J. of Nuclear Sci. and Tech.
No. 29, pp. 31-38, 2003

مجله علوم و فنون هسته‌ای
شماره ۲۹، صفحات ۳۸- ۳۱، ۱۳۸۲

Archive of SID

فراوری اورانیوم از کانسنگ نابهنجاری‌های ۱، ٦ و ۸ گنبدهای نمکی-گچین بندرعباس به روش فروشویی ستونی با آب دریا در محیط اسیدی

کاظم فاطمی*

مرکز تحقیقات هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹- ۱٤۱۵۵، تهران- ایران

چکیده: روش فروشویی ستونی یکی از روشهای آزمایشگاهی آزمون مایع شوینده به منظور بررسی ویژگیهای کانهٔ اورانیوم است که با توجّه به درصد بازده فراوری و مشکلات فرایندی، معمولاً به موازات روش سنگ شویی متداول انجام می‌گیرد، تا این که انتخاب روش و فناوری مناسب در طرّاحی عملیات گسترده‌تر، آسان گردد. در این کار پژوهشی، نخست کلرید اضافی موجود در نمونه‌های کانی مورد آزمایش با آب دریا شسته شد، سپس عملیات سنگ شویی اسیدی با آب دریا و اسید سولفوریک به روش فروشویی ستونی[1] انجام گرفت. نتایج این کار آزمایشگاهی نشان داد که حداکثر، ۸۵ درصد اورانیوم از نمونهٔ کانسنگ نابهنجاری ۱ فراوری می‌شود. در این حالت، زیادی اسید بکار رفته، بر اورانیوم باقی مانده بی‌اثر بوده و به صورت آزاد در مایع شوینده باقی می‌ماند. بازده استخراج اورانیوم در نابهنجاری ٦ به ۷۵ درصد و در نابهنجاری ۸ پس از ۳۰ دوره سنگ شویی به ۸۱ درصد رسید؛ اما حداکثر بازیافت، تنها ارزش تحقیقاتی داشته و از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست. مقایسه نتایج حاصل از این بررسی‌ها نشان می‌دهند که وجود میزان کلرید در سنگ معدن اورانیوم، در بازده استخراج این عنصر مؤثّر است. یافته‌های این پژوهش، قابلیت‌های ویژهٔ آب دریا را در فراوری اورانیوم از گنبدهای نمکی، به جای استفاده از آب شیرین، به سبب کاهش دوره عملیات، مصرف اسید کمتر و حذف هزینهٔ سنگین عملیات سنگ شویی، در پاسخ‌گویی به وسایل فنی مورد نیاز در روش فروشویی تپّه‌ای[2] ارزشمند و اقتصادی نشان می‌دهند. این کار تحقیقی نخستین مرحله پژوهش دربارهٔ روش استخراج و تغلیظ اورانیوم از سنگ معدن و محلولهای کلردار است. یافته‌های تجربی در این زمینه را می‌توان الگویی برای بررسی شرایط فروشویی تپّه‌ای اورانیوم از گنبدهای نمکی- گچین بندرعباس بکار برد.

***واژه‌های کلیدی:** گنبدهای نمکی- گچین، فروشویی ستونی، فروشویی تپّه‌ای، فراوری اورانیوم، مایع شوینده*

Extraction of Uranium from Anomali Ores No 1, 6, 8 in Salt Domes of Bandar Abbas Region Using Column Leaching by Seawater in Sulfuric Acid Medium

K. Fatemi*

Nuclear Research Center, AEOI, P.O.Box: 14155 - 1339, Tehran - Iran

Abstract: Column leaching is one of the experimental methods which is used for identifying the specifications of uranium ores. From the efficiency point of view, the process has some complications and usually it is applied in parallel with the conventional leaching process in order to facilitate of finding an appropriate design and operational method, to be applicable in a large practical scale. In this research work, at the first stage, the existed free chlorine in the samples was washed out using seawater. Then, in a process of acid leaching with seawater and sulfuric acid by the use of the column leaching was applied. The results show that the maximum of 85% of uranium from the ore of Anomali #1 is extracted. The extra residual of the used acid dose not react with the uranium and therefore it will increase the free acidity of the leach liquor. In Anomali #6, the extraction efficiency of uranium is 75%, while in Anomali #8, using 30 periods of leaching, the efficiency is 81%. However, the maximum efficiency achievement has to be avoided by the non-economical circumstances. Based on some comparisons, it is shown that the presence of chlorine in ore will affect the efficiency. The capability of "seawater" in uranium extraction from salted arches shaped, compared with the "normal or sweat water" has some advantages. These

*email: sfatooreh@seai.neda.net.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۲/۲/۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۸۲/٤/۱۵

www.SID.ir

Archive of SID

include: reduction of the operational period, less acid consumption, and reduction in the ore leaching costs. Thus, the heap leaching industry is believed to be a valuable and economical method for uranium extraction, where the needs for utilizing the complicated technical facilities can be reduced. The present work is the first research project on the uranium extraction and concentration in solution containing chlorine. Our experimental results can provide a valuable pattern for the heap leaching of uranium ores design from salted arches shaped in the region Bandar Abbas.

Keywords: ***Salted arches shaped, column leaching, Heap leaching, uranium process, leach liquor***

۱ - مقدمه

سنگ شویی مرحله‌ای کلیدی و پیچیده و در عین حال حساس از فرایند استخراج اورانیوم از سنگ معدن است. مراحل دیگر تا بدست آمدن محصول نهایی متأثّر از این مرحله‌اند. سنگ شویی ستونی روشی با بستر ثابت است که فراوری مطلوب اورانیوم با آن به پارامترهای مهمّ و شرایط ویژه‌ای از جمله ساختار سنگ معدن، قابلیت نفوذ حلّال در آن، توزیع یکنواخت نمونه (توده معدنی) در ستون، بکارگیری دقیق پارامترهای فرایند، صرف وقت بستگی دارد. در این روش، چون بر خلاف روش سنگ شویی متداول، پاره‌های درشت سنگ معدن بکار می‌روند، و امکان بکارگیری عوامل مؤثّر در افزایش بازیافت اورانیوم وجود ندارد، و کلّیه عملیات منحصراً در شرایط بستر ثابت انجام می‌گیرد، روشی دراز مدّت، ارزان، با مصرف اسید بیشتر به حساب می‌آید. در این روش، طریقه انباشتن ستون از کانه (توده معدنی معرّف) بسیار مهمّ است. چنانچه سنگ‌ریزه‌ها در کنار هم انباشته شوند، احتمال مسدود شدن جریان مایع شوینده در ستون بوجود می‌آید. همچنین در صورت رسی بودن کانه، به علّت وجود کانی‌های آهکی و رسی[۳] و تأثیر اسید بر آنها، سولفات کلسیوم و ترکیبات نامطلوب دیگر، لایهٔ نفوذناپذیر رسی بوجود می‌آید که در فرایند استخراج ایجاد اختلال می‌کند. پارامترهای مختلفی، بسته به نوع عملیات، در سینتیک واکنشهای فروشویی مؤثّرند، از جمله: خواص کانی، دانه‌بندی، درجه آزادی، غلظت حلّال و کنترل آن. گردآوری محلول خروجی، ثابت نگه داشتن حجم خوراک در هر چرخهٔ عمل، رعایت اصول نمونه برداری و توزین دقیق نمونه‌ها، رعایت زمان استراحت ستون (در صورت مؤثّر بودن) نیز از عوامل تأثیرگذار دیگر بر بازیافت اورانیوم، در آزمون‌های آزمایشگاهی مایع شوینده به حساب می‌آیند. نتایجی که در سطح این آزمون‌ها از روش فروشویی اسیدی سنگ معدن بدست می‌آیند، مبنای محاسبه در طرّاحی فنّی تپّه‌های صنعتی و نیمه صنعتی قرار می‌گیرند [۱]، و این در صورتی است که نتایج این آزمون‌ها، بر اساس مطالعات کانه‌شناسی سنگ معدن، به اندازه کافی صحیح، دقیق و پذیرفتنی باشد.

۲- توصیف پارامترهای مؤثّر بر فرایند استخراج اورانیوم در عمل فروشویی

برای فراوری بیشترین مقدار اورانیوم به روش فروشویی، محیط عمل باید از لحاظ شرایط ORP (پتانسیل اکسید شدن و احیاء) در حد مطلوب باشد. این حد پتانسیل در فروشویی اسیدی اورانیوم، ۴۷۵ - ۴۲۵ میلی‌ولت است [۲]. هوا در بین اکسیدکننده‌ها فراوان‌ترین اکسیدکننده در روش فروشویی است. به علّت افت سطح توده معدنی در ستون فروشویی، ناشی از جابجا شدن سنگ‌ریزه‌ها و وجود ترکیبات رسی به مقدار زیاد، نفوذ اکسیژن در محتویات ستون کاهش می‌یابد، که ممکن است منجر به کاهش درصد بازیافت اورانیوم شود. این پدیده در لایه‌های پایینی ستون به علّت تراکم زیاد، محتمل‌تر است. سینتیک انحلال در روش فروشویی ستونی، متناسب با سطح آزاد کانیهای اورانیوم است. هر چه سنگ معدن خردتر شود سطح آزاد بیشتری پدید می‌آید و سینتیک انحلال افزونتر می‌شود. با توجّه به اینکه در فروشویی ستونی از پاره‌های درشت سنگ معدن استفاده می‌شود، رسیدن حلّال به کانیهای موجود در ستون تابع شرایط خاص، از جمله قوانین انتقال جرم خواهد بود. در فروشویی این پاره‌سنگها، سرعت بازیابی عناصر با ارزش، (مانند مس، اورانیوم و . . .) به سرعت نفوذ واکنش‌کننده (مایع شوینده) به داخل سنگ و تماس با کانیهای موجود در آن بستگی دارد [۳]. بر این اساس، انتقال واکنش‌کننده‌ها از طریق نفوذ مایع شوینده به درون منافذ و شکافهای پاره‌سنگهای معدنی، از اهمیّت خاصی برخوردار است. چون مایع شوینده و هوا، دو سیّال (یا دو فاز) مخلوط نشدنی هستند، برای اشغال فضاهای خالی موجود در

www.SID.ir

Archive of SID

نمونهٔ درون ستون، رقابت می‌کنند. دبی محلول شوینده، تأثیر اندکی بر فضای خالی اشغال شده توسّط این محلول دارد؛ عاملهایی که این محلول را کنترل می‌کنند عبارتند از: ابعاد پاره‌سنگها و مقادیر سنگهای ریزتر موجود در ستون. تأثیر این عاملها ناشی از اثر نیروهای موئینگی است [٤]. علاوه بر سینتیک حل شدن کانیها، توزیع یکنواخت دانه‌های کانی، وجود منافذ باز در کانیها، میزان تخلخل موجود در سنگ، اندازه پاره‌سنگ‌های معدنی، دانه بندی سنگ، نفوذپذیری محلول‌های شوینده رقیق و غلظت حلّال در تماس با سطح سنگ و نفوذ کرده به داخل سنگ، از جمله پارامترهای مهمّ و تعیین کننده سرعت شویندگی هستند [٥]. بر اساس مطالعات انجام گرفته سه رژیم متفاوت برای جریان محلول نیز در آزمون‌های آزمایشگاهی با ستون وجود دارد: زهکشی موئینگی بدون جریان محلول، جریان نفوذکننده محلول و طغیان کردن محلول یا غرقاب شدن توده معدنی [٦].

چون استخراج اورانیوم از سنگ معدن به وسیلهٔ فروشویی ستونی، با پدیدهٔ پیچیدهٔ انتقال جرم در محیط متخلخل صورت می‌گیرد و این پدیده همواره با فعل و انفعالهای شیمیایی همراه می‌باشد، بنابراین، تجزیه و تحلیل همه جانبه آن دشوار و در این مقاله تنها به تشریح جنبه‌های کیفی آن اکتفا شده است.

۳- روش تحقیق

مشاهدات عینی منطقه، مطالعات کتابخانه‌ای و گزارشهای داخلی، کسب تجربه‌های آزمایشگاهی از شناخت رفتار آب-فلزشناسی (هیدرومتالورژی) سنگ معدن با انجام‌دادن آزمون‌های سنگ شویی اسیدی به روش متداول، پیش زمینه انجام این کار پژوهشی به روش فروشویی ستونی با اسید سولفوریک در محیط آب دریا بوده است.

۳-۱ تعیین مشخّصات نمونه‌ها به وسیلهٔ XRD[٤]

بر اساس مطالعات XRD بر روی نوع کانی گنبدهای نمکی، کانیهای زیر تشخیص داده شده است:

کانیهای اوّلیه اورانیوم: uraninyte، pitchblende،

کانیهای ثانویه اورانیوم: compreignacite، becquerelite، schopite، uranophane، boltwoodite، haiweete، zippeite

و کانیهای زائد: ژیپس، هالیت، هماتیت، کلسیت، میکا، کلریت، کوارتز، مگنزیت، دولومیت، کانیهای رسی.

۳-۲ آماده سازی ستونها

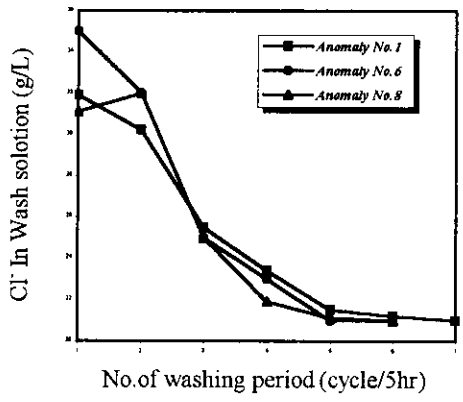
آزمایشها بر روی ۲۰ کیلوگرم کانسنگ معرّف، از نابهنجاریهای ۱ و ٦ و ۸ در سه ستون از جنس PVC، هر یک به قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۲۰ سانتی‌متر در آزمایشگاههای واحد سوخت و کانه آرایی سازمان به انجام رسید. با توجّه به اینکه نسبت قطر ستون به ابعاد پاره‌سنگ‌ها در عمل باید بزرگتر از ٦ باشد، این پاره‌سنگ‌ها از کانهٔ معرّف با دانه بندی ۲۵ـ۲۰ mm انتخاب شد. عیار اورانیوم در نمونه کانسنگ هر نابهنجاری، به روش XRF[٥] تعیین و در جدول ۱ درج شده است. برای جلوگیری از بروز مشکلات فرایندی و وارد شدن خطا در نتایج، نمونه‌های مورد آزمایش با رعایت اصول، به درون ستونها ریخته شدند. ابتدا کف سازی ستونها با استفاده از مقداری سیلکاژل به عنوان صافی، که روی قطعهٔ گونی ریخته و چهار طرف گونی به روی آن برگردانده شده بود، صورت گرفت. برای ریختن نمونهٔ کانی به داخل ستون، ابتدا ستون را در وضع مایل نگهداشته و با یک بیلچه مقداری نمونه به داخل آن می‌ریختیم؛ سپس ستون را به حالت قائم قرار داده و می‌چرخاندیم تا نمونهٔ درون آن در وضع مناسب قرار گیرد و این عمل آنقدر تکرار می‌شد تا ستون به طور یکنواخت از نمونه پر شود.

۳-۳ شستشوی کلرید اضافی سنگ معدن

قبل از شرح عملیات اسید شویی سنگ معدن، ترکیب کلرید اضافی آن، با آب دریا که غلظت کلرید در آن ۲۱ گرم در لیتر بود شسته شد. هنگامی که غلظت کلرید در محلول خروجی، به حد غلظت کلرید آب دریا می‌رسید، شستشو پایان می‌یافت و ستون برای عملیات اصلی سنگ شویی با اسید آماده می‌شد. غلظت کلرید در محلول خروجی به روش عیار سنجی با نیترات نقره و معرّف کرومات پتاسیوم اندازه‌گیری و نتایج حاصل در شکل ۱ نشان داده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱- تغییرات غلظت کلرید آزاد سنگ معدن در عملیات شستشو با آب دریا

۳-٤ فرایند اسیدشویی سنگ معدن

چرخهٔ کاری هر ستون با ۵ لیتر آب دریا در محیط اسید سولفوریک به مدّت ۵ ساعت با سرعت مشخّص بر روی سنگ معدن انجام گرفت. شرایط انجام آزمایش برای هر ستون در جدول ۱ ارائه شده است.

در هر چرخه کاری، حجم محلول خروجی از ستون معمولاً روی ۵ لیتر تنظیم می‌شد. pH و اسیدیته آزاد (باقیمانده) در آن تعیین می‌گردید. چنانچه pH آن به ۱/۵ می‌رسید، کنار گذاشته می‌شد و غلظت اورانیوم در آن تعیین می‌گردید و ملاک تغییر دوره و شروع دوره جدید قرار می‌گرفت. در غیر این صورت به عنوان خوراک چرخهٔ بعد به ستون داده می‌شد. علاوه بر pH ثابت ۱/۵، ثابت ماندن غلظت اورانیوم در محلول خروجی ۲ دوره متوالی، نیز ملاک دیگری برای پایان یافتن دوره و شروع دوره جدید بود. چنانچه تغییرات غلظت اورانیوم در دو یا سه چرخه متوالی (بجز استراحت معمول در دو روز آخر هفته) جزئی بود، مدّت استراحت غیرمتعارف نیز به ستون داده می‌شد. علاوه بر این، اسید غلیظ‌تری نیز بکار می‌رفت و مدّت چرخه کاری ستون نیز افزایش می‌یافت. این عملیات به منظور دستیابی به حداکثر فراوری اورانیوم تا آنجا ادامه می‌یافت که غلظت اورانیوم در محلول خروجی (مایع شوینده) در حدود ppm ۵۰ ثابت بماند. در این حد از غلظت اورانیوم، فرایند سنگ شویی هر نابهنجاری به پایان می‌رسید و غلظت اورانیوم در حجم نهایی حاصل از چند دوره برای محاسبه بازده عمل، تعیین می‌شد. در این حال محتویات ستون به روی سینی منتقل و در هوای محیط خشک می‌شد و به وزن ثابت می‌رسید و۱۵۰ گرم نمونهٔ معرّف، زیر صد مش از آن برای تعیین مقدار اورانیوم باقی مانده تهیّه می‌شد. در این بررسی، غلظت اورانیوم در محلول خروجی به روش ICP[6] و به صورت جامد به روش XRF تعیین و نتایج حاصل در جدولهای شماره ۲ و ۳ و شکل‌های ۲، ۳، ٤ و ۵ ارائه شده است.

٤- بحث و تجزیه و تحلیل نتایج

بیشترین درصد استخراج اورانیوم از سنگ معدن نابهنجاری یک، در دوره هفتم عملیات سنگ شویی بدست آمده است. در دوره اوّل، سنگ معدن در اثر عملیات سنگ شویی آمادگی می‌یابد تا در دوره‌های بعد اورانیوم بیشتری از آن استخراج شود. در دورهٔ چهارم با تعداد چرخهٔ بیشتر، بافت پیچیده سنگ مورد نفوذ شوینده قرار می‌گیرد. درصد بازیافت اورانیوم از این عملیات ۸۵ درصد است که ممکن است در طرّاحی روش تپه‌شویی نیز مدنظر قرار گیرد. نتایج تجربی نشان داد، بکار بردن اسید به مقدار بیشتر در افزایش درصد استخراج اورانیوم مؤثّر نبوده و به صورت اسیدیته آزاد در مایع شوینده باقی می‌ماند و بیانگر این مطلب است که بخشی از اورانیوم به نحوی در تماس با اسید کم محلول است. عاملی که به تنهایی در بازیافت اورانیوم و کاهش دوره

جدول ۱- شرایط فراوری اورانیوم از کانسارهای مختلف با آب دریا در محیط اسید سولفوریک به روش فروشویی ستونی

نابهنجاری	عیار اورانیوم در سنگ ppm	وزن نمونه Kg	اندازه پاره‌سنگها mm	دبی lit/h	دما °C	pH	L/S	غلظت اسید سولفوریک
۱	۵۲۱۰	۲۰	۲۰-۲۵	۱	۸-۳۵	۱/۵	۰/۲۵	۲ دوره اول ۲ % ۲٤ دوره ۳%
٦	۸۷۲	۲۰	۲۰-۲۵	۱	۸-۳۵	۱/۵	۰/۲۵	۱٤ دوره ۳%
۸	۹۵۱۳	۲۰	۲۰-۲۵	۱ ۱-۰/۱ در سه دوره آخر	-	-	-	۱دوره ۲ % ۲۹ دوره ۳% ۱۰ دوره آخر ۵ %

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲- نتایج حاصل از عملیات سنگ شوئی اسیدی با آب دریا (با غلظت ۱۹۰۲۱< گرم کلرید در لیتر) به روش فروشوئی ستونی

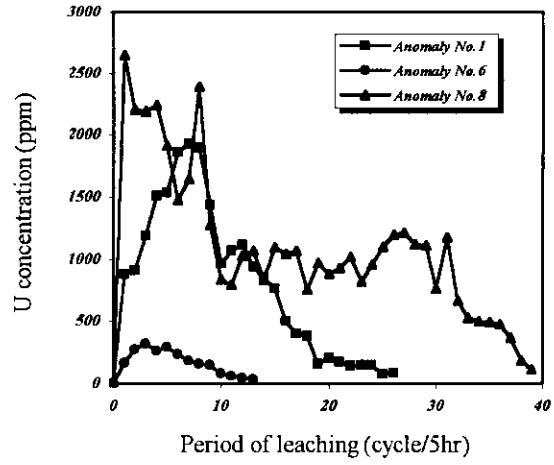
شماره نابهنجاری	دوره‌ها	دوره یا پایانی	مدت بارش اسید در هر چرخه	تعداد چرخه‌های کاری	مدت کار ستون در هر دوره (ساعت)	حجم آب مصرف شده در پایان هر دوره (لیتر)	وزن اسید مصرف شده در هر دوره (kg/T)	وزن اسید آزاد در هر پریود (Kg/T)	درصد بازیافت اورانیوم	
۱	۱	پنجم	۵	۹	۴۵	۲۵	۲۹/۷	۱۰/۷	۲۳/۱	از روی دوره ۷۸/۱۰
	۲	دهم	۵	۲۶	۱۳۰	۵۰	۱۹/۴	۱۵/۶	۳۱/۴	از روی پسمان ۸۵/۳
	۳	پانزدهم	۵	۵۳	۲۶۵	۷۵	۳۶/۵	۳/۹	۱۶	از روی حجم کل مایع شونده ۸۸/۶
	۴	بیستم	۵	۷۳	۳۶۵	۱۰۰	۳۶/۵	۳/۹	۵/۱	
	۵	بیست و ششم	۵	۱۲۷	۶۳۵	۱۳۰	۴۹/۹	۳/۹	۲/۴	
	پنج	۲۶ دوره	۵ ساعت	۲۸۸چرخه	۱۴۴۰ ساعت	۱۳۰ لیتر	۱۷۲/۳ کیلوگرم / تن	۳۸/۲ کیلوگرم / تن	۷۸/۱	
۶	۱	چهارم	۵	۴	۲۰	۲۰	۲۷/۷	۴/۴	۲۴/۶	از روی دوره ۶۵/۵
	۲	هشتم	۵	۷	۳۵	۴۰	۲۳/۶	۸/۸۱	۲۶/۴	ازروی پسمان ۷۵/۴
	۳	یازده	۵							ازروی حجم کل مایع شونده ۷۷/۹
		دوازده	۵	۱۲	۶۰	۶۰			۱۲/۳	
		سیزده	۵	۳	۱۵	۶۵	۲۱/۸	۷/۹	۱/۳	
		چهارده	۵	۳	۱۵	۷۰	۱۴/۹	۱/۳	۰/۹۴	
	سه پریود	۱۴ دوره	۵ ساعت	۲۹ چرخه	۱۴۵ ساعت	۷۰ لیتر	۸۸ کیلوگرم/تن	۲۳/۵ کیلوگرم/تن	۶۵/۵	
۸	۱	دهم	۵	۲۲	۱۱۰	۲۵	۷۸/۳		۳۹/۶	از روی دوره ۹۱/۷
	۲	بیستم	۵	۳۲	۱۶۰	۵۰	۸۰/۹		۲۰/۱	ازروی پسمان ۹۸
	۳	سی ام	۵	۸۷	۴۳۵	۷۵	۸۰/۹		۲۱/۱	ازروی حجم کل مایع شونده ۹۹/۹
	۴	سی هفتم	۲۴	۱۷۴	۴۱۷۶	۱۸۵			۱۰	
		سی هشتم	۴۸	۴۱	۱۹۶۸	۱۹۰			۰/۴۷	
		سی نهم	۴۸	۴	۱۹۲	۱۹۵	۹۵/۸		۰/۲۹	
		چهلم	۴۸	۴	۱۹۲	۲۰۰			۰/۱۸	
	چهار پریود	چهل دوره		۳۶۴ چرخه	۷۲۳۳ ساعت	۲۰۰ لیتر	۳۳۶ کیلو/تن		۹۱/۷	

جدول ۳ - نتایج حاصل از عملیات سنگ شوئی اسیدی با آب دریا (Cl^- >۲۱ gr/l) و با آب شیرین به روش فروشویی ستونی [۷]

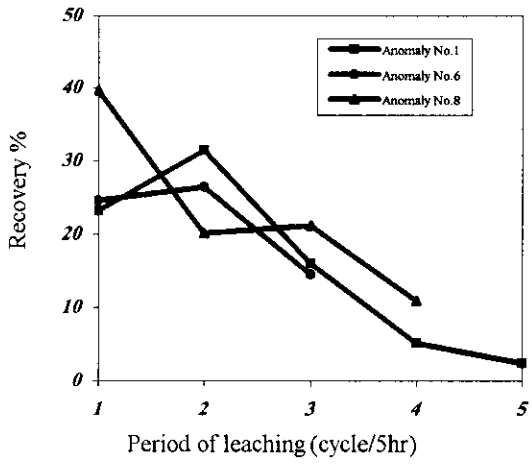
شماره نابهنجاری	درصد غلظت اسید	L/S	تعداد دوره‌ها	حجم مایع شونده نهایی (L)	مصرف اسید (Kg/T)	اسید به آزاد (Kg/T)	غلظت Cl^- در محلول (ppm)	درصد بازیافت اورانیوم
۱	۳	۰/۲۵	۳۰	۱۳۱/۳	۱۰۹/۲	۱۱/۹	۲۴۷۴۲	۷۸/۶
	۳	۰/۵	۱۲	۱۳۴/۴	۹۴	۲۰/۶		۷۸/۵
۶	۳	۰/۲۵	۱۹	۹۰	۱۴۱	۱۸/۱۶	۷۰۹	۸۰
	۳	۰/۲۵	۱۵	۷۱/۸	۱۱۶/۴	۵/۲	۲۳۵۱۸	۸۰
۸	۳	۰/۲۵	۳۸	۱۷۶/۳	۱۰۶/۵	۳۸/۹	۵۶۸	۹۵/۵
	۳	۰/۲۵	۳۳	۱۵۵/۳	۱۰۱/۲	۲۰/۸	۲۵۲۰۶	۹۰/۶
	۳	۰/۵	۱۰	۱۱۴/۵	۷۵/۲	۱/۲۵	۷۶۲	۸۳/۱
	۱/۵	۰/۵	۲۵	۲۵۴/۵	۶۰/۵	۲۳/۶		۸۳/۹

www.SID.ir

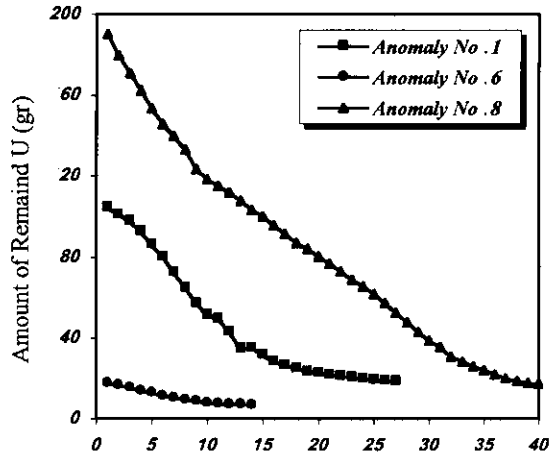
Archive of SID



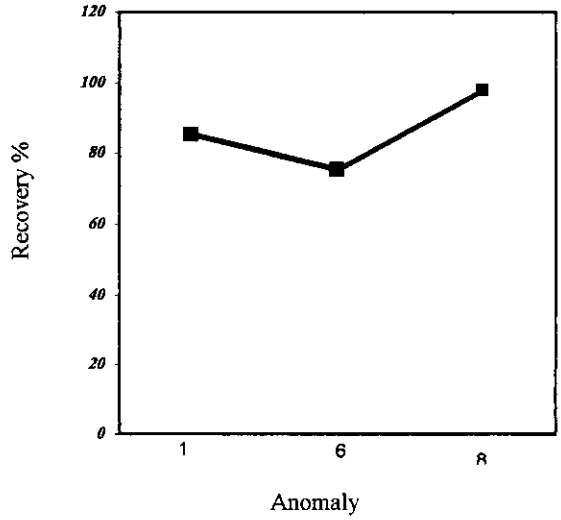
شکل ۲- تغییرات غلظت اورانیوم در مایع شونده در هر دوره



شکل ۵- درصد بازیافت اورانیوم در هر دوره



شکل ۳- وزن اورانیوم در پسماند هر دوره



شکل ٤- درصد بازیافت اورانیوم در نابهنجاریهای مختلف

مؤثّر نیست، دبی مایع شوینده است. *کاهش دبی و افزایش دوره با هم دو عامل مؤثّر* در افزایش بازیافت اورانیوم به حساب می‌آیند. اسید با غلظت ۳٪، تنها دوره عملیات را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مقایسهٔ نسبت مایع به جامد L/S=۰/۵ با آب شیرین و L/S=۰/۲۵ با آب دریا، در جدول ۳، نشان می‌دهد که دوره عملیات بیش از ٦۰٪ کاهش می‌یابد. بر پایه این مقایسه‌ها، عوامل کارآمد در بازیافت اورانیوم را می‌توان اسید با غلظت ٦٪ با دوره عملیات کمتر، نسبت L/S=۰/۵، اسید با غلظت ۳٪ با دوره عملیات بیشتر انتخاب کرد. اقتصادی‌ترین شرایط سنگ شویی با آب شیرین یا آب دریا به روش فروشویی تپه‌ای، غلظت اسید ۳٪، L/S=۰/۵، دبی زیاد، pH برابر ۱/۵ خواهند بود. به علّت وجود کربناتهای کلسیوم و سدیوم در نابهنجاری ٦، مصرف اسید در آن بالا و ایجاد پلهای گچی (SO_4Ca و $2H_2O$) به وسیلهٔ اسید سولفوریک محتمل است و امکان دارد در جذب یا به تله افتادن اورانیوم و کاهش درصد بازیافت آن مؤثّر باشد. با این وجود ۷۵/٤٪ اورانیوم از سنگ بازیافت شده است. کارایی آب دریا در این نابهنجاری در مقایسه با آب شیرین، منجر به کاهش دورهٔ عملیات و مقدار مصرف اسید شده، علاوه بر این، باقیمانده اسیدیته آزاد در مایع شوینده نیز کاهش یافته است. با توجّه به آثار مثبت نسبت L/S=۰/۵ با آب شیرین (در جدول ۳) و تأثیر آن در کاهش قابل توجّه دوره عملیات، چنانچه این نسبت نیز در آزمایش آب دریا به کار برده می‌شد، عملیات سنگ شویی با آب دریا کمتر از ١٤ دوره به پایان می‌رسید. بر پایه این نتایج، بهترین شرایط با آب شیرین و آب دریا، و قابل استفاده در

www.SID.ir

Archive of SID

طرّاحی تپه، اسید با غلظت ۳٪، L/S=۰/۵ دبی زیاد، pH=۱/۵ پیشنهاد می‌شود.

با ۳۰ دوره عملیات سنگ شویی اسیدی، ۸۱ درصد اورانیوم نابهنجاری ۸ از سنگ معدن آن قابل استخراج است و بقیه در اسید به غلظت ۳٪ کم حل می‌شود. از این رو شرایط دیگری از جمله: استراحت ستون، طولانی بودن مدّت تماس اسید با سنگ، و افزودن غلظت اسید با چرخهٔ کاری کمتر اعمال شد. در این شرایط، طولانی کردن زمان تماس اسید با سنگ از طریق کاستن دبی مایع شوینده (۲۴ تا ۴۸ ساعت)، در افزایش درصد بازیافت اورانیوم مؤثّر بود امّا مدّت عملیات استحصال به درازا کشید. اثر استراحت دادن به ستون در پایان دو دوره عملیات ظاهر می‌شود. چنانچه اسید با غلظت ۶٪ بکار رود این اثر در پایان دوره ظاهر می‌شود. در سه دوره آخر، با چرخهٔ کاری کمتر، قابلیت اسیدیته محلول تازه تهیّه شده درصد بازیافت اورانیوم را به مقدار جزئی افزایش داد. بر این اساس، چنانچه به طور مداوم، محلول خوراک تازه به ستون داده می‌شد، هرچند اسید بیشتری مصرف می‌شد، امّا دوره عملیات با چرخهٔ کمتری، به پایان می رسید. pH برابر ۱/۵ تا ۳۰ دوره عملیات اسید شویی، از شرایط مناسب محسوب می‌شود. نتایج حاصل از شوینده‌گی با آب شیرین نشان می‌دهد که اسید با غلظت کمتر از ۳٪ در افزایش بازیافت اورانیوم مؤثّر است (جدول۳). غلظت ۳٪ اسید، تنها موجب کاهش دوره می‌گردد. عوامل اساسی مؤثّر در بازیافت اورانیوم، عبارتند از: طولانی بودن مدّت عملیات سنگ شویی، استراحت دادن به ستون. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که L/S=۰/۵ با آب شیرین به مقدار قابل توجّهی دوره عملیات را کاهش می‌دهد، امّا افزایش درصد بازیافت اورانیوم به طولانی شدن دوره ارتباط دارد نه به اسیدیته آزاد. بنابراین بهترین شرایط فراوری اورانیوم از سنگ معدن نابهنجاری ۸ با آب شیرین و آب دریا، که قابل اجرا در طرّاحی روش تپه شویی می‌باشند عبارتند از: غلظت اسید کمتر از ۳٪، L/S=۰/۵، دبی زیاد، pH برابر ۱/۵. با توجّه به اینکه در جدول۳، نسبت L/S=۰/۵، با استفاده از آب شیرین نتیجه خوبی ارائه داده است، چنانچه از این نسبت در آزمایشهای با آب دریا استفاده می‌شد، حجم آب محاسبه شده (حداقل برای نابهنجاریهای ۶ و ۸ با تناژ مشخّص) که بر مبنای L/S=۰/۲۵ و مشخّصات دیگر انجام گرفته است (حدود ۹ مترمکعب برای هر تن سنگ معدن) فراتر خواهد رفت. از طرفی تهیّه چنین آبی در منطقه بندرعباس مشکل و پرهزینه بوده و استفاده از آب دریا در عملیات سنگ شویی مناسب‌تر است. این کار مستلزم آن است که استخراج اورانیوم از مایع شوینده دارای کلرید زیاد امکان پذیر باشد؛ در غیر این صورت تحقق یافتن اندیشهٔ استفاده از آب دریا در فرایند سنگ معدن گنبدهای نمکی، هنوز مسیر مناسبی را طی نکرده است. در پژوهش‌های جداگانه، نظریه استخراج اورانیوم و سازوکار شرایط اجرایی آن به وسیله شوینده‌هایی با کلرید زیاد بررسی شده [۸]، و برای تهیّه کیک زرد از این محلول‌ها، روشی پیشنهاد شده است [۹].

۵- نتیجه‌گیری

استفاده از آب دریا و آب شیرین در فرایند بازیافت اورانیوم از سنگ معدن با اعمال دوره‌های متفاوت به یک نسبت تأثیرگذارند. استفاده از آب دریا در عملیات سنگ شویی اسیدی، دارای مزایایی از جمله کاهش دوره فرایند، مصرف اسید کمتر، کاهش غلظت اسیدیته آزاد در مایع شوینده، مصرف آب کمتر، تولید مایع کم با غلظت اورانیوم بیشتر و کاستن هزینه عملیات سنگ شویی خواهد بود که آب شیرین فاقد آنها است. نتایج کلریدشویی با آب شیرین (در آزمایشگاه) نشان داد که ۲ تا ۲/۵ برابر وزن سنگ معدن به آب نیاز است تا کلرید اضافی و آزاد از سنگ خارج شود. آب دریا به علّت اشباع نبودن ممکن است به نسبت L/S=۰/۲۵، ۷۹ درصد کلرید آزاد سنگ را به صورت ترکیب قابل حل NaCl خارج کرده و عملیات سنگ شویی با آب شیرین را مقرون به صرفه نماید. نتایج فراوری اورانیوم با آب دریا بدون شستشوی کلرید اضافه از سنگ معدن نشان داد که حضور کلرید آزاد در افزایش بازیافت اورانیوم از نابهنجاریهای ۶ و ۸ به میزان ۵٪ مؤثّر بوده، و در نابهنجاری ۱ تأثیر منفی داشته است. بر این اساس، شستشوی کلرید از این دو نابهنجاری در عملیات اسید شویی با آب دریا، به لحاظ اقتصادی روش مناسبی به نظر نمی‌رسد، و تنها ارزش تحقیقاتی دارد. این پژوهش نشان داد، پس از چند دورهٔ عمل که مواد مصرف کننده اسید کم می‌شوند، pH به کندی افزایش می‌یابد. در این حالت اگر بخشی از اورانیوم در بافت پیچیده سنگ باقی مانده باشد، pH ثابت ۱/۵ نباید ملاک پایان دوره پیشین و آغاز دوره جدید در نظر گرفته

www.SID.ir

Archive of SID

شود، زیرا تعداد چرخه‌ها افزایش می‌یابد و مدّت عملیات به درازا می‌کشد. در این مطالعه، اسید با غلظت ۳٪ در فراوری اورانیوم از کانسار نابهنجاریهای ۱ و ٦ و برای نابهنجاری ۸ تا دورهٔ ۳۰ و نسبت L/S=۰/۲۵ عامل‌های مناسب بوده‌اند.

پی‌نوشت‌ها:

۱-Column Leaching
۲-Heap Leaching
۳-Claymineral
٤-X Ray Differactometer
٥-X Ray Fluorescence
٦-Inductively Coupled Plasma

References:

1. IAEA, "Uranium extraction technology," Technical Report Series, No. 359, Vienna (1993).
2. B. R. Benner and R. J. Roman, "Determination of the effective diffusivity of H^+ ions in a copper ore," Trans. SME/AIME, **256**, 103-105 (1974).
3. R. W. Bartlett, "Metal extraction from ores by heap leaching," Metallurgical and Materials Transactions B, **28B**, 529-545 (1997).
4. R. W. Bartlett, "Solution mining, leaching and fluid recovery of materials," Godon and Breach, NewYork. NY (1992).
5. W. J. Schlitt: in Au and Ag heap and dump leaching practice, J. B. Hiskey, ed., AIME, NewYork. NY, 69-83 (1984).

٦. ا. قریب، "امکان سنجی بررسی‌های فنی، اقتصادی،" پروژه هیپ لچینگ بندر عباس (۱۳۷۰).

۷. ج. کمالی، ف. ندافی، ا. جباری راد، گزارش علمی فنی، "لیچینگ سنگ معدن اورانیوم، آنومالی‌های ۱ و ٦ و ۸ گنبدهای نمکی بندرعباس توسط اسید سولفوریک در مقیاس نیمه صنعتی کوچک،" (۱۳۷۲).

۸. ک. فاطمی، م. مددی، "جداسازی یون کلراید از لیچ لیکور و تأثیر آن بر استخراج و اندازه‌گیری اورانیوم،" مجله علوم و فنون هسته‌ای سازمان انرژی اتمی ایران، شماره ۲۵، ٥٥-٤۸ (۱۳۸۱).

۹. ک. فاطمی، "تهیّه کیک زرد از لیچ لیکور حاوی کلر فراوان،" نشریه علمی سازمان انرژی اتمی ایران، شماره ۱۸، ٥٦-٤٦ (۱۳۷۸).

www.SID.ir