



دانشکده معدن ، نفت و ژئوفیزیک

گروه اکتشاف

عنوان پایان نامه ارشد

فرآوری کانسنگ طلای هیرد (خراسان جنوبی)

دانشجو

لیلا شاملی

اساتید راهنما :

دکتر سید ضیاءالدین شفائی

دکتر آرزو عابدی

استاد مشاور :

مهندس احمد امینی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

تیر ۱۳۸۸

تقدیم به آنهایی که با تمام وجود دوستشان دارم:
تقدیم به آنهایی که با تمام وجود دوستشان دارم:

پدر

مادر

برادر

و خواهرانم
و خواهرانم

بر خود واجب می دانم :

از زحمات استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر شفائی و همچنین استاد عزیزم سرکار خانم دکتر عابدی تشکر و قدردانی کنم همچنین از زحمات اعضای گروه فرآوری سازمان زمین شناسی کشور جناب آقای مهندس امینی مشاور پروژه ام و جناب آقای مهندس عبدالهی که همواره پاسخگوی سئوالات من بودند ، تشکر و قدردانی نمایم.

همچنین جا دارد از زحمات جناب آقای مهندس کر و راهنمایی های بی دریغ ایشان تشکر نمایم.

چکیده

مکتوب حاضر گزارش فرآوری کانسنگ سیلیسی- کربناتی طلای هیرد واقع در تارگت شماره ۳ منطقه هیرد است .

پس از جمع آوری نمونه توسط سازمان زمین شناسی کشور، نمونه جهت مطالعات فرآوری به آزمایشگاه کانه آرایی دانشگاه صنعتی شاهرود ارسال و پس از خردایش اولیه، همگن سازی و دانه بندی، آزمایشهای عیارسنجی و مطالعات میکروسکوپی صورت پذیرفت. مطالعات ویژگی شناختی نشان می دهد که اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و آلتره شدن کانیهای سولفیدی به گوئیت و لپیدوکروسیت مهم ترین فازهای کانی شناسی بود، عیار طلا ۲/۲ تا ۲/۶ ppm اندازه گیری شد.

جهت استخراج طلا لیچینگ با روش سیانوراسیون انتخاب شد و در دو مرحله مطالعات پارامترهای موثر در لیچینگ سیانیدی طلا بررسی شد، در ابتدا به روش فاکتوریل کامل^۱ و با توجه به ماهیت این روش تمامی حالت های ممکن آزمایش و بازه بهینه تغییرات پارامترهای موثر انتخاب و جهت انجام آزمایش های نهایی به منظور یافتن بهترین شرایط جهت دستیابی به بهترین بازیابی طلا ، به روش Historical data که یکی از روشهای سطح پاسخ^۲ در مجموعه طراحی آزمایش ها می باشد اقدام شد.

^۱ General Factorial

^۲ Response Surface

آنالیز نمونه ها نشان می دهد که در نهایت با مقدار سیانید برابر با ۲ کیلوگرم بر تن (2000 ppm)، pH برابر با 10/5 و دانه بندی 53- میکرون ، بیشترین بازیابی به مقدار ۹۲/۲٪ حاصل شد.

واژه های کلیدی : لیچینگ سیانیدی ، منطقه معدنی هیرد ، طراحی آماری آزمایشها ، روش فاکتوریل

کامل ، روش Design Expert Software , Historical data

List of papers

- 1- Shameli, L., Shafaei, S.,Z., Amini, A., Kor, M., (2009) , “ The effect of various parameters on Recovery of Hyred Gold refractory by cyanidation Process”, Accepted in 14th international mining conference in Turkey (Antalya) ,6-8 May 2009

فهرست اصلی

۱	فصل اول: کلیات
۱-۱	مقدمه
۲	۲-۱ فعالیتهای انجام شده قبلی بر روی منطقه
۵	فصل دوم: زمین شناسی منطقه مورد مطالعه و نمونه برداری
۱-۲	مقدمه
۲-۲	موقعیت جغرافیایی منطقه و راههای دسترسی
۳-۲	شرایط آب و هوایی منطقه
۴-۲	زمین شناسی منطقه معدنی هیرد
۱-۴-۲	منطقه اکتشافی شماره یک
۱-۴-۲-۱	بخش شرقی منطقه اکتشافی شماره یک
۱-۴-۲-۲	بخش غربی منطقه اکتشافی شماره یک
۲-۴-۲	منطقه اکتشافی شماره دو
۳-۴-۲	منطقه اکتشافی شماره سه
۴-۴-۲	منطقه اکتشافی شماره چهار
۵-۲	محدوده معدنی طلای هیرد تارگت شماره ۳
۶-۲	نمونه برداری
۳	فصل سوم: مطالعات کانی شناسی و شناسایی ترکیب نمونه ها

۲۳	۱-۳ مقدمه.....
۲۴	۲-۳ تعیین عیار طلا.....
۲۵	۳-۳ ترکیب شیمیایی نمونه ها
۲۶	۴-۳ مطالعات کانی شناسی کانسنگ طلای هیرد.....
۲۶	۱-۴-۳ بررسی نمونه دستی کانسنگ طلای هیرد.....
۲۷	۲-۴-۳-۲ مطالعه مقاطع نازک
۲۸	۱-۲-۴-۳-۱ مقطع نازک شماره AG-32
۳۳	۲-۲-۴-۳-۲ مقطع نازک شماره AG-31
۳۳	۳-۲-۴-۳-۳ مقطع نازک شماره AG-30
۳۴	۳-۴-۳-۳ مطالعه مقاطع صیقلی
۳۴	۱-۳-۴-۳-۱ مقطع صیقلی Ag-17 (فراکسیون ۸۴۰ میکرون)
۳۵	۲-۳-۳-۳-۲ مقطع صیقلی Ag-16 (فراکسیون ۵۰۰ میکرون)
۳۷	۵-۳ مطالعه کیفی XRD.....
۳۸	۶-۳ مطالعه XRF.....
۳۹	۷-۳ مطالعات تکمیلی کانی شناسی (میکروسکوپ الکترونی یا SEM)
۴۱	۸-۳ مطالعات قبلی
۴۴	فصل چهارم: کلیاتی درباره فرآوری کانسنگ طلا.....
۴۴	۱-۴ روش سیانیداسیون.....
۴۵	۱-۱-۴ عوامل موثر در حلالیت.....
۴۵	۱-۱-۱-۴ اثر غلظت سیانور.....

- ۴۶..... pH اثر ۲-۱-۱-۴
- ۴۸..... اثر حرارت محیط ۳-۱-۱-۴
- ۵۰..... اثر اکسیژن ۴-۱-۱-۴
- ۵۳..... اثر نور و سطح ۵-۱-۱-۴
- ۵۳..... اثر اندازه ذرات ۶-۱-۱-۴
- ۵۴..... اثر مواد شیمیایی استفاده شده در فلوتاسیون ۷-۱-۱-۴
- ۵۴..... رفتار دیگر کانی ها در انحلال سیانیدی- آلكالی ۸-۱-۱-۴
- ۵۴..... کنسارهای نقره ۱-۸-۱-۱-۴
- ۵۵..... کنسارهای مس ۲-۸-۱-۱-۴
- ۵۷..... کانی های آهن ۳-۸-۱-۱-۴
- ۵۸..... آرسنیک و کانیه‌های آنتیموان ۴-۸-۱-۱-۴
- ۵۸..... کانی های روی ۵-۸-۱-۱-۴
- ۵۹..... عناصر سولفوری ۶-۸-۱-۱-۴
- ۶۰..... کانی های تلوریم ۷-۸-۱-۱-۴
- ۶۰..... ترکیبات کربناته ۸-۸-۱-۱-۴
- ۶۲..... روش های بازیابی طلا از محلولهای سیانید ۲-۱-۴
- ۶۲..... روش رسوگیری طلا از محلول سیانیدی با استفاده از فلز روی ۱-۲-۱-۴
- ۶۳..... روش جذب طلا از محلول سیانیدی با استفاده از کربن فعال ۲-۲-۱-۴
- ۶۴..... توضیحات تکمیلی روش سیانیداسیون ۲-۴

فصل پنجم: روش تحقیق.....	۶۸
۱-۵ مقدمه.....	۶۸
۲-۵ فهم چگونگی ارتباط بین متغیر ها و پاسخ های فرایند.....	۶۹
۳-۵ تعاریف اولیه	۶۹
۱-۳-۵ طراحی آماری آزمایشها.....	۶۹
۲-۳-۵ عامل	۷۰
۳-۳-۵ سطح	۷۲
۴-۳-۵ پاسخ	۷۲
۵-۳-۵ اثرات متقابل بین عوامل	۷۲
۴-۵ طراحی آزمایشها به روش فاکتوریل کامل	۷۳
۱-۴-۵ شناسایی اثرات معنی دار به کمک آنالیز واریانس ANOVA	۷۷
۵-۵ مدلسازی اثرات معنی دار	۸۲
فصل ششم: استخراج طلائی هیرد به روش لیچینگ سیانیدی.....	۸۵
۱-۶ مقدمه.....	۸۵
۲-۶ اهداف انجام آزمایشها.....	۸۶
۳-۶ تهیه خوراک و پالپ اولیه.....	۸۶
۴-۶ طراحی و روش انجام آزمایشها	۸۹
۱-۴-۶ روش انجام آزمایشها.....	۹۰
۵-۶ آزمایشهای مربوط به مطالعه عوامل موثر بر بازیابی طلا.....	۹۲

۹۴	۶-۶ مطالعه و تفسیر داده های پاسخ (درصد بازیابی طلا)
۹۴	۱-۶-۶ اعمال تبدیل بر داده های پاسخ
۹۵	۲-۶-۶ برازش مدل بر روی داده های پاسخ
۹۶	۳-۶-۶ آنالیز واریانس پاسخ
۹۸	۴-۶-۶ آنالیز خطاهای پاسخ
۱۰۱	۵-۶-۶ بررسی نتایج پاسخ
۱۱۵	۷-۶ بررسی زمان سیانیداسیون
۱۱۸	۸-۶ بررسی سرعت هم زدن
۱۱۹	فصل هفتم: بهینه سازی شرایط لیچینگ سیانیدی
۱۱۹	۱-۷ مقدمه
۱۲۱	۲-۷ مطالعه و تفسیر داده های پاسخ
۱۲۱	۱-۲-۷ برازش مدل بر روی داده های پاسخ
۱۲۳	۲-۲-۷ آنالیز واریانس پاسخ
۱۲۴	۳-۲-۷ آنالیز خطاهای پاسخ
۱۲۸	۵-۲-۷ بررسی نتایج پاسخ
۱۳۷	فصل هشتم: نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات
۱۴۴	منابع و ماخذ

فهرست اشکال

- فصل دوم: زمین شناسی منطقه مورد مطالعه و نمونه برداری..... ۵
- شکل ۱-۲ نمایش منطقه هیرد بر روی نقشه ایران..... ۷
- شکل ۲-۲ موقعیت محدوده اکتشافی و راههای ارتباطی آن..... ۸
- شکل ۳-۲ نقشه زمین شناسی محدوده اکتشافی هیرد..... ۱۷
- شکل ۴-۲ نمایش ترانسه ها با فواصل مشخص در تمام منطقه..... ۱۹
- شکل ۵-۲ ابعاد نمونه های برداشت شده..... ۲۰
- شکل ۶-۲ منحنی دانه بندی نمونه کانسنگ هیرد..... ۲۲
- فصل سوم: مطالعات کانی شناسی و شناسایی ترکیب نمونه ها..... ۲۵
- شکل ۱-۳ نمایی از نمونه های تهیه شده..... ۲۷
- شکل ۲-۳ نمونه کانسنگ قبل از آسیاب شدن..... ۲۷
- شکل ۳-۳ نمایی از بلورهای دولومیت درگیر با اکسیدهای آهن..... ۲۹
- شکل ۴-۳ نمایی از بلورهای دولومیت درگیر با اکسیدهای آهن در نور پلاریزه..... ۲۹
- شکل ۵-۳ نمایی از سطح مقطع در نور عبوری شامل کوارتز ریز بلور حاوی لکه های اکسید آهن... ۳۰
- شکل ۶-۳ نمایی از سطح مقطع در نور عبوری شامل کوارتز ریز بلور حاوی لکه های اکسید آهن در نور پلاریزه..... ۳۰
- شکل ۷-۳ بافت کلروفومی شبه لایه ای شامل تناوب کوارتز نهان بلور و اکسیدهای آهن..... ۳۱
- شکل ۸-۳ بافت کلروفومی شبه لایه ای شامل تناوب کوارتز نهان بلور و اکسیدهای آهن در نور پلاریزه..... ۳۱

- شکل ۳-۹ زمینه اصلی سنگ میزبان کوارتز نهان بلور..... ۳۲
- شکل ۳-۱۰ زمینه اصلی سنگ میزبان کوارتز نهان بلور در نور پلاریزه..... ۳۲
- شکل ۳-۱۱ طرح شماتیکی از غالب کانی های مشاهده شده در سطح..... ۳۳
- شکل ۳-۱۲ تارهای صلیب و غیر صلیب دانه های آزاد گوتیت..... ۳۵
- شکل ۳-۱۳ گوتیت درگیر با گانگ و یک لکه مشکوک به اکسید تیتان..... ۳۶
- شکل ۳-۱۴ وجود آغشتگی از هماتیت..... ۴۱
- شکل ۳-۱۵ اکسیدهای آهن و وجود هماتیت در سطح..... ۴۲
- شکل ۳-۱۶ نمایی از پیریت دچار آلتراسیون شده و تبدیل شده به اکسید آهن..... ۴۲
- شکل ۳-۱۷ اکسیدهای آهن..... ۴۳
- شکل ۳-۱۸ پوشیدگی سطح توسط اکسید آهن..... ۴۳
- فصل چهارم: کلیاتی درباره فرآوری کانسنگ طلا..... ۴۴
- شکل ۴-۱ ترکیبات موجود در محلول سیانید به عنوان تابعی از pH..... ۴۶
- شکل ۴-۲ دیاگرام تعادلی pH برای سیستم Au-H₂O-CN- در ۲۵C..... ۴۷
- شکل ۴-۳ اثر دما بر بازیابی طلا..... ۴۹
- شکل ۴-۴ نرخ انحلال دیسک طلا - اثر همزنی..... ۵۱
- شکل ۴-۵ دیاگرام Eh-pH برای سیستم Ag-CN-H₂O در شرایط نرمال ۲۵C..... ۵۵
- شکل ۴-۶ دیاگرام Eh-pH برای سیستم Cu-CN-H₂O در شرایط نرمال ۲۵C..... ۵۷
- فصل پنجم: روش تحقیق..... ۶۸
- شکل ۵-۱ نمای شماتیک از فرایند و عوامل موثر بر آن..... ۷۱

- شکل ۵-۲ نمای مکعب مربعی پاسخها برای بررسی اثر اصلی عامل A..... ۷۵
- شکل ۵-۳ توزیع F را برای درجه آزادی (۳,۴)..... ۸۱
- فصل ششم: استخراج طلای هیرد به روش لیچینگ سیانیدی..... ۸۵
- شکل ۶-۱ منحنی توزیع نرمال مانده ها مربوط به پاسخ (بازیابی طلا %)...... ۹۵
- شکل ۶-۲ نمودار تغییرات مانده ها در مقابل مقادیر پیش بینی شده پاسخ (درصد بازیابی) توسط مدل..... ۹۸
- شکل ۶-۳ نمودار تغییرات مانده ها در مقابل توالی انجام آزمایشها مربوط به پاسخ (درصد بازیابی)..... ۹۹
- شکل ۶-۴ نمودار مقادیر واقعی پاسخ (درصد بازیابی) نسبت به مقادیر پیش بینی شده آن توسط مدل..... ۱۰۰
- شکل ۶-۵ نمودار Externally Studentized Residuals برای بررسی مقادیر خارج از رده مربوط
به پاسخ (درصد بازیابی)..... ۱۰۰
- شکل ۶-۶ نمودار تاثیر عامل سیانید بر بازیابی طلا در دانه بندی های مختلف و pH های ثابت برابر
با ۵,۱۰..... ۱۰۴
- شکل ۶-۷ نمودار تاثیر عامل سیانید بر بازیابی طلا در pH های مختلف و دانه بندی های ثابت برابر
با ۵۳ میکرون..... ۱۰۵
- شکل ۶-۸ نمودار تاثیر عامل pH بر بازیابی طلا در دانه بندی های مختلف و مقدار سیانور ثابت برابر با
۱ کیلوگرم بر تن..... ۱۰۷
- شکل ۶-۹ نمودار تاثیر عامل pH بر بازیابی طلا در مقدار سیانورهای مختلف و دانه بندی ثابت برابر با
۳۸ میکرون..... ۱۰۸
- شکل ۶-۱۰ نمودار تاثیر عامل دانه بندی بر بازیابی طلا در pH های مختلف و مقدار سیانور برابر با
۱ کیلوگرم بر تن..... ۱۱۰

شکل ۶-۱۱ نمودار تاثیر عامل دانه بندی بر بازیابی طلا در مقدار سیانورهای متفاوت و pH برابر با ۱۱..... ۱۱۱

شکل ۶-۱۲ اثرات متقابل سیانید بر مقدار pH در مقدار دانه بندی های ثابت..... ۱۱۳

شکل ۶-۱۳ نمایش نمودار با ۳ محور pH، سیانید (گرم بر تن) و بازیابی (%). ۱۱۴

شکل ۶-۱۴ نمایش نمودار با ۳ محور pH، دانه بندی (میکرون) و بازیابی (%). ۱۱۴

شکل ۶-۱۵ منحنی نرخ بازیابی طلا بر حسب درصد بر روی محور زمان بر حسب ساعت در نمونه

.....HG25 ۱۱۶

شکل ۶-۱۶ منحنی نرخ بازیابی طلا بر حسب درصد بر روی محور زمان بر حسب ساعت در نمونه

..... HG26 ۱۱۷

فصل هفتم: بهینه سازی شرایط لیچینگ سیانیدی..... ۱۱۹

شکل ۷-۱ منحنی توزیع نرمال مانده ها مربوط به پاسخ (بازیابی طلا (%). ۱۲۲

شکل ۷-۲ نمودار تغییرات مانده ها در مقابل مقادیر پیش بینی شده پاسخ (درصد بازیابی) توسط م..... ۱۲۴

شکل ۷-۳ نمودار تغییرات مانده ها در مقابل توالی انجام آزمایشها مربوط به پاسخ (درصد بازیابی). ۱۲۵

شکل ۷-۴ نمودار مقادیر واقعی پاسخ (درصد بازیابی) نسبت به مقادیر پیش بینی شده آن توسط مدل..... ۱۲۶

شکل ۷-۵ نمودار Externally Studentized Residuals برای بررسی مقادیر خارج از رده مربوط به

پاسخ (درصد بازیابی). ۱۲۷

شکل ۷-۶ نمودار تحلیل حساسیت در شرایط مقدار سیانید برابر با ۱ کیلوگرم بر تن و pH برابر با

..... ۱۰ ۱۲۸

شکل ۷-۷ نمودار تحلیل حساسیت در شرایط مقدار سیانید برابر با ۱,۵ کیلوگرم بر تن و

pH برابر با .. ۱۰ ۱۲۹

شکل ۷-۸ نمودار تحلیل حساسیت در شرایط مقدار سیانید برابر با ۲ کیلوگرم بر تن و

pH برابر با ۱۰..... ۱۲۹

شکل ۷-۹ نمودار تحلیل حساسیت در شرایط مقدار سیانید برابر با ۱ کیلوگرم بر تن و pH برابر با

۱۰/۲۵..... ۱۳۰

شکل ۷-۱۰ نمودار تحلیل حساسیت در شرایط مقدار سیانید برابر با ۲ کیلوگرم بر تن و pH برابر با

۱۰/۲۵..... ۱۳۰

شکل ۷-۱۱ نمودار تحلیل حساسیت در شرایط مقدار سیانید برابر با ۱ کیلوگرم بر تن و pH برابر

با ۱۰/۵..... ۱۳۱

شکل ۷-۱۲ نمودار تحلیل حساسیت در شرایط مقدار سیانید برابر با ۱/۵ و pH برابر با ۱۰/۵۰..... ۱۳۱

شکل ۷-۱۳ نمودار تاثیر عامل سیانید بر بازیابی طلا در pH های مختلف و دانه بندی ثابت ۴۵۳..... ۱۳۳

شکل ۷-۱۴ نمودار تاثیر عامل pH بر بازیابی طلا در مقدار سیانید های مختلف و دانه بندی ثابت ۴۵۳..... ۱۳۴

شکل ۷-۱۵ نمودار تاثیر متقابل ۲ عامل سیانید و pH بر بازیابی طلا..... ۱۳۵

شکل ۷-۱۶ نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) تاثیر عوامل سیانید و pH بر بازیابی طلا..... ۱۳۶

شکل ۷-۱۷ نمودار سه بعدی تاثیر عوامل سیانید و pH بر بازیابی طلا..... ۱۳۶

فهرست جداول

- فصل دوم: زمین شناسی منطقه مورد مطالعه..... ۵
- جدول ۱-۲- آنالیز طلا در محدوده های مختلف دانه بندی نمونه Head کانسنگ هیرد..... ۲۱
- فصل سوم: کانی شناسی کانسنگ طلای مورد مطالعه..... ۲۳
- جدول ۱-۳- تعیین عیار طلا در محدوده ابعادی مختلف..... ۲۴
- جدول ۲-۳- آنالیز کلی نمونه Head..... ۲۵
- جدول ۳-۳- نتیجه XRD..... ۳۷
- جدول ۴-۳- نتایج XRD..... ۳۷
- جدول ۵-۳- نتیجه XRF..... ۳۸
- جدول ۶-۳- نتیجه SEM..... ۳۹
- فصل چهارم: کلیاتی درباره فرآوری کانسنگ طلا..... ۴۴
- جدول ۱-۴- انحلال پذیری کانی های مس در محلول $\sim 1, 0\% \text{ NaCN}$ ۵۶
- فصل پنجم: روش تحقیق..... ۶۸
- جدول ۱-۵- طرح فاکتوریل کامل با سه عامل A, B, C در دو سطح پایین - و بالا +..... ۷۳
- جدول ۲-۵- پاسخها و اثرات عوامل در طرح فاکتوریل کامل..... ۷۵
- جدول ۳-۵- اثرات اصلی و متقابل برای هر سه عامل A و B و C برای سری اول پاسخ Y1..... ۷۷
- جدول ۴-۵- آنالیز واریانس..... ۷۹
- جدول ۵-۵- مقادیر واقعی و پیش بینی شده پاسخها توسط مدل..... ۸۳
- فصل ششم: استخراج طلای هیرد به روش لیچینگ سیانیدی..... ۸۵

- جدول ۶-۱- نتایج حاصل از آزمایش کنترلی سیانیداسیون..... ۸۸
- جدول ۶-۲- تعداد عوامل و سطوح مورد بررسی..... ۹۲
- جدول ۶-۳- تعداد تست های طراحی شده به روش فاکتوریل کامل با ۳ عامل و تغییر هر عامل در ۳
- سطح و بازیابی طلا به عنوان پاسخ بر حسب درصد..... ۹۳
- جدول ۶-۴- آنالیز واریانس پاسخ آزمایشات (درصد بازیابی طلا)..... ۹۶
- جدول ۶-۵- خلاصه آماری از مدل برازش شده..... ۹۷
- جدول ۶-۶- بررسی زمان سیانوراسیون در نمونه شماره HG25 با دانه بندی ثابت ۵۳ میکرون..... ۱۱۶
- جدول ۶-۷- بررسی زمان سیانوراسیون در نمونه شماره HG26 با دانه بندی ثابت ۵۳ میکرون..... ۱۱۷
- فصل هفتم: بهینه سازی شرایط لیچینگ سیانیدی..... ۱۱۹
- جدول ۷-۱- تعداد عوامل و سطوح مورد بررسی..... ۱۱۹
- جدول ۷-۲- تعداد تست های طراحی شده به روش پاسخ سطح با ۲ عامل و تغییر هر عامل در ۳ سطح و بازیابی طلا به عنوان پاسخ بر حسب درصد..... ۱۲۰
- جدول ۷-۳- نتیجه انواع مدل های برازش شده بر روی داده ها و نتیجه انتخاب بهترین مدل پیشنهادی..... ۱۲۰
- جدول ۷-۴- اثر عوامل و تقابلهای آماری استفاده شده..... ۱۲۲
- جدول ۷-۵- آنالیز واریانس..... ۱۲۳

فصل اول

مقدمه

روش لیچینگ سیانیدی بعنوان یکی از روشهای صنعتی و کارآمد جهت استخراج طلا بکار می رود، این روش با قدمت بیش از یک قرن همچنان بعنوان روش پیشنهادی و تحقیقاتی در بررسی های استخراج طلا از کانسنگ میزبان در ایران برای مثال کانسنگ کوه زر (باغو) (فتوحی، ۱۳۸۳)، محدوده دیگری از زون سیلیسی - کربناتی هیرد (کریمی، ۱۳۸۷)، ... و در معادن خارج از ایران برای مثال دربخش شمالی از کمربند گرینستون سادلبرک در گوشه جنوب غربی از کراتون ایلگرن در استرالیای غربی (Saddleback Yilgarn), (Lima et al,2006)، معدن گولد کورپ دریاچه قرمز در ترکیه (Goldcorp Red Lake) (Xie et al,2008) و معدن طلای اوآکیک در ترکیه (Ovacik Gold Mine) (Akcil,2002) با کانی سازی و کانی شناسی تقریبا مشابه بکار می رود.

با وجود آنکه سیانور مصرفی در این روش باعث ایجاد آلودگی های زیست محیطی می شود لذا تمرکز تحقیقات اخیر بر روی بهینه سازی شرایط لیچینگ سیانیدی، (Lima et al,2006 ; Senanayake, 2005)، تلاش با هدف مصرف کمتر سیانور یا افزودن انواع اکساینده (Xie et al, 2007) و جلوگیری از آزاد شدن گاز HCN در حین فرایند انحلال (Heath et al, 2008) می باشد.

۱-۱) فعالیتهای انجام شده قبلی بر روی منطقه

سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی ایران در سال ۷۸-۸۰ حجم عظیمی از فعالیتهای اکتشافی را در قالب طرح اکتشافات معدنی جنوب خراسان در محدوده استان خراسان جنوبی شروع کرد که ادامه فعالیتهای اکتشافی توسط دیگر طرحها در حال حاضر نیز ادامه دارد.

از جمله فعالیتهای اکتشافی، بررسی زمین شناسی اقتصادی و اکتشافات ژئوشیمیایی بر روی نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ بصیران بوده که منجر به معرفی تعدادی نواحی امید بخش معدنی از جمله منطقه طلای هیرد گردید. در سال ۱۳۸۱ عملیات پیجویی در محدوده امید بخش طلای هیرد، با ترسیم نقشه زمین شناسی - معدنی و اکتشافات ژئوشیمیایی در مقیاس ۱/۲۰۰۰۰۰ آغاز شد که ماحصل آن معرفی ۴ زون معدنی طلا دار جهت ادامه عملیات اکتشافی می باشد.

در ابتدا بر روی زون طلای شماره ۱ که به جهت گسترش رخنمون ماده معدنی از وسعت بیشتری برخوردار بود عملیات اکتشاف عمومی با حفر ترانشه و گمانه های اکتشافی انجام شد. نتایج حاصل از مطالعات فرآوری بر روی نمونه های برداشت شده از این محدوده معدنی حاکی از ذخیره نسبتاً خوبی بود اما بدلیل عیار کم و حجم باطله برداری زیاد در حال حاضر غیر اقتصادی تشخیص داده شده و فعالیتهای اکتشافی بر روی آن متوقف شده است.

ادامه عملیات اکتشافی در منطقه طلای هیرد بر روی زون طلای شماره ۳ متمرکز شد که در این منطقه نیز با حفر حدود ۱۲۰ ترانشه اکتشافی و تعداد ۲۰ حلقه اکتشافی نتایج نسبتاً خوبی حاصل شده

است ، جهت انجام مطالعات فرآوری در مقیاس آزمایشگاهی ، دو سری نمونه هرکدام به وزن تقریبی ۳۰۰ کیلوگرم از دو کانی سازی مختلف برداشت شده است که تحقیق حاضر مطالعه فرآوری طلائی هیرد در زون سیلیسی - کربناتی می باشد (عسگری و همکاران، ۱۳۸۶)

مکتوب حاضر ، تحت عنوان "فرآوری کانسنگ طلائی هیرد" با هدف بررسی استخراج طلائی کم عیار واقع در زون سیلیسی - کربناتی هیرد (زون شماره ۳) است و امکان کانه آرای کانسنگ طلا ، مورد بررسی قرار گرفته است.

قسمتهای مختلف این گزارش و تحقیقات انجام شده را می توان به صورت زیر ارائه شده است.

- فصل اول - مقدمه
- فصل دوم - زمین شناسی منطقه و معرفی خصوصیات بارز منطقه و شرح نمونه برداری که به نحوه نمونه برداری، خردایش ، آماده سازی و دانه بندی نمونه اشاره شده است.
- فصل سوم - نتیجه تجزیه شیمیایی اولیه ، مطالعات کانی شناسی که به بررسی مقاطع صیقلی و نازک تهیه شده از نمونه های موجود می پردازد ، نتیجه مطالعه SEM و نتایج XRD و XRF در این فصل آمده است.
- در فصل چهارم- کلیاتی در خصوص فرآوری طلا ارائه شده است.
- در فصل پنجم - روش تحقیق (توضیح روش فاکتوریل کامل و تحلیل آنالیز واریانس).

- در فصل ششم- عملیات اجرایی فرآوری کانسنگ طلای هیرد به روش لیچینگ سیانیدی را توضیح داده شده است.
- فصل هفتم- به بهینه سازی و یافتن بهترین شرایط جهت نیل به حداکثر بازیابی طلا (درصد) می پردازد .
- در فصل هشتم- نتیجه گیری و پیشنهادات ارائه شده است.

فصل دوم

زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

و نمونه برداری

۲-۱- مقدمه

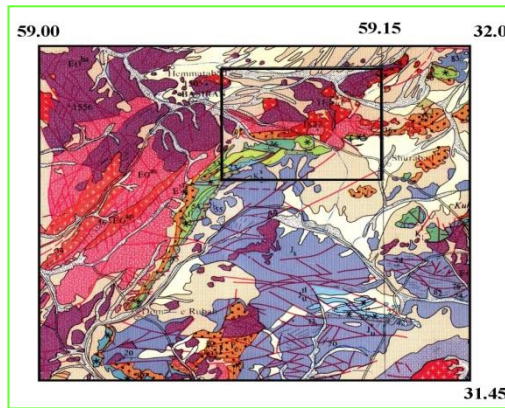
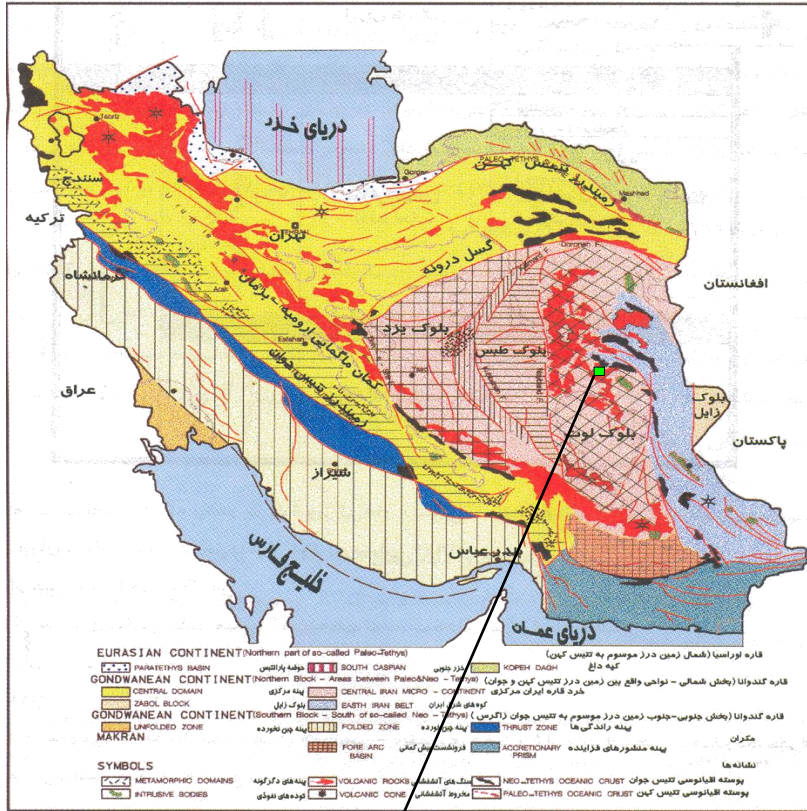
از سال ۷۸-۸۰ طرح اکتشاف و پتانسیل یابی کانسار طلای هیرد در محدوده استان خراسان جنوبی آغاز شد .

مطالعه چگونگی فرآوری طلای یکی از بخش های هیرد ، زون سیلیسی - کربناته مبحث اصلی این پایان نامه می باشد. در این فصل ابتدا به شرح مختصری از وضعیت جغرافیایی و زمین شناسی منطقه پرداخته می شود، سپس روش نمونه برداری برای اهداف فرآوری ارائه می گردد.

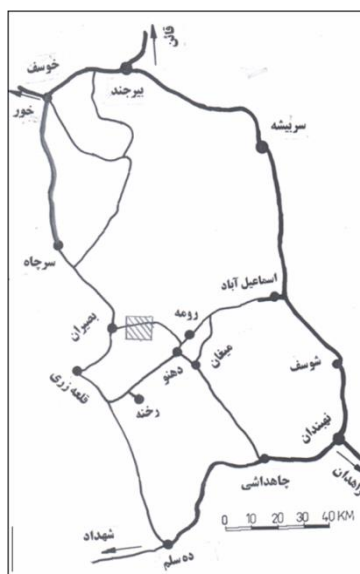
۲-۲- موقعیت جغرافیایی منطقه و راههای دسترسی

محدوده مورد مطالعه اکتشافی در استان خراسان جنوبی ، جنوب غربی بیرجند، در فاصله حدود ۴ کیلومتری شرق روستای بصیران بین طولهای جغرافیایی "۰۰' ۱۰' ۵۰ - "۰۰' ۱۵' ۵۹ و عرض های جغرافیایی "۰۰' ۵۵' ۳۱ - "۰۰' ۰۰' ۳۲ محدود شده است. در بخش مرکزی محدوده ، روستای هیرد و بخش جنوب شرق آن ، روستای شوراب واقع شده است.

راه قابل دسترسی از طرف غرب محدوده راه خاکی درجه ۲ می باشد که از آبادی بصیران به سوی منطقه مورد مطالعه منشعب می شود حدود ۵ کیلومتر فاصله دارد و از سمت شرق راه خاکی درجه ۲ می باشد که از روستای ده نو رومه و میغان به سوی منطقه مورد مطالعه منشعب می شود که حدوداً ۱۵ کیلومتر فاصله می باشد . داخل محدوده اکتشافی بجز راه خاکی مسیر بصیران به هیرد و هیرد به ده نو راه دیگری نیست و جهت دسترسی به بخشهای مختلف از مسیرهای آبراهه ای می توان استفاده نمود (عسگری و همکاران، ۱۳۸۶)



شکل ۱-۲- نمایش منطقه هیرد بر روی نقشه ایران (آقا نباتی، ۱۳۸۳)



شکل ۲-۲- موقعیت محدوده اکتشافی و راههای ارتباطی آن (عسگری و همکاران، ۱۳۸۶)

۳-۲- شرایط آب و هوایی منطقه

از لحاظ اقلیمی منطقه اکتشافی در ناحیه گرم و خشک بیابانی (کوپیری) واقع شده و از نظر پوشش گیاهی فقیر و محدود به بوته های نواحی بیابانی می باشد. در تابستان هوا گرم و خشک و زمستانهای نسبتاً سرد دارد و اختلاف دمای شب و روز زیاد است. متوسط درجه حرارت روزانه ماههای سرد تا ۵- درجه سانتیگراد و در ماههای گرم حداکثر تا ۴۰ سانتیگراد گزارش شده است.

بدیهی است مقدار کم نزولات جوی و سرعت زیاد تبخیر مانع از وجود رودخانه های دائمی در این ناحیه شده و آبهای سطحی منطقه تنها رودخانه های فصلی هستند که هنگام بارندگی در فصول بارانی ممکن است چند ساعتی جاری شوند.

بیشتر اهالی هیرد و روستاهای اطراف از جمله روستای بصیران، دهنو و رومه به کار دامپروری و کشاورزی مشغولند. کشاورزی سنتی منطقه نیز از رونق چندانی برخوردار نیست و بدیهی است بیکاری در این منطقه بخصوص در سالهای خشک و کم باران معضل بزرگی به حساب می آید (گزارش سازمان زمین شناسی کشور، ۱۳۸۱).

۲-۴- زمین شناسی منطقه معدنی هیرد

منطقه مورد بحث مربوط به محدوده بلوک لوت و بطوردقیق تر در بخش شمال خاوری محدوده بلوک لوت و در نزدیکی مرز این محدوده با زون فیلیش - کمر بند افیولیتی شرق ایران می باشد.

دامنه توالی و تنوع واحد های لیتولوژیکی در گستره ۱/۲۰۰۰۰ هیرد بگونه ایست که واحد شیلی-ماسه سنگی ژوراسیک، قدیمی ترین سنگها را در منطقه تشکیل داده و با یک دگر شیبی زاویه دار به توالی رسوبی کرتاسه بالا تبدیل می شود. این توالی که شامل واحد های شیلی، کنگلومرای، ماسه سنگی، آهک مارنی، توفهای آهکی و آهک ماسه ای است و توسط یک کنگلومرای قاعده ای پالئوسن و یک کنگلومرای قاعده ای ائوسن به سکانس ماگمایی ترشیر (شامل تناوبی از سنگهای آواری و ولکانیکی و پلوتونیک) می رسد. سنگهای آواری ائوسن شامل کنگلومرا، ماسه سنگ و ماسه سنگ توفی بوده و سنگهای ولکانیکی در گستره نقشه مذکور شامل سنگهای آندزیتی، آندزیت های سبز رنگ، آندزیت های آلترا، آندزیت آمیگدالوئیدال، توفهای کریستال و شیشه ای، آگلومرا و توفهای سنگی، آندزیت های پیروکسن دار، کوارتز آندزیت ها و آندزیت های پورفیری بوده و بازالت، بازالت آندزیتی، بازالت تراکیتی و

لاتیت‌های شدیداً آلت‌ره عموماً سنگ‌های ولکانیکی نئوژن را تشکیل می‌دهند. بعلاوه توده‌های نفوذی گرانیتی، کوارتز دیوریتی، مونزودیوریتی و گرانودیوریتی بعد از ائوسن قسمتی از ولکانیک‌های فوق‌الذکر را تحت تاثیر قرار داده و بیشتر در بخش‌های شمالی محدوده مورد مطالعه رخنمون دارند (علیمحمدی و همکاران، ۱۳۸۵).

کانی‌سازی در محدوده اکتشافی هیرد در ۴ منطقه اکتشافی به نام‌های زون ۱ تا زون ۴ مشاهده می‌شود که بزرگترین آن منطقه اکتشافی شماره ۱ است (شکل ۲-۳). کانی‌سازی به اشکال متفاوت استوک و رک، رگه‌ای و جانشینی در نقاط مختلف پنجره مطالعاتی رخنمون دارد که در ادامه به صورت جداگانه درباره آنها بحث می‌شود. بر پایه مطالعات پتروگرافی - پتروفیزیکی و تلفیق نقشه مغناطیس‌سنجی هوایی با موقعیت توده‌های نفوذی مشخص می‌شود که حداقل دو مجموعه توده نفوذی نوع I با خاصیت مغناطیسی بالا و نوع S با خاصیت مغناطیسی پایین در منطقه وجود دارد که هر یک از آنها نیز دارای تنوع بوده و شامل چندین واحد سنگی می‌شود، به گونه‌ای که توده‌های نفوذی نوع I عمدتاً در حد گابرو، دیوریت، کوارتز دیوریت و کوارتز مونزونیت و توده‌های نفوذی نوع S عمدتاً در حد دیوریت، کوارتز مونزودیوریت، کوارتز مونزونیت، گرانودیوریت و گرانیت است.

شواهد صحرایی و مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که کانی‌سازی در منطقه معدنی هیرد مرتبط با برخی توده‌های نفوذی نوع S است که در ادامه نیز درباره آنها بحث می‌شود (عسگری و همکاران، ۱۳۸۶).

۲-۴-۱- منطقه اکتشافی شماره یک

منطقه اکتشافی شماره یک در بخش های میانی محدوده مطالعاتی واقع شده و از گسترش نسبتا زیادی برخوردار است، به طوری که مساحتی بالغ بر سه کیلومتر مربع را پوشش می دهد، این منطقه اکتشافی مهمترین بخش کانی سازی منطقه است. در این ناحیه زون گسلی به طول بیشتر از چهار کیلومتر وجود دارد که روند بخش غربی با بخش شرقی آن متفاوت است و تحدیبی به سمت شمال دارد. کانی سازی در قسمت جنوبی گسل مشاهده می شود و نوع آن در بخش شرقی و غربی منطقه اکتشافی شماره یک با یکدیگر تفاوت دارد که در ادامه به آن پرداخته می شود (عسگری و همکاران، ۱۳۸۶).

۲-۴-۱-۱- بخش شرقی منطقه اکتشافی شماره یک

کانی سازی در بخش شرقی منطقه اکتشافی شماره یک در جنوب گسل بزرگ و در محدوده با امتداد تقریبا شمالی-جنوبی و به وسعت بیش از یک کیلومتر مشاهده شده و از نوع استوک ورک و افشان است. در محدوده جنوب گسل بزرگ منطقه اکتشافی شماره یک، توده های گرانیتوئیدی نوع S (با خاصیت مغناطیسی پایین) و در بخش شمالی گسل عمدتا توده های نوع I (با خاصیت مغناطیسی بالا) قرار دارند و گسل بسیار واضح مرز این دو مجموعه را تشکیل می دهد. رگچه های کانی سازی در داخل همین توده های نفوذی نوع S و نیز شیل های سیلیسی شده و بعضا آهک های اسکارنی شده قرار دارد.

تشکیل کانی سازی منطقه اکتشافی شماره یک به صورت زیر است:

۱- ابتدا رگچه های تورمالین دار تشکیل شده اند. این رگچه ها به صورت رگچه های تورمالین + سولفید + سریسیت سولفید + تورمالین + سریسیت ،سولفید ،کوارتز + سولفید +تورمالین و کوارتز +تورمالین + سولفید +کلسیت مشاهده می شوند.

۲- پس از آن رگچه ظریفی از کوارتز و کلسیت دیده می شود که رگچه های تورمالین دار را قطع نموده اند.

۳- سپس رگچه های کانی های سولفیدی بدون تورمالین تشکیل شده اند. این رگچه ها به صورت رگچه های کوارتز + سولفید ،کوارتز + سولفید ± سریسیت ،کوارتز + کلسیت + سولفید مشاهده می شوند.

۴- در مرحله بعد رگچه های کوارتز ظریف تشکیل شده اند که رگچه های قبلی را قطع می کنند.

۵- در نهایت نیز تعدادی رگچه های کوارتز + سولفید به وجود آمده است (عسگری و همکاران، ۱۳۸۶).

۲-۱-۴-۲- بخش غربی منطقه اکتشافی شماره یک

در امتداد بخش غربی گسل بزرگ که دارای امتداد N65E می باشد،تشکیل شده است. کانی سازی از نوع اسکارنی مرتبط با زون گسلی است. در این منطقه محلول کانی ساز که منشاء آن همان توده های گرانوئیدی نوع S (در بخش شرقی منطقه شماره یک) می باشد، از طریق گسل منطقه به سطح راه یافته است و از آنجا که گسل در واحد کنگلومرا است و آن دارای قلوه هایی از جنس چرت ، سنگ آهک ،شیل سیلیسی شده ،کوارتز شیری رنگ ،گرانیت و سنگ های آتشفشانی با ترکیب آندزیت - داسیت است ، در قسمت هایی که قلوه های آن سنگ آهک می باشد، از طریق فرایند متاسوماتیسم ،کانی های

تالک سیلیکاته ای مانند اپیدوت، کلریت، کلسیت، آمفیبول و ولاستونیت به وجود آمده و تشکیل موضعی و ناپیوسته اسکارن را داده است. در نتیجه در این بخش از کانی سازی هم به صورت اسکارنی و هم به صورت رگه ای است. موضوع تفاوت نوع کانی سازی در قسمت های مختلف منطقه سبب حالت بی نظمی کانی سازی شده است و لذا از نظر عیاری نیز غیر متجانس باشد. کانی سازی این بخش شامل پیریت + آرسنوپیریت ± کالکوپیریت ± اکسیدهای آهن ثانویه + تورمالین + کوارتز ± کلریت ± سربیسیت ± اپیدوت ± کلسیت ± ولاستونیت ± آمفیبول است. آلتراسیون عمده همراه با این کانی سازی پروپلیتیک + سیلیسی تا پروپلیتیک + سربیسیتی و کانی های حاصل اسکارنی شدن می باشد (عسگری و همکاران، ۱۳۸۶).

۲-۴-۲- منطقه اکتشافی شماره دو

منطقه اکتشافی شماره دو در شمال شرق نقشه، حد فاصل روستای هیرد و منطقه اکتشافی شماره یک قرار گرفته است. کانی سازی در این منطقه از نوع رگه ای مرتبط با زون گسلی است.

بزرگترین زون گسلی این محدوده به طول ۳۰۰ متر و با ضخامت ۲۰ سانتی متر تا ۴ متر با امتداد شمال غربی- جنوب شرقی درون توده های دیوریتی I و S و سنگ های آتشفشانی در حد آندزیت و لایت است که کانی سازی مس به صورت کربنات ها و سیلیکات های مس در اولین مشاهدات آن به چشم می خورد. کانی های سولفیدی پیریت، آرسنوپیریت، کالکوپیریت و اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن ثانویه نیز در منطقه وجود دارد. آلتراسیون این منطقه تورمالین - کلریت و همچنین پروپلیتیک - سیلیسی است. به

علاوه در شمال غرب این گسل در فاصله یک کیلومتری آن نیز گسلی دیگر وجود دارد که در آن نیز کانی سازی نوع رگه ای همراه با آلتراسیون پروپلپتیک - سیلیسی مشاهده می شود.

در منطقه اکتشافی شماره دو نیز محلول کانی ساز منشاء گرفته از برخی توده های نفوذی نوع S از طریق پسل به سطح زمین راه یافته است و باعث تشکیل کانی سازی رگه ای شده است (عسگری و همکاران، ۱۳۸۶).

۲-۴-۳- منطقه اکتشافی شماره سه

منطقه اکتشافی شماره سه در فاصله چهار کیلومتری جنوب غربی روستای هیرد واقع است. کانی سازی در این منطقه از نوع رگه ای درون زون های گسلی و به طور محدود جانشینی است. گسل های این منطقه درون سنگ های آتشفشانی پیروکسن آندزیت و کوارتز لاتیت با میان لایه هایی از آهک قرار دارد که به علت رخنمون کم آهک در مقیاس نقشه زمین شناسی قابل نشان دادن نبوده است. محلول ماگمایی - گرمابی کانی ساز که از همان توده های گرانیتوئیدی نوع S منشاء گرفته است، در این منطقه نیز از طریق گسل به سطح راه یافته و باعث کانی سازی رگه ای شده است و در مکان هایی که میان لایه آهکی بوده و به طور محدود جانشینی متاسوماتیسم رخ داده است. آلتراسیون این منطقه پروپلپتیک - سیلیسی شدید بوده و کانی های کلریت ، اپیدوت ، کلسیت و کوارتز همراه با کانی های سولفیدی اکسید شده مشاهده می شود (عسگری و همکاران، ۱۳۸۶).

۲-۴-۴- منطقه اکتشافی شماره چهار

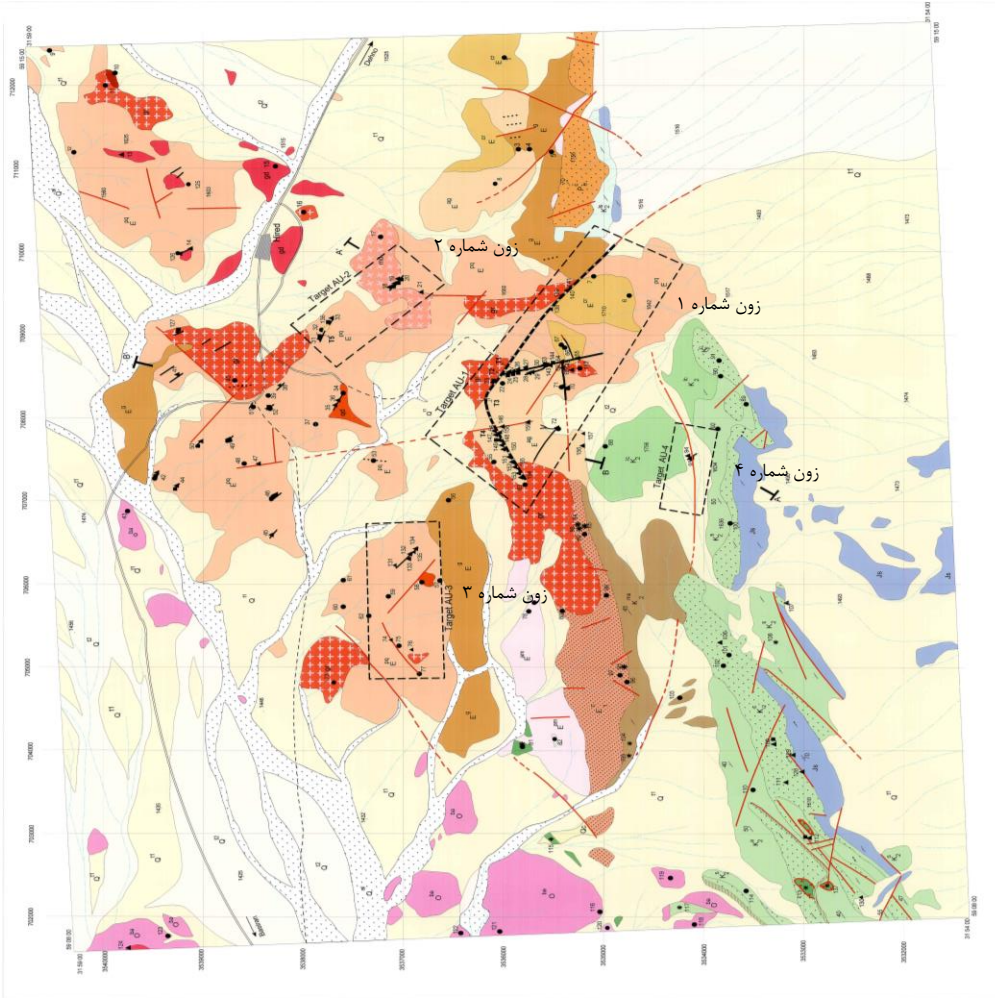
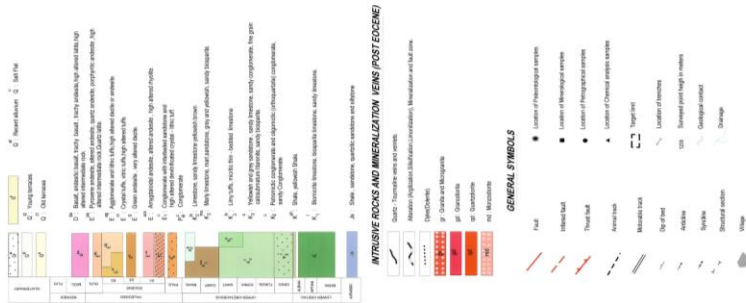
در جنوب منطقه معدنی هیرد در امتداد گسلی با راستای شرقی - غربی منطقه اکتشافی شماره چهار قرار دارد. آلتراسیون آرژیلیتی - سیلیسی همراه با اکسیدهای آهن ثانویه در بخش هایی از آن مشاهده می شود و بخش اعظم آن توسط واریزه و آبرفت پر شده است. با وجود این در مسیر آبراهه رخنمون زون مورد نظر به ده متر می رسد و آثار کمی از حفریات قدیمی روی آن مشاهده می شود. کانی سازی در این منطقه نیز مرتبط با زون گسلی و روش تشکیل آن مشابه منطقه اکتشافی شماره دو است. کانی های پیریت، کالکوپیریت، کربنات های مس و اکسید و هیدروکسیدهای ثانویه آهن در آن دیده شده است.

میزان فراوانی این کانی ها در مناطق اکتشافی مختلف متفاوت است. کانیهای مهم که در زونهای آلتراسیون و مناطق اسکارنی تشکیل شده اند عبارتند از: تورمالین، کوارتز، سریسیت، کلریت، ولاستونیت، کلسیت و آمفیبول.

عنصر طلا که مهمترین هدف اکتشافی منطقه بوده در رگه های سولفیدی - سیلیسی - تورمالینی تمرکز دارد و میانگین عیار سطحی آن در بخشهای غنی از کانی سازی حدود ۱/۵-۱ گرم در تن پیش بینی شده است (کریم پور و همکاران، ۱۳۸۶).



LEGEND



Project: Prospecting and exploration projects in south of Ibrassan
Project Director: M.T. Konehi

Mining Geologist: A.Askari & M.Safari
Digital cartography & GIS: Sh. Abbasian

Scale: 1:20000
0 0.4 0.8 Kilometers

شکل ۲-۳- نقشه زمین شناسی محدوده اکتشافی هیرد (عسکری و همکاران، ۱۳۸۶)

۲-۵- محدوده معدنی طلای هیرد زون شماره ۳

این هدف معدنی در فاصله ۴ کیلومتری جنوب غرب روستای هیرد و ۷ کیلومتری شرق روستای بصیران واقع شده است. سنگهای عمده تشکیل دهنده این محدوده عمدتاً آندزیت، پیروکسن آندزیت، کوارتز آندزیت، آندزیت پورفیری، توف، لاپیلی توف و آگلومرا می باشد.

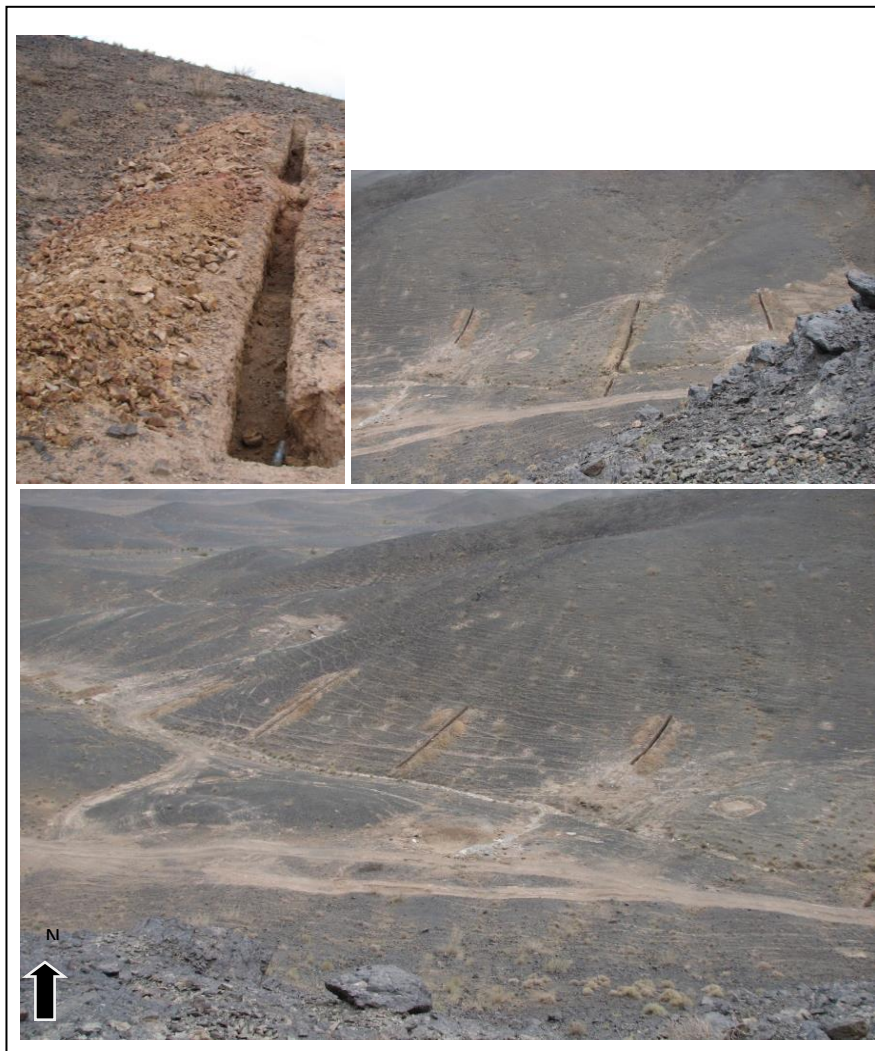
بعلاوه رخنمونهای کوچکی از کوارتز دیوریت و مونزودیوریت نیز مشاهده می شوند. محلولهای گرمابی احتمالاً مربوط به آخرین فاز تفریق نفوذیهای منطقه در راستای گسلها و شکستگیها نفوذ کرده و آلتراسیونهای پراکنده و متعددی را بوجود آورده اند که این دگرسانیها بیشتر آرژیلیتی، لیمونیتی، کربناتی و سیلیسی هستند.

کانی سازی طلا به صورت ۲ رگه اصلی یکی در امتداد تقریباً شمالی-جنوبی (N10E) و دیگری در راستای شمال شرق-جنوب غرب در سکانس پیروکلاسیک جای گرفته است این دو رگه در بخش شمالی محدوده اکتشافی باهم تلاقی دارند، بعلاوه تعدادی رگه های کوچک پراکنده نیز در محدوده اکتشافی مشاهده می شود.

رگه سیلیسی-کربناتی طلا دار که هدف این پایان نامه است با طول حداقل ۴۰۰ متر و با ضخامت متوسط ۳ متر در امتداد تقریباً شمالی- جنوبی (N10E) رخنمون دارد، سنگ در بر گیرنده این واحد تناوبی از توف، لاپیلی توف و آندزیت است. عیار طلا در سطح متغیر است، کانی سازی در بخشهای سطحی از نوع اکسیده می باشد (عسگری و همکاران، ۱۳۸۶).

۲-۶- نمونه برداری

نمونه ها از دو سری محدوده از زون شماره ۳ در ۲ نوع سیلیسی و سیلیسی-کربناتی تهیه گردید که نمونه های نوع سیلیسی-کربناتی عنوان این پایان نامه جهت انجام مطالعات فرآوری گردید. شکل (۲-۴) ترانسه هایی که محل های نمونه برداری بوده اند را نشان می دهد.



شکل ۲-۴- نمایش ترانسه ها با فواصل مشخص در تمام منطقه که به منظور انجام نمونه برداری در منطقه حفر شده اند.

نمونه برداری زمین شناسی در سال ۱۳۸۶ توسط سازمان زمین شناسی انجام گردید که در مجموع ۴۰۰-
۵۰۰ کیلوگرم از کانسنگ طلای هیرد از سازمان زمین شناسی به آزمایشگاه کانه آرایی دانشگاه صنعتی
شاهرود منتقل شد

نمونه های برداشت شده در بازه ابعادی ۵-۲۵ سانتی متر قرار داشتند که در مراحل مختلف خردایش
تحت فرایند کاهش ابعاد قرار گرفتند. خردایش در مرحله اول توسط یک سنگ شکن فکی با دهانه ۳۰
سانتی متر و گلوگاه ۵ سانتی متر و در مرحله دوم توسط یک سنگ شکن فکی با دهانه ۶ سانتی متر و
گلوگاه ۱ سانتی متر و در مرحله سوم با سنگ شکن غلطکی با سرند کنترلی ۳ میلی متر انجام شد.



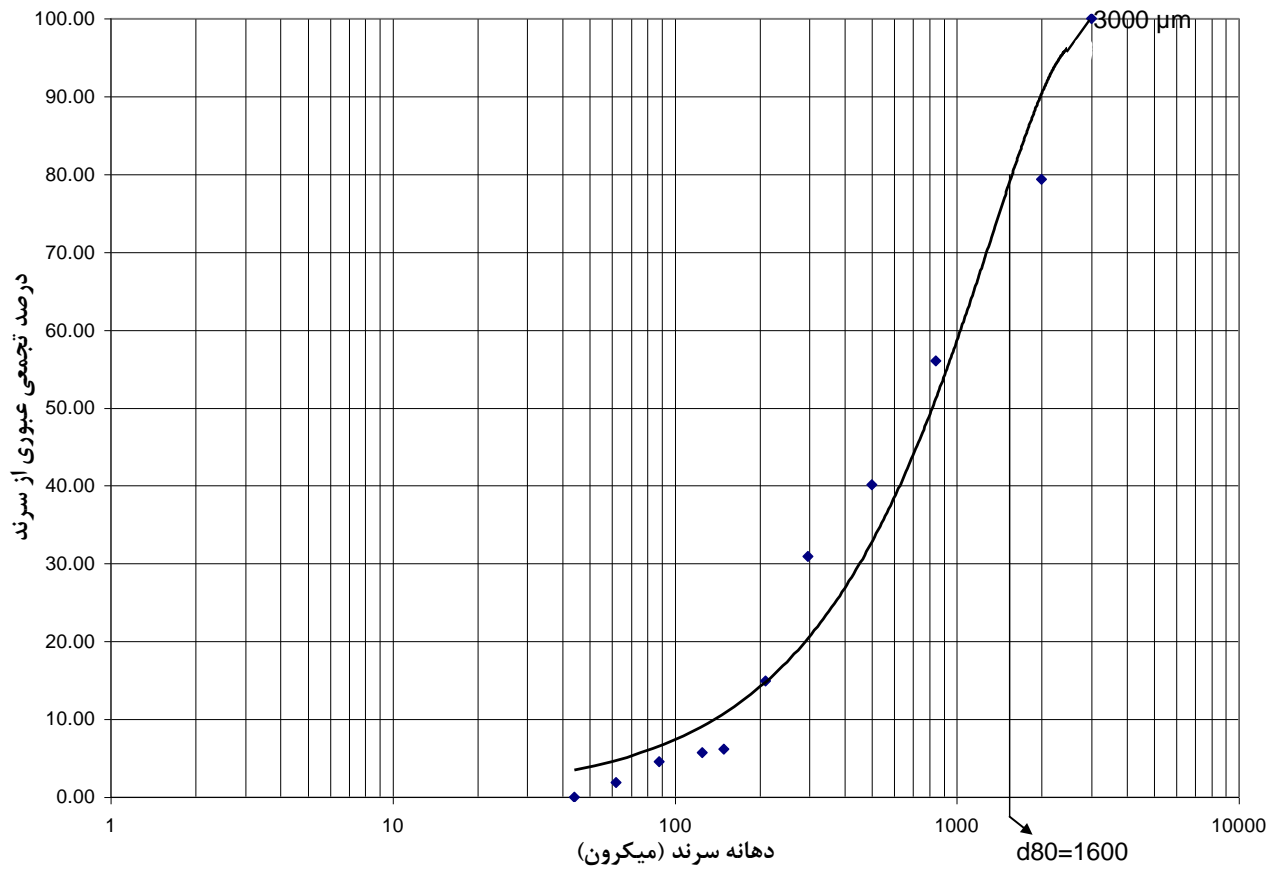
شکل ۲-۵- ابعاد نمونه های برداشت شده

نهایتاً پس از مخلوط کردن نمونه ها ، بسته های یک یا دو کیلوگرم از نمونه ها پس از تقسیم توسط تقسیم کن شانه ای (riffles) بمنظور انجام آزمایشهای بعدی آماده گردید. بنابراین نمونه اولیه (Head) در تمامی آزمایشها ابعاد حداکثر ۳ میلیمتر را دارا است. تجزیه سرنندی بمنظور دانه بندی و تعیین d_{80} نمونه ها در فراکسیونهای ۲۰۰۰، ۸۴۰، ۵۰۰، ۲۹۷، ۲۱۰، ۱۴۹، ۱۲۵، ۸۸، ۶۲ و ۴۴ انجام شد (جدول ۱-۲).

همانطور که در منحنی توزیع دانه بندی شکل (۲-۶) دیده می شود d_{80} نمونه کانسنگ هیرد براساس حداکثر ابعاد mm^3 معادل ۱۶۰۰ میکرون به دست آمد.

جدول ۱-۲- تجزیه سرنندی نمونه Head کانسنگ هیرد

درصد تجمعی وزنی		درصد وزنی (%)	وزن (گرم)	سایز (میکرون)
عبور کرده	باقی مانده			
۷۹/۳۲	۲۰/۶۸	۲۰/۶۸	۱۰۳۴	-۲۰۰۰+۸۴۰
۵۶/۰۵	۴۳/۹۵	۲۳/۲۷	۱۱۶۳/۵	-۸۴۰+۵۰۰
۴۰/۱۵	۵۹/۸۵	۱۵/۹	۷۹۵	-۵۰۰+۲۹۷
۳۰/۹۱	۶۹/۰۹	۹/۲۴	۴۶۲	-۲۹۷+۲۱۰
۱۴/۹۴	۸۵/۰۶	۱۵/۹۷	۷۹۸/۵	-۲۱۰+۱۴۹
۶/۲	۹۳/۸	۸/۷۴	۴۳۷	-۱۴۹+۱۲۵
۵/۷۷	۹۴/۲۳	۰/۴۳	۲۱/۵	-۱۲۵+۸۸
۴/۵۴	۹۵/۴۶	۱/۲۳	۶۱/۵	-۸۸+۶۲
۱/۹	۹۸/۱	۲/۶۴	۱۳۲	-۶۲+۴۴
۰/۰۱	۱۰۰	۱/۸۹	۹۴/۵	-۴۴



شکل ۲-۶- منحنی دانه بندی نمونه کانسنگ هیرد

فصل سوم

مطالعات کانی شناسی

و شناسایی ترکیب نمونه

مطالعات کانی شناسی و بافتی و ویژگی شناختی کانسنگ به منظور انجام آزمایشهای فرآوری و استخراج طلا صورت می گیرد، عیار طلا اندازه گیری شده برابر با ۲/۲ تا ۲/۶ پی پی ام می باشد که عیار طلا در ۱۰ فراکسیون انتخابی در تجزیه سرنندی با روش جذب اتمی تعیین شد، همچنین ترکیب شیمیایی کانسنگ مورد مطالعه، بررسی گردید. تعداد هفت مقطع صیقلی از فراکسیون های مختلف تجزیه سرنندی تهیه شد. همچنین تعداد یازده مقطع نازک از نمونه های دستی انتخاب شده جهت بررسی ترکیب سنگ میزبان تهیه گردید، مطالعات میکروسکوپی پلاریزان بر روی مقاطع تهیه شده صورت گرفت. علاوه بر آن یک نمونه از Head تجزیه سرنندی به آزمایشگاه XRF و چهار نمونه به آزمایشگاه XRD ارسال شد و همچنین یک نمونه جهت انجام SEM سطحی به آزمایشگاه دانشگاه تربیت مدرس ارسال شد.

۲-۳- تعیین عیار طلا

عیار طلا با روش جذب اتمی در نمونه اولیه که نمونه Head تجزیه سرنندی بود، اندازه گیری شد عیار طلا برابر با ۲/۲ تا ۲/۶ پی پی ام بود و تقریبا در تمامی فراکسیونها نزدیک به عیار اولیه Head بود، حداکثر عیار طلا در دانه بندی > ۱۴۹ میکرون (۳/۴ ppm) می باشد. در نتیجه با تغییرات کم افزایش عیار طلا با کاهش دانه بندی همراه است جدول (۱-۳) .

جدول ۱-۳- تعیین عیار طلا در محدوده ابعادی مختلف

عیار طلا (ppm)	محدوده ابعادی (میکرون)	ردیف
۲/۸۲	-۲۰۰۰+۸۴۰	۱
۳/۰۵	-۸۴۰+۵۰۰	۲
۲/۵۱	-۵۰۰+۲۹۷	۳
۲/۷۸	-۲۹۷+۲۱۰	۴
۲/۴۸	-۲۱۰+۱۴۹	۵
۳/۳۱	-۱۴۹+۱۲۵	۶
۳/۲	-۱۲۵+۸۸	۷
۲/۴۸	-۸۸+۶۲	۸
۲/۶۸	-۶۲+۴۴	۹
۲/۶۸	-۴۴	۱۰

۳-۳- ترکیب شیمیایی نمونه ها

به منظور تعیین ترکیب شیمیایی نمونه ها، پودر نمونه تهیه شده از کانسنگ با ابعاد ۲۰۰ میکرون به آزمایشگاه کانی شناسی سازمان زمین شناسی کشور ارسال گردید. تجزیه شیمیایی کل و آنالیز طلا به روش جذب اتمی بر روی نمونه کانسنگ ارسالی طلای هیرد صورت گرفت و نتیجه بشرح جدول (۲-۳) است.

جدول ۲-۳- آنالیز کلی نمونه Head

ردیف	نام ترکیب	درصد ترکیبها وعناصر مختلف
۱	SiO ₂	۴۵/۹۵
۲	Al ₂ O ₃	۱۱/۰۷
۳	Fe ₂ O ₃	۶/۵۴
۴	CaO	۱۰/۲۶
۵	MgO	۴/۰۵
۶	TiO ₂	۰/۳۷
۷	P ₂ O ₅	۰/۱۲
۸	MnO	۰/۳۴
۹	SO ₃	۱/۲۶
۱۰	Na ₂ O	۰/۴۶
۱۱	K ₂ O	۲/۷۰
۱۲	L.O.I	۱۶/۱۹

- نمونه اولیه (Head) نمونه کانسنگ طلای هیرد دارای ۲/۴ گرم بر تن (ppm) طلا است.

- مشخصه بارز این سری نمونه ها بالا بودن درصد اکسید آلومینیوم، آهن و کلسیم می باشد و ۴۶ درصد نمونه از سیلیس تشکیل شده است (جدول ۳-۲).

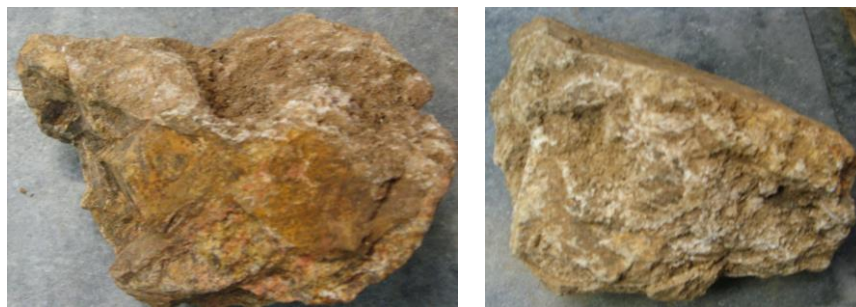
۳-۴- مطالعات کانی شناسی کانسنگ طلای هیرد

هدف اصلی از انجام مطالعات کانی شناسی در مرحله فرآوری کانسنگ، بررسی وضعیت کانه (طلا) از نظر درگیری با فازهای مختلف گانگ و امکان آزادسازی آن با روشهای مختلف فرآوری می باشد. بطور خلاصه مهمترین مشاهدات در مورد کانسنگ طلای هیرد در ادامه عنوان شده است.

۳-۴-۱- بررسی نمونه دستی کانسنگ طلای هیرد

نمونه های مورد مطالعه غالبا از سنگهای سیلیسی - کربناتی می باشند که به رنگ قهوه ای تا قرمز دیده می شوند و در سطح حالت اکسید شدن نشان می دهند شکل (۳-۱).

در مواردی کانی های شفاف که احتمالا از فرایند آلتراسیون و جانشینی کانی های سولفیدی باقی مانده باشند دیده می شوند که توسط هیدروکسید های آهن پر شده اند، ترکیبات نرم که احتمالا رسی هستند نیز در سطح دیده می شوند. کانی های سولفیدی بخصوص پیریت نیز بندرت دیده می شوند.



شکل ۳-۱- نمایی از نمونه های تهیه شده که بافت ضعیف و ظاهر اکسیده شده از مشخصات ظاهری می باشد.



شکل ۳-۲- نمونه کانسنگ قبل از آسیاب شدن

۲-۴-۳- مطالعه مقاطع نازک

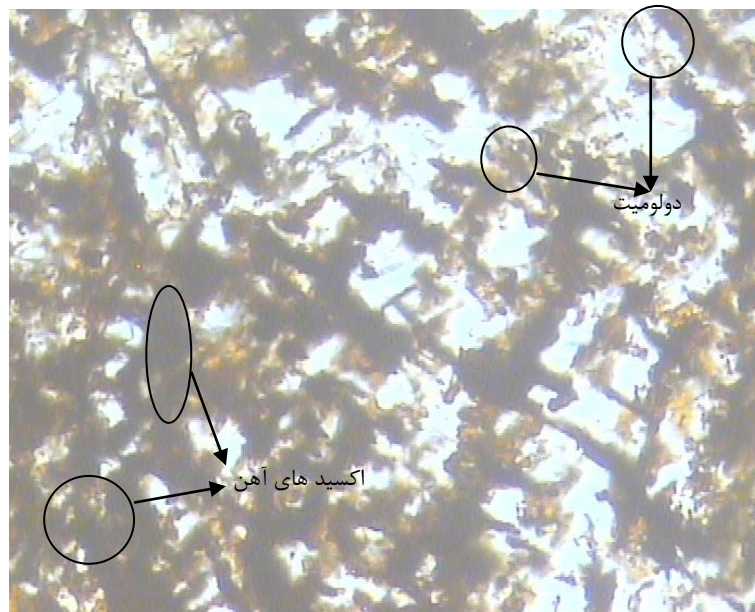
برای بررسی دقیق تر سنگهای سیلیسی - کربناته در نمونه دستی مقاطع نازک از آنها تهیه شد که مهمترین کانی های مشاهده شده : رگه های کوارتز های ریز بلور تا نهان بلور کربناتها از جنس کلسیت و احتمالاً دولومیت همراه با اکسیدهای آهن و سایر کانیهای کدر که در ادامه به شرح سه نمونه از آنها پرداخته می شود شکل(۳-۱۱).

۳-۴-۲-۱- مقطع نازک شماره AG-32

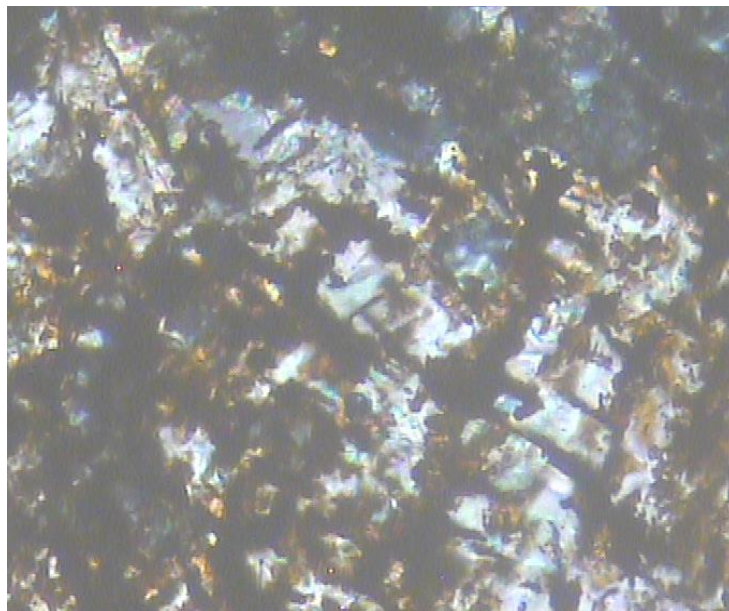
یک سنگ سیلیسی شده شامل نوارهای ظریف سیلیس نهان بلور تا ریز بلور در تناوبی با اکسید های آهن و کانیهای کدر دیگر که توسط رگچه هایی از جنس کلسیت به ضخامت ۵۰-۱۵۰ میکرونی قطع شده است در بخشهایی شامل بلورهای دولومیت نسبتاً درشت با بافت موزاییکی است که درز وشکستگی آنها توسط کانیهای کدر(اکسید های آهن) پر شده است .

در سطح مقطع رگه رگچه ای کوارتز شامل بلورهای سوزنی شکل به ضخامت (رگچه ها) حدود ۳۰۰-۴۰۰ میکرون ابعاد بلورهای کوارتز در این رگچه های درشت بلور تا گاهی بیش از ۱ میلیمتر است.

بیشتر سطح مقطع یک نوع لایه بندی ظریف شامل لایه هایی از جنس دولومیت شدیداً آغشته به اکسید های آهن در تناوب با کوارتزهای نهان بلور دیده می شود (شکل ۳-۳).



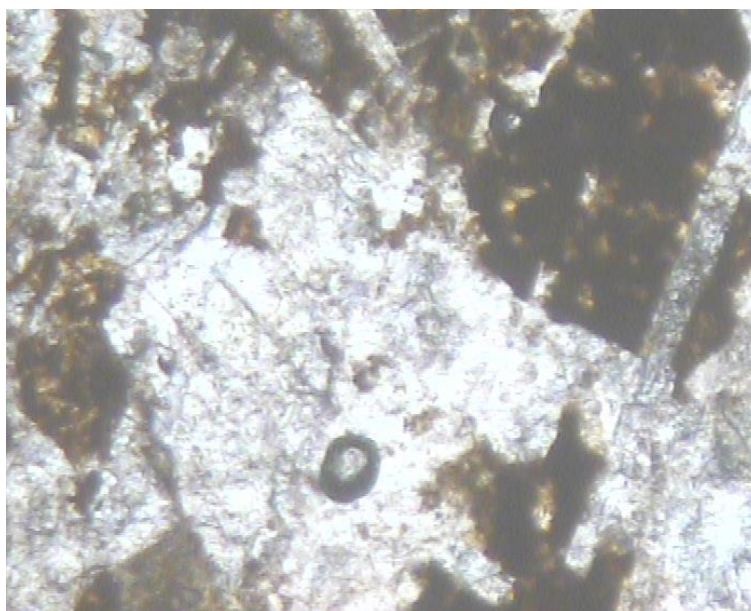
شکل ۳-۳- نمایی از بلورهای دولومیت درگیر با اکسیدهای آهن در امتداد رخ ها نورعبوری، x40



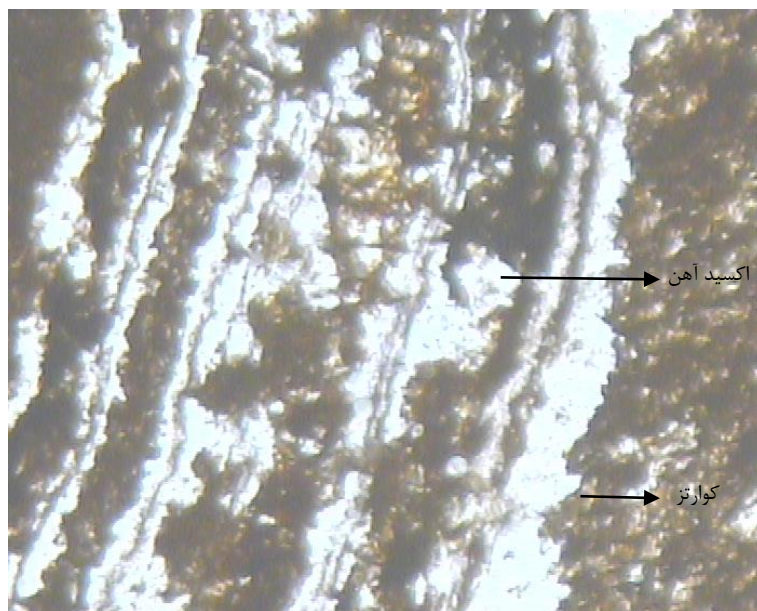
شکل ۳-۴- تصویر شکل ۳-۳ در نور پلاریزه



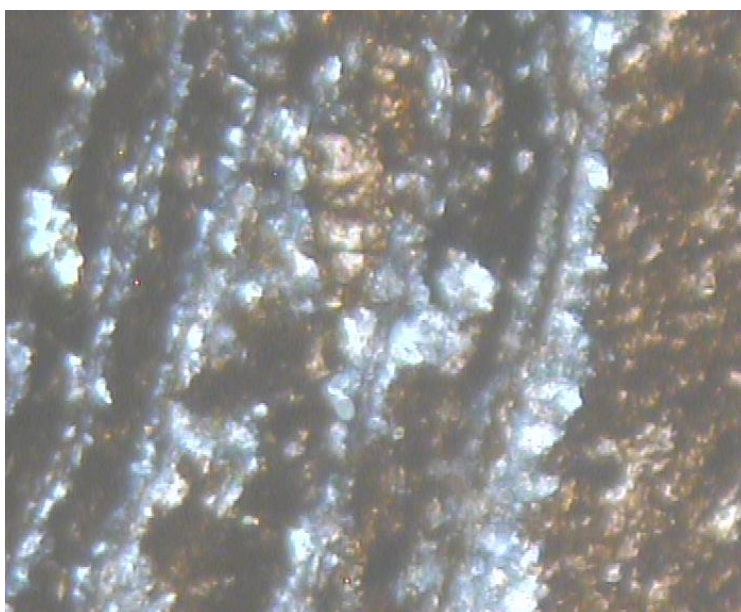
شکل ۳-۵- نمایی از سطح مقطع درنور عبوری شامل زمینه کوارتز ریز بلور که توسط رگچه کوارتز درشت بلور قطع شده و حاوی لکه های اکسید آهن است (طول عکس ۹۰۰ میکرون) نور عبوری، x4.



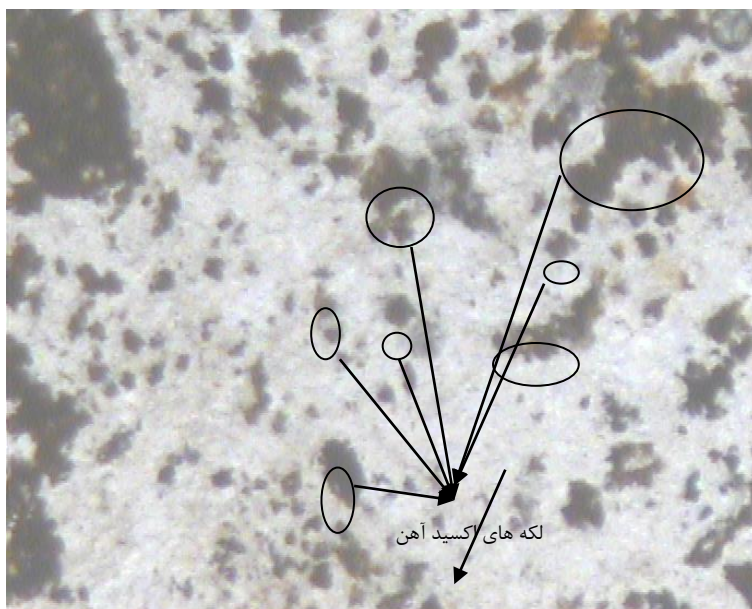
شکل ۳-۶- تصویر شکل ۳-۵ در نور پلاریزه



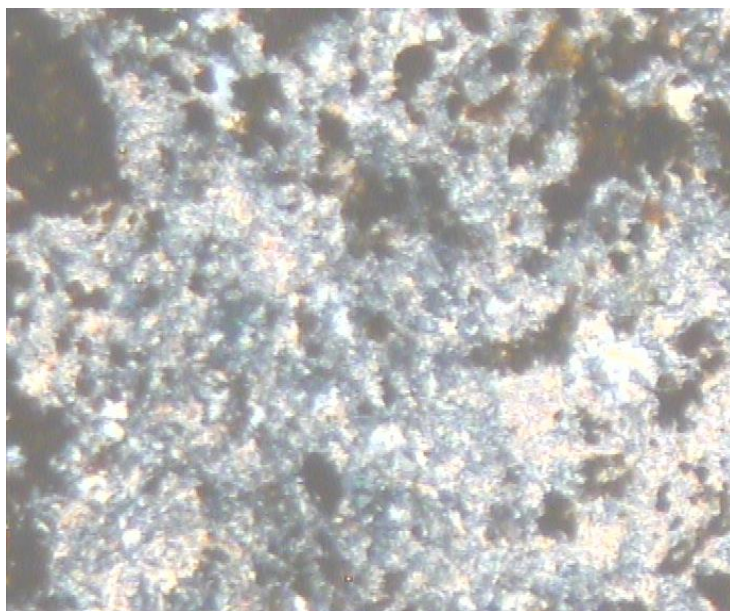
شکل ۳-۷- بافت کلروفومی شبه لایه ای شامل تناوب کوارتز نهان بلور و اکسید های آهن (آلتراسیون سولفورها)، (طول عکس ۹۰۰ میکرون) نور عبوری، X4.



شکل ۳-۸- تصویر ۳-۶ در نور پلاریزه



شکل ۳-۹- زمینه اصلی سنگ میزبان کوارتز نهان بلوری آغشته به لکه های اکسید آهن می باشد طول عکس ۹۰۰ میکرون)
نور عبوری، x4.



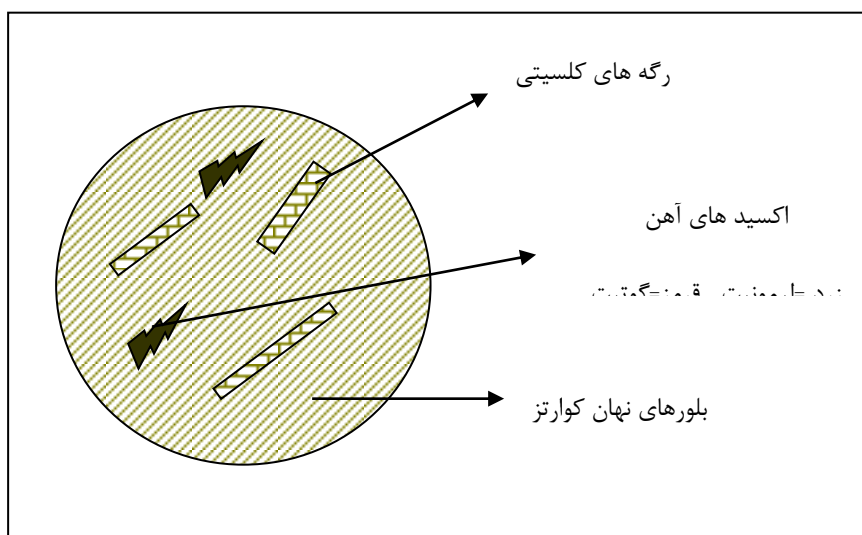
شکل ۳-۱۰- تصویر ۳-۸ در نور پلاریزه

AG-31 - ۲-۲-۴-۳ - مقطع نازک شماره

زمینه سنگ سیلیس نهان بلور است رگه رگچه هایی کلسیت قطع نموده است مانند نمونه قبل آغستگی شدید به اکسید های آهن که بصورت پرکننده حفرات یعنی رگه رگچه ای در سطح مقطع مشاهده می شود. بخش های دولومیتی توسط اکسیدهای آهن پر شده. تیپ آلتراسیون سیلیسی و اکسید آهن توسط رگچه های کوارتز قطع شده است.

AG-30 - ۳-۲-۴-۳ - مقطع نازک شماره

آغستگی های لیمونیت به رنگ زرد و گوتیت قهوه ای رنگ خاکستری سیلیس (زمینه سیلیس)، کوارتز نهان بلور در زمینه تشکیل شده است که به اکسیدهای آهن شدیداً آغشته و توسط رگه-رگچه های از این نوع قطع شده است.



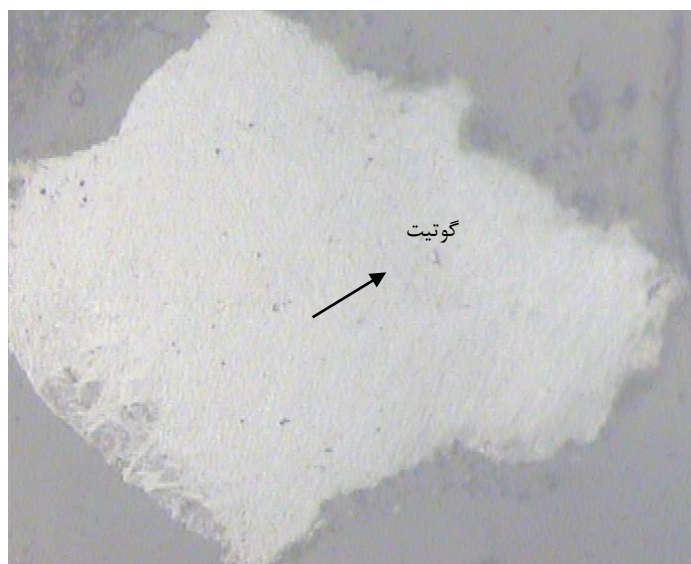
شکل ۳-۱۱ - طرح شماتیکی از غالب کانی های مشاهده شده در سطح مقطع

۳-۴-۳- مطالعه مقاطع صیقلی

جهت تعیین کانی های موجود در کانسنگ از فراکسیونهای با ابعاد ۲۰۰۰ میکرون (۱۰ مش)، ۸۴۰ میکرون (۲۰ مش)، ۵۰۰ میکرون (۳۵ مش)، ۲۹۷ میکرون (۵۰ مش)، ۲۱۰ میکرون (۷۰ مش)، ۱۴۹ میکرون (۱۰۰ مش) و ۱۲۵ میکرون (۱۲۰ مش)، مقاطع صیقلی تهیه شد که نتیجه بررسی میکروسکوپی مقاطع به شرح زیر است:

۳-۴-۳-۱- مقطع صیقلی Ag-17 (فراکسیون ۸۴۰ میکرون)

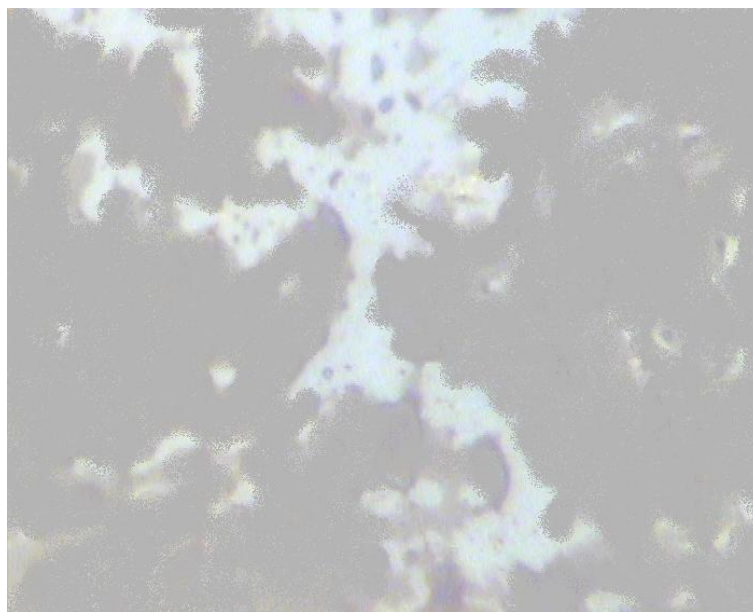
کانسنگ سیلیسی - کربناتی مملو از لکه های بی شکل گوتیت با آغستگی شدید به لیمونیت دیده می شود، لکه های گوتیت با ته رنگ آبی در نور معمولی در تارهای صلیب قرمز (کانسنگ بیشتر کوارتز) لکه های زرد رنگ اکسید آهن (مثل قطره در یک لیوان). تیتانومگنتیت و هماتیت در بعضی نقاط بحالت مشبک و در بعضی نقاط بصورت سوزنی و در بعضی نقاط بحالت دانه ای دیده می شود. لکه های گوتیت در زمینه کانسنگ دیده می شود. (شکل ۳-۱۲)



شکل ۳-۱۲- تارهای صلیب و غیر صلیب، دانه های آزاد گوتیت (طول عکس ۳۴۰ میکرون) نورانعکاسی، ۱۰x.

۲-۳-۳-۲- مقطع صیقلی Ag-16 (فراکسیون ۵۰۰ میکرون)

گوتیت در زمینه گانگ، ترکیبات تیتان (اکسید های تیتان) به ندرت درگیر با لکه های گوتیت دیده می شود. رگه رگچه های کلسیت و کوارتز در زمینه لیمونیتی دیده می شود. بعضی مواقع لکه ها شکل دارند که پیریت اولیه بوده و به گوتیت آلتزه شده است. ذرات پیریت بصورت اندک و بسختی می توان دید. سطح هوازده اکسید های آهن با بافت کلوییدال که در بعضی قسمتها دانه های مگنتیت دیده می شود. (شکل ۳-۱۳)



شکل ۳-۱۳- گوتیت درگیر با گانگ و یک لکه مشکوک به اکسید تیتان در زمینه گانگ (طول عکس ۱۷۵ میکرون) نورپلاریزان ،

x40

۳-۵- مطالعه کیفی XRD

در تکمیل بررسیهای کانی شناسی ، از روش دیفراکسیون اشعه ایکس (نمونه پودر) برای شناسایی بهتر کانی های سازنده نمونه های هیرد استفاده شد که جدول ۳-۳ کانی های شناسایی شده را با ترتیب فراوانی آنها از راست به چپ نشان می دهد.

جدول ۳-۳ = نتیجه XRD

ردیف	شماره نمونه	نتیجه XRD
۱	AG1	کوارتز + کلسیت + ژیپس + میکا + دولومیت

به منظور بررسی این مطلب که کانیهای شناخته شده در مطالعه XRD چقدر دچار خطا شده اند از فراکسیونهای ۱۰ و ۳۵ و ۷۵ مش نمونه گیری شد و برای مطالعه XRD به سازمان زمین شناسی کشور ارسال شد ، نتایج آمده در جدول ۳-۴ تاییدی بر نتیجه XRD جدول ۳-۳ می باشد، نتیجه به ترتیب کوارتز ، کلسیت ، دولومیت، کانی های رسی، ژیپس و گوتیت می باشد.

جدول ۳-۴- نتایج XRD

ردیف	شماره نمونه	نتیجه XRD
۱	HG39	کوارتز + کلسیت + دولومیت + کانی های رسی + ژیپس + گوتیت
۲	HG40	کوارتز + کلسیت + دولومیت + کانی های رسی + ژیپس + گوتیت
۳	HG41	کوارتز + کلسیت + دولومیت + کانی های رسی + ژیپس + گوتیت

۳-۶- مطالعه XRF

نتیجه مطالعه XRF به شرح جدول ۳-۵ می باشد ، SiO_2 ۳۸/۸ درصد از کل عناصر موجود در ترکیب را شامل می شود.

جدول ۳-۵- نتیجه XRF

درصد ترکیبها وعناصر مختلف	نام ترکیب	ردیف
۳۸/۸	SiO_2	۱
۱۳/۱۲	Al_2O_3	۲
۶/۱۶	Fe_2O_3	۳
۱۶/۳۸	CaO	۴
۱/۹۳	MgO	۵
۰/۴۴	TiO_2	۶
۰/۱۸	Cl	۷
۰/۴۵	MnO	۸
۲/۷۳	SO_3	۹
۰/۲۸	Na_2O	۱۰
۳/۰۵	K_2O	۱۱
۱۵/۶۶	L.O.I	۱۲
۰/۴۷	As_2O_3	۱۳
۱۰۰	Total	

۷-۳- مطالعات تکمیلی کانی شناسی (میکروسکوپ الکترونی یا SEM)

با وجود مشکوک بودن حضور بعضی از عناصر مزاحم از جمله Hg از روش میکروسکوپ الکترونی با تعیین میانگین حضور تمامی عناصر موجود در سطح مقطع صیقلی استفاده شد که نتیجه به شرح جدول (۳-۶) می باشد، در سطح این مقطع عناصر مزاحم (As, Hg ,Cu) در کمترین حد برابر با صفر درصد بوده اند که مجدداً قابل ذکر است که مطالعه SEM از سطح مقطع بوده است.

جدول ۳-۶- نتیجه SEM

درصد ترکیبها و عناصر مختلف	نام ترکیب	ردیف
۷۵/۵	AlK	۱
۱۳/۹۰	SiK	۲
۰/۸۵	SK	۳
۷۵/۰	ClK	۴
۶۲/۰	KK	۵
۹۲/۰	CaK	۶
۵۷/۰	FeK	۷
۴۲/۰	CuK	۸
۰۰/۰	AuL	۹
۰۰/۰	HgL	۱۰
۰۰/۰	AsK	۱۱
۱۰۰	Total	۱۲

مهمترین نتایج کانی شناسی به قرار زیر است:

۱- حضور مقدار زیادی از اکسیدهای آهن در نمونه ها که فراوانترین ترکیب شیمیایی در کانه های ثانوی آهن گوتیت می باشد که اغلب بصورت اشکال کاذب در ساختمان اولیه کانه های سولفوری شکل گرفته است.

۲- با وجود مشکوک بودن حضور بعضی از عناصر مزاحم از جمله Hg از روش میکروسکوپ الکترونی با تعیین میانگین حضور تمامی عناصر موجود در سطح مقطع صیقلی استفاده شد که نتیجه وجود عناصر مزاحم (As, Hg, Cu) در کمترین حد برابر با صفر درصد بود.

۳- سطح قهوه ای رنگ مقطع ناشی از شستشوی کانیهای ثانویه گوتیت و لپیدوکروسیت است. این کانیهای ثانویه از هوازدگی و اکسیداسیون کانیهای سولفیدی پیریت و کالکوپیریت است. گاه بلورهای چهارگوش و تومورف پیریت کاملاً توسط هیدروکسیدهای آهن نوع گوتیت - لپیدوکروسیت جانشین شده و تنها از روی شکل و ریخت بلور می توان تشخیص داد که پیریت بوده است. موجودیت کانی ها در نمونه بصورت انتشاری و جدا جدا بوده و درصد کانیهای جانشین شده هیدروکسید آهن نسبت به دانه های کالکوپیریت و پیریت خیلی زیادتر می باشد. تشکیل بافت جانشین باقیمانده (Residual tex.) در اثر جانشینی محصولات ثانویه (گوتیت و لپیدوکروسیت) بجای بلورهای پیریت و کالکوپیریت بوده است [1]

۴- همانطور که نتیجه XRF و آنالیز شیمیایی نمونه ها نمودارهای (۱-۳ و ۲-۳) نشان می دهد، زمینه اصلی کانسنگ هیرد از سیلیس (۴۵/۹۵ درصد) و دیگر کانیهای سیلیسی تشکیل شده است.

۵- با توجه به مطالعات کانی شناسی و میکروسکوپی نمونه های کانسنگ طلای هیرد، در مقاطع مطالعه شده با بزرگنمایی میکروسکوپ های عادی موجود تعیین ابعاد ذرات طلا جهت اعلام درجه آزادی طلا در نمونه ها ممکن نشد که مطالعه یک مقطع به روش میکروسکوپ الکترونی هم کمک قابل توجهی نداشت.

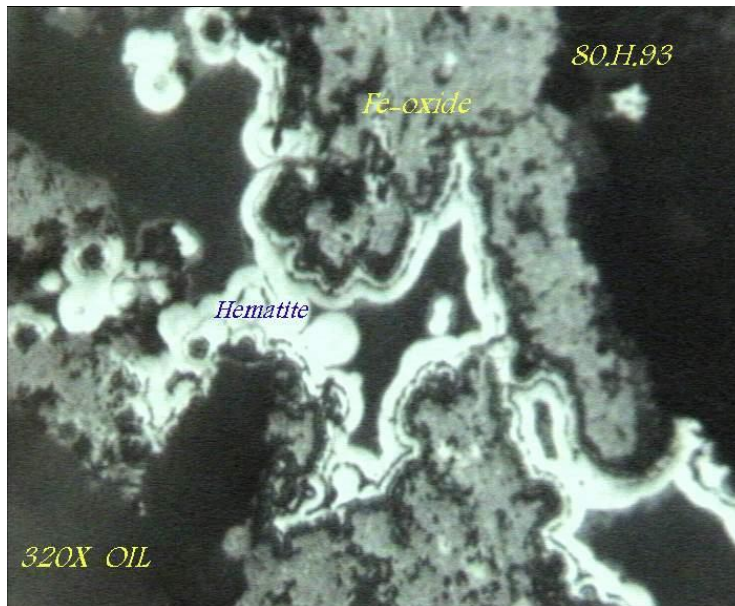
۳-۸- مطالعات قبلی

نتایج حاصل از مطالعات مقاطع صیقلی تهیه شده توسط سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور (عسگری و همکاران، ۱۳۸۶) حاکی از جایگزین شدن اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن به جای کانی های سولفوری است، برای نمونه تصاویر تعدادی از مقاطع صیقلی در ادامه آمده است :

شکل شماره ۳-۱۴ قرار گیری هماتیت را در کنار اکسیدهای آهن را نشان می دهد .

در اشکال ۳-۱۵ ، ۳-۱۶ آلتره شدن پیریت به اکسیدهای آهن قابل مشاهده است .

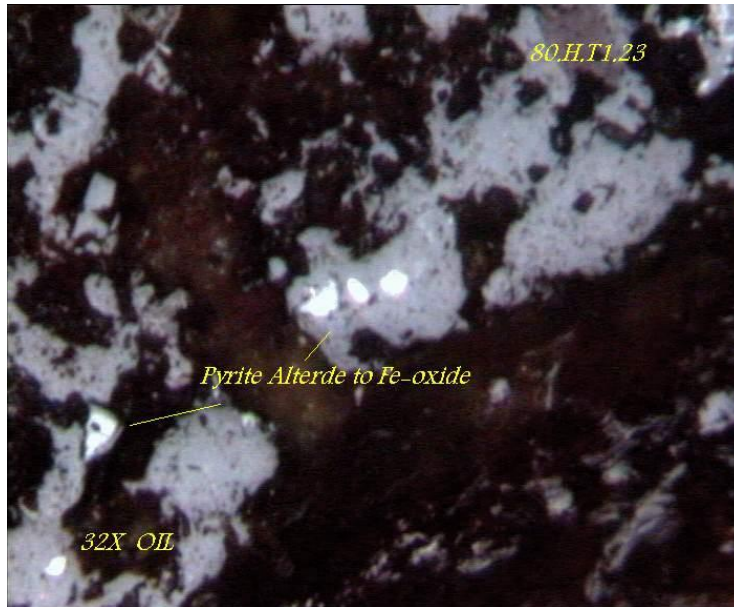
در اشکال ۳-۱۷ و ۳-۱۸ قرار گیری دانه های کوچک پیریت در کنار اکسید های آهن قابل مشاهده است.



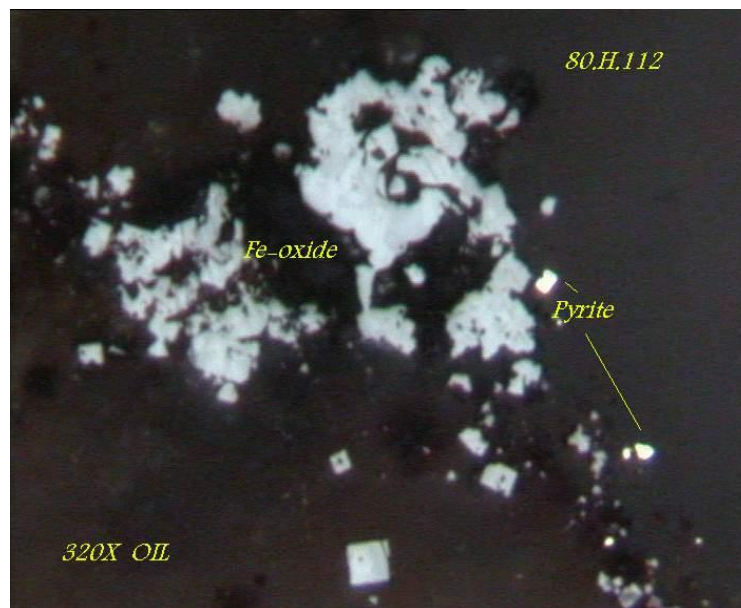
شکل ۳-۱۴ اکسید های آهن و وجود هماتیت در سطح (عسگری و همکاران، ۱۳۸۶)



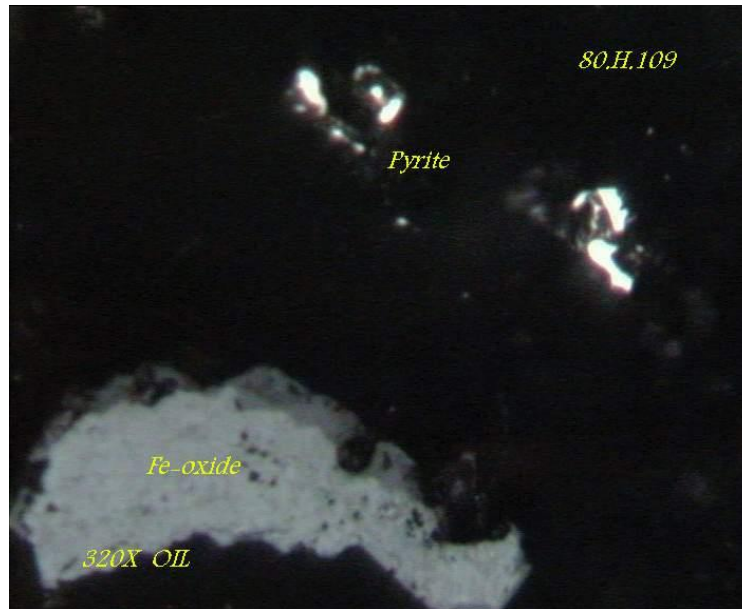
شکل ۳-۱۵ نمایی از پیریت دچار آلتراسیون شده و تبدیل شده به اکسید آهن (عسگری و همکاران، ۱۳۸۶)



شکل ۱۶-۳ نمایی از پیریت دچار آلتراسیون شده و تبدیل شده به اکسید آهن (عسگری و همکاران، ۱۳۸۶)



شکل ۱۷-۳ پوشیدگی سطح توسط اکسید آهن (عسگری و همکاران، ۱۳۸۶)



شکل ۱۸-۳ اکسید های آهن در سطح (عسگری و همکاران، ۱۳۸۶)

فصل چهارم

کلیاتی در خصوص

فرآوری کانسنگ طلا

۴-۱ روش سیانیداسیون

سیانیداسیون فرایند لیچینگ و انحلال فلز یا کانی در محلول ترکیبات اسید سیانیدریک است. واکنش به یک عامل اکسیدان و ترکیب کمپلکس نیاز دارد تا عملیات لیچینگ کامل شود. هر چند استفاده از سیانور بعنوان عامل ایجاد کمپلکس برای استخراج فلز به محیط زیست آسیب می رساند، با این حال با توجه به هزینه تمام شده پایین تر نسبت به سایر روشهای انحلال از جمله تیواوره ، ... و همچنین نرخ انحلال بالا، در حال حاضر تنها روش کاربردی است. عامل اکسیدان به طور طبیعی در این فرایند اکسیژن می باشد (Adams, 2002) .

۴-۱-۱ عوامل موثر در حلالیت

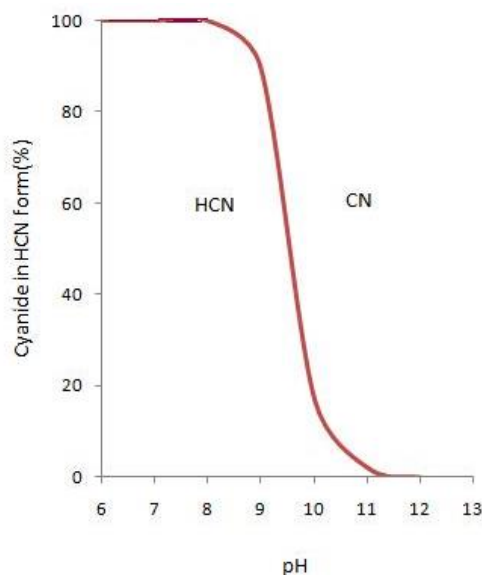
عوامل متعددی در حلالیت طلا در سیانور تاثیر دارند که در ادامه به تعدادی از این عوامل اشاره شده است:

۴-۱-۱-۱ اثر غلظت سیانور

مطالعات دقیقی بر روی عاملهای موثر در شدت حلالیت طلا و نقره در محلولهای رقیق سیانوری انجام شده است که نخستین سری آزمایشها برای تعیین تاثیر غلظت سیانور بر روی شدت حلالیت طلا و نقره است. در مقیاس صنعتی غلظت سیانور حدود ۰/۰۵ درصد و یا حدود یک پوند در تن محلول است. محلولهای غلیظ تر باعث تسریع و یا استخراج طلا نشده و از آنجایی که اتلاف شیمیایی و مکانیکی محلول قویتر سیانوری بیشتر است. بنابر این بهتر است که غلظت سیانور را در حداقل ممکن نگه داشت. ماکزیمم شدت حلالیت طلا در محلولهای سیانور با استفاده از ورق نازک طلای خالص تا غلظت ماکزیمم ۰/۰۵٪ درصد سیانور سدیم و در $\text{pH} = 9$ بدون افزایش قلیاییها تعیین شده است. بنابراین ماکزیمم حلالیت در غلظت ۰/۰۵ درصد سیانور بدست می آید که معادل غلظتی است که معمولاً در صنعت مورد استفاده قرار می گیرد (Berezowsky, 1989).

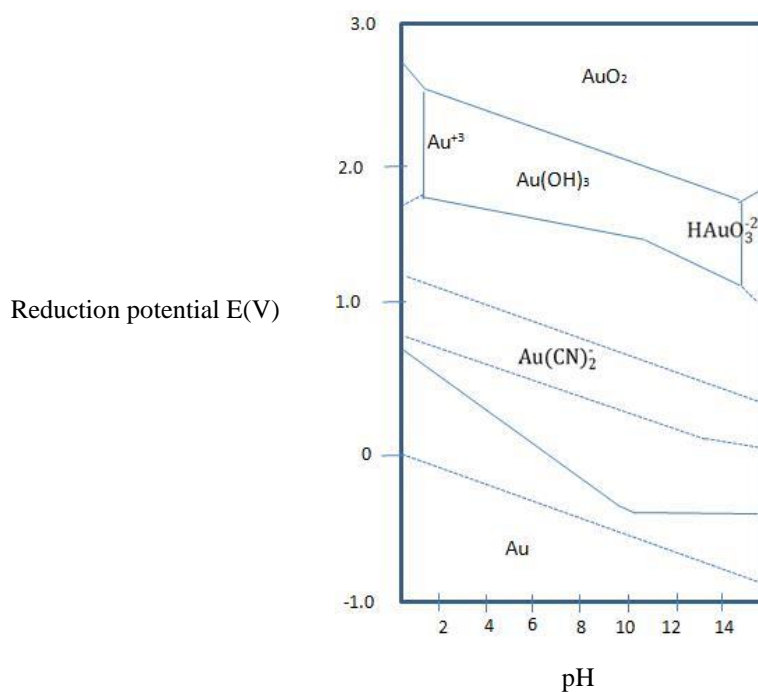
۴-۱-۱-۲ - اثر pH

با توجه به این موضوع که محلول سیانوری در pH های پایین گاز سمی اسید سیانیدریک (HCN) آزاد می‌کنند و هر چه pH کاهش پیدا کند مقدار آزاد شدن این گاز بیشتر است بنابراین pH باید افزایش یابد تا آزاد شدن این گاز حداقل شود. این عمل با اضافه نمودن قلیایی هایی مانند آهک و سود حاصل می‌شود. تاثیر قلیابیت بر روی انحلال طلا نیز بررسی شده است. این بررسی ها نشان می‌دهد که افزایش pH تا مقدار معینی انحلال طلا را افزایش می‌دهد ولی اگر pH از حد معینی بالاتر برود انحلال کاهش می‌یابد هر چند در pH های بالاتر مصرف سیانور کمتر می‌شود ولی مصرف آهک افزایش می‌یابد. pH محلول سیانوراسیون بین ۹/۵ تا ۱۱ کنترل می‌شود.



شکل ۴-۱- ترکیبات موجود در محلول سیانید به عنوان تابعی از pH (Mardison, 1992)

دیاگرام Eh-pH برای سیستم سیانید-طلا (شکل ۴-۱) نشان می دهد که نیروی الکتروشیمیایی در انحلال موثر است، برای مثال اختلاف پتانسیل بین خطوط نمایش اکسایش طلا و واکنشهای کاهش اکسیژن، در مقدار pH تقریباً بین ۹ تا ۹/۵ بیشترین است. نیروی الکتروشیمیایی انحلال در pH=9.4 جهت جلوگیری از دست رفتن سیانید برای هیدرولیز است و pH پایین کم شدن سیانید را در پی دارد. تعیین دقیق مقدار بهینه با انجام تست به دست می آید.



شکل ۴-۲- دیاگرام تعادلی pH برای سیستم Au-H₂O-CN⁻ در 25°C (Mardison, 1992)

در عمل فاکتورهای فرایند که معمولاً شرایط pH کاربردی را دیکته می کنند، عبارتند از:

- انحلال دیگر کانه ها مثل Cu ، Fe ، Te ، Sb ، As روی لیچینگ طلا موثر اند

- خصوصیات ترسیب پالپ

- ویسکوزیته پالپ

- هزینه تغییرات pH

- تغییرات pH در اثر نفوذ عواملی در انحلال مثل آهن یا کلسیم

به طور کلی، شرایط بهینه pH به تعداد فاکتورهای مربوطه وابسته است و بایستی به طور مستقل

برای هر نوع تیپ کانه و سیستم لیچینگ به دست آید.

۴-۱-۱-۳- اثر حرارت محیط

هنگامی که محلول سیانوری حاوی طلا حرارت داده شود (شکل ۴-۳) نرخ انحلال طلا به دو طریق

افزایش می یابد. اولاً افزایش درجه حرارت باعث افزایش قدرت محلول و بنابراین افزایش میزان انحلال

شده ثانیاً باعث کاهش میزان اکسیژن حل شده می شود. زیرا حلالیت گازها با افزایش درجه حرارت

کاهش پیدا می کند. قابلیت انحلال طلا در محلول ۲۵ درصد سیانور پتاسیم براساس تابعی از درجه

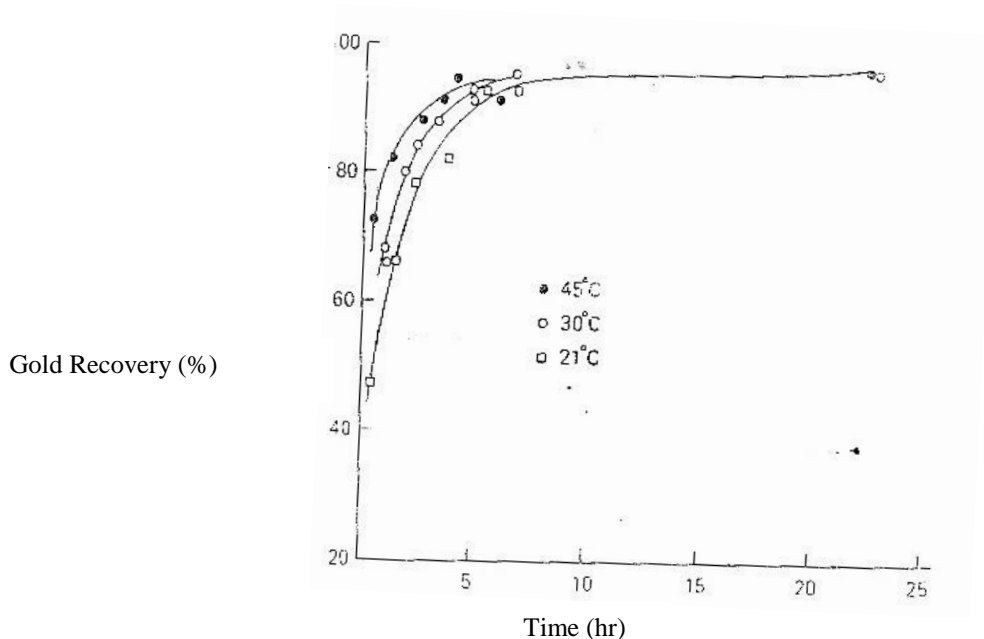
حرارت در شکل شماره ۴-۳ نشان داده شده است. حداکثر نرخ انحلال در حرارت ۸۵ درجه سانتی گراد

است نرخ انحلال طلا در ۱۰۰ درجه سانتی گراد کمتر از ماکزیمم انحلال است. اگرچه در این دما محلول

سیانوری فاقد اکسیژن محلول است. دلیل این امر ظرفیت کمتر الکتروود برای جذب یا نگهداری هیدروژن

در سطح دریک محلول گرم نسبت به محلول سرد می باشد. بنابراین با حرارت دادن محلول حداکثر نیروی الکتروموتیو مخالف EMF بعلت پلاریزاسیون کمتر و کمتر می شود تا اینکه EMF انحلال طلا بر پلاریزاسیون غلبه کند و انحلال طلا بدون وجود اکسیژن انجام می شود . بنابراین می توان با دو عامل زیر از پلاریزاسیون سطح طلا جلوگیری کرد:

عامل اول با اضافه نمودن اکسیژن که هیدروژن را در سطح طلا اکسید نموده و اجازه انحلال طلا در درجه حرارت کمتری می دهد و عامل دوم با حرارت دادن محلول که هیدروژن را از سطح طلا می راند و به آن اجازه می دهد که بدون اکسیژن در محلول سیانوری حل شود.



شکل ۴-۳- اثر دما بر بازیابی طلا (Mardison,1992)

۴-۱-۱-۴- اثر اکسیژن

اثر اکسیژن در انحلال طلا حائز اهمیت است هرچند عوامل اکسید کننده ای مانند پراکسید سدیم، پرمنگنات پتاسیم، بروماین و کلرین برای انحلال طلا قابل استفاده اند. اما هوادهی مناسب نتایج بهتری از اکسید کننده های شیمیایی خواهد داشت. مقدار اکسیژن حل شده در محلول رقیق سیانوری به چهار عامل بستگی دارد:

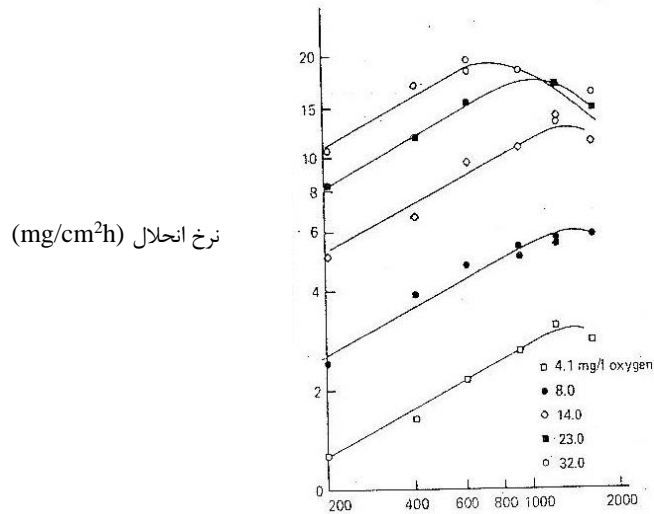
۱- فشار هوا

۲- حرارت محلول

۳- نوع و شدت همزدن

۴- قدرت یونی محلول

در غلظت پایین سیانور ، فشار اکسیژن در شدت انحلال طلا اثری نخواهد داشت. هرچند در غلظتهای بالا جایی که شدت انحلال مستقل از غلظت حلال است، آهنگ واکنش بستگی به فشار اکسیژن دارد. همزدن تاثیر اصلی بر شدت انحلال طلا معمولا در شرایط نرمال برای لیچینگ سیانیدی (مشخصه کنترل دیفوزیون) دارد و بنابر این نرخ به ضخامت سطح دیفوزیون و خصوصیات مخلوط و حجم محلول بستگی دارد. افزایش همزدن نرخ انحلال را تا حد ماکزیمم بالا می برد (شکل ۴-۴) . ضخامت لایه دیفوزیون با افزایش نرخ جریان عبوری ذرات جامد کاهش می یابد.

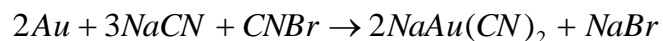
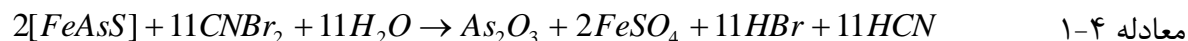


سرعت چرخش با پره های -rpm with 6.1 cm

شکل ۴-۴- نرخ انحلال دیسک طلا - اثر همزنی (Mardison, 1992)

انتقال جرم اکسیژن (به محلول) بر سرعت سطحی هوا بیان شده است (شدت جریان هوا در واحد سطح مقطع تانک، سرعت سطحی هوا تعریف می شود). آهنگ انتقال جرم اکسیژن با افزایش چگالی پالپ و کاهش اندازه ذرات کاهش می یابد. استفاده از اکسیژن خالص در سیانوراسیون از سال ۱۹۵۰ مطالعه شده است اما اولین کاربرد تجاری آن برای سیانوراسیون تحت فشار در سال ۱۹۸۳ بوده است. در تعداد قابل توجهی از کارخانه های آفریقای جنوبی معمولاً از اکسیژن خالص در عمل سیانوراسیون استفاده می شود. افزودن مواد اکسید کننده کمک فراوانی به حل شدن طلا در محلول سیانوری می کند زیرا باعث فعالتر شدن یونهای OH و بالعکس غیر فعال شدن H^+ می شود. در این حالت مقدار ماده اکسید کننده در محلول بستگی به خاصیت احیا کنندگی مواد معدنی دارد تا اینکه محیط عمل انحلال همواره در حالت اکسیدی باقی بماند. از موادی که می توان در این امر موثر باشند درصد گاز اوزن موجود در هوای منطقه

عملیات می باشد. همراه با دمیدن هوا به داخل محلول می توان از مواد و ترکیبات اکسید کننده دیگر نظیر آب اکسیژنه، اکسید منگنز (IV)، اکسید سرب، پرمنگنات پتاسیم، پرکلرات پتاسیم، سولفات سدیم، پراکسید سدیم، بروماین آمونیوم پرسولفات و... استفاده نمود. بیشترین تاثیر در اثر افزودن سولفات سدیم و پتاسیم، پراکسید سدیم، پتاسیم و سیانید آهن (III) مشاهده می شود. همچنین سرعت حلالیت با افزایش مقدار ماده اکسید کننده تا حد مناسبی افزایش می یابد. مواد آلی اکسیده نیز باعث تسریع در حلالیت طلا در محلول قلیایی سیانور مانند نیتروبنزنتول، نیتروبنزن، نیتروفنل، اسید پیکریک و ... می شوند. بدون شک افزودن مواد اکسید کننده به محلولهای سیانوری مفید است اما بعلت گران بودن آنها استفاده دراز مدت از این مواد قابل مقایسه با استفاده از هوای فشرده در محلول نیست در نتیجه در واحد های صنعتی عمدتاً بجای ترکیبات اکسید کننده از هوای فشرده در داخل مخازن استفاده می شود. در مورد کانیهای آرسنوپیریت در عمل سیانوراسیون به اکسیژن نیازی نیست بهمین خاطر در این موارد از ترکیبات سیانور برم استفاده می شود. در اثر واکنش سیانور برم در محیط قلیایی اکسیژن تولید می گردد که عامل موثری در حلالیت طلا است. مکانیزم عمل طبق واکنشهای شیمیایی زیر است:



HCN تولید شده با اضافه نمودن مواد قلیایی در ضمن عمل جذب می شود (Heath, 2008).



سیانید برم (BrCN) در محیط قلیایی شدید (pH~11) تجزیه می شود به همین منظور قلیابیت محلول باید بسیار پایین (pH~7) باشد.



معادله ۳-۴

برای عملیات سیانوری کردن کانیهای تغلیظ شده تلوراید های طلا از ترکیبات نمکهای برم استفاده می شود.

۴-۱-۱-۵- اثر نور و سطح

محلول سیانوری در برابر نور فعالتر از حالت تاریکی عمل می نماید علت آن این است که مقدار جذب اکسیژن در روشنایی نسبت به تاریکی بیشتر است همچنین سطح محلول سیانوری نسبت مستقیم در حلالیت آن با مقدار مشخصی از ماده دارد.

۴-۱-۱-۶- اثر اندازه ذرات

ماده معدنی طلا به صورت خیلی ریز خرد می شود تا به نحوی آزاد شوند که با سیانور ترکیب شوند. در شرایط ایده آل هوادهی و همزنی پالپ حداکثر نرخ انحلال طلا که محاسبه شده است ۳/۲۵ میلیگرم بر هر سانتیمتر مربع در ساعت است. این معادل نفوذ ۱/۶۸ میکرون بر هر طرف یک سطح در یک سانتیمتر مربع ذره طلا است. یا نفوذ کلی در ضخامت ۳/۳۶ میکرون در هر ساعت است بنابراین یک تکه طلا به ضخامت ۳۷ میکرون ۱۱ ساعت زمان می خواهد تا حل شود. ذرات دانه درشت طلا معمولا بوسیله تغلیظ ثقیلی جدا می شوند و بندرت با سیانور فروشویی می شوند چون دانه های درشت ممکن است تماما در زمان سیانوراسیون قابل قبول اقتصادی حل نشوند.

نرخ انحلال بطور مستقیم با افزایش سطح تماس در ارتباط است که پراکندگی ابعاد دانه و خصوصیات آزادی مواد ورودی و خوراک بر می گردد. افزایش سطح تماس با کاهش اندازه دانه (به خاطر افزایش آزادی و سطح تماس دانه های طلا) بر نرخ انحلال طلا در ارتباط است.

۴-۱-۱-۷ - اثر مواد شیمیایی استفاده شده در فلوتاسیون

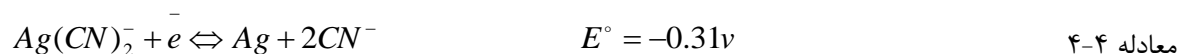
مواد معدنی طلا دار اکثرا قبل از سیانوراسیون بوسیله فلوتاسیون پیش فرآوری می شوند. اگر محصول فلوتاسیون خوب شسته نشود حضور مقادیر کم ترکیبات تیول اثر منفی بر روی عمل سیانوراسیون دارد.

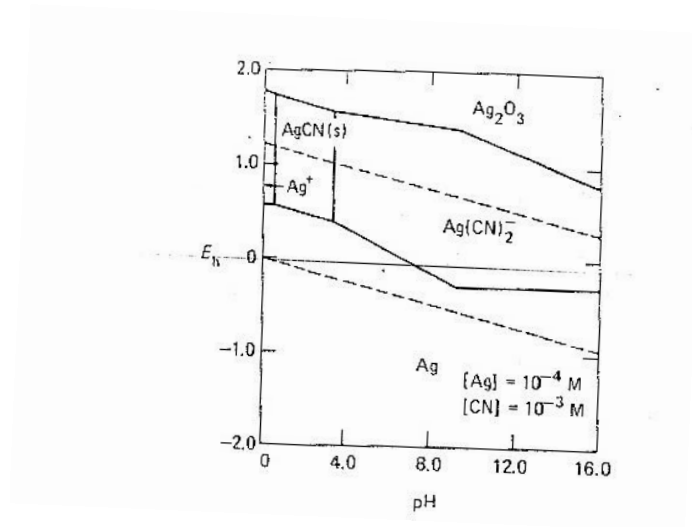
۴-۱-۱-۸ - رفتار دیگر کانی ها در انحلال سیانیدی - آلكالی

تعدادی از فلزات و کانی های همراه طلا در محلول سیانیدی آلكالی حل می شوند. این واکنش ها ممکن است مصرف کننده سیانید و اکسیژن باشند و در انحلال تغییر ایجاد کنند و انجام لیچینگ طلا و فرایند های بعدی را کند یا دچار تغییر شدید می کند.

- کانسارهای نقره

نقره بسیار زیاد با طلا در ذخایر اقتصادی همراه می شود و بنابراین رفتار آن در انحلال سیانیدی با اهمیت است. نقره خیلی مشابه طلا در انحلال آبی طلا عمل می کند و رابطه مشابه رابطه طلا دارد:





شکل ۴-۵- دیاگرام Eh-pH برای سیستم Ag-CN-H₂O در شرایط نرمال 25°C (Mardison, 1992)

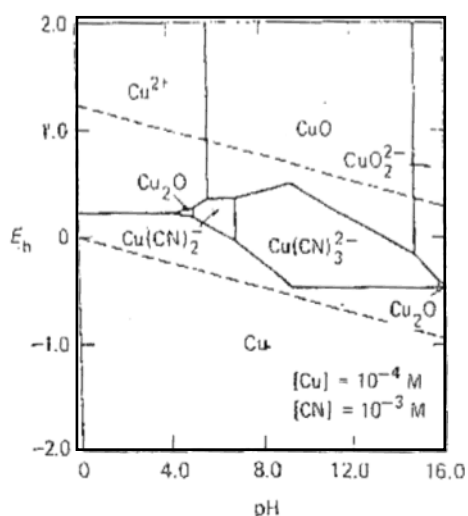
در قسمتی از شکل (۴-۵) Eh-pH سیستم $Ag-CN^- - H_2O$ کمپلکس سیانیدی Ag(I) را نشان می دهد و سیانید نقره نامحلول را تشکیل می دهد در pH های پایین ($pH < 3/5$) تشکیل می شود (Caruso, S. G., 1975).

- کانسارهای مس

کانی های مس حل می شوند تا انحلال سیانید آلكالی را در محلول تغییر بدهند ، برای بعضی از نمونه های کانی های مهم در جدول شماره (۴-۱) خلاصه شده است:

جدول ۴-۱- انحلال پذیری کانی های مس در محلول \sim ۰.۱٪ NaCN (Mardison,1992)

انحلال پذیری (%) کانی های مس در محلول NaCN ۰.۱٪		کانی ها	
45C°	23C°		
100.0	94.5	100.0	آزوریت
100.0	90.2	100.0	مالاکیت
100.0	90.2	100.0	کالکوزیت
100.0	90.0	100.0	فلز مس
100.0	85.5	100.0	کوپریت
100.0	70.0	100.0	بورنیت
75.1	65.8	75.1	انارژیت
43.7	21.9	43.7	تتراندریت
15.7	11.8	15.7	کریزوکولا
8.2	5.6	8.2	کالکوپریت



شکل ۴-۶- دیاگرام Eh-pH برای سیستم Cu-CN-H₂O در شرایط نرمال 25C° (Mardison,1992)

نسبت هایی از عوامل متعدد موجود در یک انحلال از جمله pH ، دما، تمرکز مس و سیانید می تواند با استفاده از ثابت پایداری برای عوامل متعدد تشکیل شده محاسبه شود.

شکل (۴-۶) خصوصیات کمپلکس سیانید مس را بعنوان یک تابعی از pH نشان می دهد. به طور متغیر، یک نشانه از نسبت های مرتبط می تواند با محاسبه نرخ مولکولار از سدیم سیانید به مس در محلول بدست بیاید به نوعی که این نرخ از ۲/۵ بر ۱ تا ۳/۵ بر ۱ تغییر می کند. که ثابت بالاتری از کمپلکس $Cu(CN)_3^{-2}$ تحت شرایط لیچینگ سیانیدی را انعکاس می کند.

- کانی های آهن

کربنات آهن و دیگر کربناتهای کمپلکس در محلولهای آلكالی تا حدی تجزیه می شوند ($pH < 10$) اما در pH بالاتر که معمولاً " برای لیچینگ کاربرد دارد قابل جذب نیستند. کانیهای اکسید نامحلول آهن با ظرفیت ۳ را حل نمی کنند. نرخ اکسید شدن با اکسیژن نامحلول کم است.

- آرسنیک و کانیهای آنتیموان

هم آرسنیک و هم آنتیموان با تشکیل کمپلکس های ثابت با سیانید و بطور متوالی در محلول روی نمونه های فلزی تاثیرگذارند. در شرایط کاربردی برای لیچینگ طلا ، سولفید ، آرسنیک و آنتیموان با

ترکیب آرسنوپیریت (AsO_2)، آرسنات (AsO_3)، استینیت (SbO_2)، استینات (SbO_3) با نسبتی وابسته به ترکیب محلول و pH نشان داده شده است .

در شرایط pH نرمال که برای لیچینگ طلا استفاده می شود ، اثر کانی های آرسنیک و کانی های آنتیموان روی استخراج طلا بطور عمومی با این روند کاهش می یابد.

رالگار > آرسنوپیریت > اورپیمان >> استینیت

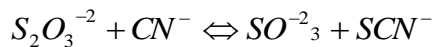
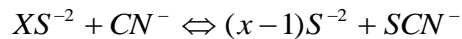
- کانیهای روی

کانیهای روی در حجم و تعداد کمتری با طلا همراه می شوند، در کانسنگ های طلا و در انحلال پذیری آنها در سیستم لیچینگ سیانید با اهمیت جلوه می نماید. انحلال پذیری کانیهای روی متفاوت عنوان شده است (Hedley, N. & Tabachnick, H., 1958) . فلز روی برای بازیافت طلا از محلول لیچ سیانیدی با توجه به رفتار و انحلال آن قابل توجه می نماید. استحکام و دوام کمپلکس سیانید نقره/روی از کمپلکس نقره/مس بیشتر است، از جهت دیگر روی در کمپلکس با سیانید می تواند بعنوان عامل کمپلکس طلا مطرح باشد.

با توجه به وجود سیانید آزاد کم در کمپکس سیانید روی ، حضور روی ایجاد مشکل کمتری در سیانوراسیون در مقایسه با حضور مس دارد.

- عناصر سولفوری

ترکیبات سولفیدی که ممکن است در طول تاثیر عامل اکسیدان یا در طول تشکیل سولفید در محلول سیانیدی رقیق تشکیل شده باشند، به سرعت با سیانید واکنش داده و تیوسیانات، سولفات و دیگر سولفور های آبی شامل سولفید، سولفات و یونهای چند سولفیدی را تشکیل می دهند. بعضی از واکنش ها در زیر لیست شده است:



انحلال عناصر سولفوری ممکن است برای حذف پوشش سولفور روی سطح ذرات طلا مفید باشد، اما واکنش مصرف کننده سیانور است (۱ درصد سولفور ۱۵/۳ گرم بر تن NaCN مصرف می کند) و از تشکیل عناصر سولفوری بایستی تا حد امکان جلوگیری شود.

۴-۱-۱-۸-۷ - کانیهای تلوریم

کانیهای تلوریم طلا ($Au_x Te_y$) به آرامی در محلول سیانید آلكالی حل می شود، اگرچه مکانیزم آن هنوز خیلی مشخص نیست اما تلوریم کمپلکس ثابتی را با سیانید تشکیل نمی دهد.

متاسفانه، بیشتر کانسنگ های تلوریم شناخته شده در کلرادو (USA)، کارگولی (استرالیا)، ایمپرر (Fiji) رفتار مطلوبی از این سری کانیها نشان نمی دهد و پیش تصفیه و جداسازی کانسنگ یا کنستانتره را با روش کلریناسیون یا تشویه را نیاز دارد.

- ترکیبات کربناته

حضور ترکیبات کربناته در کانسنگ معرف مقاوم بودن کانسنگ است و فرایند لیچینگ را با مشکل روبرو خواهد کرد. مواد و ترکیبات کربناته در کانسنگ های سولفیدی طلا به صورت کربن فعال عمل می کنند و بدین ترتیب طلای قابل انحلال در سیانور را جذب می کنند . مشکلات ایجاد شده به شرح ذیل است:

۱- ترکیب کربن طبیعی (native) که مانند زغال فعال شده عمل کرده و طلای محلول در سیانور را جذب می کند.

۲- ترکیبات هیدرکربوری با جرم مولکولی بالا به نظر می رسد به صورت مستقیم با طلا واکنش ندارند.

روش های متعددی برای غیر فعال کردن ترکیبات کربناته مانند کلریناسیون و تشویه بکار می روند. روش کربن در محلول در حال لیچینگ^۳ یک فرایند جایگزین متداول است که در این روش کربن فعال جهت رقابت با ترکیبات کربناته در جذب طلای محلول در سیانور عمل می کند. روش کربن در محلول در حال لیچینگ تاثیر بسیار کمی در هنگام حضور مقادیر زیادی ترکیبات کربناته (به شکل کربن ریز) خواهد

³ CIP (carbon In Pulp)

داشت. ممکن است که ربایندگی طلای ترکیبات با اضافه کردن ترکیب های شیمیایی مانند دیزل ، کروژن و نفت های سنگین در مدارهای لیچینگ و کارخانه های سیانوراسیون ، کنترل و از بین برود.

حضور ترکیبات کربناته می تواند همچنین ربایندگی طلا را در ترکیب های مختلف بالا ببرد. طلا و ذرات سولفیدی که توسط ترکیبات کربناته اندود می شوند ، در طی مراحل خردایش اثر پوشانندگی این ترکیبات به صورت فیزیکی ، شیمیایی و الکتروشیمیایی بر روی طلا وجود خواهد داشت و اثرات نامطلوبی بر روی انحلال و جذب کربن در مراحل بعدی به همراه خواهند آورد.

جدایش اولیه ترکیبات کربناته در طی خردایش ، به صورت قابل ملاحظه ای لیچینگ طلا را بهبود خواهد بخشید. با خرد شدن بیشتر ذرات کانسنگ طلای حاوی ترکیب های کربناته خاصیت پوشانندگی ترکیبات کربناته بر روی سطوح ذرات طلا به شدت تشدید خواهد شد (Tan,2005 ; Michaelies,1993) .

۲-۱-۴ روشهای بازیابی طلا از محلولهای سیانید

۱-۲-۱-۴ روش رسوبگیری طلا از محلول سیانیدی با استفاده از فلزات احیاء کننده مانند روی

۲-۲-۱-۴ روش جذب طلا از محلول سیانید با کربن

۱-۲-۱-۴ روش رسوبگیری طلا از محلول سیانیدی با استفاده از فلز روی

در این روش ابتدا لازم است محلول کاملاً زلالی از محلول سیانید طلا تهیه شود صرف نظر از رنگ آن محلول باید عاری از مواد کلوئیدی باشد این عمل در صنعت توسط انواع تکنیکهای صاف کردن انجام می

پذیرد استفاده از انواع کلاسیفایر ها و صافیها متداول است. روی به دو صورت تراشه (shaving) و یا پودر (dust) مورد استفاده قرار می گیرد. در صنایع بیشتر از پودر روی استفاده می شود ولی استفاده از تراشه هنوز در معادن کوچک متداول می باشد. به هر حال پودر روی به علت سطح زیاد تاثیر بیشتر و سریعتری نسبت به تراشه روی دارد.

- شیمی رسوبگیری

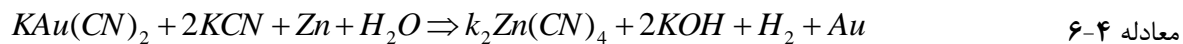
عامل موثر در رسوبگیری از محلولهای سیانید ایجاد هیدروژن نوزاد تحت تاثیر سیانید قلیایی بر روی است موارد زیر را در عمل رسوبگیری توسط روی می توان بیان نمود. طلا و یا نقره نسبت به روی در محلولهای سیانید الکترونگاتیو بوده و در نتیجه رسوب می کنند .

- عمل رسوب دهی فقط در حضور سیانید آزاد انجام می گیرد.

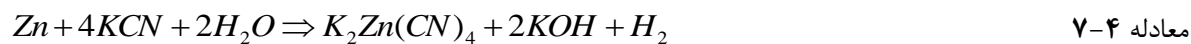
- عمل رسوبدهی همیشه با آزاد کردن هیدروژن همراه است.

- میزان قلیابیت محلول در حین عمل افزایش می یابد.

معادله واکنش را کلینل بصورت زیر ارائه می دهد.



واکنش مستقلی نیز بین روی و سیانید پتاسیم مطابق زیر انجام می گیرد.



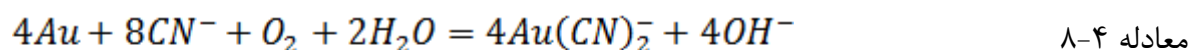
۴-۱-۲-۲ روش جذب طلا از محلول سیانیدی با استفاده از کربن فعال

در این روش از قابلیت جذب سطحی کربن فعال استفاده شده و طلا بر روی آن رسوب می کند روش کار بدین صورت است که پس از مرحله سیانوراسیون و حل طلای موجود در کانی به محلول دوغاب سیانیدی، کربن فعال افزوده می شود جهت حرکت کربن در مخازن جذب در خلاف جهت حرکت دوغاب بوده و نهایتاً کربن پس از جذب طلا توسط صافی از محلول جدا و شسته می گردد طلای جذب شده توسط کربن در تحت فشار و دما در حدود ۹۰ درجه سانتی گراد در محلول سیانیدی حل شده و طلای محلول در سلولهای الکترولیز بر روی کاتد های پشم فولادی رسوب می کند و یا حل کردن کاتد پشم فولادی در اسید نیتریک طلا بدست می آید به کار گیری کربن فعال نسبت به روی (Zn) جهت بازیابی طلا از محلولهای سیانیدی برتری هایی دارد سیستم روی نسبت به غلظتهای سیانید اکسیژن حل شده و فلزات پایه خصوصاً مس حساس می باشد در صورتی که سیستم کربن می تواند در محدوده وسیعی از غلظت سیانید عمل کند ضمناً نسبت به وجود اکسیژن حساس نبوده و عمل جذب طلا و نقره نسبت به فلزات پایه تقدم دارد، بازیابی با کربن می تواند تا ۹۸٪ انجام گیرد (Ucurum M., Arslan V., Vapur

.H., Bayat O. & Arslan V.,2006)

۴-۲- توضیحات تکمیلی روش سیانیداسیون

فرایند انحلال طلا در محلول سیانوری فرایندی است که بیش از یک قرن جهت استخراج طلا از کانسنگ میزبان به کار می رود. طلا توسط سیانور حل شده و بصورت کمپلکس سیانور طلا در می آید. فرمول شناخته شده ال.السرنر (Elsner) (۱۸۴۶) استوکیومتری واکنشهای لیچینگ طلا را توصیف می کند:



فرایند انحلال طلا در محلول سیانوری فرایندی هتروژن (ناهمگن) است، که توسط توزیع و پراکندگی یونهای سیانید و اکسیژن در اطراف سطوح ذرات طلا از طریق لایه مرزی نرسد کنترل می شود. نرخ سیانوراسیون طلا رابطه خطی با غلظت سیانور و اکسیژن دارد و تابعی از سرعت همزنی می باشد. انرژیهای فعال سازی فرایند در محدوده ۲۰-۸ KJ/mol نشان دهنده سنتیکی واکنش های با کنترل دیفوزیون تا مخلوط^۴ می باشد. در سرعتهای همزنی بالاتر از ۱۵۰ دور در دقیقه، نرخ انحلال طلا متناسب با مربع نرخ فشار اکسیژن بوده و انرژی فعال سازی فرایند در حدود ۵۸/۹ KJ/mol که نشان دهنده کنترل شیمیایی است. طبیعت الکتروشیمیایی واکنش سیانوراسیون طلا که مشابه با فرایند فرسایش (از نوع خوردگی) تحت پدیده پراکندگی می باشد (Habashi, 1987; Yannopoulos, 1991; Marsden and House 1992; Andrade and Hodouin 2006). همچنین قدرت اکسیدکنندگی اکسیژن و نرخ کم سیانوراسیون طلا در حضور H₂O₂ موضوع بحث تحقیقات اخیر بوده است. لذا ضرورت دارد که

^۴ mixed

عوامل از بین برنده سیانید و اکسیژن (به ترتیب cyanides و oxygen scavengers) شناسایی و تحت کنترل در آیند (Guzman, L. et al 1999).

البته بررسیهای الکتروشیمیایی نیاز به انجام آزمایشات متعدد و ابزار دقیق اندازه گیری پتانسیل شیمیایی دارد. در بررسیهایی که با استفاده از یک نمونه طلای خالص الکترولیتی (۹۹۹/۵ در ۱۰۰۰) انجام شد، معلوم گردید که یکی از پارامترهای مهم در زمینه انحلال طلا پتانسیل مخلوط^۵ می باشد. بطوریکه وقتی شرایط مختلف منجر به ایجاد پتانسیل بین صفر تا ۰/۵ ولت (در حضور الکتروود ۳ مولار Ag/AgCl/KCl) تغییر کند، فرایند تحت کنترل انحلال شیمیایی ترکیبات جذب سطحی شده می باشد که منطبق با محدوده نرخ کم انحلال است. از طرف دیگر وقتی پتانسیل محلول در حدود ۰/۶ v باشد (متناظر با شرایط فعال انحلال آندی طلا). فرایند تابعی از پراکندگی اکسیژن بوده و نرخ واکنش سیانوراسیون بالاتر است. کاهش قابل توجه در نرخ فرایند زمانی رخ می دهد که افزایش pH یا کاهش غلظت سیانور وابسته به تغییر وضعیت انحلال از شرایط کنترل پراکندگی^۶ به حالت کنترل شیمیایی^۷ انحلال ترکیبات جذب سطحی شده باشد. نقطه ای که این تغییر وضعیت ایجاد می شود براساس شرایطی که پتانسیل مخلوط را در هر وضعیت تعیین نماید، مشخص می گردد. همچنین ارتباط خطی بین تغییرات پتانسیل مخلوط و نرخ سیانوراسیون طلا می تواند کنترل سریع فرایند در شرایط واقعی بکار آید. (Habashi, 1987; Yannopoulos, 1991; Marsden and House, 1992; Andrade and Hodouin 2006).

^۵ Mixed potential

^۶ Diffusion Control

^۷ Chemical Control

معمولا سیانور در مقادیر ۰/۲۵ تا ۱ کیلوگرم بر تن ماده معدنی در فرآوری کانسنگ طلا بکار می رود و معمولا هزینه عمده ترکیبهای شیمیایی را شامل می گردد. آهک نیز به منظور کنترل pH و تا حد امکان جلوگیری از هیدرولیز یون سیانید به سیانید هیدروژن (مطابق معادله ۴-۹) استفاده می شود.



جهت واکنش فوق وابسته به pH و غلظت نمک در محلول می باشد. وقتی که سیانوراسیون در آب تازه انجام گیرد، pH = ۱۰/۵ به راحتی قابل دستیابی است و ۹۵٪ سیانید بصورت یون CN^{-} وجود دارد. در مواردی که از آبهای بسیار نمک^۸ مانند منطقه طلا دار کارگورلی^۹ در استرالیای غربی، استفاده شود، حضور یون منیزیم بصورت $Mg(OH)_2$ ، فرایند را مجبور به انجام سیانوراسیون در pH حدود ۹ می نماید. لذا مقدار زیادی از سیانور بصورت سیانید هیدروژن در محلول حضور دارد و به این ترتیب دو مشکل عمده وجود خواهد داشت: که یکی آزاد شدن و هدر رفتن سیانور در جو و آلودگی هوای محیط و دیگر عدم کارایی سیانید هیدروژن در انحلال طلا در مقایسه با یون سیانور سدیم یا پتاسیم در محلول می باشد. در سال ۱۹۸۹ محققین نشان دادند که در صورت انجام لیچینگ در تانکهای در بسته از هدر رفتن سیانور بصورت HCN جلوگیری می شود و می توان فرایند سیانوراسیون را در pH پایین و یا حتی در pH طبیعی پالپ انجام داد. (Perry, R. et al 1999, Heath J.L, Rumball J.A., Breuer P.L. & Jeffrey M.I, 2008) با در نظر گرفتن این مطلب که مصرف سیانور با توجه به مقدار مطلوب HCN در بازه ۵۰۰-۱۰۰۰

^۸ Hypersaline

^۹ Kalgoorlie

ppm می باشد و همچنین با در نظر گرفتن کارهای قبلی بازه تغییرات pH را جهت انجام تست ها می توان مدلسازی کرد (Akcil,2002).

جهت پرهیز از بروز مشکلات زیست محیطی که سیانید ایجاد می کند می توان از واکنشگر های غیر سیانیدی در مواردی استفاده کرد که این مواد عبارتند از کلرین از قرن ۱۹ ام استفاده می شده است ، تیو اوره بیشتر در مقیاس آزمایشگاهی بکار رفته و در مقیاس بزرگتر بخاطر نداشتن صرفه اقتصادی بکار نرفته است که مزایای زیر را دارند:

۱-آلودگی کمتر محیط زیست

۲-سینتیک لیچینگ در مواردی حتی سریعتر است

۳-در حالت های اسیدی مثل کانسنگ های درگیر کاربرد دارد

۴-انتخاب پذیرترند از سیانید که فقط برای طلا و نقره استفاده می شود و برای مس کاربرد ندارد.

فصل پنجم

روش تحقیق

در تحقیق حاضر فرایند سیانیداسیون بر روی نمونه طلای منطقه هیرد (استان خراسان جنوبی) مراحل زیر انجام شده است که جهت آشنایی ابتدا طراحی آماری آزمایشها^{۱۰} DOE تشریح می شود. طراحی آماری یک روش مناسب است که اولین بار در دهه ۱۹۲۰ توسط رونالد فیشر (Sir R.A.Fisher) به منظور مطالعه اثر همزمان چندین عامل بر روی یک پاسخ معین، ابداع گردید. در نخستین کاربردهای این روش، فیشر قصد داشت تا مشخص کند که برای کشت بهینه یک محصول، چه میزان کود، نور آفتاب و غیره مورد نیاز است. این روشها را می توان برای تمام فرایندهایی که دارای ورودی ها و خروجی های قابل اندازه گیری باشند، بکاربرد. در طول جنگ جهانی دوم و بعد از آن استفاده از روشهای طراحی آماری آزمایشها برای بهبود کیفیت فرایندها و تولیدات افزایش یافت، سپس بعد از پیشرفت کامپیوترهای شخصی استفاده از این روشها سرعت بیشتری پیدا کرد و از آن هنگام تا به حال بخش عمده توسعه روشهای مربوط به طراحی آزمایشها در محیط علمی انجام یافته است و کاربردهای بسیار زیادی را در تولید صنعتی به خود اختصاص داده است. مهمترین اهدافی که از استفاده از این روشها انتظار می رود را می توان در موارد زیر خلاصه کرد.

¹⁰ Design Of Experiment

۵-۲- مهمترین اهداف مورد نظر در استفاده از طراحی آماری آزمایش ها

مهمترین اهداف مورد نظر در استفاده از طراحی آماری آزمایش ها ، پاسخ به سئوالات و موارد مطروحه ذیل است:

۱- کدام یک از متغیرها تاثیر معنی دار از لحاظ آماری بر روی پاسخ فرآیندها دارند و کدام بی تاثیراند.

۲- بررسی و فهم اثرات متقابل (Interaction) بین متغیرها، نسبت به پاسخ فرآیند.

۳- تلاش در بهینه سازی فرآیند و یافتن مقدار هر یک از متغیرها برای مقدار بهینه پاسخ است (Montgomery, Douglas 1997).

۵-۳- تعاریف اولیه

در این بخش، تعدادی از اساسی ترین واژه ها و اصطلاحات مورد استفاده در مبحث طراحی آماری آزمایش ها، به شرح ذیل است . سایر مفاهیم نیز به تدریج و برحسب نیاز تعریف خواهند شد.

۵-۳-۱- طراحی آماری آزمایشها (DOE)

طراحی آماری آزمایشها (Design Of Experiment) یک راهکار علمی است که در طی آن با ایجاد تغییرات هدفمند و سیستماتیک در عوامل موثر در یک فرایند یا محصول و سپس بررسی تغییرات حاصله در خروجی، اطلاعات و درک وسیعی از فرایند و محصول راجع به چگونگی اثر این عوامل بر پاسخ بدست می آید.

۵-۳-۲- عامل (Factor)

متغیر قابل کنترلی (مستقلی) است که ممکن است باعث ایجاد تغییر در پاسخ (متغیر وابسته) گردد. عوامل را می توان به دو دسته زیر تقسیم بندی نمود:

- عوامل کمی پیوسته (Numeric Factor): عواملی هستند که دارای مقدار مانند زمان، دما، فشار، pH، ... می باشند.

- عامل کیفی ناپیوسته (Catagorical Factor): این عوامل فاقد مقدار هستند بلکه نوع دارند مانند نوع روش، نوع یک افزودنی، کنترل یا عدم کنترل یک عامل.

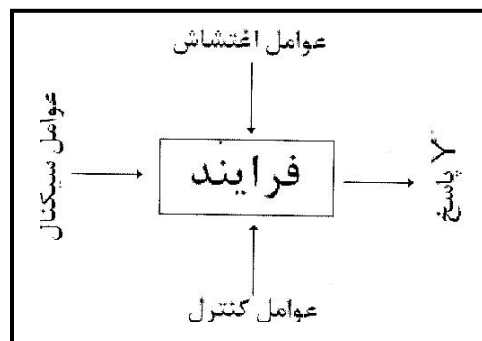
از نقطه نظر عملیاتی، سه نوع عامل وجود دارند:

- عوامل سیگنال: عواملی هستند که توسط مصرف کننده یا کاربر به منظور دستیابی به مقدار مورد نظر در پاسخ فرایند تنظیم می شوند.

- **عوامل اغتشاش (Noise):** برخی پارامترها قابل کنترل توسط طرح نیستند و از این رو عوامل اغتشاش نامیده می شوند. همچنین عواملی که تنظیم و کنترل آنها بسیار دشوار و پرهزینه است نیز به عنوان عوامل اغتشاش در نظر گرفته می شوند.

- **عوامل کنترل:** مجموعه عواملی هستند که توسط طراح انتخاب می شوند و در طول آزمایشها ثابت نگه داشته می شوند. (Montgomery, Douglas 1997).

شکل ۵-۱- نمای شماتیک و کلی از فرایند و عوامل موثر بر آن و همچنین پاسخ فرایند را نشان می دهد.



شکل ۵-۱- نمای شماتیک از فرایند و عوامل موثر بر آن

۵-۳-۳ سطح

در طراحی آماری آزمایشها، بمنظور بررسی اثر عامل روی پاسخ فرایند، مجموعه آزمایشهای طراحی می شوند که در آنها هر عامل در دو یا چند مقدار یا نوع خود قرار داده می شوند. هر یک از این مقادیر یا انواع، یک سطح برای آن عامل نامیده می شود.

۵-۳-۴ پاسخ

پاسخ یا متغیر وابسته، خروجی یک محصول یا فرایند است که قابل اندازه گیری است و می تواند در قالب یک یا ترکیبی از چند شاخص فنی و یا اقتصادی، انتخاب شود (Montgomery, Douglas 1997).

۵-۳-۵ اثرات متقابل بین عوامل

اثر متقابل، اثر همزمان دو یا چند عامل بر روی پاسخ فرایند می باشد. اگر در سطوح مختلف یک عامل، عامل دیگر اثرات متفاوتی را نشان می دهد، در این صورت بین آن دو عامل اثر متقابل وجود دارد. در جدول (۱-۵) اثر دو عامل A,B را در دو سطح مثبت و منفی نشان می دهد.

۵-۴- طراحی آزمایشها به روش فاکتوریل کامل

در این روش تمام ترکیبات ممکن از عوامل، به مورد آزمایش گذاشته می شوند. بعنوان مثال در جدول (۱-۵) طرح فاکتوریل کامل با سه عامل نشان داده شده A,B,C ارائه شده است که این عوامل در دو سطح + و - تغییر می کنند. جدول ۱-۵ آزمایش های این طرح را نشان می دهد.

جدول ۱-۵ طرح فاکتوریل کامل با سه عامل A,B,C در دو سطح پایین - و بالا +

Standard Order	Run Order	A	B	C
1	8	-	-	-
2	1	+	-	-
3	2	-	+	-
4	4	+	+	-
5	3	-	-	+
6	5	+	-	+
7	7	-	+	+
8	6	+	+	+

تعداد آزمایشهای لازم در این روش از معادله ۱-۵ بدست می آید

$$N=L^F$$

معادله ۱-۵

که در آن:

N تعداد آزمایشهای لازم

L تعداد سطوح

F تعداد عوامل

می باشد و چنانچه تعداد سطوح همه عوامل مورد بررسی ، برابر نباشد از معادله ۲-۵ می توان برای

محاسبه تعداد آزمایشها استفاده نمود.

$$N = L^{F_1} * L^{F_2} * \dots$$

معادله ۲-۵

مزیت عمده این روش در این است که تمامی حالت‌های ممکن (از جمله کلیه اثرات متقابل) را پوشش می‌دهد و لذا بیشترین میزان اطلاعات را در اختیار آزمایشگر قرار خواهد داد. عمده ترین اشکال این روش در این است که تعداد آزمایشها در آن زیاد است و بنابراین زمان و هزینه اجرای این روش زیاد می‌شود. روش فاکتوریل کامل، هنگامی بکار می‌رود که تعداد محدودی عامل و سطح وجود داشته باشد.

محاسبه و بررسی اثرات عوامل

اثر اصلی یک عامل مطابق با تعریف عبارتست از ، متوسط تغییر ایجاد شده در پاسخ به علت تغییر در سطح آن عامل.

$$Effect = \frac{\sum Y_+}{n_+} - \frac{\sum Y_-}{n_-} \quad \text{معادله ۳-۵}$$

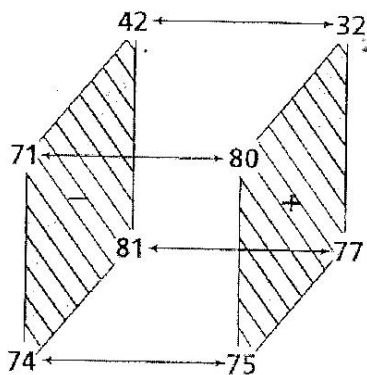
در معادله ۳-۵ $\sum Y_+$ و $\sum Y_-$ به ترتیب مجموع پاسخ‌ها در سطوح مثبت و منفی عامل مورد نظر نشان می‌دهد و n تعداد این پاسخ‌ها در آن سطوح می‌باشند.

در جدول ۲-۵ آزمایشها ، پاسخهای بدست آمده و اثرات عوامل A، B، C را برای یک طرح فاکتوریل کامل نشان می‌دهد (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000).

در جدول ۲-۵ پاسخها و اثرات عوامل در طرح فاکتوریل کامل (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000)

Standard Order	Run Order	A	B	C	Y1	Y2
1	8	-	-	-	74	3.1
2	1	+	-	-	75	3.5
3	2	-	+	-	71	1.6
4	4	+	+	-	80	1.2
5	3	-	-	+	81	0.7
6	5	+	-	+	77	0.7
7	7	-	+	+	42	0.5
8	6	+	+	+	32	0.3
Effect Y1		-1	-20.5	-17	66.5	
Effect Y2		-0.05	-1.1	-1.8		1.45

حال اگر توجه خود را بر روی سری اول پاسخها Y1، متمرکز کنیم خواهیم دید که می توانیم نتایج را برای این سه عامل بصورت مکعب مربعی نشان دهیم. در شکل (۲-۵) نتایج به صورت مکعب مربع نشان داده شده است.



شکل ۲-۵- نمای مکعب مربعی پاسخها برای بررسی اثر اصلی عامل A (Anderson M.J., Whitcomb P.J., 2000)

همانطور که در شکل (۵-۲) نشان داده شده است طرف راست مکعب مربع، شامل تمام پاسخهای آزمایشهایی است که در آن عامل A در سطح مثبت (بالای)، خود قرار داشته است و سمت چپ مکعب مربع نیز آزمایشهایی را شامل می شود که در آن عامل A در سطح منفی (پایین) خود قرار داشته است. بنابراین متوسط اختلاف پاسخها در سطوح بالا و پایین عامل A، میزان تاثیر عامل A را در سیستم نشان می دهد.

در محاسبه اثرات متقابل بین عوامل، علامتهای سطوح منفی و مثبت عوامل اصلی تشکیل دهنده آنها را با همدیگر ضرب می کنیم تا علامتهای سطوح مربوط به آن اثر متقابل بدست آید. سپس همانند روش تعیین اثرات اصلی از معادله ۵-۳ استفاده می کنیم. مثلا برای اثر متقابل AB در آزمایش اول، دو عامل A,B هر دو در سطوح منفی خود قرار دارند، بنابراین با ضرب علامت سطوح آنها در همدیگر، علامت سطح مربوط به AB مثبت خواهد شد. و برای بقیه آزمایشها نیز روند مشابه خواهد بود.

جدول ۳-۵- اثرات اصلی و متقابل برای هر سه عامل A و B و C برای سری اول پاسخ Y1 محاسبه شده است.

Standard order	Main Effect			Interaction Effects				Response
	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	
1	-	-	-	-	+	+	-	74
2	+	-	-	-	-	+	+	75
3	-	+	-	-	+	-	+	71
4	+	+	-	+	-	-	-	80
5	-	-	+	+	-	-	+	81
6	+	-	+	-	+	-	-	77
7	-	+	+	-	-	+	-	42
8	+	+	+	+	+	+	+	32
Effect	-1	-20.5	-17	0.5	-6	-21.5	-3.5	66.5

همانطور که در جدول (۳-۵) دیده می شود نکته قابل توجه این است که برای این فرایند اثر متقابل BC به تنهایی بزرگتر از اثرات اصلی تشکیل دهنده آن یعنی B و C می باشد. به عبارت دیگر ترکیب دو عامل B و C تاثیر بیشتری در فرایند داشته است. حال سئوالی که در ذهن بوجود می آید این است که آیا تغییر در اثر عوامل از نظر آماری معنی دار بوده است و یا این تغییرات صرفا بعلت تاثیر اغتشاشات در انجام آزمایشها بوجود آمده است .

۵-۴-۱- شناسایی اثرات معنی دار به کمک آنالیز واریانس ANOVA

اصول کلی آنالیز واریانس توسط رنالد فیشر بنیانگذاری شد. سپس ریاضیدانان و آمارشناسان دیگر جزئیات آن را تکمیل نمودند. آنالیز واریانس بنا به تعریف، انجام یک سلسله عملیات ریاضی است که توسط آن می توان مقدار کل تغییرات یا اختلافات موجود در یک آزمایش را به قسمت‌ها و اجزای مختلف آن تقسیم نمود.

بعضی از تغییرات به علت تاثیر عواملی است که آزمایشگر عمدا آنها را در آزمایش قرار داده است تا اثر آنها را بررسی کند (تغییر در سطوح عامل) و بعضی دیگر از تغییرات زائیده عوامل غیر قابل کنترل می باشند که برای تمیز این دو نوع، می توان از روش آنالیز واریانس نیز بهره برد. در این روش می بایست مجموع مربعات اثرات عوامل و تقابلهای آنها مورد محاسبه قرار گیرد. معادله (۵-۴) روش محاسبه مجموع مربعات اثرات عوامل و تقابلهای آنها را نشان می دهد.

$$SS = \sum_{i=1}^k \left(\frac{F^2_i}{n_{Fi}} \right) - \frac{(\sum Y)^2}{N} \quad \text{معادله ۴-۵}$$

SS مجموع مربعات مربوط به اثرات عوامل و یا تقابلهای بین آنها

K تعداد سطوح عوامل و یا تقابلهای عوامل مورد بررسی

F_i مجموع کلیه پاسخهایی که در آنها عامل و یا اثر متقابل F در سطح i قرار داشته باشد

n_{Fi} تعداد پاسخهایی که در آنها عامل و یا اثر متقابل F در سطح i قرار داشته باشد

$\sum Y$ مجموع کلیه پاسخهای آزمایشها

N تعداد کل آزمایشها

اگر بخواهیم جدول آنالیز واریانس را برای مثالی که در مبحث قبل و در جدول (۴-۵) بررسی شد (طرح سه عاملی و دو سطحی فاکتوریل کامل) تشکیل دهیم، می بایست مقادیر مجموع مربعات را برای عوامل و اثرات متقابل آنها محاسبه کنیم. در آن آزمایشها اثرات عوامل B و C و BC دارای بیشترین تاثیر بودند که قبلا توسط روش گرافیکی و کاغذ احتمال مشخص شده بود. حال در محاسبه مقادیر مجموع مربعات نیز دارای مقادیر بزرگتری می باشند، که از این اثرات برای تشکیل مدل استفاده شده است در محاسبه مجموع مربعات برای مدل، مجموع مربعات اثرات تشکیل دهنده آن را با هم جمع می کنیم که در زیر نشان داده شده است.

$$SS_{Model} = SS_B + SS_C + SS_{BC} = 840.5 + 578 + 924 = 2343$$

بقیه عوامل و اثرات متقابل آنها، که دارای تاثیر کمتری بودند نیز به عنوان تخمین خطا که مانده نامیده می شوند استفاده می شوند که در زیر مجموع مربعات مانده ها محاسبه شده است.

$$SS_{Residual} = SS_A + SS_{AB} + SS_{AC} + SS_{ABC} = 0.5 + 2 + 72 + 24.5 = 99$$

جدول ۵-۴ - آنالیز واریانس

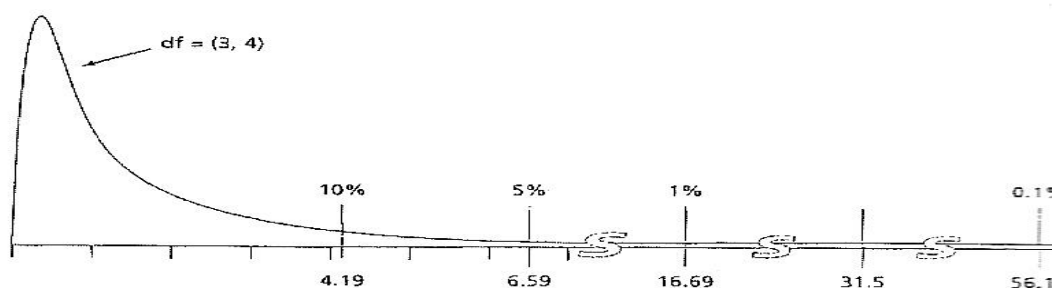
Source	Sum of Squares(SS)	Df	Mean Squares(MS)	F Value	Prob>3
Model	2343	3	781	31.50	<0.01
B	840.5	1	840.5	34.00	<0.01
C	578	1	578	23.30	<0.01
BC	924.5	1	924.5	37.30	<0.01
Residual	99	4	24.8		
COR Total	2442	7			

در جدول (۴-۵) مقادیر مجموع مربعات برای مدل، عوامل و مانده ها در ستون دوم نشان داده شده است. در ستون بعدی که با Df مشخص شده درجه آزادی مربوط به آن مقادیر نشان داده شده است. درجه آزادی برای مدل و مانده ها برابر تعداد عواملی است که در محاسبه آنها شرکت داده شده اند. برای مثال برای محاسبه مجموع مربعات مدل، از سه عامل B، C و BC استفاده شد که درجه آزادی مربوط به آن عدد ۳ بدست می آید. در محاسبه درجه آزادی برای عوامل و اثرات متقابل، اگر از تعداد سطوح تغییرات آنها یکی کم کنیم درجه آزادی مربوط به آن حاصل می شود که برای این طرح چون عوامل در دو سطح بالا و پایین تغییر داده شدند، درجه آزادی مربوط به آنها ۱ بدست آمده است.

در ستون بعدی میانگین مجموع مربعات محاسبه شده، که از تقسیم مجموع مربعات بر درجه آزادی آنها بدست می آید. از تقسیم میانگین مجموع مربعات بر میانگین مجموع مربعات مانده ها، عدد F بدست می آید. به عنوان مثال برای محاسبه عدد F برای مدل، از تقسیم $MS_{model}/MS_{Residual}$ (۸، ۲۴/۷۸۱) عدد ۳۱/۵ حاصل می شود.

مقادیر F محاسبه شده می بایست با یک توزیع F مرجع، که دارای درجه آزادی مشابهی است مقایسه شود. که در این مثال برای عدد F مربوط به مدل، توزیع F مرجع با درجه آزادی $Df=(3,4)$ مدنظر است. که درجه آزادی ۳ مربوط به صورت کسر و درجه آزادی ۴ مربوط به مخرج کسر می باشد. (Anderson M.J. & Whitcomb P.J.,2000)

& Whitcomb P.J.,2000)



شکل ۵-۳- توزیع F را برای درجه آزادی (3,4) (Anderson M.J.& Whitcomb P.J., 2003)

همانطور که در شکل (۳-۵) نشان داده شده، مقادیر بحرانی در توزیع F مشخص شده است. عدد F مدل، یعنی $31/5$ در بین دو احتمال کمتر از ۱٪ و بیشتر از ۱٪ قرار گرفته که ستون $Prob>F$ نیز این مفهوم را می رساند. در واقع این ستون نتیجه مقایسه عدد F محاسبه شده را با توزیع F، نشان می دهد. و این مطلب را بیان می کند که به احتمال کمتر از ۱٪، مقدار عدد F بزرگتری به دلیل تاثیر اغتشاشات بوجود خواهد آمد. به عبارت دیگر در سطح احتمال بیش از ۹۹٪ مدل از لحاظ آماری معنی دار خواهد بود

(Anderson M.J. & Whitcomb P.J.,2000)

۵-۵- مدل‌سازی اثرات معنی دار

مدل، در واقع یک معادله ریاضی است که برای پیش بینی پاسخ بکار می رود. ساده ترین مدل، مدل خطی ۱۵ است نمای کلی این نوع مدل برای یک طرح یک عاملی در معادله (۵-۵) نشان داده شده است. (Anderson M.J. & Whitcomb P.J.,2000).

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 X_1 \quad \text{معادله (۵-۵)}$$

در معادله (۵-۵)، \hat{Y} پاسخ پیش بینی شده، β_0 عرض از مبدا و β_1 ضریب مدل عامل X_1 می باشد. هرگاه تعداد عوامل اضافه شوند، تعداد عباراتی که در تشکیل مدل شرکت می کنند افزایش می یابد. به عنوان مثال معادله (۵-۵)، مدل کلی را برای حالتی که دو عامل و اثر متقابل آن در مدل شرکت دارند را نشان می دهد (Anderson M.J. & Whitcomb P.J.,2000).

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 \quad \text{معادله (۶-۵)}$$

حال اگر بخواهیم مدل را برای مثالی که در مبحث قبل طرح سه عاملی و دو سطحی فاکتوریل کامل تشکیل دهیم، معادله (۷-۵) بدست می آید. (Anderson M.J. & Whitcomb P.J.,2000).

$$\hat{Y} = 66.5 - 10.25B - 8.50C - 10.75BC \quad \text{معادله (۷-۵)}$$

در معادله (۷-۵)، مدل براساس سطوح عوامل کد شده (در این آزمایش دوسطحی به صورت ۱ و -۱) بسط داده شده است. که مقدار عرض از مبدا (β_0) $۶۶/۵$ ، نمایانگر متوسط پاسخهای واقعی بدست آمده می

باشد. ضرایب عوامل نیز در این حالت ، براساس شدت اثر عوامل برآزمایشها قابل مقایسه است. به عبارت دیگر عامل B که در مدل دارای ضریب ۱۰/۵- می باشد، نسبت به عامل C که دارای ضریب ۸/۵۰- است ، اثر بیشتری را در آزمایشها دارد. در جدول (۵-۵) مقادیر واقعی ، و پیش بینی شده پاسخها توسط مدل، و همچنین اختلاف آنها که به صورت مانده تعریف می شود، آورده شده است.

جدول ۵-۵- مقادیر واقعی و پیش بینی شده پاسخها توسط مدل

Standard	B	C	BC	Y1	Y [^]	Residual
1	-1	-1	+1	74	74.5	-0.5
2	-1	-1	+1	75	74.5	0.5
3	+1	-1	-1	71	75.5	-4.5
4	+1	-1	-1	80	75.5	4.5
5	-1	+1	-1	81	79.0	2
6	-1	+1	-1	77	79.0	-2
7	+1	+1	+1	42	37.0	5
8	+1	+1	+1	32	37	-5

برای آزمایش اول از جدول (۵-۵)، پاسخ پیش بینی شده براساس معادله (۷-۵) محاسبه می شود که به صورت زیر می باشد.

$$\hat{Y} = 66.5 - 10.25(-1) - 8.50(-1) - 10.75(+1) = 74.5 \quad \text{معادله (۷-۵)}$$

در واقع چون معادله (۷-۵) براساس سطوح عوامل کد شده (۱ و -۱) بسط داده شده بود، برای پیش بینی پاسخ نیز از مقادیر کد شده سطوح عوامل استفاده شده است.

البته می توان با استفاده از روشهای رگرسیون آماری، معادله (۷-۵) را به معادله (۸-۵) تبدیل کرد که در آن برای پیش بینی پاسخ مورد نظر، می توان مقادیر واقعی عوامل را در معادله جایگذاری کرد.

$$\hat{Y} = -199 + 65B + 3.62C - 0.86Bc \quad \text{معادله (۸-۵)}$$

در معادله (۸-۵) مقادیر عرض از مبدا و ضرایب عوامل را نمی توان تفسیر کرد و بزرگ بودن ضریب یک عامل به معنای بیشتر بودن تاثیر آن عامل ، در آزمایشها نمی باشد. چون در معادله (۸-۵) واحد عوامل با یکدیگر متفاوت شده است. مثلا واحد زمان و دما در حالت واقعی (کد نشده) با هم برابر و قابل قیاس نمی باشند.

در روشهای طراحی آماری آزمایشها به غیر از مدل خطی ، که مدلی با درجه اول می باشد، مدلهایی با درجات بالاتر نیز وجود دارند. مانند Quadratic و با Cubic که به ترتیب مدلهایی با درجات دوم و سوم می باشند. که بنا به تناسب ، می بایست بهترین مدل ، برای برآزش بر آزمایشها و پیش بینی آنها انتخاب شود (Anderson M.J. & Whitcomb P.J.,2000) .

فصل ششم

استخراج طلاى هيرد

به روش ليچينگ سيانيدى

۶-۱ مقدمه

در تحقیق حاضر فرآوری کانسنگ طلائی هیرد با عیار پایین ۲/۴ تا ۲/۶ گرم بر تن به روش لیچینگ سیانیدی صورت گرفت، در فرایند لیچینگ و انحلال طلا تعدادی پارامتر تاثیر گذار می باشد که در این سری از تست ها تاثیر آنها بررسی شد در ضمن بعلت وجود بعضی عناصر همراه با طلا بطور طبیعی، در روش سیانیداسیون بالا رفتن مصرف سیانور و پایین آمدن بازیابی طلا دیده شد از طرف دیگر بعلت آنکه مصرف سیانور بیش از ۱۰۰۰ ppm خارج از محدوده استاندارد بوده و عامل ایجاد آلودگی محیط زیست است، لذا تلاش بر این بود که با بهینه سازی پارامترهای موثر دیگر، مصرف سیانور تا حد امکان پایین نگه داشته شود تا نتیجه این تحقیق بتواند قابل استفاده در صنعت باشد.

در تحقیق حاضر بازیابی طلا به روش لیچینگ با استفاده از همزن های مکانیکی صورت گرفت. این روش از لحاظ اقتصادی مطلوب و قابل استفاده در صنعت است.

۶-۲ اهداف انجام آزمایشها

آزمایشها در آزمایشگاه فرآوری دانشگاه صنعتی شاهرود توسط ۳ همزن مکانیکی (IKA) و بکار گیری دستگاه pH سنج مدل Metrohm 744 و سایر ابزار آزمایشگاه با انجام برنامه ریزی و طراحی آزمایشها انجام شد، اهداف انجام آزمایشها به شرح زیر بود:

۱- بررسی امکان استخراج طلائی کم عیار و درصد بازیابی

۲- بررسی و فهم بهتر عوامل موثر و ارتباط آنها با هم، توسط روشهای طراحی آماری آزمایشها

۳- بهینه کردن شرایط سیانیداسیون با توجه به عوامل موثر و با استفاده از روشهای طراحی آماری

آزمایشها

۶-۳ تهیه خوراک و پالپ اولیه

در این تست ها، روش لیچینگ سیانیدی بر روی نمونه های شاخص آزموده شد. در عمل ابتدا در آزمایشگاه نمونه ها تا ابعاد ریزتر از ۳ میلی متر خرد شدند و با توجه به تاثیر گذاری دانه بندی جامد موجود در پالپ، سعی شد دانه بندی مطلوب جهت فرایند سیانیداسیون کانسنگ طلائی هیرد با محاسبه زمان ماندن در آسیای گلوله ای و درصد عبوری از سرنده ۲۰۰ مش (۷۵ میکرون)، تعیین گردد.

از نمونه های آماده سازی شده خوراک برای هر آزمایش، با توجه به دانه بندی موردنظر و زمان لازم برای دستیابی به آن ابعاد در آسیای گلوله ای به روش تر و با درصد جامد وزنی حدود ۵۰٪ در آسیا، خوراک جامد پالپ سیانوراسیون تهیه گردید. با توجه به محدوده متداول غلظت پالپ لازم برای سیانوراسیون و با توجه به

تشخیص وجود کانیهای رسی در ساختار کانی شناسی منطقه، درصد وزنی جامد ۳۳٪ در آزمایشهای لیچینگ رعایت گردید و برای هر آزمایش نسبت وزنی آب به جامد تقریباً برابر با ۲ در نظر گرفته شد. سیستم مورد استفاده برای سیانوراسیون نمونه ها، سیستم هم زنی در ظروف مناسب (معادل سیستم tank leaching) و با تنظیم دور روتور براساس میزان ته نشینی و شرایط بهینه چرخش و در نتیجه یکنواختی در اکسیژن ورودی به پالپ در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است این روش به منظور قابلیت کنترل بهتر و دقیق تر شرایط سیانوراسیون و همچنین سینتیک (نرخ) بالاتر انحلال طلا در شرایط هم زنی در کل در این سری از آزمایشهای مقدماتی سیانوراسیون کانسنگ طلای هیرد، بکار گرفته شد.

به منظور تعیین حدود مقدار مصرف سیانور توسط نمونه کانسنگ مورد نظر از آزمایش کنترلی سیانوراسیون بهره گرفته شد که در این آزمایش نمونه با ابعاد ۷۵ μ استفاده شد (با زمان ماندن ۳۵ دقیقه در آسیای گلوله ای برای رسیدن به $d_{80}=75\mu$)، سپس فرایند سیانیداسیون با درصد وزنی جامد ۳۳٪، $pH=10.5$ و در مدت ۲۴ ساعت انجام شد. سیانور سدیم به تدریج به محلول پالپ اضافه شد و در زمان های مختلف مقدار سیانور آزاد موجود در پالپ (سیانور آزاد مقدار سیانور حل نشده در محلول را نشان می دهد) به روش تیتراسیون با نیترات نقره و یدید پتاسیم اندازه گیری شد، نتیجه به شرح جدول ۶-۱ می باشد (این روش یکی از روشهای تخمین مقدار سیانور مورد نیاز لیچینگ سیانیدی کاربردی در آزمایشگاه سازمان زمین شناسی است).

جدول ۶-۱- نتایج حاصل از آزمایش کنترلی سیانیداسیون

مقدار سیانور آزاد (ppm)	غلظت سیانور سدیم اضافه شده (ppm)	زمان فرایند (ساعت)
۲۰۰۰	۲۰۰۰	۰
۱۳۵۰	---	۲
۸۵۰	---	۴
۶۶۰	---	۶
۹۶۰	۵۰۰	۸
۵۲۰	---	۱۲
۴۴۰	---	۲۴
۴۳۰	---	۲۶

دستگاههای مورد استفاده :

به منظور انجام آزمایش های فرآوری مختلف از وسایل و تجهیزات زیر استفاده شد:

- ۱- ۲ نوع سنگ شکن فکی ،
- ۲- آسیای گلوله ای (آسیای آزمایشگاهی دنور به قطر ۳۰ سانتی متر)،
- ۳- همزن الکتریکی مدل IKA ،
- ۴- سرندها (سرندهای سری ASTM)،
- ۵- دستگاه پودر کن (سایب تکنیک)،
- ۶- فیلتر خلاء برای آگیری محصولات سیانوراسیون و سایر محصولات دیگر،
- ۷- خشک کن نمونه ها (Oven)
- ۸- pH متر مدل Metrohm ۷۴۴

مواد مصرفی :

مواد مورد استفاده در سیانوراسیون نمونه های هیرد شامل آهک (برای تنظیم pH)، سیانور سدیم (عامل انحلال و کمپلکس دهی طلا)، نیترات نقره برای اندازه گیری میزان یون آزاد سیانور در محلول به روش تیتراسیون و یدید پتاسیم نیز بعنوان معرف نقطه انتهایی واکنش در آزمایش تیتراسیون بود. با توجه به آنکه در هر سری از آزمایشهای مقدماتی سیانوراسیون، ضرورتاً تمامی پارامترهای موثر در فرایند باید بهینه سازی گردد، آزمایشهای فعلی نیز بر اساس همین فرض و با توجه به تجربیات گذشته (گزارش های سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور) در مورد نمونه های مشابه و همچنین اطلاعات علمی موجود طراحی و به انجام رسید.

۴-۶ طراحی و روش انجام آزمایشها

طراحی و تحلیل آزمایشها جهت بررسی تمامی فاکتورهای موثر و جلوگیری از حذف عوامل موثر در تست ها، در دو مرحله و توسط روشهای آماری آزمایشها و به کمک نرم افزار Design Expert صورت پذیرفت. چون یکی از اهداف اصلی انجام آزمایشها بهینه سازی فرایند توسط روشهای آماری است .

به منظور بررسی قابلیت فرآوری نمونه های طلای کم عیار هیرد به روش سیانوراسیون، آزمایشهای مقدماتی و پایه ای لازم در این زمینه از روش فاکتوریل کامل Full Factorial بهره گرفته شد. در این سری از آزمایشها، ۳ عامل اصلی تعیین غلظت سیانور مصرفی، تعیین pH و تعیین دانه بندی مطلوب انتخاب شدند. در هر یک از

این عامل ها ۳ سطح بررسی شد و بازیابی طلا به عنوان پاسخ آزمایش برحسب درصد در نظر گرفته شد که جزییات بیشتر در ادامه توضیح داده خواهد شد.

در مرحله بعد با توجه به نتایج و اطلاعات حاصل از مرحله قبل بازه های مطلوب با بازیابی طلای بیشتر، با هدف بهینه سازی از روش سطح پاسخ (Response Surface Methods) که از روشهای مربوط به بهینه سازی در طراحی آماری آزمایشهاست استفاده شد. در این سری از آزمایشها، ۲ عامل غلظت سیانور مصرفی و pH انتخاب شدند، دانه بندی جامد مورد استفاده در پالپ در این سری از تست ها ثابت و بدون تغییر بود، بازیابی طلا برحسب درصد به عنوان پاسخ آزمایش در نظر گرفته شد که جزییات بیشتر در فصل هفتم توضیح داده خواهد شد.

همچنین جهت تعیین فاکتور تاثیر گذار زمان، در ۲ تست زمان سیانیداسیون، بطور جداگانه زمان ماند پالپ در لیچینگ سیانیداسیون بررسی شد، جزییات در انتهای همین فصل آمده است.

با وجود تاثیر گذاری فاکتورهای فرعی دیگری از جمله دور همزنی که در لیچینگ تاثیر گذارند در یک تست نیز این عامل بررسی شد، جزییات در انتهای همین فصل آمده است.

۶-۴-۱ روش انجام آزمایشها

در ابتدا با توجه به اینکه در هر تست قرار بر مقدار مشخص از هریک از عوامل موثر از جمله دانه بندی، مقدار سیانور مصرفی بر حسب گرم بر تن ماده معدنی و مقدار pH بود، ماده معدنی در آسیای گلوله ای در زمانهای مختلف خردایش شد به نحوی که با انجام تست های متعدد زمان دقیق ماندن جامد در آسیا برای

عبور ۸۰ درصد از سرنند ۲۰۰ مش بدست آید، نتیجه ماندن ۳۵ دقیقه، مخلوط ۵۰ درصد جامد و ۵۰ درصد آب در آسیای گلوله ای برای رسیدن به $d_{80}=75 \mu$ بود و مجددا زمانهای ۳۷ و ۴۰ دقیقه جهت رسیدن به $d_{80}=53\mu$ و $d_{80}=38 \mu$ تعیین که دانه بندی های تعیین شده برای تست های لیچینگ سیانیدی در پالپ متشکل از ۳۳ درصد جامد و ۶۷ درصد آب در یک بشر ۵ لیتری تهیه شد.

pH پالپ مورد نظر در ابتدای کار اندازه گیری می شد، پالپ توسط همزن مکانیکی IKA با دور ثابت ۴۵۰ rpm مخلوط گردید، مقدار سیانور با توجه به مقدار مورد نظر در هر تست بر حسب گرم بر تن ماده معدنی به پالپ افزوده می شد با توجه به عامل موثر دیگر pH در این سری از تست ها و با توجه به این مطلب که در هر تست می بایست pH پالپ در عددی، ثابت می ماند همواره و با فاصله زمانی ۳۰ دقیقه (بعثت تغییرات شدید pH در ۶ ساعت اولیه لیچینگ) pH پالپ اندازه گیری می گردید تا با بوجود آمدن هرگونه تغییر در آن، جهت تنظیم و ثابت نگهداشتن آن از اسیدسولفوریک جهت پایین آوردن و آهک جهت بالا بردن pH استفاده گردد.

بطور معمول بعد از ۲۴ ساعت، تست پایان می یافت و پالپ حاصل فیلتر می شد، محلول حاصل در یک نمونه ۱۰ سی سی جهت تعیین مقدار سیانور آزاد و یک نمونه ۱۰۰ سی سی جهت تعیین مقدار طلای محلول در سیانور و جامد باقیمانده از فرایند لیچینگ نیز جهت تعیین مقدار طلای باقیمانده به آزمایشگاه سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی ارسال شد.

در آزمایشگاه سازمان زمین شناسی روش قابلیت جذب سطحی کربن فعال استفاده شد که طلا بر روی آن رسوب می کند، اندازه گیری به دو صورت جذب اتمی و جهت تایید بر نتایج جذب اتمی از روش تشخیص با دستگاه ICP استفاده شد.

۵-۶ آزمایشهای مربوط به مطالعه عوامل موثر بر بازیابی طلا

این آزمایشات با هدف شناخت عوامل موثر بر بازیابی طلا و تعیین بازه های مطلوب تر در تعداد ۲۷ آزمایش در قالب طراحی فاکتوریل کامل انجام شد.

جدول ۶-۲- تعداد عوامل و سطوح مورد بررسی

نشانه	نام عوامل	واحد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
A	غلظت سیانور	کیلوگرم بر تن	۱	۲	۴
B	pH	-	۹/۵	۱۰/۵	۱۱
C	دانه بندی	میکرون	۳۸	۵۳	۷۵

همه عوامل بصورت کمی بوده و در ۳ سطح تغییر کرده است، بدین ترتیب توسط طراحی فاکتوریل کامل ۲۷ تست طراحی شد که جهت حذف خطاهای ناشناخته، آزمایشات با ترتیب تصادفی انجام شدند، جدول شماره ۶-۳ شرایط آزمایشی و پاسخها را در طراحی انجام شده، نشان می دهد.

جدول ۳-۶- تعداد تست های طراحی شده به روش فاکتوریل کامل با ۳ عامل و تغییر هر عامل در ۳ سطح و

بازیابی طلا به عنوان پاسخ بر حسب درصد

std	Run	Block 1	Factor A (cyanide concentration kgr/ton feed)	Factor B (pH)	FactorC (Size,μ)	Response Gold Extraction %
1	9	Block 1	1	9.5	75	83
2	19	Block 1	2	9.5	75	89
3	12	Block 1	4	9.5	75	82
4	21	Block 1	1	10.5	75	91
5	8	Block 1	2	10.5	75	81
6	10	Block 1	4	10.5	75	87
7	22	Block 1	1	11	75	87
8	23	Block 1	2	11	75	88
9	24	Block 1	4	11	75	85
10	27	Block 1	1	9.5	53	90
11	3	Block 1	2	9.5	53	84
12	17	Block 1	4	9.5	53	87
13	26	Block 1	1	10.5	53	94
14	16	Block 1	2	10.5	53	91
15	4	Block 1	4	10.5	53	88
16	18	Block 1	1	11	53	90
17	5	Block 1	2	11	53	86
18	7	Block 1	4	11	53	89
19	15	Block 1	1	9.5	38	75
20	13	Block 1	2	9.5	38	86
21	6	Block 1	4	9.5	38	90
22	25	Block 1	1	10.5	38	90
23	14	Block 1	2	10.5	38	88
24	2	Block 1	4	10.5	38	95
25	20	Block 1	1	11	38	77
26	11	Block 1	2	11	38	86
27	1	Block 1	4	11	38	84

از نظر آماری فقط اثر عوامل اصلی و تقابلهای دوعاملی آنها برای آزمایشگر دارای اهمیت و قابل تفسیر می باشند. بدین ترتیب اگر عوامل اصلی و تقابلهای دوعاملی آنها با یکدیگر اختلاط و اتحاد داشته باشند. آزمایشگر در تفسیر دچار مشکل خواهد شد و اصطلاحاً حالت ابهام، در تفسیر آزمایشها بوجود خواهد آمد.

۶-۶ مطالعه و تفسیر داده های پاسخ (درصد بازیابی)

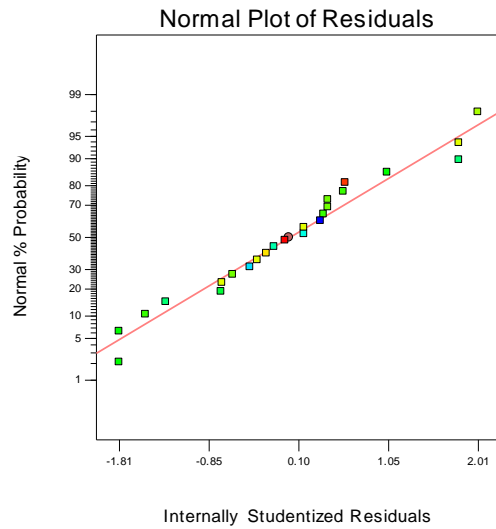
همانطور که قبلاً گفته شد، در این سری از تست ها ، ۳ عامل اصلی غلظت سیانور مصرفی ، pH و دانه بندی مطلوب انتخاب و برای آنها یک پاسخ که همان بازیابی طلا برحسب درصد می باشد در نظر گرفته شده است که در این بخش تفسیر داده های پاسخ (درصد بازیابی) مد نظر می باشد.

۶-۶-۱ اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ (درصد بازیابی)

برای برازش بهتر مدل جهت دستیابی به مدل ریاضی قابل قبول ، اگر مانده های مدل (residual) به صورت نرمال توزیع نشده باشند نیاز به اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ می باشد. که در مورد داده های پاسخ (درصد بازیابی) ، مانده های مدل به صورت نرمال توزیع شده اند و در نتیجه نیازی به اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ نیست. (شکل ۶-۱)

Design-Expert® Software
Recovery

Color points by value of
Recovery:



شکل ۶-۱- منحنی توزیع نرمال مانده ها مربوط به پاسخ (بازیابی طلا /)

۶-۶-۲ برازش مدل بر روی داده های پاسخ (درصد بازیابی)

برای بررسی رفتار عوامل بر روی پاسخ احتیاج به برازش مدل بر پاسخ آزمایشات می باشد. همانطور که قبلا نیز گفته شد، مدل در واقع یک معادله ریاضی است که برای پیش بینی پاسخ بکار می رود. در تشکیل مدل اکثرا از عوامل و تقابلهایی استفاده می شود که از نظر آماری دارای اهمیت باشند.

Final Equation in Terms of Coded Factors:

$$\begin{aligned} \text{Recovery} = & +86.27 + 0.74 \times A[1] - 1.92 \times A[2] - 1.36 \times B[1] + 1.85 \times B[2] - 1.26 \times C[1] + 1.19 \\ & \times C[2] - 0.94 \times A[1]B[1] + 0.69 \times A[2]B[1] + 2.80 \times A[1]B[2] + 3.50 \times A[2]B[2] + 1.25 \times A[1]C[1] + 0.26 \times \\ & A[2]C[1] + 3.13 \times A[1]C[2] - 2.50 \times A[2]C[2] - 1.62 \times B[1]C[1] - 0.53 \times B[2]C[1] + 0.90 \times \\ & B[1]C[2] - 2.27 \times B[2]C[2] \end{aligned}$$

۳-۶-۶ آنالیز واریانس پاسخ

در آنالیز واریانس هدف شناسایی عوامل موثر و همچنین ترتیب آنها از نظر اهمیت در پاسخ آزمایشها با یک سلسله عملیات ریاضی است. جدول ادامه آنالیز واریانس مربوط به پاسخ (درصد بازیابی) را نشان می دهد.

جدول ۳-۶-۴ آنالیز واریانس پاسخ آزمایشات (درصد بازیابی طلا)

Source	Sum Of Squares	Df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	368.6042	18	20.4780	18.976	0.0020
A-cyanide	26.3491	2	13.1745	12.208	0.0119
B-pH	71.9099	2	35.9550	33.317	0.0013
C-Size	37.0889	2	18.5444	17.184	0.0057
AB	72.0208	4	18.0052	16.684	0.0043
AC	85.8653	4	21.4663	19.892	0.0028
BC	92.9819	4	23.2455	21.54	0.0024
Residual	5.3958	5	1.0792		
Cor Total	374	23			

ملاحظه می شود که مدل برازش شده از نظر آماری معنی دار است و فقط ۰/۰۲ درصد احتمال وجود دارد که F-value بزرگتری براساس تاثیر اغتشاشات بوجود آید و همچنین به ترتیب عوامل اثرات مقدار pH (B)، اثر متقابل pH بر حسب دانه بندی (BC)، اثر متقابل مصرف سیانید بر حسب دانه بندی (AC)، اثر متقابل مصرف سیانید بر حسب pH (AB)، دانه بندی (C) و مصرف سیانید (A) است.

خلاصه آماری که در جدول ۳-۶-۵ آمده است جهت پردازش بهتر مدل است، Adeq Precision نرخ سیگنال به نویز را نشان می دهد که عدد بدست آمده در مدل برابر با ۱۹/۶۷ می باشد که عدد بالاتر از عدد ۴ مطلوبیت کافی سیگنال به نویز را نشان می دهد، در ضمن Pred R-Squared نزدیک به Adj R-Squared محاسبه

حدود تغییرات اطراف میانه را برای مدل مشخص که برای تعداد ترم های مدل تنظیم شده است را نشان می دهد که مطلوب می باشد.

جدول ۶-۵- خلاصه آماری از مدل برازش شده

R-Squared	0.99	Std. Dev.	1.04
Adj R-Squared	0.93	Mean	87
Pred R-Squared	0.90	C.V. %	1.19
Adeq Precision	19.67	PRESS	.0148

R-Squared مقادیر ضریب همبستگی های محاسبه شده را نشان می دهد که هر چه به یکدیگر نزدیک باشند وضعیت مدل برازش شده بهتر است. از طرفی ضریب همبستگی نزدیک ۱ برای مدل ، نشان دهنده برازش خوب آن مدل بر آزمایشات می باشد.

Std. Dev. ریشه دوم باقیمانده میانگین مربعات است که تخمینی از انحراف معیار است، در اینجا برابر با ۰۴/۱ می باشد.

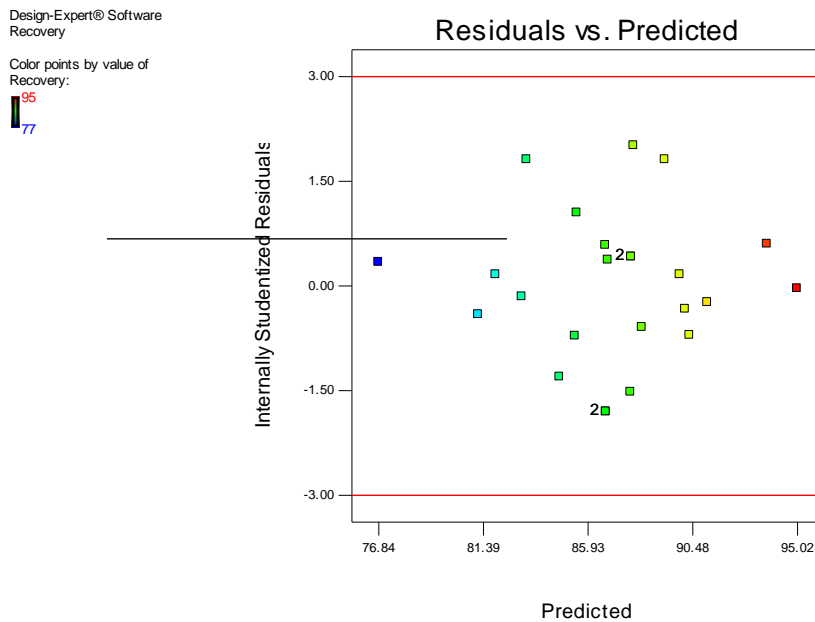
Mean میانگین کلی از همه داده های سطح پاسخ است در محاسبات این داده ها برابر با ۸۷ شده است. **PRESS** محاسبه ای است از اینکه چگونه مدل انتخابی بر هر نقطه جفت و جور می شود این محاسبه برای تمام نقاط مدل انجام می شود و در نهایت مجموع مربعات باقیمانده محاسبه می شود که در این مدل عدد محاسبه شده برابر با ۰/۱۴۸ شده است.

C.V. % ضریبی از تغییرات مدل است ، محاسبه به این صورت می باشد $100 \times (\text{Std Dev})/(\text{Mean})$.

۴-۶-۶ آنالیز خطاهای پاسخ (درصد بازیابی طلا)

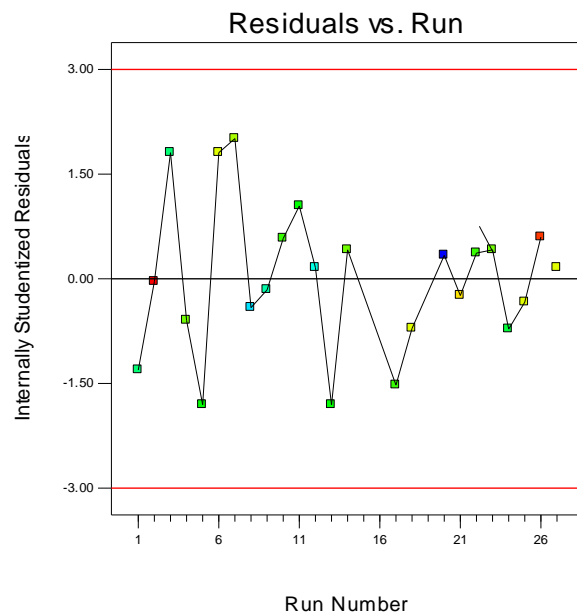
به منظور بررسی توانایی مدل برازش شده بر آزمایشها و چگونگی عملکرد آن و همچنین نحوه انجام آزمایشها بهتر است که آنالیز خطاها صورت پذیرد که این عمل در شکل های ۲-۶، ۳-۶، ۴-۶، ۵-۶ انجام شده است.

شکل ۲-۶ وضعیت مانده ها را با توجه به مقادیر پیش بینی شده پاسخ (درصد بازیابی) توسط مدل نشان می دهد. آنچه که انتظار می رود این است که مانده ها نسبت به مقادیر پیش بینی شده پاسخ توسط مدل وابسته نباشند و از الگوی خاص پیروی نکنند و به صورت پراکنده و تصادفی توزیع شده باشند که نمودار بالا این مورد را تاکید می کند .



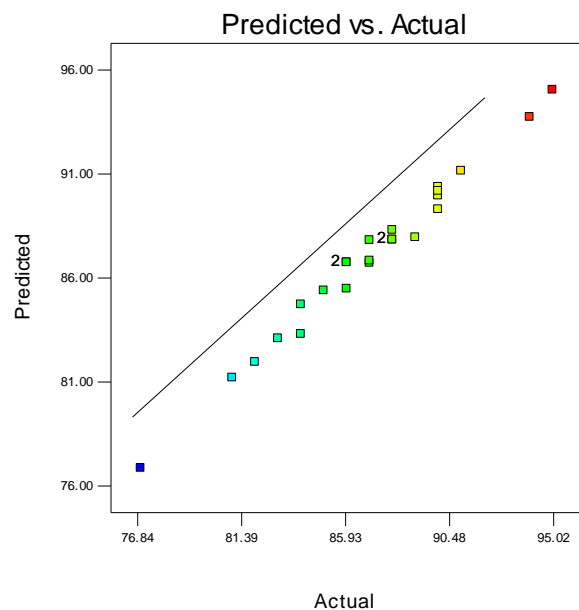
شکل ۲-۶-نمودار تغییرات مانده ها در مقابل مقادیر پیش بینی شده پاسخ (درصد بازیابی) توسط مدل

در شکل ۳-۶ به بررسی وجود الگوی احتمالی مقادیر مانده ها با توجه به توالی انجام آزمایشها پرداخته شده است. همانطور که در نمودار نیز مشاهده می شود مقادیر مانده ها به صورت تصادفی پراکنده شده اند که به مفهوم مستقل بودن مانده ها نسبت به توالی انجام آزمایشها است، که مطلوب می باشد.



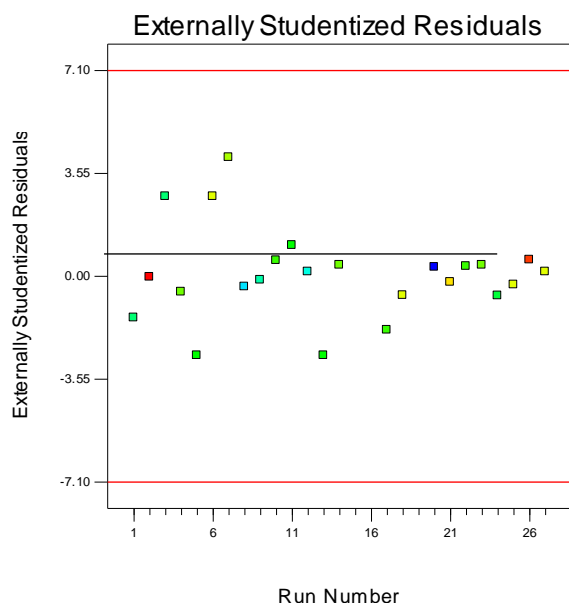
شکل ۳-۶- نمودار تغییرات مانده ها در مقابل توالی انجام آزمایشها مربوط به پاسخ (درصد بازیابی)

شکل ۴-۶ برای بررسی توانایی مدل در پیش بینی مقادیر واقعی پاسخ (درصد بازیابی) بکار می رود. از آنجایی که مقادیر واقعی و پیش بینی پاسخ (درصد بازیابی) توسط مدل، به هم نزدیک بوده اند، نقاط در شکل، تقریباً در یک خط ۴۵ درجه قرار گرفته اند که اعتماد ما را نسبت به کیفیت مدل برآزش شده بیشتر می کند



شکل ۴-۶- نمودار مقادیر واقعی پاسخ (درصد بازیابی) نسبت به مقادیر پیش بینی شده آن توسط مدل

شکل ۵-۶- نمودار Externally Studentized Residuals را نشان می دهد که برای بررسی و شناسایی مقادیر خارج از رده بکار می رود. انجام محاسبات مربوط به این نمودار بدین صورت می باشد که به ترتیب، داده های مربوط به یک آزمایش را بیرون از محاسبات نگه می دارند و سپس توسط بقیه داده ها، پاسخ را توسط مدل محاسبه می کنند. بدین ترتیب پاسخ محاسبه شده توسط مدل و پاسخ واقعی اندازه گیری شده که بیرون از محاسبات نگه داشته شده بود، با یکدیگر مقایسه شده و مانده محاسبه می شود. حال اگر مانده محاسبه شده مربوط به آن آزمایش از خطوط حدی مشخص شده (خطوط حدی بالا و پایین) که توسط آزمون t مشخص می شود تجاوز کند پاسخ اندازه گیری شده مربوط به آن آزمایش از نظر آماری به عنوان خارج از رده شناخته می شود. در نمودار (۵-۶) هیچ کدام از مانده ها از حدود مشخص شده تجاوز نکرده اند بنابراین هیچ یک از پاسخهای (درصد بازیابی) اندازه گیری شده خارج از رده نمی باشند.



شکل ۵-۶- نمودار Externally Studentized Residuals برای بررسی مقادیر خارج از رده مربوط به پاسخ (درصد بازیابی)

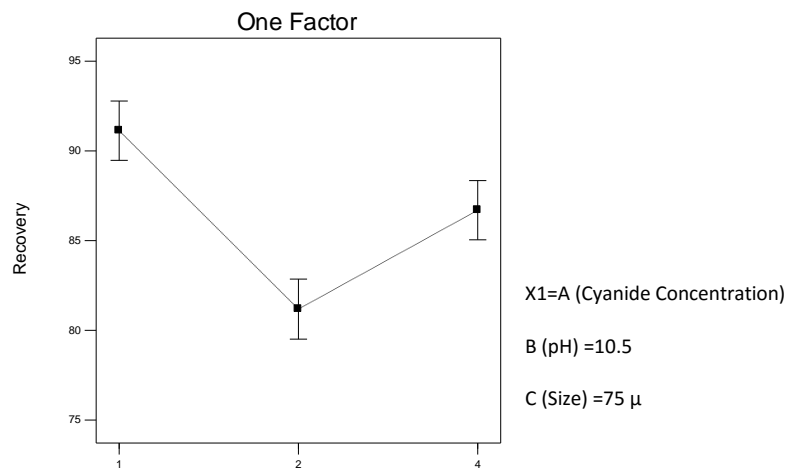
۵-۶-۶ بررسی نتایج پاسخ (درصد بازیابی)

با توجه به حصول اطمینان از برازش مناسب مدل و همچنین توزیع مناسب مانده ها، به بررسی نتایج حاصله از آزمایشهای مربوط به پاسخ (درصد بازیابی) پرداخته شده است. در ادامه به بررسی تاثیر عوامل نسبت به پاسخ (درصد بازیابی) پرداخته شده است.

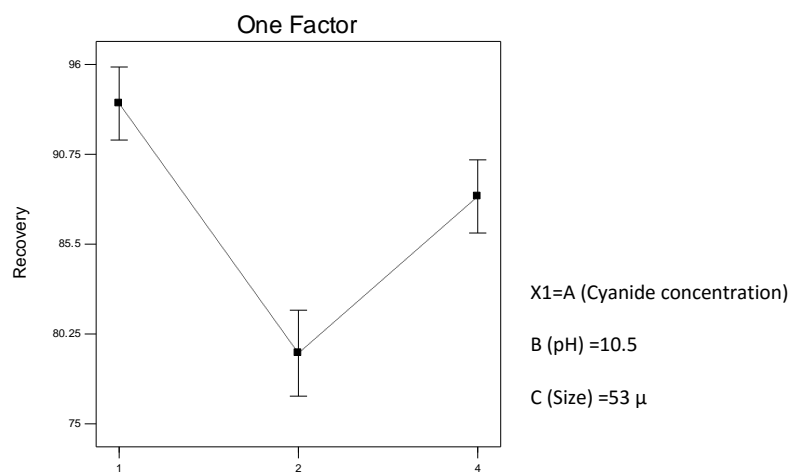
در اشکال ۶-۶ تا ۸-۶ تاثیر عوامل مختلف بر یکدیگر و همچنین در اثرات تغییر هر کدام در پاسخ آزمایش که همان بازیابی طلا است نمایش داده شده است که با شیب دار بودن خطوط موجود می توان به اثر گذار بودن این عامل بر بازیابی پی برد. نکته قابل توجه خطوط عمودی است که در ابتدا و انتهای نمودارها به شکل بازه نشان داده شده اند. این خطوط عمودی در سطح احتمال ۹۵٪ کمترین فاصله معنی دار بودن (LSD) را نشان می دهند. به عبارت دیگر اگر این بازه ها در ابتدا و انتهای سطوح عامل مورد نظر با هم همپوشانی نداشته

باشند، بدین مفهوم است که در سطح احتمال ۹۵٪ تغییر در سطوح بالا و پایین آن عامل، تاثیر معنی داری از نظر آماری در پاسخ داشته است.

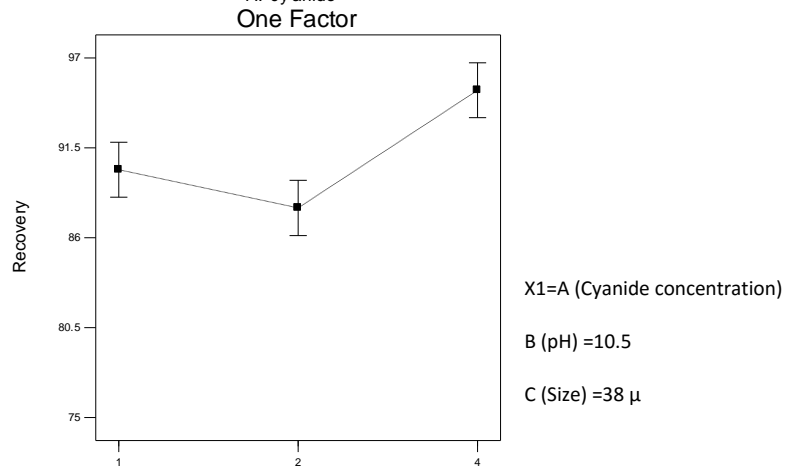
اشکال ۶-۶ و ۶-۷ به ترتیب نمودارهای تاثیر عامل سیانید بر بازیابی طلا در دانه بندی های مختلف و pH ثابت برابر ۱۰/۵ و نمودارهای تاثیر عامل سیانید بر بازیابی طلا در pH های مختلف و دانه بندی ثابت برابر با ۵۳ میکرون هستند، در این نمودارها شیب دار بودن خطوط و هم پوشانی نداشتن خطوط عمودی ابتدا و انتهای خطوط اثر گذار بودن این عامل بر بازیابی طلا را نشان می دهد، شیب تغییرات در نموداری که pH=۱۰/۵ و دانه بندی برابر با ۵۳ میکرون است دارای تغییرات شدید از مقدار بازیابی برابر با ۹۳٪ تا تقریباً برابر با ۸۰٪ می باشد در صورتی که تغییرات در حالتی که دانه بندی برابر با ۳۸ میکرون است شیب خط تغییرات در مقدار سیانور از ۱ تا ۲ کیلوگرم بر تن تقریباً به صورت خط افقی دیده می شود و بی تاثیر به نظر می رسد، حال آنکه در شکل ۶-۷ نمودار با ثابت نگهداشتن تغییرات دانه بندی در سری نمودارهای با تغییرات pH، خطوط موجود در نمودار با pH=۱۱ تقریباً به حالت افقی دیده می شوند، حال آنکه تغییرات شدیدی در نمودار pH=۱۰/۵ دیده می شود، از این سری نمودارها نتیجه می شود که عامل pH و دانه بندی و مقدار سیانور هر دو بر بازیابی طلا تاثیر گذار بوده اند جهت تعیین بهترین بازه تغییرات با توجه به مطالب عنوان شده در بالا pH=۱۰/۵ و دانه بندی برابر با ۵۳ میکرون بوده است که با تغییرات مقدار سیانور بر بازیابی طلا تاثیر گذار بوده اند. این عامل در مقدار سیانور تقریباً برابر با ۱ کیلوگرم بر تن بالاترین بازیابی طلا را به همراه دارد.



A: cyanide

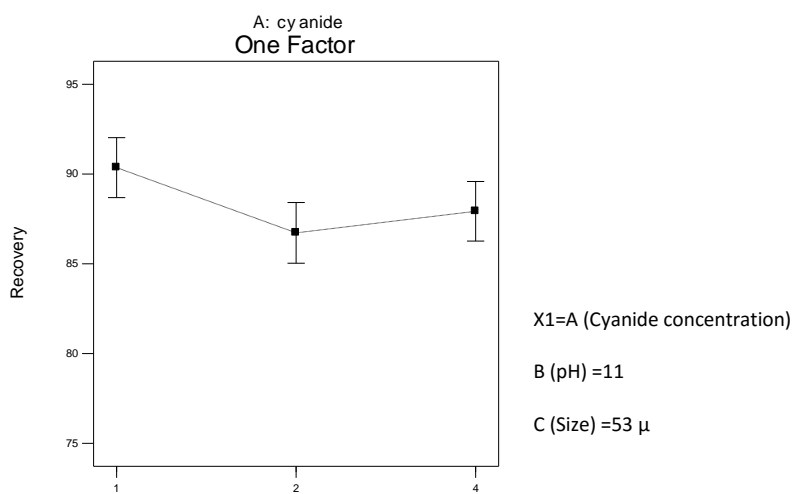
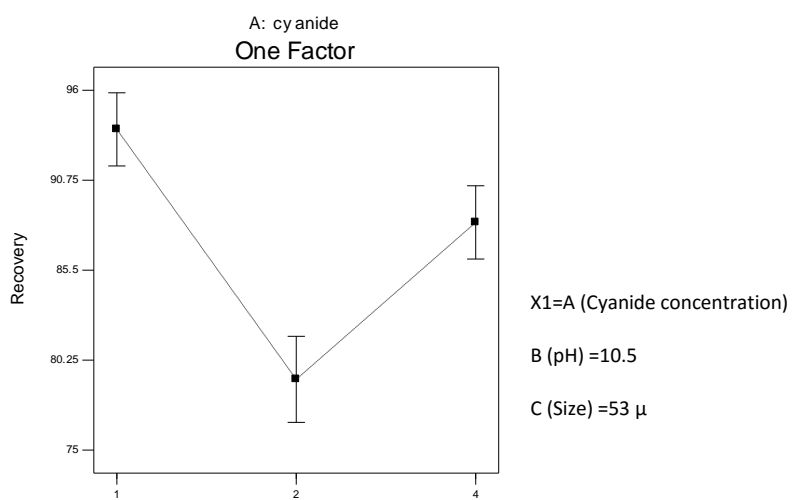
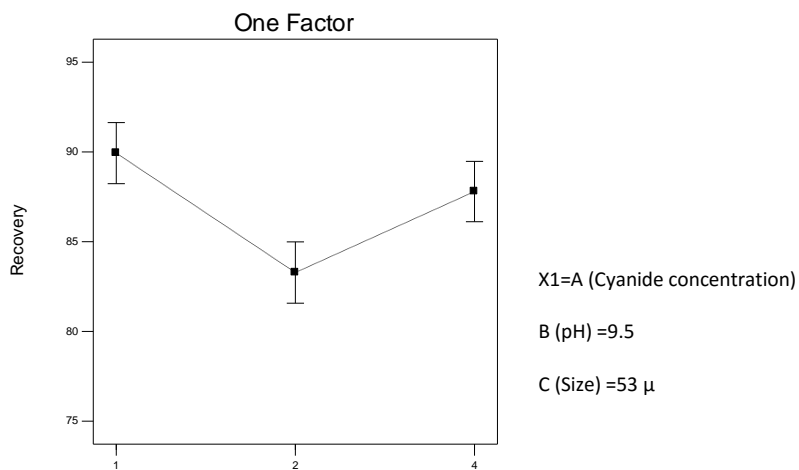


A: cyanide



A: cyanide

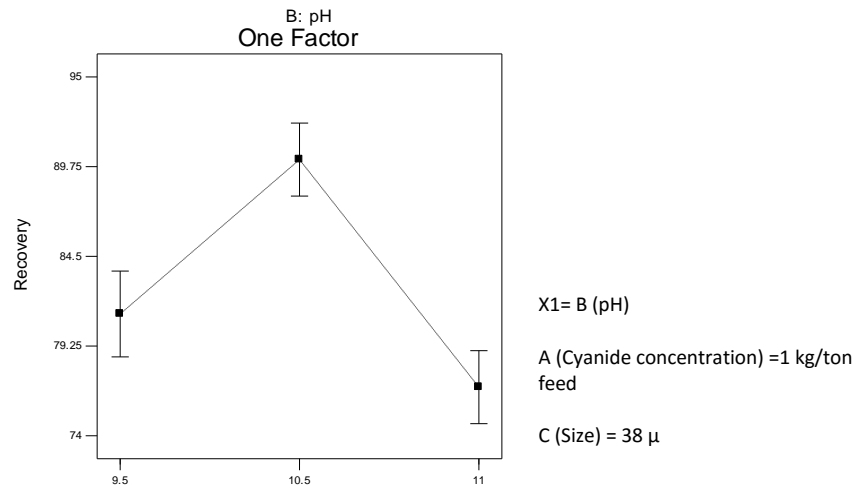
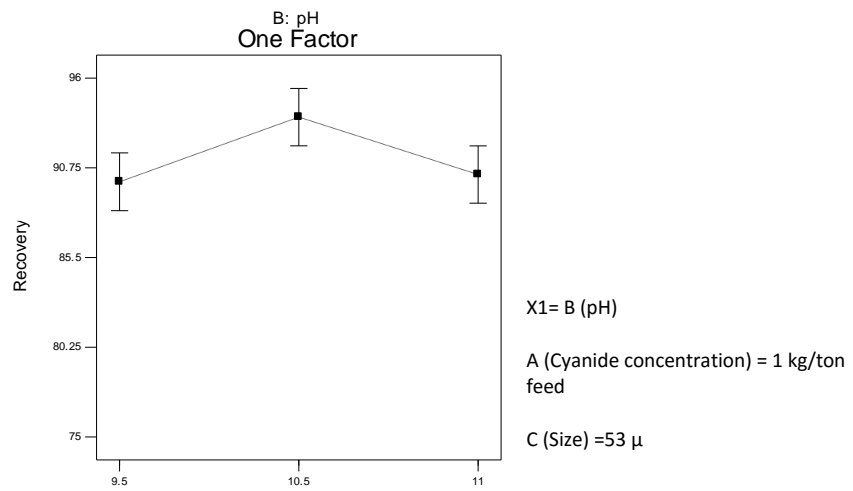
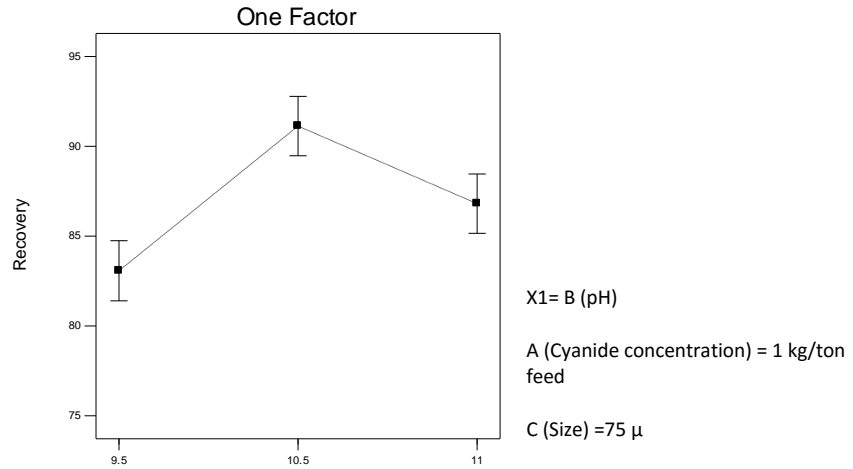
شکل ۶-۶- نمودار تاثیر عامل سیانید بر بازیابی طلا در دانه بندی های مختلف و pH های ثابت برابر با ۱۰/۵



A: cyanide

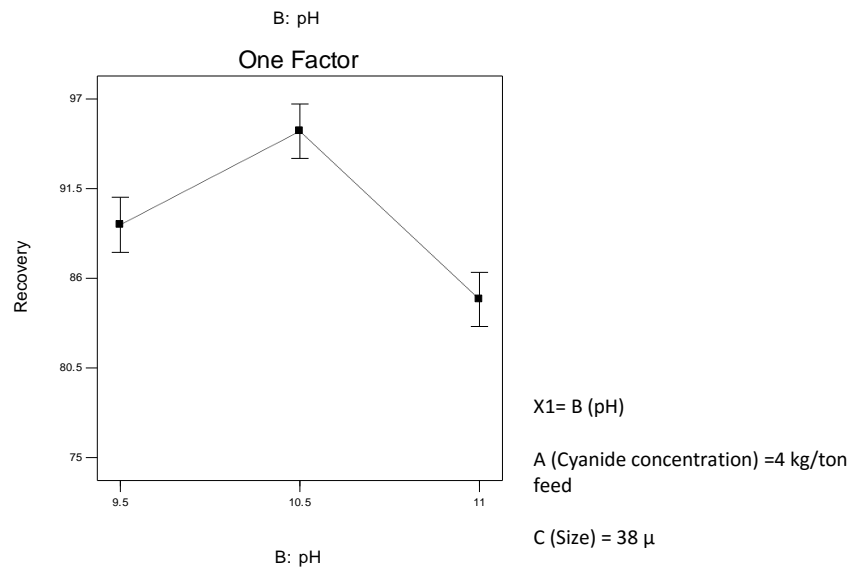
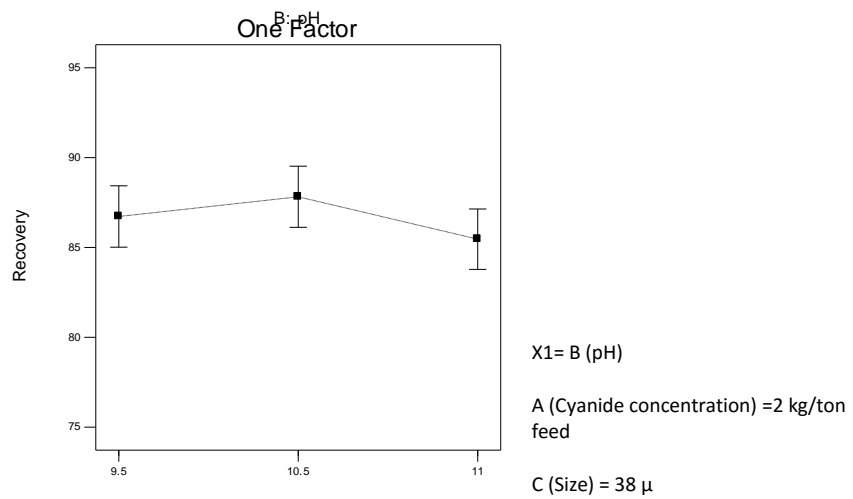
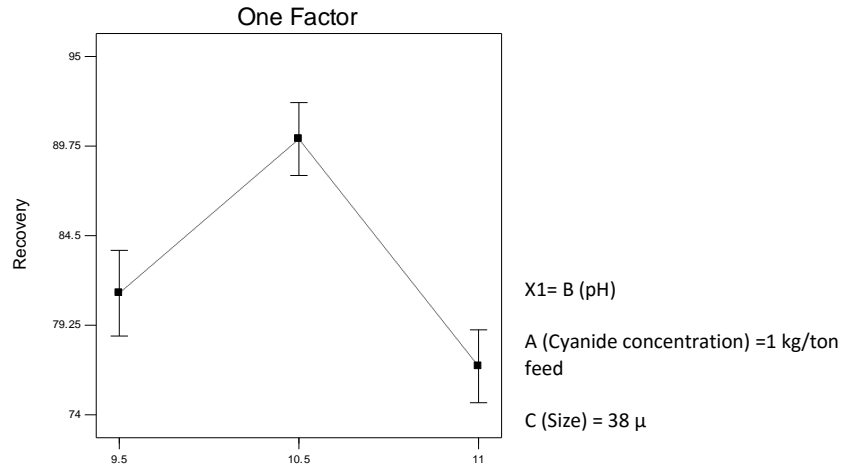
شکل ۶-۷- نمودار تاثیر عامل سیانید بر بازیابی طلا در pH های مختلف و دانه بندی های ثابت برابر با ۵۳ میکرون

در اشکال ۶-۸ و ۶-۹ نمودار تاثیر عامل pH بر بازیابی طلا در دانه بندی های مختلف و مقدار سیانور ثابت برابر با ۱ کیلوگرم بر تن و نمودار تاثیر عامل pH بر بازیابی طلا در مقدار سیانورهای مختلف و دانه بندی ثابت برابر با ۳۸ میکرون را نشان می دهد، شیب دار بودن خطوط موجود در این نمودارها به اثر گذار بودن این عامل بر بازیابی طلا اشاره می کند ، در نمودارهای مختلف آورده شده، شدت تغییرات pH در مقدار سیانید و دانه بندی های مختلف، متفاوت و بازیابی های مختلف طلا بدست آمده است، برای مثال عامل pH در حالتی که سیانور برابر با ۱ کیلوگرم بر تن و دانه بندی برابر با ۳۸ میکرون تاثیر بیشتری دارد در مقایسه با حالتی که در همان دانه بندی برابر با ۳۸ میکرون مقدار ۲ کیلوگرم بر تن به پالپ افزوده شده است و بازیابی طلای بالاتری را به همراه دارد . این عامل در $pH=10/5$ بالاترین بازیابی را به همراه دارد.



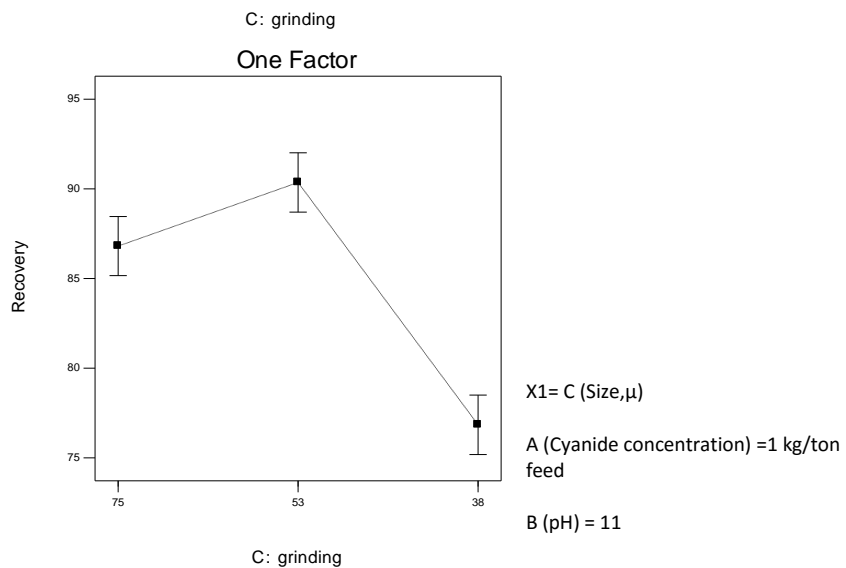
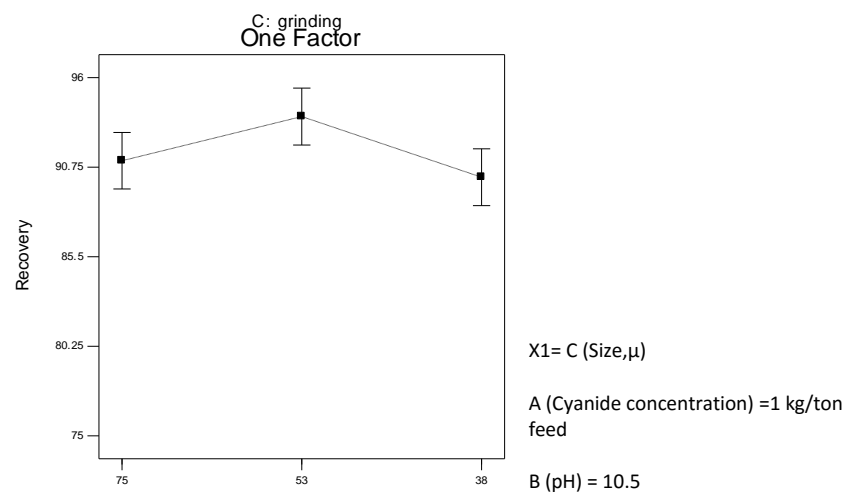
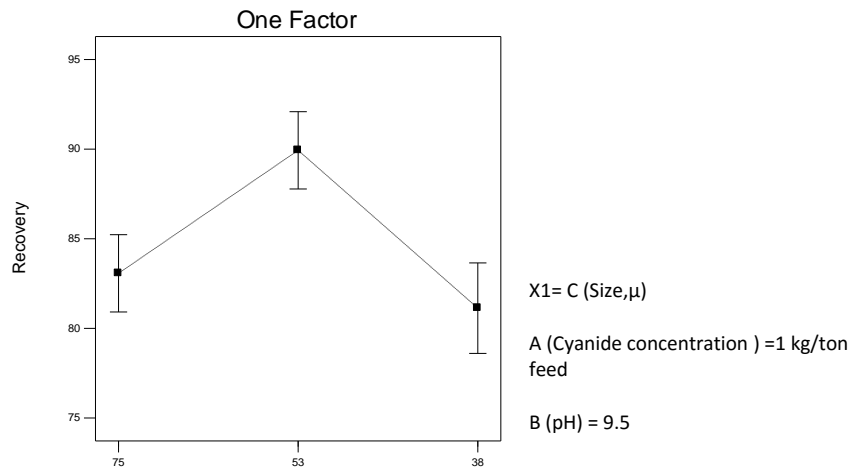
B: pH

شکل ۶-۸- نمودار تاثیر عامل pH بر بازیابی طلا در دانه بندی های مختلف و مقدار سیانور ثابت برابر با ۱ کیلوگرم بر تن

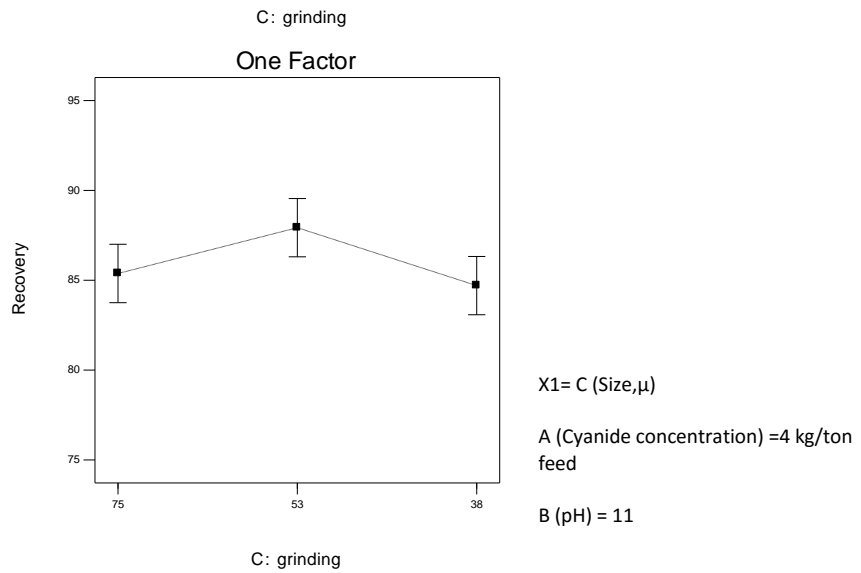
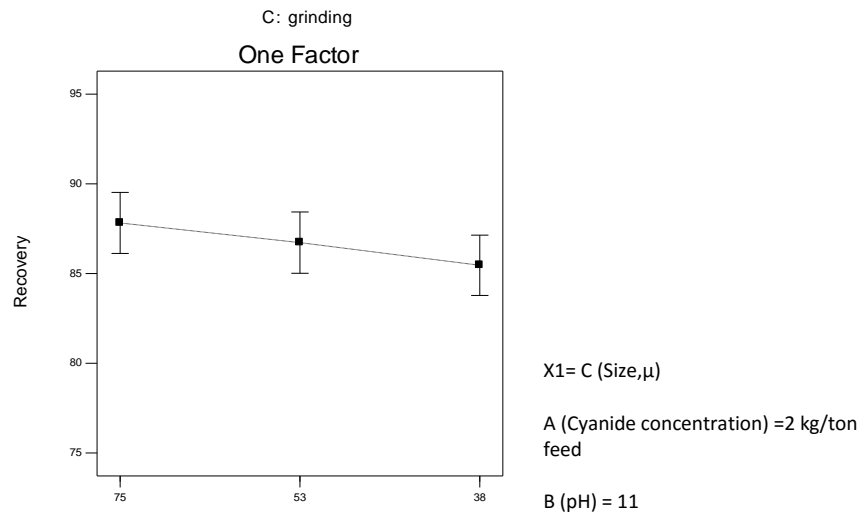
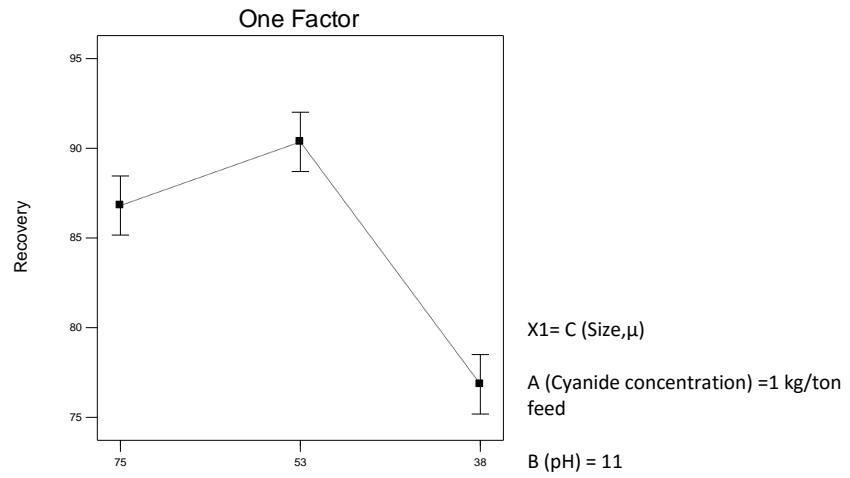


شکل ۶-۹- نمودار تاثیر عامل pH بر بازیابی طلا در مقدار سیانورهای مختلف و دانه بندی ثابت برابر با ۳۸ میکرون

شکل ۶-۱۰ و شکل ۶-۱۱ به ترتیب نمودار تاثیر عامل دانه بندی بر بازیابی طلا در pH های مختلف و مقدار سیانور برابر با ۱ کیلوگرم بر تن و نمودار تاثیر عامل دانه بندی بر بازیابی طلا در مقدار سیانورهای متفاوت و pH برابر با ۱۱ است ، این نمودارها نیز با داشتن خطوط شیب دار ، اثر گذاری این عامل بر بازیابی طلا را نشان می دهند ، به طور موردی در شرایطی که مقدار سیانور برابر با ۲ کیلوگرم بر تن و $pH=11$ نمودار تغییرات دانه بندی تقریبا به صورت خط افقی در آمده است که می توان گفت در این شرایط عامل دانه بندی تاثیر موثری بر بازیابی طلا نداشته است. در دانه بندی برابر با ۵۳ میکرون بالاترین بازیابی را بدست آمده است.



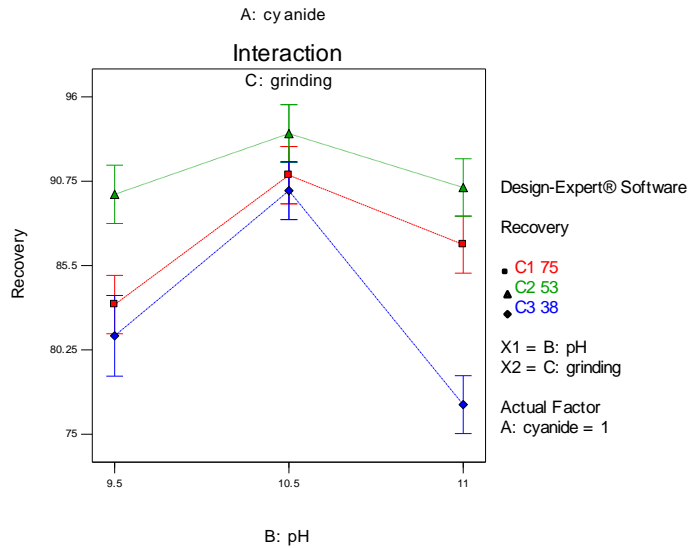
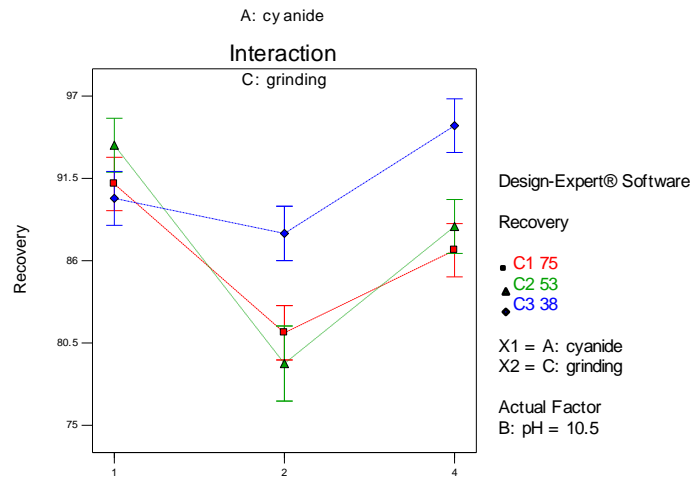
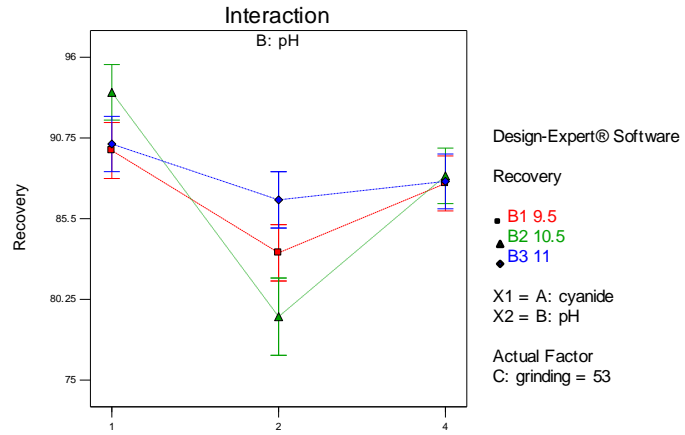
شکل ۶-۱۰- نمودار تاثیر عامل دانه بندی بر بازیابی طلا در pH های مختلف و مقدار سیانور برابر با ۱ کیلوگرم بر تن



شکل ۶-۱۱- نمودار تاثیر عامل دانه بندی بر بازیابی طلا در مقدار سیانورهای متفاوت و pH برابر با ۱۱

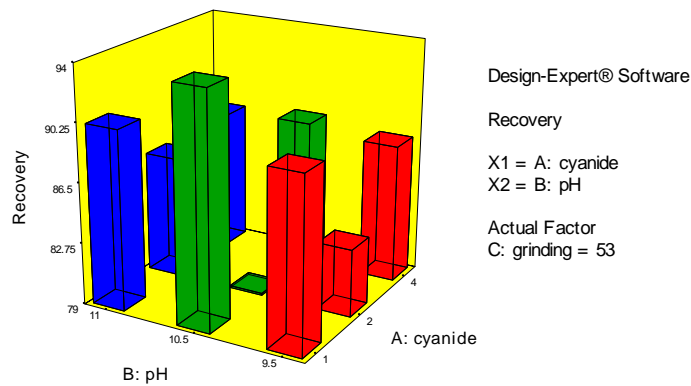
در شکل ۶-۱۲ می توان نمودارهایی را مشاهده کرد که تاثیر عوامل و سطوحشان را نشان می دهد، در صورتی که خطوط سطوح با هم برخورد کنند ، تاثیر هر کدام بر یکدیگر مشهود خواهد بود ، در حالیکه خطوط به حالت موازی با هم دیده شوند این مطلب را می رساند که سطوح از هم مستقل هستند و هیچگونه رابطه ای با هم ندارند.

خطوط سطوح موجود در نمودار اثر متقابل دانه بندی بر pH در مقدار سیانور ثابت برابر با ۱ کیلوگرم بر تن ، تقریبا به حالت موازی دیده می شوند که سطوح از هم مستقل هستند و هیچگونه رابطه ای با هم ندارند در حالی که خطوط سطوح موجود در نمودار اثر متقابل pH بر مقدار سیانور در دانه بندی ثابت برابر با ۵۳ میکرون با هم برخورد می کنند و دارای تاثیر بر روی هم هستند.

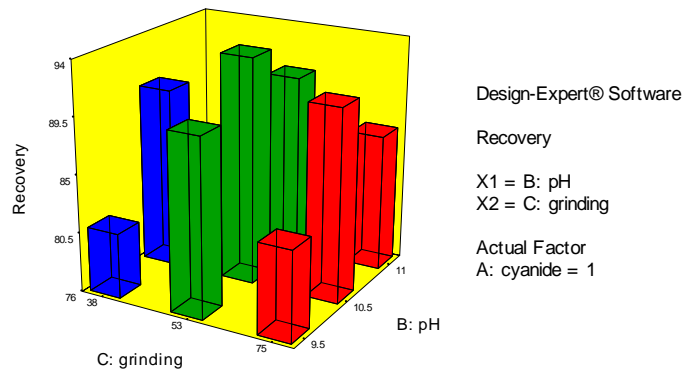


شکل ۶-۱۲- اثرات متقابل سیانید بر مقدار pH در مقدار دانه بندی های ثابت

اشکال ۶-۱۳ و ۶-۱۴ نمایش سه بعدی اثرات عوامل بر بازیابی طلا را نشان می دهند، نتایجی که در بالا اشاره شد در این جا هم بخوبی قابل مشاهده است، بدون در نظر گرفتن خطاهای تصادفی ، در سطح ۱۰/۵ عامل pH، در سطح ۱ گرم بر تن عامل سیانور و سطح ۵۳ میکرون عامل دانه بندی، بازیابی قابل قبول تر بنظر می رسد که در مرحله بعد به بهینه سازی شرایط پرداخته شده است.



شکل ۶-۱۳- نمایش نمودار با ۳ محور pH، سیانید (گرم بر تن) و بازیابی (٪).



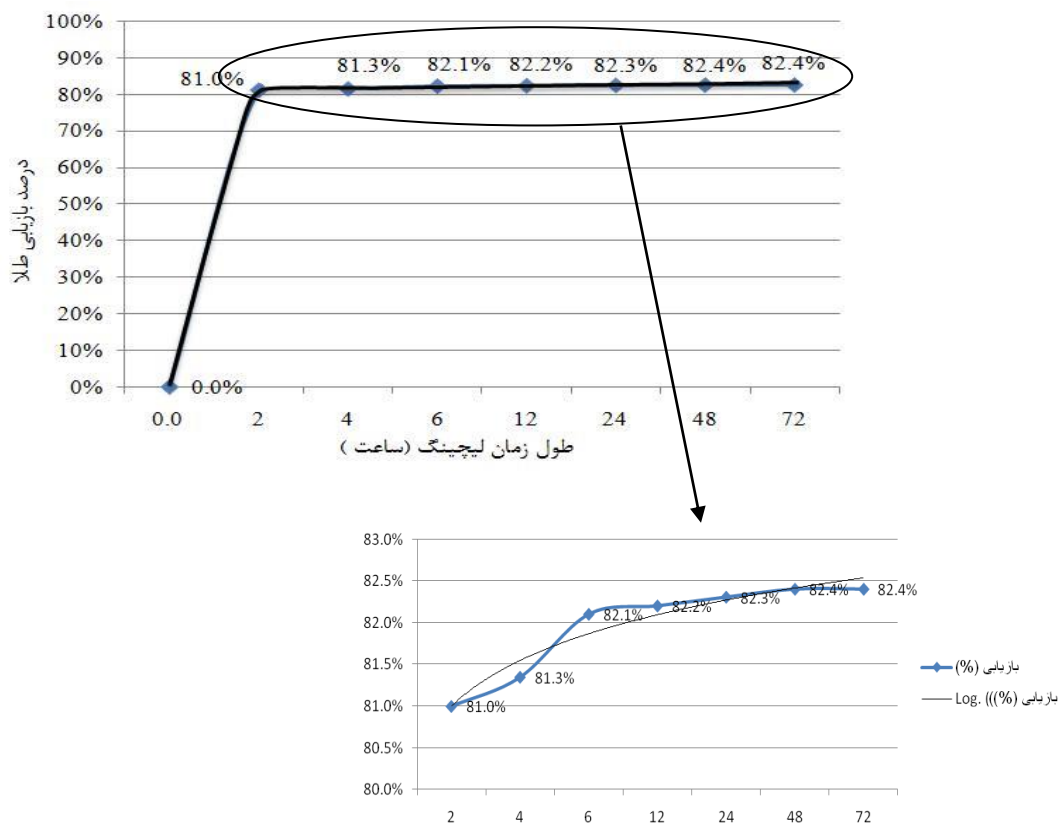
شکل ۶-۱۴- نمایش نمودار با ۳ محور pH، دانه بندی(میکرون) و بازیابی (٪).

۶-۷ بررسی زمان سیانیداسیون

تعیین زمان سیانوراسیون مهمترین آزمایش سیانوراسیون می باشد. در این آزمایش که از مقدار بیشتری پالپ جامد یعنی همان ماده معدنی معادل با ۲۵۰۰ گرم با همان نسبت وزنی جامد به آب، تهیه شد. در این آزمایشها در زمان ۲،۴،۶،۱۲،۲۴،۴۸،۷۲ ساعت هم زنی از پالپ نمونه برداری شد (Deschenes and Fulton, 2002)، مقدار pH پالپ بطور مداوم هر نیم ساعت اندازه گیری می شد با پایین آمدن pH جهت تنظیم از آهک استفاده می شد. در ساعتهای اعلام شده از پالپ به مقدار ۶۰ میلی لیتر پالپ برداشته می شد که پس از فیلتراسیون حدود ۴۰ میلی لیتر محلول بدست می آید. ۱۰ میلی لیتر از محلول فیلتر شده برای اندازه گیری یون سیانور آزاد استفاده شد و به روش تیتراسیون میزان سیانور آزاد تعیین شد. همچنین از محلول بدست آمده برای اندازه گیری میزان طلای انحلال یافته استفاده شد و مقدار طلا موجود در محلول و مقدار طلای باقی مانده در جامد اندازه گیری شد. بعد از ۷۲ ساعت از شروع آزمایش، همزدن پالپ متوقف شد و پالپ حاصل فیلتر شده کیک بدست آمد. چندین بار توسط آب ولرم شسته شد تا طلای محلول کاملاً از جامد خارج شود. سپس کیک حاصل خشک شده و تعیین عیار شد و طلای محلول که در ساعتهای مختلف برداشته شده بود نیز تعیین عیار گردید. مطابق بر نتایج آمده در جدول ۶-۶ با افزایش زمان همزدن تا ۴۸ ساعت نرخ انحلال طلا افزایش می یابد.

جدول ۶-۶- بررسی زمان سیانوراسیون در نمونه شماره HG25 با دانه بندی ثابت ۵۳ میکرون

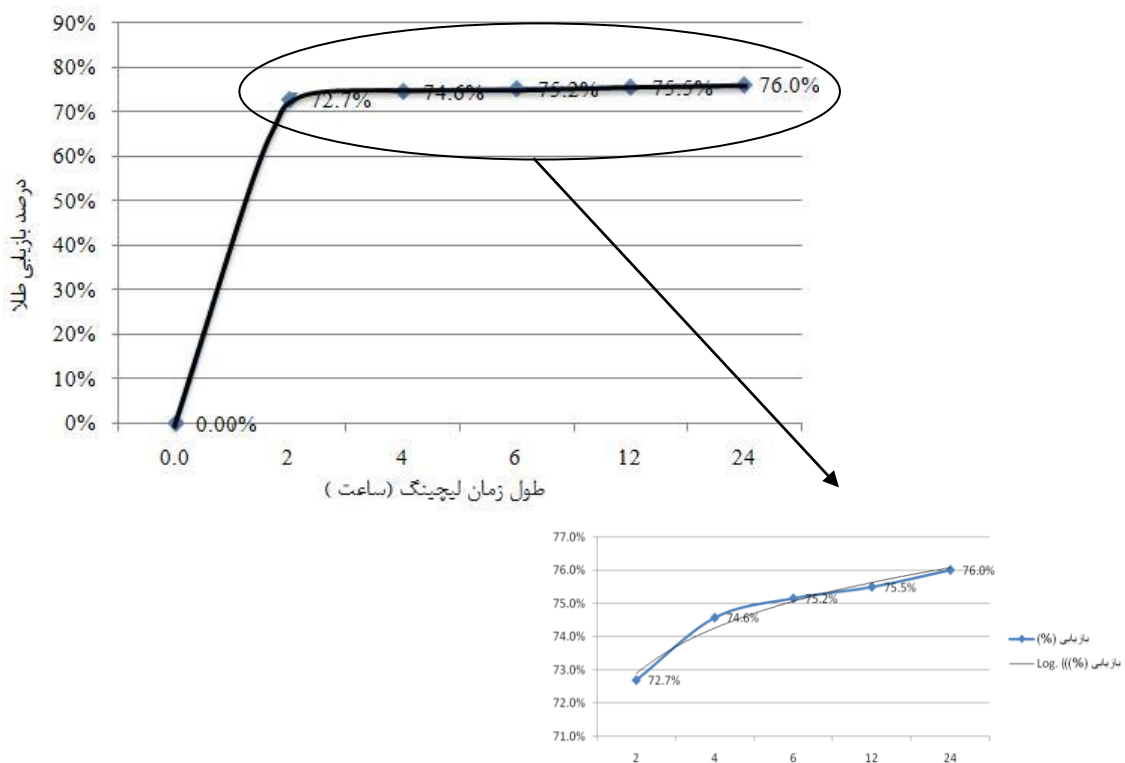
بازیابی (%)	عیار طلای محلول ppb	عیار طلای جامد باقی مانده ppb	سیانور آزاد ppm	pH نهایی	pH اولیه	آهک gr	سیانور سدیم ppm	زمان (ساعت)	
81.0%	1130	490	670	10.5	8.4	2.4	1500	2	A
81.3%	1160	540	550				---	4	B
82.1%	1140	500	460				---	6	C
82.2%	1170	510	450				220	12	D
82.3%	1260	550	460				270	24	E
82.4%	1030	480	510				---	48	G
82.4%	1090	500	470				---	72	H



شکل ۶-۱۵- منحنی نرخ بازیابی طلا بر حسب درصد بر روی محور زمان بر حسب ساعت در نمونه HG25

جدول ۶-۷- بررسی زمان سیانوراسیون در نمونه شماره HG26 با دانه بندی ثابت ۵۳ میکرون

بازیابی (%)	عیار طلائی محلول ppb	عیار طلائی جامد باقی مانده ppb	سیانور آزاد ppm	pH نهایی	pH اولیه	آهک gr	سیانور سدیم ppm	زمان (ساعت)	
72.7%	1010	770	590	9.5	8.7	2/4	1500	2	A
74.6%	1040	720	450				---	4	B
75.2%	1080	725	460				---	6	C
75.5%	1100	725	460				200	12	D
76.0%	1120	720	410				---	24	E



شکل ۶-۱۶- منحنی نرخ بازیابی طلا بر حسب درصد بر روی محور زمان بر حسب ساعت در نمونه HG26

۸-۶ بررسی سرعت هم زدن

با در نظر گرفتن این مطلب که با بیشتر شدن سرعت هم زنی برخورد ذرات ماده معدنی در پالپ با مقدار سیانور موجود در پالپ بیشتر شده و تشکیل کمپلکس می بایست بهتر صورت پذیرد، همچنین سطح بیشتری از ذرات در تماس با اکسیژن هوا قرار خواهند گرفت، در نتیجه سرعت هم زنی اثر مثبتی بر فرایند خواهد داشت در صورتی که در تست انجام شده شماره نمونه HG26 که هم بمنظور بررسی زمان سیانوراسیون طراحی شده بود و هم اینکه با بالا بردن سرعت هم زنی از ۶۵۰ RPM تا ۸۰۰ RPM درصد بهتر شدن بازیابی طلا بودیم، بعلت پخش پالپ به فضای بیرون از ظرف نتیجه مطلوبی حاصل نشد و ادامه تست بیش از ۲۴ ساعت بی فایده بود.

فصل هفتم

بهبود سازی شرایط

لیچینگ سیانیدی

۱-۷ مقدمه

آزمایشات بهینه سازی با هدف بهینه سازی عوامل موثر بر بازیابی طلا و تعیین بازه های مطلوب تر در تعداد ۶ آزمایش در قالب طراحی Historical data انجام شد. با توجه به نتایجی که از آزمایشهای قبلی به روش فاکتوریل کامل بدست آمد این بازه ها مطابق جدول ۱-۷ جهت یافتن بهترین شرایط بازیابی طلا طراحی شدند.

جدول ۱-۷- تعداد عوامل و سطوح مورد بررسی

نشانه	نام عوامل	واحد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
A	غلظت سیانور	کیلوگرم بر تن	۱	۱/۵	۲
B	pH	-	۱۰	۱۰/۲	۱۰/۵

همه عوامل بصورت کمی بوده و در ۳ سطح تغییر کرده است، بدین ترتیب توسط Historical data ، ۶ تست طراحی شد که جهت حذف خطاهای ناشناخته، آزمایشات با ترتیب تصادفی انجام شدند، جدول ۲-۷ شرایط آزمایشی و پاسخها را در طراحی انجام شده، نشان می دهد.

جدول ۷-۲- تعداد تست های طراحی شده به روش پاسخ سطح با ۲ عامل و تغییر هر عامل در ۳ سطح و بازیابی طلا به عنوان

پاسخ بر حسب درصد

std	Run	Block 1	Factor A (cyanide gr/ton)	FactorB (pH)	Response Recovery%
1	1	Block 1	1	10	86
2	2	Block 1	1.5	10.25	89
3	3	Block 1	2	10	87
4	4	Block 1	1	10.5	87
5	5	Block 1	1.5	10.25	89
6	6	Block 1	2	10.5	92

از نظر آماری فقط اثر عوامل اصلی و تقابلهای دوعاملی آنها برای آزمایشگر دارای اهمیت و قابل تفسیر می

باشند. بدین ترتیب اگر عوامل اصلی و تقابلهای دوعاملی آنها با یکدیگر اختلاط و اتحاد داشته باشند. آزمایشگر

در تفسیر دچار مشکل خواهد شد و اصطلاحاً حالت ابهام، در تفسیر آزمایشها بوجود خواهد آمد.

جدول ۷-۳- نتیجه انواع مدل های برازش شده بر روی داده ها و نتیجه انتخاب بهترین مدل پیشنهادی

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	Result
Mean vs Total	46693.082	1	46693.082			
Linear vs Mean	19.220	2	9.610	5.600	0.097	
2FI vs Linear	4.410	1	4.410	11.946	0.0745	Suggested
Quadratic vs 2FI	0.333	1	0.333	0.823	0.5309	Aliased
Cubic vs Quadratic	0.000	0				Aliased
Residual	0.405	1	0.405			
Total	46717.450	6	7786.242			

با توجه به مدل‌های برازش شده، مدل 2FI پیشنهاد می‌شود.

Final Equation in Terms of Coded Factors:

$$\text{Recovery} = +88.22 + 1.55 \times A + 1.55 \times B + 1.05 \times A \times B$$

Final Equation in Terms of Actual Factors:

$$\text{Recovery} = +149.166 - 83.00 \times \text{Cyanide} - 6.4 \times \text{pH} + 8.4 \times \text{Cyanide} \times \text{pH}$$

۲-۷ مطالعه و تفسیر داده‌های پاسخ (درصد بازیابی)

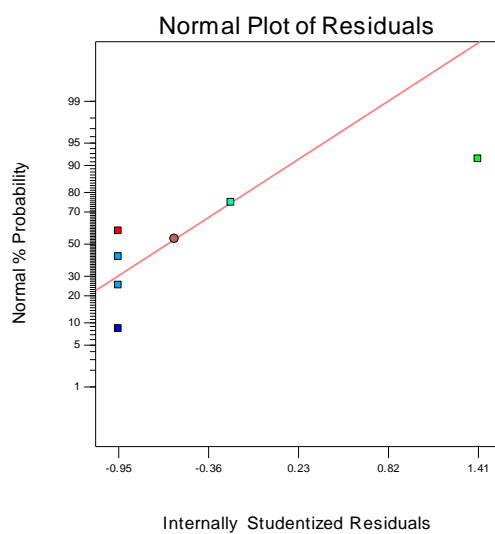
همانطور که قبلاً گفته شد، در این سری از تست‌ها، ۲ عامل اصلی تعیین غلظت سیانور مصرفی، تعیین pH برای آنها یک پاسخ که همان درصد بازیابی طلا می‌باشد در نظر گرفته شده است که در این بخش تفسیر داده‌های پاسخ درصد بازیابی مد نظر می‌باشد.

۱-۲-۷ برازش مدل بر روی داده‌های پاسخ (درصد بازیابی)

برای بررسی رفتار عوامل بر روی پاسخ احتیاج به برازش مدل بر پاسخ آزمایشات می‌باشد. همانطور که قبلاً نیز گفته شد، مدل در واقع یک معادله ریاضی است که برای پیش‌بینی پاسخ بکار می‌رود. در تشکیل مدل اکثراً از عوامل و تقابلهایی استفاده می‌شود که از نظر آماری دارای اهمیت باشند (شکل ۱-۷).

جدول ۷-۴- اثر عوامل و تقابلهای آماری استفاده شده

Alias Matrix	
[Est. Terms]	Aliased Terms
[Intercept] =	Intercept
[A] =	A
[B] =	B
[AB] =	AB
[A2]=	A2+ B2



شکل ۷-۱ منحنی توزیع نرمال مانده ها مربوط به پاسخ(بازیابی طلا /)

۷-۲-۲ آنالیز واریانس پاسخ

در آنالیز واریانس هدف شناسایی عوامل موثر و همچنین ترتیب آنها از نظر اهمیت در پاسخ آزمایشها با یک سلسله عملیات ریاضی است. جدول ادامه آنالیز واریانس مربوط به پاسخ اول (درصد بازیابی) را نشان می دهد.

جدول ۷-۵- آنالیز واریانس

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	23.630	3	7.87667	21.33634	0.0451
A-cyanide	9.610	1	9.610	26.03160	0.0363
B-pH	9.610	1	9.610	26.03160	0.0363
AB	4.410	1	4.41	11.94582	0.0745
Residual	0.73833	2	0.36917		
Lack of Fit	0.33333	1	0.33333	0.82305	0.5309
Pure Error	0.40500	1	0.40500		
Cor Total	24.36833	5			

ملاحظه می شود که مدل برازش شده از نظر آماری معنی دار است و فقط ۴/۵ درصد احتمال وجود دارد که F-value بزرگتری براساس تاثیر اغتشاشات بوجود آید و همچنین به ترتیب عوامل اثرات اثر متقابل مصرف سیانید (A) و pH (B)، اثر متقابل مصرف سیانید بر حسب pH (AB) .

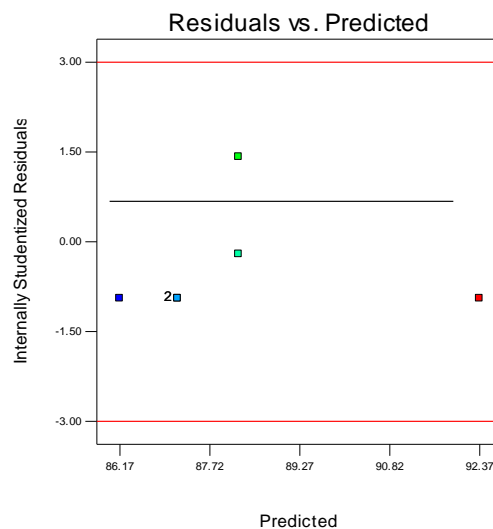
ارزش "Prob > F" کمتر از ۰/۰۵ نشان می دهد ترم های مدل مطلوب هستند. در این مورد A و B ترم های مطلوب مدل اند. ارزش های بیش از ۰/۱ نشان می دهد که ترم های مدل مطلوب نیستند Lack of Fit

"p-value" برابر با ۰/۵۳ نشان می دهد که خطای خالص بارز نیست ، وجود دارد ۵۳/۹ درصد از Lack of Fit F-value" زیاد است و می تواند به نويز ربط داشته باشد. نبود برازش مطلوب نیست.

۷-۲-۳ آنالیز خطاهای پاسخ (درصد بازیابی طلا)

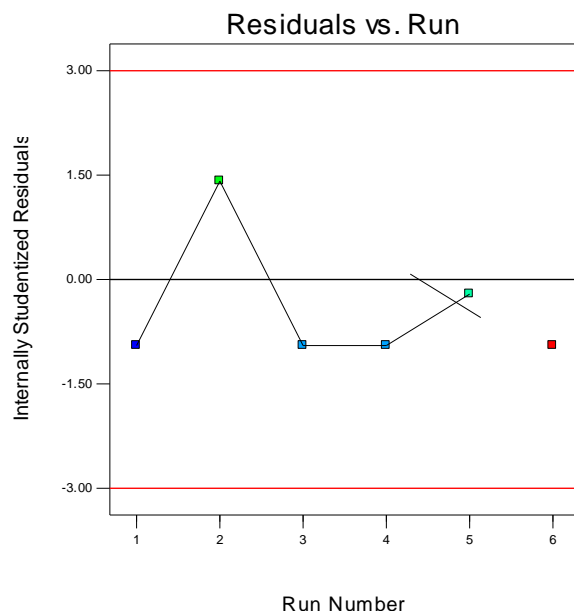
به منظور بررسی توانایی مدل برازش شده بر آزمایشها و چگونگی عملکرد آن و همچنین نحوه انجام آزمایشها بهتر است که آنالیز خطاها صورت پذیرد که به آنالیز خطاها در ادامه پرداخته شده است.

شکل ۷-۲ وضعیت مانده ها را با توجه به مقادیر پیش بینی شده پاسخ (درصد بازیابی) توسط مدل نشان می دهد. آنچه که انتظار می رود این است که مانده ها نسبت به مقادیر پیش بینی شده پاسخ توسط مدل وابسته نباشند و از الگوی خاص پیروی نکنند و به صورت پراکنده و تصادفی توزیع شده باشند که نمودار بالا این مورد را تاکید می کند .



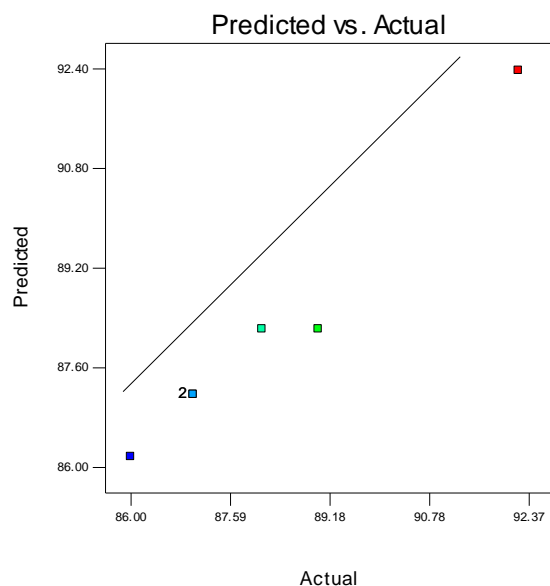
شکل ۷-۲- نمودار تغییرات مانده ها در مقابل مقادیر پیش بینی شده پاسخ (درصد بازیابی) توسط مدل

در شکل ۳-۷ به بررسی وجود الگوی احتمالی مقادیر مانده ها با توجه به توالی انجام آزمایشها پرداخته شده است. همانطور که نمودار نیز مشاهده می شود مقادیر مانده ها به صورت تصادفی پراکنده شده اند که به مفهوم مستقل بودن مانده ها نسبت به توالی انجام آزمایشها است، که مطلوب می باشد



شکل ۳-۷- نمودار تغییرات مانده ها در مقابل توالی انجام آزمایشها مربوط به پاسخ (درصد بازیابی)

شکل ۴-۷ برای بررسی توانایی مدل در پیش بینی مقادیر واقعی پاسخ (درصد بازیابی) بکار می رود. از آنجایی که مقادیر واقعی و پیش بینی پاسخ (درصد بازیابی) توسط مدل، به هم نزدیک بوده اند، نقاط در شکل، تقریباً در یک خط ۴۵ درجه قرار گرفته اند که اعتماد ما را نسبت به کیفیت مدل برازش شده بیشتر می کند.

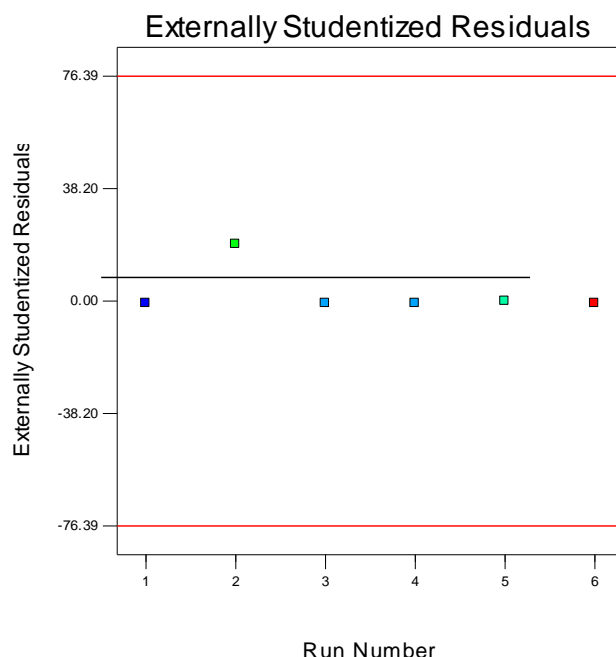


شکل ۷-۴- نمودار مقادیر واقعی پاسخ (درصد بازیابی) نسبت به مقادیر پیش بینی شده آن توسط مدل

شکل ۷-۵ نمودار Externally Studentized Residuals را نشان می دهد که برای بررسی و شناسایی مقادیر خارج از رده بکار می رود. انجام محاسبات مربوط به این نمودار بدین صورت می باشد که به ترتیب، داده های مربوط به یک آزمایش را بیرون از محاسبات نگه می دارند و سپس توسط بقیه داده ها، پاسخ را توسط مدل محاسبه می کنند. بدین ترتیب پاسخ محاسبه شده توسط مدل و پاسخ واقعی اندازه گیری شده که بیرون از محاسبات نگه داشته شده بود، با یکدیگر مقایسه شده و مانده محاسبه می شود. حال اگر مانده محاسبه شده مربوط به آن آزمایش از خطوط حدی مشخص شده (خطوط قرمز بالا و پایین) که توسط آزمون t - مشخص می شود تجاوز کند پاسخ اندازه گیری شده مربوط به آن آزمایش از نظر آماری به عنوان خارج از رده شناخته

می شود. در شکل ۷-۵ هیچ کدام از مانده ها از حدود مشخص شده تجاوز نکرده اند بنابراین هیچ یک از پاسخهای (درصد بازیابی) اندازه گیری شده خارج از رده نمی باشند.

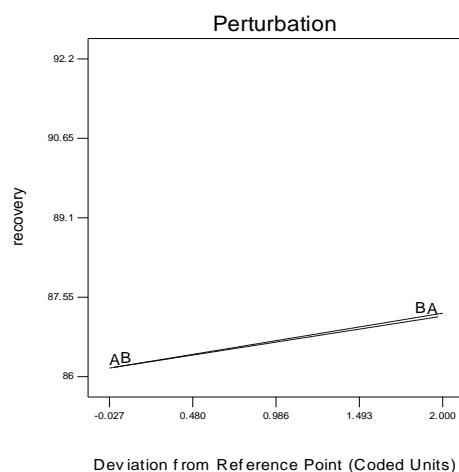
شکل ۷-۵- نمودار Externally Studentized Residuals برای بررسی مقادیر خارج از رده مربوط به پاسخ (درصد بازیابی)



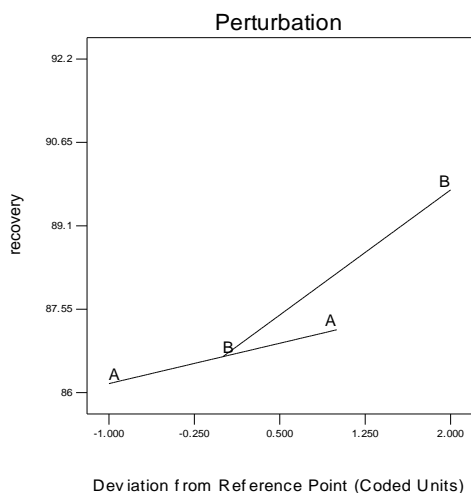
۷-۲-۴ بررسی نتایج پاسخ (درصد بازیابی)

با توجه به حصول اطمینان از برازش مناسب مدل و همچنین توزیع مناسب مانده ها، به بررسی نتایج حاصله از آزمایشهای مربوط به پاسخ (درصد بازیابی) پرداخته شده است. شکل ۷-۶ نمودار حساسیت عوامل نسبت به پاسخ (درصد بازیابی) را نشان می دهد. در تمامی اشکال ۷-۶ تا ۷-۱۲ نمودارهای تحلیل حساسیت که در شرایط مختلف مقدار سیانید و pH رسم شده بود در تمامی این نمودارها حالت زاویه دار نسبت به حالت افق نشاندهنده تاثیر گذاری دو عامل مقدار سیانید و pH بر بازیابی طلا (٪) است. برای مثال در شکل ۷-۶ این نمودار به حالت افقی دیده می شود که می توان به این نتیجه رسید که در شرایط سیانید = ۱ کیلوگرم

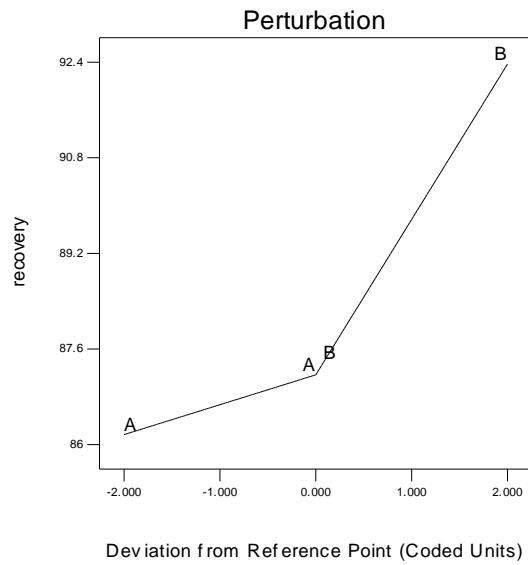
بر تن و pH=10 تاثیر این دو عامل بر روی بازیابی مطلوب نبوده است حال آنکه در شکل ۷-۱۰ خطوط موجود با زاویه بیش از ۴۵ درجه نسبت به افق قرار گرفته اند، شرایط حاکم مقدار سیانید برابر با ۲ گیلوگرم بر تن و pH=10.25 بوده است، نمودار های دیگر شرایط آزمایش ها را و تاثیر عوامل را با زاویه قرارگیری نسبت به افق می توان تعیین کرد.



شکل ۷-۶- نمودار تحلیل حساسیت در شرایط مقدار سیانید برابر با ۱ کیلوگرم بر تن و pH برابر با ۱۰

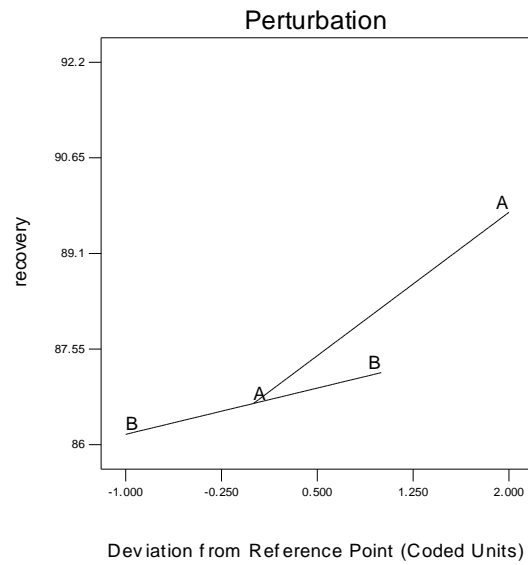


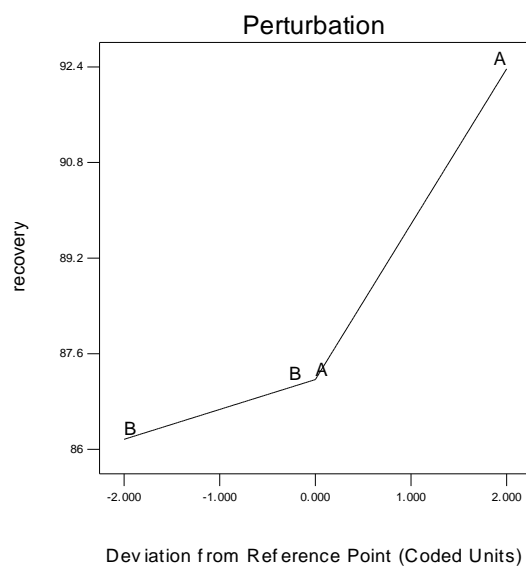
شکل ۷-۷- نمودار تحلیل حساسیت در شرایط مقدار سیانید برابر با ۱,۵ کیلوگرم بر تن و pH برابر با ۱۰



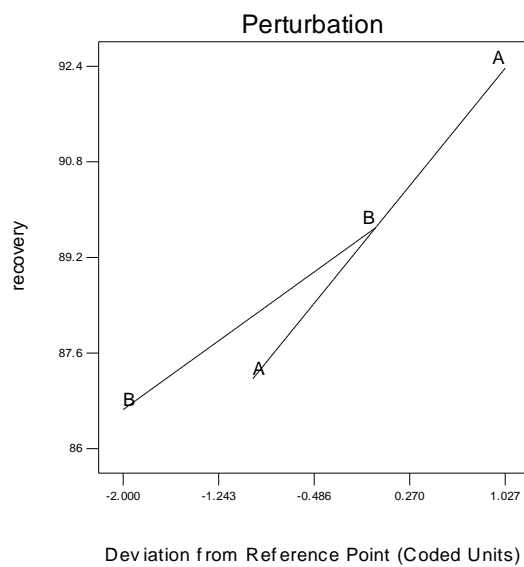
شکل ۷-۸- نمودار تحلیل حساسیت در شرایط مقدار سیانید برابر با ۲ کیلوگرم بر تن و pH برابر با ۱۰

شکل ۷-۱۰- نمودار تحلیل حساسیت در شرایط مقدار سیانید برابر با 2 کیلوگرم بر تن و pH برابر با 10.25





شکل ۷-۱۱- نمودار تحلیل حساسیت در شرایط مقدار سیانید برابر با 1 کیلوگرم بر تن و pH برابر با 10.50

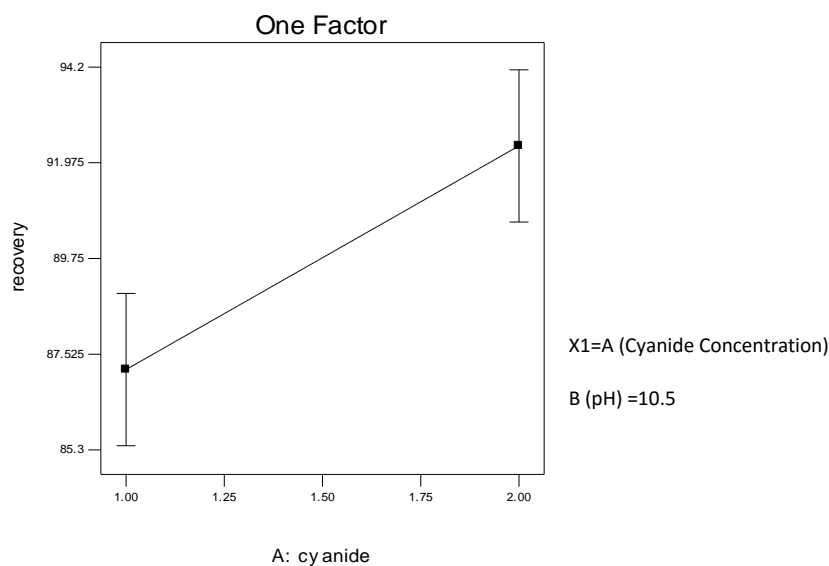


شکل ۷-۱۲- نمودار تحلیل حساسیت در شرایط مقدار سیانید برابر با 1.5 و pH برابر با 10.50

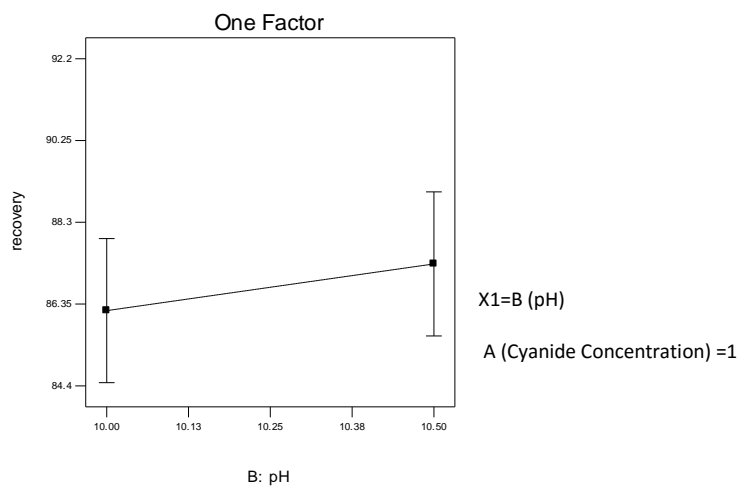
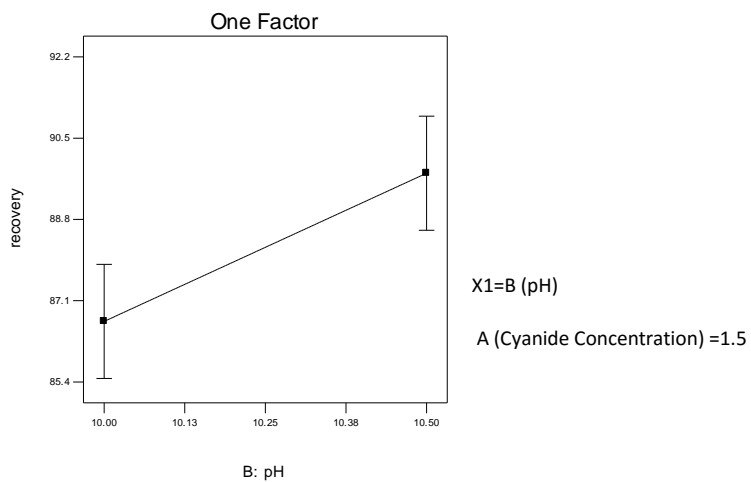
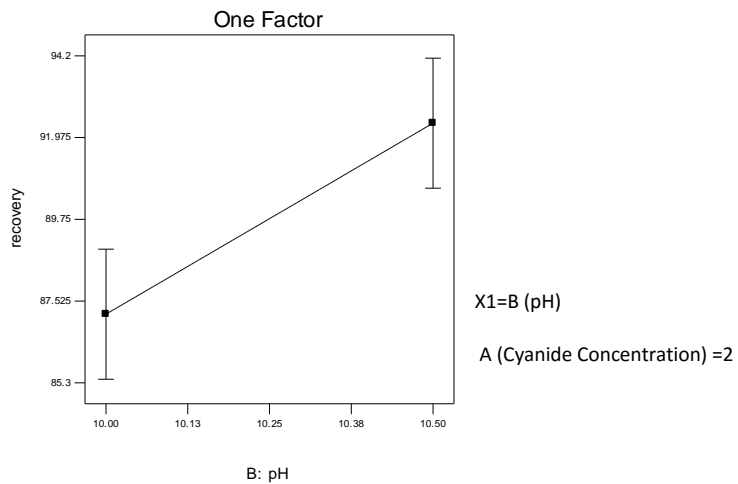
بررسی تاثیر عوامل بر پاسخ

در نمودار هایی که خطوط عمودی ابتدا و انتها با هم همپوشانی دارند عامل مورد بررسی از لحاظ تاثیر گذاری دارای اهمیت چندانی نخواهد بود ، همانطور که در اشکال ۷-۱۳ تا ۷-۱۴ دیده می شود، به جزء حالتی که تغییرات pH را در غلظت سیانور مصرفی ۱ کیلوگرم بر تن است نشان می دهد ، تاثیر گذاری عوامل pH و غلظت سیانور بر پاسخ که همان بازیابی طلا است به وضوح دیده می شود.

در ضمن با افزایش مقدار سیانور از ۱ تا ۲ گرم بر تن و افزایش pH از ۱۰ تا ۱۰٫۵، بازیابی طلا افزایش می یابد.

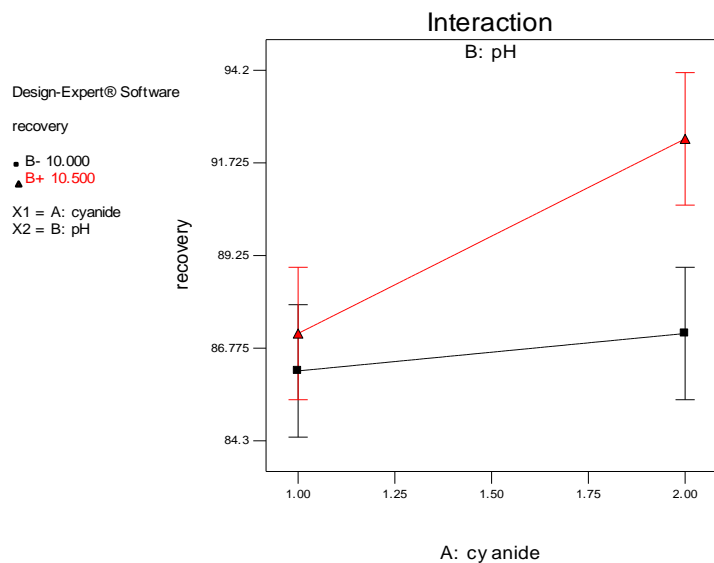


شکل ۷-۱۳ - نمودار تاثیر عامل سیانید بر بازیابی طلا در pH های مختلف و دانه بندی ثابت ۵۳ μ



شکل ۷-۱۴ - نمودار تاثیر عامل pH بر بازیابی طلا در مقدار سیانید های مختلف و دانه بندی ثابت ۵۳ μ

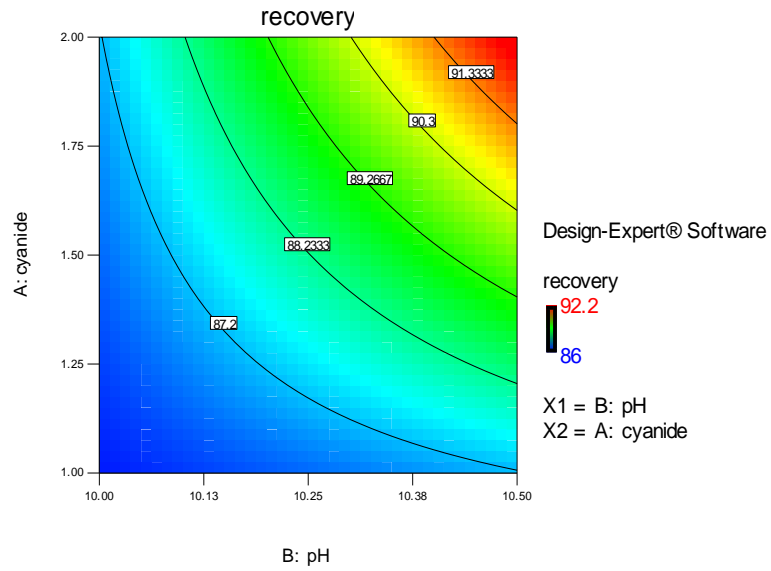
دو عامل غلظت مصرفی سیانور و pH همانطور که در شکل ۷-۱۵ قابل مشاهده است تاثیر متقابلی (اندرکنش) بر روی یکدیگر دارند. بازیابی در pH بالاتر ۱۰/۵ و غلظت مصرفی سیانور برابر با ۲ کیلوگرم دیده



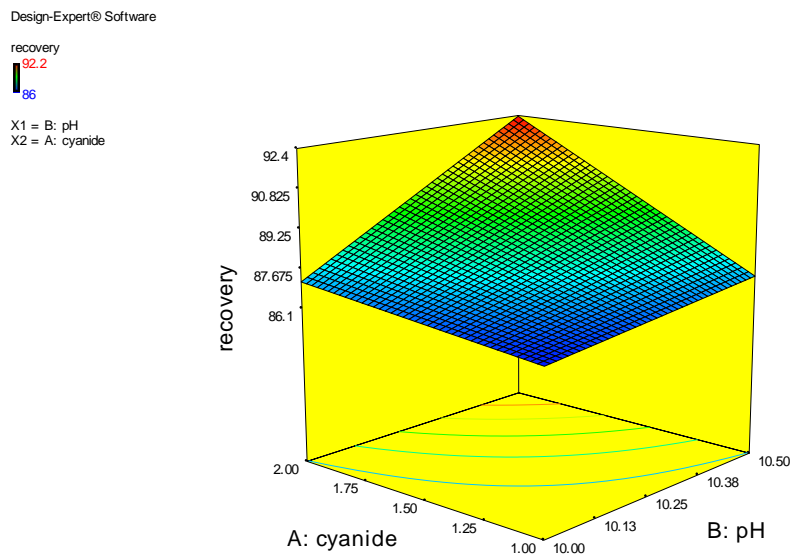
می شود.

شکل ۷-۱۵- نمودار تاثیر متقابل ۲ عامل سیانید و pH بر بازیابی طلا

همانطور که در اشکال ۷-۱۶ و ۷-۱۷ که نمودار ۲ بعدی و ۳ بعدی تغییرات pH و مقدار سیانید بر بازیابی طلا می باشد، نتیجه بالاتر بودن بازیابی طلا (%) در pH برابر ۱۰,۵ و مقدار سیانید برابر با ۲ کیلوگرم بر تن می باشد.



شکل ۷-۱۶ - نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) تاثیر عوامل سیانید و pH بر بازیابی طلا



شکل ۷-۱۷ - نمودار سه بعدی تاثیر عوامل سیانید و pH بر بازیابی طلا

فصل هشتم

نتیجه گیری

و ارائه پیشنهادات

نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات

در این تحقیق سعی شده است تا قابلیت بازیابی طلا توسط روش لیچینگ سیانیدی مطالعه شود . از آنجایی که هدف از مطالعه شناخت بهتر فرایند و عوامل موثر بر آن و همچنین امکان بهینه سازی فرایند بود، لذا برای رسیدن به این اهداف طراحی آزمایشها ،توسط روشهای طراحی آماری آزمایشها صورت گرفت که در ادامه به برخی از نتایجی که از انجام تحقیق حاصل شد پرداخته شده است:

از مطالعات انجام شده بر روی کانسنگ سیلیسی -کربناتی طلای هیرد نتایج زیر را حاصل شد:

۸-۱- مطالعات کانی شناسی مقاطع صیقلی و نازک تهیه شده از نمونه ها حاکی از پوشیده شدن سطح از اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن است و آلتزه شدن کانیهای سولفیدی به اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن به وضوح دیده می شود .چنانچه می توان ذرات طلا را همراه با پیریت هایی دانست که در سطح زمین هوازده شده و تبدیل به اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن شده اند طلا بصورت میکرونی در خلل و فرج کانسنگ در اثر اکسیداسیون پیریت آزاد شده است که در فرایند لیچینگ سیانیدی این خلل و فرج فضای مناسبی جهت عبور سیانور و انحلال طلا هستند، زمینه سنگ نیز از کانیهای کربناته از جمله کلسیت تشکیل شده است (نتایج مطالعات XRD) ،نتایج مطالعات کانی شناسی انجام شده توسط سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور نیز با نتایج حاصله مطابقت دارد.نتیجه این مطالعات نشان می دهد که عناصر مزاحم زیادی نمی تواند در فرایند روش انتخابی لیچینگ سیانیدی دیده شود.

۸-۲- با وجود حضور کانیهای رسی در مطالعات مجدد XRD انجام شده و خاصیت چسبندگی ایجاد شده در زمان خردایش بر دیواره های آسیای گلوله ای، این احتمال می رفت که این کانی به شکل عنصر مزاحم عنصر مزاحم و خوردنده شدید سیانور^{۱۱} و همچنین بر روی قابلیت لیچینگ طلا با پوشاندن کانی های مختلف و همچنین سطوح طلا در طی خردایش و فرایندهای مخلوط کردن (که اثر خود را به صورت پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و الکتروشیمیایی سطح کانی ها و طلا نشان می دهد) عمل کند به مانند کانسنگ کارلین در آمریکا و در بازیابی تاثیر گذار باشد (Harris, 1992) ولی با انتخاب درصد جامد برابر با ۳۳/۳٪ (نسبت وزنی آب به جامد = ۲) و بالابردن سرعت همزنی و با رسیدن به بازه ۱-۲ کیلوگرم بر تن مصرف سیانور با بازیابی طلای بالاتر از رنج مصرف سیانور ۲-۴ گرم بر تن، نتیجه این شد که این کانی نقش مزاحمی که قابل تدبیر باشد در فرایند لیچینگ ایجاد نکرد.

۸-۳- با توجه به اینکه روش لیچینگ سیانیدی به عنوان موثرترین روش صنعتی جهت انحلال طلا بکار می رود. در این روش عوامل متعددی تاثیر گذار و قابل کنترل و عوامل دیگری تاثیر گذار و غیر قابل کنترل هستند. با شناسایی این عوامل و انتخاب ۳ عامل تاثیر گذار و قابل کنترل، آزمایشهای لیچینگ با روش فاکتوریل کامل طراحی شد این عوامل از جمله مقدار سیانور مصرفی جهت انحلال طلا، pH و دانه بندی بودند که در ۳ سطح بررسی شدند.

۸-۴- بعد از حصول اطمینان از برازش مناسب مدل و توزیع مناسب خطا، نتایج حاصل نشان داد که از میان ۳ عاملی که مورد بررسی قرار گرفت عامل pH (B) بیشترین اهمیت را در بازیابی طلا داشت.

^{۱۱} Preg-robbing complex ore

۸-۵- همانطور که انتظار می رفت عناصر مزاحم سولفوری با توجه به مطالعات کانی شناسی با جایگزین شدن توسط اکسیدها و هیدروکسید آهن، روش لیچینگ سیانیدی و انحلال را با مشکلی جدی مواجه نکرده اند و روش فرآوری به روش لیچینگ سیانیدی قادر به بازیابی طلا با درصد تقریباً برابر با ۹۲/۲ درصد بوده است.

۸-۶- طراحی و تحلیل آزمایشها به دلیل کاستن ریسک کار در دو مرحله و توسط روشهای آماری آزمایشها و به کمک نرم افزار Design Expert صورت پذیرفت. در مرحله اول با هدف شناخت عوامل موثر و فهم بیشتر رابطه بین آنها با انجام تعداد آزمایشهای کامل، جهت شناخت کامل بدون حذف اثر یک عامل از روش فاکتوریل کامل بهره گرفته شد. در این سری از آزمایشات، سه عامل مقدار سیانور مصرفی جهت انحلال طلا، pH و دانه بندی انتخاب و درصد بازیابی طلا به عنوان پاسخ آزمایشات در نظر گرفته شد. در بررسی نتایج حاصل از آزمایشها، در پاسخ آزمایشات (درصد بازیابی) مدل 2FI بر آزمایشها برآزش شد و همچنین عملیات تحلیل خطاها نیز صورت پذیرفت. به ترتیب اثرات زیر، از نظر آماری در پاسخ آزمایشها (درصد بازیابی) معنی دار و با اهمیت بودند.

ابتدا اثر اصلی مقدار pH (B) که در بازیابی طلا رفته رفته از عدد ۹/۵ تا ۱۰/۵ با افزایش pH اثر افزایشی و از ۱۰/۵ تا ۱۱ با افزایش pH روند کاهشی داشته است. سپس اثر متقابل pH بر حسب دانه بندی (BC) بود که در سطح میانی هر دو عامل pH و دانه بندی بیشترین بازیابی طلا (۹۳/۷ درصد) دیده شد، بعد از آن اثر متقابل مصرف سیانید بر حسب دانه بندی (AC) که در سطح میانی دانه بندی و سطح پایینی مقدار سیانور مصرفی بیشترین بازیابی (۹۳/۷ درصد) دیده شد، بعد از آن اثر متقابل مصرف سیانید بر

حسب pH (AB) بود که در سطح میانی pH و سطح پایینی مقدار سیانور مصرفی بیشترین بازیابی (۹۳/۷ درصد) دیده شد، بعد از آن اثر اصلی دانه بندی (C) در بازیابی طلا رفته رفته از عدد ۷۵ تا ۵۳ میکرون با کاهش دانه بندی اثر افزایشی در بازیابی طلا داشته و از ۵۳ تا ۳۸ میکرون با کاهش دانه بندی روند کاهشی داشته است، آخرین عامل مقدار مصرفی سیانور (A) بوده است که رفته رفته از مقدار ۱ کیلوگرم بر تن تا ۲ با افزایش مصرف سیانور اثر کاهش در بازیابی طلا داشته ولی با افزایش در مقدار مصرف سیانور از ۲ تا ۴ کیلوگرم بر تن روند افزایش در بازیابی طلا دیده شد.

۸-۷- با توجه به تحلیل ها و بررسی هایی که در مرحله اول آزمایشها انجام شد، شناخت نسبتا خوبی نسبت به عوامل موثر و اثرات متقابل آنها در درصد بازیابی بدست آمد که مقدمات لازم را برای مطالعات بیشتر و بهینه سازی درصد بازیابی توسط روشهای پاسخ سطح را فراهم کرد. بدین ترتیب به صورت کلی، عامل دانه بندی چون در تمام بررسی ها، سطوح میانی آن برای آزمایشها مفید بود و از طرفی اعمال تغییرات در آن برای رسیدن به هدف در مرحله بعد نیز (بهینه سازی)، از اهمیت چندانی برخوردار نبود لذا در سطح متوسط خود (۵۳ میکرون) به صورت ثابت در نظر گرفته شد (با خردایش بیشتر ذرات کانسنگ طلای حاوی کانی های رسی، خاصیت پوشاندگی کانی های رسی بر روی سطوح ذرات طلا بیشتر خواهد شد) و دو عامل pH و مقدار سیانور مصرفی دوباره در مرحله بعد نیز بعنوان عامل، در سطوح مختلف مورد بررسی قرار گرفتند.

۸-۸- یکی از اهداف اصلی انجام تحقیق بهینه سازی شرایط بازیابی طلا با استفاده از روشهای پاسخ سطح در طراحی آماری آزمایشها بود. بدین ترتیب با توجه به اطلاعات و شناختی که از انجام آزمایشها در مرحله

اول حاصل شد، در این مرحله با هدف بهینه سازی شرایط بازیابی طلا توسط یکی از روشهای پاسخ سطح در طراحی آماری آزمایشها، تعداد ۶ آزمایش در قالب طراحی پاسخ روش و روش Historical data انجام شد.

۸-۹- در آزمایشهای نهایی ۲ عامل pH و مقدار سیانور مصرفی انتخاب و درصد بازیابی به عنوان پاسخ آزمایشها در نظر گرفته شد. برای آزمایشهای پاسخ (درصد بازیابی) مدل 2FI بر آزمایشها برازش شد و همچنین عملیات تحلیل خطاها نیز صورت پذیرفت. در بررسی نتایج حاصل به ترتیب اثرات زیر از نظر آماری در پاسخ آزمایشها (درصد بازیابی) معنی دار و با اهمیت بودند.

به ترتیب اثر متقابل مصرف سیانید (A) که افزایش مقدار سیانور تاثیر مثبت افزایشی بر بازیابی طلا به همراه داشته است و در شرایط مصرفی مقدار سیانور برابر با ۲ کیلوگرم بر تن بازیابی برابر ۹۰ درصد بوده است بعد از آن اثر اصلی عامل pH (B) نیز تاثیر مثبت افزایشی بر بازیابی طلا داشته است و در شرایط مصرفی pH=10.5 بازیابی برابر ۹۰ درصد بوده است، بعد از آن اثر متقابل مصرف سیانید بر حسب pH (AB) بوده است که با افزایش pH و سیانور بازیابی افزایش می یابد.

۸-۱۰- بهینه سازی بدین مفهوم بود که بازه سطوح عوامل در چه مقادیری تنظیم شوند تا پاسخ آزمایشها مطلوبتر شود. مطلوبیت پاسخها در این تحقیق بیشینه کردن درصد بازیابی و کمینه کردن سیانور آزاد بود. بعلاوه آنکه مقدار سیانور آزاد یکی از مراحل کنترلی آزمایشها بود، و همواره تغییرات آن در بازه مطلوب ۵۰۰-۱۰۰۰ ppm بود که این نشاندهنده انحلال مناسب سیانور در پالپ کانسنگ و آب بوده است، در

نتیجه هدف اصلی پی گیری در آزمایشهای طراحی شده ، بالا بودن درصد بازیابی طلا بوده است که نتایج حاکی از آن است که در شرایط دانه بندی برابر با ۵۳ میکرون ، $pH=10.5$ و مقدار سیانور مصرفی برابر با ۲ کیلوگرم بر تن بازیابی برابر ۹۲/۲ درصد بوده است.

۸-۱۱- با انجام مطالعات زمان سیانوراسیون ،سرعت انحلال طلا تقریبا تا حدی مشخص شد،تقریبا بیش از ۸۰٪ انحلال در زمان ۲ ساعت از شروع انحلال صورت می گیرد و تقریبا ۲۴ ساعت زمان برای لیچینگ با توجه به این مطلب که طولانی تر شدن زمان سیانوراسیون انرژی مصرفی بالاتری می خواهد،کافی است.

در نهایت نکات ذیل به عنوان پیشنهاد در تکمیل و بهینه سازی در فرایند فرآوری نمونه های طلای هیرد ارائه می گردد:

بررسیهای سینتیکی و الکتروشیمی لیچینگ سیانیدی کامل تری بر روی نمونه صورت پذیرد.

انجام تست های سیانوراسیون با افزودن موادی که باعث بالارفتن درصد بازیابی و پایین آمدن مصرف سیانور می شوند انجام گیرد مثل فروسیانید ها و.....

تکمیل مطالعات فرآوری هیدرومتالورژیکی نمونه طلای هیرد با استفاده از تیوسولفات یا ترکیبهای مشابه بعنوان جایگزینی غیر آلاینده برای سیانور و بررسی میزان بازیابی طلا.

منابع و ماخذ:

- داگلاس سی. مونتهگومری، ۱۹۴۳ م. طراحی و تحلیل آزمایشها، جلد اول، دکتر رسول نورالنساء، چاپ اول ۱۳۸۶، مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، ص. ۱۰۹ - ۱۹۶.
- عسگری علی، شمس محمد جواد، برنا بهروز، (۱۳۸۶)، گزارش کانی شناسی و مطالعه مقاطع تهیه شده کانسنگ طلای هیرد (تارگت معدنی شماره ۳).
- علیمحمدی معصومه، خاکزاد احمد، زرین کوب محمد حسین، عسگری علی، قربانی محمد علی، (۱۳۸۵) ، پتروگرافی، پترولوژی و پتروژنز توده‌های نفوذی ناحیه معدنی هیرد (جنوب بیرجند)، چهاردهمین همایش انجمن بلورشناسی و کانی شناسی ایران، ص. ۲۱۹-۲۲۷، دانشگاه بیرجند.
- فتوحی بابک، ۱۳۸۳، پایان نامه کارشناسی ارشد، فرآوری کانسنگ اکسید طلای کوه زر، دانشکده معدن، دانشگاه تهران.
- کره ای محمد تقی، (۱۳۸۱)، گزارش اکتشافات ژئوشیمیایی نیمه تفصیلی در محدوده آنومالی ۱/۲۰۰۰۰ هیرد، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- کریم پور محمد حسن، ملک زاده سفارودی آزاده، حیدریان شهری محمدرضا، عسگری علی، (۱۳۸۶) ، کانی شناسی، آلتراسیون و ژئوشیمی منطقه اکتشافی طلا- قلع هیرد، چهاردهمین همایش انجمن بلورشناسی و کانی شناسی ایران، ص. ۲۷۸-۲۸۴، دانشگاه بیرجند.
- کریم پور، محمد حسن و دیگران، ۱۳۸۵، " مطالعات زمین شناسی، ژئوشیمی، پترولوژی و ژئوفیزیک در منطقه کانی سازی طلا-قلع هیرد (خراسان جنوبی)"، مرکز تحقیقات دخیار معدنی شرق ایران، صفحات ۱۱۳-۱۶.

Adams, M.D., (2002) , “ On-site gold refining of cyanide liquors by solvent extraction”, Minerals Engineering 16 , pp 369–373.

Akcil, A., (2002), “First application of cyanidation process in Turkish gold mining and its environmental impacts”, Minerals Engineering 15 , pp 695–699.

Anderson M.J.& Whitcomb P.J.,2000, DOE Simplified :Practical Tools For Effective Experimentation, Productivity Press .

Berezowsky, R. M. G. S. & Weir, D. R.(1989), “ Refractory gold; the role of pressure oxidation”.In :proc.of world gold 1989,AIME, pp.295- 304.

Caruso, S. G., (1975), “ The chemistry of cyanide compounds and their behavior in the aquatic environment”, Carnegie Mellon Inst. Of research .USA.

Green, J.C.A., (1984) , “The optimization of flotation networks”, International Journal of Mineral Processing 13, pp 83–103.

Guzman, L. et al., (1999), “Electrochemistry of conventional gold cyanidation ”, Electrochimica Acta , 44, pp.2625-2632.

Habashi, F., (1987) , “ One hundred years of cyanidation ” , CIM Bulletin 80, pp 108–114.

Harris , L., (1992), “Newmont’s refractory gold ore program”, Randol International,Golden Colorado, pp 465-472 .

Heath J.L, Rumball J.A., Breuer P.L. & Jeffrey M.I, (2008), “Monitoring and minimisation of HCN(g) emissions from a gold plant ”, Minerals Engineering 21 , pp 434–442.

Hedley, N. & Tabachnick, H., (1958), “ Chemistry of cyanidation ”, Mineral dressing notes 23, pp 34-46.

Lima, Andrade , L.R.P. , Hodouin ,(2006) “ Simulation study of the optimal distribution of cyanide in a gold leaching circuit” , Minerals Engineering , pp 1319–1327.

Mardison, J., House, I., (1992), “The Chemistry of Gold Extraction ” , Ellis Horwood , pp 280-307.

Michaelies, H.V., (1993), "Options for treatment of refractory gold ores", Randol International Ltd.

Perry, R., et al., (1999), "Low pH Cyanidation of gold", Mineral Engineering, pp.1431-1440.

Prasad, M.S.R., Mensah-Biney, Pizaro, R.S., (1991), "Modern Trend In Gold Processing", Journal of Mineral Processing, pp 169-181.

Senanayake G., (2005), "Kinetics and reaction mechanism of gold cyanidation :Surface reaction model via Au(I)-OH-CN complexes", Hydrometallurgy 80, pp 1-12.

State-Ease. Inc, 2005, Design Expert Manual.

Tan, H., Feng, D., Luckey, G.C., van Deventer, J.S.J., (2005), "The behavior of carbonaceous matter in cyanide leaching of gold", hydrometallurgy 78.

Ucurum M., Arslan V., Vapur H., Bayat O. & Arslan V, (2006), "Recovery of unburned carbon from lime calcination process using statistical technique", Electrochimica Acta, 44, pp.2850-2861.

Xie, Feng, Dreisinger David, Lu Jianming, (2008), "The novel application of ferricyanide as an oxidant in the cyanidation of gold and silver", Minerals Engineering, pp 1010-1016.

Xie, Feng, Dreisinger David B., (2007), "Leaching of silver sulfide with ferricyanide-cyanide solution", Hydrometallurgy 88, pp 98-108.

Yannopoulos, J.C., (1991), "The Extractive Metallurgy of Gold", Van Nostrand Reinhold, pp 132-154.