



## کانه آرای کانسنگ توریم- اورانیم کانسار زریگان به روش‌های ثقلی، مغناطیسی و الکتریکی

محمود اسکندری نسب<sup>۱</sup>، سعید علمدار میلانی\*<sup>۲</sup>، عباس سام<sup>۱</sup>

۱- بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، صندوق پستی: ۷۶۱۶۹۱۴۱۱۱، کرمان - ایران

۲- پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

**چکیده:** با توجه به عیار پایین توریم و اورانیم در سنگ معدن زریگان، انجام عملیات کانه‌آرایی در قبل از تخلیص نهایی ضروری است. نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس (XRD) نمونه‌ی معرف سنگ معدن زریگان نشان داد که این سنگ معدن حاوی مقادیر زیادی فلدسپات، کوارتز، هماتیت، تیتانومنیستیت و مقداری عناصر نادر خاکی می‌باشد. پس از خردایش سنگ توسط سنگ‌شکن فکی، خروجی آن برای رسیدن به درجه‌ی آزادی مطلوب به وسیله آسیای گلوله‌ای، تا ابعاد ۸۵ میکرون آسیا شد. سپس با انجام جدایش ثقلی بر روی آن با استفاده از میز لرزان، حدود ۹۵ درصد سیلیس آن خارج شد. به دنبال آن، بخش سنگین میز تحت جداسازی مغناطیسی شدت- بالا قرار گرفته و کنسانتره‌ی مغناطیسی آن به وسیله جداکنده‌ی مغناطیسی شدت- پایین جداسازی گردید. در ادامه، خروجی جداکنده‌ی مغناطیسی شدت- پایین تحت جداسازی الکتریکی قرار گرفت. عیار توریم و اورانیم در کنسانتره‌ی نهایی بخش غیرمغناطیسی شدت- بالا، به ترتیب، به ۴۰۰۰ و ۵۰۰۰ گرم در تن افزایش یافت. این در حالی است که تنها ۱۵ درصد وزنی خوراک اولیه به این بخش انتقال یافت. این، به کاهش قابل‌ملاحظه‌ی مصرف اسید و افزایش راندمان عملیات فروشویی منجر خواهد شد. نهایتاً، مدار کانه‌آرایی به صورت سنگ‌شکن فکی/آسیای گلوله‌ای/میز لرزان/جداکنده‌ی مغناطیسی شدت- بالا/جداکنده‌ی مغناطیسی شدت- پایین / و جداکنده‌ی الکتریکی پیشنهاد شد.

**واژه‌های کلیدی:** کانه‌آرایی، توریم، اورانیم، زریگان، جداسازی مغناطیسی، جداسازی الکتریکی، جدایش ثقلی

## Thorium- Uranium Processing with Gravity, Magnetic and Electrical Separation in Zarigan Ore Deposit

M. Eskandari Nasab<sup>1</sup>, S. Alamdar Milani\*<sup>2</sup>, A. Sam<sup>1</sup>

1- Mining Engineering Department, Technical Collaage, Shahid Bahonar University, P.O. Box: 7616914111, Kerman-Iran  
2- Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 11365-8486, Tehran - Iran

**Abstract:** Because of low grade of thorium and uranium in the Zarigan mineral deposit, the pre-concentration operation prior to leaching is nessesary. From X-ray diffraction analysis results, it was clear that this ore has large amount of other minerals such as Feldespat, Quartz, Hematite, Titanomagnetite, and rare earths. In this paper increasing of thorium grade in Zarigan deposit by using gravity, magnetic and electrical separations methods is reported. The output of a Jaw crusher was ground to 85 micron by using ball mill. Then about 95% of SiO<sub>2</sub> was separated by using a shaking table separation. The heavy concentrate of shaking table was processed by a high intensity magnetic separator and then the magnetic concentrate separated by a low intensity magnetic separator. Finally, the non magnetic concentrate of low magnetic separator was processed with the electrical separation. The grades of thorium and uranium in the non magnetic concentrate of low magnetic separator were increased to 4000 and 5000 ppm respectively where only 15% of the initial feed (ore) was transferred to this concentrate. Therefore, where this resulted in a decrease of acid consumption in the leaching processes and an increase efficiency of the process. The pre-treatment circuit of this ore was designed as Jaw crusher/ball mill/shaking table/high-magnetic separator/low-magnetic separator/electrical separator, respectively.

**Keywords:** Pre Concentration, Thorium, Uranium, Zarigan, Gravity Separation, Magnetic Separation, Electrical Separation

\*email: Salamdar@aeoi.org.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۸۸/۱۱/۱۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۸۹/۹/۶



## ۱- مقدمه

بالای ۹۸ درصد است [۸]. ویجی الکشمی<sup>(۱)</sup> و همکارانش نیز برای کانه آرای توریم از سنگ معدن زنتیم از عملیات ثقلی، مغناطیسی و الکتریکی استفاده کردند [۹]. در سنگ معدن زیرگان، کانی‌های مختلف با اختلاف قابل ملاحظه در خواص ثقلی، مغناطیسی و الکتریکی از جمله کانی‌های آهن (با چگالی و خاصیت مغناطیسی بالا) و تیتانیم (با چگالی بالا و خاصیت الکتریکی شدید) در مقابل کانی‌های سبک و بعضاً غیر مغناطیسی و غیرالکتریکی مانند کوارتز، آلپیت و رس وجود دارند (جدول ۱)، لذا در این تحقیق با هدف طراحی مدار کانه آرای سنگ معدن زیرگان، قابلیت جداسازی توریم از این سنگ با استفاده از روش ثقلی (میز لرزان)، مغناطیسی و الکتریکی بررسی شده است.

## ۲- روش تحقیق و مواد

ماده معدنی ورودی در این تحقیق، سنگ معدن زیرگان بود که ابتدا توسط سنگ شکن فکی تا اندازه‌ی ۵ میلی‌متر خرد شد و سپس توسط آسیای گلوله‌ای تا ابعاد ۸۵ میکرون آسیا گردید. آسیای گلوله‌ای مورد استفاده دارای قطر، حجم داخلی و سرعت بحرانی، به ترتیب، برابر با ۲۸۵ میلی‌متر، ۱٫۲ لیتر و ۸۶٫۳۶ دور در دقیقه بود. نسبت بار خردکننده به ماده‌ی معدنی ۲ به ۱ و حجم کل بار در آسیا برابر ۴۵٪ انتخاب شد [۱۰]. نمونه‌ی خرد شده، با استفاده از میز لرزان نوع ویفلی با سطح میز ۲۴×۵۰ اینچ مربع تحت جدایش ثقلی قرار گرفت. سایر مشخصات میز شامل فرکانس، شیب طولی، شیب عرضی، و دامنه‌ی، به ترتیب، برابر با ۲۶۰ بار در دقیقه، صفر، ۳ درجه، و ۸ میلی‌متر بودند. کنسانتره سنگین حاصل از میز، توسط جداکننده‌ی مغناطیسی شدت-بالا به شدت ۱٫۷ تسلا و بخش مغناطیس آن توسط جداکننده‌ی مغناطیسی شدت-پایین به شدت ۰٫۵ تسلا مورد جداسازی مغناطیسی قرار گرفت. خروجی جداکننده‌ی مغناطیسی شدت-پایین توسط جداکننده‌ی الکترواستاتیکی به شدت ۲۰ کیلوولت تحت جدایش الکتریکی قرار گرفت. در تمامی موارد شرایط دستگاه بهینه شده بود.

توریم یکی از مهم‌ترین منابع انرژی آینده‌ی دنیا محسوب می‌شود [۱ و ۲]. سایر کاربردهای توریم شامل ساخت توری چراغ گازی، جوشکاری، سرامیک و بوته‌های ذوب می‌شود [۳]. با توجه به محدود بودن ذخایر معدنی اورانیم و ذخایر بالاتر توریم (حدود ۵ برابر اورانیم)، دنیا ناچار از رفتن به سمت و سوی چرخه‌ی توریمی و تولید سوخت هسته‌ای توریمی است [۱]. مراحل اصلی فرایند پرعیارسازی توریم و اورانیم به ترتیب شامل کانه آرای و تولید کنسانتره‌ی با عیار نسبتاً بالای این عناصر، فروشویی (و هضم) کنسانتره‌ی حاصله، استخراج عناصر از این کنسانتره، تخلیص و تبدیل به فلز یا سایر ترکیبات مناسب می‌باشد [۴]. تا ۰٫۲ درصد ناخالصی از جمله عناصر نادر خاکی، هیچ تأثیر زیانباری روی کاربردهای معمول توریم ندارد. اما فن آوری هسته‌ای متقاضی مقادیر بسیار کم تری از ناخالصی‌های همراه توریم و به ویژه عناصر جاذب نوترون مانند عناصر نادر خاکی و بور است [۵]. بنابراین برای تولید سوخت هسته‌ای توریمی، فرایندهای تغلیظ دارای اهمیت بسیار زیادی هستند. ضمناً عملیات فروشویی بدون پیش‌فرآوری (کانه آرای اولیه) باعث مصرف زیاد اسید و غیراقتصادی شدن عملیات فرآوری خواهد شد. مطابق جدول ۱ عیار توریم و اورانیم در سنگ معدن زیرگان پایین است. از این رو عملیات کانه آرای قبل از فروشویی ضروری است.

طی عملیات پیش‌فرآوری با توجه به اختلاف خواص فیزیکی یا شیمی فیزیکی کانی‌ها، جداسازی انجام می‌شود [۶]. مهم‌ترین این روش‌ها شامل روش ثقلی (واسطه‌ی سنگین، جیگ، میز لرزان) [۷]، مغناطیسی و الکتریکی [۶] و روش فلوتاسیون می‌باشند. برای استحصال توریم موجود در کانی مونازیت ماسه‌ی ساحلی هند، ابتدا ماسه در معرض جدایش ثقلی و سپس جداسازی مغناطیسی قرار می‌گیرد که طی آن مگنتیت و ایلمنیت به وسیله‌ی جداکننده‌ی مغناطیسی شدت-پایین خارج می‌شوند و در مرحله‌ی بعدی گارنت به وسیله‌ی مغناطیس شدت-بالا استخراج می‌شود. کنسانتره‌ی مونازیت حاصل دارای خلوص

جدول ۱- ترکیبات عناصر مختلف موجود در سنگ معدن زیرگان

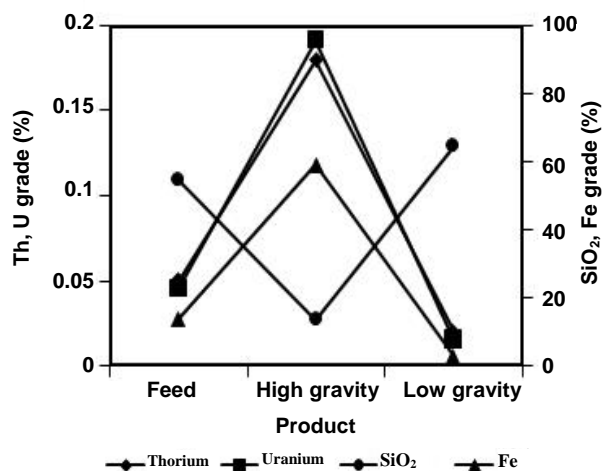
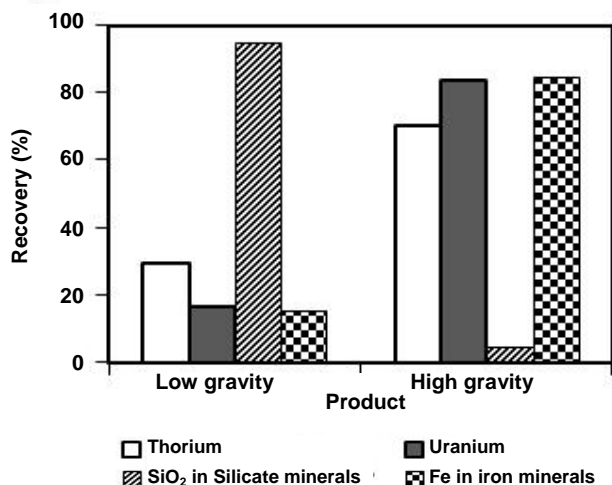
ترکیب	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
مقدار (%)	۰٫۷	۱٫۱	۱۲	۵۴٫۷	۰٫۷	۲٫۳	۲٫۹	۳٫۲	۵٫۸	۰٫۳	۱۳٫۷
	BaO	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ppm	SrO	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	ThO <sub>2</sub>	U <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cl	
	۰٫۲	۰٫۳	۰٫۳		۷۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	۴۵۰	۴۵۰	



## ۳- یافته‌ها و تحلیل نتایج

## ۱- سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی

بحرانی (یعنی برابر ۶۵ دور بر دقیقه) انتخاب گردید [۱۰]. آن‌گاه، نمونه‌ی آسیا شده، با استفاده از مجموعه سرندهای آزمایشگاهی، طبقه‌بندی شد. نتایج نشان داد که اندازه‌ی خروجی آسیا برابر ۸۵ میکرون (میکرون = ۸۵  $d_{80}$ ) بود. در این پروژه سعی شد که میزان کارآیی عملیات آسیاکنی با استفاده از نتایج مرحله‌ی بعد یعنی میزان جدایش با میز لرزان ثقلی ارزیابی شود. پس از جداسازی نمونه‌ی آسیا شده، با میز (شکل ۱) مشخص شد که کارآیی میز در جداسازی ثقلی کانی‌های سبک و سنگین بسیار مطلوب بوده است. این، نشان می‌دهد که میزان خردایش در حد مطلوب بوده است. از این‌رو به نظر می‌رسد که درجه‌ی آزادی کانی‌های با ارزش در زیرگان نیز حدود ۸۰ تا ۱۰۰ میکرون (یعنی در گستره‌ی درجه‌ی آزادی در آنومالی ۵ ساغند) می‌باشد.



شکل ۱- جداسازی بخش‌های سبک و سنگین سنگ معدن با استفاده از میز لرزان (جدایش ثقلی).

آنومالی زیرگان در میان دو مجموعه‌ی متاسوماتیکی با ترکیب آمفیبول و فلدسپات، و ترکیبات هوازده شده مانند کائولینیت و کلریت قرار دارد. این دو مجموعه خود در میان مجموعه سنگ‌های فوق‌العاده سخت با ترکیب کوارتز و فلدسپات واقع شده‌اند. کانی‌سازی به دو صورت هیدروترمال و متاسوماتیسم رخ داده است و شکستگی‌های سنگ میزبان یعنی توف‌های سیلیسی و اسیدی، کنترل‌کننده‌ی کانی‌سازی از نوع هیدروترمال می‌باشند. این شکستگی‌ها ابتدا به وسیله‌ی رگه‌های آمفیبولی پر می‌شوند و سپس تحت تأثیر محلول‌های هیدروترمال، مقداری آهن (هماتیت) آزاد می‌شود. لذا، بین هماتیت و پرتوزایی سازگاری مستقیم وجود دارد. در نوع متاسوماتیسم، کانی‌های فلزی مانند تیتانومنییت در سنگ آلیت پراکنده شده‌اند. بنابراین در این نوع کانی‌سازی، عناصر پرتوزای اورانیم و توریم در کانی‌های حاوی اکسید آهن مانند تیتانومنییت، ایلمنیت و منییت و هم‌چنین در کائولین و کلریت حضور دارند [۱۱]. روش تعیین ترکیب فازهای کانی‌شناسی با استفاده از تکنیک XRD نشان داد که کانی‌های فلدسپات (آنورتیت، سانیدین و آلیت) و کوارتز کانی‌های اصلی و کانی‌های ژئوپس، ورمیکولیت، موسکویت، مگنتیت، تیتانومنییت و ایلمنیت کانی‌های فرعی سنگ معدن زیرگان می‌باشند.

## ۲- خردایش و طبقه‌بندی

عملیات آزادسازی کانی‌ها با درجه‌ی آزادی<sup>(۲)</sup> مشخص می‌شود [۱۲] که عبارت است از درصد بخش آزاد شده‌ی یک کانی نسبت به کل آن کانی. در عمل، دستیابی به درجه‌ی آزادی ۱۰۰٪ تصویری آرمانی بیش نیست، به همین دلیل عملیات خردایش را همواره تا رسیدن به درجه‌ی آزادی مناسب و بهینه ادامه می‌دهند. شباهت زیادی بین کانی‌سازی در زیرگان و کانی‌سازی‌های نوع متاسوماتیت در ساغند وجود دارد [۱۱]. با توجه به مطالعات انجام شده در آنومالی ۵ ساغند، میزان درجه‌ی آزادی کانی با ارزش بین ۹۰ تا ۱۲۵ میکرون است [۱۳]. لذا به عنوان اولین بخش کانه‌آرایی؛ پس از خردایش سنگ معدن تا ابعاد ۵ میلی‌متر با استفاده از سنگ‌شکن فکی؛ نمونه‌ی خرد شده تحت عملیات آسیاکنی با استفاده از آسیای گلوله‌ای قرار گرفت. شرایط آسیا کاملاً بهینه شده و سرعت آن برابر ۷۵ درصد سرعت



### ۳-۳ جداسازی ثقلی با استفاده از میز لرزان

تجزیه‌ی عنصری با استفاده از تکنیک XRF (جدول ۱) نشان داد که سنگ معدن زیریگان به طور متوسط دارای ۵۰۰ گرم بر تن توریم و ۴۵۰ گرم بر تن اورانیم و دیگر عناصر نادر خاکی است. با توجه به درصد بسیار بالای سیلیس (۵۴٫۷ درصد) با چگالی پایین (حدود ۲٫۶) و هم چنین درصد قابل ملاحظه‌ای از کانی‌های سنگین چون کانی‌های تیتانیم (حدود ۵٫۸ درصد) و آهن (۱۳٫۷ درصد) با چگالی حدود ۴ تا ۶ (کانی‌های ایلمنیت و تیتانومینیت و مگنیتیت)، به نظر می‌رسد که اولین هدف عملیات کانه‌آرایی باید حذف کانی‌های سیلیکاته و کوارتز موجود در کانه باشد. این امر، لزوم استفاده از عملیات ثقلی در مراحل اولیه‌ی کانه‌آرایی را توجیه می‌کند. با توجه به ریز بودن محصول آسیای گلوله‌ای به دلیل کوچک بودن درجه‌ی آزادی آن، روش‌های جداسازی ثقلی متعارف مانند جیگ و واسطه‌ی سنگین، با موانع جدی از جمله آمیزش محصولات سبک و سنگین مواجه هستند. این موضوع به کاهش اثر گرانش و چگالی در محدوده‌ی ذرات بسیار ریز مربوط می‌شود. اما با توجه به این که میز لرزان از ترکیب سازوکارهای مختلف برای جداسازی ثقلی بهره می‌گیرد، قادر به جداسازی ذرات سبک و سنگین ریز با کارایی بالاتر نسبت به اغلب دیگر روش‌های ثقلی می‌باشد [۷].

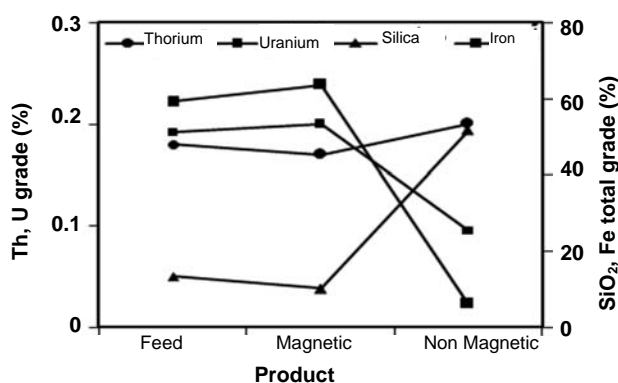
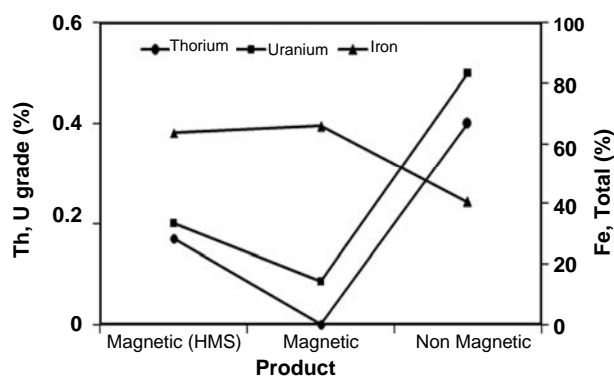
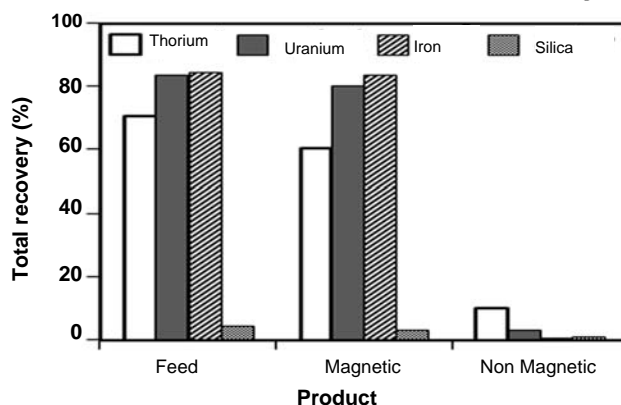
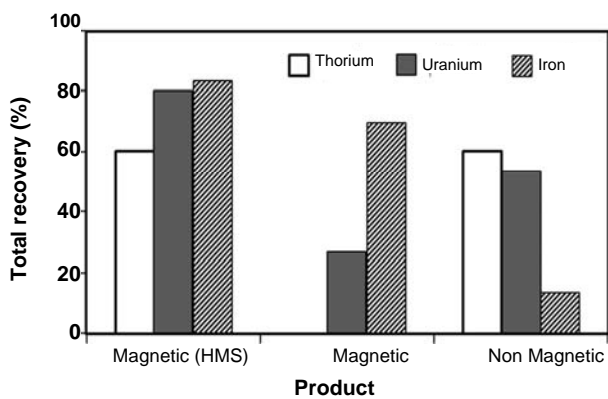
بنابراین پس از مرحله‌ی خردایش و آسیاکنی، از میز لرزان برای جداسازی ثقلی خروجی آسیا، استفاده شد. در این مرحله، میزان بازیابی وزنی خوراک در بخش سنگین برابر ۲۰ درصد بود. نتایج این مرحله در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱ مشخص می‌شود که حدود ۹۵ درصد کانی‌های سیلیکاته‌ی موجود در خوراک به باطله (بخش سبک میز) و هم چنین حدود ۸۵ درصد آهن (مهم‌ترین کانی سنگین در خوراک) به کنسانتره (بخش سنگین) منتقل شده است. لذا، میز لرزان با کارایی نسبتاً بالایی عمل جداسازی ثقلی را انجام داده است. میزان بازیابی توریم و اورانیم در بخش سنگین نیز، به ترتیب، ۷۱ و ۸۴ درصد بود که نشان‌دهنده‌ی انتقال بخش کمی از آن‌ها به باطله است که در صورت نیاز می‌توان بر روی آن جداسازی دیگری انجام داد. هم چنین عیار اورانیم و توریم به ترتیب از ۵۰۰ و ۴۵۰ گرم بر تن در خوراک به ۱۸۰۰ و ۱۹۰۰ گرم بر تن کنسانتره (بخش سنگین) افزایش یافته است. بنابراین،

پرعیارسازی مطلوبی برای این عناصر صورت گرفته است. کیایی و همکارانش (۲۰۰۰) با تفکیک ماده‌ی معدنی آنومالی ۵ ساغند براساس چگالی به چند بخش مختلف و با استفاده از روش مایعات سنگین، و تعیین عیار اورانیم و توریم در این بخش‌ها، پراکندگی توریم و اورانیم در ماده‌ی معدنی آنومالی ۵ ساغند را مورد بررسی قرار دادند و به نتایج مشابهی رسیدند [۱۳].

### ۳-۴ جداسازی مغناطیسی

در شکل ۱ مشاهده می‌شود که عیار آهن در کنسانتره‌ی سنگین میز بسیار بالا و برابر ۵۹٫۱ درصد است. از این رو به نظر می‌رسد که استفاده از روش‌های جداسازی مغناطیسی، پس از مرحله‌ی ثقلی ضرورت دارد. لذا، پس از جداسازی ثقلی، بخش سنگین کنسانتره‌ی میز که حاوی بخش پرعیار شده‌ی اورانیم و توریم می‌باشد به عنوان ورودی بخش جدایش مغناطیسی شدت-بالا با شدت ۱٫۷ تسلا مورد استفاده قرار گرفت. در این حالت با تغییر شدت میدان مغناطیسی و دبی خوراک، پارامترهای دستگاه در بهترین حالت تنظیم شده بود [۱۴]. مطابق نتایج به دست آمده، حدود ۹۲ درصد وزنی خوراک این جداکننده به بخش مغناطیسی شدت-بالا منتقل شد.

شکل ۲ نشان می‌دهد که قسمت اعظم خوراک به بخش مغناطیسی شدت-بالا منتقل شده است. با توجه به تغییرات کمی که در عیار، روی داده است، می‌توان گفت که جداکننده‌ی مغناطیسی شدت-بالا، جدایش مطلوبی را برای اورانیم و توریم فراهم نمی‌کند. نتایج نشان می‌دهد که بخش بسیار کمی از توریم و اورانیم با بخش غیرمغناطیسی و مابقی آن با کانی‌های مغناطیسی درگیر است. در این بخش، مابقی سیلیس آزاد موجود در خوراک، به بخش غیرمغناطیسی انتقال یافته و از خوراک جدا شده است. ضمناً در این بخش، بیش از ۹۹ درصد آهن به بخش مغناطیسی منتقل شده و جداسازی مطلوبی برای آهن انجام شده است. علی‌رغم این که عیار توریم تغییر قابل ملاحظه‌ای پیدا نکرده ولی عیار اورانیم در بخش غیرمغناطیسی کاهش یافته است. این، نشان می‌دهد که بخش کمی از عناصر پرتوزا (به ویژه توریم) در بخش غیرمغناطیسی از دست می‌رود که با توجه به وزن کم این بخش در مقایسه با بخش مغناطیسی می‌توان از آن صرف نظر کرد.



شکل ۳- وضعیت جداسازی در جداکننده‌ی مغناطیسی شدت- پایین.

شکل ۲- جداسازی کنسانتره‌ی سنگین میز به وسیله‌ی جداکننده‌ی مغناطیسی شدت- بالا.

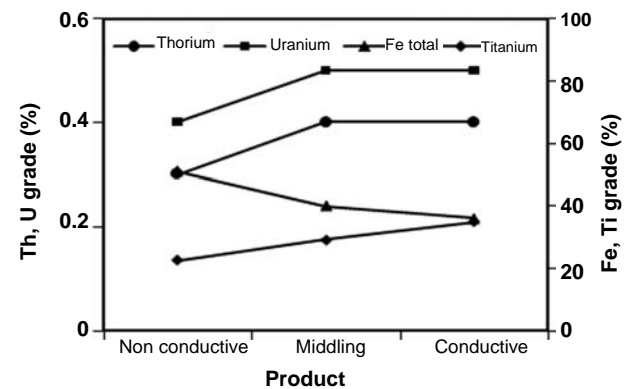
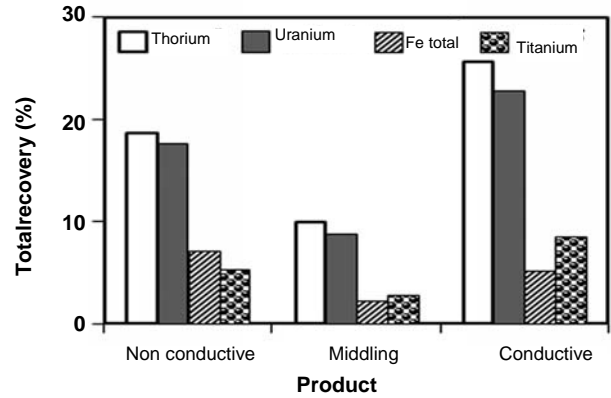
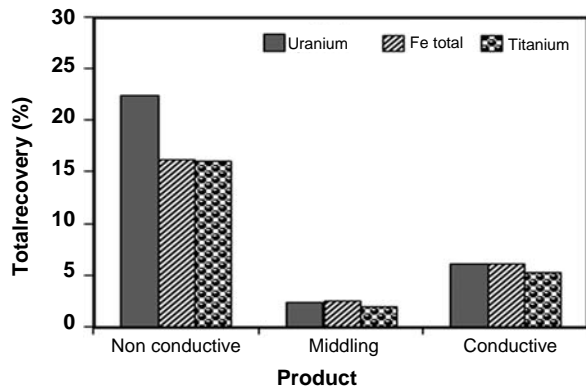
### ۳-۵ جداسازی الکتریکی

تجزیه‌ی عنصری بخش غیرمغناطیسی و مغناطیسی جداکننده‌ی مغناطیسی شدت- پایین با استفاده از تکنیک XRF نشان داد که، به ترتیب، ۲۸٫۴ و ۱۰ درصد این دو محصول را اکسید تیتانیم (با خاصیت الکتریکی شدید) تشکیل می‌دهد. از این رو، با هدف بررسی امکان جداسازی کانی‌های تیتانیم‌دار (ایلمنیت، تیتانومگنتیت و تا حدی روتیل)، این دو بخش تحت عملیات جداسازی الکتریکی با شرایط بهینه [۱۵] قرار گرفتند. ابتدا عمل جداسازی الکتریکی بر روی بخش غیرمغناطیسی انجام شد که نتایج حاصل از آن در شکل ۴ نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود عیار توریم و اورانیم نسبت به عیار خوراک تغییر قابل ملاحظه‌ای پیدا نکرده است. پس می‌توان مراحل بعدی پرعیارسازی (فروشویی) توریم را روی خوراک جداکننده‌ی الکتریکی انجام داد.

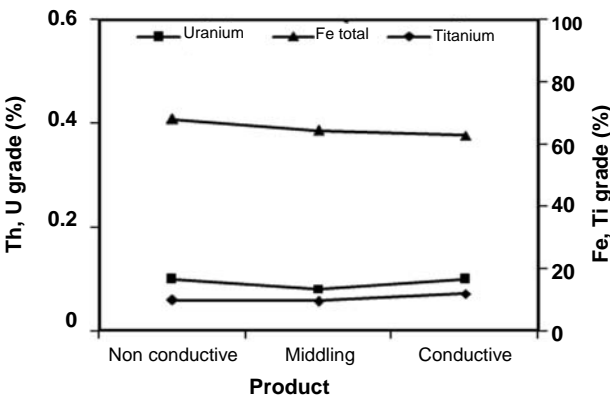
پس از این که مواد غیرمغناطیس به وسیله‌ی جداکننده‌ی مغناطیسی شدت- بالا از خوراک خارج شدند، بخش مغناطیسی شدت- بالا برای جداسازی بیش‌تر به جداکننده‌ی مغناطیسی شدت- پایین هدایت شد. همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود اکثر آهن موجود در بخش مغناطیسی شدت- بالا از نوع مگنتیت می‌باشد. اهم جداسازی توریم در این بخش صورت می‌گیرد به طوری که تقریباً تمامی توریم به بخش غیرمغناطیسی منتقل می‌شود. این، نشان‌دهنده‌ی درگیر بودن توریم با بخش غیرمغناطیسی شدت- پایین (یعنی مثلاً ایلمنیت) است. نتایج جدایش اورانیم در این بخش حاکی از توزیع اورانیم در بین کانی‌های مغناطیسی و غیرمغناطیسی است. حدود ۱۵ درصد وزنی خوراک اولیه (سنگ معدن) به بخش غیرمغناطیسی شدت- پایین منتقل شده است و عیار توریم و اورانیم در کنسانتره‌ی بخش غیرمغناطیسی شدت- پایین، به ترتیب، به ۴۰۰۰ و ۵۰۰۰ گرم بر تن افزایش یافته است. این، نشان‌دهنده‌ی پرعیارسازی مطلوب برای عناصر توریم و اورانیم است.



به طور خلاصه طرح مدار کانه آرای پیشنهادی سنگ معدن زریگان، همان طور که به طور طرح وار در شکل ۶ نشان داده شده است، به ترتیب، به صورت سنگ شکن فکی / سرند / آسیای گلوله ای / سرند / میز لرزان / جداکننده مغناطیسی شدت- بالا / جداکننده مغناطیسی شدت- پایین (یا جداکننده الکتریکی) است.

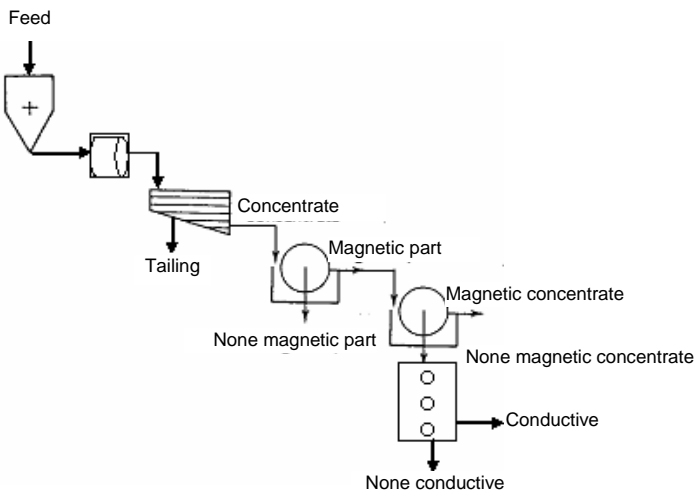


شکل ۴- جداسازی بخش غیرمغناطیسی جداکننده مغناطیسی شدت- پایین با جداکننده الکتریکی.



شکل ۵- جداسازی بخش مغناطیسی جداکننده مغناطیسی شدت- پایین با استفاده از جداکننده الکتریکی.

بخش مغناطیسی شدت- پایین نیز توسط جداکننده الکتریکی مورد جداسازی الکتریکی قرار گرفت. نتایج آن در شکل ۵ آمده است. میزان توریم در این بخش تقریباً ناچیز است، اما بخش قابل توجهی از اورانیم به این بخش منتقل می شود که جداکننده الکتریکی برای جداسازی آن کارآیی مطلوبی ندارد. بنابراین برای جداسازی آن همانند مورد قبل بهتر است عملیات بعدی فروشویی بر روی ورودی این جداکننده انجام گیرد. نکته ی قابل توجه این است که در جداسازی الکتریکی کنسانتره مغناطیسی جداکننده مغناطیسی شدت- پایین به دلیل این که این بخش معمولاً حاوی کانی های مغناطیسی (به ویژه تیتانومگنتیت) است، قسمت اعظم تیتانیم موجود در خوراک به همراه این کانی های مغناطیسی، به بخش غیرالکتریکی منتقل می شود (شکل ۵)، حال آن که در جداسازی الکتریکی کنسانتره غیرمغناطیسی شدت- پایین، بیش ترین مقدار تیتانیم به بخش الکتریکی منتقل می شود (شکل ۴)، زیرا تیتانیم در بخش غیرمغناطیسی شدت- پایین به صورت ایلمنیت است که هادی می باشد.



شکل ۶- مدار کانه آرای (پیش فرآوری) پیشنهادی برای کانسار توریم- اورانیم زریگان.



## References:

1. Dennis K. Hays, Andrey Mushakov, "Thorium: the fuel of future," Nuclear Energy Review, WWW.Thoriumpower.com, 2 (2006).
2. International Atomic Energy Agency, "Thorium fuel cycles: potential benefits and challenges," Vienna, Australia, 5-20 (2005).
3. Fathi Habashi, "A textbook of hydrometallurgy," Department of mining and metallurgy, Laval University, Quebec City, Canada, 430-440 (1993).
4. F.L. Cathbert, "Thorium production technology," National Lead Compony of Ohio, United State of Ameerica, 104-120 (1958).
5. B. Parkash, S.K. Kantan, N.K. Rao, "Metallurgy of thorium production," Atomic Energy Establishment, International Atomic Energy Agency, Vienna, 11-27 (1962).
6. Barry A. Wills, "Mineral processing technology," Elsevier, 7 Edition, 345-360 (2003).
7. O.B. Richard, "Gravity concentration technology, deelopments in mineral processing," Vol. 5, Elsevier Science Publisher (1984).
8. Fathi Habashi, "Handbook of extractive hydrometallurgy," Vol. III, Newyork, 1660-1665 (1997).
9. R. Vijayalakshmi, S.L. Mishra, H. Singh, C.K. Gupta, "Processing of xenotime concentrate by sulphuric acid digetion," Bhabha Atomic Research Centre, Mumbai, India, Hydrometallurgy 61, 75-80 (2001).
10. M. Gafari, M. Eskandari, "Determination of optimum process of ball mill variables," Bachelor's Degree Thesis, Bahonar Uni, Zarand Faculty, 42-50 (2008).
11. Sh. Shahbeik, A. Sam, M. Ranjbar, "Analysis of radiometric data of zarigan aria for exploration of uranium and thorium," Bachelor's Degree Thesis, Bahonar Uni, 11-19 (2005).
12. International Atomic Agency, "Uranium procurment," Vienna, 180-190 (1983).
13. M. Kiaie, A. Sam, K. Nazari, "Uranium and thorium processing investigation in saghand-anomaly 5," Master Degree Thesis, Bahonar Uni, 45-70 (1379).
14. M. Eskandari, "Optimization of kahnoj titanium pilot plant, magnetic part," Kahnoj Titanium Project, Iran, Kerman, Kahnoj (2004).
15. M. Eskandari, A. Sam, "Optimization of electrical separation circiut of kahnoj titanium project using taguchi method," 7<sup>th</sup> Mininig Engineering Conference, Sahand Uni, Tabriz, 301-309 (2009).

## ۴- نتیجه‌گیری

عیار توریم و اورانیم در سنگ معدن زریگان معمولاً پایین است. از این رو، استحصال مستقیم این عناصر از سنگ معدن از طریق روشی، به دلیل وجود درصد بالای مواد باطله و در نتیجه مصرف بالای اسید و تجهیزات روشی دارای توجیه فنی و اقتصادی نیست. بنابراین، برای حذف اکثر ناخالصی‌های همراه کانی‌های با ارزش، معمولاً از عملیات کانه‌آرایی استفاده می‌شود. در این تحقیق مدار کانه‌آرایی سنگ معدن زریگان به صورت سیستم مندرج در شکل ۶ طراحی و ارایه شد. پس از خریدار و آسیاکنی سنگ معدن، با استفاده از میز لرزان ثقلی ۹۵ درصد کانی‌های سیلیکاته‌ی آن خارج شد. سپس با استفاده از جداکننده‌ی مغناطیسی شدت- بالا، بخش غیرمغناطیسی از بخش سنگین میز جدا شد و عملیات کانه‌آرایی با جداسازی کنسانتره‌ی مغناطیسی شدت- بالا با جداکننده‌ی مغناطیسی شدت- پایین ادامه یافت. بازیابی وزنی کل مدار در بخش غیرمغناطیسی جداکننده‌ی مغناطیسی شدت- پایین برابر ۱۵ درصد بود. عیار توریم و اورانیم در این بخش، به ترتیب، به ۴۰۰۰ و ۵۰۰۰ گرم برتن افزایش یافت که این موضوع به کاهش چشم‌گیر هزینه‌های روشی منجر خواهد شد. نتایج هم‌چنین نشان داد که بخش غیرمغناطیسی جداکننده‌ی مغناطیسی شدت- پایین را نیز می‌توان مستقیماً تحت عملیات روشی قرار داد.

## تقدیر و تشکر

بدین وسیله از آقای دکتر محمد قنادی‌مراغه و هم‌چنین از تمامی مسئولین و پرسنل آزمایشگاه‌های تحقیقاتی جابربن حیان به خاطر مهیا نمودن امکان این تحقیق تشکر می‌شود.

## پی‌نوشت‌ها:

- ۱- Vijayalakshmi
- ۲- Degree of Liberation