

## بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در لیچینگ سیانیدی کانسنگ طلا

محمد رضا مرادی<sup>۱</sup>، سید محمد جواد کلینی<sup>۲\*</sup>، محمود عبداللهی<sup>۳</sup>، احمد امینی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس، mrm\_uotm@yahoo.com

۲- دانشیار دانشگاه تربیت مدرس، koleini@modares.ac.ir

۳- استاد دانشگاه تربیت مدرس، minmabd@modares.ac.ir

۴- مدیر بخش فرآور مواد معدنی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات مواد معدنی کشور

(دریافت ۲۸ فروردین ۱۳۹۱، پذیرش ۷ دی ۱۳۹۲)

### چکیده

نمونه‌ای از محدوده‌ی اکتشافی زایلیک تهیه گردید. مطالعات میکروسکوپ نوری (مقاطع نازک-صیقلی و صیقلی)، XRD، XRF و SEM نشان داد که این کانه از نوع اکسیدی می‌باشد. کانی اصلی کوارتز و کانی‌های دیگر شامل کانی‌های رسی، اکسیدهای ثانویه و آبدار آهن و بندرت پیریت، کالکوپیریت، طلا، آزوریت و مالاکیت می‌باشد. بدلیل پراکندگی طلای ریزدانه در زمینه، فرآیند سیانوراسیون کانه‌بدون پیش‌عمل-آوری انجام شد. آزمایش‌های سیانوراسیون با عوامل تأثیرگذار pH، d<sub>s</sub>، غلظت سیانور و زمان لیچینگ توسط نرم‌افزار DX8 طراحی شد. نرم‌افزار مدل‌های بازیابی طلا و سیانور آزاد باقی‌مانده با R<sup>2</sup> بترتیب برابر ۰/۷۷ و ۰/۸۳ را ارائه داد. شرایط بهینه‌ی به‌دست آمده از نرم‌افزار، در مرحله‌ی بعد توسط آزمایش‌های اکسیداسیون و سینتیک، بهبود یافت. نتایج تحقیق نشان داد که پیش‌هواده‌ی با دبی  $\frac{lit}{min}$  در ۳ ساعت، و هواده‌ی در زمان لیچینگ مناسب می‌باشد، همچنین افزودن سیانور سدیم بطور متناوب نسبت به افزودن آنی سیانور سدیم در زمان صفر، به دلیل دارا بودن بازیابی تقریباً برابر و مصرف سیانور کمتر مؤثرتر تشخیص داده شد. با توجه به اینکه بازیابی در ۲۴ ساعت و ۱۲ ساعت تفاوت چندانی با هم ندارد، زمان بهینه لیچینگ، ۱۲ ساعت در نظر گرفته شد. با توجه به سیانور مصرفی در ۱۲ ساعت میزان مصرف آن ۱۰۵۰ ppm بدست آمد. pH بهینه ۱۰/۱۵ و d<sub>s</sub> بهینه ۱۰۶ میکرون برای دستیابی به بازیابی بهینه‌ای برابر ۹۳/۹۳٪ بدست آمد.

### کلمات کلیدی

کانسنگ طلا، زایلیک، سیانوراسیون، اکسیداسیون

## ۱- مقدمه

طلا از نمونه کانسنگ طلای زایلیک و سپس بهینه‌سازی مقادیر پارامترهای مؤثر در فرآیند می‌باشد. مطالعه‌ی خواص سنجی نمونه نشان داد که طلا بصورت خیلی ریز در کانه پراکنده شده است. در نتیجه روش ثقلی، برای این نمونه روش مناسبی نمی‌باشد [۴، ۱۱]. بنابراین، آزمایش‌های سیانوراسیون پیشنهادی طراحی آماری آزمایش برای عمل‌آوری این نمونه بکار گرفته شد.

بعد از انجام آزمایش‌های پیشنهادی طرح CCD نرم‌افزار، در انتها با بررسی عوامل دیگر از جمله پیش‌هوادهی، هوادهی، افزودن نیترات سرب به عنوان اکسیدکننده در آزمایش‌ها، شرایط بهینه‌ی حاصل از نتایج طراحی آماری آزمایش بهبود داده شد.

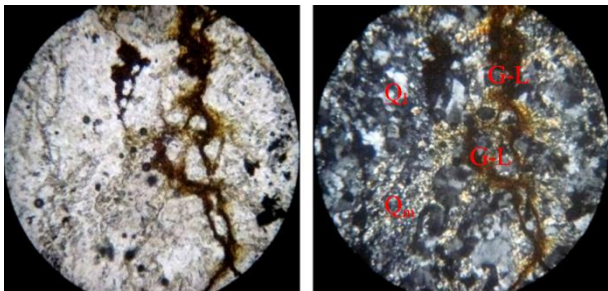
## ۲- مواد و روش انجام کار

## ۲-۱- تهیه‌ی نمونه

حدود ۱۵۰ کیلوگرم نمونه از ترانسه‌ها و انبار موجود از نمونه‌ی اکسید شده تهیه گردید. تعدادی نمونه برای مطالعات کانی‌شناسی علاوه بر مطالعه‌ی کانه‌آرایی، تهیه گردید.

## ۲-۲- مطالعات کانی‌شناسی

مطالعه‌ی کانی‌شناسی نوری و الکترونی به‌منظور تعیین درجه‌ی آزادی طلا و فازهای کانی‌زایی نمونه‌ها انجام شد.



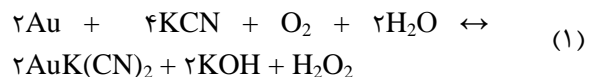
شکل ۱: گوتیت- لیمونیت (G-L) در زمینه کوارتزهای توده‌ای با بافت نهان بلور (Q<sub>1</sub>) تا ریز بلور (Q<sub>m</sub>) و کلسدونیک در سطح مقطع نازک صیقلی تهیه شده از نمونه.

مطالعات کانی‌شناسی نشان داد که نمونه اکسیده بوده و کانی‌های سولفیدی (پیریت) در ابعاد میکرونی (کم‌تر از ۳۰ میکرون) در متن بعضی از تجمع‌های اکسیدی هماتیت، گوتیت و لیمونیت دیده می‌شود. گاهی ابعاد پیریت باقیمانده در متن بخش‌های هماتیتی-گوتیتی تا ۱۰۰ میکرون نیز می‌رسد (شکل ۱).

جدول ۱، درجه آزادی بدست آمده با روش چشمی (شمارش) کانی‌های اکسیدی آبدار آهن و پیریت را در بخش-

کانسار طلای زایلیک در فاصله ۱۱ کیلومتری باختر اهر، در استان آذربایجان شرقی قرار دارد. مهم‌ترین سیمای کانی‌سازی در محدوده مورد مطالعه، زون‌های کانی‌سازی رگه‌ای - رگچه‌ای می‌باشد که توسط گسل‌ها و زون‌های گسلی کنترل شده است. کانی اصلی تشکیل‌دهنده رگه‌ها و زون‌های کانی‌سازی کوارتز و سایر کانی‌های تشکیل‌دهنده آن‌ها شامل روتیل، پیریت، کالکوپیریت، گالن، تترائدریت، طلا، کولیت، آزوریت - مالاکیت، اکسیدهای ثانویه و آبدار آهن، می‌باشند. ساخت و بافت بیشتر رگه‌ها و زون‌های کانی‌سازی از نوع پرشی است. عیار متوسط طلای بدست آمده از گمانه‌های گرفته‌شده ۲/۱ گرم در تن گزارش شده است.

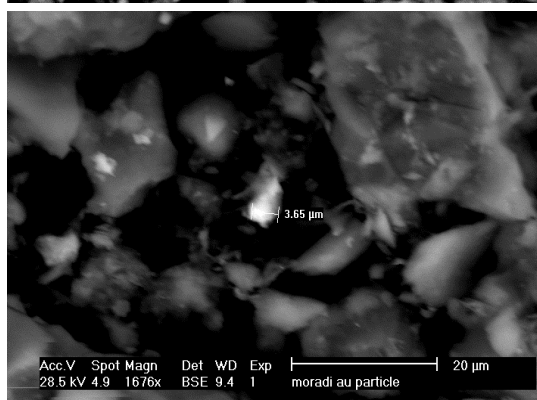
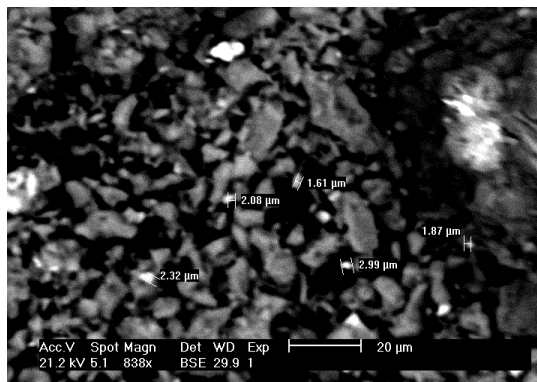
سیانوراسیون روشی ارزان، براحتی قابل دسترس و بسیار مؤثر است. انحلال‌پذیری طلا در محلول آبی سیانور از ابتدای قرن ۱۹، شناخته شده است، اما از سال ۱۸۹۰ بصورت اقتصادی استفاده شده است [۱]. محلول رقیق سیانور سدیم و پتاسیم یک اثر انحلالی چشمگیر روی ذرات طلا و نقره در کانه‌ی طلا دارند [۱]. اگرچه طلا به اکسیداسیون حساس نیست، اما در حضور عامل کمپلکس مناسب مانند سیانور (CN<sup>-</sup>)، زمانی طلا اکسیده باشد، یک کمپلکس سیانوری [Au(CN)<sub>2</sub>] تشکیل می‌دهد [۲]. انحلال طلا در محلول سیانوری قلیایی در سطح تماس مایع-جامد اتفاق می‌افتد که مطابق معادله‌ی (۱) واکنشی غیرهمگن می‌باشد [۱، ۳]:



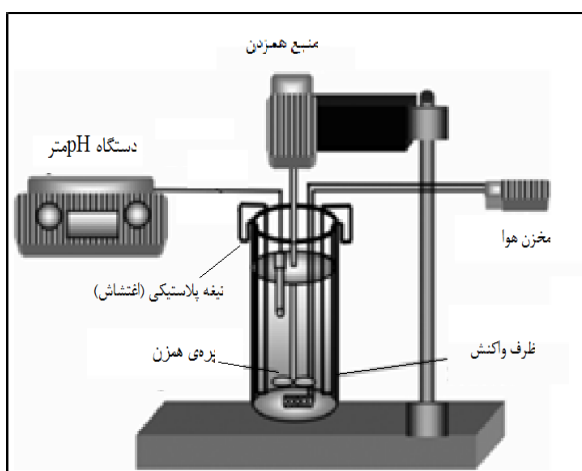
در واقع کانه‌های طلا را می‌توان بصورت خردایش آزاد، پیچیده یا مقاوم دسته‌بندی کرد. کانه‌های خردایش آزاد ( $d_{80} < 75 \mu m$ ) توسط لیچ سانیدی ۲۰-۳۰ ساعته‌ی معمول زمانی- که سیانور کافی با غلظت ۲۵۰-۱۰۰ ppm در  $pH=10$ ، اضافه شود، بازیابی بیشتر از ۹۰٪ را نتیجه می‌دهد. کانه‌هایی را که با سیانوراسیون مستقیم نمی‌توان بصورت اقتصادی بازیابی کرد، مقاوم می‌نامند. کانه‌هایی که با استفاده از مقادیر بطور قابل- توجهی بالاتر از غلظت سیانور یا اکسیژن بازیابی اقتصادی طلا را به‌همراه دارند، پیچیده می‌نامند. پارامترهای مؤثر بر فرآیند سیانوراسیون شامل: غلظت سیانور،  $pH/Eh$ ، دما، غلظت اکسیژن، ترکیبات طلا، سطح ذره‌ی طلا و توزیع ابعادی، می‌باشند [۴].

هدف اصلی مطالعه‌ی حاضر دستیابی به شرایط استخراج

و زمان لیچینگ) و عامل‌های ثابت (درصد جامد پالپ، دما و دور همزن) می‌باشند. غالباً فرض می‌شود که اثرات ناشی از عامل‌های ثابت و قابل‌تغییر نسبتاً کوچک و ناچیز است. به-منظور یک ارزیابی اولیه از آزمایش سیانوراسیون و تعیین سطوح عوامل تأثیرگذار یک آزمایش کنترلی اولیه با شرایط زیر انجام شد. شمایی از نحوه‌ی اجرای آزمایش‌های لیچینگ در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۲: ذرات طلای مشاهده شده با ابعاد کوچک‌تر از ۳ μm حاصل شده با الکترون‌های برگشتی (BSE) توسط ESEM



شکل ۳: شمایی ساده از آزمایش‌های لیچینگ کانه

های ابعادی (۲۵۰، ۱۲۵، ۸۸ و ۶۳ میکرومتر) نشان می‌دهد.

جدول ۱: درجه آزادی کانی‌ها در بخش‌های ابعادی

اکسید آبدار آهن		پیریت			بخش ابعادی (μm)
درجه آزادی	دانه درگیر	دانه آزاد	درجه آزادی	دانه درگیر	
۳۰	۷	۳	۷۸	۲	+۱۲۵-۲۵۰
۵۳	۱۸	۲۰	۷۸	۲	+۸۸-۱۲۵
۶۴	۱۵	۲۷	۷۹	۳	+۶۳-۸۸
۶۵	۱۶	۳۰	۱۰۰	۰	+۳۷-۶۳

از نتایج آنالیز XRD مشخص شد که کانه بیشتر از کانی-های کوارتز و کانی‌های رسی تشکیل شده است، با وصف اینکه در مقاطع صیقلی و نازک‌صیقلی و نمونه‌ی دستی کانی‌های پیریت و اکسیدهای آهن مشاهده شد. نتایج XRF نیز در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲: نتایج حاصل از روش آنالیز XRF

درصد	نوع اکسید	درصد	نوع اکسید
۱/۸۶	K <sub>2</sub> O	۸۲/۶۳	SiO <sub>2</sub>
۰/۱۴	SO <sub>3</sub>	۹/۳۵	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۰/۲۰	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۲/۶۵	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۰/۳۲	TiO <sub>2</sub>	۰/۲۸	CaO
۲/۱۸	L.O.I	۰/۲۱	MgO

در مطالعات ESEM همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، ذرات طلا پس از روبش دقیق پودر، شناسایی شدند که اندازه‌ی همه‌ی ذرات طلا کوچک‌تر از ۳ μm می‌باشند.

### ۲-۳- آزمایش سیانوراسیون

بعلت بازیابی خیلی پایین تغلیظ ثقلی، آزمایش‌های سیانوراسیون برای عمل‌آوری مستقیم این نمونه به کار گرفته شد. برای دستیابی به شرایط بهینه‌ی سیانوراسیون با توجه به منابع پیشین و محدودیت‌های موجود از روش طراحی آزمایش با استفاده از نرم‌افزار DX8 استفاده شد.

### ۲-۳-۱- انتخاب متغیر پاسخ، عامل‌ها، سطوح و دامنه‌ها

متغیر پاسخ بازیابی طلا و غلظت سیانور آزاد باقی‌مانده در محلول، انتخاب شد. عامل‌های طراحی بالقوه‌ی زیادی وجود دارد، که عبارتند از: (pH)، d<sub>۸۰</sub>، غلظت اولیه‌ی سیانور آزاد

۱۱، ۳، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۲، ۹] ثابت شده است که در محدوده‌ای از pH، سیانور سدیم به صورت یون آزاد سیانور، ظاهر می‌شود که این بازه، pH های بالای ۹/۵ است و نیز کار کردن در pH های کمتر از ۸ بدلیل تولید بالای HCN توصیه نشده است [۴، ۵، ۶، ۷، ۱۵، ۱۴، ۹]. در این مطالعه برای pH سطوح ۱۰، ۱۰/۵ و ۱۱ انتخاب شد.

در این مطالعه از نرم‌افزار DX8 و طرح CCD که یکی از مهم‌ترین روش‌های سطح پاسخ می‌باشد، استفاده شده است. آزمایش‌های پیشنهادی نرم‌افزار اجرا شده و پاسخ‌ها همانطور که در جدول ۱۱ نشان داده شده است، بدست آمد.

نتایج حاصل از ICP توسط آنالیز طلای استحصال شده به وسیله‌ی استخراج‌کننده‌های آلی DIBK و اتر و آنالیز با دستگاه جذب اتمی، تأیید شدند. از آنجاییکه عبارهای گزارش شده توسط ICP قابل اعتمادتر و تکرارپذیرتر بودند، دستگاه ICP برای آنالیز محلول‌های تیزابی خوراک و باطله مناسب تشخیص داده شد و از نتایج آن برای محاسبه‌ی بازیابی و تحلیل در نرم‌افزار طراحی آزمایش بهره گرفته شد.

#### ۲-۴- تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

ارائه‌ی نتایج حاصل از آزمایش‌ها بصورت یک مدل تجربی یا به عبارت دیگر مدلی که رابطه‌ی بین متغیر پاسخ و عامل‌های مهم طراحی را بر اساس داده‌های حاصل بیان کند، می‌تواند مفید واقع شود. تجزیه و تحلیل باقی‌مانده‌ها و ارزیابی کیفیت مدل نیز از جمله فنون تجزیه و تحلیلی مهم در کارآمدی مدل محسوب می‌شود [۱۶].

#### ۲-۴-۱- تحلیل نتایج با استفاده از نرم افزار DX8

پاسخ بازیابی نرم‌افزار مدل درجه دو با مقادیر F و حداقل احتمال قابل قبول (p) پیشنهاد شده است. همچنین آزمون نقصان در برازش نیز مدل درجه دو با مقادیر F و حداقل احتمال قابل قبول (p) را پیشنهاد کرده است.

#### آنالیز واریانس مدل پیشنهادی بازیابی

جدول ۳ (آنالیز واریانس) مبتنی بر آزمون فیشر میزان معنی‌دار بودن مدل و فاکتورها را در مدل بازیابی نشان می‌دهد [۹].

شرایط ثابت در کل آزمایش‌های سیانوراسیون:

- gr (۳۰۰ ± ۰/۵) کانه‌ی خرد شده با  $d_{80}$  مطلوب
- ml (۶۰۰ ± ۲) آب مقطر
- دور همزن (۷۵۰ ± ۵۰) rpm
- S/L = ۱/۲ عامل لیچینگ = سیانور سدیم
- دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی‌گراد)
- تنظیم کننده‌های pH: آهک و اسید کلریدریک (۰/۵)

در آزمایش اولیه:

$$d_{80} = 74 \mu\text{m} \quad \text{ppm} = 2000 \quad \text{اولیه} \quad [\text{CN}^-]$$

$$\square \text{ ساعت } = 72 = \text{زمان لیچینگ}$$

در حین لیچینگ، بطور متناوب از محلول نمونه برداری شد و سیانور آزاد با استفاده از تیتراسیون توسط نیترات نقره اندازه‌گیری شد. در زمان‌هایی که غلظت سیانور به مقداری کمتر از ۵۰۰ ppm کاهش می‌یافت به مقدار لازم سیانور سدیم اضافه شده تا غلظت سیانور به ۱۰۰۰ ppm برسد.

در این آزمایش جرم‌های اضافه‌شده‌ی سیانور در هر مرحله با هم جمع شده که برابر ۴/۶۱ گرم سیانور سدیم می‌باشد، که معادل ۳۰۷۳ ppm سیانور آزاد در ۰/۶ لیتر آب مقطر می‌باشد. اما این مقدار مصرف سیانور در حالتی است که سیانور بصورت مرحله به مرحله اضافه شود که متفاوت از حالتی است که به صورت یک دفعه در ابتدا همان مقدار سیانور اضافه شود. بازیابی نهایی نیز در این آزمایش بعد از ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت به ترتیب برابر ۸۹/۳۹، ۹۰/۱۰ و ۹۰/۳۶ درصد بود.

با توجه به مطالعات پیشین کانه‌های اکسیدی طلا [۴، ۱، ۵، ۶، ۸، ۲، ۹] و مطالعات میکروسکوپی نوری و الکترونی انجام شده روی نمونه مورد نظر و در نتیجه ابعاد بسیار ریز دانه‌های طلا، سطوح  $d_{80}$  برابر ۸۸، ۷۴ و ۶۳ میکرون انتخاب شدند. با توجه به آزمایش‌های کنترلی اولیه، سطوح غلظت ۲۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۱۰۰۰ ppm انتخاب شد. در بیشتر مطالعات پیشین [۴، ۹، ۱۰] که بصورت کلاسیک تأثیر پارامترها بررسی شده است، آزمایش‌ها با زمان‌های ۲۴ و ۴۸ ساعت انجام شده است. اما در این مطالعه با توجه به آزمایش‌های اولیه‌ی کنترلی و بازیابی‌های حاصل در زمان‌های متناوب و به منظور نمایان سازی تأثیر بقیه‌ی پارامترها و از آنجاییکه در طراحی آزمایش هدف صرفه‌جویی در زمان و هزینه‌های مصرفی است، سطوح زمانی ۶، ۹ و ۱۲ ساعت انتخاب شدند. در مطالعات پیشین [۴،

جدول ۳: آنالیز ANOVA مدل بازیابی

ANOVA for Response Surface Reduced Cubic Model						
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]						
*توجه: A=pH, B=[CN <sup>-</sup> ], C=d <sub>80</sub> , D= Leaching Time						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	۶۶۳/۳۷	۵	۱۳۲/۶۷	۱۵/۵۶	<۰/۰۰۰۱	معنی دار
AB	۶۱/۵۴	۱	۶۱/۵۴	۷/۲۲	۰/۰۱۲۹	
AC	۱۷۹/۱۶	۱	۱۷۹/۱۶	۲۱/۰۱	۰/۰۰۰۱	
A <sup>2</sup>	۲۳۸/۸۱	۱	۲۳۸/۸۱	۲۸/۰۱	<۰/۰۰۰۱	
B <sup>2</sup>	۱۳۶/۱۱	۱	۱۳۶/۱۱	۱۵/۹۷	۰/۰۰۰۵	
ABD	۸۳/۶۳	۱	۸۳/۶۳	۹/۸۱	۰/۰۰۰۴۵	
Residual	۲۰۴/۶۰	۲۴	۸/۵۲			
Lack of Fit	۱۸۱/۵۵	۱۹	۹/۵۶	۲/۰۷	۰/۲۱۵۰	بی معنی
Pure Error	۲۳/۰۵	۵	۴/۶۱			
Cor Total	۸۶۷/۹۷	۲۹				

pH، بازیابی کاهش می‌یابد. در نمودار سه‌بعدی و خطوط تراز (pH-d<sub>80</sub>) در [CN<sup>-</sup>] = ۱۵۰۰ ppm و زمان لیچینگ ۶ ساعت مشاهده می‌شود با افزایش همزمان pH و کاهش d<sub>80</sub>، بازیابی افزایش می‌یابد. معمولاً، محدوده‌ی pH بهینه در عمل ۱۰ تا ۱۲ است [۹، ۱۶]. از آنجاییکه، بازیابی سیانوراسیون طلا در حدود pH=۱۱ شروع به کاهش می‌کند سیانوراسیون طلا در ۱۰ تا pH=۱۰ ترجیح داده می‌شود.

#### اثر غلظت سیانور [CN<sup>-</sup>]

با توجه به مدل ارائه‌شده توسط نرم‌افزار، مشاهده می‌شود که اثر [CN<sup>-</sup>] با اثر pH و زمان تداخل دارد، و این نشان می‌دهد که [CN<sup>-</sup>] عامل مؤثری در لیچینگ سیانوری طلا است. غلظت‌های سیانور کم‌تر یا بالاتر از مقدار بهینه، سرعت انحلال طلا را کاهش می‌دهد. همانطور که در نمودار سه‌بعدی و خطوط تراز در شکل ۵ و شکل ۷ مشاهده می‌شود، با فاصله از مقدار نقطه‌ی بهینه‌ی [CN<sup>-</sup>]، بازیابی کاهش می‌یابد. باید به این نکته توجه داشت که در غلظت‌های پایین سیانور نرخ انحلال طلا اساساً وابسته به غلظت سیانور است، درحالی‌که در غلظت‌های بالای سیانور نرخ انحلال اصولاً وابسته به غلظت اکسیژن است [۱۱، ۱، ۷، ۱۷]. توجه شود که یک تعادل بین مصرف سیانور پایین و سرعت انحلال بالای طلا، ضروری است. استفاده از مقادیر اضافی سیانور، مصرف سیانور را بطور غیرضروری افزایش داده و اثر مفیدی بر بازیابی طلا ندارد.

مقدار F و P مدل بترتیب برابر ۱۵/۵۶ و ۰/۰۰۱ می‌باشد که بیانگر معنی‌داری مدل است. بیشترین F در جدول مربوط به A<sup>2</sup> (pH<sup>2</sup>) و اثر متقابل AC (pH و d<sub>80</sub>) است که بیانگر تأثیر زیاد این فاکتورها در مدل می‌باشد. اما [CN<sup>-</sup>]B<sup>2</sup>، اثر متقابل سه‌گانه‌ی ABD (pH، [CN<sup>-</sup>] و زمان لیچینگ) و اثر متقابل AB به دلیل مقدار F کوچک‌تر به ترتیب اهمیت تقریباً کم‌تری دارند. در جدول ۴ داده‌های آماری مدل ارزیابی شده‌اند.

جدول ۴: معیارهای آماری مدل بازیابی

Std. Dev.	۲/۹۲۰	R-Squared	۰/۷۶۴
Mean	۸۰/۸۵۶	Adj R-Squared	۰/۷۱۵
C.V. %	۳/۶۱۱	Pred R-Squared	۰/۵۸۴
PRESS	۳۶۱/۴۴۴	Adeq Precision	۱۱/۶۳۱

در نهایت، مدل ارائه‌شده توسط نرم‌افزار برای میزان بازیابی بر حسب پارامترهای حقیقی در زیر ارائه شده است.

پس از بررسی مناسب بودن مدل، نماهای هندسی مدل بر حسب عوامل مؤثر بر پاسخ ارزیابی شود.

#### اثر pH

با توجه به مدل ارائه‌شده توسط نرم‌افزار، مشاهده شد که اثر pH با اثر هر سه عامل دیگر تداخل دارد و همچنین جدول ANOVA نشان می‌دهد که pH مؤثرترین عامل در لیچینگ سیانوری طلا است.

همانطور که در نمودار سه‌بعدی و خطوط تراز در شکل ۴ و شکل ۶ مشاهده می‌شود، با دور شدن از مقدار بهینه‌ی

خردایش بیشتر مصرف انرژی و هزینه‌ی بیشتری نیاز دارد. بنابراین،  $d_8$  بهینه‌ای که تعیین می‌شود باید از نظر فنی و اقتصادی قابل قبول باشد. در حالت متداول بازیابی با افزایش اندازه‌ی ذرات، کاهش می‌یابد. از آنجاییکه خردایش کمتر هزینه‌ی کمتری دارد، اندازه‌ی خوراک بزرگتر ترجیح داده می‌شود.

از نتایج حاصل از تعیین مقدار سیانور مصرف شده در حالت‌های مختلف مشخص است، با افزایش زمان خردایش یا کاهش  $d_8$ ، مقدار مصرف سیانور افزایش چندانی را از خود نشان نمی‌دهد. اما با توجه به حضور کانی‌های رسی در نمونه کانسنگ، با افزایش زمان خردایش این ترکیب‌ها فعال‌تر شده و می‌توانند در فرآیند سیانوراسیون با خاصیت پوشاندگی ایجاد اختلال می‌کنند که این اختلال به صورت کاهش بازیابی در فرآیند سیانوراسیون می‌باشد.

### اثر زمان لیچینگ

با توجه به مدل ارائه شده توسط نرم افزار و تغییر سطح زمان در نمودار سه‌بعدی حاصل، اثر زمان لیچینگ بر بازیابی طلا در زمان‌های ابتدایی بیشتر بوده و در سطوح زمانی بالاتر تأثیر کم‌تری دارد. این نشان می‌دهد که نرخ لیچینگ طلا با افزایش زمان لیچینگ، کاهش می‌یابد. از آنجایی که بخش اعظم طلا در همان ساعات اولیه استخراج می‌شود نرخ لیچینگ طلا در ساعات اولیه با شیب تندی افزایش می‌یابد و بعد از ساعت اولیه به تعادل می‌رسد. البته قابل توجه است که اثر زمان وقتی اندازه‌ی ابعادی درشت‌تر است، اندکی بارزتر می‌باشد. نتایج طراحی آزمایش نشان می‌دهد که بازیابی طلا با افزایش زمان بعد از ساعات اولیه، افزایش قابل توجهی ندارد.

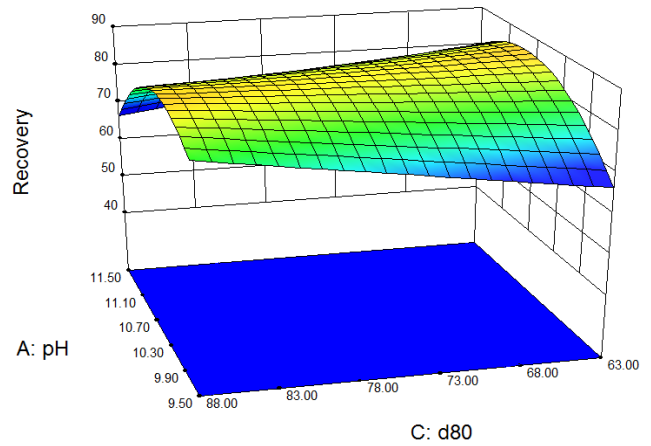
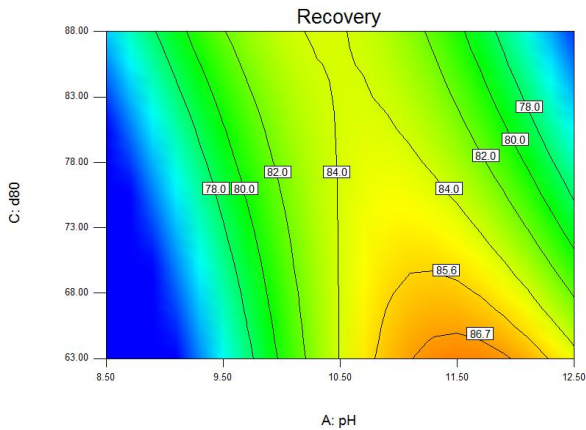
بنا به نتایج جدول ANOVA مشخص شد که  $d_8$  ذرات در محدوده‌ی مورد مطالعه تأثیری بر مصرف سیانور ندارد، می‌توان نتیجه گرفت که مصرف‌کننده‌های سیانور در کانه در همان اندازه‌های بزرگ آزاد شده‌اند و خردایش بیشتر تأثیری در میزان آزادشدگی آن‌ها نداشته، در نتیجه  $d_8$  کانه در محدوده‌ی بررسی شده تأثیر چشمگیری بر مصرف سیانور ندارد. اما مشاهده شد که افزایش در غلظت سیانور در پالپ با افزایش مصرف سیانور همراه است. غلظت بالای سیانور آزاد، انحلال فلز و تشکیل کمپلکس‌های سیانور-فلز را افزایش می‌دهد.

حضور چشمگیر مصرف‌کننده‌های سیانور، همانند کانی‌های ثانویه‌ی مس (با غلظت کمتر از ۱۰۰ ppm) (برای مثال کالکوسیت، کولیت، مالاکیت، آزوریت و غیره)، می‌تواند باعث مصرف سیانور خیلی بالایی شود. مصرف بالای سیانور اغلب بازیابی‌های طلای پایین را نتیجه می‌دهد، بطوریکه ابتدا سیانور ترجیحاً توسط فازهای مس خیلی فراوان قبل از اینکه یون سیانور بتواند طلا را حل کند، مصرف می‌شود. با توجه به مطالعات پیشین مس کمپلکس‌های پیچیده‌تری نسبت به طلا با سیانور تشکیل می‌دهد، بطور معمول نسبت مولی ۵ به ۱ سیانور به مس برای لیچ طلا لازم است تا کمبود سیانور در اثر مصرف آن توسط یون‌های مس برای انحلال طلا به عنوان عامل محدودکننده عمل نکند [۱۱، ۱۷].

بدیهی است اکسیژن برای انحلال طلا در محلول سیانوری حیاتی است. در فشار اتمسفر، سیانوراسیون به غلظت سیانور وابسته نیست و نرخ انحلال طلا بوسیله‌ی غلظت اکسیژن ثابت در محلول کنترل می‌شود. غلظت بالاتر سیانور، اثری روی نرخ استخراج طلا ندارد، اما از نظر شیمیایی و مکانیکی استهلاک و هدرروی ایجاد می‌شود و بنابراین هزینه‌های عملیاتی افزایش می‌یابد. بنابراین این پارامتر باید در محدوده‌ی مقدار بهینه ثابت شود [۱، ۷].

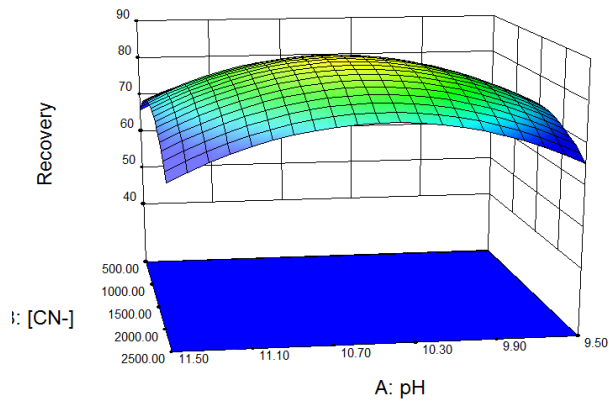
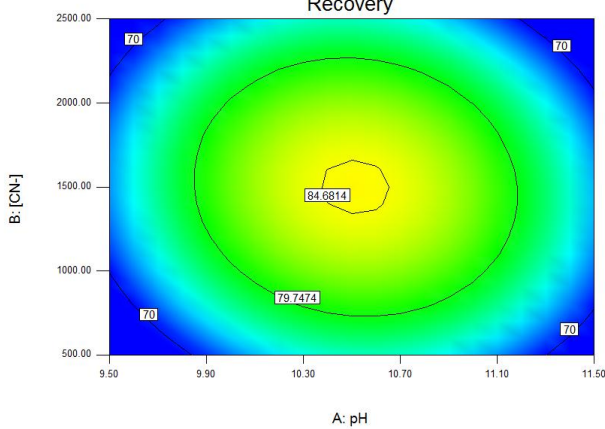
### اثر ابعاد ذرات ( $d_8$ )

اندازه‌ی ذرات کانه‌های طلا باید تا زمانی که ذرات طلا آزاد شوند و/یا در معرض سیانور قرار گیرند، کاهش یابد. اگر کانه به اندازه‌ی کافی خرد نشود، احتمال نفوذ سیانور و به تبع آن انحلال طلا و بازیابی آن کاهش خواهد یافت. از طرف دیگر،



شکل ۶: نمودار منحنی تراز  $d_{80}$  در مقابل pH در  $[CN^-]=1500$  ppm و زمان لیچینگ برابر ۶ ساعت

شکل ۴: نمودار سه بعدی  $d_{80}$  در مقابل pH در  $[CN^-]=1500$  ppm و زمان لیچینگ برابر ۱۲ ساعت



شکل ۷: نمودار سه بعدی pH در مقابل  $[CN^-]$  در  $d_{80}=74$   $\mu$  و زمان لیچینگ برابر ۱۲ ساعت

شکل ۵: نمودار سه بعدی pH در مقابل  $[CN^-]$  در  $d_{80}=74$   $\mu$  و زمان لیچینگ برابر ۱۲ ساعت

(P)، پیشنهاد شده است (جدول ۵).

### آنالیز واریانس مدل

برای معنی دار بودن فاکتورها از معیار F و ارزش p استفاده شده است.

### ۲-۴-۲- تحلیل نتایج با استفاده از نرم افزار DX8

#### پاسخ غلظت سیانور آزاد باقی مانده

توسط نرم افزار مدل خطی با مقادیر F و حداقل احتمال قابل قبول (P) پیشنهاد شد. همچنین در آزمون نقصان در برازش نیز مدل خطی با مقادیر F و حداقل احتمال قابل قبول

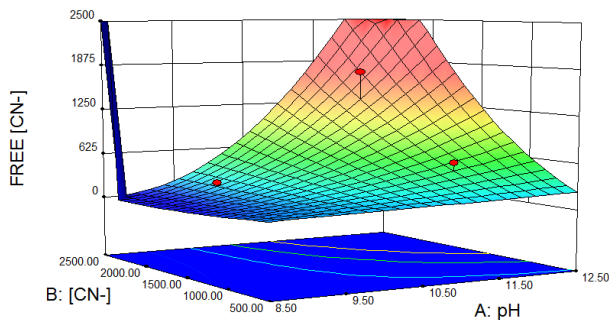
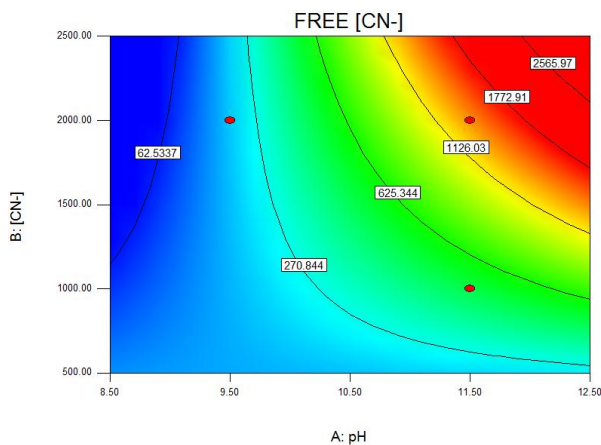
جدول ۵: اطلاعات ANOVA مدل غلظت سیانید آزاد

ANOVA for Response Surface Reduced Cubic Model						
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	۱۹۹۲/۷۶	۳	۶۶۴/۲۵	۴۰/۳۲	<۰/۰۰۰۱	معنی دار
A-pH	۱۴۲۹/۸۸	۱	۱۴۲۹/۸۸	۸۶/۷۹	<۰/۰۰۰۱	
B-[CN-]	۳۴۴/۸۲	۱	۳۴۴/۸۲	۲۰/۹۳	۰/۰۰۰۱	
AB	۱۸۴/۷۲	۱	۱۸۴/۷۲	۱۱/۲۱	۰/۰۰۲۶	
Residual	۴۱۱/۸۸	۲۵	۱۶/۴۸			
Lack of Fit	۳۴۲/۷۷	۲۰	۱۷/۱۴	۱/۲۴	۰/۴۴۱۵	بی معنی
Pure Error	۶۹/۱۰	۵	۱۳/۸۲			
Cor Total	۲۴۰۴/۶۴	۲۸				



تأثیر غلظت سیانور  $[CN^-]$ 

با توجه به مدل پیشنهادی، هرچه غلظت سیانور اولیه افزایش یابد مقدار سیانور آزاد باقی مانده در محلول زیادتر می شود، این رابطه منطقی می باشد. نمودارهای سه بعدی و خطوط تراز نشان داده شده در شکل ۸ و شکل ۹ این مطلب را تأیید می کند.

شکل ۸: نمودار سه بعدی غلظت سیانور آزاد بر حسب  $[CN^-]$  و pHشکل ۹: خطوط تراز غلظت سیانور آزاد بر حسب  $[CN^-]$  و pH

## ۲-۳ - بهینه سازی پاسخ بازبایی

در این قسمت از نرم افزار با مد نظر قرار دادن یک سری شرط می توان حالت بهینه ی مورد نظر را بدست آورد. ابتدا سعی شد که هیچ گونه شرطی لحاظ نشود تا درجه آزادی بالایی برای دستیابی به حالت بهینه وجود داشته باشد، در مرحله ی بعد با محدود کردن شرایط بهینه به حالت های مطلوب، شرایط بهینه ی مشروط حاصل شد.

جدول ۷ و جدول ۸ بترتیب نتایج حالت بدون شرط خاص و مشروط را نشان می دهد. در حالت بهینه سازی مشروط سعی شد شرایطی اعمال شود که در صنعت مورد پسند است و نیز از لحاظ ایمنی و اقتصادی مطلوب باشد.

مقدار F و P مدل بترتیب برابر  $40/32$  و  $0/001$  می باشد که بیانگر این است مدل معنی دار است، بیشترین F در جدول مربوط به A (pH) می باشد که بیانگر تأثیر زیاد این فاکتور در مدل است. اما B (غلظت سیانور آزاد)، اثر متقابل دوگانه ی AB (pH و  $[CN^-]$ ) بدلیل مقدار F کوچک تر بترتیب اهمیت تقریباً کمتری دارند. در جدول ۶ داده های آماری مدل ارزیابی شده اند.

جدول ۶: معیارهای آماری مدل غلظت سیانید آزاد

Std. Dev.	۴/۰۵۹	R-Squared	۰/۸۲۹
Mean	۲۱/۷۹۶	Adj R-Squared	۰/۸۰۸
C.V. %	۱۸/۶۲۳	Pred R-Squared	۰/۷۷۴
PRESS	۵۴۲/۸۷۶	Adeq Precision	۲۰/۹۹۵

در نهایت، مدل ارائه شده توسط نرم افزار برای میزان غلظت سیانور آزاد بر حسب فاکتورهای حقیقی در زیر ارائه شده است.

$$\begin{aligned} \text{Free } [CN^-] &= \\ & 65/758 \\ & -0/32 * pH \\ & -0/140 * [CN^-] \\ & +0/014 * pH * [CN^-] \end{aligned}$$

## تأثیر pH

با توجه به مدل پیشنهادی، هرچه pH افزایش یابد مقدار سیانور آزاد باقی مانده در محلول زیادتر می شود که ممکن است به دلیل کاهش تشکیل HCN احتمالی و مصرف کم تر سیانور توسط واکنش های جانبی باشد. نمودارهای سه بعدی و خطوط تراز نشان داده شده در شکل ۸ و شکل ۹ مؤید این ادعا است.

با استفاده از دیاگرام های Eh-pH می توان به نوع کمپلکس هایی که در یک pH مشخص میان یون  $CN^-$  و سایر ترکیب ها تشکیل می شود، دست یافت. برخی از این کمپلکس ها پایدار و برخی دیگر ناپایدار هستند که این امر می تواند منجر به ایجاد اختلال در فرآیند تعیین سیانور آزاد موجود در محیط لیچینگ گردد. این اختلال بدین صورت است که در حالی که یون  $CN^-$  در ابتدا با یک ترکیب یا عنصر کمپلکس تشکیل داده است و عملاً از سیستم لیچینگ خارج شده است و نقشی در انحلال طلا ندارد، اما به علت ناپایدار بودن کمپلکس در پایان آزمایش سیانوراسیون، یون  $CN^-$  از ترکیب مورد نظر جدا شده و در هنگام تیتراسیون با نیترات نقره، جزء سیانور آزاد محسوب می شود [۱، ۱۱، ۱۷].



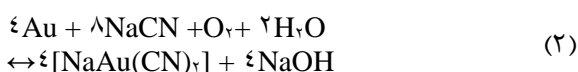
جدول ۷: اطلاعات بهینه‌سازی بازیابی در حالت بدون شرط خاص

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Importance	Optimal point
A:pH	in range	۹/۵	۱۱/۵	۳	۱۰/۰۵
B:[CN <sup>-</sup> ] (ppm)	in range	۵۰۰	۲۵۰۰	۲	۱۲۱۹/۷۶
C:d80 (μ)	in range	۵۳	۱۰۶	۴	۱۰۵/۵۳
D:Leaching time (h)	in range	۳	۱۲	۳	۸/۹۶
Recovery (%)	maximize	۷۰/۰۵	۸۹/۷۱	۵	۹۰/۱۴

جدول ۸: اطلاعات بهینه‌سازی بازیابی در حالت مشروط

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Importance	Optimal point
A:pH	is in range	۱۰	۱۱	۳	۱۰/۰۰
B:[CN <sup>-</sup> ] (ppm)	minimize	۵۰۰	۲۵۰۰	۲	۵۰۷
C:d80 (μ)	maximize	۵۳	۱۰۶	۴	۱۰۶/۰۰
D:Leaching time (h)	minimize	۳	۱۲	۳	۳/۰۰
Recovery (%)	maximize	۷۰/۰۵	۸۹/۷۱	۵	۸۹/۷۷

شستشوی سیانوری قلیایی یک پیش‌نیاز می‌باشد. اگرچه طلا در برابر اکسیداسیون مقاوم است، اما در حضور یک عامل کمپلکس‌ساز مناسب همانند (CN<sup>-</sup>), زمانی که اکسیداسیون رخ داده باشد، کمپلکس سیانوری [Au(CN)<sub>2</sub>]<sup>-</sup> براحتی تشکیل می‌دهد. معادله‌ی السنر (Elsner's equation)، معادله (۲) نقش اکسیژن را در سیانوراسیون طلا نشان می‌دهد:



کانی‌های حساس به اکسیژن همواره در کانه‌های طلا با غلظت خیلی بیشتری از طلا در محلول وجود دارند. در نتیجه، تقاضای سیانور و اکسیژن فقط به طلا محدود نمی‌شود بلکه غلظت کانی‌های حساس به اکسیژن همانند سولفیدها نیز مؤثر است [۹]. پیش‌اکسیداسیون به فرآیند سیانوراسیون اجازه می‌دهد که با سطوح مصرف خیلی پایین اکسیژن و سیانور با سرعت لیچینگ بالاتری نسبت به حالت معمولی اجرا شود. عقیده بر این است که تشکیل غشای سولفیدی طلای اکسایشی با اکسیداسیون طلا یا اکسیداسیون سولفید به سولفات در یک زوج گالوانیک با اکسیژن بسیار متشابه است، این تمایل با افزایش pH مسلم‌تر می‌شود [۱۸].

#### ۲-۵-۱- آزمایش‌های اکسیداسیون و پیش‌اکسیداسیون

با دخیل کردن عوامل دیگر، شرایط بهینه‌ی حاصل از نتایج طراحی آماری آزمایش بهبود داده شد. با توجه به اهمیت نقش اکسیداسیون و مرحله‌ی پیش‌لیچینگ در انحلال طلا توسط سیانور، آزمایش‌های سیانوراسیون این بخش

#### ۲-۴- بهینه‌سازی پاسخ غلظت سیانور آزاد باقی‌مانده

در این قسمت همان شرایط عملی در پاسخ بازیابی اعمال شد، و نتایج به صورت جدول ۹، حاصل شد.

جدول ۹: اطلاعات بهینه‌سازی غلظت سیانور آزاد باقی‌مانده

بدون شرط		مشروط	
Name	Optimal point	Name	Optimal point
pH	۱۰/۰۵	pH	۱۰/۰۰
[CN <sup>-</sup> ] (ppm)	۱۲۱۹/۷۶	[CN <sup>-</sup> ] (ppm)	۵۰۷
d80 (μ)	۱۰۵/۵۳	d80 (μ)	۱۰۶/۰۰
Leaching time (h)	۸/۹۶	Leaching time (h)	۳/۰۰
Recovery (%)	۹۰/۱۴	Recovery (%)	۸۹/۷۷
[CN <sup>-</sup> ] <sub>Free</sub> (ppm)	۱۹۶	[CN <sup>-</sup> ] <sub>Free</sub> (ppm)	۱۶۶

نتیجه شد که غلظت سیانور آزاد باقی‌مانده در پایان لیچینگ برای حالت بدون شرط ۱۹۶ ppm و در حالت مشروط ۱۶۶ ppm است. از طرف دیگر غلظت سیانور مصرفی در پایان لیچینگ برای حالت بدون شرط ۱۰۲۴ ppm و در حالت مشروط ۳۴۱ ppm است. البته توجه به این نکته ضروری است که زمان لیچینگ در حالت بهینه‌ی بدون شرط ۹ ساعت و در حالت بهینه‌ی مشروط ۳ ساعت است.

#### ۲-۵-۲- اکسیداسیون و سینتیک فرآیند

به‌طور متداول طلا توسط لیچینگ سیانوری مستقیم استخراج می‌شود. اما اکسیداسیون طلا برای انحلال آن در

همان طور که در جدول ۱۰ در نظر گرفته شده، اجرا شدند.

جدول ۱۰: شرایط و نتایج آزمایش های اکسیداسیون

ساعت ۲۴= زمان لیچینگ در کل آزمایش ها			$d_{\text{L}} = 106 \mu\text{m}$	$\text{pH} = 10/1$	$\text{pH} = 10$ پیش هوادهی				
ثابت سینتیک (k)	بازیابی (%)	غلظت سیانور مصرف شده (ppm)	$E_{\text{h}}^{\text{initial}}$ (Volt)	نوع سیانور	غلظت نیترات سرب اضافه شده (ppm)	دبی هوادهی (Lit/min)	زمان (ساعت) - دبی پیش- هوادهی (Lit/min)	$[\text{CN}^-]$ (ppm)	آزمایش
۱/۲۹۱	۸۸/۲۱	۱۳۰۱	۰/۳۱	سدیم	-	-	-	۱۵۰۰	اول
۱/۲۹۵	۸۹/۰۳	۲۸۰۱	۰/۲۶	سدیم	-	-	-	۳۰۰۰	دوم
۱/۳۵۰	۸۹/۴۹	۱۳۵۱	۰/۳۲	پتاسیم	-	-	-	۱۵۰۰	سوم
۱/۵۰۶	۹۱/۴۶	۱۲۰۰	۰/۵۰	سدیم	-	۰/۶	-	۱۵۰۰	چهارم
۱/۴۱۷	۹۰/۸۱	۱۲۰۰	۰/۳۵	سدیم	۱۵۰۰	-	-	۱۵۰۰	پنجم
۱/۵۵۸	۹۲/۰۳	۹۹۸	۰/۴۵	سدیم	۱۵۰۰	۰/۶	-	۱۵۰۰	ششم
۱/۶۱۶	۹۳/۹۶	۸۵۲	۰/۵۱	سدیم	-	۰/۶	۰/۶ - ۳	۱۵۰۰	هفتم
۱/۶۵۷	۹۴/۰۷	۱۰۵۰	۰/۵۱	سدیم	-	۰/۶	۰/۶ - ۳	افزودن متوالی	هشتم

لیچینگ حاصل از مرحله ی طراحی آزمایش اجرا شد. بدلیل اینکه احتمال دارد سطح انتخابی غلظت سیانور در ۲۴ ساعت، کافی نباشد، دو سطح غلظت سیانور در آزمایش اول ppm ۱۵۰۰ (نزدیک به غلظت بهینه طراحی آزمایش) و در آزمایش دوم ppm ۳۰۰۰ انتخاب شد.

بازیابی های حاصل از آزمایش اول و دوم تفاوت معنی داری با یکدیگر ندارند. با افزایش غلظت سیانور استفاده شده، فقط مصرف سیانور بالا رفت. بدلیل مصرف اکسیژن توسط واکنش سیانور با عناصر موجود در پالپ، اکسیژن محلول کاهش یافته و محیط احیایی تر تشکیل می شود. از آنجایی که ثابت سرعت آن ها نیز تقریباً برابر است، ppm ۱۵۰۰ به عنوان غلظت بهینه - ی سیانور انتخاب شد.

### آزمایش سوم

در این آزمایش هدف مقایسه سینتیک، بازیابی و سیانور مصرفی حاصل از سیانوراسیون توسط سیانور پتاسیم نسبت به سیانور سدیم می باشد. البته اشاره به این نکته ضروری می - باشد که جرم مولی سیانور پتاسیم  $\frac{65}{\text{Mol}}$  و جرم مولی سیانور سدیم  $\frac{49}{\text{mol}}$  است. بنابراین برای دستیابی به غلظت برابر از سیانور در محلول، جرم بیشتری از سیانور پتاسیم نسبت به سیانور سدیم لازم می باشد. در این آزمایش از KCN به عنوان عامل لیچ استفاده شد.

به منظور مقایسه بین سینتیک واکنش سیانوراسیون در آزمایش های اجرا شده، واکنش سیانوراسیون طلا درجه یک فرض شد. با توجه به اینکه در یک واکنش مرتبه ی اول،  $[\text{Au}]_t$  با زمان به طور نمایی کاهش می یابد، سرعت سیانوراسیون از رابطه ی  $r = -k[\text{Au}]$  حاصل می شود. بازیابی را نیز می توان از رابطه ی  $R(t) = R_{\infty} * (1 - e^{-kt})$  محاسبه کرد. در پایان هم نتایج حاصل از محاسبه مقادیر بازیابی در زمان های مختلف و همچنین استفاده از روش کمینه سازی تفاضل مربعات مقادیر پیش بینی از مقادیر واقعی، k ثابت سرعت هر آزمایش به طور مجزا حاصل شد. با مقایسه کردن k های حاصل نسبت به هم می توان معیار مناسبی را به منظور مقایسه ی سینتیک انحلال طلا در اختیار داشت [۱۹]. در این آزمایش ها در حین لیچینگ در ساعت های ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۲۴، نمونه - برداری انجام شد تا سینتیک انحلال طلا و مصرف سیانور نیز بدست آید. در شکل ۱۱ و شکل ۱۰ نتایج حاصل از کل آزمایش های این بخش به صورت نمودار و بازیابی در ساعت دوازدهم و بیست و چهارم و ثابت سینتیک هر آزمایش ارائه شده است.

### آزمایش های اول و دوم

آزمایش اول و دوم با هدف بهبود محدوده ی زمانی

دلیل غیرفعال سازی گالوانیکی) در عدم وجود ساختار سولفیدی، دوباره فعال سازد. همانطور که لورنزن و دیگران اشاره کرده اند، سرب تأثیر تسریع کننده روی انحلال طلا دارد، اما زمانی که غلظت‌های بالا از سرب اضافه شود، طلا غیرفعال می‌شود [۷، ۹، ۱۸].

#### آزمایش ششم

در این آزمایش تأثیر همزمانیترات سرب و هوادهی با دبی  $\frac{lit}{min}$  ۰/۶، بررسی شد. که ثابت سینتیک و بازیابی بالاتری را نسبت به آزمایش چهارم و پنجم در بر داشت.

#### آزمایش هفتم

در این آزمایش از پیش‌هوادهی با دبی  $\frac{lit}{min}$  ۰/۶ در ۳ ساعت قبل از لیچینگ در pH برابر ۱۰ (تنظیم‌کننده‌ی pH آهک است) و هوادهی در طول لیچینگ استفاده شد.

نتایج حاصل از آزمایش‌های چهارم تا هفتم نشان داد که هوادهی در ۳ ساعت قبل از لیچینگ و هوادهی در طول لیچینگ بازیابی بیشتری را در بر دارد. در حالت کلی در فرآیند سیانوراسیون اکسیژن اتمسفری به‌عنوان یک عامل اکسیدکننده در سیانوراسیون طلا عمل می‌کند اما میزان حلالیت آن در محلول لیچینگ بسیار پایین است که این مسأله باعث کند شدن فرآیند سیانوراسیون می‌شود و لذا نرخ سیانوراسیون توسط عامل مقدار اکسیژن حل شده در محیط لیچینگ محدود می‌شود. علاوه بر این، مقدار اکسیژن با پیشرفت واکنش کاهش می‌یابد و از سوی دیگر به سرعت و به مقدار کافی جایگزین نمی‌شود. بنابراین نرخ انحلال لیچینگ با هوادهی قبل از لیچینگ و در زمان لیچینگ این کمبود اکسیژن را کاهش می‌دهد و به دنبال آن مقدار طلای استحصال شده و نرخ انحلال افزایش می‌یابد.

#### آزمایش هشتم

در این آزمایش، آزمایشی را که داری ثابت سرعت انحلال بالاتری بوده و نیز مقدار سیانور آزاد باقی‌مانده در انتهای آزمایش بیشترین مقدار را داشته (آزمایش هفتم که همراه با پیش‌هوادهی و هوادهی در زمان لیچینگ بود)، با اضافه کردن متناوب سیانور به جای اضافه کردن آبی سیانور سدیم در زمان صفر، از نظر مصرف سیانور نیز بهینه‌سازی تا حد امکان انجام شد. روند کار در این آزمایش به این صورت بود که مطابق با آزمایش هفتم پیش‌هوادهی ۳ ساعت انجام شد و در شروع

با توجه به این آزمایش سیانور پتاسیم، ثابت سینتیک بالاتری را نتیجه داد، بر همین اساس سینتیک انحلال طلا توسط سیانور پتاسیم نسبت به سیانور سدیم کمی سریع‌تر است، اما با توجه به Eh محیط از نظر اکسایش تقریباً مانند سیانور سدیم عمل کرد (Eh برابری حاصل گردید). توجه به این نکته ضروری است که سیانور پتاسیم قیمت بالاتری را نسبت به سیانور سدیم دارد.

#### آزمایش چهارم

در این آزمایش از دبی هوای  $\frac{lit}{min}$  ۰/۶ بر لیتر در زمان لیچینگ به‌منظور مطمئن شدن از وجود مقدار اکسیژن کافی برای تکمیل واکنش، استفاده شد. در عمل، یک سطح بالای سیانور ترجیحاً نسبت به سطح بالای اکسیژن حل شده (D.O) در محلول، ثابت نگاه داشته می‌شود. به‌عنوان یک نتیجه در اکثر عملیات‌ها سطوح سیانور همانند انحلال طلا وابسته به سطح D.O است.

آشکار است که متغیرهای مهم در سیانوراسیون طلا، پیش‌اکسیداسیون قبل از سیانوراسیون، یا سیانوراسیون مستقیم پالپ کانه را می‌توان برای دستیابی به بازیابی بالاتر طلا، زمان ماند کم‌تر، مصرف کم‌تر سیانور و کاهش نگرانی‌های زیست‌محیطی مربوط به مقدار سیانور در سیال خروجی، بهینه کرد. بر این اساس در این آزمایش سعی شد از اکسیداسیون توسط هوادهی با دبی مشخص استفاده شود [۹].

#### آزمایش پنجم

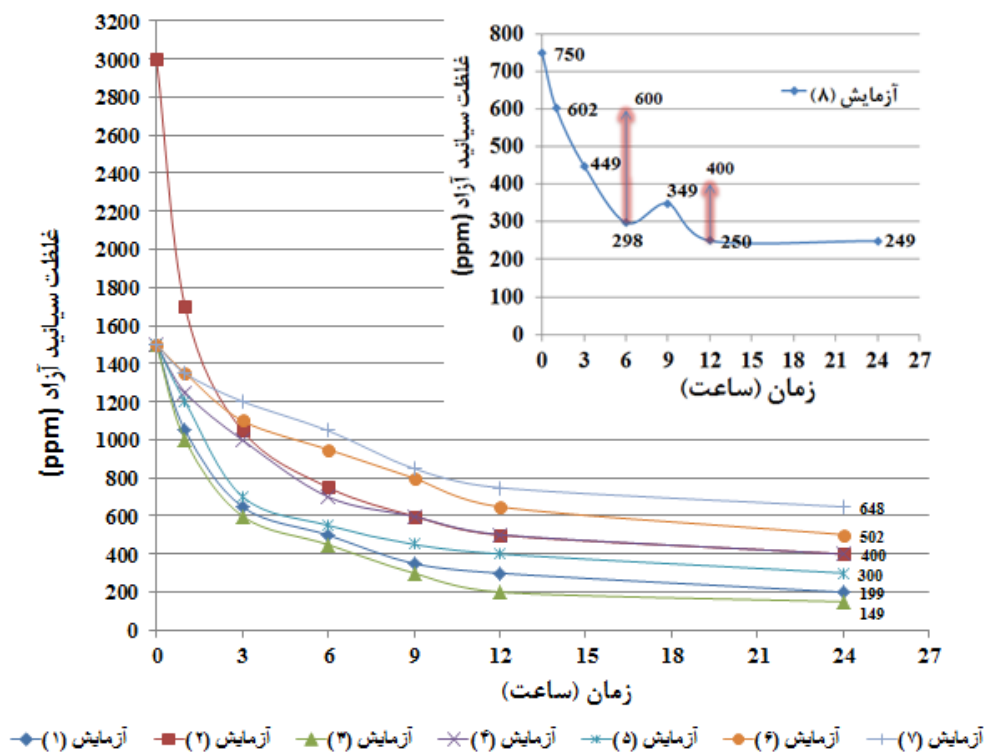
در این آزمایش از نیترات سرب به‌عنوان تسریع‌کننده‌ی واکنش استفاده شد. اثر مثبت نیترات سرب در یک مکانیزم خنثی کردن اثر سولفید حل‌شده‌ی حاصل از واکنش‌های احیای کانی‌های سولفیدی که ممکن است با اکسیداسیون طلا زوج گالوانیک تشکیل داده باشد، است. سولفید با افزایش نیترات سرب به محلول، بصورت سولفید سرب رسوب خواهد کرد. سولفید منتقل شده به سطوح طلا، یک غشای سولفیدی طلا تشکیل خواهد داد که سطح طلا به این دلیل غیرفعال می‌شود. در یک مکانیزم همزمان، یون سرب ممکن است با طلا طی واکنش‌های جابجایی برای به‌معرض گذاشتن سطح که بطور مشابه، کم‌تر غیرفعال شده است، عمل کند. یا ممکن است غشای سولفیدی طلا را که ذره‌ی طلا را غیرفعال کرده است، دوباره فعال کند. در مکانیزم دیگر، سرب (II) محلول، به غشاهای طلای اکسیده هجوم برده و غشاهای غیرفعال را (به-

شد و در ساعات ۱، ۳، ۹، ۱۲ و ۲۴ برای سنجش سیانور آزاد افزایش pH یکی از دلایل کاهش سرعت انحلال می‌تواند باشد [۱ و ۶].

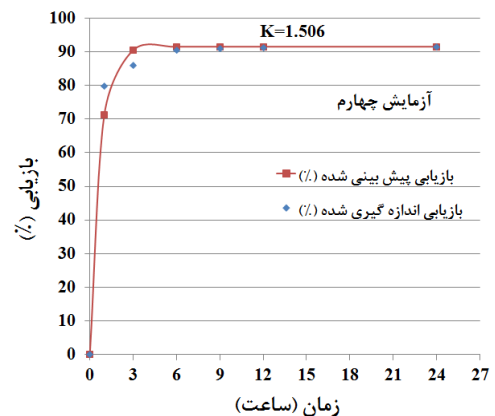
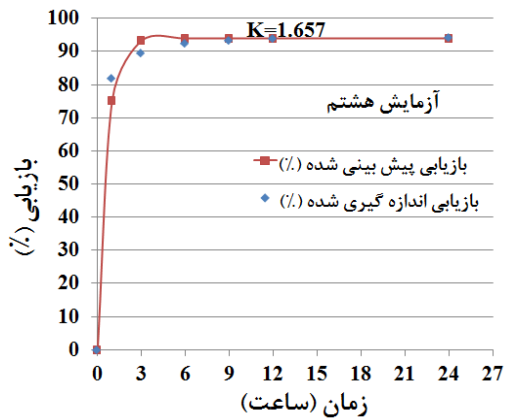
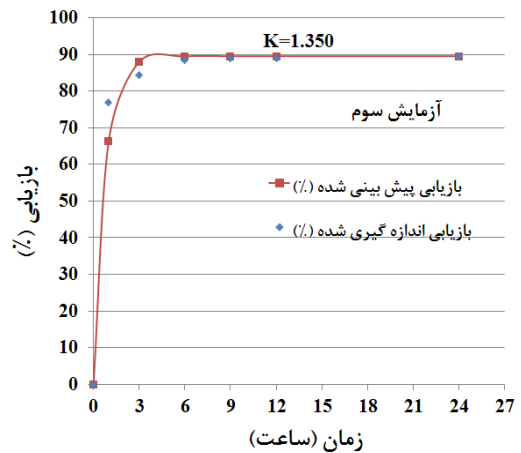
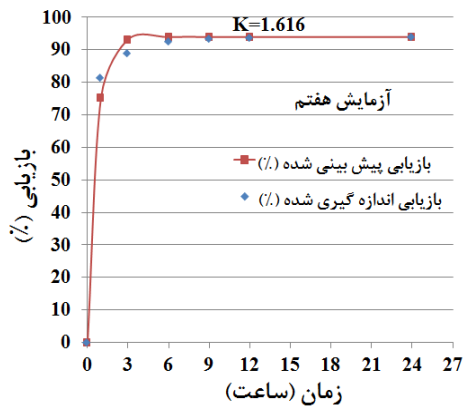
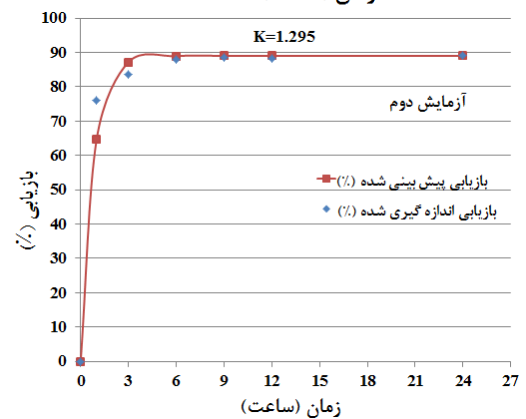
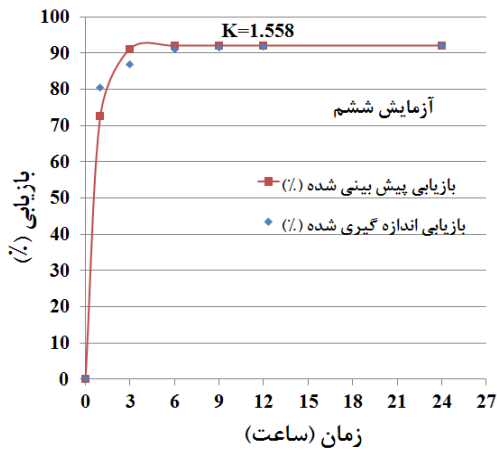
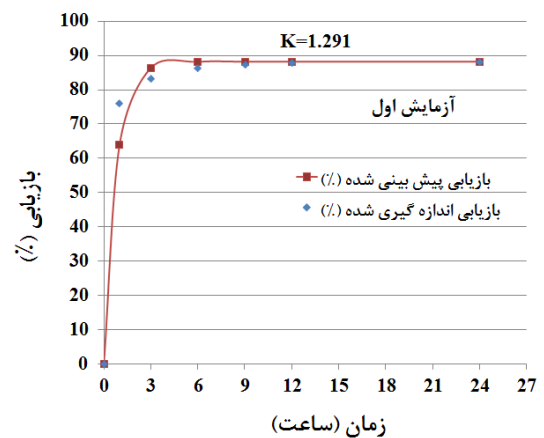
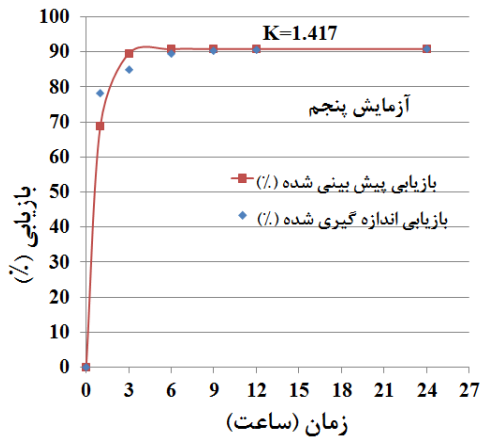
با توجه به شکل ۱۰ سیانور مصرفی در ۱۲ ساعت برابر  $1/19 \text{ gr}$  سیانور سدیم معادل  $1050 \text{ ppm}$  حاصل شد، که  $0/85 \text{ gr}$  در زمان صفر اضافه شده و  $0/34 \text{ gr}$  در ساعت ششم باید اضافه شود. همچنین با توجه به شکل ۱۱ و ثابت سینتیک و ثابت سینتیک حاصل از آزمایش‌های انجام شده، پیش‌هوادهی با دبی  $0/6 \frac{\text{lit}}{\text{min}}$  در ۳ ساعت، و هوادهی در زمان لیچینگ مناسب تشخیص داده شد. با توجه به آزمایش هشتم افزودن سیانور سدیم بطور متناوب نسبت به افزودن آنی سیانور سدیم در زمان صفر، مؤثرتر است. البته با توجه به اینکه بازیابی در ۲۴ ساعت و ۱۲ ساعت تفاوت چندانی با هم ندارد، از اینرو زمان بیهنه‌ی لیچینگ ۱۲ ساعت در نظر گرفته شد. pH بیهنه  $10/1$  و  $d_{80}$  بیهنه  $106$  میکرون برای دستیابی به بازیابی بیهنه بدست آمد.

سیانوراسیون ابتدا معادل  $[\text{CN}^-]=750 \text{ ppm}$ ، به پالپ اضافه و غلظت طلا نمونه‌برداری انجام شد، لازم به ذکر است در زمان‌هایی که غلظت سیانور آزاد به کم‌تر از  $300 \text{ ppm}$  رسید به منظور حفظ غلظت سیانور در حین لیچینگ به پالپ تا  $600 \text{ ppm}$  جرم لازم از سیانود سدیم اضافه گردید. در زمان ابتدایی لیچینگ  $E_{h_{\text{initial}}}=0/51 \text{ Volt}$  نسبت به الکتروود استاندارد هیدروژن، می‌باشد.

این آزمایش نسبت به آزمایش‌های قبلی بازیابی بیشتر، سیانور مصرفی کم‌تر و حتی نرخ انحلال طلا بیشتتری دلیل ثابت سرعت بالاتر را دارد. سینتیک بالاتر، به این دلیل است که در آزمایش‌های قبلی غلظت سیانور در ابتدا نسبت به غلظت بیهنه زیادتر بوده که این امر باعث کند شدن سرعت انحلال نسبت به سرعت انحلال در غلظت بیهنه می‌شود. همانطور که در مطالعات پیشین گزارش شده غلظت‌های سیانور آزاد بالاتر یا پایین‌تر از غلظت بیهنه، نرخ انحلال طلا را در محلول سیانوری، کاهش می‌دهد. که در غلظت‌های بالاتر تأثیر بر



شکل ۱۰: تغییرات غلظت سیانور آزاد در مقابل زمان در آزمایش‌های اول تا هشتم



شکل ۱: بازیابی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده برحسب زمان و ثابت سینتیک واکنش در آزمایش‌های اول تا هشتم

جدول ۱۱: کاربرد آزمایش‌های طراحی شده با استفاده از نرم افزار DX8

FREE [CN <sup>-</sup> ] (ppm)	Recovery (%)	D: Leaching time (h)	C: d <sub>80</sub> (μ)	B: [CN <sup>-</sup> ] (ppm)	A: pH	Run	Std
۲۹۹/۵۲	۸۲/۹۷	۶	۶۳	۱۰۰۰	۱۰	۲۲	۱
۴۴۹/۲۸	۷۹/۳۵	۶	۶۳	۱۰۰۰	۱۱	۱	۲
۲۴۹/۶	۷۰/۷۴	۶	۶۳	۲۰۰۰	۱۰	۸	۳
۱۶۴۷/۴	۸۹/۷۱	۶	۶۳	۲۰۰۰	۱۱	۷	۴
۸۹۸/۵۶	۸۷/۹	۶	۸۸	۱۰۰۰	۱۰	۲۱	۵
۵۹۹/۰.۴	۷۳	۶	۸۸	۱۰۰۰	۱۱	۲۳	۶
۲۴۹/۶	۷۹/۹۸	۶	۸۸	۲۰۰۰	۱۰	۶	۷
۱۷۴۷/۲	۷۶/۴۷	۶	۸۸	۲۰۰۰	۱۱	۱۸	۸
۹۹/۸۴	۷۴/۸۹	۱۲	۶۳	۱۰۰۰	۱۰	۴	۹
۶۴۸/۹۶	۸۰/۸	۱۲	۶۳	۱۰۰۰	۱۱	۲۵	۱۰
۲۹۹/۵۲	۷۸/۷۲	۱۲	۶۳	۲۰۰۰	۱۰	۵	۱۱
۱۴۴۷/۷	۸۵/۸	۱۲	۶۳	۲۰۰۰	۱۱	۱۵	۱۲
۱۹۹/۶۸	۸۳/۲۶	۱۲	۸۸	۱۰۰۰	۱۰	۲۶	۱۳
۷۴۸/۸	۸۱/۷۵	۱۲	۸۸	۱۰۰۰	۱۱	۲۹	۱۴
۹۹/۸۴	۸۴/۸	۱۲	۸۸	۲۰۰۰	۱۰	۱۴	۱۵
۱۴۹۷/۶	۷۹/۵۲	۱۲	۸۸	۲۰۰۰	۱۱	۱۲	۱۶
۵۰	۷۰/۰۵	۹	۷۵/۵	۱۵۰۰	۹/۵	۲۸	۱۷
۸۹۸/۵۶	۷۳/۵۶	۹	۷۵/۵	۱۵۰۰	۱۱/۵	۲۷	۱۸
۱۴۹/۷۶	۷۰/۵۹	۹	۷۵/۵	۵۰۰	۱۰/۵	۲	۱۹
۶۹۸/۸۸	۷۸/۷	۹	۷۵/۵	۲۵۰۰	۱۰/۵	۹	۲۰
۲۹۹/۵۲	۸۲/۷	۹	۵۳	۱۵۰۰	۱۰/۵	۱۷	۲۱
۷۴۸/۸	۷۹/۲۳	۹	۱۰۰/۵	۱۵۰۰	۱۰/۵	۱۳	۲۲
۵۴۹/۱۲	۸۳/۵۹	۳	۷۵/۵	۱۵۰۰	۱۰/۵	۱۶	۲۳
۲۴۹/۶	۸۴/۳۳	۱۵	۷۵/۵	۱۵۰۰	۱۰/۵	۳	۲۴
۳۹۹/۳۶	۸۳/۳۵	۹	۷۵/۵	۱۵۰۰	۱۰/۵	۱۱	۲۵
۴۹۹/۲	۸۴/۱۱	۹	۷۵/۵	۱۵۰۰	۱۰/۵	۱۹	۲۶
۳۹۹/۵۶	۸۶/۶۷	۹	۷۵/۵	۱۵۰۰	۱۰/۵	۱۰	۲۷
۴۹۹/۲۸	۸۵/۷۴	۹	۷۵/۵	۱۵۰۰	۱۰/۵	۲۴	۲۸
۲۹۹/۵۲	۸۹/۱۷	۹	۷۵/۵	۱۵۰۰	۱۰/۵	۲۰	۲۹
۱۵۶/۷۹	۸۴/۲۳	۹	۷۵/۵	۱۵۰۰	۱۰/۵	۳۰	۳۰

## ۳- نتیجه گیری

با توجه به مطالعات خواص سنجی، پیش‌فرآوری، لیچینگ و اکسیداسیون کانه نتایج زیر در مورد نمونه کانسنگ طلای زایلک حاصل شد.

از مطالعات میکروسکوپ نوری و الکترونی روی مقاطع نازک و نازک‌صیقلی مشخص شد که این کانه از نوع اکسیدی می‌باشد. قسمت عمده‌ی کانی‌های فلزی موجود در کانه را اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن (هماتیت، گوتیت و لیمونیت) و بندرت کانی‌های سولفیدی آهن در داخل کانی‌های اکسیدی آهن تشکیل داده‌اند. در مواردی اندک کانی کالکوپیرت مشاهده شد که در سطح نمونه دستی به صورت مالاکیت نمایان شده است. بخش اعظم کانه را کانی‌های سیلیکاته همانند کوارتز، فلدسپات و کانی‌های رسی تشکیل داده است. در مطالعات درجه آزادی به صورت چشمی ثابت شد، دانه‌های کانی پیریت در ۶۳ میکرون، ۱۰۰٪ آزاد شده‌اند، اما کانی‌های اکسیدی در این ابعاد تقریباً به ۶۵٪ آزادی رسیده‌اند. مطالعات SEM نشان داد که طلا در ابعاد کم‌تر از ۳ میکرون و به صورت پراکنده در کانسنگ و به‌طور تقریبی همراهی نزدیکی با عنصر آهن دارد.

با توجه به نتایج آزمایش‌های سیانوراسیون، نرم‌افزار شرایط بهینه‌ی حاصل در حالت غیر مشروط را در  $\text{pH} = 10/05$ ، غلظت سیانور اولیه‌ی ۱۲۰۰ ppm،  $d_{80}$  برابر ۱۰۶ میکرون و زمان لیچینگ ۹ ساعت با بازیابی ۹۰/۱۴٪ و غلظت سیانور آزاد باقی مانده‌ی برابر ۱۹۵ ppm، با درجه‌ی مطلوبیت ۱، ارائه داد. شرایط بهینه‌ی حاصل در حالت مشروط را در  $\text{pH} = 10/15$ ، غلظت سیانور اولیه‌ی ۵۰۷ ppm،  $d_{80}$  برابر ۱۰۶ میکرون و زمان لیچینگ ۳ ساعت با بازیابی ۸۹/۷۷٪ و غلظت سیانور آزاد باقی مانده‌ی برابر ۱۶۶ ppm، با درجه‌ی مطلوبیت ۱، ارائه داد.

با توجه به آزمایش‌های پیش‌هواده‌ی، اکسیداسیون و ثابت سینتیک حاصل از واکنش‌ها در هشت آزمایش، شرایط بهینه‌ی پیشنهادی نرم‌افزار بهبود یافت. با اجرای آزمایش‌ها در شرایط متفاوت با استفاده از نیترات سرب و هواده‌ی در حالات متفاوت، شرایط بهبود یافته‌ی نهایی حاصل شد. با توجه به ثابت سینتیک حاصل از آزمایش‌های انجام شده، پیش‌هواده‌ی با دبی  $\frac{\text{lit}}{\text{min}}$  ۰/۶ در ۳ ساعت و هواده‌ی در

زمان لیچینگ، مناسب تشخیص داده شد. همچنین افزودن سیانور سدیم به‌طور متناوب نسبت به افزودن آنی سیانور سدیم در زمان صفر، مؤثرتر ارزیابی شد. از آنجاییکه بازیابی در ساعت ۲۴ و ۱۲، تفاوت چندانی باهم ندارد، زمان بهینه‌ی لیچینگ ۱۲ ساعت در نظر گرفته شد. با توجه به سیانور مصرفی در ۱۲ ساعت، جرم سیانورسدیم مصرفی برابر  $gr$  ۱/۱۹ معادل ۱۰۵۰ ppm سیانور حاصل شد، که  $gr$  ۰/۸۵ در زمان صفر اضافه شده و  $gr$  ۰/۳۴ در ساعت ششم اضافه گردید.  $\text{pH}$  بهینه ۱۰/۱۵ و  $d_{80}$  بهینه ۱۰۶ میکرون برای دستیابی به بازیابی بهینه‌ی برابر ۹۳/۹۳٪ بدست آمد.

## ۴- تقدیر و تشکر

این مطالعه در دانشگاه تربیت مدرس و با همکاری سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کل کشور انجام شده است. که لازم است از مساعدت‌های کلیه پرسنل آن‌ها که در این مطالعه همکاری خود را دریغ نکردند، تشکر به عمل آورم.



## مراجع

- [18] Lorenzen, L. and J.S.J. van Deventer, *Electrochemical interactions between gold and its associated minerals during cyanidation*. Hydrometallurgy, 1992.30(1-3): p. 177-193.
- [19] Selabat. A.R., *Physical Chemistry for Engineering Courses*, 1<sup>th</sup> Edition, Arak university, 2006.
- [1] Yannopoulos, J.C., *The extractive Metallurgy of Gold*. Van Norstand Rainhold, 1992.
- [2] Mahmood, A., Noaparast .M., Aslani, S., Ghorbani, A., *The Arghash gold ore sample treatment*. Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B: Engineering, 2010.34: p. 577-589.
- [3] Senanayake, G., *The cyanidation of silver metal: Review of kinetics and reaction mechanism*. Hydrometallurgy, 2006. 81(2): p. 75-85.
- [4] La Brooy, S.R., Ling, H.G., Walker, G.S., *Review of gold extraction from ores*. Minerals Engineering, 1994.7(10): p. 1213-1241.
- [5] Adams, M.D., *Advanced in gold ore processing*. Elsevier, 2005.
- [6] Gupta, C.K., Mukherjee, T. K., *Hydrometallurgy in Extraction Processes*. CRC Press, 2000.2: p. 1-47.
- [7] Marsden, J., Ellis Horwood, I.H., *The chemistry of gold extraction*. 1992: p. 260-295.
- [8] Tan, H., Feng, D., Lukey, G.C., Van Denventer, J.S.J., *The behaviour of carbonaceous matter in cyanide leaching of gold*. Hydrometallurgy, 2005.78(3-4): p. 226-235.
- [9] Kondos, P.D., Deschênes, G., Morrison, R.M., *Process optimization studies in gold cyanidation*. Hydrometallurgy, 1995.39(1-3): p. 235-250.
- [10] Karimi, P., Abdollahi, H., Amini, A., Noaparast, M., Shafaei, S.Z., Habashi, F., *Cyanidation of gold ores containing copper, silver, lead, arsenic and antimony*. International Journal of Mineral Processing, 2010.95(1-4): p. 68-77.
- [11] Coetzee, L.L., Salomon J. T., Gavin J. M., Juan-David van der M., Tracey A., *Modern gold departments and its application to industry*. Minerals Engineering, 2011. 24(6): p. 565-575.
- [12] De Andrade Lima, L.R.P. and Hodouin, D., *Optimization of reactor volumes for gold cyanidation*. Minerals Engineering, 2005. 18(7): p. 671-679.
- [13] De Andrade Lima, L.R.P. and Hodouin, D., *Residence time distribution of an industrial mechanically agitated cyanidation tank*. Minerals Engineering, 2005. 18(6): p. 613-621.
- [14] Fricker, A.G., *Recovery of cyanide in the extraction of gold*. Journal of Cleaner Production, 1993. 1(2): p. 77-80.
- [15] Habashi, F., *A textbook of hydrometallurgy*, Métallurgie extractive Québec, Enr., 1993.
- [16] Montgomery, Douglas C., *Design and Analysis of Experiments*, 5<sup>th</sup> Edition, 2001.
- [17] Venter, D., S.L. Chryssoulis, and T. Mulpeter, *Using mineralogy to optimize gold recovery by direct cyanidation*. JOM, 2004. 56(8): p. 53-56.