

مشخصه‌یابی و فراوری کانسنگ طلای ازغد با اثر ناگت بالا

حامد خالدی^۱، سیما محمدنژاد^{۲*}، محمود عبداللهی^۳

۱. فارغ التحصیل کارشناسی ارشد فراوری مواد معدنی دانشگاه تربیت مدرس، hamed.kh72@yahoo.com

۲. استادیار فراوری مواد معدنی دانشگاه تربیت مدرس، sima.mnejad@modares.ac.ir

۳. استاد فراوری مواد معدنی دانشگاه تربیت مدرس، minmabd@modares.ac.ir

(دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۰۹ - پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۰۹)

چکیده

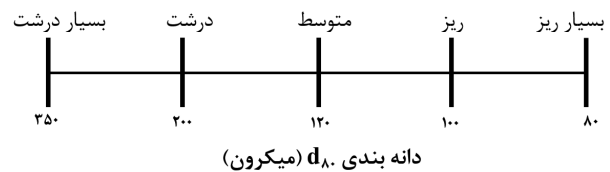
یکی از چالش‌های پیش‌رو در شناسایی و مشخصه‌یابی غالب کانسنگ‌های طلای رگه‌ای، وجود اثر ناگت بالا است. بهره‌برداری از این ذخایر چه در مرحله برآورد ذخیره و چه در مرحله فراوری با پیچیدگی‌های بسیاری روبه‌رو است. در این پژوهش کانسنگ طلای ازغد با اثر ناگت بالا با به‌کارگیری روش‌های نوین عیارسنجی بررسی شده است. معدن ازغد سه رگه اکسیدی، شیلی و سیلیکاتی دارد. داده‌های عیارسنجی اولیه به روش قال‌کاری وجود اثر ناگت بالا را تأیید کرد. با مقایسه روش‌های مختلف عیارسنجی، روش لیچینگ کامل با شرایط ۵ کیلوگرم نمونه به ابعاد زیر ۷۵ میکرون و میزان سیانور سدیم ۱/۵ گرم بر لیتر در pH برابر ۱۰/۵ به‌عنوان روش مناسب برای عیارسنجی این نمونه تعیین شد. بر این اساس عیار طلا در رگه‌های اکسیدی، سیلیکاتی و شیلی، برابر ۴/۷، ۰/۴ و ۰/۲۵ پی‌پی‌ام تعیین شد. همچنین مطالعات فازشناسی طلا به روش لیچینگ تشخیصی نشان داد که ۷۵/۷ درصد طلا آزاد، ۱۸/۰ درصد درگیر در فازهای سولفیدی و ۶/۳ درصد طلا در فازهای سیلیکاتی توزیع یافته است. آزمایش‌های فراوری به‌منظور توسعه فرایند مناسب در این کانسنگ انجام شد. بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی مؤثر، میزان خردایش $d_{80}=75$ میکرون، مصرف سیانور سدیم ۱/۴۱ گرم بر لیتر و ۳۰ درصد جامد در $pH=10/5$ و مدت‌زمان ۲۴ ساعت را تأیید کرد. میزان بازیابی در این شرایط برابر ۸۲/۹ درصد طلا به‌دست آمد. نتایج این تحقیق می‌تواند به نحو مؤثری در شناسایی، مشخصه‌یابی و فراوری کانسنگ‌های طلای با اثر ناگت بالا استفاده شود.

کلمات کلیدی

اثر ناگت، طلا، سیانوراسیون، مشخصه‌یابی، ازغد

۱- مقدمه

طلا در طبیعت در چهار دسته ابعادی شامل طلای درشت‌دانه یا ناگت، طلای میکرونی، طلای زیرمیکرونی و طلای جذب سطحی وجود دارند [۱]. در این تقسیم‌بندی اگرچه مرز مشخصی به لحاظ محدوده ابعادی برای هر یک از دسته‌ها وجود ندارد اما تا حد زیادی می‌تواند بیانگر ویژگی‌های متفاوت هر یک از گروه‌ها باشد. در شکل ۱ محدوده ابعادی طلا در پنج زیرگروه بسیاردرشت، درشت، متوسط، ریز و بسیارریز نشان داده شده است [۲].



شکل ۱- محدوده ابعادی طلا در کانسنگ‌های مختلف

طلای ناگت یا درشت‌دانه عموماً قابل‌رؤیت با چشم بوده و در ذخایر پلاستی در رودخانه‌ها یافت می‌شود. هرچند این ناگت‌های درشت‌دانه در ذخایر رگه‌ای هوازده و همچنین در باطله کارخانه‌های فرآوری نیز وجود دارند [۳]. مطالعات گسترده‌ای روی نحوه تشکیل این ذرات درشت‌دانه انجام شده است. دو تئوری غالب در این زمینه وجود دارند [۴]:

- ۱- ترسیب ذرات میکرونی از محلول‌های گرمایی، تماس و اتصال ذرات ریزدانه در دمای پایین / تغلیظ باکتریایی
 - ۲- هوازدهی ذرات ریزدانه و اتصال و تشکیل ناگت
- این ذرات درشت‌دانه عموماً تا حد ۸۳ تا ۹۲ درصد، طلای خالص بوده و ناخالصی‌های همراه نقره و مس می‌باشند. بزرگ‌ترین ناگت یافت شده در سطح زمین ۷۸ کیلوگرم وزن داشته و از منطقه ویکتوریای استرالیا استخراج شده است [۵]. اگرچه استحصال و فرآوری طلای ریزدانه و میکرونی عموماً با مشکلاتی همراه است اما از سوی دیگر، ذرات درشت‌دانه نیز که تحت عنوان کلی طلای ناگت شناخته می‌شوند فرایند بهره‌برداری از این ذخایر را چه در مرحله برآورد ذخیره و تعیین عیار میانگین و چه در مرحله استحصال و فرآوری با پیچیدگی‌هایی روبه‌رو می‌کند [۶، ۷]. پیش‌ازاین مطالعات پراکنده‌ای در زمینه روش‌های شناسایی و فرآوری کانسنگ‌های طلای دارای اثر ناگت انجام شده که هریک به بخشی از چالش‌های پیشرو در این نوع ذخایر پرداخته ولی تاکنون به‌صورت جامع و کامل مطالعاتی در این زمینه انجام نشده است. در میان روش‌های عیارسنجی طلا، روش قال کاری متداول‌ترین روش عیارسنجی

طلا است که با عیارگیری وزن بسیار کوچکی از نمونه (۲۰۰ تا ۳۰۰ گرم) انجام می‌شود. عموماً عیار به‌دست‌آمده با این روش پایین‌تر از عیار به‌دست‌آمده از روش‌هایی نظیر قال-کاری سرندی و لیچینگ کامل است. دو پارامتر اصلی در عیارسنجی طلا معرف بودن نمونه و میزان اثر ناگت ناشی از توزیع ناپیوسته و پراکندگی ذرات طلا در نمونه است [۸]. مطالعات نشان داده‌اند در نمونه‌هایی که اثر ناگت مشاهده می‌شود روش لیچینگ کامل به نتایج قابل‌اعتمادتری منجر می‌شود. در روش لیچینگ کامل^۱، لیچینگ سیانوری نمونه در بطری غلتان انجام می‌شود تا مشکل طلای درشت‌دانه را با عیارسنجی یک نمونه بزرگ که می‌تواند ۵ کیلوگرم یا بیشتر باشد برطرف کند. نمونه ۱۰۰ درصد زیر ۷۵ میکرون خرد شده و ۲۴ ساعت با میزان سیانور کافی تحت لیچینگ سیانوری قرار می‌گیرد [۹، ۱۰].

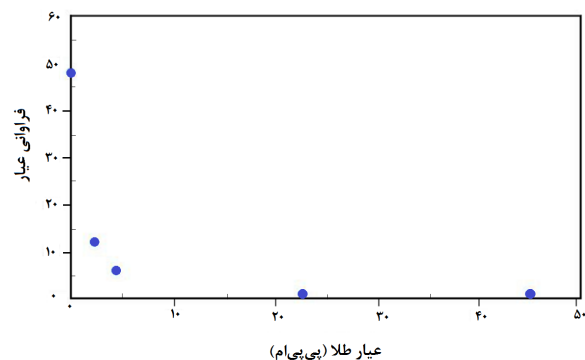
برای اولین بار در سال ۱۹۹۰ روشی استاندارد توسط کریسولیز^۲ و کابری^۳ برای مشخصه‌یابی و تعیین نحوه توزیع طلا در طبقات ابعادی و فازهای مختلف کانسنگ توسعه داده شد و سپس توسط پتراک^۴ و همکاران در سال ۱۹۹۵ بهینه و اصلاح شد. تاسینری^۵ (۱۹۹۶) و کوچونین^۶ - جانسون^۷ (۱۹۹۹) هر یک اصلاحاتی در این روش‌ها پیشنهاد کرده‌اند. در روشی که توسط تاسینری (۱۹۹۶) توسعه داده شد از روش سیانوراسیون - ملغمه‌سازی و در روش کوچونین و جانسون (۱۹۹۹) از روش لیچینگ تشخیصی استفاده شده است [۱۱].

یکی از روش‌های پرکاربرد در فرآوری و استحصال کانسنگ-های درشت‌دانه طلا، روش‌های پرعیارسازی ثقلی است. در این روش‌ها با حذف ذرات درشت‌دانه طلا از پیچیدگی‌های خردایش ذرات طلا در مدارهای آسیا و نرم‌کنی و همچنین لیچینگ آهسته این ذرات ممانعت به‌عمل می‌آید. برای این منظور از دستگاه‌های جدایش ثقلی مانند، جداکننده نلسون و انواع میزها (لرزان و جمینی) استفاده می‌شود. عموماً کنسانتره این بخش به سالن الکترولیز و یا کوره ذوب انتقال می‌یابد و بخش باطله ثقلی وارد قسمت سیانوراسیون می‌شود که ادامه این بخش تفاوتی با مدارهای متداول کارخانه‌های فرآوری طلا

1 . Leach Well
 2 Chryssoullis
 3 Cabri
 4 Petruk
 5 Tassinari
 6 Kojonen
 7 Johnson

ندارد [۱۲].

با توجه به وجود کانسنگ‌های رگه‌ای طلا در ایران و اهمیت وجود اطلاعاتی جامع در زمینه عیارسنجی و مشخصه‌یابی و همچنین فراوری آن‌ها، در این مطالعه کانسنگ طلای ازغد شناسایی و مشخصه‌یابی شده و همچنین پیچیدگی‌های مطرح در فراوری این ذخیره بررسی شده است. معدن ازغد در فاصله پنجاه کیلومتری جنوب غربی شهر مشهد واقع شده است. در این محدوده آثاری از بهره‌برداری از این معدن در گذشته وجود دارد. هرچند اثر ناگت بالا و عدم همخوانی داده‌های عیارسنجی بهره‌برداری از این معدن را در سال‌های گذشته به تأخیر انداخته است. در شکل ۲ پراکندگی داده‌های عیار- فراوانی در این کانسنگ که از گزارش‌های موجود حاصل از بیش از ۵۰ نمونه قال کاری استخراج شده، نشان داده شده است. تفرق داده‌ها به خوبی نمایانگر اثر ناگت و نامناسب بودن روش قال کاری برای عیارسنجی این ذخیره می‌باشد.



شکل ۲- تغییرات عیار طلا اندازه‌گیری شده به روش قال کاری در کانسنگ طلای ازغد

در این تحقیق با استفاده از روش‌های مختلف عیارسنجی روش مناسب برای عیارسنجی این کانسنگ پیشنهاد شده و در نهایت مطالعات فراوری به روش پرعیارسازی ثقلی و سیانوراسیون مستقیم صورت گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

هدف از این پژوهش، مشخصه‌یابی و تعیین ویژگی‌های کانسنگ طلای ازغد و همچنین تعیین روش مناسب برای فراوری این کانسنگ می‌باشد. برای تحقق این اهداف، در بخش

اول مشخصات و ویژگی‌های این کانسنگ به شرح زیر مطالعه شده است:

- ۱- بررسی ترکیب کانی‌شناسی و شیمیایی ماده معدنی در سه زون اکسیدی، شیلی و سیلیکاتی
- ۲- بررسی عیار و نحوه توزیع طلا در طبقات مختلف ابعادی سه زون اکسیدی، شیلی و سیلیکاتی
- ۳- بررسی نحوه توزیع طلا در فازهای مختلف کانی‌شناسی از طریق فروشویی تشخیصی برای رگه اکسیدی به‌عنوان رگه اصلی طلا دار
- ۴- مطالعات پیش‌تغلیظ ثقلی برای رگه اکسیدی
- ۵- بررسی ویژگی‌های طلارایی زون شیلی
- ۶- تعیین میزان خردایش بهینه و بهینه‌سازی فرآیند سیانوراسیون.

این ذخیره شامل سه رگه اکسیدی، سیلیکاتی و شیلی است که ویژگی‌های هر رگه مورد بررسی و شناسایی قرار گرفت. با توجه به اینکه ترانسه‌هایی برای مطالعات اکتشافی در معدن حفر شده بود، نمونه‌ها از هر دو دیواره ترانسه‌ها از دو رگه اکسیدی و شیلی به صورت شیاری انجام شد. از اکثر ترانسه‌ها و قسمت‌های که رگه‌های طلا دار رخنمون داشت نمونه شیاری تهیه شد. عرض رگه اصلی حدود ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متر و عرض رگه شیلی حدود ۱ تا ۲ متر است.

در قسمت‌های سیلیکاتی که ماده معدنی سخت و عرض رگه سیلیسی حدود ۱۰ متر بود، تهیه نمونه شیاری به آسانی مقدور نبود و نمونه‌ها به صورت لب‌پری از قسمت‌های مختلف حفاریات اکتشافی موجود برداشته شد. از هر سه تیپ موجود نمونه‌هایی با وزن تقریبی ۷۰ کیلوگرم تهیه شد.

همه‌ی نمونه‌ها با سنگ‌شکن فکی و استوانه‌ای به صورت جداگانه خرد شدند. سپس هر تیپ نمونه، همگن و با ریفلر تقسیم شد. مقداری از نمونه‌ها جهت مطالعات سیانوراسیون با آسیای گلوله‌ای تا ابعاد زیر ۷۵ میکرون نرم شد.

برای شناسایی فازهای موجود در سه تیپ نمونه از روش پراش اشعه ایکس با دستگاه D8-Advance XRD ساخت شرکت Bruker AXS و تعیین ترکیب شیمیایی نمونه از روش XRF مدل VX1000EA ساخت شرکت Hitach استفاده شد. آنالیزهای جذب اتمی با دستگاه مدل AA۲۴۰ ساخت شرکت Varian انجام شد.

در این مطالعه از نمونه کانسنگ طلای ازغد، سیانور سدیم، هیدروکسید سدیم، اسید کلریدریک (۳۷ درصد)، اسید سولفوریک (۹۸ درصد)، اسید نیتریک (۶۸ درصد) و اسید

فلوئوریدریک (۴۸ درصد) با خلوص آزمایشگاهی (مرک) استفاده شد.

آزمایش‌های عیارسنجی با روش لیچینگ کامل در بطری غلطان با حجم ۲۵ لیتر انجام شد. برای آماده‌سازی نمونه مقدار ۵ کیلوگرم از هر سه تیپ نمونه با آسیای گلوله‌ای نرم شد به‌طوری‌که ۱۰۰ درصد آن از الک ۲۰۰ مش (۷۵ میکرون) عبور کند. سپس روش لیچینگ کامل تحت شرایط جدول ۱ برای هر کدام از نمونه‌ها انجام شد.

جدول ۱- شرایط انجام آزمایش لیچینگ کامل

مدت زمان (ساعت)	سیانور سدیم (گرم بر لیتر)	pH	درصد جامد
۲۴	۱/۵	۱۰/۵	۳۰

پس از هر آزمایش کل نمونه فیلتر و شسته شده و محلول با دستگاه جذب اتمی پس از تغلیظ محلول به روش استخراج حلالی طلا با استخراج کننده دی ایزو بوتیل کتون (DIBK) و آنالیز شد. همچنین برای آنالیز پسماند فرایند لیچینگ از روش قال کاری استفاده شد.

به‌منظور مشخصه‌یابی طلای کانسنگ ازغد، مطالعات توزیع طلا در ابعاد مختلف نیز انجام شد. آزمایش‌های توزیع طلا در ابعاد و فازهای مختلف در راکتور ۱،۵ لیتری با همزن مکانیکی در دمای محیط انجام شد. برای این منظور مقدار ۱ کیلوگرم از نمونه اکسیدی، سیلیکاتی و شیلی در آسیای گلوله‌ای تا ابعاد ۷۵- میکرون نرم شد و در طبقات ابعادی ۶۳+۷۵-، ۵۳+۶۳-، ۶۳+۴۵-، ۴۵+۳۸- و ۳۸- میکرون دانه‌بندی تر و در دمای ۸۳ درجه خشک شد. سپس به روش لیچینگ کامل با شرایط مندرج در جدول ۱ عیارسنجی شد.

در ادامه به‌منظور تعیین فازهای درگیر و حاوی طلا، روش لیچینگ تشخیصی برای نمونه اکسیدی تحت شرایط مندرج در جدول ۲ انجام شد. برای این منظور ابتدا یک مرحله لیچینگ سیانوری جهت انحلال طلای آزاد انجام‌شده سپس باقی‌مانده جامد شستشو و فیلتر می‌شود. پس‌از آن یک مرحله لیچینگ اسیدی جهت انحلال کانی‌ها و آزاد شدن طلای درگیر در این فازها انجام می‌شود. مراحل لیچینگ سیانوری و اسیدی به‌صورت متوالی برای هر چهار اسید شامل اسید سولفوریک، کلریدریک، نیتریک و فلوئوریدریک انجام شد. درنهایت عیار محلول‌های سیانوراسیون جهت تعیین میزان طلای موجود به روش جذب اتمی آنالیز شد. در محاسبات مربوط به لیچینگ تشخیصی از تغییرات وزنی مربوط به انحلال سایر فازها صرف‌نظر شده است.

جدول ۲- شرایط انجام آزمایش لیچینگ تشخیصی

مقدار	پارامتر			
۲۵۰	وزن اولیه نمونه (گرم)			
۷۵	D100 (میکرون)			
۴۵۰	دور همزن (دور در دقیقه)			
سیانوراسیون				
۲۵	مقدار جامد (%)			
۱۰/۵	pH (تنظیم‌شده با سود)			
۲۴	زمان (ساعت)			
۱/۵	غلظت سیانور سدیم (گرم بر لیتر)			
لیچینگ اسیدی				
HF	HNO ₃	H ₂ SO ₄	HCl	نوع اسید
۳۳	۳۳	۳۳	۳۳	درصد جامد
۶	۶	۵	۸	زمان (ساعت)
۲۵	۶۰	۸۰	۶۰	دما (درجه سانتی‌گراد)
۲۰	۳۳	۴۸	۱۲	درصد حجمی اسید

به‌منظور پرعیارسازی ثقلی نمونه از جداکننده آزمایشگاهی نلسون در مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی (IMPRC) استفاده شد. بهینه‌سازی فرآیند سیانوراسیون با استفاده از قسمت بهینه‌سازی نرم‌افزار DX۱۰ انجام شد.

همان‌طور که در بخش نتایج گزارش خواهد شد، با توجه به وجود طلای درشت‌دانه در نمونه جهت امکان‌سنجی پرعیارسازی ثقلی، نمونه اکسیدی با استفاده از دستگاه جداکننده نلسون تحت شرایط جدول ۳ مورد آزمایش قرار گرفت. لازم به ذکر است دستگاه نلسون استفاده‌شده در این آزمایش فاقد سرعت‌سنج بوده و پارامتر سرعت جام دستگاه برحسب کسری از سرعت ماکزیمم تنظیم شد. در ۸۰ درصد دور، شتابی معادل ۹۰ برابر ثقل زمین بر ذرات وارد می‌شود.

جدول ۳- شرایط آزمایش دستگاه جداکننده نلسون

واحد	مقدار	پارامتر
۵	کیلوگرم	وزن نمونه
d ₈₀ =۷۵	میکرون	ابعاد نمونه
۳۰۰	میلی بار	فشار آب
۸۰	درصد	سرعت جام
۱۷۰/۲۴	گرم بر دقیقه	نرخ باردهی
۲۴	میلی‌لیتر بر دقیقه	نرخ آبدهی

به‌منظور تعیین ویژگی‌های فراوری کانسنگ، با توجه به وجود مواد آلی در نمونه شیلی مطالعات طلاربایی نمونه انجام شد. برای انجام آزمایش طلاربایی ابتدا محلول استاندارد ۵

در نهایت مطالعات بهینه‌سازی فرایند سیانوراسیون به روش طراحی پاسخ سطح انجام شد. با توجه به مطالعات پیشین پارامترهای مؤثر بر سیانوراسیون طلا؛ میزان مصرف سیانور، درصد جامد، pH محلول، همزنی و هوادهی می‌باشد که هوادهی با توجه به اینکه کلیه آزمایش‌ها در بطری غلظت به حجم ۲۵ لیتر انجام شد امکان تغییر این پارامتر میسر نبود و برای همه‌ی آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شد. همچنین pH برابر ۱۰/۵ در تمام آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. همزنی با توجه به دستگاه رولر موجود در آزمایشگاه به صورتی انتخاب شد که پالپ به صورت همگن باشد و ته‌نشین نشود و به صورت ثابت در نظر گرفته شد. در نهایت تنها تأثیر دو پارامتر میزان مصرف سیانور و درصد جامد توسط نرم‌افزار طراحی آزمایش نسخه ۱۰ به روش طراحی پاسخ سطح (CCD) مورد مطالعه قرار گرفت. در جدول ۴ پارامترها و محدوده‌های کمینه و بیشینه هر پارامتر نشان داده شده است.

جدول ۴- پارامترهای بهینه‌سازی سیانوراسیون و محدوده‌های کمینه و بیشینه

پارامتر	حد پایین	حد بالا
سیانور سدیم (گرم بر لیتر)	۱	۲
درصد جامد	۲۵	۳۵

در بخش بعدی نتایج حاصل از مطالعات ارائه شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱ مطالعات شناسایی و مشخصه‌یابی کانسنگ

۳-۱-۱ ترکیب کانی‌شناسی و شیمیایی نمونه‌ها

نتایج آنالیز XRD روی نمونه معرف حاصل از سه رگه مختلف کانسنگ نشان داد کوارتز، گوئتیت و پیریت در نمونه اکسیدی، کوارتز و گوئتیت در نمونه سیلیکاتی و کوارتز، ایلیت و مسکویت در نمونه شیلی کانی‌های غالب می‌باشند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در نمونه اکسیدی میزان کوارتز حتی بالاتر از نمونه سیلیکاتی است. هرچند به دلیل وجود کوارتز دانه‌درشت در نمونه سیلیکاتی نام‌گذاری بر مبنای شکل و بافت غالب این نمونه انجام شده است. نتایج آنالیز نیمه‌کمی در جدول ۵ ارائه شده است. آنالیز XRF برای سه نوع تیپ اکسیدی،

میلی‌گرم بر لیتر طلا آماده شد. مراحل تهیه محلول استاندارد به این قرار بود که یک فویل ۲۴ عیار (۹۹٫۹۹ درصد) طلا به وزن ۱ گرم در محلول ۰٫۵ درصد سیانور در pH ۱۱ برای مدت ۲۴ ساعت حل شد. در پایان آزمایش قطعه باقی‌مانده فویل طلا از محلول خارج شده و پس از قرائت عیار محلول و ترقیق آن، نمونه استاندارد با عیار مشخص ۵ پی‌پی‌ام تهیه شد. سپس دو آزمایش سیانوراسیون با استفاده از محلول طلا دار و محلول سیانوری فاقد طلا تحت شرایط مندرج در جدول ۱ انجام و نمونه‌گیری در مدت‌زمان ۱، ۲، ۴، ۶، ۱۲ و ۲۴ ساعت انجام شد. محلول‌ها به روش جذب اتمی آنالیز و تفاضل عیار به دست‌آمده از نمونه استاندارد در زمان مشابه به عنوان میزان طلا رابی نمونه محاسبه شد. همچنین مقدار مواد آلی نمونه به روش LECO Combustion در دانشگاه شهید بهشتی آنالیز شد.

در ادامه برای تعیین شرایط بهینه فرایند سیانوراسیون آزمایش‌های بهینه‌سازی میزان خردایش و پارامترهای عملیاتی سیانوراسیون انجام شد. برای این منظور ابتدا از ترکیب دو نمونه اکسیدی و شیلی یک نمونه معرف که شرایط مشابه با یک دپوی ۸۰ هزار تنی استخراجی از معدن داشته باشد تهیه شد. عیار این دپو با نمونه‌گیری دقیق به روش لیچینگ کامل ۲٫۷ پی‌پی‌ام تعیین شد. با توجه به اینکه رگه اکسیدی به صورت رگچه در رگه شیلی نفوذ کرده، استخراج از رگه‌های اکسیدی و تا عیار حد ۰/۴ پی‌پی‌ام صورت می‌گیرد. بدین منظور با نمونه‌هایی که به صورت جداگانه از هر رگه در آزمایشگاه موجود بود و همچنین محاسبات موازنه جرم برای به دست آوردن عیار متوسط مشابه با دپوی استخراجی، نسبت وزنی رگه شیلی به اکسیدی ۱/۲۹ انتخاب شد و نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌های بعدی مخلوط شدند. در این بخش از مطالعات، با توجه به جدا بودن و عدم درگیری رگه سیلیکاتی با سایر رگه‌ها و از سوی دیگر میزان ذخیره اندک این بخش، نمونه سیلیکاتی مورد استفاده قرار نگرفت. میزان نمونه برای هر آزمایش با توجه به مطالعات قبلی و وجود اثر ناگت ۵ کیلوگرم انتخاب شد. جهت تعیین میزان خردایش بهینه، شش نمونه با اندازه ذرات ۲۱۲، ۱۵۰، ۱۰۶، ۹۰، ۷۵ و ۶۳ میکرون (۱۰۰ درصد ذرات از سرند عبور داده شد) در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است d80 محاسبه شده با توجه به تجزیه سرندي نمونه با فرض این‌که منحنی‌های دانه‌بندی موازی باشد به ترتیب برای شش نمونه برابر ۱۳۵، ۹۰، ۶۷، ۶۰، ۵۳ و ۴۹ میکرون تعیین شد. آزمایش‌ها با شرایط آزمایش لیچینگ کامل مندرج در جدول ۱ انجام شد.

سیلیکاتی و شیلی ترکیب شیمیایی سه نمونه را نشان می‌دهند (جدول ۶).

برای محاسبه عیار نمونه‌ها به روش لیچینگ کامل از رابطه ۱ استفاده شده است:

عیار نمونه = میزان طلای حل شده در لیچینگ کامل + میزان طلای باقی‌مانده در باطله لیچینگ به روش قال کاری (رابطه ۱)

با توجه به این‌که مقدار $0/82$ پی‌پی‌ام طلا در باطله سیانوراسیون نمونه اکسیدی وجود دارد و مقدار $3/98$ پی‌پی‌ام طلا با روش لیچینگ کامل انحلال پیدا کرده است پس $4/8$ پی‌پی‌ام مقدار طلای موجود در رگه اکسیدی می‌باشد که با نتیجه عیارسنجی این نمونه با روش قال کاری ($4/7$ پی‌پی‌ام) هم‌خوانی دارد.

در رگه سیلیکاتی باوجود آنالیز نمونه‌های تکراری جهت کنترل، نتایج خوراک این نمونه با مقدار طلائی که با روش لیچینگ کامل حل شد هم‌خوانی ندارد و مقدار عیار طلا خوراک که با روش قال کاری اندازه‌گیری شد ($0/53$ پی‌پی‌ام) کمتر از مقدار طلای حل‌شده ($0/4$ پی‌پی‌ام) است. بنابراین روش قال کاری، روش مناسبی برای عیارسنجی این نمونه نبوده است. این امر از آنجا ناشی می‌شود که مقدار 200 گرم نمونه به‌کاررفته در روش قال کاری معرف مناسبی از نمونه نبوده و به همین دلیل روش لیچینگ کامل که با 5 تا 10 کیلوگرم نمونه انجام می‌شود به نتایج دقیق‌تر و تکرارپذیرتری منجر می‌شود. در رابطه با نمونه شیلی با توجه به عیار کم رگه و خطای دستگاهی تقریباً نتایج لیچینگ کامل و قال کاری هم‌خوانی دارند.

۳-۱-۳ نتایج حاصل از مطالعات توزیع طلا در ابعاد مختلف

جدول ۸ نتایج عیارسنجی هر یک از طبقات ابعادی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج نشان داده‌شده، در نمونه اکسیدی و سیلیکاتی به ترتیب ۷۸ و ۹۴ درصد طلای محتوی در ذرات با ابعاد زیر 38 میکرون تجمع یافته‌اند. درحالی‌که در نمونه شیلی $52/7$ درصد طلا در دانه‌بندی‌های درشت‌تر ($+53$ میکرون) می‌باشد که احتمال وقوع طلای درشت‌دانه در بخش شیلی را تأیید می‌کند. لازم به ذکر است که جهت کنترل نتایج این آزمایش دوبار انجام‌شده که نتایج تکرارپذیری بسیار بالایی را نشان دادند. نتایج ارائه‌شده میانگین آنالیز دو نمونه است.

جدول ۵- نتایج آنالیز نیمه کمی پراش اشعه ایکس

نمونه اکسیدی		نمونه سیلیکاتی		نمونه شیلی	
کوارتز	۶۶	کوارتز	۵۴	کوارتز	۶۶
گوئیتیت	۱۴	گوئیتیت	۳۸	ایلپیت	۱۹
ایلپیت	۷	ایلپیت	۴	مسکویت	۷
آنورتیت	۵	کلریت	۲	مونت‌موریلونیت	۵

جدول ۶- ترکیب شیمیایی نمونه‌های تهیه‌شده از کانسنگ ازغد

ترکیب %	نمونه اکسیدی	نمونه سیلیکاتی	نمونه شیلی
SiO ₂	۴۳/۹۳	۴۵/۴۳	۶۸/۸۳
Al ₂ O ₃	۵/۲۱	۱/۵۵	۱۷/۰۵
BaO	۰	۰	۰/۰۶
CaO	۱/۵۷	۰/۳۲	۰/۳۰
Fe ₂ O ₃	۳۳/۷۱	۴۰/۸۳	۲/۹۹
K ₂ O	۱/۴۴	۰/۴۱	۴/۹۶
MgO	۰/۲۴	۰/۲۲	۰/۴۶
MnO	۱/۷۱	۳/۴۲	۰/۱۷
Na ₂ O	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱۸
P ₂ O ₅	۰/۳۶	۰/۱۰	۰/۱۵
SO ₃	۰/۲۵	۰/۱۷	۰/۰۸
TiO ₂	۰/۲۲	۰/۰۷	۰/۷۹
LOI	۸/۹۶	۷/۴۳	۳/۹۴
Cu	۰/۳۹	۰	۰
As	۲/۰۱	۰	۰

۳-۱-۲ مطالعات عیارسنجی اولیه به روش لیچینگ کامل

نتایج عیارسنجی نمونه به روش لیچینگ کامل در جدول ۷ گزارش شده است. خوراک و پسماند لیچینگ کامل نمونه‌های اکسیدی، سیلیکاتی و شیلی جهت عیارسنجی به روش قال- کاری آنالیز شد که نتیجه این آنالیزها نیز در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷- نتایج آنالیز محلول‌های آزمایش لیچینگ کامل و قال کاری

خوراک و پسماند لیچینگ کامل

عیار (گرم در تن)	اکسیدی	سیلیکاتی	شیلی
خوراک	۴/۷۰۴	۰/۰۵۹	۰/۲۴۷
گرم طلای حل شده به روش لیچینگ کامل به ازای تن خوراک	۳/۹۸	۰/۴	۰/۱۲
پسماند لیچینگ	۰/۸۲۷	۰/۰۱۷	۰/۰۵۵

۳-۲- مطالعات فراوری

۳-۲-۱ مطالعات پیش تغلیظ ثقلی

با توجه به امکان وجود طلای درشت‌دانه در نمونه و همچنین حضور ۷۶ درصد از طلا به صورت طلای آزاد در نمونه، جهت امکان‌سنجی پری‌عیارسازی ثقلی، نمونه اکسیدی مورد مطالعات پری‌عیارسازی ثقلی قرار گرفت. نتایج آنالیز این آزمایش در جدول ۱۰ گزارش شده است.

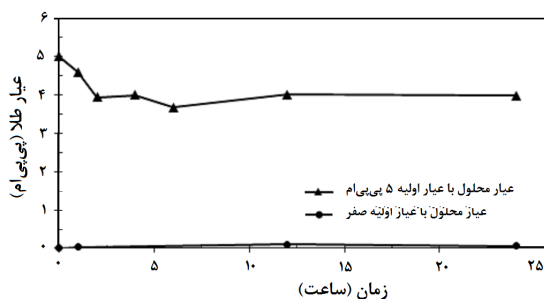
جدول ۱۰- نتایج آزمایش پیش تغلیظ ثقلی با دستگاه نلسون

نوع نمونه	وزن (گرم)	عیار (پی‌پی‌ام)	بازبایی (%)
خوراک	۵۰۰۰/۰	۴/۵۷	---
کنسانتره	۹۹/۷	۹۹/۳۰	۴۳/۳۴
باطله	۴۹۰۰/۳	۲/۶۴	۵۶/۶۶

لازم به ذکر است اصلاح عیارها با شرط موازنه وزنی با روش بهینه‌سازی مشروط (لاگرانژ) برای وزن فلز (طلا) در خوراک، کنسانتره و باطله انجام شد. با توجه به این که ۴۳/۳۴ درصد کل طلای نمونه در کنسانتره ثقلی که ۲ درصد وزنی کل نمونه را شامل می‌شود، متمرکز شده است، و نیز با در نظر داشتن وجود اثر ناگت در این نمونه می‌توان گفت که طلای دانه‌درشت موجود در نمونه در بخش کنسانتره ثقلی تجمع یافته که می‌توان با روشی جداگانه این بخش از نمونه را فراوری کرد. طلای موجود در بخش غیر ثقلی را نیز می‌توان با روش مرسوم سیانوراسیون استحصال کرد.

۲-۲-۳ بررسی قابلیت طلاربایی

در نمونه شیلی، مواد آلی، میکا و رس وجود دارند که لزوم انجام آزمایش‌های طلاربایی را تأیید می‌کند. نتایج مطالعات طلاربایی در نمونه شیلی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- نتیجه آزمایش طلاربایی بر روی نمونه شیلی

جدول ۸- نتایج توزیع ابعادی و توزیع طلا در طبقات ابعادی مختلف

محدوده ابعادی (میکرون)	اکسیدی	سیلیکاتی	شیلی
-۷۵+۶۳	۴/۸۱	۲/۸۹	۲۵/۰۰
-۶۳+۵۳	۶/۸۵	۲/۲۲	۲۷/۷۸
-۶۳+۴۵	۴/۵۳	۰/۴۴	۱۶/۶۷
-۳۸+۴۵	۶/۱۴	۰/۸۹	۱۵/۷۴
-۳۸	۷۷/۶۷	۹۳/۵۶	۱۴/۸۱
مجموع	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

۳-۱-۴ نتایج لیچینگ تشخیصی

نتایج روش لیچینگ تشخیصی برای نمونه اکسیدی در جدول ۹ ارائه شده است.

جدول ۹- نتایج لیچینگ تشخیصی نمونه اکسیدی

مراحل عمل‌آوری	کانی‌های محلول	توزیع طلا (%)
لیچینگ سیانوری	طلا	۷۵/۷
لیچینگ با HCl	کلسیت، دولومیت، گالن، پیرویت، همتیت	۰
لیچینگ سیانوری	طلا	۰
لیچینگ با H ₂ SO ₄	سولفیدهای مس و روی، پیریت	۵/۳
لیچینگ سیانوری	طلا	۵/۳
لیچینگ با HNO ₃	پیریت، مارکاسیت، آرسنوپیریت	۱۲/۷
لیچینگ سیانوری	طلا	۱۲/۷
لیچینگ با HF	سیلیکات‌ها	۶/۳
لیچینگ سیانوری	طلا	۶/۳

قابل ذکر است که ۲۶/۸ درصد از نمونه با اسید کلریدریک حل شده است که کانی‌های گوئتیت و کلسیت حل شده‌اند. همچنین ۳۱/۷ درصد نمونه با اسید سولفوریک، ۹/۷ درصد با اسید نیتریک و ۲۷/۳ درصد با اسید فلئوئوریدریک حل شده است. بدین ترتیب ۷۶ درصد طلا آزاد، ۱۸ درصد درگیر در فاز سولفیدی (مجموع طلای حل شده پس از عمل‌آوری با اسید سولفوریک و نیتریک) و ۶ درصد در فاز سیلیکاتی می‌باشد. لازم به ذکر است که اگرچه حضور فازهای سولفیدی در آنالیز فازهای با غلظت کم در این روش، سولفور موجود در آنالیز XRF شاهدهی بر وجود این فازها می‌تواند باشد.

جدول ۱۲- طرح آزمایش برای بهینه‌سازی سیانوراسیون (۵ کیلوگرم نمونه، ۱۰/۵ pH و ۲۴ ساعت)

شماره‌ی آزمایش	غلظت سیانور سدیم (گرم بر لیتر)	درصد جامد	بازیابی (درصد)
۱	۱/۵۰	۳۷/۱	۷۸/۵۵
۲	۱/۵۰	۳۰	۸۳/۳۷
۳	۱/۵۰	۳۰	۸۴/۳۲
۴	۲/۰۰	۲۵	۸۱/۳۸
۵	۰/۷۹	۳۰	۷۲/۰۰
۶	۱/۵۰	۲۲/۹	۹۱/۳۰
۷	۲/۲۱	۳۰	۷۸/۶۳
۸	۱/۰۰	۳۵	۷۰/۰۳
۹	۱/۰۰	۲۵	۷۲/۸۷
۱۰	۲/۰۰	۳۵	۷۶/۸۱
۱۱	۱/۵۰	۳۰	۸۵/۷۴

جدول ۱۳- آنالیز واریانس مربوط به طرح آزمایش

متغیر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	p-Value
مدل	۳۴۴/۰۲	۳	۱۴۴/۶۷	۰/۰۰۵۲
غلظت سیانور سدیم (A)	۷۶/۰۰	۱	۷۶/۰۰	۰/۰۳۱۹
درصد جامد (B)	۸۰/۹۱	۱	۸۰/۹۱	۰/۰۲۸۲
A ²	۱۸۷/۱۱	۱	۱۸۷/۱۱	۰/۰۰۴۱
باقی‌مانده‌ها	۷۴/۵۵	۷	۱۰/۵۶	-
عدم‌کفایت	۷۱/۷۱	۵	۱۴/۳۴	۰/۰۹۲۶
خطای خالص	۲/۸۴	۲	۱/۴۲	-

با توجه به جدول ۱۳ ملاحظه می‌شود که اثر عوامل یادشده در بازه اطمینان مهندسی (۹۵ درصد) معنی‌دار هستند. همچنین مدل مرتبه دوم به‌دست‌آمده برای بازیابی معنی‌دار بوده و (طبق مقدار احتمال عدم‌کفایت مدل) به‌خوبی قادر به توصیف تغییرات متغیر پاسخ است. مدل به‌دست‌آمده در رابطه ۲ ارائه‌شده است.

$$R = +۴۳/۷ + ۷۲/۲A - ۰/۶B - ۲۲A^2 \quad (\text{معادله } ۲)$$

R: بازیابی (%)

A: غلظت سیانور سدیم (گرم بر لیتر)

B: درصد جامد (%)

برای بررسی کارایی این مدل از شاخص‌های آماری برای تحلیل مقادیر بازیابی تخمین زده شده توسط مدل و باقی‌مانده‌های آن استفاده شد. خلاصه‌ای از این بررسی‌ها در نمودارهای شکل ۴ گزارش شده است. ملاحظه می‌شود که توزیع باقی‌مانده‌ها یکسان بوده و از توزیع نرمال پیروی می‌کند.

با توجه به نمودار، مقدار طلایابی نمونه شیلی برابر ۱/۱۱ پی‌پی‌ام (۲۱/۴ درصد) می‌باشد. همچنین کل کربن آلی در نمونه اندازه‌گیری و برابر ۰/۳۹ گرم در تن تعیین شد.

۳-۲-۳ تعیین میزان خردایش بهینه

نتایج مطالعات تعیین خردایش بهینه در جدول ۱۱ ارائه‌شده است.

جدول ۱۱- میزان بازیابی طلا در ابعاد خردایش مختلف

بازیابی (%)	عیار خوراک (پی‌پی‌ام)	خوراک (d ₁₀₀ میکرون)
۸۲/۵۷	۲/۶۹	-۲۱۲
۸۲/۵۶	۲/۶۶	-۱۵۰
۸۳/۳۸	۲/۵۴	-۱۰۶
۸۳/۷۳	۲/۵۱	-۹۰
۸۷/۰۸	۲/۴۱	-۷۵
۷۸/۴۲	۲/۷۱	-۶۳

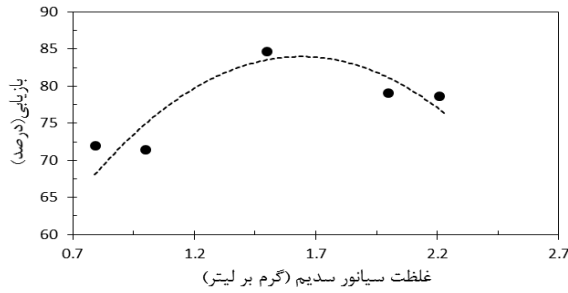
همان‌طور که ملاحظه می‌شود با کاهش ابعاد ذرات سطح تماس محلول سیانوری با ذرات طلا افزایش‌یافته و بازیابی روند افزایشی دارد. در ابعاد ۶۳- برخلاف انتظار این رقم کاهش‌یافته است که می‌توان آن را به آگلومراسیون و چسبیدن ذرات و جلوگیری از دسترسی عامل لیچینگ نسبت داد. در نمونه خردایش شده در ابعاد زیر ۶۳ میکرون این اثر به‌خوبی قابل‌مشاهده بود. بر همین اساس ابعاد ۷۵- میکرون به‌عنوان ابعاد بهینه خردایش انتخاب شد.

۳-۲-۴ بهینه‌سازی فرایند سیانوراسیون

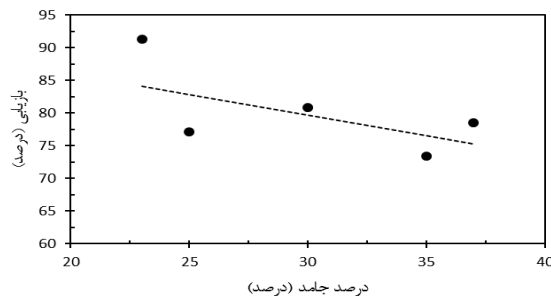
مطالعات بهینه‌سازی فرایند سیانوراسیون به روش طراحی پاسخ سطح انجام شد. نتایج آنالیز این آزمایش در جدول ۱۲ گزارش شده است.

برای بهینه‌سازی فرایند، پاسخ بازیابی نسبت به عوامل غلظت سیانور سدیم و درصد جامد پالپ توسط یک رابطه مرتبه دوم مدل‌سازی شد. طی این فرایند اثر غلظت سیانور سدیم بر بازیابی معنی‌دار و مرتبه دوم تشخیص داده شد. اما تأثیر درصد جامد پالپ بر بازیابی، مرتبه اول تعیین گردید. نتایج تحلیل واریانس داده‌های به‌دست‌آمده از این آزمایش‌ها در جدول ۱۳ آورده شده است.

سیانور، فرایند لیچینگ طلا توسط میزان اکسیژن موجود در محلول کنترل شده و مستقل از میزان سیانور بوده است [۱۳]. از سوی دیگر با افزایش درصد جامد پالپ بازیابی به صورت خطی کاهش می یابد (شکل ۶). لازم به ذکر است در این دو شکل نقطه چین نشان دهنده مدل برازش شده و دایره های توپر نشان دهنده نقاط آزمایشی است.

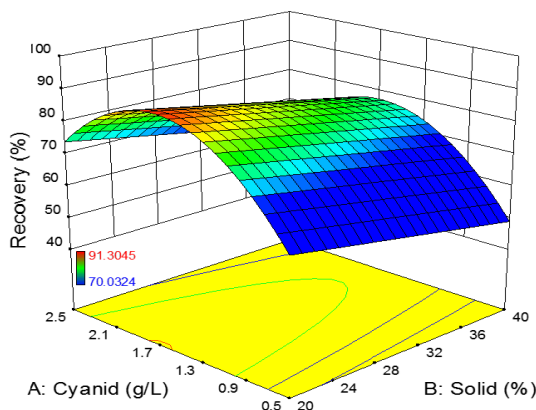


شکل ۴- تغییرات بازیابی نسبت به تغییرات غلظت سیانور سدیم.

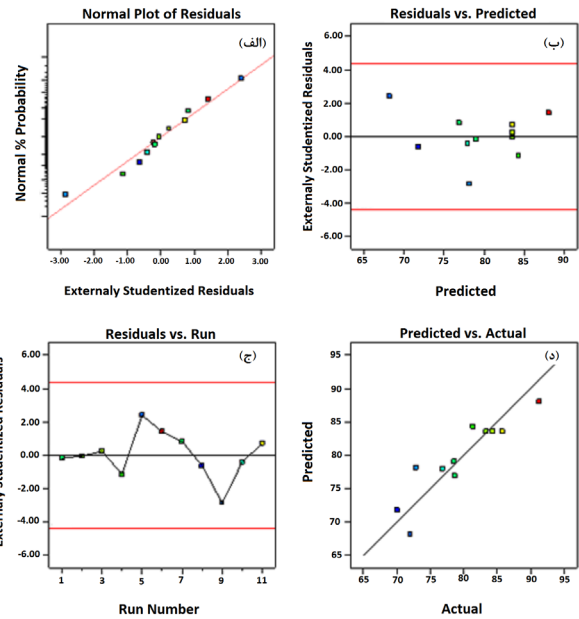


شکل ۵- تغییرات بازیابی نسبت به تغییرات غلظت درصد جامد پالپ

با اجتماع نتایج به دست آمده می توان نمودار سطح پاسخ بازیابی نسبت به تغییرات سیانور و درصد جامد را رسم کرد (شکل ۷). بازیابی همواره با کاهش درصد جامد و نزدیک شدن غلظت سیانور سدیم به مقدار ۱/۶۴ گرم بر لیتر افزایش می یابد.



شکل ۶- سطح بازیابی بر حسب غلظت سیانور سدیم و درصد جامد



شکل ۳- تحلیل آماری پاسخ و باقی مانده های مدل. (الف) بررسی توزیع باقی مانده ها. (ب) بررسی وجود داده های خارج از ردیف. (ج) بررسی تصادفی بودن پاسخ نسبت به ترتیب انجام آزمایش ها. (د) مقایسه مقدار واقعی پاسخ با مقدار تخمین زده شده توسط مدل.

طبق آزمون t-student هیچ داده ی خارج از ردیف در نتایج وجود ندارد. از آنجایی که روند آزمایش ها تصادفی انتخاب شده است، مقادیر باقی مانده های مدل نسبت به شماره ی آزمایش ها نیز می بایست تصادفی بوده و هیچ روندی در نمودار آن مشاهده نشود (شکل ۴-ج). کنترل این موضوع برای بررسی عدم تأثیرگذاری شرایط محیطی مؤثر در بازیابی که در این آزمایش ها در نظر گرفته نشده اند ضروری است. مقایسه ی مقادیر پاسخ اندازه گیری شده با مقادیر پاسخ مدل نیز نشان دهنده ی کارایی مناسب مدل در توصیف تغییرپذیر داده های اندازه گیری است.

پس از کسب اطمینان از کیفیت مدل به دست آمده، پاسخ مدل نسبت به تغییرات غلظت سیانور سدیم و درصد جامد پالپ بررسی شد. تغییرات بازیابی طلا نسبت به تغییرات غلظت سدیم از یک رابطه ی مرتبه دوم تبعیت می کند (شکل ۵). بر اساس ماهیت فیزیکی- شیمیایی فرآیند سیانوراسیون انتظار می رود افزایش غلظت اولیه ی سیانور سدیم تا یک مقدار مشخص باعث افزایش بازیابی شده و سپس بازیابی را کاهش می دهد. مدل برازش شده برای این فرآیند یک مدل چندجمله ای مرتبه دوم بوده و دارای یک نقطه ی بیشینه می باشد. افزایش غلظت سیانور سدیم تا مقدار ۱/۶۴ گرم بر لیتر باعث افزایش بازیابی شده است. در غلظت های بالاتر

اکسیدی، سیلیکاتی و شیلی؛ برابر $4/7$ ، $4/4$ و $0/25$ پی‌پی‌ام طلا تعیین شد.

مطالعات نحوه توزیع طلا در ابعاد مختلف برای هر سه نمونه اکسیدی، سیلیکاتی و شیلی انجام شد. در نمونه اکسیدی ۷۸ درصد طلا در طبقه ابعادی ۳۸- میکرون و در نمونه شیلی این مقدار برابر $14/8$ درصد طلا می‌باشد. با توجه به مطالعات لیچینگ تشخیصی توزیع طلا برای نمونه اکسیدی به صورت، $75/7$ درصد طلای آزاد، $18/0$ درصد درگیر در فازهای سولفیدی (مجموع طلای حل شده پس از عمل‌آوری اسید سولفوریک و اسید نیتریک) و $6/3$ درصد طلا در فاز سیلیکاتی است.

آزمایش‌های طلاربابی برای نمونه شیلی به دلیل وجود کانی-های رسی و میکا انجام و مقدار طلاربابی این نمونه برابر $1/11$ پی‌پی‌ام تخمین زده شد.

برای امکان‌سنجی مطالعات پیش‌تغلیظ ثقلی برای نمونه اکسیدی به‌عنوان رگه اصلی طلا دار بررسی شد. با توجه به این-که $43/34$ درصد کل طلای نمونه در کنسانتره ثقلی که ۲ درصد وزنی کل نمونه را شامل می‌شود، متمرکز شده است می-توان روش پیش‌تغلیظ ثقلی را به‌عنوان گزینه مناسب برای بخش حاوی طلای درشت‌دانه پیشنهاد کرد.

در بخش فراوری آزمایش‌های تعیین میزان خردایش بهینه و آزمایش‌های بهینه‌سازی با روش طراحی پاسخ سطح برای نمونه ترکیبی اکسیدی و شیلی انجام شد. میزان خردایش بهینه برابر $d80$ برابر ۷۵ میکرون به‌دست‌آمده آمد.

در مطالعات بهینه‌سازی فرآیند سیانوراسیون، مقدار درصد جامد برابر ۳۰ و مصرف سیانور سدیم برابر با $1/41$ گرم بر لیتر تعیین شد. مقدار بازیابی در این شرایط برابر $82/9$ درصد تعیین شد. میزان مصرف بالای سیانور و طلاربابی مواد آلی دو چالش اصلی بر سر راه بهره‌برداری از این ذخیره است.

منابع

- [1] Vaughan, J.P., 2004. "The Process Mineralogy of Gold: The classification of Ore Types". JOM, 56(7), pp. 46-48.
- [2] Laplante, A.R., 2000. "A Standardized Test to Determine Gravity Recoverable Gold. Department of Mining and metallurgical Engineering". McGill University, Canada.
- [3] Butt, C., et al. 2006. "Origin and weathering of gold nuggets". Geochimica et Cosmochimica Acta, 70(18), pp. 78-81.
- [4] Hough, R., et al. 2007. "Gold Nuggets: Supergene or Hypogene?" Australian Journal of Earth Sciences, 54(7), pp. 959-964.

به‌منظور بهینه‌سازی فرآیند سیانوراسیون مقدار درصد جامد برابر ۳۰ درصد در نظر گرفته شد. اهداف بهینه‌سازی کاهش مصرف سیانور (درجه اهمیت ۳) و افزایش بازیابی (درجه اهمیت ۵) قرار داده شد. درنهایت مقدار بهینه‌ی مصرف سیانور سدیم برابر با $1/41$ گرم بر لیتر محاسبه شد. این مقدار مصرف سیانور بسیار بیشتر از مقدار سیانور مصرفی متداول در کارخانه‌های سیانوراسیون می‌باشد که عمده دلیل آن را می‌توان به وجود کانی‌های مصرف‌کننده سیانور نظیر گوئیتیت و کانی‌های مس نسبت داد [۱۳]. مقدار بازیابی در این غلظت سیانور و درصد جامد ۳۰ برابر $82/9$ درصد تخمین زده شد. مقدار مطلوبیت بهینه‌سازی برای این حالت برابر ۶۰ درصد می-باشد. پایین بودن این مقدار به دلیل وجود بازیابی ۹۱ درصدی در نتایج آزمایش‌ها است.

پس از کسب اطمینان از کیفیت مدل به‌دست‌آمده، پاسخ مدل نسبت به تغییرات غلظت سیانور سدیم و درصد جامد پالپ بررسی شد. تغییرات بازیابی طلا نسبت به تغییرات غلظت سیانور سدیم از یک رابطه‌ی مرتبه دوم تبعیت می‌کند. بر اساس ماهیت فیزیکی- شیمیایی فرآیند سیانوراسیون انتظار می‌رود افزایش غلظت اولیه سیانور سدیم تا یک مقدار مشخص باعث افزایش بازیابی شده و سپس بازیابی ثابت شود. مدل برازش شده برای این فرآیند یک مدل چندجمله‌ای مرتبه دوم بوده و دارای یک نقطه‌ی بیشینه می‌باشد. می‌توان این‌گونه اظهار کرد که افزایش غلظت سیانور سدیم تا مقدار $1/64$ گرم بر لیتر باعث افزایش بازیابی شده و در غلظت‌های بالاتر توسط میزان اکسیژن موجود در محلول کنترل شده و مستقل از میزان سیانور خواهد بود [۱۳]. از سوی دیگر همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش درصد جامد پالپ بازیابی به‌صورت خطی کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهند بازیابی همواره با کاهش درصد جامد و نزدیک شدن غلظت سیانور سدیم به مقدار $1/64$ گرم بر لیتر افزایش می‌یابد.

۴ - نتیجه‌گیری

مطالعات انجام‌شده روی کانسنگ ازغد با اثر ناگت بالا مؤید آن است که روش فال‌کاری قادر به تعیین عیار معرف و تکرارپذیر در این ذخایر نیست. روش لیچینگ کامل با شرایط ۵ کیلوگرم نمونه به ابعاد زیر ۷۵ میکرون و میزان سیانور سدیم $1/5$ گرم بر لیتر در pH برابر $10/5$ به‌عنوان پروتکل مناسب برای عیارسنجی این نوع کانسنگ‌ها تعیین شد. بر اساس روش لیچینگ کامل، مقادیر عیار طلا به ترتیب برای نمونه‌های

- [5] <http://www.ammrf.org.au>.
- [6] Dominy, S., I. Platten, and M. Raine, Grade and geological continuity in high-nugget effect gold-quartz reefs: implications for resource estimation and reporting. *Applied Earth Science*, 2003. 112(3): p. 239-259.
- [7] Dominy, S., P.R. Stephenson, and A.E. Annels, Classification and reporting of mineral resources for high-nugget effect gold vein deposits. *Exploration and Mining Geology*, 2001. 10(3): p. 215-233.
- [8] Coetzee, L.L., et al., Modern gold departments and its application to industry. *Minerals Engineering*, 2011. 24(6): p. 565-575.
- [9] Dominy, S., Predicting the unpredictable: evaluating high-nugget effect gold deposits. *Mineral Resource and Ore Reserve Estimation*, 2014: p. 659-678.
- [10] Dominy, S., et al., General considerations of sampling and assaying in a coarse gold environment. *Applied Earth Science*, 2000. 109(3): p. 145-167.
- [11] Petruk, W., *Applied mineralogy in the mining industry*. 2000: Elsevier.
- [12] Cox, J.J., W.W. Valliant, and K.A. Altman. Technical Report on the Hemlo Mine, Marathon, Ontario, Canada. Available from: www.streetinsider.com.
- [13] Marsden, J.O., House, C.I., 2006. *The chemistry of gold extraction*, 2nd Edition, Society of Mining, Metallurgy and Exploration (SME), Littleton (CO), USA, 6.