نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن"
Iranian Journal of Mining Engineering
(IRJME)

دوره دوم، شماره سوم، سال ۱۳۸٦، صفحه ۳۱ تا ۳۹
Vol. 2, No. 3, 2007, pp.31-39

بهینه‌سازی پارامترهای موثر در فروشویی اسیدی نمونه کانسنگ اورانیوم‌دار خشومی

فرزانه رحمتی[۱]؛ محمد نوع‌پرست[۲]؛ علی‌حسین علاقبند[۳]

۱- دانشگاه تهران
۲- دانشگاه تهران، تلفن:۸۲۰۸۴۲۶۵، پست الکترونیکی:noparast@ut.ac.ir
۳- سازمان انرژی اتمی ایران

(دریافت ۱۰ اردیبهشت ۱۳۸٦ ، پذیرش ۲۸ مهر ۱۳۸٦)

چکیده

فروشویی یکی از مراحل هیدرومتالورژی است که برای استخراج عناصر باارزش از سنگ معدن به صورت محلول مورد استفاده قرار می‌گیرد. معمولاً کانسنگ‌های اورانیوم توسط مواد شیمیایی اسیدی یا قلیایی همانند اسیدسولفوریک یا کربنات سدیم و بی‌کربنات سدیم تحت فروشویی قرار می‌گیرند. در این مقاله نتایج بررسی‌های فروشوئی اسیدی انجام شده بر روی نمونه کانسنگ خشومی ارائه شده است. منطقه خشومی در ۱۵۰ کیلومتری شمال شرقی یزد واقع است. طی مطالعات اولیه ۴۷ آنومالی در آن ارزیابی گردید. آنومالی ۶ با ۵ بلوک به لحاظ پرتوزائی قابل ملاحظه و وجود کانی‌های ثانویه اورانیوم، به‌عنوان مناسب‌ترین آنومالی شناسایی شد. در این مطالعه با انجام آزمایش‌های متعدد بر روی نمونه‌های بلوک ۳، مقادیر بهینه پارامترهای مختلف مانند ابعاد ذرات، غلظت اسید مصرفی (H_2SO_4)، نوع و مصرف اکسیدان، درجه حرارت، زمان و غلظت دوغاب تعیین گردیدند. بهترین مقادیر برای پارامترهای فوق‌الذکر معادل ۶۰۰ میکرون برای ابعاد ذرات (d_{80})، مصرف ۸۰ کیلوگرم اسید به ازای هر تن کانسنگ، ۲ ساعت به‌عنوان زمان، ۴۰ درجه سانتی‌گراد برای دما، نوع اکسیدان MnO_2، ۵ کیلوگرم بر تن به‌عنوان میزان مصرف اکسیدان و تحت نسبت وزنی برابری از مایع به جامد (L/S) به‌دست آمدند. همچنین در انتها آزمایشی با استفاده از نمونه‌ای با وزن بیشتر و تحت شرایط بهینه انجام شد و بازیابی قابل قبول ۸۱٪ برای اورانیوم به‌دست آمد، که در واقع تاییدی بر مقادیر حاصل از آزمایش‌های قبلی بود.

کلمات کلیدی

فروشویی اسیدی، کانسارخشومی، اسید سولفوریک، اکسیدان.

Archive of SID

www.SID.ir

۱- مقدمه

مطالعات اولیه بر روی منطقه کوه‌های درانجیر(خشومی) و کویر درانجیر، که در ۱۵۰ کیلومتری شمال‌شرقی یزد واقع است، درسال ۱۳۶۸ انجام شد. طی مطالعات اولیه ۴۷ آنومالی نقطه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفتند که آنومالی ۶ با ۵ بلوک به لحاظ پرتوزائی قابل ملاحظه و وجود کانی‌های ثانویه اورانیوم بعنوان مناسب‌ترین و امیدبخش‌ترین آنومالی (در میان ۴۷ آنومالی اولیه) شناسایی شده و در اولویت مطالعات بعدی قرارگرفت. آنومالی ۶ منطقه خشومی در منتهی‌الیه گوشه جنوب‌شرق رشته کوه خشومی قرار دارد. میزان پرتوزائی در این منطقه از ۳۰۰ تا ۱۵۰۰۰ cps می‌باشد و تجزیه مقدار اورانیوم ۱۴ تا ۴۰۰۰ ppm را نشان داده است. واحدهای تشکیل دهنده منطقه شامل میکاشیست، گنیس و گرانیت است. دایک‌های با ترکیب اسیدی و بازی نیز واحدهای این منطقه را تحت تاثیر قرار داده است[۱].

در این تحقیق مطالعات فروشویی اسیدی که یکی از مراحل مهم فرآوری اورانیوم است، بر روی نمونه بلوک ۳ از آنومالی ۶ خشومی انجام گردید. نتایج مطالعات کانی‌شناسی انجام شده، دلالت بر آن دارد که کانی‌های اولیه اورانیوم شامل اورانیت، پیچبلند، کوفینیت و کانی‌های ثانویه اورانیوم شامل بولتوودیت، اورانوفان و توربرنیت می‌باشند. کانی‌سازی اورانیوم در منطقه به صورت همراهی با کانی‌های فرعی زیرکن، آلانیت، اسفن، آناتاز و کانی‌های تیتانیوم‌دار می‌باشد. همچنین کانی‌های غیر رادیواکتیو مشاهده شده بر سطح سنگ‌ها شامل هماتیت، گوتیت، لیمونیت، مالاکیت، آزوریت، همی‌مورفیت، ولفنیت و کریزوکولا گزارش شده است[۱].

فروشویی فرآیندی است که طی آن ماده معدنی در تماس با حلال مناسبی قرار می‌گیرد و بعضی از اجزاء کانی‌های موجود در سنگ معدن در آن حل می‌شوند. فروشویی بر مبنای حلال مصرفی به فروشویی اسیدی و قلیایی تقسیم بندی می‌شود. در فروشویی اسیدی عمدتاً از اسید سولفوریک و در فروشویی قلیایی از کربنات و بی‌کربنات سدیم استفاده می‌شود[۲و ۳]. فروشویی قلیایی برای کانسنگ‌های با کربنات بالا (که مقادیر زیادی اسید مصرف می‌کنند) مورد استفاده قرار می‌گیرد. بطور کلی اگر کانسنگ حاوی بیشتر از ۹ـ۷ درصد کربنات باشد، فروشویی قلیایی اقتصادی‌تر است. البته دراین امر باید سایر عوامل مانند کارآیی استخراج اورانیوم، مصرف آب (به ویژه در مناطق خشک و کم آب)، مصرف انرژی و مشکلات زیست محیطی در نظر گرفته شوند[۴]. لیچینگ اسیدی در اکثر کارخانه‌های فرآوری اورانیوم مورد استفاده قرار می‌گیرد.

بطور کلی اورانیوم به صورت طبیعی به دو حالت چهار و شش ظرفیتی وجود دارد. شکل شش ظرفیتی UO_3 و شکل چهار ظرفیتی آن UO_2 است. در حالت شش ظرفیتی اورانیوم مستقیماً وارد محلول می‌شود و تشکیل یون اورانیل را می‌دهد. یون اورانیل حاصل با یون سولفات در لیچینگ اسیدی تولید کمپلکس آنیونی سولفات اورانیل می‌نماید. در کانی‌هایی مانند اورانیت، اورانیوم به حالت چهار ظرفیتی وجود دارد و انحلال آن به کندی صورت می‌گیرد و از این نظر باید ابتدا اورانیوم به حالت شش ظرفیتی اکسید شود. اکسیداسیون سریع با حضور یون‌های فریک موجود در محلول حاصل می‌شود و برای ادامه اکسیداسیون در محلول، یک ماده اکسیدان که بتواند آهن دو ظرفیتی حاصل از واکنش را مجدداً به آهن سه ظرفیتی تبدیل کند، لازم است[۵]. برای این منظور از مواد اکسیدان نظیر دی‌اکسید منگنز استفاده می‌شود. مصرف اسید تابعی از ترکیب باطله موجود در کانسنگ است[۶]. کلسیت، دولومیت، منیزیت و سیدریت به سادگی در غلظت کم اسید و درجه حرارت معمولی واکنش می‌دهند. سولفیدها، آهن فلزی، بعضی از فسفات‌ها، مولیبدات‌ها، وانادات‌ها، اکسیدها و غیره علاوه بر اینکه اسید بیشتری مصرف می‌کنند، با افزایش درجه حرارت یا غلظت اسید، موجب آلودگی محلول نیز می‌شوند[۴].

هدف اصلی از انجام این مطالعه بررسی و بهینه کردن پارامترهای مؤثر بر فروشویی اسیدی نمونه کانسنگ اورانیوم‌دار خشومی است که برای انجام این ارزیابی از نمونه های بلوک ۳ از آنومالی ۶ منطقه خشومی استفاده شد.

۲-آماده‌سازی نمونه

به منظور انجام مطالعات، ابتدا نمونه مورد نیاز از کانسنگ خشومی تهیه گردید. این نمونه از ترانشه‌های اکتشافی برداشت شد و وزن آنها معادل ۱۳۰ کیلوگرم بود، که در عملیات فروشویی اسیدی مورد استفاده قرار گرفت.

ابعاد نمونه تهیه شده به‌طور متوسط ۱۰۰ میلی‌متر بود. البته به طور محدود قطعات بزرگ‌تر از ۱۰۰ میلی‌متر نیز در نمونه وجود داشت که با پتک خرد شدند. نمونه‌ها بعد از خردایش اولیه با استفاده از سنگ‌شکن فکی به ابعاد زیر ۲۵ میلی‌متر رسیدند. طی مراحل مختلف خردایش با استفاده از سنگ‌شکن فکی و آسیای دیسکی نمونه‌های به ابعاد d_{80} معادل ۲۱۲، ۳۵۵، ۵۰۰، ۶۰۰ و ۸۵۰ میکرون تهیه شدند. سپس هر یک از نمونه‌های پنج‌گانه به نمونه‌های ۸۰۰ گرمی تبدیل شدند. هر یک از نمونه‌ها توسط XRF مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفتند

Archive of SID
www.SID.ir

که نتایج آن در جدول ۱ آمده است. همچنین آنالیز کامل عناصر نمونه با d_{80}=۶۰۰ میکرون در جدول ۲ ارائه شده است.

در آزمایش‌های فروشویی، نمونه‌های ۱۰۰ گرمی مورد استفاده قرار گرفتند. این نمونه‌ها به منظور حفظ معرف بودن، به روش طبقه‌بندی تهیه شدند. به این ترتیب که مقداری از نمونه کلی به صورت مخروطی تهیه و توسط دو تیغه فلزی و با حرکت دورانی این مخروط مسطح گردید. سپس با نوک تیغه تقسیم‌بندی‌های طولی و عرضی در نمونه (مسطح شده) ایجاد گردید و توسط قاشق از هر خانه مقداری نمونه برداشت شد، تا وزن نمونه برداشت شده به ۱۰۰گرم برسد.

جدول ۱: نتایج XRF نمونه آنومالی۶ (بلوک۳) خشومی.

شماره نمونه	ابعاد (d_{80}، میکرون)	U(ppm)	Th(ppm)	CaO(%)
۱	۸۵۰	۱۵۲۰	۲۰	۵/۵۴۷
۲	۶۰۰	۱۵۳۶	۲۱	۵/۴۲۶
۳	۵۰۰	۱۵۴۴	۲۴	۵/۵۵۹
۴	۳۵۵	۱۸۸۳	۲۴	۶/۴۱۲
۵	۲۱۲	۱۸۴۶	۲۹	۶/۰۷۳

جدول ۲: نتایج XRF کامل نمونه سایز ۶۰۰ میکرون.

SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)
۶۲/۴۱۲	۱۱/۸۶۶	۴/۷۸۱	۵/۴۲۶
K_2O (%)	TiO_2 (%)	MnO_2 (%)	P_2O_5 (%)
۱/۹۸۰	۰/۳۲۷	۰/۱۸۳	۰/۰۹۲
MgO (%)	Na_2O	LOI (%)	Sr (ppm)
۱/۳۱۵	۳/۵۲۹	۷/۲۱۴	۲۸۲
Cr (ppm)	Cu (ppm)	Nb (ppm)	Ni (ppm)
۸	۱۴۲	۱۴	۱۲
Mo (ppm)	Th (ppm)	Cl (ppm)	Zr (ppm)
۱۰۰	۲۱	۲۴۳۷	۱۳۱
Ce (ppm)	Pb (ppm)	Ba (ppm)	S (ppm)
۸۳	۴۰۳	۷۰۹	۸۹۱
Rb (ppm)	Co (ppm)	V (ppm)	Y (ppm)
۸۸	۳	۴۳	۱۷
		Zn (ppm)	U (ppm)
		۱۸۳۰	۱۵۳۶

۳-شرح آزمایش

همان‌طور که ذکر شد به منظور بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در فروشویی اسیدی، از نمونه‌های ۱۰۰گرمی استفاده شد. ابتدا نمونه وزن شده در بشر قرار گرفته و حجم معینی از آب و اسید و همچنین اکسیدان (به میزان لازم) به آن اضافه شد. سپس بشر داخل حمام بن ماری قرار گرفت و با استفاده از همزن‌های مکانیکی عملیات فروشویی انجام شد.

پس از سپری شدن زمان فروشویی، حجم محلول اصلی یادداشت شد و سپس عمل فیلتراسیون صورت گرفت. کیک حاصل از عملیات فیلتراسیون برای استخراج اورانیوم، تحت شستشو قرارگرفت. در این نوع فروشویی از آب اسیدی با pH=۱/۵ برای شستشو استفاده شد تا اورانیوم جذب شده در کیک را شسته و به داخل محلول منتقل کند. عمل شستشو در دو مرحله انجام پذیرفت و در هر مرحله حجم محلول یادداشت شد. بنابراین حاصل این عملیات سه محلول بود که محلول اول از لیچینگ و دو محلول دیگر از دو مرحله شستشو به‌دست آمد.

مقداری از این سه محلول فیلتر شده و به طور جداگانه جهت اندازه‌گیری اورانیوم و سایر عناصر استفاده شد. لازم به ذکر است که اندازه‌گیری اورانیوم به روش FIA و ICP صورت گرفت و بر اساس نتایج حاصل و همچنین عیار اولیه نمونه بازیابی برای هر آزمایش محاسبه گردید. بازیابی با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$(\%)R=\frac{[(V*X)+(V_1*X_1)+(V_2*X_2)]*100}{(W*X_3)}$$

که در آن

R= بازیابی اورانیوم(٪)،

V، V_1 و V_2= به‌ترتیب حجم‌های محلول اصلی(لیچ لیکور) و محلول‌های حاصل از شستشوی اول و دوم(cm^3)

X_3= عیار اورانیوم در نمونه(ppm)

W= وزن نمونه(gr)

X، X_1 و X_2= به‌ترتیب عیارهای اورانیوم در محلول اصلی و در محلول‌های شستشوی اول و دوم(ppm).

در طول آزمایش‌ها و در هر مرحله یکی از پارامترها متغیر و سایر پارامترهای مؤثر در فروشویی ثابت در نظر گرفته شد. البته لازم ذکر است که مقدار اولیه برای هر پارامتر به صورت تجربی تعیین گردید. پارامترهای مورد بررسی در این آزمایش‌ها شامل ابعاد ذرات، میزان اسید مصرفی، درجه حرارت، زمان، نوع و مصرف اکسیدان، نسبت وزنی مایع به جامد(L/S) بودند.

Archive of SID
www.SID.ir

۳-۱- اثر ابعاد ذرات

در این آزمایش ابعاد ذرات متغیر و سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شد. شرایط انجام آزمایش‌ها به شرح زیر بوده و نتایج حاصل از آنها در جدول ۳ ارائه شده است. ردیف مربوط به ابعاد، خود شامل سه ردیف است که ردیف اول آن مربوط به لیچینگ و دو ردیف دیگر مربوط به شستشو می‌باشد.

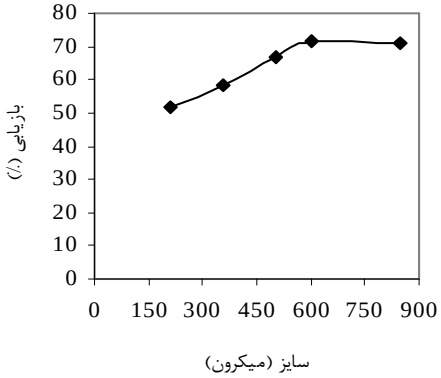
جدول ۳: تغییرات بازیابی نسبت به ابعاد کانه

شماره نمونه	U در محلول (ppm)	حجم (CC)	ابعاد (میکرون)	U در محدوده ابعادی (ppm)	بازیابی (٪)
۱	۱۱۷۰	۷۹	۸۵۰	۱۵۲۰	۷۱/۰۸
۲	۲۶۰	۴۷			
۳	۶۸	۵۰			
۴	۱۱۸۳	۸۰	۶۰۰	۱۵۳۶	۷۱/۸۱
۵	۲۵۴	۴۸			
۶	۶۸	۵۱			
۷	۱۱۲۰	۷۶	۵۰۰	۱۵۴۴	۶۶/۸۱
۸	۲۷۹	۴۹			
۹	۹۳	۴۷			
۱۰	۱۲۴۰	۷۲	۳۵۵	۱۸۸۳	۵۸/۰۵
۱۱	۳۵۰	۴۵			
۱۲	۹۱	۴۷			
۱۳	۱۲۰۰	۶۴	۲۱۲	۱۸۴۶	۵۱/۵۶
۱۴	۲۲۱	۴۶/۵			
۱۵	۱۹۳	۴۲			

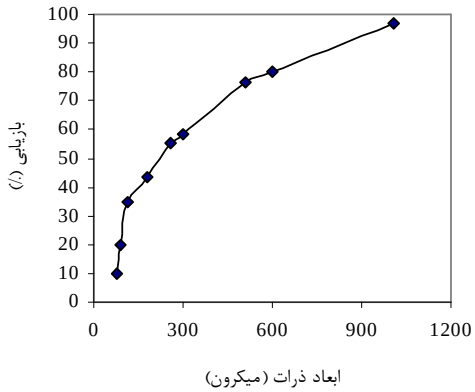
شرایط انجام آزمایش‌ها:

- وزن نمونه‌ها: ۱۰۰ گرم
- ابعاد ذرات(d_{80}): ۲۱۲، ۳۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰، ۸۵۰ میکرون
- محلول شستشو: اسید سولفوریک (H_2SO_4)
- مصرف اسید: ۷۰ کیلوگرم بر تن
- زمان: ۳ ساعت
- دما: ۵۰ درجه سانتی‌گراد
- اکسیدان: دی اکسید منگنز (MnO_2)
- مصرف اکسیدان: ۱۰ کیلوگرم در تن
- نسبت وزنی مایع به جامد (L/S) :۱

با مقایسه مقادیر بازیابی‌ها در جدول ۳ مشخص گردید که ابعاد۶۰۰ میکرون با بیشترین مقدار بازیابی به میزان ۷۱/۸۱٪، مناسب‌ترین ابعاد ذرات است. شکل ۱ روند تغییرات بازیابی را برحسب ابعاد ذرات نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود اختلاف بازیابی برای دو ابعاد ۶۰۰ و ۸۵۰ میکرون بسیار اندک می‌باشد. بنابراین ابعاد ۶۰۰ میکرون به عنوان ابعاد بهینه ذرات در نظر گرفته شد. پس از مشخص شدن این ابعاد، بر روی این نمونه آنالیز سرندی انجام شد که منحنی درصد تجمعی عبورکرده برحسب ابعاد ذرات در شکل ۲ آمده است که d_{80} آن برابر ۶۰۰ میکرون می‌باشد.



شکل۱: منحنی تغییرات بازیابی برحسب ابعاد ذرات



شکل ۲: منحنی درصد تجمعی عبور کرده برحسب ابعاد ذرات قبل از فروشویی.

۳-۲- اثرمیزان مصرف اسید

در این آزمایش میزان مصرف اسید متغیر و سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شد. شرایط انجام آزمایش به صورت زیر بوده و نتایج حاصل در جدول ۴ ارائه شده است. شکل ۳ منحنی تغییرات بازیابی را برحسب میزان مصرف اسید نشان می‌دهد که روند افزایش تدریجی بازیابی با افزایش مصرف اسید کاملاً مشخص است.

www.SID.ir

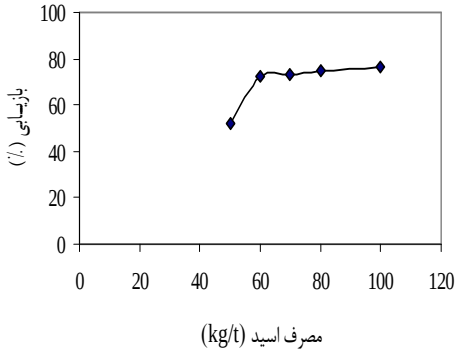
جدول ۴: نتایج آزمایش‌های مربوط به تعیین مصرف بهینه اسید (عیار اورانیوم در خوراک ppm ۱۵۳۶)

شماره نمونه	U در محلول (ppm)	حجم (CC)	H_2SO_4 (Kg/t)	بازیابی (٪)
۱۶	۷۲۴	۸۱/۵	۵۰	۵۲/۱
۱۷	۲۹۲	۵۰/۵		
۱۸	۱۲۳	۸۱		
۱۹	۱۲۰۰	۴۶/۵	۶۰	۷۲/۱۵
۲۰	۲۰۸	۵۰		
۲۱	۷۹	۷۸		
۲۲	۱۲۳۷	۴۷	۷۰	۷۲/۸۱
۲۳	۲۸۷	۴۸		
۲۴	۳۹	۸۰/۵		
۲۵	۱۲۰۰	۴۹/۵	۸۰	۷۴/۹۴
۲۶	۳۰۷	۴۸		
۲۷	۶۹	۷۵		
۲۸	۱۲۹۰	۵۰	۱۰۰	۷۶/۳۴
۲۹	۳۴۳	۴۸		
۳۰	۷۰			

شرایط انجام آزمایش‌ها:

- وزن نمونه‌ها: ۱۰۰ گرم
- ابعاد ذرات(d_{80}): ۶۰۰ میکرون
- محلول شستشو: اسید سولفوریک (H_2SO_4)
- مصرف اسید: ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۱۰۰کیلوگرم بر تن
- زمان: ۳ ساعت، دما: ۵۰ درجه سانتی‌گراد
- اکسیدان: دی اکسید منگنز (MnO_2)
- مصرف اکسیدان: ۱۰ کیلوگرم بر تن
- نسبت وزنی مایع به جامد:(L/S)

چنانچه ملاحظه می‌شود بهترین بازیابی مربوط به مصرف ۸۰ کیلوگرم اسید به ازای هر تن کانسنگ، به میزان ۷۴/۹۴٪ است. البته وقتی مصرف اسید تا ۱۰۰ کیلوگرم بر تن افزایش می‌یابد، بازیابی به مقدار بسیار کمی (کمتر از ۱/۵ درصد) افزایش می‌یابد، که این میزان مصرف اسید (۱۰۰ کیلوگرم در تن) با در نظر گرفتن میزان افزایش ناچیز بازیابی، اقتصادی نمی‌باشد. بنابراین مصرف بهینه اسید معادل ۸۰ کیلوگرم بر تن در نظر گرفته شد.



شکل ۳: تغییرات بازیابی بر حسب میزان مصرف اسید

۳-۳- اثر نوع اکسیدان

به منظور تعیین نوع اکسیدان، متغیرهای دیگر ثابت بوده و صرفاً نوع اکسیدان تغییر داده شد. شرایط انجام آزمایش به صورت زیر بوده و نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. از این اکسیدان‌ها جهت افزایش emf (پتانسیل اکسیداسیون و احیاء) و رساندن آن به دامنه مناسب استفاده شد. همانطور که ملاحظه می‌شود بیشترین بازیابی مربوط به $KMnO_4$ است و پس از آن MnO_2 بالاترین مقدار بازیابی را دارد. البته $KMnO_4$، emf بسیار بالایی دارد و همین امر موجب اکسیداسیون بیش از حد می‌شود. علت عدم انتخاب آن علی‌رغم بازیابی بیشتر (حدود ۱۰٪)، ملاحظات اقتصادی (مقرون به صرفه نبودن) می‌باشد. ضمن آنکه رنگ بنفش تیره آن موجب بروز مشکلاتی در آنالیز محلول می‌شود. بنابراین با توجه به توضیحات فوق، MnO_2 به عنوان اکسیدان مناسب انتخاب گردید.

شرایط انجام آزمایش‌ها:

- وزن نمونه‌ها: ۱۰۰ گرم
- ابعاد ذرات(d_{80}): ۶۰۰ میکرون
- محلول شستشو:اسید سولفوریک (H_2SO_4)
- مصرف اسید: ۸۰ کیلوگرم در تن
- زمان: ۳ ساعت
- دما: ۵۰ درجه سانتی گراد
- اکسیدان: MnO_2 , $NaClO_3$, $KMnO_4$
- مصرف اکسیدان: ۱۰ کیلوگرم در تن
- نسبت وزنی مایع به جامد(L/S) : ۱

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۵: نتایج آزمایش های تعیین نوع اکسیدان (عیاراورانیوم در خوراک ۱۵۳۶ ppm)

شماره نمونه	U در محلول (ppm)	حجم (CC)	emf (mv)	نوع اکسیدان	بازیابی (٪)
۳۱	۱۴۴۷	۸۰	۱۱۱۵	$KMnO_4$	۸۴/۹
۳۲	۲۴۱	۴۶			
۳۳	۷۶	۴۷			
۳۴	۱۱۷۰	۷۸/۵	۸۶۰	$NaClO_3$	۶۵/۸۷
۳۵	۱۷۴	۴۳			
۳۶	۴۲	۴۴			
۳۷	۱۲۰۰	۸۱	۶۲۰	MnO_2	۷۵/۵
۳۸	۳۰۷	۵۰			
۳۹	۶۹	۵۰			

۳-۴- اثرمیزان مصرف اکسیدان

به منظور بهینه‌سازی مصرف اکسیدان مورد استفاده، مقدار مصرف اکسیدان متغیر و پارامترهای دیگر ثابت لحاظ شدند. شرایط انجام آزمایش به صورت زیر بوده و نتایج آزمایش‌ها در جدول ۶، و همچنین شکل ۴ ارائه شده است.

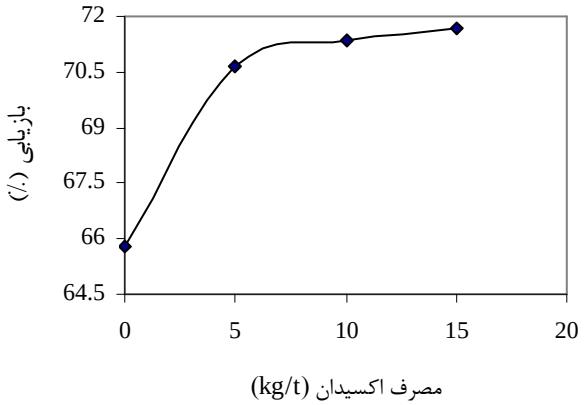
شرایط انجام آزمایش‌ها:

- وزن نمونه‌ها: ۱۰۰ گرم
- ابعاد ذرات (d_{80}): ۶۰۰ میکرون
- محلول شستشو: اسید سولفوریک (H_2SO_4)
- مصرف اسید: ۸۰ کیلوگرم بر تن
- زمان: ۳ ساعت
- دما: ۵۰ درجه سانتی‌گراد
- اکسیدان: MnO_2
- مصرف اکسیدان: ۰ ، ۵، ۱۰، ۱۵ کیلوگرم در تن
- نسبت وزنی مایع به جامد(L/S) : ۱

چنانچه ملاحظه می‌شود بیشترین بازیابی مربوط به مصارف ۱۰ و ۱۵ کیلوگرم بر تن اکسیدان است. با افزایش مصرف اکسیدان از ۵ به۱۰ و ۱۵ کیلوگرم بر تن، بازیابی در حدود ۱٪ افزایش می‌یابد. لذا با توجه به ناچیز بودن مقدار افزایش بازیابی (۱٪)، در مقایسه با افزایش مصرف اکسیدان (از ۵ به ۱۰ و ۱۵ کیلوگرم در تن) نتیجه می‌شود که مصرف اکسیدان ۵ کیلوگرم بر تن مناسب می‌باشد.

جدول ۶: نتایج آزمایش‌های تعیین مصرف اکسیدان (عیار اورانیوم در خوراک ۱۳۱۵/۵ ppm)

شماره نمونه	U در محلول (ppm)	حجم (CC)	مصرف اکسیدان (Kg/t)	بازیابی (٪)
۴۰	۹۶۲	۷۶/۴	۰	۶۵/۷۹
۴۱	۲۴۱	۴۳		
۴۲	۵۵	۴۹		
۴۳	۱۰۹۰	۷۲	۵	۷۰/۶۴
۴۴	۲۶۴	۴۴		
۴۵	۶۳	۴۵		
۴۶	۱۱۰۳	۷۲/۵	۱۰	۷۱/۳۵
۴۷	۲۵۴	۴۴		
۴۸	۵۸	۴۷		
۴۹	۱۰۶۴	۷۵	۱۵	۷۱/۶۷
۵۰	۲۸۲	۴۵		
۵۱	۳۸	۴۷		



شکل ۴: منحنی تغییرات بازیابی بر حسب میزان مصرف اکسیدان.

۳-۵- اثر درجه حرارت

به منظور تعیین اثر درجه حرارت، میزان دما متغیر و سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شدند. شرایط انجام آزمایش به شرح زیر بوده و نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در جدول ۷، و شکل ۵ ارائه شده است. نتایج دلالت بر بازیابی مطلوب در درجه حرارت ۴۰ درجه سانتی‌گراد دارد. با افزایش درجه حرارت، بازیابی اورانیوم افزایش می‌یابد، البته پس از ۴۰ درجه سانتی‌گراد، افزایش چشمگیری در مقدار بازیابی مشاهده نمی‌شود (تقریبا ثابت است) و لذا نیاز به درجه حرارت بالاتر نمی‌باشد. ضمن آنکه افزایش دما موجب انحلال کانی‌های

www.SID.ir

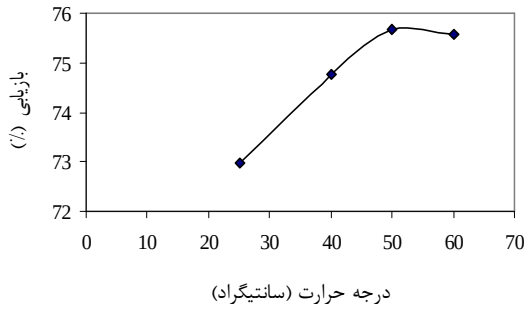
موجود در کانسنگ و همین طور افزایش مصرف اسید سولفوریک می‌شود. بنابراین درجه حرارت ۴۰ درجه سانتی‌گراد به‌عنوان مقدار مطلوب در نظر گرفته شد.

شرایط انجام آزمایش‌ها:

- وزن نمونه‌ها: ۱۰۰ گرم
- ابعاد ذرات(d_{80}): ۶۰۰ میکرون
- محلول شستشو: اسید سولفوریک (H_2SO_4)
- مصرف اسید: ۸۰ کیلوگرم بر تن
- زمان: ۳ ساعت
- دما: ۲۵، ۴۰، ۵۰ ، ۶۰ درجه سانتی‌گراد
- اکسیدان: MnO_2
- مصرف اکسیدان: ۵ کیلوگرم در تن
- نسبت وزنی مایع به جامد(L/S): ۱

جدول ۷: نتایج آزمایش‌های تعیین درجه حرارت (عیار اورانیوم در خوراک ppm۱۳۱۵/۵).

شماره نمونه	U در محلول (ppm)	حجم (CC)	دما (^oC)	بازیابی (٪)
۵۲	۱۰۲۸	۸۰	۲۵	۷۲/۹۶
۵۳	۲۵۴	۴۶		
۵۴	۴۴	۴۷		
۵۵	۱۰۷۱	۷۶	۴۰	۷۴/۷۵
۵۶	۲۷۳	۵۲		
۵۷	۵۷	۴۸/۱		
۵۸	۱۰۵۶	۷۹	۵۰	۷۵/۶۸
۵۹	۲۷۹	۴۷/۵		
۶۰	۶۰	۴۸		
۶۱	۱۰۹۲	۷۹	۶۰	۷۵/۵۸
۶۲	۲۳۴	۴۵/۵		
۶۳	۵۴	۴۶/۵		



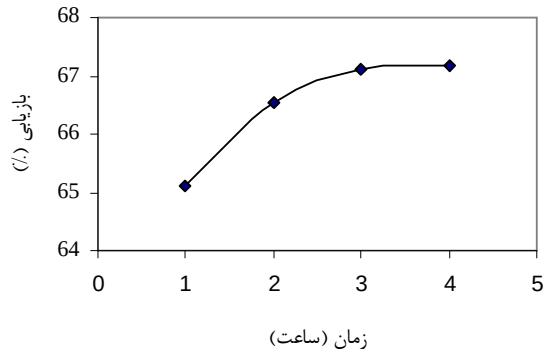
شکل ۵- منحنی تغییرات بازیابی برحسب دما

۳-۶- تعیین زمان بهینه

در این آزمایش‌ها زمان متغیر و سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شد. شرایط انجام آزمایش به صورت زیر بوده و نتایج حاصل از آزمایش‌ها در جدول ۸، و شکل ۶ ارائه شده است. نتایج حاصل بیانگر تغییرات بازیابی در زمان‌های مختلف آزمایش است. چنانچه ملاحظه می شود پس از زمان ۲ ساعت در مقایسه با ۳ ساعت، افزایش چشمگیری در بازیابی به‌وجود نیامده است. لذا زمان ۲ ساعت بهتر از ۳ ساعت است. البته مقدار بازیابی در ۲ ساعت، صرفاً (۱/۴۳٪) بیشتر از بازیابی در ۱ ساعت می‌باشد که اختلاف قابل ملاحظه‌ای نیست. بنابراین زمان بهینه بین ۱ تا ۲ ساعت است که با توجه به مقدار بالاتر عددی بازیابی در ۲ ساعت، این زمان به عنوان زمان بهینه در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۸: نتایج آزمایش‌های تعیین زمان (عیار اورانیوم در خوراک ppm ۱۳۱۵/۵).

شماره نمونه	U در محلول (ppm)	حجم (CC)	زمان (ساعت)	بازیابی (٪)
۶۴	۹۳۰	۸۰	۱	۶۵/۱
۶۵	۲۰۸	۴۵		
۶۶	۳۹	۴۸/۵		
۶۷	۹۵۰	۸۰	۲	۶۶/۵۳
۶۸	۲۰۴	۴۵		
۶۹	۵۰	۴۷		
۷۰	۹۵۰	۷۹/۵	۳	۶۷/۱
۷۱	۱۹۹	۴۷		
۷۲	۶۸	۵۰		
۷۳	۹۶۰	۷۹	۴	۶۷/۱۹
۷۴	۲۵۰	۴۴		
۷۵	۵۴	۴۶/۵		



شکل ۶: منحنی تغییرات بازیابی برحسب زمان

Archive of SID

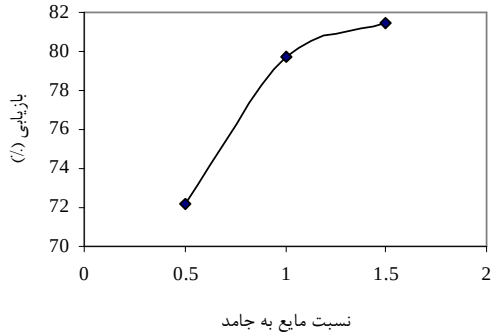
www.SID.ir

شرایط انجام آزمایش‌ها:

- وزن نمونه‌ها: ۱۰۰ گرم
- ابعاد ذرات (d_{80}): ۶۰۰ میکرون
- محلول شستشو: اسید سولفوریک (H_2SO_4)
- مصرف اسید: ۸۰ کیلوگرم بر تن
- زمان: ۱، ۲، ۳، ۴ ساعت
- دما: ۴۰ درجه سانتی‌گراد
- اکسیدان: MnO_2
- مصرف اکسیدان: ۵ کیلوگرم بر تن
- نسبت وزنی مایع به جامد(L/S): ۱

۳-۷- تعیین نسبت وزنی مایع به جامد (L/S)

در این آزمایش نسبت وزنی مایع به جامد (L/S) متغیر و سایر پارامترها ثابت بودند. شرایط انجام آزمایش به صورت زیر بوده نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در جدول ۹ آمده است. همچنین شکل ۷ روند تغییرات بازیابی را برحسب نسبت وزنی مایع/جامد نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود بیشترین بازیابی مربوط به L/S= ۱/۵ است. البته این نسبت به دو علت مناسب نمی‌باشد: اولاً بازیابی آن افزایش چشمگیری نسبت به L/S=۱ ندارد. ثانیاً به لحاظ اقتصادی این نسبت (۱/۵) مقرون به صرفه نمی‌باشد، زیرا موجب مصرف آب بیشتری شده و همچنین حجم دستگاه‌های انتخابی نیز بزرگ‌تر خواهند بود. لذا نسبت L/S=۱ به‌عنوان نسبت مطلوب انتخاب گردید.



شکل ۷: منحنی تغییرات بازیابی برحسب نسبت وزنی مایع/جامد.

شرایط انجام آزمایش‌ها:

- وزن نمونه‌ها: ۱۰۰ گرم
- ابعاد ذرات(d_{80}) : ۶۰۰ میکرون
- محلول شستشو: اسید سولفوریک (H_2SO_4)
- مصرف اسید: ۸۰ کیلوگرم بر تن
- زمان: ۲ ساعت
- دما: ۴۰ درجه سانتی‌گراد
- اکسیدان: MnO_2
- مصرف اکسیدان: ۵ کیلوگرم بر تن
- نسبت وزنی مایع به جامد(L/S): ۰/۵، ۱، ۱/۵

جدول ۹: نتایج آزمایش‌های تعیین نسبت مایع به جامد (عیار اورانیوم در خوراک ppm ۱۳۱۵/۵).

شماره نمونه	U در محلول (ppm)	حجم (CC)	نسبت وزنی مایع/جامد	بازیابی (٪)
۷۶	۲۰۷۱	۳۵	۱/۲	۷۲/۱۷
۷۷	۴۱۴	۴۵		
۷۸	۸۸	۴۳/۵		
۷۹	۱۱۲۰	۸۵/۵	۱	۷۹/۷۵
۸۰	۱۶۵	۴۴		
۸۱	۴۴	۴۳		
۸۲	۷۸۴	۱۲۸	۳/۲	۸۱/۴۸
۸۳	۱۲۹	۳۹		
۸۴	۴۳	۴۲		

۴- آزمایش نهایی با استفاده ازپارامترهای بهینه

به منظور کنترل نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده، در انتها آزمایشی تحت شرایط بهینه به‌دست آمده صورت پذیرفت. این آزمایش در مقیاس بزرگ‌تر و با استفاده از مقدار بیشتری از نمونه به وزن ۵۰۰ گرم و با توزیع دانه‌بندی مندرج در جدول ۱۱ انجام شد. شرایط انجام آزمایش به صورت زیر بود.

- ابعاد ذرات (d_{80}) : ۶۰۰ میکرون
- مصرف اسید: ۸۰ کیلوگرم بر تن
- زمان: ۲ ساعت
- دما: ۴۰ درجه سانتی‌گراد
- اکسیدان: MnO_2
- مصرف اکسیدان: ۵ کیلوگرم بر تن
- نسبت وزنی مایع به جامد(L/S): ۱

شایان ذکر است که پس از انجام لیچینگ اسیدی، نمونه با محلول اسیدی با pH معادل ۱/۵، دو بار شستشو داده شد و حجم هر مرحله بدست آمد. نتایج حاصل از این آزمایش در جدول ۱۰ ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود بازیابی استخراج اورانیوم ۸۱٪ حاصل شده است که مقدار قابل قبولی می‌باشد. لازم به ذکر است که آنالیز کامل نمونه نهایی نیز انجام شد که با توجه به ناچیز بودن میزان سایر عناصر در محلول در اینجا ارائه نگردید.

Archive of SID
www.SID.ir

جدول۱۰-نتایج آزمایش نهایی تحت شرایط بهینه (عیار اورانیوم در خوراک ppm ۱۳۱۵/۵).

شماره نمونه	U در محلول (ppm)	حجم (cc)	بازیابی (٪)
۸۵	۱۰۷۸	۴۵۰	۸۱
۸۶	۱۳۴	۲۲۸	
۸۷	۶۸	۲۵۲/۵	

۵-نتیجه‌گیری

نمونه کانسار خشومی (بلوک ۳ از آنومالی ۶) مورد بررسی‌های فروشویی اسیدی قرار گرفت. در این مطالعه با انجام آزمایش‌های متعدد، مقادیر مطلوب و بهینه پارامترهای مختلف و موثر مانند دانه‌بندی، غلظت اسید مصرفی، نوع اکسیدان، غلظت اکسیدان، درجه حرارت، زمان و غلظت پالپ به دست آمدند. وزن نمونه مورد استفاده در آزمایش‌ها ۱۰۰گرم بوده و بهترین مقادیر برای پارامترها به شرح زیر حاصل شدند.

- ابعاد ذرات (d_{80}): ۶۰۰ میکرون
- مصرف اسید: ۸۰ کیلوگرم در تن
- زمان: ۲ ساعت
- دما: ۴۰ درجه سانتی گراد
- اکسیدان: MnO_2
- مصرف اکسیدان: ۵ کیلوگرم در تن
- نسبت وزنی مایع به جامد(L/S) : ۱

لازم به ذکر است که تحت شرایط بهینه فوق، آزمایش نهایی با استفاده از مقدار بیشتری از نمونه (۵۰۰گرم) انجام گرفت و بازیابی استخراج اورانیوم ۸۱٪ حاصل شد که با توجه به عدم وجود اختلاف با مقادیر بازیابی‌ها در سایر آزمایش‌ها، دلالت بر تائید و اطمینان به نتایج آزمایش‌های قبلی می‌باشد.

جدول ۱۱: توزیع ابعادی نمونه مورد آزمایش تحت شرایط بهینه

محدوده ابعادی (میکرون)	درصد وزنی (٪)	وزن تجمعی عبوری (٪)	عیار اورانیوم (٪)	پراکندگی اورانیوم (٪)	اورانیوم لیچ (٪)
+۱۰۰۰	۸/۷۹	۸/۷۹	۰/۰۰۶۱	۵/۲۰۳	۵۳/۷۹
-۱۰۰۰+۶۰۰	۱۰/۷۴	۱۹/۵۳	۰/۰۰۷۰	۷/۲۹۱	۷۰/۰۹
-۶۰۰+۵۰۰	۴/۸۱	۲۴/۳۴	۰/۰۱۱۸	۵/۵۰۴	۷۹/۱۹
-۵۰۰+۳۰۰	۲۷/۱۶	۵۱/۵۰	۰/۰۱۲۹	۳۳/۹۸	۸۴/۱۳
-۳۰۰+۲۵۰	۳/۷۵	۵۵/۲۵	۰/۰۱۱۵	۴/۱۸۴	۸۸/۰۹
-۲۵۰+۱۸۰	۱۲/۸۷	۶۸/۱۲	۰/۰۱۰۱	۱۲/۵۲۴	۹۰/۳۲
-۱۸۰+۱۲۵	۱۰/۵۶	۷۸/۶۸	۰/۰۰۸۸	۹/۰۱۹	۹۳/۰۲
-۱۲۵+۹۰	۱۰/۸۹	۸۹/۵۷	۰/۰۰۸۹	۹/۴۰۷	۹۵/۱۴
-۹۰+۷۵	۴/۱۹	۹۳/۷۶	۰/۰۱۱۵	۴/۶۶۹	۹۵/۱۳
-۷۵	۶/۲۴	۱۰۰	۰/۰۱۳۸	۸/۳۵۹	۹۴/۳۹
مجموع	۱۰۰	-	۰/۰۱۰۳=میانگین	-	-

۶- منابع

[۱] حیدریان، فرانک، ۱۳۸۲، "*مطالعه و بررسی دگرسانی و کانی‌سازی اورانیوم در سنگ‌های منطقه اکتشافی خشومی (آنومالی ۶)*"،گزارش واحد اکتشاف، سازمان انرژی اتمی،

[2] Mudd, G.M., 2000, "*Acid in situ leach Uranium*", Tailing & Mine Waste, Fort Collins, USA, pp. 517-526.

[3] IAEA, "*Uranium Extraction Technology*", International Atomic Energy Agency, 1993, pp 355.

[4] Merrit, R.C., "*The Extractive Metallurgy of Uranium*", Colorado School of Mines Research Institute Under Contract with Atomic Energy commission of USA, 1971.

[5] Ho, E.M., Quan, C.H., 2007, "*Iron(II) oxidation by SO_2/O_2 for use in uranium leaching*", Hydrometallurgy, Vol. 85, No. 2-4, pp. 183-192.

[6] Yijun, Z., Jianwei, Z., 2005, "*Development of China's hard rock Uranium resources: Supporting Technology and Research*", Recent developments in uranium exploration, production and environmental issues, Czech Republic, pp. 33-37.

Archive of SID

www.SID.ir