treatment of refractory sulphide ores, *Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii*, Vol. 31, pp: 63-72
- Curreli, L., Ghiani, M., Surracco, M. & Orru, G., 2005- Beneficiation of a gold bearing enargite ore by flotation and As leaching with Na-hypochlorite, *Minerals Engineering*, Vol. 18, pp: 849-854
- Dai, X. & Jeffrey, M. I., 2006- The effect of sulfide minerals on the leaching of gold in aerated cyanide solutions, *Hydrometallurgy*, Vol. 82, pp: 118-125
- Dai, X., Jeffrey, M. I. & Breuer, P. L., 2005- The development of a flow injection analysis method for the quantification of free cyanide and copper cyanide complexes in gold leaching solutions, *Hydrometallurgy*, Vol. 76, pp: 87-96
- De Andrade Lima, L. R. P. & Hodouin, D., 2005- Optimization of reactor volumes for gold cyanidation, *Minerals Engineering*, Vol. 18, pp: 671-679
- Deschenes, G., Lastra, R., Brown, J. R., Jin, S., May, O. & Ghali, E., 2000- Effect of lead nitrate on cyanidation of gold ores: progress on the study of the mechanisms, *Minerals Engineering*, Vol. 13, pp: 1263-1279
- Deschenes, G., McMullen, J., Ellis, S., Fulton, M. & Atkin, A., 2005- Investigation on the cyanide leaching optimization for the treatment of KCGM gold flotation concentrate- phase 1, *Minerals Engineering*, Vol. 18, pp: 832-838
- Senanayake, G., 2006- The cyanidation of silver metal: Review of kinetics and reaction mechanism, *Hydrometallurgy*, Vol. 81, pp: 75-85
- Gupta, C. K. & Mukherjee, T. K., 2000- *Hydrometallurgy in Extraction Processes*, CRC Press, Vol. 2, chap 1, pp: 1-47
- Guzmana, L., Segarra, M., Chimenos, J. M., Cabotb, P. L. & Espiell, F., 1999- Electrochemistry of conventional gold cyanidation, *Electrochimica Acta*, Vol. 44, pp: 2625-2632
- Jones, G. & Miller, G., 2005- Mercury and Modern Gold Mining in Nevada, Final Report to U.S. Environmental Protection Agency Region IX
- Luna, R. M. & Lapidus, G.T., 2000- Cyanidation kinetics of silver sulfide, *Hydrometallurgy*, Vol. 56, pp: 171-188
- Marsden, J., Hous, I. & Horwood, E., 1992- The chemistry of gold extraction, pp: 260-295
- Wadsworth, M. E., 2000- Surface processes in silver and gold cyanidation, *Int. J. Miner. Process.*, Vol. 58, pp: 351-368
- Wadsworth, M. E. & Zhu, X., 2003- Kinetics of enhanced gold dissolution: activation by dissolved silver, *Int. J. Miner. Process.*, Vol. 72, pp: 301-310
- Roy, R. K., 1995- A primer on the Taguchi method, Van Nostrand Reinhold, New York
- Sandenbergh, R. F. & Miller, J. D., 2001- Catalysis of the leaching of gold in cyanide solutions by lead, bismuth and thallium, *Minerals Engineering*, Vol. 14, pp: 1379-1386

Optimization of Cyanide Leaching Process in Order to Increase Au, Ag and Hg Recovery in Pouya Zarkan Aghdareh Plant

Archive of SID

M. Abdollahy^{1*}, S. M. J. Koleini¹ & A. Ghaffari¹

¹Dept. of Mineral processing, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 2009 September 01

Accepted: 2010 February 06

Abstract

Cyanidation process is one of the most important and widespread hydrometallurgical technologies used in the extraction of gold and silver from ores and concentrates. Some of the most effective parameters on cyanide leaching are sodium cyanide concentration, dissolved oxygen, solid percent, pH, particle size, retention time and agitation speed. In this article the effect of these parameters on the recovery of gold, silver and mercury from Pouya Zarkan Aghdareh ore has been studied to determine the optimum conditions using Taguchi experimental design method. The experiments at the screening step based on L16 orthogonal array indicated that the effective parameters on gold, silver and mercury recovery such as sodium cyanide, pH, solid percent in pulp, d_{80} and retention time were obtained equal to 900 g/t ore, 10, 42%, 53 μm and 30 h, respectively. The experiments at the optimization step based on L18 orthogonal array indicated that d_{80} on gold recovery and retention time on silver and mercury recovery were the most effective parameters. Finally the optimum conditions for gold, silver and mercury recovery were obtained for parameters such as sodium cyanide, pH, solid percent in pulp, d_{80} and retention time equal to 1000 g/t ore, 10.3, 46%, 37 μm and 40 h, respectively. At this conditions gold, silver and mercury recovery were equal to 91.42 ± 1.02 , 54.31 ± 1.24 and 19.50 ± 0.66 percent, respectively.

Key words: Optimization of Leaching , Cyanidation, Gold, Silver, Mercury, experimental design, Taguchi.

For Persian Version see pages 129 to 138

*Corresponding author: M. Abdollahy; E-mail: minmabd@modares.ac.ir