



جداسازی توریم از یک محلول فروشویی اسیدی واقعی به روش استخراج حلالی با استخراج کننده دی (۲-اتیل هگزیل) فسفریک اسید و ترسیب شیمیایی با آمونیاک

فرشته خان‌رمکی^{*}، علیرضا کشتکار، هژبر صحبت‌زاده، اکرم پورمتین، ندا اکبری
پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۸۴۸۶، تهران-ایران

*Email: fkhanramaki@aeoi.org.ir

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۳/۳۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۷/۲۳

چکیده

با توجه به محدود بودن ذخایر اورانیم، فراوانی توریم نسبت به آن، عدم کاربرد در تکثیر سلاح‌های هسته‌ای و دیگر مزایای سوخت‌های توریمی نسبت به اورانیمی، توسعه چرخه سوخت توریم در کشورهای مختلف از جمله ایران مورد توجه می‌باشد. در این تحقیق فرایند جداسازی و بازیابی توریم از یک محلول فروشویی اسیدی واقعی با غلظت ۵۰۰ mg/L توریم در مقیاس آزمایشگاهی به منظور تولید رسوب اکسید توریم مورد ارزیابی قرار گرفت. پارامترهای فرایندی مؤثر بر استخراج، تهی‌سازی و ترسیب شیمیایی توریم شامل نوع استخراج کننده (اسیدی، بازی و خنثی)، غلظت استخراج کننده (۰/۰۵-۱ M)، اسیدیته فاز آبی (۶/۹۲-۰/۳۲)، زمان تعادل (۵-۶۰ min)، نوع و غلظت تهی‌ساز (۱-۷ M) و عامل رسوب‌دهنده به روش تک متغیره در هر بخش مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. با توجه به نتایج تجربی استخراج کننده دی (۲-اتیل هگزیل) فسفریک اسید با غلظت ۱ M، اسیدیته فاز آبی برابر با ۰/۱، زمان تماس ۶۰ min، سولفوریک اسید با غلظت ۵ M به عنوان تهی‌ساز و آمونیاک ۲۵٪ به عنوان عامل رسوب‌دهنده در این تحقیق انتخاب شد. بازیابی توریم از محلول فروشویی اسیدی واقعی در شرایط فرایندی به دست آمده منجر به تولید رسوب اکسید توریم با خلوص ۶۶٪ گردید.

کلیدواژه‌ها: محلول فروشویی اسیدی واقعی، استخراج حلالی، رسوب‌دهی شیمیایی، بازیابی توریم

Separation of thorium from a real acidic leach liquor solution by solvent extraction method with Di(2-ethylhexyl) phosphoric acid as extractant and chemical precipitation with ammonia

F. Khanramaki*, A.R. Keshtkar, H. Sohbatzadeh, A. Pourmatin, N. Akbari

Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-3486, Tehran - Iran

Research Article

Received 21.6.2022, Accepted 15.10.2022

Abstract

Due to the limited uranium reserves, the abundance of thorium compared to it, not being used in nuclear proliferation, and other advantages of thorium fuels over uranium fuels, the development of the thorium fuel cycle in various countries, including Iran, is considered. In this research, the separation and recovery processes of thorium from a real acidic leach liquor solution with a concentration of 500 mg/L thorium on a laboratory scale to produce thorium oxide precipitate were evaluated. The operating parameters affecting the extraction, stripping, and chemical precipitation processes of thorium include the type of extractant (acidic, basic, and neutral), the concentration of the extractant (0.05-1 M), aqueous phase acidity (0.032-6.92), equilibrium time (5-60 min), type and concentration of stripper (1-7 M) and precipitating agent were studied by the univariate method in each section. According to the experimental results, Di(2-ethylhexyl) phosphoric acid with a concentration of 1 M as extractant, aqueous phase acidity equal to 0.1, equilibrium time 60 min, sulfuric acid with a concentration of 5 M as a stripper, and ammonia as a precipitating agent were selected. Recovery of thorium from a real acidic leach liquor solution under obtained conditions resulted in the production of thorium oxide precipitate with a purity of 66%.

Keywords: Real leach liquor solution, Solvent extraction, Chemical precipitation, Thorium recovery



۱. مقدمه

توریم از جمله عناصر شیمیایی پرتوزا است که در سال ۱۸۲۸ کشف شده است. این عنصر به وفور در طبیعت یافت می‌شود، به طوری که فراوانی توریم نسبت به اورانیوم در پوسته زمین حدود ۳ تا ۴ برابر بیش‌تر تخمین زده شده است [۱]. این عنصر هم‌چنین محصول جانبی فرایند استخراج عناصر کمیاب خاکی از موناژیت نیز می‌باشد. در سال‌های اخیر، با توجه به توسعه انرژی هسته‌ای، پیدا کردن منابع فراوان و پایدار برای سوخت‌های هسته‌ای از اهمیت قابل توجهی برخوردار گردید. بنابراین سوخت‌های توریم را می‌توان به عنوان جایگزینی مناسب برای سوخت‌های اورانیوم در نظر گرفت [۱، ۲]. در نتیجه، استخراج و خالص‌سازی این فلز از سنگ معدن از اهمیت بالایی برخوردار است.

روش‌های استخراج با حلال، تبادل یونی، غشاء مایع، روش‌های جذب و رسوب‌دهی از جمله روش‌های گسترده برای استخراج و جداسازی عناصر از محلول‌های آبی مختلف می‌باشد [۳، ۴]. یکی از مهم‌ترین فرایندهای استخراج فلزات، روش استخراج حلالی است که به طور گسترده در صنایع مختلف مانند داروسازی، هیدرومتالورژی و پسمانداری مورد استفاده است که در مقایسه با سایر روش‌ها یک روش بسیار آسان، کم‌هزینه، دارای پتانسیل بالا در گزینش‌پذیری و با احتمال تولید پسماند کم‌تر می‌باشد [۵، ۶]. بنابراین روش استخراج حلالی یکی از مؤثرترین روش‌ها برای استخراج و خالص‌سازی فلز در صنعت می‌باشد.

یکی از مهم‌ترین اجزای اصلی در فرایند استخراج با حلال، انتخاب استخراج‌کننده می‌باشد. بنابراین در سیستم‌های استخراج با حلال، حلال‌های فسفات، آمینها و اسیدهای کربوکسیلیک معمولاً مورد مطالعه قرار می‌گیرند [۷]. بر اساس مطالعات انجام شده، ترکیبات مختلفی از جمله دی(۲- اتیل هگزیل) فسفریک اسید، سیانکس ۲۷۲، سیانکس ۳۰۲، سیانکس ۹۲۱، سیانکس ۹۰۱، تری بوتیل فسفات، آل‌امین ۳۳۶ و ... برای استخراج توریم از محلول‌های مختلف استفاده می‌شوند [۸].

در زمینه استخراج توریم از محلول فروشویی واقعی یک طرح با عنوان "فرایند هیدرومتالورژیکی برای استخراج حلالی و جداسازی عناصر توریم، اورانیوم و برخی از عناصر نادر خاکی موجود در محلول فروشویی کانسنگ توریم- اورانیوم زیرگان با استفاده از استخراج‌کننده سیانکس ۲۷۲" در سال ۱۳۹۰ توسط پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای ثبت شده است. از جمله موارد مطرح شده در این طرح، طراحی روش هیدرومتالورژیکی جدید

برای استخراج حلالی و جداسازی عناصر توریم، اورانیوم و برخی از عناصر نادر خاکی موجود در محلول فروشویی کانسنگ اورانیوم زیرگان با استفاده از استخراج‌کننده سیانکس ۲۷۲، معرفی قابلیت بالاتر استخراج‌کننده‌های فسفردار در اسیدیته بالا نسبت به اسیدیته پایین و هم‌چنین اجرای روش جدید استخراج حلالی پیشنهادی بر روی سنگ معدن حاوی میزان بالای آهن زیرگان و استحصال توریم و اورانیوم از آن می‌باشد [۹]. هم‌چنین در آزمایشگاه ملی اکریچ بر روی استخراج توریم، اورانیوم و عناصر نادر خاکی از محلول سولفات حاصل از سنگ معدن موناژیت مطالعه و بررسی جامع انجام گرفته است. در این مطالعه محلول شفاف فاز آبی از انحلال سنگ موناژیت هند در سولفوریک اسید ۹۳٪ و افزودن آب و سپس فیلتر نمودن تهیه شد. آنالیز نمونه محلول فروشویی نشان داد که غلظت توریم در محدوده ۵/۳-۷/۷ g/liter، عناصر نادر خاکی در محدوده ۳۴-۵۲ g/liter و اورانیوم در محدوده ۰/۱۷-۰/۲۱ g/liter بود. مقدار pH محلول نیز تقریباً ۰/۰۵ گزارش شد. در این تحقیق از استخراج‌کننده آمینی نوع اول Primene JM برای استخراج انتخابی توریم از محلول فروشویی استفاده شده است. به طوری که فرایند استخراج توریم از محلول فروشویی موناژیت توسط استخراج‌کننده Primene JM با غلظت ۰/۱ مولار در رقیق‌کننده کروزن در مدت زمان تقریبی ۱ دقیقه به تعادل رسید. ایزوترم استخراج توریم با استخراج‌کننده Primene JM با غلظت ۰/۱ مولار، ۹۷٪ کروزن به عنوان رقیق‌کننده و ۳٪ تری‌دکانول به عنوان اصلاح‌کننده نشان داد که این ترکیب قدرت بالایی (ضریب استخراج برابر با ۴۰۰) برای استخراج توریم از محلول فروشویی سولفات دارد. به طوری که در یک مرحله استخراج ایده‌ال، بازده استخراج ۹۹/۸٪ گزارش شد. هم‌چنین بازیابی توریم از فاز آلی باردار با نیتریک اسید و سدیم نیترات انجام گرفت [۱۰]. در مقاله تحقیقاتی، بورای و همکاران در سال ۲۰۱۶ به منظور جداسازی توریم از سایر مزاحمت‌هایی نظیر آهن، سرب و زیرکونیم از استخراج‌کننده آلی سیانکس ۲۷۲ با غلظت ۰/۱ مولار و pH حدود ۱ در مدت زمان ۶۰ دقیقه استفاده نمودند که توریم به فاز آلی انتقال یافت و با محلول نیتریک اسید تهی‌سازی گردید که بازده بازیابی حدود ۸۰٪ گزارش گردیده است [۱۱]. در مقاله تحقیقاتی دیگر، میروف و همکاران در سال ۲۰۰۴ به منظور جداسازی توریم از محلول کلریدی حاوی توریم به همراه ناخالصی‌هایی مانند آهن، TBP استفاده نموده‌اند. غلظت استخراج‌کننده HDEHP برابر با ۴۰٪ حجمی گزارش شده است. استخراج توریم در محیط هیدروکلریک اسید در حضور نمک کلسیم کلرید انجام شده



استخراج توریم در شرایط بهینه استخراج با غلظت ۰/۱۲ مولار استخراج‌کننده، pH برابر با ۶/۵ و محیط نیترا ته با غلظت ۰/۵ مولار نیتریک اسید، ۹۸/۵ درصد گزارش شد [۱۷]. فرایند استخراج حلالی توریم با استخراج‌کننده‌های تری بوتیل فسفات و سیانکس ۲۷۲ از محیط نیترا ته توسط شاعری و همکارانش در سال ۲۰۱۵ بررسی شده است. در این تحقیق، تأثیر متغیرهای عملیاتی از جمله زمان تعادل، اسیدیته فاز آبی، غلظت استخراج‌کننده و دما مورد بررسی قرار گرفت. هم‌چنین اثر هم‌افزایی استخراج‌کننده‌ها بر بازده استخراج توریم (IV) مورد بررسی قرار گرفت و ضریب هم‌افزایی ۳/۸۶ در نسبت مولی Cyanex۲۷۲/TBP برابر با ۴:۱ به دست آمد [۱۸].

در روش ترسیب، مواد شیمیایی با فلزات سنگین واکنش داده و در انتها در فرم نامحلول رسوب می‌کنند. ترسیب شیمیایی، به معنای اضافه نمودن برخی مواد شیمیایی خاص جهت ایجاد تغییرات فیزیکی در مواد جامد جهت نامحلول نمودن و ته‌نشینی آن‌ها می‌باشد. هدف اصلی در فرایند ترسیب، انتخاب شرایطی است که توریم با حداقل ناخالصی رسوب داده شود. در این روش، پارامترهای متعددی از جمله pH، غلظت عناصر ناخالص موجود و زمان واکنش تأثیر بسیاری در کنترل فرایند و افزایش راندمان دارند. در مرحله رسوب‌دهی توریم از فاز آبی روش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت با توجه به میزان خلوص توریم در ترکیب کنسانتره روش مناسب رسوب‌دهی انتخاب گردید.

با توجه به محدود بودن ذخایر اورانیم، فراوانی توریم نسبت به اورانیم و هم‌چنین مزایای سوخت‌های توریمی نسبت به سوخت‌های اورانیمی، توسعه چرخه سوخت توریم در کشورهای مختلف از جمله ایران مورد توجه می‌باشد. بررسی‌ها نشان داده است که هزینه‌ی تولید الکتریسیته با استفاده از توریم به‌عنوان سوخت هسته‌ای، کم‌تر از یک‌دهم هزینه تولید آن به وسیله‌ی سوخت اورانیم است [۱]. بنابراین می‌توان گفت برای هر سنگ معدنی در دنیا با توجه به ماتریس پیچیده و منحصر به فردی که دارد، مستلزم آن است که یک سری مراحل فرایندی خاص برای استحصال جزء هدف از سنگ معدن موردنظر طراحی و تدوین شود. از آن‌جا که معدن ساغند یکی از معادن عملیاتی فعال در کشور است که حاوی مقادیر قابل توجهی توریم به همراه اورانیم می‌باشد و با توجه به ماتریس خاص سنگ معدن، مستلزم دستیابی به دانش فنی برای استخراج توریم می‌باشد که جزء مهم‌ترین هدف و نوآوری تحقیق حاضر تلقی می‌گردد. در تحقیق حاضر با توجه به اهمیت بالای عنصر توریم به عنوان سوخت جایگزین در صنعت هسته‌ای، بهینه‌سازی پارامترهای

است [۱۲]. هم‌چنین در سال ۲۰۰۲، گوپتا و همکاران از سیانکس ۹۲۳ به منظور بازیابی و جداسازی توریم، اورانیم و عناصر نادر خاکی استفاده کردند. نتایج نشان داد که استخراج توریم و اورانیم در محیط نیتریک اسید ۵ مولار انجام گرفت و بازیابی توریم با استفاده از هیدروکلریک اسید ۲ مولار صورت پذیرفت [۱۳]. در تحقیقی دیگر که توسط وادیا و همکاران در سال ۲۰۱۷ انجام شد، از سنگ معدن مونازیت مالزی استفاده شد. در این تحقیق استخراج توریم از محیط نیتریک اسید با استفاده از استخراج‌کننده TBP و Aliquat ۳۳۶ با نسبت حجمی به ترتیب برابر با ۳۰ و ۱۰٪ در کروزن مورد بررسی قرار گرفت. فرایند شستشوی فاز آلی با آب مقطر انجام شد. در این مطالعه تعیین غلظت عنصر توریم در کنسانتره توریم مونازیت و محلول‌های آبی با استفاده از طیف‌سنجی جرمی پلاسما (ICP-MS) انجام شد. در این پژوهش از سه مرحله استخراج و سه مرحله شستشو برای جداسازی توریم استفاده گردید [۱۴].

در تحقیقی که توسط اورابی و همکاران در سال ۲۰۲۱ انجام شد، دی‌پروپیل‌امین برای اولین بار در استخراج انتخابی و جداسازی اورانیم و توریم از محلول فروشویی سولفات حاصل از سنگ معدن مونازیت استفاده شد. استخراج توریم (۹۸٪) با استفاده از دی‌پروپیل‌امین در نفت سفید در pH برابر با ۱ به دست آمد. هم‌چنین از سولفوریک اسید ۱ مولار به‌عنوان محلول ته‌ی‌ساز استفاده گردید و در نهایت توریم و اورانیم به ترتیب به صورت اکزالات و پراکسید به منظور کاربردهای تکنولوژیکی رسوب داده شدند [۱۵]. توسعه فرایند استخراج توریم و جداسازی آن از اورانیم و عناصر نادر خاکی از محلول فروشویی حاصل از سنگ معدن مونازیت کره‌ای توسط کیونگ وو چونگ و همکارانش مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق، ابتدا فرایند لیچینگ سنگ با سولفوریک اسید و سپس شستشو با آب انجام شد. سپس استخراج‌کننده‌های تجاری PC۸۸A، D۲EHPA، Amine و Primene JM-T به‌منظور جداسازی انتخابی توریم مورد ارزیابی قرار گرفتند که کارایی استخراج‌کننده‌ها برای استخراج توریم به ترتیب زیر گزارش شدند:

Primene JM-T > D۲EHPA > PC۸۸A > Aliquat ۳۳۶ > Alamine ۳۳۶
سولفوریک اسید به عنوان یک عامل شستشو برای بازیابی خاک‌های کمیاب استخراج شده استفاده گردید. در نهایت مناسب‌ترین عامل برای بازیابی کمی توریم از استخراج‌کننده Primene JM-T، هیدروکلریک اسید ۰/۵ مولار بود [۱۶]. استخراج‌کننده بر پایه شیف [(E)-۴-(۲-hydroxyethylimino)pentan-۲-one (AcEt)] به‌منظور استخراج توریم از محیط کلریدی توسط چیرا و همکارانش در سال ۲۰۱۸ مورد بررسی قرار گرفت. بازده



۲.۲ روش انجام آزمایش‌ها

۱.۳.۲ استخراج توریم در مقیاس آزمایشگاهی به روش ناپیوسته

یک محلول فروشویی اسیدی واقعی به منظور استخراج توریم در حضور یون‌های مزاحم به عنوان فاز آبی استفاده شد و اسیدیته فاز آبی با استفاده از آمونیاک و سدیم هیدروکسید با درجه خلوص آزمایشگاهی تنظیم گردید.

در فاز آلی از انواع مختلفی از استخراج‌کننده‌های رقیق شده با حلال کروزن استفاده شد. حلال کروزن نسبت به حلال‌های دیگر برای استخراج توریم در مقیاس صنعتی کاربرد بیشتری دارد. دو فاز آبی و آلی با نسبت فاز آلی به آبی (O/A) مشخص به یک ارلن شیشه‌ای در بسته منتقل شدند و برای مدت زمان مشخص در داخل شیکر با دور مشخص ۱۸۰ rpm و در دمای محیط قرار داده شدند تا به طور کامل با یکدیگر مخلوط گردند و حداکثر استخراج یون‌های فلزی از یک فاز به فاز دیگر انجام شود. پس از رسیدن به تعادل به وسیله قیف جداکننده دو فاز آبی و آلی از یکدیگر جدا شده و غلظت توریم در فاز آبی با استفاده از آنالیز ICP مشخص و هم‌چنین غلظت یون فلزی در فاز آلی با انجام موازنه جرم تعیین گردید. در این بخش برای بهینه‌سازی پارامترهای فرایندی مؤثر در استخراج توریم از روش تک متغیری استفاده شده است.

معیارهای سنجش فرایند استخراج حلالی شامل ضریب توزیع (D)، بازده استخراج (E%) و بازده بازیابی یون فلزی از فاز آبی به آلی (S%) به وسیله معادلات زیر محاسبه شدند [۱۹]:

$$D = \frac{[M]_t - [M]_{aq}}{[M]_{aq}} \quad (1)$$

$$\% E = \left(\frac{D}{D + \left(\frac{V_{aq}}{V_{org}} \right)} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$\% S = \left(\frac{[M]_{aq,a} V_{aq}}{[M]_{org,t} V_{org}} \right) \times 100 \quad (3)$$

در این معادلات $[M]_{aq}$ غلظت اولیه و نهایی باقی‌مانده فلز در فاز آبی، V_{aq} و V_{org} حجم فازهای آلی و آبی بوده و $[M]_{aq,a}$ غلظت تعادلی یون فلزی در محلول بازیابی و $[M]_{org,t}$ غلظت کل فلز انتقال یافته به فاز آلی در مرحله استخراج می‌باشد.

فرایندی مؤثر بر استخراج حلالی (شامل نوع و غلظت استخراج‌کننده، اسیدیته فاز آبی، زمان تماس دو فاز)، تهی‌سازی (شامل نوع و غلظت تهی‌ساز) و ترسیب شیمیایی توریم از محلول واقعی فروشویی اسیدی (محیط حاوی سولفوریک و نیتریک اسید) مورد بررسی قرار گرفت که در ادامه نتایج به‌دست آمده ارائه شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲ مواد

مواد اولیه موردنیاز برای انجام آزمایش‌ها در بخش استخراج توریم از محلول فروشویی شده به روش متداول اسیدی و رسوبدهی در مقیاس آزمایشگاهی به روش ناپیوسته با توجه به کاربرد آن‌ها مطابق جدول ۱ استفاده شده است.

۲.۲ دستگاه‌ها

تنظیم pH فاز آبی با استفاده از دستگاه pH متر Sartorius ساخت کشور آمریکا انجام شد. هم‌چنین از دستگاه طیف‌سنج پلاسما جفت شده القایی از نوع نشر اتمی (ICP-AES^۱) ساخت شرکت واریان استرالیا به منظور تعیین غلظت عناصر موجود در محلول فروشویی‌شده، استفاده شد. دستگاه فلورسانس اشعه ایکس (XRF^۲) به منظور تعیین عناصر موجود در کنسانتره به دست آمده به کار گرفته شده است.

جدول ۱. لیست مواد شیمیایی مورد نیاز برای انجام آزمایش‌ها

واحد	کاربرد	نام ماده	
استخراج‌کننده	استخراج‌کننده	تری بوتیل فسفات	
		دی(۲-اتیل هگزیل) فسفریک اسید	
		آلامین ۳۳۶	
فرایند استخراج	رقیق‌کننده	تری اکتیل فسفین اکساید	
		کروزن	
		منبع توریم	محلول واقعی فروشویی اسیدی
		بازیابی‌کننده	سدیم کربنات
سدیم بی‌کربنات			
نیتریک اسید			
سولفوریک اسید			
هیدروکلریک اسید			
فرایند رسوبدهی	عامل رسوب‌دهنده	آمونیاک	
		سولفوریک اسید	
		سدیم هیدروکسید	
		اگزالیک اسید	
		سدیم کربنات	

1. Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry
2. X-Ray Fluorescence



جدول ۲. غلظت عناصر مورد بررسی مطابق نتایج آنالیز ICP در محلول فروشویی اسیدی واقعی

عناصر	مقدار در نمونه (mg/L)
آهن (Fe)	۷۲۰۰۰
وانادیم (V)	۹۱۹
توریم (Th)	۵۰۰
منگنز (Mn)	۶۵
اورانیم (U)	۴۵
مولیبدن (Mo)	۲۲
لاتانیم (La)	۱۵

جدول ۳. شرایط بهینه آزمایش لیچینگ برای تهیه محلول فروشویی سنگ معدن ساغند

وزن نمونه	۱۰۰ g
نوع اسید	سولفوریک اسید و نیتریک اسید
مقدار اسید	۵۰۰ g/l
اندازه ذرات	۱۴۹ μm
دما	۸۵ °C
زمان	۶ h
نسبت مایع به جامد (L/S)	۱

جدول ۴. غلظت آنیون‌های سولفات و نیترات در محلول فروشویی

غلظت در نمونه		آنیون
(g/l)	(mol/l)	
۳۴۲٫۶	۳٫۵۷	سولفات (SO_4^{2-})
۱۴۷٫۶	۲٫۳۸	نیترات (NO_3^-)

به منظور تعیین اسیدیته محلول فروشویی، فرایند تیتراسیون حجم مشخصی از محلول فروشویی (۲۰ میلی‌لیتر) با محلول ۰٫۵ مولار پتاسیم هیدروکسید با افزودن چند قطره شناساگر انجام شد. با مشخص نمودن حجم مصرفی تیترانت (۲۷۵ میلی‌لیتر) و انجام محاسبات، اسیدیته محلول فروشویی برابر با ۶٫۸۷۵ مولار محاسبه گردید.

۱۰۳ بهینه‌سازی پارامترهای فرایندی استخراج و بازیابی توریم

۱۰۱۳ تعیین نوع استخراج‌کننده مناسب

به منظور تعیین استخراج‌کننده مناسب برای استخراج توریم از محلول فروشویی در حضور ناخالصی‌ها به دلیل داشتن آنیون‌های نیترات و سولفات در محلول از استخراج‌کننده‌های آنیونی، کاتیونی و خنثی از جمله دی (۲-اتیل هگزیل) فسفریک اسید^۱، تری بوتیل فسفات^۲، آل‌امین^۳ و تری اکتیل فسفین اکساید^۴ با غلظت ۱ M استفاده شده و نتایج به‌دست آمده از

۲۰۳۲ رسوب‌دهی توریم در مقیاس آزمایشگاهی به روش ناپیوسته با توجه به آنالیز محلول فروشویی، عناصر وانادیم و آهن عمده‌ترین مزاحمت برای جداسازی توریم بودند که با روش استخراج حلالی به حداقل رسانده شدند. در ادامه برای تولید کنسانتره توریم از روش رسوب‌دهی با عامل‌های مختلف رسوب‌دهنده استفاده گردید.

ترسیب روشی است که در آن، اختلاف در حلالیت منجر به جداسازی می‌شود. یعنی جزیی که حلالیت کم‌تری دارد به صورت فاز جامد از محلول جدا می‌شود. از آن‌جا که در روش ترسیب، pH نقش کلیدی هم در کیفیت و هم در کمیت رسوب دارد، بررسی pHهای مختلف در محیط‌های متفاوت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از دیگر پارامترهای مؤثر در روش ترسیب می‌توان به عامل زمان، غلظت ماده‌ی رسوب‌دهنده و دما اشاره نمود. در این روش، پارامترهای متعددی از جمله غلظت عناصر ناخالص موجود و زمان واکنش، تأثیر بسیاری در کنترل فرایند و افزایش راندمان دارند.

۳. نتایج و بحث

از آن‌جایی که محلول‌های فروشویی‌شده حاصل از سنگ معدن معمولاً شامل محدوده وسیعی از عناصر جدول تناوبی هستند، شناسایی همه این عناصر بسیار هزینه‌بر می‌باشد. بنابراین با توجه به مطالعه‌ای که انجام گرفت، عناصری که اغلب در محلول فروشویی سنگ معدن توریم در منابع موجود بودند شناسایی شدند و سپس غلظت این عناصر در محلول تعیین گردید. مطابق نتایج آنالیز (جدول ۲) می‌توان گفت که عناصر وانادیم و آهن عمده‌ترین مزاحمت برای جداسازی توریم از محلول فروشویی حاضر به شمار می‌روند.

محلول فروشویی حاصل از فرایند لیچینگ از ترکیب سنگ معدن ساغند با مخلوط سولفوریک و نیتریک اسید تهیه گردید. هم‌چنین این محلول فروشویی در شرایط بهینه فرایند لیچینگ که در جدول ۳ آورده شده، به‌دست آمد. با توجه به نتایج آزمایش‌ها، غلظت اسید ۵۰۰ g/l و سولفوریک و نیتریک اسید با نسبت حجمی به ترتیب ۷۰ و ۳۰٪ با بازیابی ۶۴ درصد برای توریم و ۸۴ درصد برای اورانیم بهترین شرایط فرایند لیچینگ بود.

با توجه به شرایط بهینه فرایند لیچینگ انجام شده بر روی سنگ معدن و مقدار مصرف اسیدها، میزان آنیون‌های سولفات و نیترات موجود در نمونه محلول فروشویی محاسبه گردید و نتایج در جدول ۴ آورده شده است.

1. Di-(2-Ethylhexyl)Phosphoric Acid (DEHPA)

2. Tributyl Phosphate (TBP)

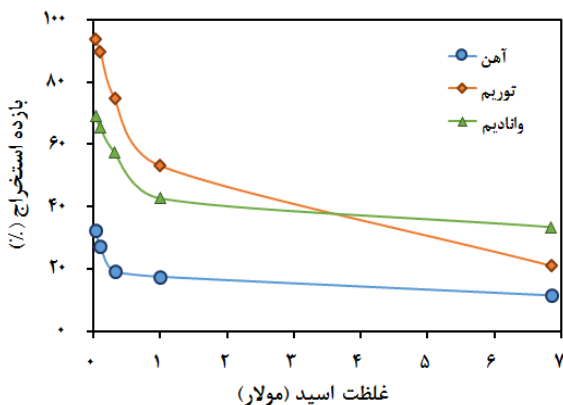
3. Tri-Octyl/Decyl Amine (Alamine 336)

4. Trioctylphosphine Oxide (TOPO)



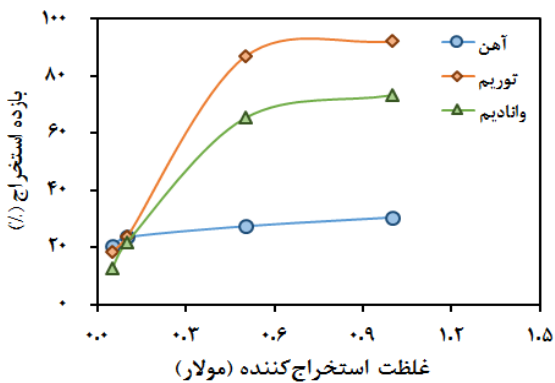
۳.۱.۳ تعیین غلظت بهینه استخراج کننده

بررسی تغییرات غلظت استخراج کننده در میزان استخراج توریم و ناخالصی‌ها از محلول فروشویی با استخراج کننده دی(۲-اتیل هگزیل) فسفریک اسید انجام پذیرفت و نتایج به دست آمده در شکل ۲ آورده شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در غلظت‌های پایین‌تر (۰/۱ مولار) بازده استخراج آهن (۲۳/۶٪) و وانادیم (۲۱/۹٪) در حد توریم (۲۳/۸٪) بوده و این امر میزان خلوص توریم را کاهش می‌دهد. اما با افزایش غلظت استخراج کننده میزان استخراج توریم افزایش یافته در حالی که استخراج آهن افزایش بسیار ناچیزی داشته است. به طوری که در غلظت ۱ مولار از استخراج کننده حداکثر خلوص توریم به دست می‌آید و بازده استخراج توریم ۹۲/۲٪ می‌باشد. از آنجایی که مقدار بالای آهن در نمونه اولیه و استخراج آن باعث کاهش میزان خلوص توریم می‌گردد، بنابراین غلظت ۱ مولار به عنوان غلظت مناسب استخراج کننده دی(۲-اتیل هگزیل) فسفریک اسید برای استخراج حداکثری توریم و حداقلی ناخالصی‌ها در بررسی سایر پارامترهای استخراج انتخاب شد.



شکل ۱. اثر اسیدیته محلول آبی بر بازده استخراج

($[DEHPA]=0.5\text{ M}$, زمان=۶۰ min, $O/A=1$, $\text{دمای}=25^\circ\text{C}$).



شکل ۲. اثر غلظت استخراج کننده DEHPA بر بازده استخراج

($\text{دمای}=25^\circ\text{C}$, $O/A=1$, زمان=۶۰ min, $[اسیدیته]=0.1$)

این بررسی در جدول ۵ آورده شده است. به طوری که میزان پایین بازده استخراج توریم به دلیل اسیدیته بالای محلول فروشویی ($\text{pH}<0$) می‌باشد. می‌توان گفت که اسیدیته روی نوع، بار و غلظت کمپلکس تشکیل شده بسیار مؤثر است. از طرفی فرایند استخراج و خالص‌سازی تابع اسیدیته و نوع و غلظت عناصر و آنیون‌های موجود در محیط می‌باشد.

نتایج جدول نشان می‌دهد که ترکیب دی(۲-اتیل هگزیل) فسفریک اسید برای استخراج توریم از محلول فروشویی در این شرایط آزمایش گزینه مناسب‌تری است. میزان پایین بازده استخراج به دلیل اسیدیته بالای محلول فروشویی می‌باشد.

۳.۱.۴ تعیین اسیدیته بهینه محلول فروشویی

استخراج توریم از محلول فروشویی در اسیدیته‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و نتایج در شکل ۱ نشان داده شده است. تغییرات اسیدیته اولیه فاز آبی (محلول فروشویی) در این نمودار نشان می‌دهد به علت بالا بودن اسیدیته محلول فروشویی میزان استخراج توریم بسیار پایین است و با کاهش در مقدار اسیدیته افزایش قابل ملاحظه‌ای در میزان بازده استخراج توریم مشاهده شد، به طوری که ماکزیمم بازده استخراج در اسیدیته حدود ۰/۱ مشاهده گردید. با کاهش اسیدیته به مقدار ۰/۰۳۲ تغییر قابل ملاحظه‌ای در بازده استخراج مشاهده نشد و در مقادیر اسیدیته پایین‌تر از ۰/۰۰۱ به دلیل مقدار بالای آهن در محلول فروشویی رسوب تشکیل گردید. بنابراین با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده، اسیدیته برابر با ۰/۱ ($\text{pH}=1$) به عنوان اسیدیته بهینه برای انجام آزمایش‌های استخراج توریم با استخراج کننده دی(۲-اتیل هگزیل) فسفریک اسید انتخاب گردید. با توجه به نتایج تحقیقات گذشته (مطابق جدول ۱۱) در اسیدیته‌های پایین میزان استخراج توریم قابل توجه می‌باشد که این امر در تحقیق حاضر نیز قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۵. بررسی اثر نوع استخراج کننده بر استخراج توریم

(شرایط آزمایش: 1 M = غلظت استخراج کننده، 6.9 M = اسیدیته، $O/A=1$ ،

60 min = زمان تعادلی، 25°C = دما)

نوع استخراج کننده	عنصر	بازده استخراج (%)
تری اکتیل فسفین اکساید (TOPO)	آهن	۶/۴
	توریم	۱۱/۱۷
	وانادیم	۳۱/۹۹
آلامین ۳۳۶ (Alamine ۳۳۶)	آهن	۹/۴۰
	توریم	۱/۲۹
	وانادیم	۱۴/۰۹
دی(۲-اتیل هگزیل) فسفریک اسید (DEHPA)	آهن	۱۱/۶۲
	توریم	۲۹/۱۳
	وانادیم	۵۳/۴۷
تری بوتیل فسفات (TBP)	آهن	۱۰/۲۷
	توریم	۵/۲۰
	وانادیم	۴۳/۱۸



برای رسوبدهی در pH حدود ۸ و دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شود.

بنابراین به منظور رسوبدهی توریم از آمونیاک برای تغییر اسیدیته و تنظیم pH استفاده گردید. ابتدا به حجم مشخصی از محلول تهی‌سازی شده، آمونیاک غلیظ قطره قطره اضافه گردید تا pH محلول به ۸ رسید، در این شرایط محلول کدر گردید. سپس به مدت ۱۰ دقیقه در شیکر با دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد و سپس به مدت ۱ ساعت هم‌زده شد، بعد از آن ۲۴ ساعت زمان برای تکمیل رسوبدهی در نظر گرفته شد. در نهایت رسوب پودری زردرنگی تشکیل شد که پس از صاف کردن رسوب به منظور حذف سولفات، رسوب حاصل چندین مرتبه با آب مقطر شسته و به مدت ۴ ساعت در آن با دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد خشک شد و رسوب حاصل جهت آنالیز به XRF فرستاده شد که نتایج این آزمایش در جدول ۹ آورده شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد رسوب حاصل حاوی ۰.۶۳٪ توریم اکسید است.

جدول ۸. بررسی عوامل مؤثر بر فرایند رسوبدهی

عوامل رسوب‌دهنده	دما (°C)	pH	مشخصات رسوب
سدیم هیدروکسید و سدیم کربنات	۱۰ محیط و ۸۰	۲	رسوب مشاهده نشد
سدیم هیدروکسید	محیط	۱	رسوب با خلوص پایین
سدیم هیدروکسید	۱۰	۱	رسوب با خلوص پایین
سدیم هیدروکسید	۱۰	۶	رسوب بدون توریم
سدیم هیدروکسید و اگزالیک اسید	محیط	۱	رسوب با خلوص پایین
سدیم هیدروکسید و اگزالیک اسید	۱۰	۱	رسوب بدون توریم
آمونیاک	محیط	۲	رسوب با خلوص پایین
آمونیاک	محیط	۸	رسوب با خلوص ۰.۴۶٪
آمونیاک	۱۰	۸	رسوب با خلوص ۰.۶۳٪

جدول ۹. نتایج آزمایش XRF از رسوب تولید شده توسط آمونیاک

نام عنصر	نتیجه آنالیز	واحد
SiO _۲	۰.۵۴	W/W%
V _۲ O _۵	۲۱.۰۹	W/W%
P _۲ O _۵	۰.۸۹	W/W%
Fe _۲ O _۳	۱۱.۱	W/W%
CaO	۰.۱۵	W/W%
CuO	۷۰۰	mg/L
ThO _۲	۶۳.۱	W/W%
ZnO	۸۰۰	mg/L
MgO	۱.۲۴	W/W%
UO _۲	۱.۰۸	W/W%

با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت سولفوریک اسید بازده بازیابی توریم از فاز آلی افزایش می‌یابد به طوری که در غلظت ۵ مولار از سولفوریک اسید بیش‌ترین مقدار بازیابی (۰.۸۵٪) دیده شد و سپس با افزایش بیش‌تر در غلظت اسید افزایش قابل توجهی در بازده بازیابی توریم مشاهده نشد بنابراین غلظت ۵ مولار از سولفوریک اسید به عنوان غلظت بهینه برای بازیابی حداکثری توریم از محلول فروشویی انتخاب شد. هم‌چنین در محلول بازیابی به‌دست آمده غلظت توریم، وانادیم و آهن در آن به ترتیب ۳۷۶/۴، ۱۳۳/۶ و ۶۱/۴ mg/L می‌باشد.

۲.۳ بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر رسوبدهی توریم از محلول تهی‌ساز

به منظور تولید رسوب توریم از محلول بازیابی، عامل‌های مختلف رسوبدهی مانند سدیم هیدروکسید، آمونیاک و اگزالیک اسید مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آنالیز رسوب با XRF در هر آزمایش در جدول ۸ آورده شده است. با استفاده از سدیم هیدروکسید به عنوان عامل رسوب‌دهنده در دماهای مختلف، رسوبی مشاهده نگردید. با بررسی اگزالیک اسید در دو دمای محیط و ۱۰ درجه سانتی‌گراد جهت رسوبدهی توریم مشاهده گردید که آهن نیز به همراه توریم در محلول هم‌رسوبی داشت و رسوب توریم دارای خلوص بسیار پایینی بود، لذا از اگزالیک اسید جهت ترسیب توریم صرف‌نظر شد. در ادامه از عامل رسوب‌دهنده آمونیاک در دمای محیط استفاده شد. در این شرایط رسوب توریم مشاهده گردید. از آن‌جا که آمونیم هیدروکسید منجر به تشکیل رسوب آمونیم وانادات طبق رابطه زیر می‌گردد [۲۱، ۲۲]، لذا جهت کاهش اثر هم‌رسوبی وانادیم به همراه رسوب توریم دمای کم‌تر از دمای محیط (۱۰ درجه سانتی‌گراد) نیز مورد بررسی قرار گرفت که نتیجه بهتری نسبت به دمای محیط داشت.



هم‌چنین نتایج حاصل از ترسیب با عامل آمونیاک نشان داد که بالاترین خلوص توریم با عامل رسوب‌دهنده آمونیاک در pH حدود ۸ حاصل می‌گردد. نتایج حاصل از کل آزمایشات ترسیب با عامل‌های مختلف رسوب‌دهنده نشان داد که بهترین شرایط رسوبدهی توریم زمانی حاصل می‌شود که از عامل آمونیاک



بودن محیط استخراج نسبت به سایر تحقیقات انجام شده در این زمینه گردید.

جدول ۱۰. نتایج آنالیز ICP از انحلال نمونه رسوب حاصله

عناصر	غلظت (mg/L)	درصد وزنی (% w/w)
منیزیم	۰٫۰۰۲	بسیار ناچیز
کلسیم	۰٫۰۰۴	بسیار ناچیز
سیلیسیم	۰٫۰۵	بسیار ناچیز
اورانیم	۳٫۶	۰٫۲۶
آهن	۱۵۶٫۵	۱۱٫۲۷
وانادیم	۳۰۴٫۱	۲۱٫۸۹
توریم	۹۲۵	۶۶٫۵۸

سپس به منظور تعیین غلظت دقیق‌تر عناصر گزارش شده از آنالیز XRF، با انحلال بخشی از رسوب تشکیل شده در حجم معین و نتایج آنالیز ICP (مطابق جدول ۱۰) می‌توان نتیجه گرفت که رسوب حاصله حاوی حدود ۶۶ درصد توریم می‌باشد. جزئیات یافته‌های مطالعات قبلی و نتایج تحقیق حاضر به طور خلاصه در جدول ۱۱ ارائه شده است. با توجه به نتایج حاصل از تحقیقات صورت گرفته، محلول‌های فروشویی حاوی یک اسید می‌باشد، اما در تحقیق حاضر با توجه به ماتریس خاص سنگ معدن ساغند و به منظور استحصال حداکثری عناصر مهم آن (اورانیم و توریم)، فرایند لیچینگ با استفاده از سولفوریک و نیتریک اسید انجام شد در نتیجه محیط استخراج حاوی نیترات و سولفات می‌باشد که این امر منجر به متفاوت

جدول ۱۱. خلاصه‌ای از نتایج حاصل از تحقیقات صورت گرفته در زمینه سیستم‌های استخراج توریم

مرجع	ملاحظات	محیط استخراج	رقیق‌کننده	استخراج‌کننده
[۱۵]	استخراج توریم (۹۸٪) با استفاده از دی پروپیلامین در نفت سفید در pH برابر با ۱ به دست آمد. سپس استخراج انتخابی اورانیم (۹۷٪) توسط دی پروپیلامین در pH برابر با ۳ حاصل گردید. از محلول تهی‌ساز سولفوریک اسید با غلظت ۱ مولار، توریم و اورانیم به ترتیب به صورت اگزالات و پراکسید رسوب داده شدند.	H ₂ SO ₄	Kerosene	Dipropylamine
[۱۶]	Primene JM-T استخراج‌کننده بهتری برای استخراج توریم بود و ترتیب کارایی استخراج کننده‌ها به شرح زیر گزارش شد: Primene JM-T > D2EHPA > PC-88A > Aliquat ۳۳۶ > Alamine ۳۳۶ سولفوریک اسید به عنوان یک عامل شستشو برای بازیابی خاک‌های کمیاب استخراج شده استفاده گردید. در نهایت مناسب‌ترین عامل برای بازیابی کمی توریم هیدروکلریک اسید ۰٫۵ مولار بود.	H ₂ SO ₄	A 150	Primene JM-T, D2EHPA, PC 88A
[۱۷]	شرایط بهینه برای استخراج توریم در pH برابر با ۶٫۵ و استخراج‌کننده AcEt با غلظت ۰٫۰۱۲ مولار و ۰٫۵ مولار نیتریک اسید (۹۸٫۵ درصد استخراج توریم گزارش شده است).	HCl	Methylene chloride	(E)-4-(2-hydroxy-ethyl-imino) pentan-2-one (AcEt)
[۲۳]	کارایی استخراج‌کننده‌ها براساس بازده استخراج توریم به ترتیب زیر گزارش شد: Cyanex ۹۲۳ > Cyanex ۲۷۲ > DHOA > TBP	HNO ₃	Xylene	Cyanex 923, Cyanex 272, TBP, DHOA
[۲۴]	مکانیسم تبادل کاتیونی توریم به صورت [Th(NO ₃) ₂ SO ₄] ⁺ و ترتیب کارایی استخراج‌کننده‌ها به شرح زیر گزارش شد: APSO > BMSO > DHSO > DISO	HNO ₃	Bis-(tri-fluoro-methylsulfonyl) imide lithium salt (LiNTf ₂), 1-butyl-1-methyl-piperidinium	Benzyl-methyl sulphoxide (BMSO), allyl phenyl sulphoxide (APSO), di isobutyl-sulphoxide (DISO), di hexyl sulphoxide (DHSO)
[۱۸]	pH بهینه برابر با ۳ و حداکثر فاکتور هم‌افزایی ۳٫۸۶ با نسبت مولی ۱:۴ سیانکس ۲۷۲ و TBP گزارش شده است.	HNO ₃	Kerosene	Tri-butyl phosphate (TBP) and bis(2,4,4-trimethylpentyl) phosphinic acid (Cyanex272)
[۲۵]	حداکثر استخراج توریم با استخراج‌کننده Aliquat ۳۳۶ در غلظت ۵ M نیتریک اسید گزارش شد.	HNO ₃ , HCl, H ₂ SO ₄	Kerosene	Tri-butyl-phosphate (TBP), trioctyl-amine (TOA), and tricaprylyl methyl ammonium chloride (Aliquat 336)
[۲۶]	عوامل مختلف نمک‌زدایی مانند LiNO ₃ , NaNO ₃ , NH ₄ NO ₃ و KNO ₃ برای فرایند استخراج توریم مورد بررسی قرار گرفتند که در نهایت لیتیم نیترات به عنوان بهترین معرف نمک‌زدایی معرفی گردید. هم‌چنین کمپلکس استخراج شده توریم به صورت Th(NO ₃) ₂ .۲DEHEHP در گزارش شد.	HNO ₃	Kerosene	Di-(2-ethyl-hexyl) 2-ethylhexyl phosphonate (DEHEHP)
[۲۷]	بازده استخراج توریم ۹۵٪ و بازده بازیابی ۸۶٪ گزارش شد.	HCl, HNO ₃	Kerosene	Di(1-methyl heptyl) methyl phosphate (P350)
تحقیق حاضر	با توجه به محلول فروشویی که حاوی سولفوریک و نیتریک اسید بود، D2EHPA استخراج‌کننده بهتری برای استخراج توریم در حضور ناخالصی‌ها در شرایط حاضر بود. هم‌چنین فرایند شستشو با سولفوریک اسید رقیق و بازیابی توریم با محلول سولفوریک اسید ۴ مولار انجام شد. در نهایت با رسوب‌دهی توریم با استفاده از آمونیاک ۲۵٪ در pH برابر با ۸، کنسانتره با محتوی حدود ۶۶٪ توریم اکسید تولید گردید.	HNO ₃ (۳۰٪) و H ₂ SO ₄ (۷۰٪)	Kerosene	TOPO, Alamine 336, D2EHPA, TBP



۴. نتیجه‌گیری

هدف از انجام تحقیق جداسازی توریم به روش استخراج حلالی و ترسیب شیمیایی از یک محلول فروشویی واقعی در مقیاس آزمایشگاهی به منظور تولید رسوب اکسید توریم می‌باشد. پس از آنالیز ICP نمونه محلول فروشویی واقعی و تعیین مشخصات خوراک، پارامترهای فرایندی مؤثر بر استخراج حلالی و ترسیب شیمیایی مورد ارزیابی قرار گرفت. مقادیر بهینه برای پارامترهای فرایندی در فرایند استخراج حلالی مورد بررسی شامل نوع و غلظت استخراج‌کننده، اسیدیته فاز آبی، زمان تعادلی، نوع و غلظت بازیابی‌کننده به منظور حداکثر استخراج توریم و حداقل استخراج ناخالصی‌های آهن و وانادیم از محلول فروشویی واقعی به ترتیب برابر با دی(۲-اتیل هگزیل) فسفریک اسید، ۱ M، ۰/۱، ۳۰ min، سولفوریک اسید با غلظت ۵ M به دست آمدند. هم‌چنین فرایند رسوب‌دهی از فاز تهی‌سازی در pH برابر با ۸ با افزودن آمونیاک به محلول در دمای ۱۰ °C انجام پذیرفت. بر اساس نتایج آزمایشگاهی می‌توان نتیجه گرفت که رسوب اکسید توریم به دست آمده محتوی حدود ۶۶ درصد اکسید توریم (آنالیز ICP) می‌باشد.

مراجع

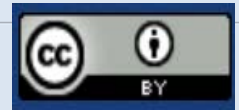
- M.A. Didi, et al., *Liquid-liquid extraction of thorium(IV) by fatty acids: a comparative study*, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **299**, 1191 (2014).
- M. Eskandarinasab, S. Alamdar Milani, *Hydrometallurgical process for solvent extraction and separation of thorium, uranium and some rare earth elements in the commercial solution of Zarigan thorium-uranium mine using Cyanex-272 as extractant*, *Registration Number: 70592, Declaration Number: 390030347*, (2019).
- D.J. Crouse, K.B. Brown, *Recovery of Thorium, Uranium, and Rare Earths from Monazite Sulfate Liquors by the Amine Extraction (AMEX) Process*, *ORNL-2720* (1959).
- E.H. Borai, et al., *Subsequent Separation and Selective Extraction of Thorium (IV), Iron (III), Zirconium (IV) and Cerium (III) from Aqueous Sulfate Medium*, *South African Journal of Chemistry*, **69**, 148 (2016).
- V.G. Maiorov, et al., *Preparation of Thorium-Containing Concentrate from Perovskite*, *Radiochemistry*, **47**, 498 (2005).
- B. Gupta, et al., *Extraction of uranium, thorium and lanthanides using Cyanex-923: Their separations and recovery from monazite*, *J. Radioanal. Nucl. Chem*, **251**, 451 (2002).
- W.M. Al-Areqi, et al., *Solvent extraction of thorium from rare earth elements in monazite thorium concentrate*, *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, **21**, 1250 (2017).
- A.H. Orabi, et al., *Sequential separation and selective extraction of uranium and thorium from monazite sulfate leach liquor using dipropylamine extractant*, *Miner. Eng.*, **172**, 107 (2021).
- K.W. Chung, et al., *Solvent extraction, separation and recovery of thorium from Korean monazite leach liquors for nuclear industry applications*, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **83**, 72 (2020).
- M.F. Cheira, et al., *Solvent Extraction and Separation of Thorium(IV) from Chloride Media by a Schiff Base*, *J. Solution. Chem*, **47(4)**, 611 (2018).
- M. Shaeri, M. Torab-Mostaedi, A.R. Kelishami, *Solvent extraction of thorium from nitrate medium by TBP, Cyanex272 and their mixture*, *J. Radioanal. Nucl. Chem*, **303**, 2093 (2015).
- R. Torkaman, et al., *Synergistic extraction of gadolinium from nitrate media by mixtures of bis (2,4,4-trimethylpentyl) thiophosphinic acid and di-(2-ethylhexyl) phosphoric acid*, *Ann. Nucl. Energy*, **62**, 284 (2013).
- G.M. Ritcy, A.W. Ashbrook, *Solvent extraction principles and applications to process metallurgy, Part I. (New York: Elsevier, 1984)*.
- B. Pan, et al., *Ammonium vanadate/ammonia precipitation for vanadium production from a high vanadate to sodium ratio solution obtained via membrane electrolysis method*, *J. Clean. Prod.*, **263**, 121 (2020).
- S. Longa, et al., *Recovery of vanadium from alkaline leaching solution from roasted stone coal*, *Sci. Asia*, **40**, 69 (2014).
- Thorium fuel cycles: potential benefits and challenges*, in, *International atomic energy agency, IAEA-Tecdoc-1450, ISBN 92-0-103405-9. Vienna, (2005)*.
- Thorium fuel utilization options and trends, IAEA-TECDOC-1319, Proceeding of three IAEA meetings in Vienna. (November 2002)*.
- S. Radhika, et al., *Liquid-liquid extraction and separation possibilities of heavy and light rare-earths from phosphoric acid solutions with acidic organophosphorus reagents*, *Sep. Purify. Technol.*, **75**, 295 (2010).
- F. Xie, et al., *A critical review on solvent extraction of rare earths from aqueous solutions*, *Miner. Eng.*, **56**, 10 (2014).
- F. Habashi, *A textbook of hydrometallurgy: Métallurgie extractive*, *E. Québec, Ed.*, (1993).
- H. Singh, C.K. Gupta, *Solvent Extraction in Production and Processing of Uranium and Thorium*, *Miner. Proc. Extr. Metall. Rev.*, **21(1-5)**, 307 (2000).
- R.K. Mishra, et al., *A comparative study on extraction of Fe(III) from chloride leach liquor using TBP, Cyanex 921 and Cyanex 923*, *Hydrometallurgy*, **104**, 298 (2010).



23. M. Singh, et al., *Understanding the extraction mechanism, radiolytic stability and stripping behavior of thorium by ionic liquid based solvent systems: evidence of ion exchange and solvation mechanism*, *J. Radioanal. Nucl. Chem*, **311**, 195 (2017).
24. S. Priya, et al., *Piperidinium based ionic liquid in combination with sulphoxides: Highly efficient solvent systems for the extraction of thorium*, *Hydrometallurgy*, **164**, 111 (2016).
25. M.E. Nasab, *Solvent extraction separation of uranium(VI) and thorium(IV) with neutral organophosphorus and amine ligands*, *Fuel*, **116**, 595 (2014).
26. Y. Wang, et al., *Preparation of high-purity thorium by solvent extraction with di-(2-ethylhexyl) 2-ethylhexyl phosphonate*, *J. Radioanal. Nucl. Chem*, **298**, 1651 (2013).
27. X. Zhong, Y. Wu, *Recovery of uranium and thorium from zirconium oxychloride by solvent extraction*, *J. Radioanal. Nucl. Chem*, **292**, 355 (2012).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

**استناد به این مقاله**

فرشته خان‌رمکی، علیرضا کشتکار، هژیر صحبت‌زاده، اکرم پورمتین، ندا اکبری (۱۴۰۲)، جداسازی توریم از یک محلول فروشویی اسیدی واقعی به روش استخراج حلالی با استخراج‌کننده دی(۲-اتیل هگزیل) فسفریک اسید و ترسیب شیمیایی با آمونیاک، ۱۰۵، ۱۷-۲۷

DOI: 10.24200/nst.2022.1149.1754

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1510.html

