مجله علوم، مهندسی و فناوری هستهای، دوره ۴۶، شماره ۲، جلد ۱۱۲، تابستان ۱۴۰۴

Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology Vol. 46 (2), Serial Number 112, 2025

بررسی پارامترهای مؤثر بر بازیابی عناصر نادر خاکی از کانسنگ چاهگز با استفاده از فرایند فروشویی اسیدی

محمد رضائی\* 回

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

\*Email: mrezaee@aeoi.org.ir

مقالة پژوهشى

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۳۱ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۱۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۰۵

#### چکیدہ

در این پژوهش، بازیابی عناصر نادر خاکی از کانسنگ چاهگز به وسیله فرایند فروشویی اسیدی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تأثیر پارامترهای مختلف بر روی انحلال عناصر نادر خاکی بررسی گردید. نتایج نشان داد که غلظت اسید، درجه حرارت، اندازه ذرات کانسنگ، نسبت مایع به جامد و زمان فروشویی به ترتیب از عوامل مهم در بازیابی عناصر نادر خاکی از کانسنگ میباشند. درصد بازیابی عناصر نادر خاکی در اسید سولفوریک نسبت به اسیدهای دیگر بالاتر بود. افزایش دما تا ۸۵ درجه سانتیگراد سبب تسریع در انجام واکنش لیچینگ و افزایش بازیابی عناصر نادر خاکی میشود. با افزایش نسبت مایع به جامد تا ۲ تماس مؤثر جامد با مایع به دلیل وجود اسید اضافی در محیط واکنش افزایش پیدا میکند، در نتیجه میزان شویش عناصر نادر خاکی بیشتر میشود. درجه حرارت ۸۵ درجه سانتیگراد، زمان ۶ ساعت، غلظت اسید سولفوریک ۱٫۵ مولار، نسبت مایع به جامد تا ۲ تماس مؤثر جامد با مایع به دلیل وجود اسید اضافی در محیط در معناص نادر بازی می می در نتیجه میزان شویش عناصر نادر خاکی بیشتر میشود. درجه حرارت ۸۵ درجه سانتیگراد، زمان ۶ ساعت،

**كليدواژەھا:** عناصر نادر خاكى، فروشويى، كانسنگ چاەگز

# Investigating the effective parameters on the recovery of rare earth elements from Chahgaz ore using acid washing process

M. Rezaee\*

Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-8486, Tehran - Iran

**Research Article** 

Revised: 09.10.2024, Accepted: 26.10.2024

#### Abstract

In this research, the recovery of rare earth elements from Chahgaz ore has been investigated through an acid leaching process. The effect of different parameters on the dissolution of rare earth elements was also explored. The results indicated that factors such as acid concentration, leaching temperature, ore particle size, liquid to solid ratio, and leaching time are crucial in recovering rare earth elements from the ore. Specifically, the recovery percentage of rare earth elements in sulfuric acid was found to be higher compared to other acids. Increasing the temperature to 85 degrees Celsius was observed to accelerate the leaching reaction and enhance the recovery of rare earth elements. Moreover, increasing the liquid to solid ratio up to 2 led to improved contact between the solid and liquid phases, as excess acid in the reaction medium facilitated a higher leaching rate of rare earth elements. Optimal conditions for the leaching process were determined to be a temperature of 85 degrees Celsius, a leaching time of 6 hours, a sulfuric acid concentration of 1.5 M, a liquid to solid ratio of 2, and a particle size of 150 microns. Under these conditions, a recovery percentage of 95% for rare earth elements from Chahgaz ore was achieved.

Keywords: Rare earth elements, Leaching, Chahgaz ore

Received: 21.08.2024,

Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology

Vol. 46 (2), Serial Number 112, 2025, P 170-178

مجله علوم، مهندسی و فناوری هستهای دوره ۴۶، شماره ۲، جلد ۱۱۲، تابستان ۱۴۰۴، ص ۱۷۰–۱۷۸



نادر خاکی سبب میشود که مقاومت این آلیاژها افزایش یابد. همچنین استحکام آلیاژهای آلومینیم را افزایش میدهند. از دیگر کاربردهای عناصر نادر خاکی ساخت کاتالیستهای شیمیایی است. این کاتالیستها در گستره وسیعی از فرایندهای شیمیایی مانند فرایندهای اکسیداسیون، پلیمریزاسیون و در صنایع پتروشیمی استفاده میشوند. ایتریم و تربیم نیز در صنایع پزشکی و ساخت داروهای ضدسرطان کاربرد دارند. همچنین در رادارها، ماهوارهها و وسایل ارتباطی دقیق از این عناصر استفاده میشود. شکل ۱، برآورد تقاضای جهانی برای عناصر نادر خاکی تا سال ۲۰۳۵ در صنایع مختلف را نشان میدهد [۱-۵].

فرایندهای مورد استفاده برای استخراج عناصر نادر خاکی شامل تجزیه کانیهای عناصر نادر خاکی و سپس فروشویی همزمان یا متوالی عناصر نادر خاکی از کانیهای تجزیه شده میشود. کنسانتره حاصل از پرعیارسازی کانسنگ را میتوان مثلاً با تشویه اسیدی، کراکینگ قلیایی و کلرزنی تجزیه کرد. عناصر نادر خاکی را میتوان بهصورت انتخابی استخراج کرد. ماهیت فرایند مورد استفاده برای استخراج عناصر نادر خاکی به نوع کانیهای موجود در کنسانتره، عیار کنسانتره و محصولات موردنظر بستگی دارد [۶-۸].

#### ۱. مقدمه

عناصر نادر خاکی به دلیل گسترش کم و کاربرد فراوانی که در صنایع گوناگون دارند همواره در اقتصاد جهانی نقش تعیین کننده ای داشته و کشورهای تولید کننده این عناصر نیز از این موقعیت به نحو مطلوبی بهرهمند شدهاند. از دهه ۹۰ تاکنون میزان مصرف این عناصر رو به افزایش است، بهطوری که مصرف سالانه آنها، بیش از صد هزار تن گزارش شده است. اخیراً نیز این عناصر، کاربرد وسیعی در صنایع جدید یافته و از اهمیت زیادی برخوردار شدهاند و از اینرو تحت عنوان «عناصر استراتژیک» شناخته میشوند. مصارف مهم عناصر نادر خاکی در تصفيه نفت، صنعت شيشه، سراميك، مغناطيس دائمي و آلیاژهای مخصوص است. از کاربردهای این عناصر میتوان به كابلهاى فيبر نورى (عنصر ايريبيم) اشاره نمود. سريم ارزانترین و فراوانترین عنصر نادر خاکی است و در ساخت جلای شیشه مورد استفاده قرار می گیرد. تجهیزات با تکنولوژی بالا، تجهیزات ارتباطی و برخی از آلیاژهای جدید نیز از مواردی هستند که تولید آنها وابسته به عناصر نادر خاکی است. این عناصر تمایل شدیدی برای ترکیب با ناخالصیهای غیرفلزی مانند اكسيژن، نيتروژن، كربن، هيدروژن دارند. همچنين اين عناصر در تهیه فولاد، ابزارهای ابررسانا، باتریهای جدید و دامنه وسيعي از سراميكها استفاده ميشوند. در آلياژها افزودن عناصر



شکل ۱. برآورد تقاضای جهانی برای عناصر نادر خاکی تا سال ۲۰۳۵ در صنایع مختلف [۲].

Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology Vol. 46 (2), Serial Number 112, 2025, P 170-178



استخراج عناصر نادر خاکی فرایندی شیمیایی است که کنسانتره کانی عناصر نادر خاکی را به ترکیبی از عناصر نادر خاکی تبدیل می کند که ممکن است محصول نهایی و یا محصول میانی برای تولید عنصر یا ترکیب دیگری از عناصر نادر خاکی باشد. فرایند استخراج عناصر نادر خاکی از یک یا چند واکنشگر برای تجزیه کانی و فروشویی عناصر نادر خاکی به شکل محلول بهره می گیرد. در فرایند جداسازی عنصر نادر خاکی از استخراج حلالی، تبادل یونی یا ترسیب شیمیایی برای توليد اكسيدهاى عناصر نادر بهصورت مخلوط يا خالص استفاده میکنند [۱۱-۹]. در روشهای متنوع استخراج عناصر نادر خاکی از واکنشگرهای مختلف بسیاری بهره گرفته می شود. این واکنشگرها عمدتاً اسیدهای آلی، قلیاها، الکترولیتها و گاز كلر هستند. اسيدهايي كه معمولاً استفاده مي شوند شامل سولفوریک اسید Hcl، هیدروکلریک اسید HCl و نیتریک اسید HNO<sub>r</sub> هستند. سدیم هیدروکسید NaOH و سدیم کربنات NarCO<sub>r</sub> رایجترین قلیاهای مورد استفاده هستند. الكتروليتهاى مورد استفاده نيز شامل آمونيم سولفات NaCl امونیم کلرید NH<sub>6</sub>Cl و سدیم کلرید (NH<sub>6</sub>)<sub>7</sub>SO<sub>6</sub> هستند. نیتریک اسید، هیدروکلریک اسید و سولفوریک اسید بیشتر برای استخراج عناصر نادر خاکی از کانیهای کانسنگ سيليكات نظير گادولينيت، اودياليت و آلانيت استفاده مي شوند. قلیاها و سولفوریک اسید بیشتر برای فروشویی عناصر نادر خاکی از کانی های کانسنگ فسفات مانند مونازیت و زنوتایم مفید هستند. کانیهای عناصر نادر خاکی کربناتیت مانند باستنازیت نیز با استفاده از سولفوریک اسید و قلیاها فراوری میشوند. نیتریک اسید عمدتاً برای فروشویی اودیالیت و آپاتیت استفاده میشود. استخراج عناصر نادر خاکی از کانسارهای رسی جذب يونى با استفاده از محلولهاى الكتروليتي انجام مىشود [18-17]

در سال ۲۰۲۲، فروشویی عناصر نادر خاکی از فسفو ژیپس در چین مورد بررسی قرار گرفت و شرایط بهینه فروشویی عبارت بودند از: نوع اسید و غلظت آن، هیدروکلریدریک اسید، ۱٬۶۵ مول بر لیتر، نسبت جامد به مایع ۱۰:۱۰ دما، ۶۰ درجه سانتیگراد و زمان ۶۰ دقیقه [۱۷]. در سال ۲۰۱۵، فروشویی عناصر نادر خاکی از بوکسیت در بلژیک مورد بررسی قرار گرفت و شرایط بهینه فروشویی عبارت بودند از: نوع اسید و غلظت آن، هیدروکلریدریک اسید، ۶۰٫۰ مول بر لیتر، نسبت جامد به مایع ۱۰۵۰، دما، ۲۵ درجه سانتیگراد و زمان ۲۴ ساعت [۸۸]. در سال ۲۰۱۶، فروشویی عناصر نادر خاکی از فسفو ژیپس در کانادا مورد بررسی قرار گرفت و شرایط بهینه فروشویی عبارت بودند از: نوع اسید و غلظت آن، هیدروکلریدریک اسید، ۱٫۵ مول بر

لیتر، نسبت جامد به مایع ۱۰۸، دما، ۸۰ درجه سانتی گراد و زمان ۲۰ دقیقه [۱۹]. در سال ۲۰۱۶، فروشویی عناصر نادر خاکی از سنگ معدن زیرکونو سیلیکات در استرالیا مورد بررسی قرار گرفت و شرایط بهینه فروشویی عبارت بودند از: نوع اسید و غلظت آن، سولفوریک اسید، ۲٫۲ گرم اسید در یک گرم سنگ، دما، ۳۲۰ درجه سانتی گراد و زمان ۳ ساعت [۲۰]. در پی جوییهای مغناطیس سنجی به عمل آمده توسط کارشناسان پی جوییهای مغناطیس سنجی به عمل آمده توسط کارشناسان روسی و ایرانی در منطقه بافق، آنومالی های فراوانی از جمله کانسار آهن چاه گز شناسایی شدند. کانسار آهن چاه گز در منطقه معدنی بافق در ایران مرکزی و در ۴۳ کیلومتری شمال معدن چغارت قرار گرفته است.

مطالعات اکتشافی و زمین شناسی انجام شده بر روی کانسنگ چاهگز نشان داده این منطقه حاوی عناصر با ارزش توریم و عناصر نادر خاکی می باشد [۲۱].

در پژوهش حاضر، به بررسی پارامترهای مهم در فرایند فروشویی عناصر نادر خاکی از کانسنگ چاهگز پرداخته شده است. جهت به دست آوردن حداکثر بازیابی عناصر نادر خاکی از کانسنگ چاهگز پارامترهای فرایندی از جمله: نوع شوینده- غلظت شوینده- دما- نسبت مایع به جامد-زمان-اندازه ذرات به روش یک متغیر در زمان بهینهسازی شدند. آنالیز شیمیایی کانسنگ فوق توسط XRF انجام گرفته است.

## ۲. مواد و روش پژوهش ۱.۲ <sub>مواد</sub>

در پیجوییهای مغناطیسسنجی به عمل آمده توسط کارشناسان روسی و ایرانی در منطقه بافق، آنومالیهای فراوانی از جمله کانسار آهن چاه گز شناسایی شدند. کانسار آهن چاه گز در منطقه معدنی بافق در ایران مرکزی و در ۴۳ کیلومتری شمال معدن چغارت قرار گرفته است. خوراک مورد استفاده در این پژوهش، کانسنگ چاه گز بود. نتایج آنالیز XRF نمونه در جدول ۱ ارائه شده است. اسیدهای معدنی شامل اسید سولفوریک (درصد خلوص ۹۸)، اسید نیتریک (درصد خلوص آلمان تهیه شدند.

چاہگز	کانسنگ	XRF نمونه	<b>۱.</b> آناليز	جدول
-------	--------	-----------	------------------	------

SiO <sub>γ</sub> (/.)	۵۲٬۹	Na <sub>v</sub> O (/.)	۲,۳۶
Fe <sub>γ</sub> O <sub>γ</sub> (/.)	۱۸٫۲۱	ThO <sub>τ</sub> (/.)	۲,٠
MgO (/.)	۲٫۴	$\mathrm{Cr}_{r}\mathrm{O}_{\Delta}$ (/.)	• ، ۲۹
Al <sub>7</sub> O <sub>7</sub> (/.)	۵,۴۱	$P_{\tau}O_{\Delta}$ (/.)	• /۳۷
CaO (/.)	۶,۹۷	Others (/.)	•,84
TiO <sub>γ</sub> (/.)	۶,۸۴		
K <sub>7</sub> O (/.)	٣,۴١		

Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology Vol. 46 (2), Serial Number 112, 2025, P 170-178

# ۲.۲ روش پژوهش

۱.۲.۲ آمادهسازی نمونه

نمونه کانسنگ معدن چاه گز به منظور آمادهسازی برای ادامه مراحل پیش فراوری تا ابعاد زیر ۵۰۰ میکرون خردایش و نمونه برداری شد. شکل ۲ مراحل آماده سازی نمونه کانسنگ معدن چاه گز را نشان می دهد.

## ۲.۲.۲ تجزیه سرندی

پس از تقسیم نمونه و بهدست آوردن نمونه معرف بایستی نمونه مورد تجزیه سرندی قرار گیرد. هدف اصلی در تعیین ابعاد دانهها، بهدست آوردن اطلاعاتی کمی در مورد ابعاد و توزیع آن در نمونه مورد آزمایش است. رایجترین روش اندازه گیری ابعاد دانهها، استفاده از سرندهای آزمایشگاهی است که محدوده به دانههای بزرگتر از ۳۷ میکرون میشود. آنالیز اندازه ذرات جهت مشخص کردن درجه آزادی کانیهای با ارزش از کانسنگ در اندازههای مختلف، تعیین اندازه بهینه خوراک و مشخص کردن دامنه اندازه ذراتی با بیشترین تلفشدگی کانیهای باارزش، انجام می گیرد. آنالیز سرندی تر (۲ کیلوگرم نمونه) در ابعاد (میکرون) (۳۰۰+، ۲۱۲+، ۱۵۰+، ۱۰۶+، ۲۵۰+، ۲۵۰+ و ۳۸+) انجام شده است.

پس از انجام آنالیز سرندی بایستی هر فراکسیون سرندی خشک شده و وزن گردد، لذا نمونهها داخل ظرفهای فلزی و در آون تحت دمایی حدود ۹۰ درجه سانتی گراد خشک شده، آن گاه مورد توزین قرار می گیرند. با داشتن وزن هر فراکسیون سرندی، درصد وزنی روی هر سرند و نیز درصد تجمعی عبور کرده را می توان به دست آورد.

# ۳.۲.۲ پیشفراوری مغناطیسی

جدایش مغناطیسی تر بر روی ۲ نمونه به ابعاد ۱۵۰ و ۲۱۲ میکرون انجام گرفته است.

# ۴.۲.۲ آزمایشات لیچینگ

آزمایشهای لیچینگ در مقیاس آزمایشگاهی مطابق شکل ۳ در بالن سه دهانه مجهز به کندانسور همراه هیتراستیرر به منظور همزنی و تنظیم درجه حرارت رآکتور انجام شدند. برای هر آزمایش ابتدا محلول لیچینگ آماده و بعد از به دما رسیدن رآکتور، کانسنگ به محلول اضافه میشد. پارامترهای آزمایش لیچینگ شامل موارد نوع شوینده- غلظت شوینده- دما- نسبت مایع به جامد-زمان-اندازه ذرات به روش یک متغیر در زمان بهینهسازی شدند. آزمایشات لیچینگ در وزن ۲۰ گرم و در ابعاد

۱۵۰ میکرون نمونه انجام گرفته است. شکل شماتیک فرایند لیچینگ کانسنگ چاهگز در شکل ۴ نشان داده شده است.



**شکل ۲.** مراحل آمادهسازی نمونه کانسنگ معدن چاهگز.



شکل ۳. رآکتور آزمایش لیچینگ کانسنگ چاه گز در مقیاس آزمایشگاهی. Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology Vol. 46 (2), Serial Number 112, 2025, P 170-178



شکل ۴. شکل شماتیک فرایند لیچینگ کانسنگ چاهگز.

# ۳. نتایج و بحث

# ۱.۳ نتایج آنالیز سرندی تر

با توجه به نتایج آنالیز سرندی تر (جدول ۲ و شکل ۵) و همچنین نتایج آنالیز نمونهها (مجموع غلظت ۴ عنصر لانتانیم، سریم، ایتریم و نئودیمیم در ابعاد ۱۵۰ میکرون بیشتر میباشد)، بنابراین برای انجام مراحل فروشویی، کانسنگ تا ۱۵۰ میکرون آسیا شد.

## ۲.۳ نتایج پیشفراوری مغناطیسی

نتایج پیش فراوری مغناطیسی در جدول ۳ آورده شده است. عیار عناصر نادر خاکی (مجموع غلظت عناصر لانتانیم، سریم، ایتریم و نئودیمیم برحسب میلی گرم بر لیتر) در خوراک ۹۵۰ و باطله در ابعاد ۱۵۰ میکرون ۹۵۰ و باطله در ابعاد ۲۱۲ میکرون اماه میباشد و با توجه به نتایج بهدست آمده برای نسبت تغلیظ (جدول ۳)، جداسازی مغناطیسی تأثیری بر پرعیارسازی عناصر نادر خاکی ندارد. قابل ذکر است عیار عناصر توسط دستگاه XRF تعیین گردیده است.

۳.۳ نتایج بهینهسازی پارامترهای مؤثر بر آزمایشات لیچینگ ۱.۳.۳ بررسی اثر نوع اسید در لیچینگ اثر اسیدسولفوریک، اسیدنیتریک و اسیدکلریدریک بر روی لیچینگ عناصر نادر خاکی کانسنگ چاهگز بررسی شد که نتایج

در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به نتایج بهدست آمده اثر اسیدسولفوریک بهتر از اسیدنیتریک و اسیدکلریدریک است.

<b>جدول ۲.</b> نتایج آنالیز سرندی تر نمونه							
ارماد	وزن باقى	درصد وزن	درصد	درصد			
	ماندہ روی	باقی ماندہ	تجمعي باقي	تجمعي			
(ميكرون)	سرند (گرم)	روی سرند	مانده	عبور کردہ			
٣٠٠	))))	$\Delta_{/}\Delta$	$\Delta_{/}\Delta$	٩۴٫۵			
717	١٠٢	۵,٣	٩. • ١	٨٩,١			
۱۵۰	١٧٨	٨,٩	۱۹٫۸	۲.• ۸			
1.8	180	$\Lambda_{/}$ Y	۲۸,۱	۷۱٫۹			
۷۵	۱۹۵	٩٫٧	$\nabla V_{/} A$	87,T			
۵۳	۲۰۰	۱.	۴۷٫۸	۵۲,۲			
٣٨	۶٨	٣٫۴	۵١/٢	۴۸٫۸			



شکل ۵. نمودار درصد تجمعی مواد عبور کرده از سرند نسبت به ابعاد سرند.

Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology Vol. 46 (2), Serial Number 112, 2025, P 170-178

۱۵۰ و ۲۱۲ میکرون	، تغليظ بهدست آمده در دو ابعاد	<b>جدول ۳</b> . نتایج نسبت
ابعاد		نسبت تغليظ
۲۱۲ میکرون	بخش غيرمغناطيسي	١,٢١
۱۵۰ میکرون	بخش غيرمغناطيسي	١

لیچینگ	در	شوينده	نوع	رسی اثر	۴. بر	جدول

درصد بازیابی (./) ± انحراف استاندارد نسبی (./) (n=۳)	زمان (ساعت)	دما (درجه سانتیگراد)	اندازه ذرات (میکرون)	نسبت مایع به جامد	غلظت اسيد (٪ و مولار)	نوع اسيد
$arphi$ ) $\pm$ $arphi_{/}$ A	٢	٨۵	10.	٢	۳ مولار	$\mathrm{H}_{r}\mathrm{SO}_{r}$
47,4 ± 4,4	٢	٨۵	10.	٢	7.Δ	$HNO_{\tau}$
$\Delta 1/r \pm \Delta/1$	٢	٨۵	10.	٢	7.Δ	HCl

۲.۳.۳ بررسی اثر غلظت اسید در لیچینگ

بررسی اثر غلظت اسیدسولفوریک در لیچینگ عناصر نادر خاکی کانسنگ چاهگز در جدول ۵ ارائه شده است.

براساس نتایج جدول ۵، با افزایش غلظت اسیدسولفوریک از ۸٫۰ به ۱٫۵ مولار بازیابی عناصر نادر خاکی افزایش مییابد، که به دلیل آن میباشد که حلالیت هیدروکسید این عناصر نادر خاکی در اسیدهای قوی بهخصوص اسیدسولفوریک بسیار بالا است [۲۲]. همچنین با افزایش غلظت اسیدسولفوریک از ۱٫۵ به ۶ مولار میزان بازیابی کاهش مییابد که به دلیل آن میباشد که در غلظتهای بالاتر حلال، چگالی آن بیشتر میشود و بنابراین محلولی که به داخل ذرهها واکنش میدهد به سختی به بیرون نفوذ میکند، بنابراین بازیابی در غلظتهای بالاتر اسید کاهش مییابد [۳۳]، که نتایج بهدست آمده از تأثیر غلظت اسید سولفوریک مشابه نتایج بهدست آمده از مراجع [۲۲، ۲۳] میباشد. بنابراین، غلظت ۱٫۵ مولار به عنوان غلظت بهینه میباشد. بنابراین، غلظت ۱٫۵ مولار به عنوان غلظت بهینه

# ۳.۳.۳ بررسی اثر نسبت مایع به جامد در لیچینگ

بررسی اثر نسبت مایع به جامد در لیچینگ عناصر نادر خاکی کانسنگ چاهگز در جدول ۶ ارائه شده است.

براساس نتایج جدول ۶ با افزایش نسبت مایع به جامد از ۱ به ۲ بازیابی عناصر نادر خاکی افزایش مییابد به این دلیل که با افزایش نسبت مایع به جامد تماس مؤثر جامد با مایع به دلیل وجود اسید اضافی در محیط واکنش افزایش پیدا میکند، در نتیجه شویش عناصر نادر خاکی بیشتر میشود. از سوی دیگر در مجله علوم، مهندسی و فناوری هستهای

محصول جامد در مدت زمان بیشتری اتفاق میافتد. همچنین با افزایش نسبت مایع به جامد از ۲ به ۳ میزان بازیابی تغییرات چندانی ندارد، به این دلیل است که مقدار اسید برای واکنش با پودر سنگ برای شویش عناصر نادر خاکی در نسبت مایع به جامد ۲ کافی است و افزایش بیشتر آن تأثیری چندانی ندارد. نتایج بهدست آمده از تأثیر نسبت مایع به جامد مشابه نتایج بهدست آمده مراجع میباشد [۲۴]. بنابراین با در نظر گرفتن کاهش هزینه فراوری، نسبت مایع به جامد ۲ به عنوان بهینه در نظر گرفته شده است.

نسبت بالاتر مایع به جامد تبخیر اسیدسولفوریک و خشک شدن

# ۴.۳.۳ بررسی اثر دما در لیچینگ

بررسی اثر دما در لیچینگ عناصر نادر خاکی کانسنگ چاهگز در جدول ۷ ارائه شده است.

براساس نتایج جدول ۷ با افزایش دما از ۶۵ به ۸۵ درجه سانتی گراد بازیابی عناصر نادر خاکی افزایش مییابد، زیرا با افزایش دما در انجام واکنش لیچینگ تسریع صورت می گیرد. نتایج بهدست آمده از تأثیر دما مشابه نتایج بهدست آمده مراجع میباشد [۲۵]. بنابراین، دمای ۸۵ درجه سانتی گراد به عنوان دمای بهینه در نظر گرفته شده است.

۵.۳.۳ بررسی اثر زمان در لیچینگ بررسی اثر زمان در لیچینگ عناصر نادر خاکی کانسنگ چاهگز در جدول ۸ ارائه شده است. ۱۷۵

	ينگ	سی اثر غلظت اسید در لیچ	<b>جدول ۵</b> . برر،			
درصد بازیابی (٪) ± انحراف استاندارد نسبی (٪) (n=۳)	زمان (ساعت)	دما (درجه سانتیگراد)	اندازه ذرات (میکرون)	نسبت مایع به جامد	غلظت اسيد (مولار)	نوع اسيد
$\Delta\Delta_{i}\mathcal{F}\pm\Upsilon_{i}\mathcal{F}$	٢	٨۵	10.	٢	۰ ،۵	$\mathrm{H}_{\tau}\mathrm{SO}_{\tau}$
88,9 ± 8,4	٢	٨۵	۱۵۰	٢	١	$\mathrm{H}_{r}\mathrm{SO}_{F}$
$Y\Delta_{i}Y \pm T_{i}Y$	٢	٨۵	۱۵۰	٢	١٫۵	$\mathrm{H}_{\tau}\mathrm{SO}_{\tau}$
۶۱ ± ۳٫۸	٢	٨۵	10.	٢	٣	$\mathrm{H}_{\tau}\mathrm{SO}_{\tau}$
$\Delta 1_{0} \Delta \pm \mathbf{f}_{0} \mathbf{F}_{0}$	٢	٨۵	10.	٢	۴٫۵	$\mathrm{H}_{r}\mathrm{SO}_{r}$
$\chi_{\gamma} \neq \chi_{\gamma}$	٢	٨۵	۱۵۰	٢	۶	$\mathrm{H}_{r}\mathrm{SO}_{f}$
	لیچینگ	اثر نسبت مایع به جامد در	<b>جدول ۶</b> . بررسی			
صد بازیابی (./) ± انحراف استاندارد نسبی (./) (n=۳)	زمان در ساعت)	دما (درجه سانتی گراد) (۱	اندازه ذرات (میکرون)	نسبت مایع به جامد	۔ غلظت اسید (مولار)	نوع اسيد
$\Delta T_{i} Y \pm F_{i} $	٢	٨۵	۱۵۰	١	۱٫۵	$\mathrm{H}_{\tau}\mathrm{SO}_{\tau}$
$\mathcal{F}\Delta_{I}\mathcal{T}\pm\mathcal{T}_{I}\mathcal{R}$	٢	٨۵	10.	١٫۵	۱٫۵	$\mathrm{H}_{\tau}\mathrm{SO}_{\tau}$
$\mathbf{V}\boldsymbol{\mathcal{P}}_{i}\mathbf{Y} \pm \mathbf{v}_{i}\mathbf{V}$	٢	٨۵	10.	٢	۵,۱	$\mathrm{H}_{\tau}\mathrm{SO}_{\tau}$
$\nabla \Delta_{i} \Delta \pm \nabla_{i} \lambda$	٢	٨۵	۱۵۰	۲ <sub>/</sub> ۵	۱٫۵	$\mathrm{H}_{\tau}\mathrm{SO}_{\tau}$
$\nabla \mathcal{F}_{/} \Delta \pm \nabla_{/} \lambda$	٢	٨۵	10.	٣	۱٫۵	$\mathrm{H}_{\tau}\mathrm{SO}_{\tau}$
		. بررسی اثر دما در لیچینگ	جدول ۷.			
درصد بازیابی (٪) ± انحراف استاندارد نسبی (٪) (n=۳)	زمان (ساعت)	دما (درجه سانتیگراد)	اندازه ذرات (میکرون) (	نسبت مایع به جامد	غلظت اسيد (مولار)	نوع اسيد
$\Delta \mathcal{F}_{i}\mathcal{F} \pm \mathcal{F}_{i}\mathcal{F}$	٢	۶۵	۱۵۰	٢	۱٫۵	$\mathrm{H}_{r}\mathrm{SO}_{F}$
80,9 ± 4,7	٢	۷۵	10.	٢	١٫۵	$\mathrm{H}_{\tau}\mathrm{SO}_{\tau}$
۷۶,۶ ± ۳,۷	٢	٨۵	10.	٢	١٫۵	$\mathrm{H}_{r}\mathrm{SO}_{r}$
		بررسی اثر زمان در لیچینگ	جدول ۸.		_	
درصد بازیابی (٪) ± انحراف استاندارد نسبی (٪) (n=۳)	زمان (دقيقه)	دما (درجه سانتیگراد)	اندازه ذرات (میکرون)	نسبت مایع به جامد	غلظت اسيد (مولار)	نوع اسيد
$ra_{1} + r_{1}$	۱۵	٨۵	10.	٢	۱٫۵	H <sub>7</sub> SO <sub>5</sub>
$\Delta \Upsilon_{I} \Upsilon \pm \Upsilon_{I} \cdot$	٣٠	٨۵	۱۵۰	٢	١٫۵	$\mathrm{H}_{\tau}\mathrm{SO}_{\tau}$
88,1 ± 3,1	۶.	٨۵	10.	٢	١٫۵	$\mathrm{H}_{\tau}\mathrm{SO}_{\tau}$
$Y \Delta_i A \pm \Upsilon_i \Delta$	17.	٨۵	10.	٢	١٫۵	$\mathrm{H}_{\tau}\mathrm{SO}_{\tau}$
$\lambda \cdot \lambda \pm \lambda^{\prime} \epsilon$	۱۸۰	٨۵	۱۵۰	٢	١٫۵	$\mathrm{H}_{\tau}\mathrm{SO}_{\tau}$
$\lambda r_{\lambda} \Delta \pm r_{\lambda} r$	74.	٨۵	10.	٢	۵٫۱	$\mathrm{H}_{\tau} \mathbf{SO}_{\tau}$
$\mathfrak{f}_{i} A \pm \mathfrak{r}_{i} .$	36.	٨۵	10.	٢	۵٫۱	$\mathrm{H}_{\tau}\mathrm{SO}_{\tau}$
${\mathfrak{A}}_{\Delta_{j}}{\mathfrak{I}} \pm {\mathfrak{r}}_{j}{\boldsymbol{\cdot}}$	47.	٨۵	۱۵۰	٢	۱,۵	$H_{\tau}SO_{\tau}$

Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology

مجله علوم، مهندسی و فناوری هستهای دوره ۴۶، شماره ۲، جلد ۱۱۲، تابستان ۱۴۰۴، ص ۱۷۰–۱۷۸

بررسی نتایج اثر زمان در لیچینگ کانسنگ در جدول ۸ ارائه شده است. با توجه به نتایج بهدست آمده با افزایش زمان تا ۳۶۰ دقیقه استخراج عناصر نادر خاکی از کانسنگ چاهگز افزایش می یابد و بعد از آن تغییر چندانی نمی کند. دلیل آن این است که با افزایش مدت زمان لیچینگ زمان تماس ذرات و مایع شستشوی لیچینگ بیشتر شده و در نتیجه میزان حلالیت عناصر نادر خاکی در مایع شستشو بیشتر می شود. با گذشت زمان بیشتر، محصول جامد متراکم در مرحله هضم بیشتر تخریب شده و یونهای عناصر نادر خاکی بیشتر وارد مایع لیچلیکور میشوند. نتایج بهدست آمده از تأثیر زمان مشابه نتایج بهدست آمده مراجع می باشد [۲۷، ۲۷]. بنابراین، زمان ۳۶۰ دقیقه به عنوان زمان بهینه در نظر گرفته شده است.

۶.۳.۳ بررسی اثر اندازه ذرات کانسنگ در لیچینگ

بررسی اندازه ذرات کانسنگ در ابعاد ۷۵، ۱۰۶، ۱۵۰، ۲۱۲ و ۳۰۰ میکرون مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایشها در جدول ۹ ارائه شده است. با توجه به نتایج با افزایش اندازه ذرات کانسنگ بازیابی عناصر نادر خاکی از ابعاد ۳۰۰ تا ابعاد ۱۵۰ میکرومتر افزایش یافته که به دلیل آن است که با کاهش اندازه ذرات، انتشار داخلی مایع لیچلیکور به داخل ذرات افزایش پیدا کرده و در نتیجه سطح تماس ذرات با مایع لیچلیکور بیشتر شده و در نتیجه میزان بازیابی عناصر نادر خاکی افزایش پیدا میکند ولى از ابعاد ١۵٠ تا ابعاد ٧۵ ميكرومتر كاهش مىيابد، كه به

رضائى	محمد
-------	------

دلیل آن است با کاهش زیاد اندازه ذرات، مساحت سطح تازه تولید شده به صورت تصاعدی افزایش پیدا کرده و میزان مصرف يونهاى هيدروژن با حل كردن يونهاى آلوده بيشتر افزايش پیدا می کند. نتایج بهدست آمده از تأثیر اندازه ذرات کانسنگ مشابه نتایج بهدست آمده مراجع می باشد [۲۹، ۲۹]. بنابراین اندازه ۱۵۰ میکرون به عنوان بهینه برای ادامه کارهای آزمایشگاهی انتخاب شد.

#### ۴. نتیجه گیری

در این مقاله اطلاعاتی در مورد لیچینگ کانسنگ چاهگز با اسیدهای معدنی به منظور آزادسازی عناصر نادر خاکی ارائه شده است. این اطلاعات در مراحل بعدی هیدرومتالورژیکی به منظور بازیابی عناصر نادر خاکی از اهمیت بالایی برخوردار است. بهترین عملکرد شستشوی عناصر نادر خاکی با استفاده از محلول اسیدسولفوریک ۱٬۵ مولار به دست آمد که باعث انحلال بیشتر عناصر نادر خاکی شد. افزایش زمان واکنش تا ۶ ساعت باعث بهبود راندمان شستشوی عناصر نادر خاکی شد. بهینهسازی فرایند لیچینگ نشان میدهد که کارآمدترین روش شامل شستشوی کانسنگ با اندازه ذره ۱۵۰ میکرون در دمای ۸۵ درجه سانتی گراد و با نسبت مایع به جامد برابر ۲ میباشد. درصد بازیابی عناصر نادر خاکی بعد از لیچینگ بسیار زیاد (۹۵٪) بوده است

<b>جدول ۹.</b> بررسی اثر اندازه ذرات در لیچینگ								
درصد بازیابی (٪) ± انحراف استاندارد نسبی (٪) (n=۳)	زمان (ساعت)	دما (درجه سانتی گراد)	اندازه ذرات (میکرون)	نسبت مایع به جامد	غلظت اسيد (مولار)	نوع اسيد		
$\delta_{\lambda}$ $\neq$ $\gamma_{\lambda}$	۶	٨۵	۳۰۰	٢	۵٫۱	$\mathrm{H}_{\tau}\mathrm{SO}_{\tau}$		
$\lambda \Upsilon_{j} \Delta \pm \Upsilon_{j} \Upsilon_{j}$	۶	٨۵	717	٢	٥٫٨	$\mathrm{H}_{\tau}\mathrm{SO}_{\tau}$		
${}^{A\Delta_{j}T} \pm {}^{T}{}_{j}$ .	۶	٨۵	۱۵۰	٢	۵٫۱	$\mathrm{H}_{\tau}\mathrm{SO}_{\tau}$		
84/Y ± 4/X	۶	٨۵	1.8	٢	١٫۵	$\mathrm{H}_{\tau}\mathrm{SO}_{\tau}$		
$r \Delta_{i} r \pm \Delta_{i} \cdot$	۶	٨۵	۷۵	٢	۱ <sub>/</sub> ۵	$\mathrm{H}_{\tau}\mathrm{SO}_{\tau}$		



#### مراجع

- 1. De Lima L.B, Filho W.L. Rare Earths Industry; Technological, Economic, and Environmental Implications. Elsevier. 2016.
- Alonso E, Sherman A.M, Wallington T.J, Everson M.P, Field F.R, Roth R, Kirchain R.E. Evaluating rare earth element availability: A case with revolutionary demand from clean technologies. Environmental science and technology. 2012;46:3406-3414.
- 3. Gupta C.K, Krishnamurthy N. Extractive Metallurgy of Rare Earths. Book. 2005.
- 4. Jha A.R. Rare earth materials; properties and applications. CRC press, Taylor and Francis Group. 2014.
- 5. Voncken J.H.L. The rare earth elements; an introduction. Springer Briefs in earth sciences. 2016.
- 6. Gupta C.K, Krishnamurthy N. Extractive metallurgy of rare earths. CRC PRESS. 2005.
- 7. Zhang J, Zhao B, Schreiner B. Separation Hydrometallurgy of Rare Earth Elements. Book. 2016.
- 8. Wang D, Chi R. Rare earth processing and extraction technology. Scientific Press, Beijing, China. 1996.
- Xie F, Zhang T, Dreisinger D, Doyle F. A critical review on solvent extraction of rare earths from aqueous solutions. Minerals Engineering. 2014;56:10–28.
- 10. Page M.J, Soldenhoff K, Ogden M.D. Comparative study of the application of chelating resins for rare earth recovery. Hydrometallurgy. 2017;169:275–281.
- 11. Zhang W, Feng D, Xie X, Tong X, DU Y, Cao Y. Solvent extraction and separation of light rare earths from chloride media using HDEHP-P350 system. Journal of Rare Earths. 2022;40:328-337.
- 12. Honaker R.Q, Zhang W, Werner J. Acid leaching of rare earth elements from coal and coal ash: implications for using fluidized bed combustion to assist in the recovery of critical materials. Energy Fuels. 2019;33:5971–5980.
- 13. Peelman S, Sun Z.H.I, Sietsma J, Yang Y. Book Rare Earths Industry, Chapter 12, Leaching of rare earth elements: Review of past and present technologies. Elsevier. 2016.
- 14. Canovas C.R, Chapron S, Arrachart G, Pellet-Rostaing S. Leaching of rare earth elements (REEs) and impurities from phosphogypsum: A preliminary insight for further recovery of critical raw materials. Journal of Cleaner Production. 2019;219:225-235.
- 15. Walawalkar M, Nichol C.K, Azimi G. Process investigation of the acid leaching of rare earth elements from phosphogypsum using HCl, HNO<sub>3</sub>, and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Hydrometallurgy. 2016;166:195-204.
- 16. Shen L, Chen J, Chen L, Liu C, Zhang D, Zhang Y, Su W, Yuefeng Deng Y. Extraction of mid-heavy rare earth metal ions from sulphuric acid media by ionic liquid [A336][P507]. Hydrometallurgy. 2016;161:152-159.

- 17. Guan Q, Sui Y, Liu C, Wang Y, Zeng C, Yu W, Gao Z, Zang Z, Chi R. Characterization and leaching kinetics of rare earth elements from phosphogypsum in hydrochloric acid. Minerals. 2022;703:1-18.
- Rao Borra C, Pontikes Y, Binnemans K, Van Gerven T. Leaching of rare earths from bauxite residue (red mud). Minerals Engineering. 2015;76:20-27.
- 19. Walawalkar M, Nichol C.K, Azimi G. Process investigation of the acid leaching of rare earth elements from phosphogypsum using HCl, HNO<sub>3</sub>, and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Hydrometallurgy. 2016;166:195-204.
- Lim H, Ibana D, Eksteen J. Leaching of rare earths from fine-grained zirconosilicate ore. Journal of Rare Earths. 2016;34:908-916.
- Ziapour S. Petrology and geochemistry of iron and rare earth elements in the Chahgaz iron deposit (Central Iran). PhD thesis in geology, petrology. 2011 [In Persian].
- Zhang Q, Saito F. Non-thermal process for extracting rare earths from bastnaesite by means of mechanochemical treatment. Hydrometallurgy. 1998;47:231-241.
- 23. Trisnawati I, Prameswara G, Mulyono P, Prasetya A, Murti Petrus H.T.B. Sulfuric acid leaching of heavy rare earth elements (HREEs) from Indonesian zircon tailing. International Journal of Technology. 2020;11:804-816.
- Rosita W, Bendiyasa I.M, Perdana I, Anggara F. Recovery of rare earth elements and Yttrium from Indonesia coal fly ash using sulphuric acid leaching. AIP Conference Proceeding. 2020;2223:050004. https://doi.org/10.1063/5.0000836.
- 25. Whitty-Leveille L, Reynier N, Lariviere D. Rapid and selective leaching of actinides and rare earth elements from rare earth-bearing minerals and ores. Hydrometallurgy. 2018;177:187-196.
- Kim C.J, Yoon H.S, Chung K.W, Lee J.Y, Kim S.D, Shin S.M. Leaching kinetics of lanthanum in sulfuric acid from rare earth element (REE) slag. Hydrometallurgy. 2014;146:133–137.
- 27. Kumari A, Panda R, Jha M.K, Lee J.K, Kumar J.R, Kumar V. Thermal treatment for the separation of phosphate and recovery of rare earth metals (REMs) from Korean monazite. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2014;21:696–703.
- Chusnun Niam A, Ya-Fen W, Shyh-Wei C, Sheng-Jie Y. Recovery of rare earth elements from waste permanent magnet (WPMs) via selective leaching using the Taguchi method. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2019;97:137–145.
- Yang X, Honaker R.Q. Leaching kinetics of rare earth elements from fire clay seam coal. Minerals. 2020;491:1-17.

#### **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

رضائی، محمد. (۱۴۰۴)، بررسی پارامترهای مؤثر بر بازیابی عناصر نادر خاکی از کانسنگ چاهگز با استفاده از فرایند فروشویی اسیدی. مجله علوم، مهندسی و فناوری هستهای، Url: https://jonsat.nstri.ir/article\_1687.html .DOI: https://doi.org/10.24200/nst.2024.1655.2048 .۱۷۸–۱۷۰ .

Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology Vol. 46 (2), Serial Number 112, 2025, P 170-178 مجله علوم، مهندسی و فناوری هستهای دوره ۴۶، شماره ۲، جلد ۱۱۲، تابستان ۱۴۰۴، ص ۱۷۰–۱۷۸