



مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی پارامترهای موثر بر فروشویی سیانید - گلایسین کانه طلا با روش طراحی
آزمایش‌ها

سعیده علی‌دادی^۱، کیانوش بارانی بیرانوند^{۲*}، محمد حیاتی^۳

۱. فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، گروه معدن، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران، saeedeh.alidadi@gmail.com

۲. دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، گروه معدن، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران، kianoush.barani@gmail.com

۳. استادیار، دانشکده فنی مهندسی، گروه معدن، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران، mohammad_hayaty@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۹ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۳

چکیده

تحقیقات زیادی برای یافتن یک حلال مناسب به جای سیانید در فروشویی طلا انجام گرفته است اما بیشتر روش‌های پیشنهاد شده به علت داشتن مشکلات زیست‌محیطی، فنی و اقتصادی، کمتر به طور وسیع در مقیاس صنعتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اخیراً استفاده از آمینو اسیدها به ویژه گلایسین به عنوان جایگزینی برای سیانید یا به عنوان کمک‌کننده به سیانید و کاهش‌دهنده مصرف آن در فروشویی طلا مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق فروشویی سیانید - گلایسین کانه طلا با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها مورد بررسی قرار گرفت. تاثیر پارامترهای، غلظت اکسیدکننده پراکسید هیدروژن، غلظت سیانید، غلظت گلایسین و درصد جامد بر روی بازیابی طلا مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که موثرترین پارامترها به ترتیب عبارت از درصد جامد، غلظت گلایسین، غلظت سیانید و غلظت اکسیدکننده است. بازیابی طلا با افزایش درصد جامد، غلظت گلایسین و غلظت سیانید کاهش یافته است. بیشترین بازیابی زمانی حاصل شده است که این متغیرها در سطوح پایین خود باشند. در شرایط بهینه در غلظت پراکسید هیدروژن ۲/۴۹ درصد، غلظت سیانید ۱۵۰ گرم بر تن، غلظت گلایسین ۰/۳۵ مول بر لیتر و درصد جامد ۲۵ درصد بازیابی حدود ۸۱ درصد طلا حاصل شده است.

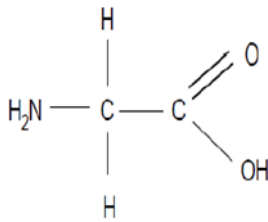
کلمات کلیدی

سنگ معدن طلا، فروشویی سیانیدی، گلایسین، بهینه‌سازی، طراحی آزمایش‌ها.



۱- مقدمه

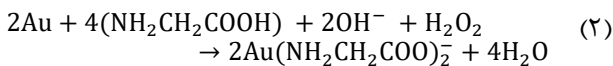
دارویی، تولید خوراک حیوانات، تولید مکمل‌های غذایی و دارویی کاربرد دارد.



شکل ۱- ساختار شیمیایی گلیسین

زمین‌شناسان بیش از ۲۰ نوع آمینو اسید را در سنگ‌های رسوبی شناسایی کرده‌اند. آن‌ها دریافتند که آمینو اسیدها نقش مهمی در انتقال و تمرکز طلا در رسوبات دارند. آن‌ها توانایی آمینو اسیدها را در انحلال طلا مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که طلا به خوبی در آمینو اسیدها حل می‌شود و دما، غلظت، اسیدیته و نوع آمینو اسید از عوامل موثر بر حلالیت طلا هستند [۹].

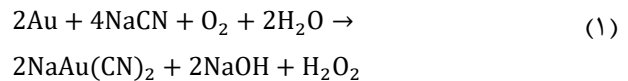
تحقیقات اخیر در استرالیا به ویژه در دانشگاه‌های کترین^۲ و استرالیای غربی^۳ نشان داده است که آمینو اسیدها به تنهایی و به همراه سیانید قادر به فروشویی طلا از نمونه‌های خالص طلا و همچنین کانه‌های طلا هستند [۱۰]–[۱۶]. واکنش انحلال طلا در محلول قلیایی گلیسین در رابطه ۲ آمده است [۱۷]:



فروشویی انتخابی مس از کنسانتره مس- طلا با محلول حاوی گلیسین مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که محلول حاوی گلیسین در حضور پراکسید هیدروژن می‌تواند در ۱۱ تا ۱۰/۵ pH و در دمای اتاق، طی ۴۸ ساعت ۹۸ درصد مس موجود در کنسانتره را حل کند. انحلال آهن و سرب در این شرایط قابل توجه نبوده است. با افزایش غلظت سیانید و غلظت پراکسید هیدروژن انحلال مس به آرامی افزایش پیدا کرده است اما با افزایش درصد جامد انحلال مس کاهش یافته است [۱۸].

فروشویی طلا و مس از فویل خالص طلا و فویل طلا - نقره (۵۰ درصد طلا و ۵۰ درصد نقره) با گلیسین و در حضور پراکسید هیدروژن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که طلا و نقره در شرایط قلیایی و در دمای بین ۲۳ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد در محلول حاوی گلیسین حل

فروشویی^۱ سیانیدی مهم‌ترین و اصلی‌ترین روش انحلال طلا از سنگ معدن آن است. در این روش طلا از سنگ معدن با محلول سیانیدی حل می‌شود و در ادامه طلا حل شده با استفاده از کربن فعال، استخراج و با حلال و یا الکترووینینگ بازیابی می‌شود. انحلال طلا در محلول سیانید سدیم و در حضور اکسیژن مطابق با رابطه ۱ است [۱]:



هر ساله بیش از میلیون‌ها تن، سنگ معدن طلا با استفاده از سیانید، فروشویی می‌شود. در کانادا و استرالیا فروشویی سیانیدی یکی از مهم‌ترین روش‌های انحلال طلا است. در ایران نیاز فروشویی سیانیدی طلا مهم‌ترین روش فرآوری طلا است. مصرف بیش از حد سیانید در معادن طلا، تأثیرات مخرب زیست‌محیطی بر روی آب، حیوانات و گیاهان دارد. از دیگر معایبی که کاربرد سیانید را با محدودیت‌های جدی روبه‌رو کرده است، وجود عناصری مانند مس، آهن، روی، آرسنیک، آنتیموان به همراه طلا است که به وسیله سیانید حل می‌شوند. این عناصر علاوه بر افزایش مصرف سیانید و هزینه‌های فرآیند انحلال، بازیابی انتخابی طلا را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند [۲].

تحقیقات زیادی برای یافتن یک روش مناسب برای جایگزینی فروشویی سیانیدی طلا انجام شده است. در حال حاضر فرآیندهایی از قبیل تیواوره، تیوسولفات، تیوسیانات و هالیدها (کلر، برم و ید)، به عنوان روش‌های جایگزین سیانوراسیون مطرح شده‌اند اما این روش‌ها به علت داشتن مشکلات فنی و اقتصادی، کمتر در مقیاس صنعتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۳]–[۷].

در سال‌های اخیر در استرالیا، تحقیقاتی برای استفاده از آمینو اسیدها به ویژه گلیسین ($\text{NH}_2\text{-CH}_2\text{-COOH}$)؛ به عنوان جایگزینی برای سیانید (یا به عنوان کمک‌کننده به سیانید و کاهش‌دهنده مصرف آن) انجام شده است. آمینو اسیدها ترکیبات ارگانیکی شامل یک گروه کربوکسیل (-COOH) و یک گروه آمین (-NH_2) هستند. عامل متمایز آمینو اسیدهای مختلف، زنجیر جانبی به نام R است که به نوبه خود خواص آمینو اسید را کنترل می‌کند [۸].

شکل ۱ ساختار شیمیایی آمینو اسید گلیسین را نشان می‌دهد. گلیسین به صورت صنعتی تولید می‌شود و در صنایع

² Curtin university
³ Western Australia

¹ leaching

می‌شوند. آهنگ انحلال در ۲۳ درجه سانتی‌گراد پایین است ولی با افزایش دما افزایش یافته است. آهنگ انحلال طلا با افزایش غلظت گلاسیسین، غلظت نقره و pH (تا pH=۱۱) افزایش یافته است [۱۹].

تاثیر یون‌ها، کانی‌های سولفیدی و نوع آمینو اسید بر فروشویی طلا از فویل خالص طلا در حضور پراکسید هیدروژن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که گلاسیسین، هیستدین و آلانین حتی در غلظت‌های پایین (۰/۱ مولار) می‌توانند طلا را حل کنند. آهنگ انحلال با گلاسیسین بیشتر از هیستدین و آلانین بوده است. در حضور یون‌های Cu^{+2} آهنگ انحلال طلا افزایش پیدا کرده است و در حضور کانی پیریت آهنگ انحلال طلا کاهش پیدا کرده است. کاهش آهنگ طلا در حضور پیریت می‌تواند ناشی از آن باشد که بخشی از پراکسید هیدروژن برای اکسیداسیون سطح پیریت مصرف می‌شود و یا اینکه پیریت در نقش یک کاتالیست باعث تجزیه پراکسید هیدروژن شده است [۱۰].

فروشویی طلا، نقره و مس از کنسانتره مس- طلا، کانه‌های اکسیدی مس- طلا و سولفیدی مس طلا با مخلوطی از سیانید و گلاسیسین مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که در حضور گلاسیسین (سیانید به همراه مقداری گلاسیسین) انحلال مس، طلا و نقره به طور قابل توجهی افزایش پیدا کرده است. اضافه کردن گلاسیسین به محلول سیانیدی می‌تواند آهنگ انحلال طلا را تا ۳ برابر افزایش دهد [۲۰].

گلاسیسین در یک محیط قلیایی برای فروشویی فلزات پایه و گران‌قیمت از مدارهای الکتریکی مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان داده است که در اولین مرحله فروشویی، گلاسیسین انحلال فلزات مس، سرب و روی را به فلزات گران‌قیمت ترجیح می‌دهد. در مرحله دوم می‌توان طلا و نقره را با استفاده از گلاسیسین و مقادیر کمی سیانید حل کرد [۱۳].

کانه‌های طلا که حاوی کانی‌های سولفیدی فعال یا کانی‌های با خاصیت احیاکنندگی باشند، اکسیدکننده زیادی مصرف می‌کنند و همین امر ممکن است باعث غیرموثر شدن فرآیند شود. تاثیر اکسیدکننده‌هایی مانند پرمنگنات پتاسیم، پراکسید هیدروژن، کلرات سدیم، یدید پتاسیم و فریک سیانید پتاسیم بر فرآیند فروشویی کانه طلا سولفیدی با گلاسیسین مورد بررسی قرار گرفته است. بیشترین میزان استخراج طلا با پرمنگنات پتاسیم مشاهده شده است. با کمک اکسیدکننده پرمنگنات پتاسیم در ۱/۵ کیلوگرم بر تن گلاسیسین و ۳ کیلوگرم بر تن پرمنگنات، درصد جامد ۳۰ درصد و pH=۱۰/۵ بازیابی

طلا ۸۵ درصد بدست آمده است. این در حالی است که در سیانوراسیون معمولی این کانه در درصد جامد ۳۰ درصد و pH=۱۰/۵ بازیابی ۸۷ درصد بوده است. برای سایر اکسیدکننده‌ها بازیابی طلا در بهترین شرایط فقط ۱۱ درصد بوده است. نسبت بین گلاسیسین و پرمنگنات بسیار بر بازیابی تاثیرگذار بوده است. زمانی که مولاریته پرمنگنات بیشتر از مولاریته گلاسیسین بوده است بازیابی کاهش یافته است زیرا در این شرایط مقادیر اضافی پرمنگنات باعث اکسید شدن گلاسیسین موجود در محلول می‌شود [۲۱].

در بیشتر تحقیقات انجام شده گلاسیسین نسبت به سایر آمینو اسیدها ترجیح داده شده است و آهنگ انحلال بهتری دارد. نتایج نشان داده است که زمانی که از گلاسیسین به تنهایی استفاده می‌شود آهنگ انحلال بسیار کند است. استفاده همزمان سیانید و گلاسیسین تاثیر هم افزایی دارد و حتی در دمای اتاق (بدون نیاز به افزایش دما) بازیابی فروشویی نسبت به شرایط استفاده از سیانید تنها و یا گلاسیسین تنها افزایش چشم‌گیری داشته است و حتی تا سه برابر آهنگ انحلال طلا افزایش یافته است.

به هر حال در زمینه استفاده از گلاسیسین برای فروشویی طلا از سنگ معدن طلا تحقیقات اندکی حتی در سطح بین‌المللی انجام شده است و بسیاری از این تحقیقات بر روی نمونه‌های ورقه خالص طلا و یا فویل خالص طلا انجام شده است و تحقیقات بر روی ماده معدنی معدود است. رفتار فروشویی نمونه خالص طلا با سنگ معدن طلا می‌تواند بسیار متفاوت باشد. معمولاً در کانه طلا کانی‌های سولفیدی حاوی فلزات پایه مانند آهن، مس، سرب و روی وجود دارد که این فلزات مصرف‌کننده سیانید و یکی از عوامل مهم افزایش مصرف زیاد سیانیدند. همچنین در فرآیند انحلال طلا وجود اکسیدکننده ضروری است. اگر کانه حاوی مقادیر زیادی کانی‌های سولفیدی باشد بخش زیادی از اکسیدکننده صرف اکسید کردن سطح سولفیدها می‌شود.

در تحقیقی که در دانشگاه لرستان توسط بارانی و همکاران انجام شده است کاهش مصرف سیانید در فروشویی یک کانه پلی‌متال طلا با استفاده از گلاسیسین مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان داده است که در حضور ۱۵۰۰ گرم بر تن سیانید و بدون گلاسیسین ۷۵ درصد طلا حل می‌شود اما در حضور ۲۰۰ گرم بر تن سیانید به همراه ۰/۵ مول بر لیتر گلاسیسین و در pH=۱۰/۵، حدود ۸۰ درصد طلا حل می‌شود. در این شرایط مصرف سیانید حدود ۸۰ درصد کاهش می‌یابد

مهم‌ترین کانی‌های شناسایی شده بر اساس مقدار فراوانی، کالکوپیریت، کواتز، کلسیت، کائولینیت و گالن است. همچنین کانی‌های گیبسیت، انگلزیت، پیریت و باریت نیز در نمونه شناسایی شده‌اند.

۲-۲-۲- مطالعات SEM

برای شناسایی بهتر فازهای موجود در نمونه، مقاطع صیقلی از نمونه پودری تهیه شد و با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM^۲) مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۳ دو نمونه از تصاویر الکترون برگشتی^۳ تهیه شده با SEM را نشان می‌دهد. به کمک آنالیز EDX^۴ و مقایسه نتایج با آنالیز EDX نمونه‌های استاندارد، فازهای موجود در مقاطع صیقلی شناسایی شدند. در نمونه مورد نظر چند ذره طلا که همگی به درجه آزادی رسیده‌اند (اندازه کوچک‌تر از ۲۰ میکرون) و همچنین مقدار قابل توجهی از کانی‌های گالن و سروزیت شناسایی شد. درگیری گالن و سروزیت با یکدیگر و نیز با مگنتیت، کوولیت و کوارتز در نمونه مشاهده شد. باریت، اسمیت‌زونیت، اسفالریت، تیتانومگنتیت و فلدسپات، سایر کانی‌های شناسایی شده در نمونه‌اند. با توجه به ماهیت تصاویر حاصل از الکترون‌های برگشتی، مناطق حاوی عناصر سنگین‌تر مانند طلا یا سرب با رنگ روشن‌تر دیده می‌شوند.

۲-۲-۳- مطالعات XRF

جدول ۱ نتایج آنالیز XRF نمونه مورد بررسی را نشان می‌دهد. بر این اساس مهم‌ترین اکسیدهای موجود در نمونه، SiO_2 ، Al_2O_3 ، Fe_2O_3 ، PbO است.

۲-۲-۴- مطالعات آنالیز شیمیایی عناصر

مقدار طلا در نمونه‌های جامد به روش قال‌گذاری^۵ و در نمونه‌های محلول حاصل از فروشویی به روش استخراج با حلال دی‌ایزوبوتیل کتون^۶ و سپس خوانش با دستگاه جذب اتمی انجام شد. آنالیز سایر عناصر با دستگاه ICP-OES انجام شد. جدول ۲ نتایج آنالیز شیمیایی نمونه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود کانسنگ مورد مطالعه دارای ۱۳ گرم بر تن طلا، ۱۸/۱ گرم بر تن نقره، ۲۲۶۸ گرم بر تن مس، ۱۷۴۹۰ گرم بر تن روی، ۴۳۵۲۰ گرم بر تن سرب و ۵۹۶۱۴ گرم بر تن آهن است.

[۲۲]. در تحقیق ایشان فقط تاثیر عوامل غلظت گلاسیسین و سیانید مورد بررسی قرار گرفته است و تاثیر سایر عوامل مانند درصد وزنی جامد پالپ و غلظت ماده اکسیدکننده مورد توجه و بررسی قرار نگرفته است. در تحقیق حاضر تاثیر این عوامل و همچنین برهمکنش بین آن‌ها با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها و تحلیل نتایج با روش ANOVA مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی تحقیق بهینه‌سازی عوامل موثر برای کاهش بیشتر مصرف حلال‌های سیانید و گلاسیسین است.

۲- مواد و روش کار

۱-۲- تهیه و آماده‌سازی نمونه

نمونه سنگ معدن استفاده شده در این تحقیق از معدن طلای گندی تهیه شد. این معدن در ۱۳۰ کیلومتری جنوب شرق سمنان و در ۱۰ کیلومتری شمال شرق روستای معلمان و در ۳ کیلومتری شمال جاده معلمان- ترود قرار دارد. کانسار گندی یک کانسار پلی‌متال است. کانی‌سازی در این ناحیه به صورت رگه‌ای است و طلا به شکل انکلوزیون و محلول‌های جامد، داخل کانی‌های سولفور اولیه قرار دارد [۲۳]. یک نمونه به وزن ۱۰۰ کیلوگرم از ترانسه‌های زون پرعیار معدن تهیه شد. با ریفل کردن زیر نمونه‌های ۲ کیلوگرمی از نمونه اصلی تهیه شد. هر یک از نمونه‌های ۲ کیلوگرمی درون آسیای سرامیکی به روش تر تا ۱۰۰ درصد زیر ۲۰۰مش (۷۴ میکرون) خرد شد. برای آزمایش‌های فروشویی هر یک از نمونه‌های ۲ کیلوگرمی آسیا شده، با ریفل کردن به ۱۰ نمونه ۲۰۰ گرمی تقسیم شدند.

۲-۲- شناسایی نمونه

۱-۲-۲- مطالعات XRD

برای شناسایی فازها و کانی‌های موجود در نمونه، آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD^۱) بر روی یک نمونه نماینده انجام شد. در آزمایش XRD اگر درصد وزنی یک فاز در نمونه حدود زیر ۵ درصد باشد آن فاز شناسایی نمی‌شود اما خیلی از فازهای موجود در نمونه به ویژه کانی‌های سولفیدی ممکن است درصد وزنی آن‌ها کمتر از این مقدار باشد. برای رفع این مشکل ابتدا نمونه به کمک جداکننده نلسون پرعیارسازی شده است تا درصد فازهای نمونه که طلا بیشتر در این فازها درگیر است افزایش یابد. یک نمونه از کنسانتره پرعیار شده با جداکننده نلسون به وسیله دستگاه XRD (Stoe, model STADIP, Germany) مورد آنالیز قرار گرفت. شکل ۲ طیف XRD نمونه را نشان می‌دهد. بر اساس پیک‌های شناسایی شده در این طیف

^۱ X-ray diffraction

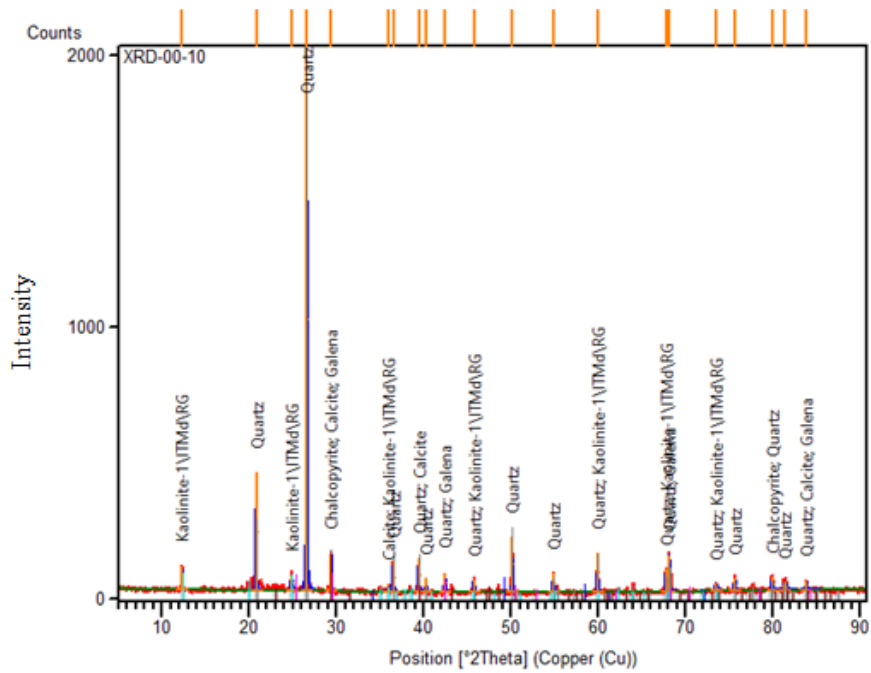
^۲ Scanning electron microscope

^۳ Backscattered electron

^۴ Energy dispersive X-ray analysis

^۵ Fire Assay

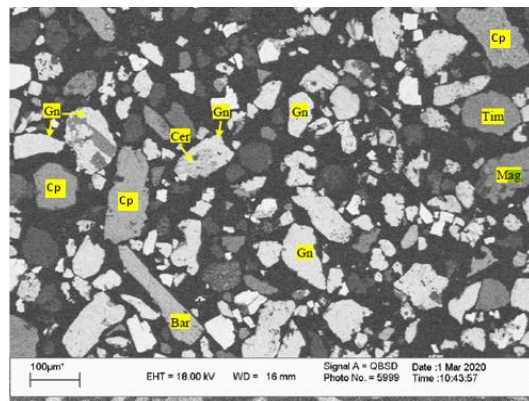
^۶ Diisobutyl Ketone (DIBK)



شکل ۲- طیف آنالیز XRD نمونه مورد بررسی

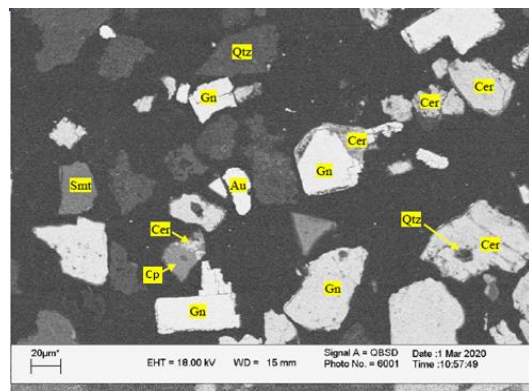
جدول ۱- نتایج آنالیز XRF

درصد وزنی	اکسید	درصد وزنی	اکسید	درصد وزنی	اکسید
۱,۴۴	S	۰,۲۳	MnO	۵۷,۰۹	SiO ₂
۱,۰۲	K ₂ O	۰,۱۸	P ₂ O ₅	۱۴,۵۲	Al ₂ O ₃
۰,۳۲	Na ₂ O	۱,۹۵	ZnO	۱,۷۵	CaO
۸,۰۸	L.O.L	۳,۱۱	PbO	۰,۴۹	MgO
		۰,۲۳	CuO	۰,۴۵	TiO ₂
		۰,۵۵	BaO	۸,۳۳	Fe ₂ O ₃



جدول ۲- عناصر شیمیایی و مقادیر آن‌ها در نمونه

مقدار (گرم برتن)	عنصر	مقدار (گرم برتن)	عنصر	مقدار (گرم برتن)	عنصر
۶,۲	Th	۱۸۸۸	Mn	۱۳,۴۱۶	Au
۲۰	Co	۹,۷	Mo	۱۸,۱	Ag
۲۵	Cr	۵۷	Ni	۴۵۷۵	Al
۲۶۶۸	Cu	۷۲۸	P	۱۲۸	As
۵۹۶۱۴	Fe	۴۳۵۲۰	Pb	۱۹۳۱۰	Ca
۱۲	Le	۱۹۹۱۲	S	۴۴,۵	Cd
۳	Li	۳,۵۳	Sb	۲۲	Ce
۲۱۳۹	Mg	۵۷	V	۵,۹	Sc
۰,۸	Yb	۱۷۴۹۰	Zn	۶	Y



شکل ۳- تصاویر SEM تهیه شده از مقاطع صیقلی (طلای آزاد Au، کالین، Gn، باریت Bar، اسمیت زونیت Smt، سروزیت Cer، اسفالریت Sp، کالکوپریت Cp، کولیت Cv، کوارتز Qtz، مگنتیت Mag، فلدسپار Ssp)

۳-۲- آزمایش‌های فروشویی

در همه آزمایش‌های فروشویی ۲۰۰ گرم نمونه خاک به همراه مقادیر لازم آب مقطر درون بطری‌های وینچستر^۱ ۲/۵ لیتری ریخته شد. حجم آب به مقداری بوده است که پالپی با درصد جامد مورد انتظار فراهم شود. در ادامه pH پالپ با کمک سود سوزآور (Na(OH)) بین ۱۰٫۵ تا ۱۱ (در همه آزمایش‌ها) تنظیم شد. در ادامه عامل فروشویی (سیانید و گلاسیسین) و عامل اکسیدکننده (پراکسید هیدروژن H₂O₂) به مقدار پیش‌بینی شده در شرایط آزمایش، وزن و به محتوی بطری اضافه شد. سرعت دوران بطری غلتان ۱۵۰ دور بر دقیقه بود که شرایط تلاطم مورد نیاز برای هم‌زدن پالپ را تامین کند. بر روی درب بطری یک سوراخ ۵ میلی‌متر تعبیه شد تا هوای

مورد نیاز واکنش تامین شود. شکل ۴ تصویری از دستگاه بطری غلتان به همراه بطری‌ها را نشان می‌دهد. تمام مواد شیمیایی مورد استفاده ساخت شرکت سیگما-آلدריך^۲ و با گرید آزمایشگاهی تهیه شد. زمان هر آزمایش ۴۸ ساعت بود. پس از اتمام هر آزمایش، پالپ فیلتر شده و بخش جامد از محلول لیچ جدا شد. باطله جامد به کمک خشک‌کن در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد خشک شد و بعد از خشک شدن مقدار ۵ گرم نمونه معرف از آن برداشت شد. در نهایت نمونه معرف باطله جامد و ۵ سی‌سی نمونه معرف محلول نهایی فروشویی برای تعیین عیار طلا به آزمایشگاه ارسال شد. درصد انحلال طلا (بازیابی طلا به محلول فروشویی) با کمک موازنه جرم طلا بین محلول حاصل از فروشویی و باطله باقیمانده تعیین شد (رابطه ۳).

طلای موجود در محلول لیچ

$$\text{طلای موجود در محلول لیچ} + \text{طلای موجود در باطله جامد} = \text{درصد بازیابی طلا} \times 100 \quad (3)$$



شکل ۴- انجام آزمایش‌های فروشویی (دستگاه بطری غلتان به همراه بطری‌ها)

۴-۲- طرح انجام آزمایش‌ها

در این تحقیق غلظت گلاسیسین، غلظت سیانید، غلظت اکسیدکننده پراکسید هیدروژن و درصد جامد پالپ به عنوان پارامترهای متغیر در نظر گرفته شده‌اند. سایر پارامترها در همه آزمایش‌ها ثابت بوده‌اند. نتایج تحقیقات قبلی نشان داد که معمولاً با گذشت زمان pH پالپ تغییرات محسوسی دارد به ویژه زمانی که زمان آزمایش زیاد باشد ثابت نگه داشتن pH در یک مقدار ثابت مشکل است. بنابراین در این تحقیق pH به عنوان یک متغیر ثابت و در محدوده ۱۰٫۵ تا ۱۱ در نظر گرفته شد. این تحقیق در ادامه

تحقیق قبلی نویسندگان مقاله انجام گرفته است [۲۲] و بنابراین سطوح پارامترهای متغیر بر اساس نتایج تحقیق قبلی تعیین شد. سطوح بالا و پایین پارامترهای متغیر در جدول ۳ ارائه شده است. طرح انجام آزمایش‌ها به کمک نرم‌افزار طراحی آزمایش (Design Experiments, Version 7) DX7 و به کمک روش سطح-پاسخ (طرح مرکب مرکزی) انجام شد و در نهایت ۲۷ آزمایش برای شناسایی پارامترهای موثر و بهینه‌سازی فرآیند پیش‌بینی شد. در جدول ۴ طرح انجام آزمایش‌ها و نتایج گزارش شده است.

¹ Winchester bottles

² Sigma-Aldrich

جدول ۳- سطوح بالا و پایین پارامترهای متغیر

سطوح					علامت	متغیر
۵	۴	۳	۲	۱		
۲,۲۵	۲	۱,۷۵	۱,۵	۰,۵	A	پراکسید هیدروژن (درصد حجمی)
۲۵۰	۲۲۵	۲۰۰	۱۷۵	۱۵۰	B	سیانید (گرم بر تن)
۰,۶۵	۰,۵۷	۰,۵	۰,۴۳	۰,۳۵	C	گلاسیسین (مول بر لیتر)
۳۵	۳۲,۵	۳۰	۲۷,۵	۲۵	D	درصد جامد پالپ (درصد وزنی)

جدول ۴- طرح انجام آزمایش‌ها و نتایج

استاندارد	شماره	پراکسید هیدروژن (درصد حجمی)	غلظت سیانید (گرم بر تن)	غلظت گلاسیسین (مول بر لیتر)	درصد جامد پالپ (درصد)	بازبایی طلا (درصد)
۴	۱	۲,۵۰	۲۵۰	۰,۳۵	۲۵	۷۳,۶۴
۶	۲	۲,۵۰	۱۵۰	۰,۶۵	۲۵	۷۳,۱۷
۱۶	۳	۲,۵۰	۲۵۰	۰,۶۵	۳۵	۶۴,۶۱
۱۰	۴	۲,۵۰	۱۵۰	۰,۳۵	۳۵	۶۵,۳۲
۲۵	۵	۲	۲۰۰	۰,۵۰	۳۰	۳۲,۴۵
۵	۶	۱,۵۰	۱۵۰	۰,۶۵	۲۵	۷۵,۳۹
۱۷	۷	۱	۲۰۰	۰,۵۰	۳۰	۶۹,۷۰
۷	۸	۱,۵۰	۲۵۰	۰,۶۵	۲۵	۷۰,۵۳
۲۱	۹	۲	۲۰۰	۰,۲۰	۳۰	۷۶,۷۲
۳	۱۰	۱,۵۰	۲۵۰	۰,۳۵	۲۵	۷۱,۵۷
۱۵	۱۱	۱,۵۰	۲۵۰	۰,۶۵	۳۵	۶۴,۷۹
۱۹	۱۲	۲	۱۰۰	۰,۵۰	۳۰	۷۳,۳۰
۱۸	۱۳	۳	۲۰۰	۰,۵۰	۳۰	۷۰,۹۸
۲۶	۱۴	۲	۲۰۰	۰,۵۰	۳۰	۶۲,۷۴
۱	۱۵	۱,۵۰	۱۵۰	۰,۳۵	۲۵	۷۶,۶۱
۲	۱۶	۲,۵۰	۱۵۰	۰,۳۵	۲۵	۸۰,۷۱
۱۲	۱۷	۲,۵۰	۲۵۰	۰,۳۵	۳۵	۵۲,۹۵
۲۰	۱۸	۲	۳۰۰	۰,۵۰	۳۰	۶۰,۷۲
۸	۱۹	۲,۵۰	۲۵۰	۰,۶۵	۲۵	۸۰,۲۹
۹	۲۰	۱,۵۰	۱۵۰	۰,۳۵	۳۵	۷۰,۸۵
۱۴	۲۱	۲,۵۰	۱۵۰	۰,۶۵	۳۵	۷۲,۱۶
۲۳	۲۲	۲	۲۰۰	۰,۵۰	۲۰	۸۱,۰۰
۲۷	۲۳	۲	۲۰۰	۰,۵۰	۳۰	۶۵,۸۹
۲۲	۲۴	۲	۲۰۰	۰,۸۰	۳۰	۶۰,۰۲
۱۳	۲۵	۱,۵۰	۱۵۰	۰,۶۵	۳۵	۷۴,۷۴
۱۱	۲۶	۱,۵۰	۲۵۰	۰,۳۵	۳۵	۷۰,۱۱
۲۴	۲۷	۲	۲۰۰	۰,۵۰	۴۰	۶۰,۱۶

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آنالیز واریانس

طرح انجام آزمایش‌ها و نتایج حاصل شده در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج وارد نرم‌افزار DX7 شده و یک مدل مناسب

انتخاب و به نتایج برازش و آنالیز واریانس روی نتایج انجام شده است. هدف از آنالیز واریانس شناسایی عوامل موثر و اهمیت تاثیرگذاری آن‌ها بر نتایج است. نتایج آنالیز واریانس در جدول ۵ آمده است. برای محاسبه و پیش‌بینی پاسخ‌های آزمایش، مدل ریاضی زیر (رابطه ۴) به وسیله نرم‌افزار ارائه شده است:

$$(Au\ Recovery)^3 = 1.891E + 005 - 1678.44 \times A - 37249.96 \times B - 58838.66 \times C - 66460.78 \times D - 34748.76 \times A \times D + 44246.21 \times A^2 + 34431.84 \times B^2 + 40692.37 \times C^2 + 50865.72 \times D^2 + 25349.31 \times A \times C - 22996.29 \times B \times C \times D + 68516.80 \times A^2 \times C \quad (4)$$

مقدار بیشینه و کمینه فقط ۱۰۰ گرم بر تن اختلاف وجود دارد اما به هر حال هدف بهینه‌سازی عوامل در دامنه محدودتری نسبت به تحقیقات قبلی بوده و در این شرایط کوچکترین خطا در هر یک از مراحل انجام آزمایش‌ها و یا آنالیزها ممکن است خطای قابل ملاحظه‌ای در نتایج ایجاد کند.

برای یک پارامتر هرچه مقدار F بیشتر و مقدار P کم‌تر باشد نشان‌دهنده آن است که اثرگذاری پارامتر مورد نظر بیش‌تر است [۲۴]. بر اساس اطلاعات جدول ۵، پارامترهای درصد جامد، غلظت گلیسین و غلظت سیانید که مقدار P آن‌ها کمتر از ۰/۰۵ است به ترتیب موثرترین پارامترها بر بازیابی طلا هستند و تاثیر آن‌ها با اهمیت است اما غلظت پراکسید هیدروژن که مقدار P آن بیشتر از ۰/۰۵ است تاثیر آن بر بازیابی طلا کم و بی‌اهمیت است. میزان تاثیرگذاری فقط مربوط به بازه مورد بررسی پارامترها در این تحقیق است و قابل تعمیم به همه شرایط نیست و برای مثال نمی‌توان گفت همیشه و در همه شرایط غلظت پراکسید هیدروژن بر بازیابی طلا تاثیرگذار نیست.

جدول ۶ پارامترهای آماری مربوط به اعتبارسنجی مدل را نشان می‌دهد. اگر مقدار p مدل کمتر ۰/۰۵ و مقدار R² بیشتر از ۰/۸ باشد و نقصان برازش بی‌اهمیت باشد، نشان‌دهنده این است که مدل انتخاب شده برای پاسخ‌ها مدل مناسبی است. مقادیر مربوط به پارامترهای یاد شده که در جدول ۵ و ۶ آمده است، نشان می‌دهد که مدل پیشنهاد شده مدل مناسب و معتبری برای پیش‌بینی پاسخ آزمایش‌ها است. معیار دیگر برای ارزیابی مدل، دقت کافی است که معیار نسبت سیگنال به نویز است و میزان مطلوب آن باید بزرگتر از ۴ باشد. مدل پیشنهادی دارای مقدار سیگنال به نویز ۷/۴ است (جدول ۶) که نشان‌دهنده سیگنال کافی و در نتیجه مناسب بودن مدل برای هدایت فضای طرح است. البته باید گفت هر چند که پارامترهای اعتبارسنجی مدل در سطح قابل قبولی قرار دارند اما ایده‌آل نیستند. برای مثال مقدار R² مدل، ۰/۸۲ است که فاصله قابل توجهی با مقدار ایده‌آل ۱ دارد. مهم‌ترین دلیل این امر کم بودن دامنه تغییرات برخی از پارامترهای متغیر است، به ویژه در مورد غلظت سیانید که در محدوده ۱۵۰ تا ۲۵۰ گرم بر تن تغییر کرده است یعنی بین

جدول ۵- نتایج آنالیز واریانس

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	میزان F	میزان P	توضیح
مدل	۶۶۰۳/۸۵	۱۲	۶۲۱۴/۴۷	۵/۳۲	۰/۰۰۲۱	با اهمیت
غلظت پراکسید هیدروژن (A)	۴۰۷/۳۶	۱	۴۰۷/۳۶	۰/۰۱۵	۰/۹۰۴۳	
غلظت سیانید (B)	۳۲۱۷/۲۲	۱	۳۲۱۷/۲۲	۷/۳۸	۰/۰۱۶۷	با اهمیت
غلظت گلیسین (C)	۳۰۲۵/۷۱	۱	۳۰۲۵/۷۱	۶/۱۴	۰/۰۲۶۶	با اهمیت
درصد جامد (D)	۴۷۳۲/۶۲	۱	۴۷۳۲/۶۲	۲۳/۴۸	۰/۰۰۰۳	با اهمیت
AD	۲۶۸۲/۳۷	۱	۲۶۸۲/۳۷	۴/۲۸	۰/۰۵۷۶	
A ²	۳۴۷۰/۵۰	۱	۳۴۷۰/۵۰	۹/۲۵	۰/۰۰۸۸	با اهمیت
B ²	۲۹۳۵/۶۷	۱	۲۹۳۵/۶۷	۵/۶۰	۰/۰۳۲۹	با اهمیت
C ²	۳۲۸۰/۳۹	۱	۳۲۸۰/۳۹	۷/۸۳	۰/۰۱۴۳	با اهمیت
D ²	۳۸۰۷/۵۶	۱	۳۸۰۷/۵۶	۱۲/۲۳	۰/۰۰۳۶	با اهمیت
ABC	۲۱۷۵/۷۷	۱	۲۱۷۵/۷۷	۲/۲۸	۰/۱۵۳۵	
BCD	۲۰۳۷/۶۲	۱	۲۰۳۷/۶۲	۱/۸۷	۰/۱۹۲۵	
A ² C	۲۹۲۴/۰۲	۱	۲۹۲۴/۰۲	۵/۵۵	۰/۰۳۳۶	با اهمیت
باقیمانده	۳۹۸۳/۲۶	۱۴	۱۶۵۲/۱۹			
نقصان برازش	۲۹۷۷/۶۱	۱۲	۱۳۰۰/۵۹		۰/۹۹۴۶	بی اهمیت

جدول ۶- پارامترهای آماری مدل

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
انحراف معیار	۴۰٫۶۵	PRESS	۶۴۲۳٫۱۶
میانگین	۶۹٫۷۹	Adj R-Squared	۰٫۶۶
%C.V	۱۹٫۷۴	Pred R-Squared	۰٫۲۶
R ²	۰٫۸۲	Adeq Precision	۷٫۴۱۵

۳-۲- تاثیر پارامترها بر بازیابی طلا

۳-۲-۱- تاثیر پراکسید هیدروژن بر بازیابی طلا

رابطه ۱ واکنش شیمیایی انحلال طلا در حضور سیانید را نشان می‌دهد. بر اساس این واکنش به ازای هر مول از فلز حل شده طلا، ۲ مول سیانید و تقریباً به ازای هر ۲ مول طلای حل شده یک مول اکسیژن مصرف می‌شود و تقریباً به ازای هر ۲ مول فلز طلا حل شده یک مول H₂O₂ تولید می‌شود. با توجه به اینکه سیانید و اکسیژن برای واکنش طلا در فرآیند سیانوراسیون مورد نیاز است بنابراین سرعت انحلال بستگی به غلظت این دو خواهد داشت. در غلظت‌های کم سیانید، آهنگ انحلال تنها به غلظت سیانید بستگی دارد اما در غلظت‌های زیاد سیانید، آهنگ انحلال مستقل از غلظت سیانید است و تنها بستگی به فشار اکسیژن دارد [۲۵].

رابطه ۲ نیز انحلال طلا را در محلول قلیایی گلیسین نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که وجود اکسیژن باعث افزایش انحلال طلا می‌شود. تحقیقات قبلی نیز نشان داد که علاوه بر اکسیژن وجود اکسیدکننده‌های محلول مانند پراکسید هیدروژن در فروشویی با گلیسین باعث افزایش میزان انحلال طلا می‌شود [۱۰].

هیدروژن پراکسید مطابق رابطه ۵ در محلول شروع به آزاد کردن اکسیژن می‌کند:

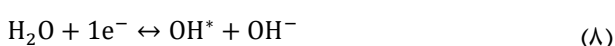
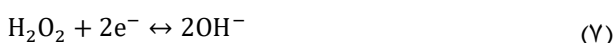
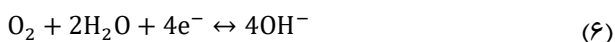


آهنگ تجزیه پراکسید هیدروژن بستگی به غلظت پراکسید، دما، pH و وجود ناخالصی‌ها دارد. همچنین پراکسید هیدروژن می‌تواند در زمان طولانی و تحت تابش نور ماورا بنفش موجب اکسید شدن گلیسین شود [۱۰].

شکل ۵- الف تغییرات بازیابی طلا را با تغییر درصد پراکسید هیدروژن زمانی که سایر پارامترها در سطح میانی خود باشند را نشان می‌دهد. در غلظت پراکسید هیدروژن ۱/۵ درصد میزان بازیابی طلا، ۶۱٫۷۰ درصد است و با افزایش میزان پراکسید هیدروژن به ۲ درصد، بازیابی طلا کاهش یافته است

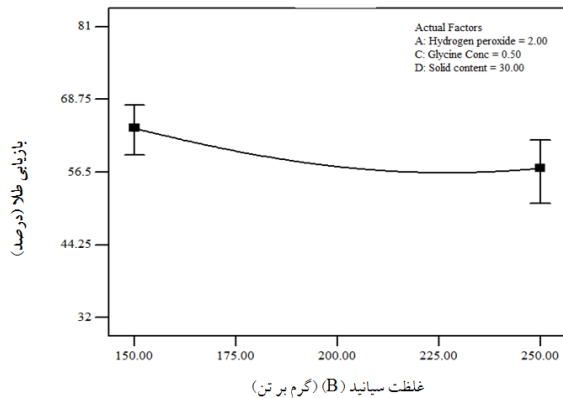
اما پس از افزایش میزان پراکسید هیدروژن به ۲/۵ درصد، میزان بازیابی طلا افزایش یافته و به ۶۱٫۴ درصد رسیده است. کاهش بازیابی طلا در نتیجه افزایش غلظت اکسیژن می‌تواند به این دلیل باشد که در نتیجه اکسید شدن کانی‌های سولفیدی یک لایه Au₂S در سطح ذرات طلا ایجاد شده و در نتیجه، موجب کاهش آهنگ انحلال ذرات طلا می‌شود [۵]، [۲۶].

در یک تحقیق مشابه تاثیر غلظت پراکسید هیدروژن در فروشویی گلیسینی بر بازیابی مس از یک کانه طلا- مس مورد بررسی قرار گرفته است [۱۸]. نتایج نشان داده است که افزایش غلظت پراکسید هیدروژن از صفر به ۱ و ۲ درصد موجب افزایش انحلال مس شده است. در این تحقیق استدلال شده است که واکنش کاتدیک در محلول گلیسین در حضور یون‌های مس و بدون پراکسید هیدروژن به صورت رابطه ۶ است اما در حضور پراکسید هیدروژن واکنش کاتدیک به رابطه ۷ یا رابطه ۸ تغییر می‌کند:

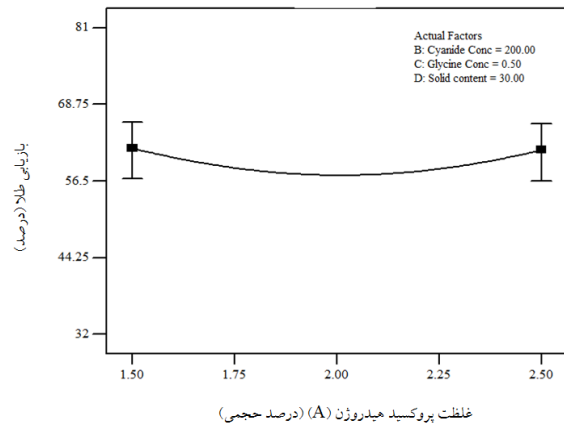


در محلول حاوی پراکسید هیدروژن انحلال مس به دلیل افزایش هم‌زمان آهنگ واکنش کاتودیک افزایش می‌یابد. همچنین انحلال مس به علت وجود رادیکال‌های هیدروژن که دارای پتانسیل احیا استاندارد مثبت بالایی (۲٫۳۸ V) هستند افزایش می‌یابد. دلایل مطرح شده در تحقیق یاد شده در مورد افزایش بازیابی طلا در حضور پراکسید هیدروژن در محدوده ۲ تا ۲/۵ درصد نیز صدق می‌کند.

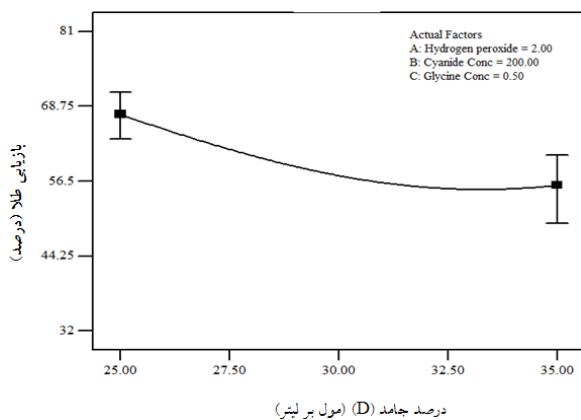
بر اساس نتایج جدول آنالیز واریانس (جدول ۵) و شکل ۵- الف، غلظت پراکسید هیدروژن تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر بازیابی طلا ندارد که ممکن است دلیل آن غلظت پایین سیانید باشد و در غلظت‌های کم سیانید، آهنگ انحلال تنها به غلظت سیانید بستگی دارد.



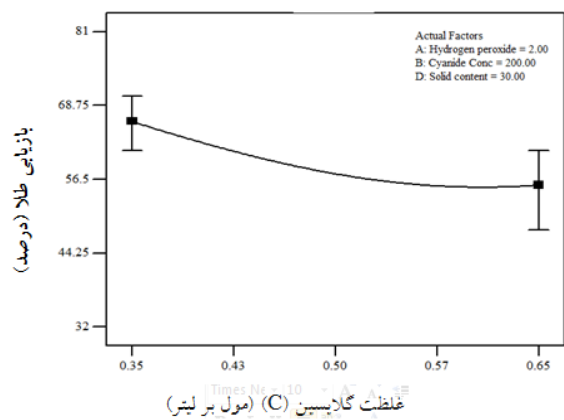
ب



الف



ت



پ

شکل ۵- تاثیر غلظت پراکسید هیدروژن (الف)، غلظت سیانید (ب)، غلظت گلیسین (پ) و درصد جامد (ت) بر بازیابی طلا

دیگر دلایل این کاهش می‌توان به وجود کانی‌های سولفیدی در کانه مورد بررسی اشاره کرد. در نتیجه انحلال کانی‌های سولفیدی و آزاد شدن یون‌های سولفید در محلول سیانیدی یک لایه پسیو از Au_2S بر روی سطوح ذرات طلا تشکیل می‌شود که همین پدیده می‌تواند باعث کاهش در بازیابی طلا شود [۵]، [۲۶]. بررسی‌های بیشتر در مورد تاثیر مولاریته‌های مختلف از دو حلال سیانید و گلیسین بر بازیابی طلا می‌تواند به درک بیشتر این فرآیند کمک کند.

۳-۲-۳- تاثیر غلظت گلیسین بر بازیابی طلا

تحقیقات نشان داده است که فلزاتی مانند مس، کبالت، نیکل، روی، کادمیم و سرب با گلیسین کمپلکس‌های پایدار تشکیل می‌دهند اما در محیط قلیایی فلزاتی مانند آهن، منگنز، کلسیم، کروم و اغلب عناصر لیتوفیل با گلیسین کمپلکس تشکیل نمی‌دهند [۲۷]، [۲۸]. تاثیر گلیسین بر فلوتاسیون کانی‌های کالکوسیت، پیریت و گالن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که گلیسین با کالکوسیت واکنش

۳-۲-۲- تاثیر غلظت سیانید بر بازیابی طلا

شکل ۵- ب تاثیر غلظت سیانید را بر بازیابی طلا در شرایط ثابت؛ غلظت ۰/۵ مول بر لیتر گلیسین، درصد جامد پالپ ۳۰ درصد و پراکسید هیدروژن ۲ درصد را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت سیانید از ۱۵۰ به ۲۵۰ گرم بر تن بازیابی طلا کاهش یافته است. در انحلال طلا به وسیله سیانید طبق رابطه ۱ به ازای هر مول گرم اکسیژن باید ۴ مول گرم سیانید سدیم یا پتاسیم در محلول وجود داشته باشد که نشان‌دهنده این است که یک محلول رقیق سیانید سدیم یا پتاسیم برای انحلال طلا کافی است. محلول‌های غلیظتر نه تنها باعث تسریع انحلال نمی‌شوند بلکه باعث اتلاف بیشتر سیانور می‌شوند. البته در فروروشی کانسنگ طلا فلزات دیگری مانند مس و نقره نیز از مصرف کننده‌های سیانیدند که همین باعث مصرف زیاد سیانید می‌شود. در تحقیق حاضر علاوه بر حلال سیانید گلیسین نیز در محلول وجود دارد و بر همکنش بین این دو حلال که تا حدودی هنوز ناشناخته است، می‌تواند یکی از دلایل کاهش بازیابی طلا با افزایش غلظت سیانید باشد. از

می‌دهد و دو کمپلکس پایدار گلیسین مس تشکیل می‌شود. گالن و پیریت نیز با گلیسین واکنش انجام می‌دهند اما ثابت پایداری کمپلکس‌های سرب گلیسین و آهن گلیسین از کمپلکس‌های مس گلیسین کمتر است [۲۹].

در تحقیق حاضر نیز امکان تشکیل کمپلکس‌های گلیسین با فلزات مصرف‌کننده سیانید مانند مس، روی، نقره و نظایر آن وجود دارد زیرا در محلول پراکسید هیدروژن وجود دارد که می‌تواند سطح کانی‌های سولفیدی را اکسید کرده و در نتیجه اکسیداسیون سطح این کانی‌ها، یون‌های فلزی در محلول آزاد شوند و با گلیسین کمپلکس تشکیل دهند و به این صورت یون‌های سیانید بیشتری برای انحلال طلا در دسترس قرار می‌گیرند و انحلال طلا در حضور گلیسین افزایش می‌یابد.

شکل ۵- پ تاثیر غلظت گلیسین را بر بازیابی طلا در شرایط ثابت غلظت سیانید ۲۰۰ گرم بر تن، درصد جامد پالپ ۳۰ درصد و پراکسید هیدروژن ۲ درصد، را نشان می‌دهد که با افزایش غلظت گلیسین از ۰/۳۵ به ۰/۶۵ مول بر لیتر بازیابی طلا کاهش یافته است. بر اساس محاسبات انجام شده ۰/۳۵ مول بر لیتر گلیسین معادل ۶/۶ کیلوگرم بر تن است که در واقع یک محلول غلیظ از گلیسین است. در غلظت ۲۰۰ گرم بر تن سیانید، افزایش بیشتر گلیسین تاثیر منفی بر بازیابی طلا داشته است. بررسی بیشتر این موضوع و دلایل آن نیازمند شناسایی پدیده‌ها و ترکیبات سطحی روی ذرات کانه است.

۳-۲-۴- تاثیر درصد جامد پالپ بر بازیابی طلا

شکل ۵- ت تاثیر درصد جامد پالپ را بر بازیابی طلا در شرایط ثابت غلظت سیانید ۲۰۰ گرم بر تن، غلظت گلیسین ۰/۵ مول بر لیتر و پراکسید هیدروژن ۲ درصد را نشان می‌دهد که با افزایش درصد جامد بازیابی طلا کاهش یافته است. اطلاعات جدول آنالیز واریانس نیز نشان داد که درصد جامد موثرترین پارامتر بر بازیابی طلا است. در تحقیقات مشابه نیز افزایش درصد جامد پالپ باعث کاهش انحلال فلز شده است که دلیل آن کاهش کارایی انتقال اکسیژن به دلیل افزایش دانسیته پالپ است [۱۸].

۳-۳- تاثیر اندرکنش پارامترها بر بازیابی طلا

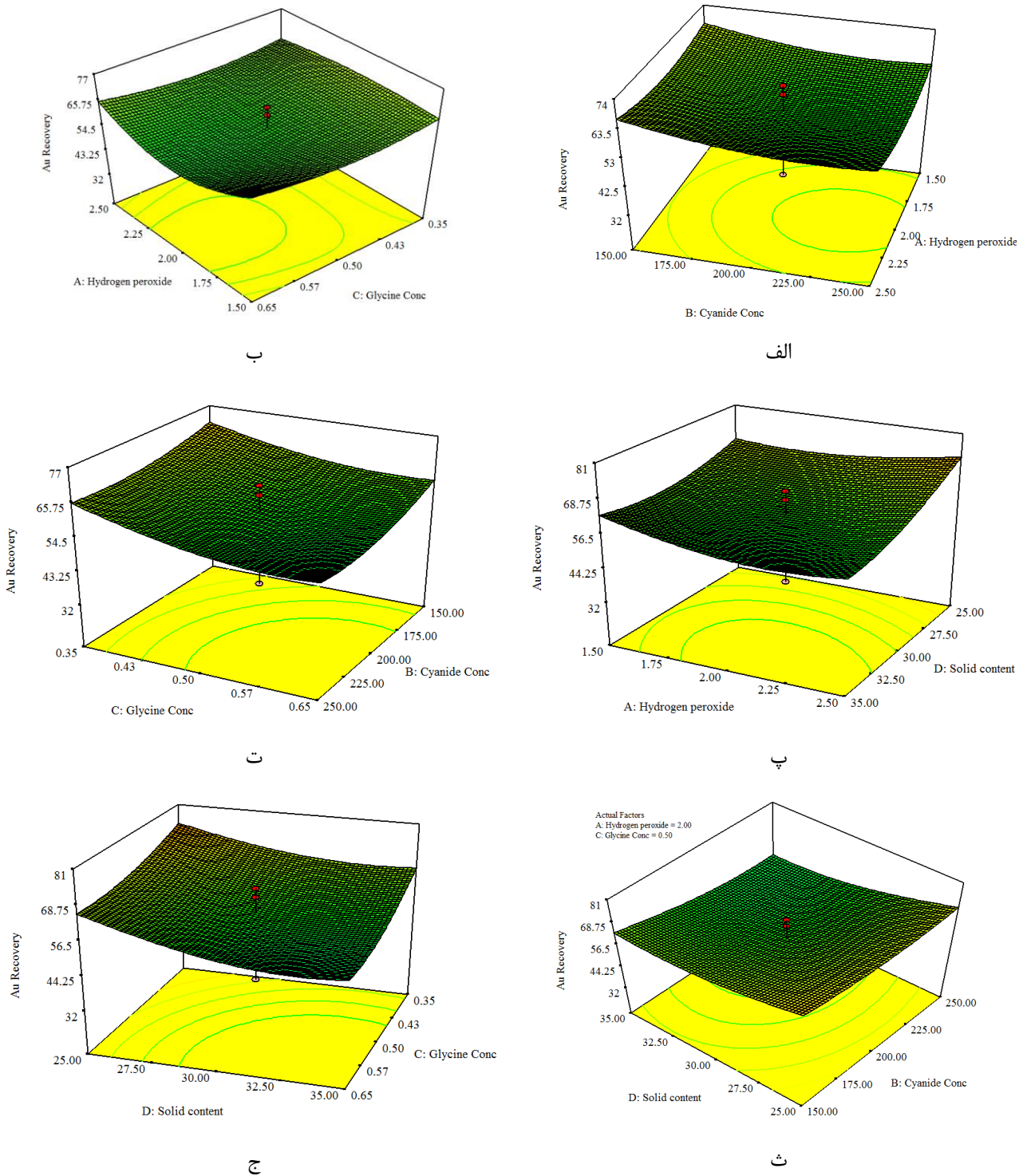
شکل ۶ اندرکنش بین پارامترهای مختلف را بر بازیابی طلا نشان می‌دهد. بررسی اثر برآیند سیانید و پراکسید هیدروژن (شکل ۶- الف) نشان می‌دهد زمانی که هر دوی آن‌ها در سطوح پایینی خودند میزان بازیابی طلا بیشتر از سطوح بالایی

آن‌ها است. بررسی اندرکنش بین غلظت گلیسین و پراکسید هیدروژن (شکل ۶- ب) نیز نشان می‌دهد زمانی که سطوح هر دو پارامتر پایین است، بازیابی طلا بیشتر است و زمانی که هر دو در سطوح میانی‌اند بازیابی طلا کمتر می‌شود.

بررسی اندرکنش بین دو پارامتر غلظت پراکسید هیدروژن و درصد جامد (شکل ۶- پ) نشان می‌دهد زمانی که درصد جامد کم و غلظت پراکسید زیاد است، بازیابی طلا افزایش می‌یابد. به طوری که در ابتدا با افزایش مقدار پراکسید هیدروژن و کاهش درصد جامد پالپ بازیابی طلا با یک افزایش ۳ درصدی از ۶۶/۶۷ درصد به ۶۹/۶۶ می‌رسد. پس از آن با افزایش میزان درصد جامد پالپ بازیابی طلا سیر نزولی دارد به طوری که وقتی میزان درصد جامد پالپ بین ۳۰ تا ۳۲ درصد و میزان پراکسید هیدروژن ۲ درصد است کم‌ترین میزان بازیابی طلا یعنی ۵۷/۶۷ درصد حاصل شده است.

بررسی اندرکنش بین غلظت سیانید و گلیسین بر بازیابی طلا (شکل ۶- ت) نشان می‌دهد زمانی که غلظت گلیسین و سیانید در سطوح پایینی خود قرار دارند (۰/۳۵ تا ۰/۴۳ مول گلیسین، ۱۵۰ تا ۱۷۵ گرم بر تن سیانید) بالاترین مقدار بازیابی طلا (۶۸/۸۶ درصد) حاصل شده است. با افزایش غلظت این دو حلال به سطوح بالای خود بازیابی طلا حدود ۱۱ درصد کاهش یافته است. بررسی مجزای این دو پارامتر بر بازیابی طلا نیز نشان داد که افزایش میزان غلظت این دو پارامتر تاثیر منفی بر بازیابی طلا دارد. نسبت مولی بین دو حلال سیانید و گلیسین بر انحلال طلا تاثیرگذار است و باید بیشتر مورد بررسی قرار گیرد.

اثر برآیند دو پارامتر غلظت سیانید و درصد جامد بر بازیابی طلا (شکل ۶- ث) نشان می‌دهد بازیابی طلا در سطوح پایینی این دو پارامتر، افزایش چشمگیری نسبت به سطوح بالایی آن‌ها دارد، به گونه‌ای که بازیابی طلا در سطوح پایینی این دو پارامتر ۶۸/۳۵ درصد است و این مقدار در سطوح بالایی آن‌ها به ۵۶/۲۷ درصد کاهش یافته است. بررسی اندرکنش غلظت گلیسین و درصد جامد بر بازیابی طلا (شکل ۶- ج) نیز نشان می‌دهد در سطوح پایینی گلیسین (۰/۳۵ تا ۰/۴۳ مول بر لیتر) و درصد جامد پالپ (۲۵ تا ۲۷/۵۰ درصد)، بازیابی طلا نسبت به سطوح بالایی آن‌ها حدود ۱۴ درصد بیشتر است. بررسی مجزای این دو پارامتر بر بازیابی طلا نیز نشان داد که افزایش میزان این دو پارامتر تاثیر منفی بر بازیابی طلا دارد.



شکل ۶- تاثیر اندرکنش پارامترها بر بازیابی طلا: پراکسید هیدروژن و سیانید (الف)، پراکسید هیدروژن و گلیسین (ب)، پراکسید هیدروژن و درصد جامد (پ)، سیانید و گلیسین (ت)، سیانید و درصد جامد (ث) و گلیسین و درصد جامد (ج)

۳-۴- بهینه‌سازی فرآیند

به این اهداف تعیین کرد. سطوح بهینه پارامترها متغیر و پیش‌بینی مقدار بازیابی طلا در این شرایط در جدول ۷ آمده است. برای بررسی صحت شرایط بهینه ۳ آزمایش با شرایط پیشنهادی انجام شده است که نتایج آن در جدول ۸ گزارش

یافتن بهترین شرایطی با کمترین مصرف مواد شیمیایی و بالاترین میزان بازیابی طلا از اهداف اصلی این تحقیق است. با استفاده از روش سطح پاسخ می‌توان شرایط بهینه را برای نیل

شده است. نتایج این آزمایش‌ها حاکی از اختلاف ناچیز مقادیر واقعی بازیابی طلا نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده است. این اختلاف کم، تاییدکننده پیش‌بینی مدل و همچنین سطوح بهینه پارامترها است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با هدف کاهش مصرف مواد شیمیایی تاثیر پارامترهای غلظت اکسیدکننده پراکسید هیدروژن، غلظت سیانید، غلظت گلايسين و درصد جامد بر بازیابی طلا از سنگ معدن طلای گندی سمنان مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که موثرترین پارامترها به ترتیب عبارت از درصد جامد، غلظت گلايسين، غلظت سیانید و غلظت اکسیدکننده. افزایش درصد جامد، غلظت گلايسين و غلظت سیانید بر بازیابی طلا تاثیر منفی داشته‌اند. بیشترین بازیابی در زمانی

حاصل شده است که این متغیرها در سطوح پایین خود باشند. با افزایش درصد جامد از ۲۵ به ۳۵ درصد، بازیابی طلا از ۶۷/۴۲ به ۵۵/۷۷ درصد کاهش یافت. با افزایش غلظت گلايسين از ۰/۳۵ به ۰/۶۵ مول بر لیتر، بازیابی طلا از ۶۶ به کمتر از ۵۶ درصد کاهش یافت. تاثیر این پارامترها بر بازیابی طلا و اندرکنش بین آن‌ها فقط می‌تواند مربوط به محدوده مورد بررسی متغیرها در این تحقیق باشد و قطعاً یک رفتار کلی نیست. در شرایط بهینه در غلظت پراکسید هیدروژن ۲/۴۹ درصد، غلظت سیانید ۱۵۰ گرم بر تن، غلظت گلايسين ۰/۳۵ مول بر لیتر و درصد جامد ۲۵ درصد بازیابی حدود ۸۱ درصد طلا حاصل شده است. در مقایسه با تحقیق قبلی که روی همین نمونه انجام گرفته است، مقدار سیانید ۵۰ گرم بر تن و مقدار گلايسين ۰/۱۵ مول بر لیتر کاهش یافته است درحالی‌که تغییر محسوسی در بازیابی طلا حاصل نشده است.

جدول ۷- شرایط بهینه برای دستیابی به بیش‌ترین میزان بازیابی طلا

بازیابی طلا (درصد)	درصد جامد پالپ (درصد)	غلظت گلايسين (مول بر لیتر)	غلظت سیانید (گرم بر تن)	پراکسید هیدروژن (درصد حجمی)
۸۱/۱۵۲	۲۵	۰/۳۵	۱۵۰	۲/۴۹

جدول ۸- آزمایش‌های انجام گرفته برای اعتبارسنجی شرایط بهینه‌ی پیشنهادی

شماره آزمایش	بازیابی پیش‌بینی شده (درصد)	بازیابی طلای به دست آمده (درصد)	اختلاف مقادیر بازیابی واقعی و پیش‌بینی شده
۱	۸۱/۱۵۲	۸۱/۲	۰/۰۴۸
۲	۸۱/۱۵۲	۸۰/۵	۰/۶۵۲
۳	۸۱/۱۵۲	۸۰/۷	۰/۴۵۲

منابع

- X. Dai and M. I. Jeffrey, "The effect of sulfide minerals on the leaching of gold in aerated cyanide solutions," *Hydrometallurgy*, vol. 82, no. 3-4, pp. 118-125, 2006.
- C. Xia, *Associated sulfide minerals in thiosulfate leaching of gold: problems and solutions*. Queen's University, 2008.
- S. Zheng, Y. Wang, and L. Chai, "Research status and prospect of gold leaching in alkaline thiourea solution," *Minerals engineering*, vol. 19, no. 13, pp. 1301-1306, 2006.
- B. C. Tanda, "Glycine as a lixiviant for the leaching of low grade copper-gold ores," Curtin University, 2017.
- Z. Jingrong, L. Jianjun, Y. Fan, W. Jingwei, and Z. Fahua, "An experimental study on gold solubility in amino acid solution and its geological significance," *Chinese Journal of Geochemistry*, 2002, pp. 71-77.
- G. Hilson and A. J. Monhemius, "Alternatives to cyanide in the gold mining industry: what prospects for the future?," *Journal of Cleaner production*, vol. 14, no. 12-13, pp. 1158-1167, 2006.
- D. M. Muir, "A review of the selective leaching of gold from oxidised copper--gold ores with ammonia--cyanide and new insights for plant control and operation," *Minerals Engineering*, vol. 24, no. 6, pp. 576-582, 2011.
- M. G. Hasab, F. Rashchi, and S. Raygan, "Chloride--hypochlorite leaching and hydrochloric acid washing in multi-stages for extraction of gold from a refractory concentrate," *Hydrometallurgy*, vol. 142, pp. 56-59, 2014.
- S. Örgül and Ü. Atalay, "Reaction chemistry of gold leaching in thiourea solution for a Turkish gold ore," *Hydrometallurgy*, vol. 67, no. 1-3, pp.

- and copper leaching from gold-copper ores and concentrates using a synergistic lixiviant mixture of glycine and cyanide,” vol. 169, pp. 339–345, 2017.
21. E. A. Oraby, J. J. Eksteen, and G. M. O. Connor, “Hydrometallurgy Gold leaching from oxide ores in alkaline glycine solutions in the presence of permanganate,” *Hydrometallurgy*, vol. 198, no. June, p. 105527, 2020.
 22. K. Barani, M. Dehghani, M. R. Azadi, and A. Karrech, “Leaching of a polymetal gold ore and reducing cyanide consumption using cyanide-glycine solutions,” *Minerals Engineering*, vol. 163, p. 106802, 2021.
 23. Z. Rezaeshahzadeh, S. Bouzari, and G. Badakhshanmomtaz, “Relation of gold mineralization with tectonic and fault structures of gandiarea (south of damghan),” *journal of the earth*, vol. 6, no. 22, pp. 107–114, 2012.
 24. D. Azizi, S. Z. Shafaei, M. Noaparast, and H. Abdollahi, “Modeling and optimization of low-grade Mn bearing ore leaching using response surface methodology and central composite rotatable design,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 22, no. 9, pp. 2295–2305, 2012.
 25. F. Habashi, *Textbook of Hydrometallurgy*, Second. Quebec: Laval University, 1999.
 26. L. Lorenzen and J. S. J. Van Deventer, “The mechanism of leaching of gold from refractory ores,” *Minerals Engineering*, vol. 5, no. 10–12, pp. 1377–1387, 1992.
 27. F. H. A. Al-Jeboori and T. A. M. Al-Shimiesawi, “Synthesis and investigation of complex formation between amino acid (glycine) and various metal ion by using spectroscopic methods,” *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, vol. 5, no. 11, pp. 318–321, 2013.
 28. M. Dry, “A preliminary evaluation of alkaline glycine as an alternative to cyanide for gold extraction,” in *Alta Gold-PM Conference*, 2016.
 29. J. S. Hanson, M. Barbaro, D. W. Fuerstenau, A. Marabini, and R. Barbucci, “Interaction of glycine and a glycine-based polymer with xanthate in relation to the flotation of sulfide minerals,” *International Journal of Mineral Processing*, vol. 23, no. 1–2, pp. 123–135, 1988.
 - vol. 15, no. 4, pp. 296–302, 1996.
 10. J. J. Eksteen and E. A. Oraby, “The leaching and adsorption of gold using low concentration amino acids and hydrogen peroxide : Effect of catalytic ions , sulphide minerals and amino acid type,” *Minerals Engineering*, vol. 70, pp. 36–42, 2015.
 11. J. J. Eksteen and E. . Oraby, “A process for precious metals recovery,” PCT/AU2014/ 000877, 2014.
 12. J. J. Eksteen, “The leaching of gold , silver and their alloys in alkaline glycine-peroxide solutions and their adsorption on carbon,” *Hydrometallurgy*, vol. 152, no. May 2015, pp. 199–203, 2014.
 13. E. A. Oraby, H. Li, and J. J. Eksteen, “An alkaline glycine-based leach process of base and precious metals from powdered waste printed circuit boards,” *Waste and Biomass Valorization*, vol. 11, no. 8, pp. 3897–3909, 2020.
 14. E.-S. A. Oraby and M. I. Jeffrey, “An electrochemical study of the dissolution of pure gold and gold-silver alloys in thiosulfate leach solutions,” *Ecs Transactions*, vol. 28, no. 6, p. 237, 2010.
 15. E. A. Oraby, H. Li, and J. J. Eksteen, “An Alkaline Glycine - Based Leach Process of Base and Precious Metals from Powdered Waste Printed Circuit Boards,” *Waste and Biomass Valorization*, 2019.
 16. M. R. Azadi, A. Karrech, M. Attar, and M. Elchalakani, “Data analysis and estimation of thermodynamic properties of aqueous monovalent metal-glycinate complexes,” *Fluid Phase Equilibria*, vol. 480, pp. 25–40, 2019.
 17. M. G. Aylmore, “Alternative lixivants to cyanide for leaching gold ores,” in *Advances in gold ore processing*, Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2005, pp. 501–539.
 18. E. A. Oraby and J. J. Eksteen, “The selective leaching of copper from a gold – copper concentrate in glycine solutions,” *Hydrometallurgy*, vol. 150, pp. 14–19, 2014.
 19. E. A. Oraby and J. J. Eksteen, “The leaching of gold, silver and their alloys in alkaline glycine--peroxide solutions and their adsorption on carbon,” *Hydrometallurgy*, vol. 152, pp. 199–203, 2015.
 20. E. A. Oraby, J. J. Eksteen, and B. C. Tanda, “Gold