

Improving The cyanidation process of gold ore containing sulfide compounds by water treatment and adding sodium ferrate

*Mehdi Alizadeh^{1,2}, Mohsen Alizadeh², Ali Salehi³, Manochehr Mohammadi⁴

1- Associate professor, Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

2-Research Institute for Steel, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

3- Soror Poyan Rastakhiz Co. Isfahan, Iran.

4- Moteh Gold Complex, Iran

Citation: Alizadeh M, Alizadeh M, Salehi A, Mohammadi M. Improving The cyanidation process of gold ore containing sulfide compounds by water treatment and adding sodium ferrate. Metallurgical Engineering 2020; 23(1): 38-48 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2020.118104.1272>

doi: <http://dx.doi.org/10.22076/me.2020.118104.1272>

ABSTRACT

Usually, hydrometallurgy concept is applied in gold extraction process; where, water is the most widely used raw material. Therefore, the quality of water plays a very important role in the process. This work is focused mainly on the effect of water quality on gold leaching process; specifically, when additives were employed. Water in various qualities, alkaline substances (calcium hydroxide and sodium carbonate) and sodium cyanide were used to prepare the leaching solution. The gold ore was characterized by scanning electron microscope; the titration and atomic absorption spectroscopy methods were used to determine the amount of free cyanide and soluble gold, respectively. The results indicated that, by adding sodium ferrate to water and also consider a roasting stage in the process, dramatic change occurred in terms the solubility of gold (from 0.1 to 1.1 mg/l) and free cyanide (from 475 to 510 mg/l). The leaching rate was also affected when sodium ferrate was added to the used water.

Keywords: Leaching, Water, Nano sodium ferrate, Gold, Free cyanide, Sulfide.

Received: 5 December 2019 | Accepted: 27 June 2020

■ ■

* **Corresponding Author:**

Mehdi Alizadeh, PhD

Address: Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Tel: +98 (31) 33915765

E-mail: alizadeh@cc.iut.ac.ir

بهبود فرایند سیانوراسیون کانسنگ طلا حاوی ترکیبات سولفیدی توسط عملیات تصفیه آب و افزودن فرات سدیم

* مهدی علی زاده^۱، محسن علی زاده^۲، علی صالحی^۳، منوچهر محمدی^۴

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

۲- پژوهشگر فولاد دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

۳- شرکت سرور پویان رستاخیز، اصفهان، ایران.

۴- مدیر تحقیق و توسعه مجتمع طلای موله، ایران.

چکیده

در فرایند استحصال طلا به روش هیدرومتالورژی، آب به عنوان پرمصرفی ترین ماده اولیه کاربرد دارد که کیفیت آن می تواند نقش مؤثری بر عملکرد فرایند داشته باشد. بنابراین، هدف از این مقاله شناخت اثر کیفیت آب و حضور اکسیدان فرات سدیم در فرایند لیچینگ سیانیدی کانی طلا سولفیددار است. به همین منظور، فرایند لیچینگ سیانیدی ترکیبی از کانسنگ های حاوی طلا معادن سنجده و چاه خاتون با عیار تقریبی معادل ۱/۲ mg/kg توسط دستگاه بطری چرخان به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط انجام شد. جهت تهیه محلول لیچینگ از آب (با کیفیت های متفاوت)، مواد بازی مختلف (آهک هیدراته و سدیم کربنات) و سیانید سدیم با خلوص بالا استفاده شد. جهت مشخصه یابی خاک از آنالیز صفحه ای و مشخصه اشعه ایکس دستگاه میکروسکپ الکترونی روبشی استفاده شد. به منظور ارزیابی کیفیت آب از آزمون های مختلف جهت شناسایی یون های موجود استفاده شد. مقدار سیانید آزاد و طلای محلول به ترتیب از روش تیتراسیون و طیفسنجی جذب اتمی تعیین شد. نتایج نشان داد که استفاده از آب با سختی پایین حاوی اکسیدان فرات سدیم در لیچینگ سیانیدی طلای حاوی سولفید، مقدار طلای محلول از ۱/۰ mg/l به ۱/۱ و سیانید آزاد محلول از ۴۷۵ mg/l به ۵۱۰ افزایش یافت. همچنین جهت انجام مقایسه استفاده از اکسیدان فرات سدیم بر کاهش اثر حضور ترکیبات سولفیدی موجود در خاک، فرایند تشویه در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۶۰ دقیقه انجام شده است. مشاهده شد که افزودن اکسیدان فرات سدیم به آب علاوه بر اینکه منجر به افزایش سرعت لیچینگ شد، تقریباً نتایج مشابهی با تشویه نمودن کانسنگ طلا حاوی سولفید دارد.

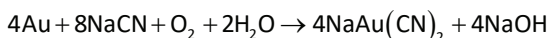
واژه های کلیدی: لیچینگ، آب، فرات سدیم، طلا، سیانید آزاد، سولفید.

دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۴ | پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۰۷

۱. مقدمه

لیچینگ انجام شود. ملاحظه می شود که یکی از عوامل اصلی واکنش دهنده ها، آب است. به طور معمول محلول لیچینگ از ۶۰ درصد آب و ۴۰ درصد جامد تشکیل می شود. بنابراین کیفیت آب مصرفی یکی از عوامل اصلی اثرگذار در این فرایند به شمار می رود (۷). از جمله عواملی که سبب کاهش کیفیت شیمیایی آب های زیرزمینی برای استفاده در صنایع می شود؛ افزایش حضور یون های مزاحم است. این یون ها می توانند در روند فرآوری مواد معدنی تأثیر بگذارند و با ایجاد رسوب یا خوردگی سبب کاهش بازدهی تولید شوند (۸).

رابطه (۱)



لیچینگ (یا فروشویی) یکی از فرایندهای اصلی متالورژی استخراجی است که در گروه هیدرومتالورژی قرار می گیرد (۱، ۲). در سال ۱۸۴۶ برای اولین بار الزرنر^۱ بیان کرد که طلا در محلول سیانید در حضور اکسیژن حل می شود که به این فرایند سیانیدی کردن^۲ نیز می گویند (۳، ۴). تجزیه طلا در محلول سیانیدی در رابطه ۱ نشان داده شده است (۱، ۵، ۶). بر اساس این رابطه جامد طلا دار در محلول حاوی آب و سیانید سدیم (NaCN) قرار می گیرد تا با دمش اکسیژن فرایند

1. Elsener
2. cyanidation

* نویسنده مسئول:

دکتر مهدی علی زاده

نشانی: اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مواد.

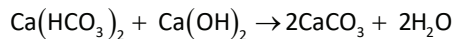
تلفن: ۳۳۹۱۵۷۶۵ (۳۱) ۰۹۸+

پست الکترونیکی: alizadeh@cc.iut.ac.ir

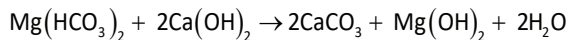
www.SID.ir

http://metalleng.ir/

رابطه (۲)



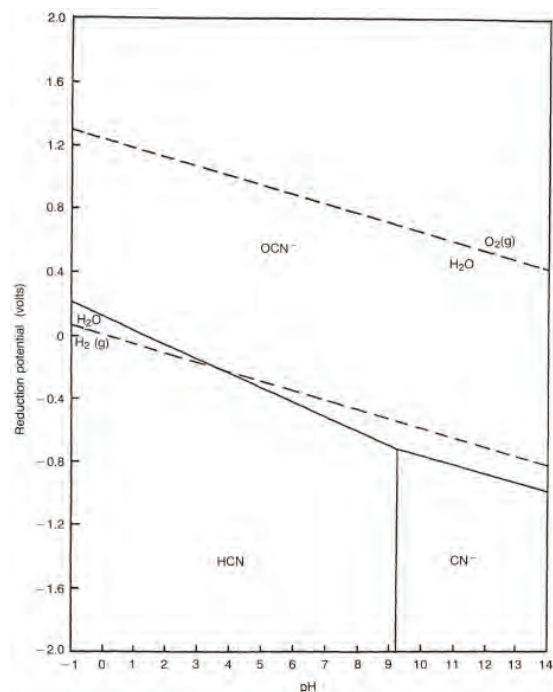
رابطه (۳)



در بسیاری از کارخانه‌های طلا این مشکل وجود داشته است که در ابتدای استخراج از سطح معدن روباز طلا، نوع سنگ اکسیدی می‌باشد و پس از گذشت چندین سال از زمان بهره‌برداری و مصرف لایه‌های رویی، سنگ سولفیدی خود را نشان می‌دهد (۳). این تغییر رفتار معدن در نوع کانی منجر به افزایش مصرف سیانید سدیم می‌شود که دیگر استفاده از فرایند معمول سیانیدی برای استحصال طلا صرفه اقتصادی ندارد (۱۰، ۱۴). در مجتمع طلای موته به دلیل استفاده از خاک اکسیدی معدن چاه خاتون و سولفیدی سنجده تقریباً خاک ترکیبی مورد استفاده قرار می‌گیرد که استحصال طلا با همین فرایند فعلی بسیار پر هزینه است و شاید صرفه اقتصادی کم‌تری داشته باشد. راه‌حل‌های مختلفی جهت مقرون به صرفه کردن استفاده از خاک‌های مقاوم سولفیدی (یا ترکیبی) در فرایند استحصال طلا پیشنهاد شده است که می‌توان به خردایش شدید، تشویه، بیواکسیداسیون، اکسیداسیون با فشار، کلرزی و سایر روش‌های دیگر اشاره نمود. در روش‌های مبتنی بر اکسیداسیون هدف اصلی تبدیل سولفید فلز به سولفات و اکسید فلز است. با این حال، مشخصه شناسایی خاک ترکیبی، مصرف بیش از حد سیانید و اکسیژن آن است (۲). جفری^۴ و همکارش ملاحظه کردند که وجود سولفید (یا هیدروسولفید) در خاک باعث کاهش شدید لیچینگ طلا شده است (۱۱). به طوری که نرخ لیچینگ طلا در غیاب هیدروسولفید ۷ مرتبه بیش‌تر از زمانی است که در خاک ۱ mM سولفید وجود داشته باشد. به همین جهت آن‌ها برای حذف سولفید موجود روی سطح طلا از سرب دو ظرفیتی برای تشکیل رسوبات پایدار PbS استفاده نمودند (۱۱). کریمی و همکارانش رفتار سینتیکی بازیابی طلا و نقره از کانسنگ طلا دار با عیار بالا، با استفاده از اکسیدکننده‌های مختلف هوا و H₂O₂ را بررسی کردند (۱۵). نتایج نشان داد که ثابت سینتیکی انحلال طلا هنگام استفاده ترکیبی از هوا و H₂O₂ بیش‌ترین افزایش را داشته است.

در این مقاله سعی شده است که با استفاده از کاهش سختی آب در راستای بهبود کیفیت آن توسط مواد بازی مختلف و استفاده از اکسیدان قوی فرات سدیم، آب با سختی و میزان املاح مناسب، جهت مصرف در فرایند لیچینگ سیانیدی طلا، بکار گرفته شود و اثر بهبود کیفیت آب بر فرایند لیچینگ سیانیدی خاک طلای حاوی سولفید مورد بررسی قرار بگیرد.

بر اساس شکل ۱ برای جلوگیری از تشکیل گاز سمی HCN حفظ شرایط قلیایی محلول لیچینگ مسأله ضروری است (۶). معمولاً در فرایند لیچینگ طلا برای کنترل pH از شیرآهک استفاده می‌شود که در حدود ۱۰/۵ الی ۱۱ تنظیم می‌شود (۵). اگر چه از آهک هیدراته برای کنترل pH استفاده می‌شود ولی افزودن آهک هیدراته به آب با سختی بالا منجر به انجام واکنش‌های ناخواسته می‌شود. به بیان دیگر، بر اساس رابطه‌های (۲) و (۳) بی‌کربنات‌ها (سختی موقت) موجود در آب با شیرآهک موجود، واکنش می‌دهد و رسوبات بسیار ریز میکرونی CaCO₃ و Mg(OH)₂ ایجاد می‌شوند. این رسوبات ویسکوزیته پالپ را افزایش می‌دهند و منجر به کاهش نرخ انتقال جرمی اکسیژن در پالپ می‌شود (۶، ۹). همچنین به‌طور معمول به دلیل حضور دائمی رسوبات بسیار ریز تشکیل شده در محیط در اثر انجام واکنش‌های شیمیایی بین آب و شیرآهک و وجود سامانه‌های هوادهی از کف در مخزن‌های کربن در پالپ^۲ (CIP)، این ذرات همراه جریان متلاطم پالپ در گردش بوده، بطوریکه احتمال جذب آن‌ها توسط ذرات کربن فعال وجود دارد و به این ترتیب ظرفیت جذب طلا کاهش خواهد یافت (۶، ۱۰، ۱۱). علاوه بر این، ترکیب Mg(OH)₂ خاصیت بافری بسیار شدیدی دارد و مانع از افزایش یا تثبیت pH محلول (یا پالپ) می‌شود (۱۲). افت pH در اثر تشکیل این رسوبات مذکور و یا انجام برخی از واکنش‌های شیمیایی در آب مصرفی، منجر به تشکیل HCN و در نتیجه کاهش سیانید آزاد محلول می‌شود (۱۳). در نتیجه استفاده از آب با سختی بالا در فرایند لیچینگ سیانیدی باعث افزایش مصرف شیرآهک می‌شود.



شکل ۱. پتانسیل احیاء بر حسب pH برای سامانه CN-H₂O (۶).

4. Jeffrey

3. carbon in pulp

جدول ۱. برخی از مشخصات آب ورودی به آسیا تر مجتمع طلای موته

مشخصه	واحد	مقدار	روش انجام آزمون
TDS	ppm	۵۰۸۴	ASTM 2540 C
TH	ppm CaCO ₃	۱۷۴۸	ASTM 2340 C
SO ₄ ²⁻	ppm	۹۴۸	ASTM 4500 SO ₄ C
Cl ⁻	ppm	۳۰۲۰	W4 467
Mg	ppm	۲۱۹	ICP
Ca	ppm	۳۳۳	ICP
pH	-	۷/۵	pH meter

جدول ۲. کدگذاری و شرایط تهیه نمونه‌ها

کد نمونه	فراست سدیم (ml/lit)	شیر آهک با غلظت ۱۰ درصد وزنی (ml/lit)	سدیم کربنات با غلظت ۱۰ درصد وزنی (ml/lit)	هوادهی	pH محلول اولیه
L Lime	-	۵۰/۰	-	-	۱۱/۴۵
LA Lime+Air	-	۳۴/۰	-	✓	۹/۷۷
LScA Lime+ Na ₂ CO ₃ +Air	-	۲۰/۰	۲۰/۰	✓	۱۱/۷۲
FLScA FerSol+Lime+Na ₂ CO ₃ +Air	۰/۲	۲۰/۰	۲۰/۰	✓	۱۱/۷۳
R* Roasting	-	-	-	-	۷/۵۰
DWL Distilled Water+ Lime	-	۶/۰	-	-	۱۰/۹۱
FC Factory conditions	-	-	-	-	۷/۵۰

۲. مواد و روش تحقیق

باقیمانده در ته ظرف جدا شد. در برخی از آزمون‌ها به‌منظور بررسی اثر دمش هوا در آب از پمپ هوا با ظرفیت هوادهی ۷۰ لیتر در هر دقیقه، فشار هوادهی ۰/۰۳ میلی پاسکال و قدرت موتور ۵۰ وات به مدت ۳۰ دقیقه استفاده شد. در رابطه با نمونه R هیچ افزودنی به پالپ یا آب اضافه نشده است و تنها نمونه جامد طی فرایند تشویه در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه قرار گرفته است. در نمونه FC محلول مشابه فرایند معمول در مجتمع طلای موته طراحی شده است (مخلوط آب فرایند بدون هیچ تغییری با خاک). جهت انجام فرایند لیچینگ و ارزیابی هر یک از محلول‌های آبی تهیه‌شده در شرایط واقعی، نیاز به نمونه‌برداری از مواد

برای انجام آزمون‌های مختلف جهت ارزیابی اثرگذاری کیفیت آب بر فرایند لیچینگ طلا از آب ورودی به آسیای تر (آب فرایند) مجتمع طلای موته نمونه‌گیری انجام شد که برخی از مشخصات آن در جدول ۱ بیان شده است.

جهت تهیه نمونه‌های مختلف، ابتدا ۱ لیتر از آب ورودی به آسیا (آب فرایند) درون بشر با حجم ۱ لیتر ریخته و روی هم‌زن مغناطیسی قرار داده شد. در هر نمونه با افزودن مواد مشخص‌شده در جدول ۲ به مدت ۳۰ دقیقه در دمای محیط عملیات اختلاط انجام شد. در نهایت پس از گذشت ۳۰ دقیقه از پایان انجام فرایند اختلاط، آب تصفیه‌شده با pH بالا از لجن

جدول ۳. ترکیب شیمیایی جامد تهیه شده

ترکیب/عنصر	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	SO ₃	Na ₂ O	Au	Cu	Ag
واحد	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	ppm	ppm	ppm
مقدار	۶۶/۹	۱۳/۶	۱/۷	۴/۴	۱/۴	۱/۷	۳/۵	۴/۱	۱/۲	۲۵	۰/۱۸

جدول ۴. نتایج آزمون دانه بندی نمونه جامد جدا شده از سرریز هیدروسیکلون

نمونه	۱۶۰ مش (۱۰۶ میکرون)	۲۰۰ مش (۷۵ میکرون)	۲۳۰ مش (۶۳ میکرون)
سرریز هیدروسیکلون	۸/۹	۱۶/۸	۲۲/۲
نتیجه	۷۷/۸ درصد وزنی کم تر از ۶۳ میکرون		

بشر شیشه‌ای کاملاً شفاف ریخته و حدود ۰/۵ میلی لیتر از معرف ردانین (محلول پارا دی متیل آمینو بنزیلیدین رادنین در استن) به آن افزوده شد. سپس به محلول آماده شده به آرامی نیترات نقره افزوده می شود تا با تشکیل کمپلکس نقره با سیانید، تغییر رنگ دیده شود.

۳. نتایج و بحث

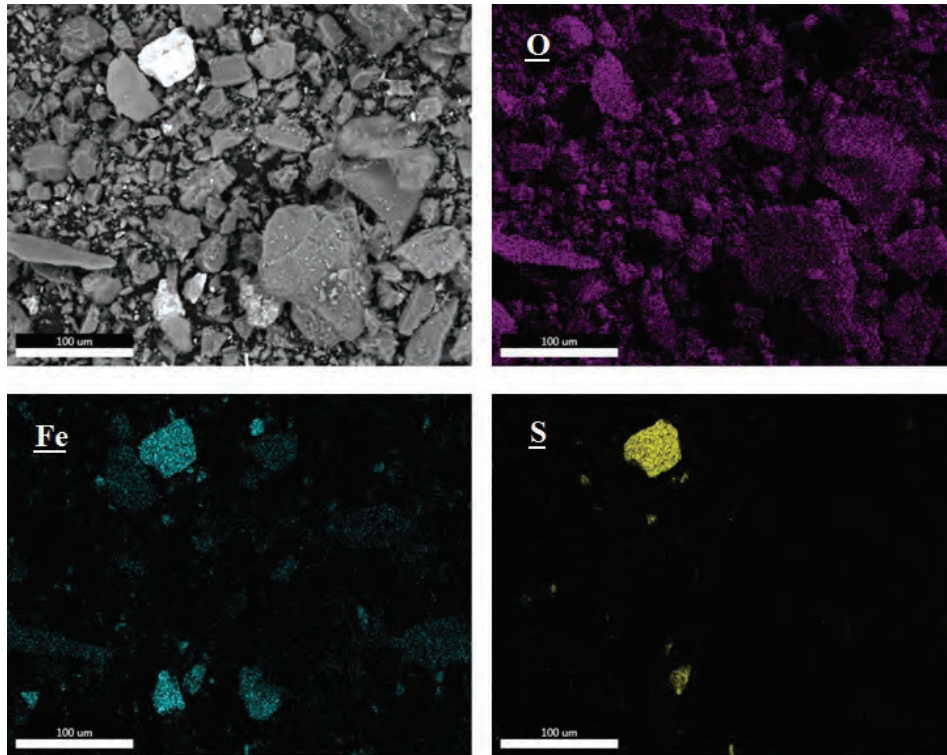
بررسی نمونه جامد و آب

تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی با آنالیز صفحه‌ای عنصری نمونه جامد در شکل ۲ نشان داده شده است. وجود عناصر گوگرد و آهن، حضور ترکیبات سولفیدی را تأیید می نماید. بنابراین با توجه به آنالیز عنصری توسط میکروسکپ الکترونی روبشی، مشخص است که تکه‌های براق موجود در تصویر حضور فازهای سولفیدی حاوی آهن را نشان می دهند. همچنین آزمون مشخصه یابی اشعه ایکس (EDS) از محل های براق موجود در تصاویر SEM نمونه خاک انجام شد که نتیجه آن در شکل ۳ نشان داده شده است. طبق نتایج به دست آمده حدس زده می شود که قسمت های روشن در تصویر SEM بیانگر وجود فاز پیریت (FeS₂) در خاک است.

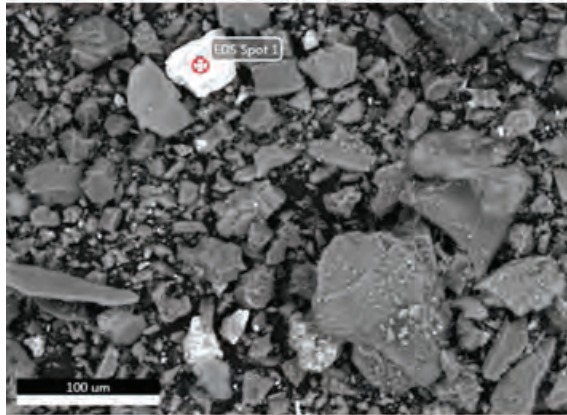
در جدول ۵ سختی کل برای تمامی نمونه های آب تهیه شده، مشخص شده است. بطور کلی مشاهده می شود که افزودن شیرآهک به آب باعث حذف کامل منیزیم گردیده است. در نمونه L که تنها از شیرآهک جهت کاهش سختی آب استفاده شده، منیزیم آن کاملاً حذف و کلسیم باقی مانده است. در روش کاهش سختی توسط فرایند آهک زنی، سختی کلسیمی وقتی می تواند به صورت کربنات کلسیم از محیط خارج شود که یون CO₃²⁻ در محیط وجود داشته باشد. افزودن قلیا مانند شیرآهک یا سود سوزآور باعث تبدیل بی کربنات

جامد حاوی طلا است. به این منظور پالپ ۴۰ درصد وزنی جامد با pH حدود ۶/۵ و چگالی ۱/۳۳ کیلوگرم بر لیتر از سرریز هیدروسیکلون مجتمع طلای موته نمونه برداری شد. به دلیل اینکه نمونه پالپ تهیه شده با استفاده از آب کارخانه تهیه شده است، بنابراین لازم است که جهت برطرف نمودن نمک های محلول ناشی از حضور آب کارخانه فرایند شستشو مواد جامد با آب مقطر انجام شود. به همین منظور پس از عبور پالپ از کاغذ صافی و جدایش مواد جامد از آب، مواد باقی مانده روی کاغذ صافی سه مرتبه توسط آب مقطر شستشو داده شد. بعد از شستشوی کامل، مواد جامد درون خشک کن به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد خشک شد. نتایج ترکیب شیمیایی و دانه بندی نمونه جامد تهیه شده به ترتیب در جداول ۳ و ۴ مشخص شده است. علاوه بر این مورفولوژی ذرات و نحوه توزیع اندازه ذرات خاک توسط میکروسکپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین جهت مشخص نمودن حضور گوگرد در نمونه جامد از تجهیزات جانبی SEM شامل آنالیز صفحه ای (Map) و مشخصه اشعه ایکس (EDS) بهره گرفته شد.

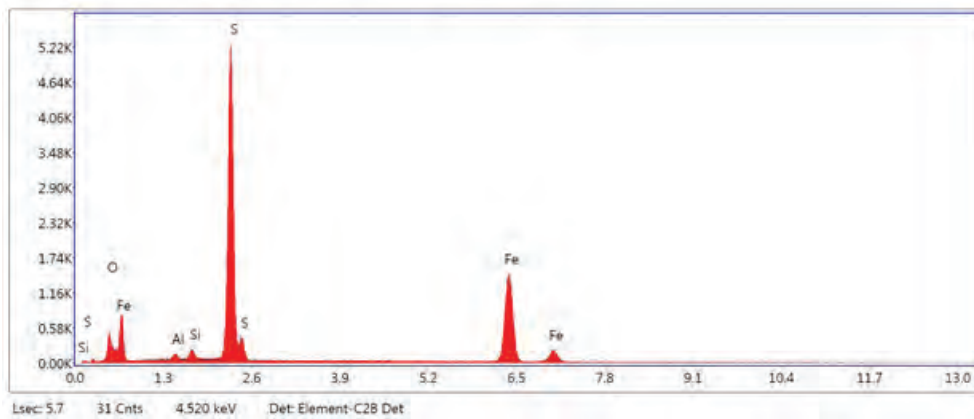
برای انجام فرایند لیچینگ نمونه های جامد ۴۰۰ گرمی درون بطری های شیشه ای ریخته و ۶۰۰ میلی لیتر از نمونه آب های تهیه شده به آن ها اضافه و روی دستگاه بطری غلتان هم زده شد و در صورت نیاز به تنظیم pH، آهک هیدراته به محلول افزوده شد. علاوه بر این، مقدار ۰/۳۲ گرم سیانور ۹۸ درصد به هر نمونه افزوده و در ادامه در زمان های مختلف دستگاه بطری غلتان متوقف و قسمت جامد از محلول جدا شد. برای ارزیابی مقدار سیانید آزاد و طلای موجود در محلول به ترتیب از روش های تیتراسیون و طیف سنج جذب اتمی (AAS) استفاده شد. تیتراسیون سیانید به این صورت است که ابتدا ۵۰ میلی لیتر از محلول جدا شده از جامد، درون



شکل ۲. آنالیز نقشه عنصری توسط SEM از نمونه جامد.



Element	Weight %	Atomic %
OK	6.23	14.73
AlK	0.77	1.08
SiK	1.04	1.41
SK	40.76	48.10
FeK	51.20	34.68



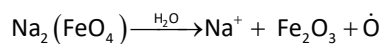
شکل ۳. مشخصه یابی اشعه ایکس (EDS) از ناحیه براق مشخص شده در تصویر SEM نمونه خاک.

جدول ۵. سختی آب در نمونه‌های مختلف

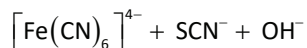
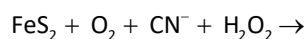
نمونه	سختی کل (ppm CaCO ₃)	Ca (ppm)	Mg (ppm)
L	۱۸۰۱	۷۲۰	۰
LA	۱۳۹۴	۵۵۷	۰
LSCA	۴۰۰	۱۶۰	۰
FLSCA	۴۰۰	۱۶۰	۰
DWL	۳۶۱	۱۴۴	۰
FC	۱۷۴۸	۳۳۳	۲۱۹

در رابطه (۵) مشخص است، هنگامی که فرات سدیم در محیط آبی قرار می‌گیرد، منجر به تشکیل رادیکال آزاد اکسیژن (O[•]) می‌شود که خاصیت اکسیداسیونی بسیار قوی دارد (۱۶). بنابراین با دسترس بودن اکسیژن کافی، اکسیداسیون کانی سولفیدی (مانند پیریت) طبق رابطه (۶) انجام می‌شود که با توجه به قلیلیای بودن محیط و در نتیجه حضور سیانید به صورت یون آزاد در محلول، محصول تیوسیاناتات (SCN⁻) تشکیل می‌شود. این محصول با اکسیژن محلول در آب طبق رابطه (۷) واکنش می‌دهد که منجر به آزاد شدن H⁺ می‌شود. در نتیجه حضور اکسیدان در محیط سیانوراسیون منجر به کاهش pH می‌شود (۴، ۱۱). بنابراین با افزودن اکسیدان به دلیل کاهش pH نیاز به مصرف مواد بازی بیشتر خواهد شد. با این وجود، به دلیل ارزان قیمت بودن مواد بازی (مانند آهک هیدراته و سدیم کربنات) این مسأله نمی‌تواند نقطه ضعفی برای استفاده از اکسیدان در محیط لیچینگ طلا به حساب بیاید.

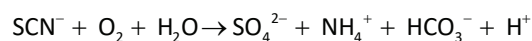
رابطه (۵)



رابطه (۶)



رابطه (۷)



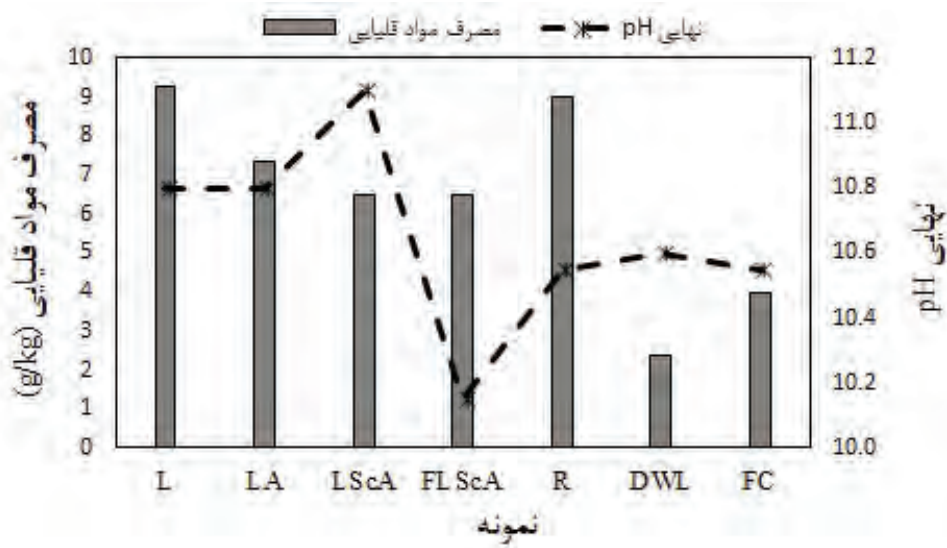
شکل ۵ مقدار سیانید آزاد (CN⁻) را در هر محلول پس از اتمام فرایند لیچینگ نشان می‌دهد. واضح است که در شرایط کارخانه (FC) به دلیل غلظت بالای املاح آب، سیانید آزاد کم‌تری (حدود ۴۷۰ mg/l) نسبت به سایر نمونه‌ها در محلول وجود داشته است. مقدار سیانید آزاد در هنگام استفاده از آب مقطر (نمونه DWL) ۵۰۰ mg/l به دست آمده است که نسبت به شرایط استفاده از آب فرایند (نمونه FC)

به کربنات می‌شود و یون کربنات در دسترس قرار می‌گیرد؛ اما زمانی که شیرآهک افزوده شد، یون کلسیم باعث سختی غیر کربناتی می‌شود که بایستی برای رفع این مشکل از سودا اش (سدیم کربنات) استفاده نمود تا یون کربنات لازم در دسترس قرار بگیرد (۸). البته برای کاهش سختی کلسیمی (غیر کربناتی) می‌توان از سود هم استفاده نمود با این تفاوت که سود قیمت بالاتری دارد و همچنین بر فرایند لیچینگ و محیط‌زیست نیز تأثیرات منفی می‌گذارد. ملاحظه می‌شود که در نمونه LSCA افزودن سدیم کربنات همراه با شیرآهک در مقایسه با نمونه L که بدون سدیم کربنات است، باعث شده که سختی به شدت آفت نماید.

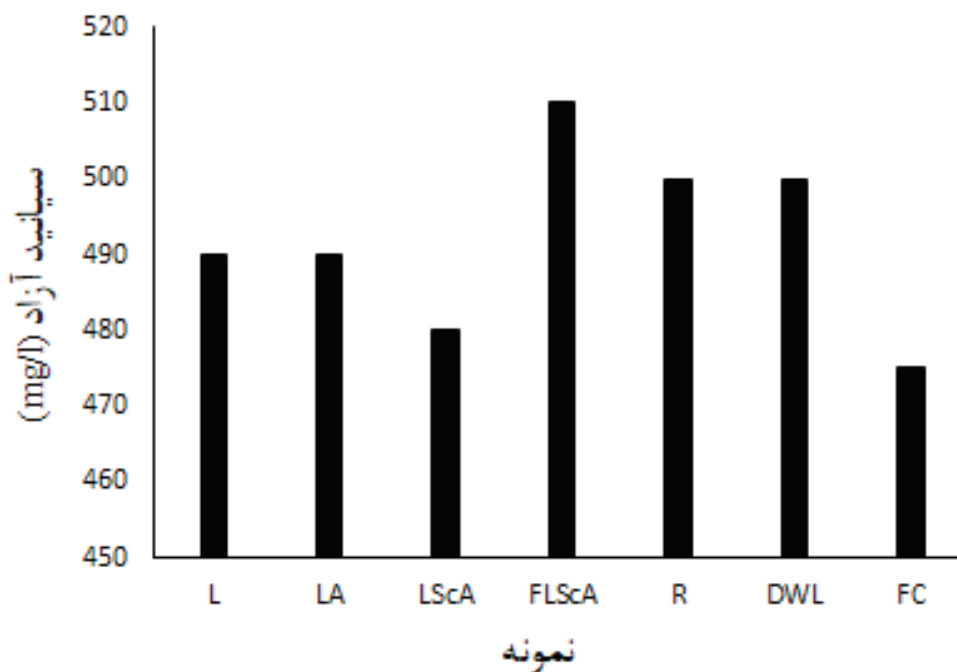
بررسی فرایند لیچینگ

معیار مصرف مواد بازی در فرایند لیچینگ طلا جهت رسیدن به pH حدود ۱۱ است تا از انتشار گاز سمی HCN جلوگیری شود (شکل ۱). در شکل ۴ مقدار مصرف مواد بازی به ازای هر کیلوگرم ماده جامد در نمونه‌های مختلف مقایسه شده است. همچنین منحنی مقدار pH نهایی پالپ پس از اتمام فرایند لیچینگ برای هر نمونه رسم شده است. کم‌ترین مصرف مواد بازی در نمونه تهیه شده با آب مقطر است. در آب مقطر به دلیل اینکه آب عاری از یون‌های مزاحم است؛ لذا مقدار مواد بازی بسیار کمی نیاز شده تا pH افزایش یابد. با مقایسه نمونه‌های L با LA می‌توان به این موضوع پی برد که انجام هوادهی به شدت بر افزایش pH یا کاهش مصرف قلیا مؤثر بوده است. این موضوع ناشی از کاهش گاز CO₂ محلول در آب است. وجود گازهای محلول در آب مانند CO₂ علاوه بر اینکه باعث افزایش H⁺ می‌شود، از سویی دیگر باعث تجزیه شیرآهک نیز خواهد شد (۸).

با مقایسه روند pH نهایی محلول در دو نمونه LSCA و FLSCA واضح است که استفاده از اکسیدان فرات سدیم باعث کاهش pH شده است. این موضوع به حضور اکسیدان فرات سدیم در محلول و سولفید در خاک ارتباط دارد. همان‌طور که



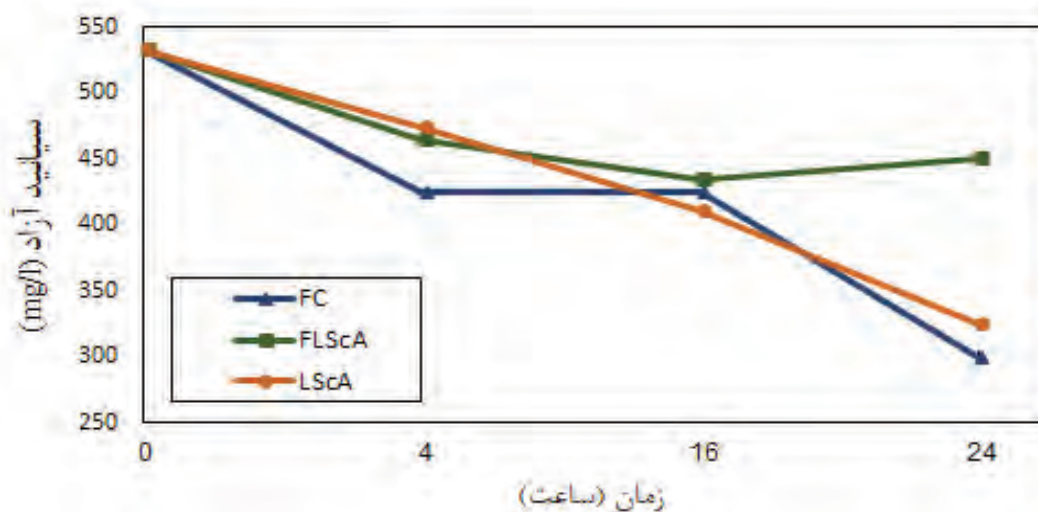
شکل ۴. مصرف آهک هیدراته در فرایند لیچینگ.



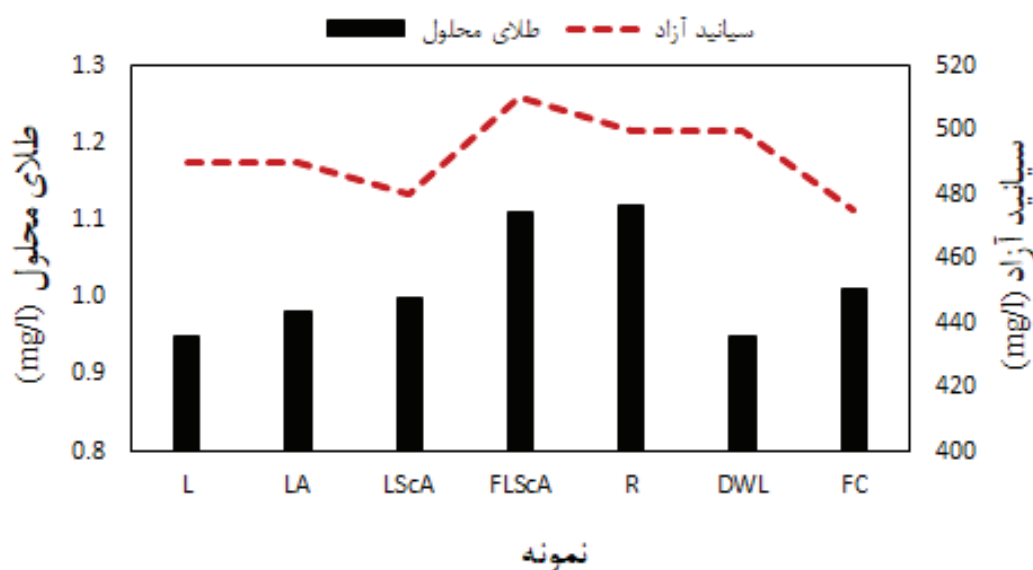
شکل ۵. مقایسه سیانید آزاد محلول در نمونه‌های مختلف.

محلول) را دارا می‌باشد، ناشی از انجام فرایند تصفیه آب و افزودن اکسیدان فرات سدیم است. به عبارت دیگر با توجه به جدول ۵ مشخص است که هر دو نمونه LSCA و FLSCA میزان سختی آب مشابهی دارد، ولی افزودن فرات سدیم به نمونه FLSCA منجر به افزایش سیانید آزاد محلول از ۴۸۰ به ۵۱۰ شده است. این موضوع ناشی از آن است که در صورتی که اکسیژن کافی در محیط وجود نداشته باشد، سولفید موجود در محیط قلیایی تبدیل به یون هیدروسولفید

خیلی بیش‌تر است. این مطلب گویای اثر منفی آب با املاح بالا (یا آب شور) مورد مصرف در کارخانه برای فرایند لیچینگ طلا بر مصرف سیانید را کاملاً نشان می‌دهد. با این وجود به نظر می‌رسد که در کنار استفاده از فرایند تصفیه آب، افزودن مواد اکسیدان اثر مثبت قابل توجهی داشته است. همان‌طور که مشخص است، بهترین مقدار سیانید آزاد محلول در نمونه‌های FLSCA و R اندازه‌گیری شده است. در نمونه FLSCA که کم‌ترین سیانید مصرفی (یا بیش‌ترین سیانید آزاد



شکل ۶. تغییرات مقدار سیانید آزاد محلول نسبت به زمان‌های مختلف فرایند لیچینگ.



شکل ۷. مقایسه طلای محلول و سیانید آزاد در نمونه‌های مختلف.

سیانید آزاد محلول در زمان‌های مختلف برای سه نمونه FC، LScA و FLScA در شکل ۶ مقایسه شده است. مشخص است که مقدار تغییرات سیانید آزاد در FLScA در زمان‌های متفاوت نسبت به دو نمونه دیگر تغییر چندانی نداشته است. این در حالی است که در FC و LScA تغییرات سیانید آزاد از زمان شروع واکنش بسیار سریع و روند رو به کاهشی را نشان داده است. بنابراین، در صورت عدم حضور اکسیژن کافی در محلول و وجود ترکیبات سولفیدی در محیط قلیایی سیانوری باعث مصرف اکسیژن و سیانید می‌شود و نرخ بازدهی لیچینگ سیانیدی طلا را کاهش می‌دهد (۱۷). کاهش سیانید آزاد در

می‌شود و در نهایت سبب تشکیل لایه پسیو (غیرفعال) Au_2S روی سطح طلا می‌شود (۴). تشکیل لایه پسیو به دلیل اینکه خود مصرف‌کننده سیانید است علاوه بر اینکه منجر به افزایش مصرف سیانید می‌شود، بلکه سرعت لیچینگ را به شدت کاهش می‌دهد. مشابه رابطه (۶)، چنانچه در محیط اکسیژن کافی وجود داشته باشد (استفاده از اکسیدان)، Au_2S تشکیل شده با اکسیژن موجود در محیط واکنش می‌دهد تا لایه پسیو سولفیدی از بین برود و یون کمپلکس سیانیدی طلا تشکیل شود (۱۵). جهت بررسی تأثیر کیفیت آب و افزودن اکسیدان فرات سدیم بر سرعت لیچینگ طلا، مقدار

۴. نتیجه‌گیری

با بررسی خاک مورد استفاده در مجتمع طلای موته و آب مصرفی مشاهده شده که خاک مورد استفاده ترکیبی از ترکیبات اکسیدی و سولفیدی است که ترکیبات سولفیدی موجود به شدت بر مصرف سیانید مؤثر است. علاوه بر این آب مورد مصرفی سختی بسیار بالایی دارد که جهت انجام فرایند لیچینگ در محیط بازی با ترکیب شدن با شیرآهک لجن زیادی تولید می‌نماید و فرایند را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین با تصفیه و افزودن مواد نانو اکسیدان به آب و استفاده در فرایند لیچینگ سیانیدی خاک طلای ترکیبی نتایج زیر به‌دست آمد:

- ۱- افزودن شیرآهک و سدیم کربنات به آب باعث شد که سختی کل از CaCO_3 ppm ۱۸۰۰ به ۴۰۰ کاهش یابد.
- ۲- با مقایسه نمونه‌های مشابه ملاحظه شد که دماش هوا در آب باعث افزایش pH و در نتیجه مصرف عامل بازی کم‌تر شده است. این در صورتی است که حضور ماده اکسیدان فرات سدیم منجر به افت pH شده است.
- ۳- در استفاده از آب مقطر و آب تصفیه‌شده به همراه اکسیدان فرات سدیم مشاهده شد که مقدار سیانید آزاد از 475 mg/l به حدود 500 mg/l افزایش یافته است.
- ۴- افزودن فرات سدیم به محلول باعث تداخل در ایجاد یون‌های کمپلکس طلا در محلول نشده است. به عبارتی، در نمونه FLSCA مقدار بازیابی طلای محلول نسبت به FC (شرایط کارخانه) از $1/0 \text{ mg/l}$ به $1/1$ افزایش یافته است.
- ۵- در نمونه R که نمونه جامد پس از تشویه در فرایند لیچینگ با آب فرایند مورد بررسی قرار گرفته، مشاهده می‌شود که بیش‌ترین طلای محلول با وجود تقریباً میزان سیانید آزاد حدود 500 ppm در این نمونه ایجاد شده است.
- ۶- نتایج حاکی از آن است که با اعمال عملیات تصفیه آب و افزودن اکسیدان فرات سدیم می‌توان مقدار طلا و سیانید آزاد محلولی را به‌دست آورد که با فرایند تشویه به‌دست آمده است. علاوه بر این مشاهده شد که استفاده از آب با سختی پایین و افزودن اکسیدان فرات سدیم به آن باعث افزایش سرعت لیچینگ می‌شود.

نمونه FC با گذشت زمان نسبت به نمونه LSCA می‌تواند ناشی از تشکیل رسوبات اضافی (به‌دلیل واکنش آب سخت با آهک هیدراته) است. طبق روابط (۲) و (۳) در صورت استفاده از آب سخت و افزودن آهک هیدراته به آن، رسوبات CaCO_3 و Mg(OH)_2 تشکیل می‌شود که این‌ها به‌دلیل اینکه ویسکوزیته پالپ را افزایش می‌دهند، منجر به تداخل در سرعت حرکت اکسیژن خواهند شد و سرعت فرایند لیچینگ را کاهش می‌دهند (۱۸). در نتیجه با توجه به عوامل گفته‌شده استفاده از اکسیدان و آب با سختی کم در فرایند سیانوراسیون خاک طلای حاوی سولفید ضروری به نظر می‌رسد.

در شکل ۷ مقدار طلا و سیانید آزاد محلول در نمونه‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که در حالتی که آب فرایند پس از هوادهی به مدت ۳۰ دقیقه، توسط شیرآهک و سدیم کربنات تصفیه شود و به ازای هر لیتر $0/2$ میلی‌لیتر فرات سدیم به آن افزوده شود (نمونه FLSCA) مقدار بازیابی طلای محلول مناسبی به‌دست آمده است. همچنین بیش‌ترین مقدار طلای محلول در نمونه R اندازه‌گیری شد که تقریباً معادل مقدار طلای محلول به‌دست آمده در نمونه FLSCA است. با این تفاوت که مقدار سیانید آزاد محلول در نمونه R کم‌تر از FLSCA است. این در صورتی است که جهت انجام فرایند تشویه برای رعایت مسائل محیط‌زیستی نیازمند تجهیزاتی گران قیمت به منظور جلوگیری از آزادسازی SO_2 در محیط است (۴، ۱۹، ۲۰). بنابراین می‌توان با انجام فرایند تصفیه آب و افزودن اکسیدان قوی با هزینه بسیار کم مقدار طلایی را با مصرف اندک سیانید سدیم، استحصال نمود که با فرایند تشویه به‌دست آمده است. علاوه بر این، کم‌ترین مقدار طلای محلول در نمونه DWL که از آب مقطر برای تهیه آن استفاده شده، به‌دست آمده است. نمونه DWL با وجود اینکه عاری از املاح اضافی است، ولی اثر چندانی بر مقدار طلای محلول نداشته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کیفیت بالای آب مصرفی در فرایند سیانوراسیون طلا اگرچه تأثیر چندانی بر طلای محلول نهایی ندارد، ولی مصرف سیانید سدیم را کاهش می‌دهد. همچنین، همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، استفاده از آب با سختی بالا باعث کاهش سرعت لیچینگ می‌شود.

References

- [۱] رابرت پلک، تک فرایندهای متالورژی استخراجی، ترجمه علی سعیدی و ابوالفضل امیرکاوئی، مرکز انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، ۱۳۸۹.
- [2] La Brooy S, Linge H, Walker G. Review of gold extraction from ores. *Minerals Engineering*. 1994;7(10):1213-1241.
- [۳] محمود عباسزاده و احمد خدادادی، بررسی لیچینگ سیانیدی در کارخانه طلای زرمهر به منظور تعیین شرایط بهینه بازیابی طلا، کنگره و نمایشگاه بین المللی معدن، ۲۷ الی ۳۰ مهرماه ۱۳۸۹، تهران.
- [4] Rego AJ. Atmospheric alkaline pre-oxidation of refractory sulphide gold ores. University of British Columbia; 2018.
- [۵] محمود عبدالمهی، سیدمحمدجواد کلینی و علی غفاری، بهینه سازی فرایند لیچینگ سیانیدی در کارخانه فرآوری پوپازرکان آق دره به منظور افزایش بازیابی طلا، نقره و جیوه، علوم زمین، شماره ۷۸، ۱۳۸۹، ۱۲۹-۱۳۸.
- [6] Yannopoulos JC. The extractive metallurgy of gold. New York: Springer Science & Business Media; 2012.
- [7] Nyamunda BC. Review of the impact on water quality and treatment options of cyanide used in gold ore processing. *Water Quality*; 2017.
- [۸] محمد چالکش امیری، اصول تصفیه آب، انتشارات ارکان دانش، اصفهان، ۱۳۸۹.
- [9] Ellis S, Senanayake G. The effects of dissolved oxygen and cyanide dosage on gold extraction from a pyrrhotite-rich ore. *Hydrometallurgy*. 2004;72(1-2):39-50.
- [10] Tsuchida N, Muir D. Studies on role of oxygen in the adsorption of $Au(CN)_2^-$ and $Ag(CN)_2^-$ onto activated carbon. *Metallurgical Transactions B*. 1986;17(3):529-533.
- [11] Jeffrey M, Breuer P. The cyanide leaching of gold in solutions containing sulfide. *Minerals Engineering*. 2000;13(10-11):1097-1106.
- [12] Perky R, Browner R, Dunnei R, Stoitis N. Low pH cyanidation of gold. *Minerals Engineering*. 1999;12(12):1431-1440.
- [13] Kuma JS, Younger PL. Water quality trends in the Tarkwa gold-mining district, Ghana. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2004;63(2):119-132
- [14] Tapley B, Stoitis N, Lien L. Modified Nano-filtration membrane treatment of hyper-saline goldfields water – an overview and benefits to gold plant operation and economics. *Met-Plant*. 2015;1:431-463.
- [۱۵] پویا کریمی، هادی عبدالمهی، احمد امینی و محمد نوع پرست، بررسی رفتار سینتیکی انحلال طلا و نقره با استفاده از اکسیدکننده های مختلف در فرایند سیانوراسیون کانسنگ طلای هیرد، مجله امیرکبیر، سال بیستم، شماره جلد ۷۱، ۱۳۸۸، ۷۱-۷۹.
- [16] Samimi-Sedeh S, Saebnoori E, Talaiekhosani A, Fulazzaky MA, Roestamy M, Amani AM. Assessing the efficiency of sodium ferrate production by solution plasma process. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2019;39(4):769-786.
- [17] Bayat O, Vapur H, Akyol F, Poole C. Effects of oxidizing agents on dissolution of Gumuskoy silver ore in cyanide solution. *Mineral Engineering* 2003;16(4):395-398.
- [18] Gomes CP, Almeida MF, Loureiro JM. Gold recovery with ion exchange used resins. *Separation and Purification Technology*. 2001;24(1-2):35-57.
- [19] Lukey G, Van Deventer J, Chowdhury R, Shallcross D. The effect of salinity on the capacity and selectivity of ion exchange resins for gold cyanide. *Minerals Engineering*. 1999;12(7):769-85.
- [20] Almeida M. Leaching of a gold bearing partially roasted sulphide: laboratory scale studies. *Materials Research*. 2001;4(4):14-30.