



## فراوری اورانیوم از کانسنگ نابهنجاری‌های ۱، ۶ 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: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران- ایران

**چکیده:** روش فروشویی ستونی یکی از روش‌های آزمایشگاهی آزمون مایع شوینده به منظور بررسی ویژگی‌های کانه اورانیوم است که با توجه 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 طراحی 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<sup>(۱)</sup> انجام گرفت. نتایج این کار آزمایشگاهی نشان داد که حداکثر، ۸۵ درصد اورانیوم از نمونه 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 ۶ 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 مؤثر است. یافته‌های این پژوهش، قابلیت‌های ویژه 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 هزینه سنگین عملیات سنگ شویی، در پاسخ‌گویی به وسایل فنی مورد نیاز در روش فروشویی تپه‌ای<sup>(۲)</sup> ارزشمند و اقتصادی نشان می‌دهند. این کار تحقیقی نخستین مرحله پژوهش درباره روش استخراج و تغلیظ اورانیوم از سنگ معدن و محلول‌های کلردار است. یافته‌های تجربی در این زمینه را می‌توان الگویی برای بررسی شرایط فروشویی تپه‌ای اورانیوم از گنبد‌های نمکی-گچین بندرعباس بکار برد.

**واژه‌های کلیدی:** گنبد‌های نمکی-گچین، فروشویی ستونی، فروشویی تپه‌ای، 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

۱۳۸۲/۴/۱۵

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

include: reduction of the operational period, less reagent 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 complex technical facilities can be reduced. The present work is the first research project on the uranium leaching 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

فروشویی مؤثرند، از جمله: خواص کانی، دانه‌بندی، درجه آزادی، غلظت حلال و کنترل آن. گردآوری محلول خروجی، ثابت نگه داشتن حجم خوراک در هر چرخه عمل، رعایت اصول نمونه برداری و توزین دقیق نمونه‌ها، رعایت زمان استراحت ستون (در صورت مؤثر 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 طراحی فنی تپه‌های 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 مؤثر 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 علت افت سطح توده معدنی در ستون فروشویی، ناشی از جابجا شدن

**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 متأثر از این مرحله‌اند. سنگ شویی ستونی روشی با بستر ثابت است که فراوری مطلوب اورانیوم با آن به پارامترهای مهم و شرایط ویژه‌ای از جمله ساختار سنگ معدن، قابلیت نفوذ حلال 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 مؤثر در افزایش بازیافت اورانیوم وجود ندارد، و کلیه عملیات منحصراً در شرایط بستر ثابت انجام می‌گیرد، روشی دراز مدت، ارزان، با مصرف اسید بیشتر به حساب می‌آید. در این روش، طریقه انباشتن ستون از کانه (توده معدنی معرّف) بسیار مهم 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 علت وجود کانی‌های آهکی و رسی<sup>(۳)</sup> و تأثیر اسید بر آنها، سولفات کلسیوم و ترکیبات نامطلوب دیگر، لایه نفوذناپذیر رسی بوجود می‌آید که در فرایند استخراج ایجاد اختلال می‌کند. پارامترهای مختلفی، بسته به نوع عملیات، در سینتیک واکنشهای



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 [۱].

چون استخراج اورانیوم از سنگ معدن به وسیله فروشویی ستونی، با پدیده پیچیده انتقال جرم در محیط متخلخل صورت می‌گیرد و این پدیده همواره با فعل و انفعالی‌های 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 انجام دادن آزمون‌های سنگ شویی اسیدی به روش متداول، پیش‌زمینه انجام این کار پژوهشی به روش فروشویی ستونی با اسید سولفوریک در محیط آب دریا بوده است.

### ۳-۱ تعیین مشخصات نمونه‌ها به وسیله XRD<sup>(۴)</sup>

بر اساس مطالعات XRD بر روی نوع کانی گنبد‌های نمکی، کانیهای زیر تشخیص داده شده است: کانیهای اولیه اورانیوم: uraninite، pitchblende، کانیهای ثانویه اورانیوم: compreignacite، becquerelite، zippeite، haiweete، boltwoodite، uranophane، schopite 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 ۶ و ۸ در سه ستون از جنس PVC، هر یک به قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۲۰ سانتی‌متر در آزمایشگاههای واحد سوخت و کانه

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 علت 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 توجه به اینکه در فروشویی ستونی از پاره‌های درشت سنگ معدن استفاده می‌شود، رسیدن حلال 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 اهمیت خاصی برخوردار است. چون مایع شوینده و هوا، دو سیال (یا دو فاز) مخلوط نشدنی هستند، برای اشغال فضاهای خالی موجود در نمونه درون ستون، رقابت می‌کنند. دبی محلول شوینده، تأثیر اندکی بر فضای خالی اشغال شده توسط 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 [۴].

علاوه بر سینتیک حل شدن کانیها، توزیع یکنواخت دانه‌های کانی، وجود منافذ باز در کانیها، میزان تخلخل موجود در سنگ، اندازه پاره سنگهای معدنی، دانه بندی سنگ، نفوذپذیری محلول‌های شوینده رقیق و غلظت حلال در تماس با سطح سنگ و نفوذ کرده به داخل سنگ، از جمله پارامترهای مهم و تعیین کننده سرعت شویندگی هستند [۵]. بر اساس مطالعات انجام گرفته سه رژیم



No. of washing period (cycle/5hr)

شكل ۱- تغييرات غلظت كلريد آزاد سنگ معدن در عمليات شستشو با آب دريا

### ۳-۴ فرآيند اسيدشويي سنگ معدن

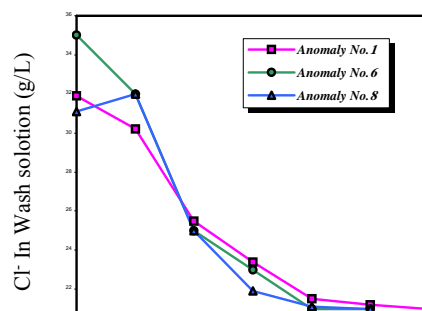
چرخه کاري هر ستون با ۵ ليتر آب دريا در محيط اسيد سولفوريك به مدت ۵ ساعت با سرعت مشخص بر روي سنگ معدن انجام گرفت. شرايط انجام آزمایش براي هر ستون در جدول ۱ ارائه شده است.

در هر چرخه کاري، حجم محلول خروجي از ستون معمولاً روي ۵ ليتر تنظيم مي‌شود. pH و اسيديته آزاد (باقيمانده) در آن تعيين مي‌گردد. چنانچه pH آن به ۱/۵ مي‌رسد، کنار گذاشته مي‌شود و غلظت اورانيوم در آن تعيين مي‌گردد و ملاک تغيير دوره و شروع دوره جديد قرار مي‌گرفت. در غير اين صورت به عنوان خوراك چرخه بعد به ستون داده مي‌شود. علاوه بر pH ثابت ۱/۵، ثابت ماندن غلظت اورانيوم در ۱۰-۱۱ خروجي ۲ دوره متوالي، نيز يري براي پايان يافتن دوره دوره جديد بود. چنانچه غلظت اورانيوم در دو يا سه متوالي (بجز استراحت ر دو روز آخر هفته) جزئي استراحت غيرمتعارف نيز داده مي‌شود. علاوه بر اين، ميظتري نيز بكار مي‌رفت و نه کاري ستون نيز افزايش اين عمليات به منظور دستيابي به حداکثر فراوري اورانيوم تا آنجا ادامه مي‌يافت که غلظت اورانيوم در محلول خروجي (مايع شوينده) در حدود ۵۰ ppm ثابت بماند. در اين حد از غلظت اورانيوم، فرآيند سنگ شويي هر نابهنجاري به پايان مي‌رسيد و غلظت اورانيوم در حجم نهايي حاصل از چند دوره براي محاسبه بازده عمل، تعيين مي‌شود. در اين حال محتويات ستون به روي سيني منتقل

آرآيي سازمان به انجام رسيد. با توجه به اينکه نسبت قطر ستون به ابعاد پاره‌سنگها در عمل بايد بزرگتر از ۶ باشد، اين پاره‌سنگها از کانه معرف با دانه بندي mm ۲۰-۲۵ انتخاب شد. عيار اورانيوم در نمونه كانسنگ هر نابهنجاري، به روش XRF<sup>(۵)</sup> تعيين و در جدول ۱ درج شده است. براي جلوگيري از بروز مشکلات فرايندي و وارد شدن خطا در نتايج، نمونه‌هاي مورد آزمون با رعايت اصول، به درون ستونها ريخته شدند. ابتدا کف ساري ستونها با استفاده از مقداري سيلکاژل به عنوان صافي، که روي قطعه گوني ريخته و چهار طرف گوني به روي آن برگردانده شده بود، صورت گرفت. براي ريختن نمونه کاني به داخل ستون، ابتدا ستون را در وضع مایل نگهداشته و با يك بيلچه مقداري نمونه به داخل آن مي‌ريختيم؛ سپس ستون را به حالت قائم قرار داده و مي‌چرخانديم تا نمونه درون آن در وضع مناسب قرار گيرد و اين عمل آنقدر تکرار مي‌شد تا ستون به طور يکنواخت از نمونه پر شود.

### ۳-۳ شستشوي كلريد اضافي سنگ معدن

قبل از شرح عمليات اسيد شويي سنگ معدن، تركيب كلريد اضافي آن، با آب دريا که غلظت كلريد در آن ۲۱ گرم در ليتر بود شسته شد. هنگامي که غلظت كلريد در محلول خروجي، به حد غلظت كلريد آب دريا مي‌رسيد، شستشو پايان مي‌يافت و ستون براي عمليات اصلي سنگ شويي با اسيد آماده مي‌شود. غلظت كلريد در محلول خروجي به روش عيار سنجي با نيترات نقره و معرف کرومات پتاسيوم اندازه‌گيري و نتايج حاصل





می‌یابد تا در دوره‌های بعد اورانیوم بیشتری از آن استخراج شود. در دوره چهارم با تعداد چرخه بیشتر، بافت پیچیده سنگ مورد نفوذ شوینده قرار می‌گیرد. درصد بازیافت اورانیوم از این عملیات ۸۵ درصد است که ممکن است در طراحی روش تپه‌شویی نیز مدنظر قرار گیرد. نتایج تجربی نشان داد، بکار بردن اسید به مقدار بیشتر در افزایش درصد استخراج اورانیوم مؤثر 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

و در هوای محیط خشک می‌شد و به وزن ثابت می‌رسید و ۱۵۰ گرم نمونه معرّف،

زیر صد مش از آن برای تعیین مقدار اورانیوم باقی مانده تهیه می‌شد. در این بررسی، غلظت اورانیوم در محلول خروجی به روش ICP<sup>(۶)</sup> و به صورت جامد به روش XRF تعیین و نتایج حاصل در جدولهای شماره ۲ و ۳ و شکل‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ ارائه شده است.

#### ۴- 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 اول، سنگ معدن در اثر عملیات سنگ شویی آمادگی

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

نابند جاری	عبار اورانیوم در سنگ ppm	وزن نمونه Kg	اندازه پاره سنگ 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% ۲۴ دوره ۳%
۶	۸۷۲	۲۰	۲۰-۲۵	۱	۸-۳۵	۱/۵	۰/۲۵	۱۴ دوره ۳%
۸	۹۵۱۳	۲۰	۲۰-۲۵	۱-۱/۰ در سه دوره آخر	-	-	-	۱۰ دوره ۲% ۲۹ دوره ۳% ۱۰ دوره آخر ۵%

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

نابهنجار شماره	دوره ها	پایان دوره	مقدار اسید در چرخه	مقدار چرخه های کاری	تعداد چرخه های (ساعت)	مقدار اسید در هر دوره (متر مکعب)	مقدار آب در هر چرخه (kg/T)	وزن اسید مصرف شده در هر دوره	وزن اسید آزاد در هر چرخه (Kg/T)	درصد بازیافت اورانیوم
۱	۱	پنجم	۵	۹	۴۵	۲۵	۲۹/۷	۱۰/۷	۲۳	از روی دوره ۷۸/۱ از روی پسمان ۸۵/۳ از روی حجم کل مایع شوینده ۸۸/۶
	۲	هفتم	۵	۲۶	۱۳۰	۵۰	۱۹/۴	۱۵/۶	۳۱	
	۳	پانزدهم	۵	۵۳	۲۶۵	۷۵	۳۶/۵	۳/۹	۱۶	
	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	
۶	پنج	۲۶ دوره	۵ ساعت	۲۸۸ چرخه	۱۴۴۰ ساعت	۱۳۰ لیتر	۱۷۲/۳ کیلوگرم / تن	۳۸/۲ کیلوگرم / تن	۷۸	
	۱	چهارم	۵	۴	۲۰	۲۰	۲۷/۷	۴/۴	۲۴	از روی دوره ۶۵/۵
۲	هشتم	۵	۷	۳۵	۴۰	۲۳/۶	۸/۸۱	۲۶		



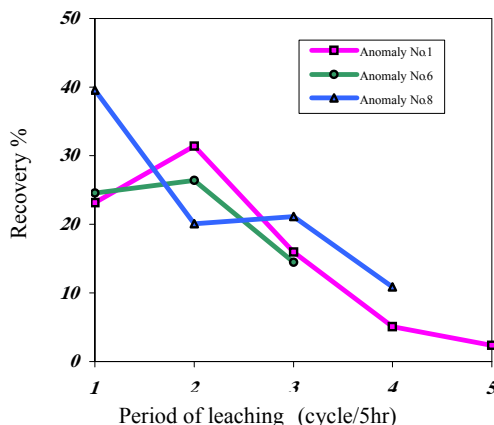
	۳/			۶۰	۶۰	۱۲	۵	يازده دوازده	۳	
	۱۲/	۷/۹	۲۱/۸	۶۵	۱۵	۲	۵	۵		
	۱/۳	۱/۳	۱۴/۹	۷۰	۱۵	۳	۵	سيزده چهارده		
	۰/۹۴							۵		
	۰									
	۰/۵	۲۳/۵ كيلوگرم /تن	۸۸ كيلوگرم/ت ن	۷۰ ليتر	۱۴۵ ساعت	۲۹ چرخه	۵ ساعت	۱۴ دوره	سه پري- ود	
از روي دوره ۹۱/۷ از روي پسمان ۹۸ از روي حجم كل مايع شوينده ۹۹/۹	۶/		۷۸/۳	۲۵	۱۱۰	۲۲	۵	دهم	۱	۸
	۳۹/									
	۱/		۸۰/۹	۵۰	۱۶۰	۳۲	۵	بيستم	۲	
	۲۰/									
	۱/		۸۰/۹	۷۵	۴۳۵	۸۷	۵	سي ام	۳	
	۲۱/									
۱۰/				۱۸۵	۴۱۷۶	۱۷۴	۲۴	سي هفتم	۴	
۴۷/			۱۹۰	۱۹۶۸	۴۱	۴۸	سي هشتم			
۰/		۹۵/۸	۱۹۵	۱۹۲	۴	۴۸	سي نهم			
۲۹/			۲۰۰	۱۹۲	۴	۴۸	سي چهل			
۰/										
۱۸/										
۰/										
۷/		۳۳۶ كيلو/تن	۲۰۰ ليتر	۷۲۳۳ ساعت	۳۶۴ چرخه			چهار دوره	چهار پريو د	
۹۱/										

جدول ۳ - نتايج حاصل از عمليات سنگ شوي اسيدي با آب دريا ( $Cl^- > 21 \text{ gr/l}$ ) و با آب شيرين به روش فروشويي ستوني [ ۷ ]

شماره نابهن جاري	درصد غلظت اسيد	L/S	تعداد دوره ها	حجم مايع شوينده نهايي (L)	مصرف اسيد (Kg/T)	اسيديته آزاد (Kg/T)	غلظت $Cl^-$ در محلول (ppm)	درصد بازيافت اورانيوم
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

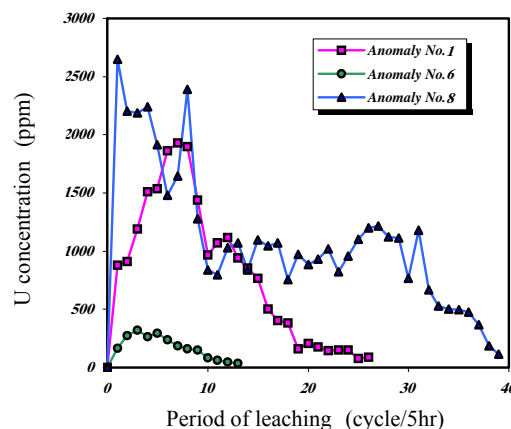


شکل ۴- درصد بازیافت اورانیوم در نابهنجاریهای مختلف

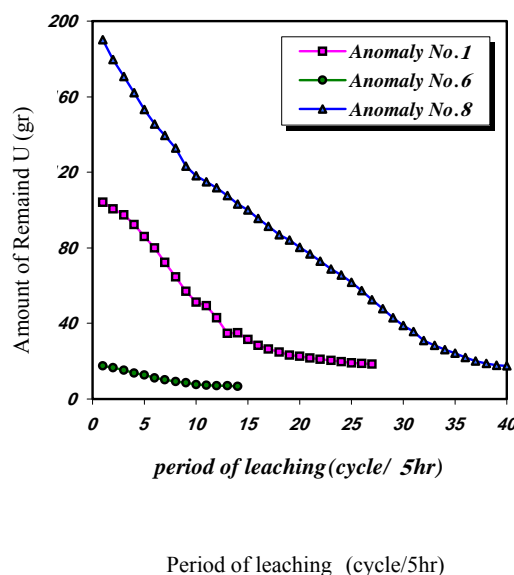


شکل ۵- درصد بازیافت اورانیوم در هر دوره

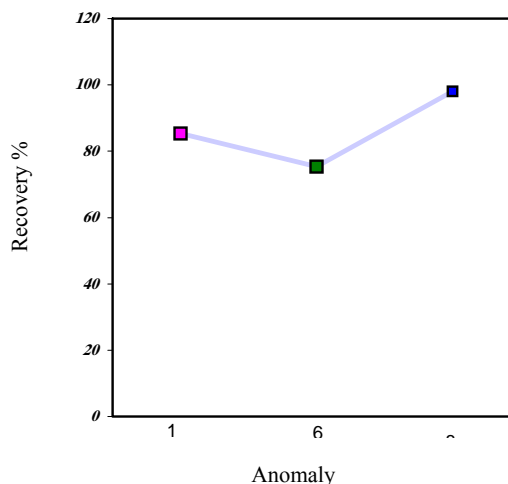
مؤثر نیست، دبی مایع شوینده است. کاهش دبی و افزایش دوره با هم دو عامل مؤثر در افزایش بازیافت اورانیوم به حساب می‌آیند. اسید با غلظت ۳٪، تنها دوره عملیات را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مقایسه نسبت مایع به جامد با آب شیرین و  $L/S=0/25$  در جدول ۳، نشان می‌دهد که دوره عملیات بیش از ۶۰٪ کاهش می‌یابد. بر پایه این مقایسه ها، عوامل کارآمد در بازیافت اورانیوم را می‌توان اسید با غلظت ۶٪ با دوره عملیات کمتر، نسبت  $L/S=0/5$ ، 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٪،  $L/S=0/5$ ، دبی زیاد، pH برابر ۱/۵ خواهند بود. به علت وجود کربناتهای کلسیوم و سدیم در نابهنجاری ۶، مصرف اسید در آن بالا و ایجاد پله‌های گچی ( $SO_4Ca$  و  $2H_2O$ ) به وسیله اسید سولفوریک محتمل است و امکان دارد در جذب یا به تله افتادن اورانیوم و کاهش درصد بازیافت آن مؤثر باشد. با این وجود ۷۵/۴٪ اورانیوم از سنگ بازیافت شده است. کارایی آب دریا در این نابهنجاری در مقایسه با آب شیرین، منجر به کاهش دوره عملیات



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



شکل ۳- وزن اورانیوم پسماند هر دوره





اساسي مؤثر در بازيفت اورانيوم، عبارتند از: طولاني بودن مدت عمليات سنگ شويي، استراحت دادن به ستون. مقايسه نتايج نشان مي دهد كه  $L/S=0/5$  با آب شيرين به مقدار قابل توجهي دوره عمليات را کاهش مي دهد، اما افزايش درصد بازيفت اورانيوم به طولاني شدن دوره ارتباط دارد نه به اسيدپته آزاد. بنابراین بهترین شرایط فراوري اورانيوم از سنگ معدن نابهنجاري ۸ با آب شيرين و آب دريا، كه قابل اجرا در طراحي روش تپه شويي مي باشند عبارتند از: غلظت اسيد كمتر از ۳٪،  $L/S=0/5$ ، دبي زياد، pH برابر ۱/۵. با توجه به اينكه در جدول ۳، نسبت  $L/S=0/5$ ، با استفاده از آب شيرين نتيجه خوبي ارائه داده است، چنانچه از اين نسبت در آزمايشهاي با آب دريا استفاده مي شد، حجم آب محاسبه شده (حداقل براي نابهنجاريهاي ۶ و ۸ با تناژ مشخص) كه بر مبناي  $L/S=0/25$  و مشخصات ديگر انجام گرفته است (حدود ۹ مترمكعب براي هر تن سنگ معدن) فزاتر خواهد رفت. از طرفي تهيه چنين آبي در منطقه بندرعباس مشكل و پرهزينه بوده و استفاده از آب دريا در عمليات سنگ شويي مناسبتر است. اين كار مستلزم آن است كه استخراج اورانيوم از مايع شوينده داراي كلريد زياد امكان پذير باشد؛ در غير اين صورت تحقق يافتن انديشه استفاده از آب دريا در فرايند سنگ معدن گنبدهاي نمكي، هنوز مسير مناسب را طي نكرده است. در پژوهشهاي جداگانه، نظريه استخراج اورانيوم و سازوكار شرايط اجرايي آن به وسيله شوينده‌هاي با كلريد زياد بررسي شده [۸]، و براي تهيه كيك زرد از اين محلول‌ها، روشي پيشنهاده شده است [۹].

#### ۵- نتيجه‌گيري

استفاده از آب دريا و آب شيرين در فرايند بازيفت اورانيوم از سنگ معدن با اعمال دوره‌هاي متفاوت به يك نسبت

و مقدار مصرف اسيد شده، علاوه بر اين، باقيمانده اسيدپته آزاد در مايع شوينده نيز کاهش يافته است. با توجه به آثار مثبت نسبت ۵/۰  $L/S=$  با آب شيرين (در جدول ۳) و تأثير آن در کاهش قابل توجه دوره عمليات، چنانچه اين نسبت نيز در آزمايش آب دريا به كار برده مي شد، عمليات سنگ شويي با آب دريا كمتر از ۱۴ دوره به پايان مي رسيد. بر پايه اين نتايج، بهترين شرايط با آب شيرين و آب دريا، و قابل استفاده در طراحي تپه، اسيد با غلظت ۳٪،  $L/S=0/5$  دبي زياد،  $pH=1/5$  پيشنهاده مي شود.

با ۳۰ دوره عمليات سنگ شويي اسيدي، ۸۱ درصد اورانيوم نابهنجاري ۸ از سنگ معدن آن قابل استخراج است و بقيه در اسيد به غلظت ۳٪ كم حل مي شود. از اين رو شرايط ديگري از جمله: استراحت ستون، طولاني بودن مدت تماس اسيد با سنگ، و افزودن غلظت اسيد با چرخه كاري كمتر اعمال شد. در اين شرايط، طولاني كردن زمان تماس اسيد با سنگ از طريق كاستن دبي مايع شوينده (۲۴ تا ۴۸ ساعت)، در افزايش درصد بازيفت اورانيوم مؤثر بود اما مدت عمليات استحصال به درازا كشيده. اثر استراحت دادن به ستون در پايان دو دوره عمليات ظاهر مي شود. چنانچه اسيد با غلظت ۶٪ بكار رود اين اثر در پايان دوره ظاهر مي شود. در سه دوره آخر، با چرخه كاري كمتر، قابليت اسيدپته محلول تازه تهيه شده درصد بازيفت اورانيوم را به مقدار جزئي افزايش داد. بر اين اساس، چنانچه به طور مداوم، محلول خوراك تازه به ستون داده مي شد، هرچند اسيد بيشتري مصرف مي شد، اما دوره عمليات با چرخه كمتر، به پايان مي رسيد.  $pH$  برابر ۱/۵ تا ۳۰ دوره عمليات اسيد شويي، از شرايط مناسب محسوب مي شود. نتايج حاصل از شويندگي با آب شيرين نشان مي دهد كه اسيد با غلظت كمتر از ۳٪ در افزايش بازيفت اورانيوم مؤثر است (جدول ۳). غلظت ۳٪ اسيد، تنها موجب کاهش دوره مي گردد. عوامل





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 دوره عمل که مواد مصرف‌کننده اسید کم می‌شوند، pH به کندي افزایش می‌یابد. در این حالت اگر بخشی از اورانیوم در بافت پیچیده سنگ باقی‌مانده باشد، pH ثابت ۱/۵ نباید ملاک پایان دوره پیشین و آغاز دوره جدید در نظر گرفته شود، زیرا تعداد چرخه‌ها افزایش می‌یابد و مدت عملیات به درازا می‌کشد. در این مطالعه، اسید با غلظت ۳٪ در فراوری اورانیوم از کانسار نابهنجاریهای ۱ و ۶ و برای نابهنجاری ۸ تا دوره ۳۰ و نسبت  $L/S=0/2$  عامل‌های مناسب بوده‌اند.

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 علت اشباع نبودن ممکن است به نسبت  $L/S=0/2$ ، 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٪ مؤثر بوده، و در

**پی‌نوشت‌ها:**

- ۴ - X Ray Diffractometer
- ۵ - X Ray Fluorescence
- ۶ - Inductively Coupled Plasma

- ۱ - Column Leaching
- ۲ - Heap Leaching
- ۳ - Claymineral

## References:

5. W. J. Schlitt: in Au and Ag heap and dump leaching practice, J. B. Hiskey, ed., AIME, New York. NY, 69-83 (1984).
- ۱.۶. قریب، "امکان سنجی بررسی‌های فنی، اقتصادی،" پروژه هیپ لچینگ بندر عباس (۱۳۷۰).
۷. ج. کمالی، ف. ندافی، ا. جباری راد، گزارش علمی فنی، "لچینگ سنگ معدن اورانیوم، آنومالی‌های ۱ و ۶ و ۸ گندهای نمکی بندرعباس توسط اسید سولفوریک در مقیاس نیمه صنعتی کوچک،" (۱۳۷۲).
۸. ک. فاطمی، م. مددی، "جداسازی یون کلراید از لیج لیکور و تأثیر آن بر استخراج و اندازه‌گیری
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<sup>+</sup> 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, New York. NY (1992).



۹. ك. فاطمي، "تهيه كيك زرد از ليچ ليكور حاوي كلر فراوان"، نشریه علمی سازمان انرژی اتمی ایران، شماره ۱۸، ۵۶-۴۶ (۱۳۷۸).

اورانيوم، "مجله علوم و فنون هسته اي سازمان انرژی اتمی ایران، شماره ۲۵، ۴۸-۵۵ (۱۳۸۱).