



بررسی پارامترهای هیدرودینامیکی و بازده استخراج برای جداسازی اورانیم با استفاده از حلال تری اکتیل آمین در یک ستون استخراج ضربه‌ای افقی از نوع سینی‌دار

حسین بدخشان^۱، احمد قریب^۱، فرهاد پناهی^۱، محمد قنادی مراغه^۲، سیدجابر صفدری^{۲*}، محمدحسن ملاح^۱

۱. دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صندوق پستی: ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳، تهران - ایران

۲. پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۶۵-۸۴۸۶، تهران - ایران

مقاله فنی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۹/۱۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۱/۳۰

چکیده

در این پژوهش استخراج اورانیم از محلول فروشویی سنگ معدن اورانیم با استفاده از روش استخراج حلالی برای اولین بار در یک ستون استخراج ضربه‌ای افقی از نوع سینی‌دار مورد بررسی قرار گرفت. استخراج اورانیم از محیط سولفات با غلظت 0.25 mol.L^{-1} ، توسط حلال تری اکتیل آمین با غلظت ۵ درصد حجمی، در رقیق‌کننده‌ی کروزن با ۹۰ درصد حجمی و اصلاح‌کننده‌ی فازی دکانول با غلظت ۵ درصد حجمی انجام گرفت. تأثیر پارامترهای عملیاتی شامل شدت ضربه، نرخ جریان فاز پراکنده و نرخ جریان فاز پیوسته بر روی موجودی فاز پراکنده، قطر میانگین ساتر قطرات و توزیع آن‌ها و همچنین درصد استخراج به دست آمد. افزایش شدت ضربه و افزایش نرخ جریان فاز پراکنده و همچنین کاهش نرخ جریان فاز پیوسته باعث افزایش درصد استخراج گردید. نتایج نشان می‌دهد که ستون استخراج ضربه‌ای افقی از نوع سینی‌دار دارای بازدهی بالا برای استخراج اورانیم از محلول فروشویی و از نظر بازدهی استخراج قابل رقابت با ستون‌های ضربه‌ای سینی‌دار از نوع عمودی می‌باشد. با مقایسه روابط متعدد ارایه شده برای موجودی فاز پراکنده و اندازه قطره با نتایج تجربی به دست آمده در این پژوهش، رابطه‌ی جدیدی برای پیش‌بینی قطر میانگین قطرات و همچنین موجودی فاز پراکنده در یک ستون استخراج ضربه‌ای برای استخراج اورانیم ارایه گردید. در مدل ارایه شده، مقدار متوسط خطای مطلق برای اندازه قطره ۷.۷٪ و برای موجودی فاز پراکنده ۸.۲٪ به دست آمد.

کلیدواژه‌ها: استخراج اورانیم، اندازه قطره، موجودی فاز پراکنده، ستون‌های ضربه‌ای افقی سینی‌دار

Investigation of hydrodynamic parameters and separation efficiency for extraction of uranium by Tri-n octylamine in a horizontal pulse sieve plate column

H. Badakhshan¹, A. Gharib¹, F. Panahinia², M. Ghannadi-Maragheh², J. Safdari^{2*}, M.H. Mallah¹

1. Energy Engineering and Physics Department, Amirkabir University of Technology, P.O. Box: 15875-4413, Tehran - Iran
2. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-8486, Tehran - Iran

Technical Paper

Received 8.12.2019, Accepted 18.4.2020

Abstract

In this study, recovery of uranium from leach liquor using solvent extraction technique in a horizontal pulsed sieve plate column was experimentally investigated. Extraction of uranium from an aqueous sulfate solution with 0.25M concentration acid, by using TOA solvent, diluted in kerosene and n-decanol modifier of 5%, 90% and 5% v/v respectively was studied and the influences of operation parameters including the phase flow rates along with pulsation intensity on the dispersed phase holdup, drop size and drop size distribution, as well as extraction efficiency, were evaluated. Increasing pulsation intensity along with the dispersed phase flow rate and decreasing the continuous phase flow rate caused to increase the extraction efficiency. Results showed that the horizontal pulsed sieve plate column has high efficiency for extraction of the uranium from leach liquor. Moreover, a comparative evaluation of available correlations proposed for the prediction of mean drop size and hold up in such columns have been conducted. New correlations for estimating mean drop size and hold up in a horizontal pulsed sieve-plate column were presented, which provided AARE of 7.7% and 8.2%, respectively.

Keywords: Uranium extraction, Dispersed phase holdup, Sauter mean drop diameter, Horizontal pulsed sieve-plate column

*Email: safdari@aeoi.org.ir

۱. مقدمه

استخراج که دارای مزایای بیش‌تری از قبیل فضای موردنیاز کم، نگه‌داری آسان و موجودی کم حلال می‌باشند، ستون‌های استخراج هستند [۱۳]. سیر تکاملی ستون‌های استخراج منجر به معرفی ستون استخراج ضربه‌ای^{۱۰} شده است. در این ستون‌ها به دلیل اینکه سیستم اعمال ضربه خارج از ستون می‌باشد، برای کار با مواد رادیواکتیو و خورنده^{۱۱} بسیار مناسب می‌باشند [۱۴، ۱۵].

روش استخراج با حلال یکی از روش‌های مهم برای استخراج و جداسازی اورانیم از محیط‌های آبی در صنعت هسته‌ای می‌باشد. برای این منظور در طول دهه‌های اخیر از استخراج‌کننده‌های متفاوتی از قبیل تری‌بوتیل فسفات^{۱۲}، تری اکتیل آمین^{۱۳} و ۲- اتیل هگزیل^{۱۴} برای استخراج اورانیم از محلول‌های آبی سولفات استفاده شده است [۱۶-۲۱]. انواع استخراج‌کننده‌هایی که برای استخراج اورانیم استفاده می‌شود در جدول ۱ گزارش شده است [۲۲]. تری اکتیل آمین به دلیل انتخاب‌پذیری و بازده بالای استخراج، به عنوان یک استخراج‌کننده ارزشمند محسوب می‌شود. به همین منظور اغلب از تری اکتیل آمین برای استخراج اورانیم از منابع مختلف استفاده می‌شود [۲۳].

از بین تمام استخراج‌کننده‌های نیتروزنی بر پایه آمینی، تری اکتیل آمین (TOA) به عنوان یکی از بهترین گزینه‌ها می‌باشد. محلول ۴۰٪ تری اکتیل آمین در کروزین قادر به استخراج^{-۱} g. L^{-۱} از محلول آبی شامل اورانیم می‌باشد، هم‌چنین محلول ۹۰٪ تری اکتیل آمین در کروزین توانایی استخراج^{-۱} g. L^{-۱} ۲۶۲ اورانیم از محیط حاوی کلراید را دارد [۲۴]. کروزین به خاطر قدرت استخراج و هم‌چنین شرایط ایجادکننده برای جدایش سریع فازها اغلب به عنوان رقیق‌کننده^{۱۵} در حلال‌ها برای استخراج اورانیم از محیط‌های آبی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۵].

جدول ۱. انواع استخراج‌کننده برای استخراج اورانیم

استخراج‌کننده‌های اسیدی	استخراج‌کننده‌های بازی	استخراج‌کننده‌های خنثی
HDEP	Alamine 336	TBP
β -diketones	Tri-laurylammconium chbride	TOPO
Cyanex 272	Di-trimethylhexyl ammonium chloride	TBPO
Cyanex 301	Aliquat 336	Cyclic polyether di-benzo-18-crown-6 (DBC)
Cyanex 302	TODGA	Cyanex 921
Hydroxyl oximes	2-OAP	Cyanex 923
Thiocarbazones	TOA	Cyanex 925

10. Pulsed Extraction Columns

11. Corrosive

12. Tri N-Butyl Phosphate (TBP)

13. Tri-N-Octylamine (TOA)

14. 2-Ethyl Hexyl

15. Diluent

فرایندهای استخراج و خالص‌سازی اورانیم با روش استخراج حلالی^۱ به دلیل کاربرد گسترده این فلز سخت و گران‌بها در زمینه‌های مختلف به‌ویژه در صنعت همواره مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به توسعه و کاربردهای اورانیم، محصولات تجاری با خلوص و کیفیت بالای آن‌ها جایگزین مواد مبتنی بر سوخت‌های فسیلی گردیده است. به همین منظور اورانیم به عنوان یک فلز استراتژیک مهم برای کاربردهای صنعتی و برنامه انرژی هسته‌ای تبدیل شده است [۱]. در دهه‌های اخیر، به دلیل تقاضای جهانی برای این ماده شکافت‌پذیر^۲، استخراج و جداسازی اورانیم بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است و در این راستا از روش‌های مختلف جداسازی از قبیل استخراج مایع-جامد^۳ و مایع-مایع^۴ بیش‌تر استفاده شده است [۲-۸].

استخراج مایع-مایع یک فرایند جداسازی مهم است که در بسیاری از صنایع مانند نفت، زیست‌شیمی، تولید سوخت هسته‌ای، صنایع داروسازی، استخراج فلزات، صنایع غذایی، مدیریت پسماند و دیگر صنایع استفاده می‌شود [۹-۱۰]. به‌طور خاص از زمان تولید برق هسته‌ای، جداسازی اورانیم از سنگ معدن آن یک موضوع قابل توجه بوده و پژوهش‌های گسترده‌ای در این زمینه صورت گرفته است. از بین روش‌های مختلفی که برای جداسازی اورانیم وجود دارد، استخراج مایع-مایع که استخراج حلالی نیز نامیده می‌شود، روش متداول‌تری است [۱۱]. فرایند استخراج با حلال به دلیل خلوص بالای محصولات، توانایی بازیافت زیاد، گزینش‌گری بالا^۵، هزینه پایین، سادگی عملیات، مصرف کم مواد اولیه و ظرفیت تولید بالا به‌طور گسترده‌ای در صنعت هسته‌ای استفاده می‌شود [۱۲].

استفاده از میکسرستلرها^۶ جهت خالص‌سازی و جداسازی اکتینیدها دارای مزایایی نظیر مناسب بودن برای عملیات پیوسته^۷ یا ناپیوسته^۸، حساسیت کم نسبت به تغییر شرایط خوراک یا محیط، راه‌اندازی آسان، پایدار بودن در استخراج و بازده استخراج بالا، برای ارزیابی استخراج در مقیاس آزمایشگاهی ایده‌آل می‌باشد. با این‌حال این روش دارای معایبی نیز می‌باشد که از جمله آن‌ها می‌توان به زمان اقامت بالا، آب‌بندی ضعیف، موجودی بالای فاز پراکنده^۹ و هم‌چنین فضای زیاد مورد نیاز اشاره نمود [۹]. نوع دیگری از روش‌های

1. Solvent Extraction

2. Fissionable

3. Liquid-Solid Extraction

4. Liquid-Liquid Extraction

5. Selectivity

6. Mixer-Settlers

7. Continuous

8. Batch

9. Hold Up

از بین انواع مختلف ستون‌های ضربه‌ای، نوع سینی‌دار آن برای استخراج و جداسازی آکتینیدها از جمله اورانیم کاربرد دارد که در منابع، اطلاعات کافی از آن‌ها برای نوع افقی موجود نمی‌باشد. علاوه بر این، دانش مربوط به طراحی و عملکرد این ستون‌ها به دلیل رفتار پیچیده پارامترهای هیدرودینامیکی و انتقال جرم این ستون، مشکل است. بنابراین برای طراحی مناسب این ستون‌ها دانستن اندازه قطره و موجودی فاز پراکنده تحت شرایط عملیاتی مختلف، به‌ویژه برای نوع افقی سینی‌دار، امری ضروری می‌باشد. تاکنون فقط پژوهش‌هایی در زمینه موجودی فاز پراکنده و اندازه قطره در ستون ضربه‌ای عمودی از نوع سینی‌دار انجام شده و روابطی برای پیش‌بینی موجودی فاز پراکنده و اندازه قطره تحت شرایط عملیاتی مختلف ارائه گردیده است [۳۱-۳۳].

هدف از این پژوهش، امکان‌سنجی استفاده از ستون استخراج ضربه‌ای افقی از نوع سینی‌دار برای استخراج اورانیم از محیط سولفات‌ها توسط حلال تری اکتیل آمین (TOA) با به‌دست آوردن اطلاعاتی از موجودی فاز پراکنده و اندازه قطره تحت شرایط مختلف عملیاتی می‌باشد. تأثیر پارامترهای عملیاتی مختلف شامل شدت ضربه، نرخ جریان فاز پراکنده و نرخ جریان فاز پیوسته بر روی موجودی فاز پراکنده، قطر میانگین قطرات و بازده استخراج مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. بخش تجربی

۲.۱ مواد مورد استفاده

در پژوهش حاضر از محلول فروشویی شده^۴ کارخانه تولید کیک زرد بندرعباس به عنوان محلول آبی ناخالص منبع اورانیم استفاده و برای استخراج اورانیم موجود در آن از روش استخراج با حلال توسط تری اکتیل آمین به عنوان حلال، کروزین (با خلوص بالا) به عنوان رقیق‌کننده و دکانول به عنوان اصلاح‌کننده فازی آلی استفاده شده است. ویژگی‌های فیزیکی دو فاز پراکنده و پیوسته در جدول ۲ گزارش شده است.

۲.۲ تجهیزات و روش آزمایش

آزمایش‌ها در دمای بالای 20°C و در یک ستون استخراج نیمه‌صنعتی ضربه‌ای افقی از نوع سینی‌دار انجام گردید. قسمت اصلی ستون (بخش فعال ستون) یک لوله شیشه‌ای به طول 1.46 m و قطر داخلی 6.2 cm است. این ستون در قسمت فعال خود دارای ۲۴ جفت سینی که از جنس فولاد زنگ نزن می‌باشد که به فاصله 0.5 cm از هم قرار گرفته‌اند. دو ناحیه ته‌نشین‌کننده^۵ با قطر 9 cm یکی در سمت راست و دیگری در سمت چپ ستون جهت جداسازی فازها تعبیه شده‌اند. ورودی و خروجی ستون به چهار مخزن با حجم 20 L متصل شده

از بین انواع مختلف از تجهیزات استخراج‌کننده که تاکنون در کاربردهای صنعتی برای استخراج با حلال اورانیم استفاده شده است، می‌توان به میکسر-ستلرها و ستون‌های ضربه‌ای اشاره کرد [۲۶]. در حال حاضر تنها ستون‌هایی که برای استخراج اورانیم منتشر شده است، ستون‌های ضربه‌ای بیتمن^۱ بوده و در این خصوص تنها دو گزارش در مورد افزایش مقیاس آن‌ها به همراه مقایسه عملکرد نمونه نیمه‌صنعتی و نوع صنعتی در مراجع ذکر گردیده است. هر دو گزارش در ارتباط با ستون‌های ضربه‌ای بیتمن هستند؛ یکی شامل استخراج اورانیم در المپیک دام استرالیا است که توسط مووزویتز و همکارانش ارائه شده است [۲۷] و دیگری بر روی تولید اسید فسفریک به وسیله استخراج از Haifa Chemicals متمرکز می‌شود که توسط میلر و کلینبرگر ارائه شده است [۲۷]. ستون‌های ضربه‌ای بیتمن، از نوع دیسک و دونات^۲ بیش از ۱۵ سال است که برای استخراج اورانیم در کارخانه المپیک دام در استرالیا مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همچنین در سال‌های اخیر یک کارخانه در آفریقای جنوبی و کارخانه دیگری در استرالیا از این نوع ستون‌های ضربه‌ای استفاده می‌کنند [۲۷]. عملکرد این ستون‌ها با بازده 98% بسیار عالی بوده و کارکردی شبیه به چهار ستون میکسر-ستلر متوالی دارند. ستون‌های ضربه‌ای بیتمن دارای مزایای زیادی از قبیل موجودی پایین حلال، نیاز به تعمیرات و نگهداری کم‌تر، هدررفت پایین حلال و عملیات ساده می‌باشند. با این حال میکسر-ستلرها بیش‌تر برای عملیات بازیابی^۳ و شستشو استفاده می‌شوند [۲۷]. با مقایسه عملیات استخراج و بازیابی در هر دو تجهیزات، با توجه به هزینه‌ها تحت شرایط عملیاتی مختلف، هزینه لازم برای ستون‌های بیتمن با تخمینی از اندازه تجهیزات، نوع و کیفیت سنگ معدن ۳۰ تا 40% پایین‌تر است. در واقع در ستون‌های استخراج ضربه‌ای به دلیل هدررفت پایین حلال، هزینه عملیاتی کم‌تر است. بنابراین نصب و راه‌اندازی ستون‌های ضربه‌ای بیتمن برای جداسازی اورانیم از محیط‌های آبی دارای مزیت‌های بیش‌تری نسبت به میکسر-ستلرها هستند. هزینه‌های عملیاتی لازم برای نصب و راه‌اندازی تجهیزات ستون‌های ضربه‌ای تقریباً 20% پایین‌تر از تجهیزات مشابه میکسر ستلرها می‌باشد [۲۶-۲۹]. استفاده موفقیت‌آمیز از ستون‌های ضربه‌ای برای استخراج اورانیم باعث شده است که از این ستون‌ها برای استخراج فلزات دیگر نظیر مس، روی، کبالت و نیکل استفاده شود. برای مثال در پروژه GORO NIKEL در کالدونیای، استفاده از ستون‌های ضربه‌ای برای استخراج فلزات پایه به کار گرفته شده است [۳۰].

1. Bateman
2. Disc-and-Doughnut
3. Stripping

4. Leaching
5. Settler

کشش بین فازی دو فاز پراکنده و پیوسته نیز با استفاده از دستگاه "Kru" ss tensiometer تعیین گردید و برای به دست آوردن دانسیته دو فاز از روش پیکومتری استفاده گردید. همچنین ویسکوزیته دو فاز با استفاده از دستگاه "DVI-Primviscometer" اندازه گیری و مشخص گردید. جدول ۲ ویژگی فیزیکی فاز پراکنده و پیوسته را نشان می دهد. در ابتدای آزمایش ها، فضای خالی ستون از محلول آبی سولفات اورانیوم پر می شود و سپس تری اکتیل آمین + کروزین + دکانول (فاز پراکنده) وارد ستون می گردد. زمان مورد نیاز برای رسیدن به پایداری در هر آزمایش بر حسب نرخ جریان فاز آلی و آبی محاسبه شده و لحاظ گردید.

۱.۲.۲ بازده استخراج

آزمایش ها تحت شرایط عملیاتی مختلف از قبیل شدت ضربه، نرخ جریان فاز پراکنده و نرخ جریان فاز پیوسته انجام شدند. برای به دست آوردن غلظت اورانیوم در فاز آبی در طول فعال ستون و همچنین در فاز آلی، بعد از بازیابی توسط محلول کربنات سدیم از دستگاه آنالیز اسپکترومتری جرمی (ICP-AES) استفاده شد. نسبت غلظت کل فلز در فاز آلی به فاز آبی، ضریب توزیع^۲ نامیده می شود. ضریب توزیع در فرایند جداسازی با حلال توسط رابطه ۱ و درصد استخراج^۳ نیز با روابط (۲ الف) و (۲ ب) بیان می شوند. از رابطه ۲ الف برای سیستم های ناپیوسته و از رابطه ۲ ب برای سیستم های پیوسته استفاده می شود.

$$D = \frac{M_{d,q}}{M_{c,q}} = \left(\frac{M_d}{M_c} \right) \times \frac{V_c}{V_d} \quad (1)$$

$$\% \text{Extraction} = \frac{D \times \frac{V_d}{V_c}}{1 + D \times \frac{V_d}{V_c}} \times 100 \quad (2 \text{ الف})$$

$$\% \text{Extraction} = \frac{x_{in} - x_{out}}{x_{in} - x_{out}^*} \quad (2 \text{ ب})$$

که در آن M_d غلظت اورانیوم در فاز پراکنده، M_c غلظت اورانیوم در فاز پیوسته و V_d و V_c به ترتیب حجم فاز آلی و آبی استفاده شده برای سیستم ناپیوسته می باشد. همچنین x_{in} غلظت اورانیوم در ورودی فاز پیوسته، x_{out} غلظت اورانیوم در خروجی فاز پیوسته و x_{out}^* غلظت تعادلی در فاز پیوسته متناظر با غلظت اورانیوم در فاز پراکنده که در سیستم پیوسته استفاده می گردد است.

است. جریان ورودی فاز آلی و آبی به ستون با دو روماتر نشان داده شد. سنسور نوری وظیفه کنترل سطح مشترک دو فاز^۱ را در ناحیه ته نشین کننده بالایی بر عهده دارد. شیر سلنوییدی نیز در خروجی فاز آبی تعبیه شده است. در حالتی که فصل مشترک دو فاز از حد تعیین شده بالاتر رود، سنسور نوری با فرستادن یک سیگنال به شیر نوری باعث می شود شیر برقی اجازه خروج فاز سنگین را بدهد تا فصل مشترک دو مایع به حالت قبل برگردد. نمای کلی ستون و تجهیزات آن در شکل ۱ و مشخصات ستون به کار گرفته شده در جدول ۳ گزارش شده است.

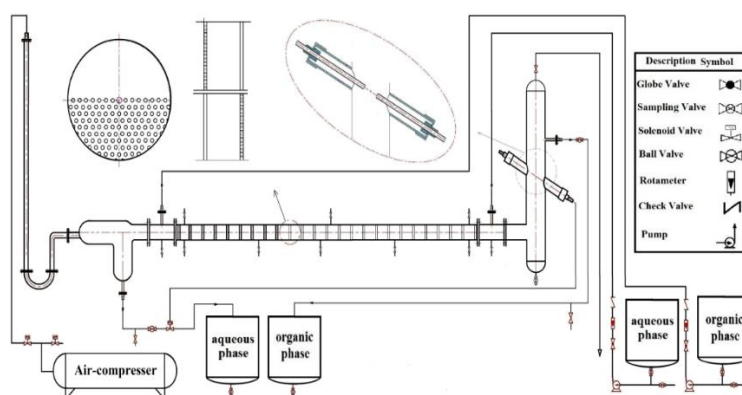
تغییرات غلظت اورانیوم در ورودی و خروجی و همچنین در طول فعال ستون با نمونه گیری از شیرها مشخص گردید. مقدار اورانیوم استخراج شده توسط فاز آلی نیز پس از بازیابی توسط محلول کربنات سدیم یک مولار مشخص شد. برای به دست آوردن غلظت اورانیوم از دستگاه اسپکترومتری نشر اتمی پلاسما جفت شده القایی (ICP-AES) استفاده شد.

جدول ۲. ویژگی های فیزیکی فاز پراکنده و پیوسته در دمای ۲۵ °C

$\sigma (\times 10^{-2} \text{ N/m})$	$\mu (\times 10^{-2} \text{ kg.s/m})$	$\rho (\text{kg/m}^3)$	
۶	۱,۰۲	۱۰۱۶,۸	فاز آبی
	۱,۴۷۶	۷۳۹,۸	فاز آلی

جدول ۳. مشخصات هندسی ستون

۱,۴۶	طول ستون (m)
۶,۲	قطر ستون (cm)
۹	قطر مخازن ته نشین کننده (cm)
۶۰	طول مخزن ته نشین کننده بالایی (cm)
۳۰	طول مخزن ته نشین کننده پایینی (cm)
۱	ضخامت صفحه ها (mm)
۲	قطر سوراخ صفحه ها (mm)
۳,۵	قطر جدا کننده ها (mm)
۵	فاصله بین دو محفظه یا سل (cm)
۱	فاصله بین دو صفحه در یک جفت صفحه (cm)
۰,۲۲	سطح آزاد (-)



شکل ۱. نمای کلی ستون استخراج ضربه ای افقی از نوع سینی دار مورد مطالعه.

2. Distribution Coefficient
3. Extraction Efficiency

1. Interface

در رابطه فوق v_d حجم فاز پراکنده و v_c حجم فاز پیوسته در طول فعال ستون است. در این پژوهش در ابتدا موجودی فاز پراکنده با استفاده از روش shut-down محاسبه گردید. روش کار به این ترتیب بود که بعد از رسیدن سیستم به حالت پایدار^۲ ورودی و خروجی فاز آلی و آبی به ستون هم‌زمان قطع شده و شدت ضربه نیز متوقف گردید. بعد از جدایش فازها، کسر حجمی فاز پراکنده داخل ستون با استفاده از روش طول قوس محاسبه می‌شد. با تعیین طول کمان، طول سطح بین دو فاز در هر آزمایش با استفاده از رابطه ۶ مشخص می‌گردید.

$$L_i = 2r_i \cos\left(\frac{1}{2}\left(\pi - \frac{s}{r_i}\right)\right) \quad (6)$$

r_i شعاع داخلی ستون و s طول کمان قوس می‌باشد. موجودی فاز پراکنده از روش فوق توسط روابط زیر به دست می‌آید.

$$A_o = \frac{1}{2} \pi r_i^2 - r_i^2 \cos^{-1}\left(\frac{L_i}{2r_i}\right) - \frac{L_i}{2} (r_i^2 - x^2)^{1/2} \quad (7)$$

$$\phi_o = \frac{A_o}{\pi r_i^2} \quad (8)$$

۳. نتایج و بحث

ستون استخراج ضربه‌ای افقی از نوع سینی‌دار در سه رژیم مختلف میکسر ستلر، شبه پراکنده و رژیم امولسیون کار می‌کند که عمدتاً تحت تأثیر شدت ضربه می‌باشند [۳۲، ۳۱]. آزمایش‌های اولیه‌ی ما در ستون ضربه‌ای افقی سینی‌دار در طیف گسترده‌ای از شدت ضربه انجام شد و در این راستا رژیم‌های جریان‌های مختلف در ستون مشاهده گردید. در نتیجه، رژیم کاری شبه پراکنده برای انجام آزمایش به منظور دستیابی به بالاترین بازده استخراج در نظر گرفته شد. در ادامه اثر پارامترهای عملیاتی شامل شدت ضربه، نرخ جریان فاز پراکنده و نرخ جریان فاز پیوسته بر قطر میانگین قطرات، موجودی فاز پراکنده و بازده استخراج مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از انجام مراحل فوق، نتایج حاصل از به کارگیری روابط متعدد ارایه شده برای موجودی فاز پراکنده و اندازه قطره با نتایج تجربی به دست آمده در این پژوهش مقایسه شد. برای پیش‌بینی اندازه قطره و موجودی فاز پراکنده در این ستون، با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای تأثیرگذاری که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از نتایج آزمایش‌های انجام شده برای قطر متوسط قطرات و موجودی فاز پراکنده، یک رابطه نیمه تجربی ارایه گردید.

۳.۲.۲ اندازه‌گیری قطر قطرات

اندازه‌گیری قطر قطره به روش عکس‌برداری از طریق یک دوربین دیجیتال مدل نیکون D5000 انجام شد و قطر قطرات با قیاس با قطر خارجی میله نگه‌دارنده میانی به عنوان مبنا تعیین گردید. برای تعیین اندازه قطره‌ها در طول ستون، در چهار نقطه مختلف از ستون عکس گرفته شد. این عکس‌ها توسط نرم‌افزار AutoCAD تجزیه و تحلیل شد. در هر آزمایش نزدیک به ۸۰۰ قطره برای محاسبه قطر میانگین قطرات اندازه‌گیری شد. شکل ۲ دو نمونه از عکس‌های گرفته شده در حالت پایدار را نشان می‌دهد. هم‌چنین بر مبنای عبارت $(d_i \pm \Delta d_i / 2)$ اندازه قطره‌ها در دسته‌هایی گروه‌بندی شده و مورد تحلیل آماری قرار گرفت. قطر میانگین ساتر قطرات d_{32} با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$d_{32} = \left(\frac{\sum_{i=0}^n n_i d_i^3}{\sum_{i=0}^n n_i d_i^2} \right) \quad (3)$$

n_i تعداد قطرات با قطر d_i در محدودی تعیین شده می‌باشد. برای مشخص کردن متوسط درصد خطای مطلق^۱ (AARE) از رابطه ۴ استفاده شده است.

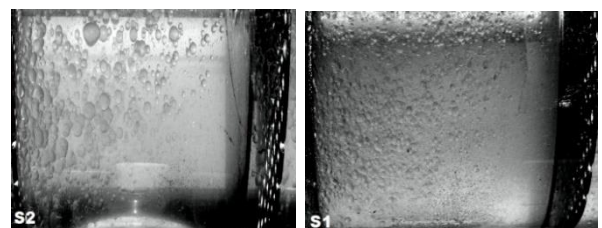
$$AARE = \frac{1}{NDP} \sum_{i=1}^{NDP} \frac{|X_i(\text{exp}) - X_i(\text{theo})|}{X_i(\text{exp})} \quad (4)$$

NDP تعداد آزمایش‌های مورد بررسی و $X_i(\text{exp})$ و $X_i(\text{theo})$ به ترتیب مقادیر به دست آمده از داده‌های تجربی و تئوری می‌باشند.

۳.۲.۲ اندازه‌گیری موجودی فاز پراکنده

یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که در طراحی ستون‌های استخراج مایع-مایع مؤثرند، موجودی فاز پراکنده می‌باشد. نسبت حجم فاز پراکنده به کل حجم فاز پراکنده و پیوسته در قسمت فعال ستون می‌باشد و طبق رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

$$x_d = \frac{v_d}{v_d + v_c} \quad (5)$$



شکل ۲. دو نمونه از عکس‌های گرفته شده برای اندازه‌گیری قطر قطرات.

پارامترهای عملیاتی شامل شدت ضربه، نرخ جریان فاز پراکنده و نرخ جریان فاز پیوسته در یک ستون استخراج ضربه‌ای افقی از نوع سینی‌دار مورد بررسی قرار گرفت. تأثیر شدت ضربه بر روی توزیع اندازه قطرات در نرخ جریان‌های ثابت فاز پراکنده و پیوسته در شکل ۴ الف نشان داده شده است. با افزایش شدت ضربه، اندازه قطرات پایدارتر می‌شود؛ بدین معنی که بازه اندازه قطرات بسته‌تر شده و درصد بیش‌تری از قطرات قطری برابر با اندازه متوسط قطرات خواهند داشت که در این حالت قله نمودارها بالاتر رفته و نمودار باریک‌تر می‌شود.

تأثیر نرخ جریان فاز پراکنده و نرخ جریان فاز پیوسته بر مقادیر تجربی به‌دست آمده برای توزیع اندازه قطرات در شدت ضربه ثابت در شکل‌های ۴ ب و ۴ ج نشان داده شده است. با افزایش نرخ جریان فاز پراکنده و پیوسته توزیع اندازه قطرات گسترده‌تر می‌شود. با افزایش نرخ جریان فازها، مقاومت به مقدار کمی در مسیر جریان فاز پراکنده افزایش پیدا می‌کند، ماندگی فاز پراکنده در ستون مقدار ناچیزی افزایش یافته و در نتیجه هم‌بستگی بیش‌تر و قطرات نسبتاً بزرگ‌تری تشکیل خواهند شد. در نتیجه بازه‌ی پراکندگی قطرات پهن‌تر می‌شود.

۳.۲ تأثیر پارامترهای عملیاتی بر روی موجودی فاز پراکنده
نتایج تأثیر پارامترهای مختلف بر روی موجودی فاز پراکنده در شکل ۵ نشان داده شده است. در رژیم شبه‌پراکنده، با افزایش شدت ضربه موجودی فاز پراکنده کاهش می‌یابد. افزایش شدت ضربه منجر به افزایش تنش برشی و به دنبال آن شکست بیش‌تر قطرات می‌شود. هم‌چنین با افزایش تعداد قطرات، سرعت لغزشی^۳ آن‌ها کم‌تر شده و موجودی فاز پراکنده کاهش می‌یابد. مطابق رابطه ۵، افزایش نرخ جریان فاز پراکنده باعث افزایش موجودی فاز پراکنده می‌شود. به‌طور مشابه افزایش نرخ جریان فاز پیوسته، همان‌طور که در شکل ۵ ج نشان داده شده است، موجب افزایش موجودی فاز پراکنده می‌شود. با افزایش نرخ جریان فاز پیوسته نیروی دراگ بین قطرات فاز پراکنده و فاز پیوسته افزایش می‌یابد. این عامل باعث کند شدن حرکت قطرات شده و زمان ماند آن‌ها افزایش یافته و در نتیجه موجودی فاز پراکنده افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش نرخ جریان فازها منجر به افزایش موجودی فاز پراکنده می‌شود. از مقایسه شکل‌های ۵ ب و ۵ ج مشاهده می‌شود که تأثیر نرخ جریان فاز پیوسته بر افزایش موجودی فاز پراکنده کم‌تر از نرخ جریان فاز پراکنده است.

۱.۳ تأثیر پارامترهای عملیاتی بر روی قطر میانگین قطرات

در مورد همه ستون‌های استخراج، به‌ویژه ستون‌های استخراج‌کننده سینی‌دار مشبک ضربه‌ای، اندازه قطره اهمیت بسیار زیادی در رفتار هیدرودینامیکی و عملکرد انتقال جرم دارد. به عبارتی این پارامتر بر روی موجودی و زمان اقامت فاز پراکنده تأثیر می‌گذارد و همانند طغیان مساحت بین فازی موجود برای انتقال جرم را تحت تأثیر خود قرار داده و بر روی سینتیک انتقال جرم به‌واسطه ضرایب انتقال جرم که وابسته به قطر قطرات هستند، اثرگذار است.

تغییر قطر میانگین قطرات تحت پارامترهای عملیاتی مختلف از قبیل شدت ضربه، نرخ جریان فاز پراکنده و نرخ جریان فاز پیوسته در شکل ۳ نشان داده شده است. تأثیر شدت ضربه بر قطر میانگین قطرات در نرخ جریان فاز پراکنده و پیوسته ثابت در شکل ۳ الف نشان داده شده است. با افزایش شدت ضربه، میزان شکست^۱ قطره‌ها بر میزان هم‌بستگی^۲ آن‌ها غلبه کرده و باعث کاهش اندازه متوسط قطره در شدت ضربه‌های بیش‌تر می‌شود.

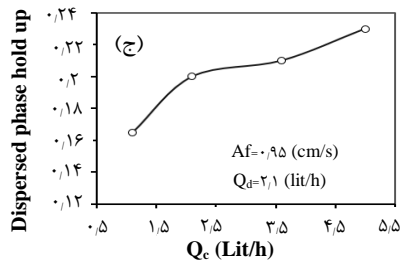
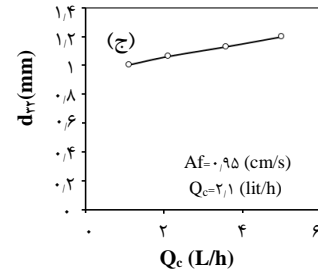
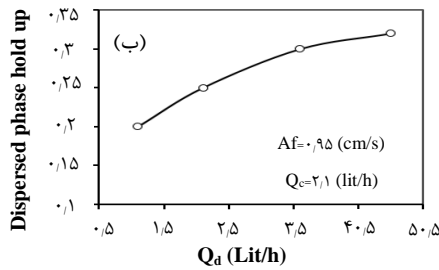
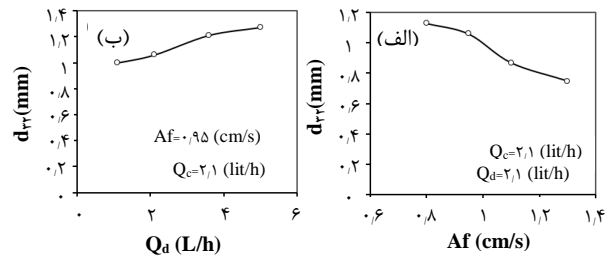
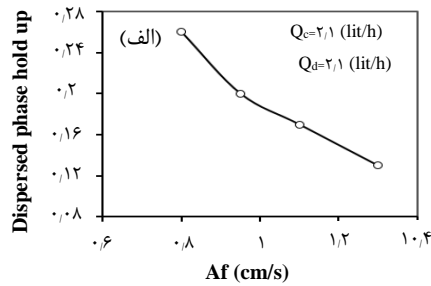
تأثیر نرخ جریان فاز پراکنده بر تغییرات قطر میانگین قطرات در امتداد افقی ستون در شکل ۳ ب نشان داده شده است. با افزایش نرخ جریان فاز پراکنده، پدیده هم‌بستگی قطرات بر شکست آن‌ها چیره می‌شود. با این حال اثر شدت ضربه بر تغییرات قطر میانگین قطرات بزرگ‌تر از نرخ جریان فاز پراکنده بود.

تأثیر نرخ جریان فاز پیوسته بر قطر میانگین قطرات در شدت ضربه 0.95 cm.s^{-1} و نرخ جریان فاز پراکنده $L.h^{-1}$ در شکل ۳ ج نشان داده شده است. مشابه تأثیر نرخ جریان فاز پراکنده، با افزایش نرخ جریان فاز پیوسته نیز قطر میانگین قطرات افزایش پیدا می‌کند. با افزایش نرخ جریان فاز پیوسته به مقدار کمی مقاومت در مسیر جریان فاز پراکنده افزایش پیدا می‌کند، مقدار ناچیزی ماندگی فاز پراکنده در ستون افزایش یافته و در نتیجه هم‌بستگی بیش‌تر و قطرات نسبتاً بزرگ‌تری را شاهد خواهیم بود.

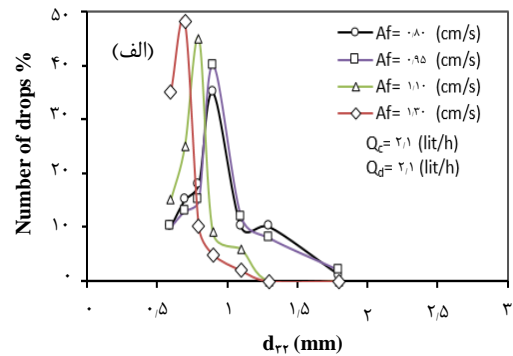
۳.۳ تأثیر پارامترهای عملیاتی مختلف بر توزیع اندازه‌ی قطرات
توزیع اندازه قطرات در ستون‌های استخراج ضربه‌ای بستگی زیادی به شکست و هم‌بستگی قطرات دارد. با توجه به مقالات موجود، در ستون‌های استخراج صنعتی میزان شکست قطرات بر هم‌بستگی آن‌ها غلبه می‌کند [۳۴]. در این پژوهش تأثیر

1. Breakage
2. Coalescence

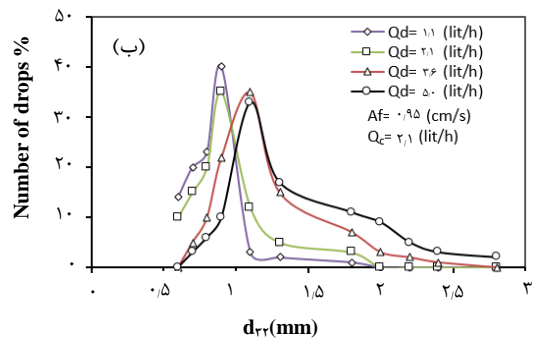
3. Slip Velocity



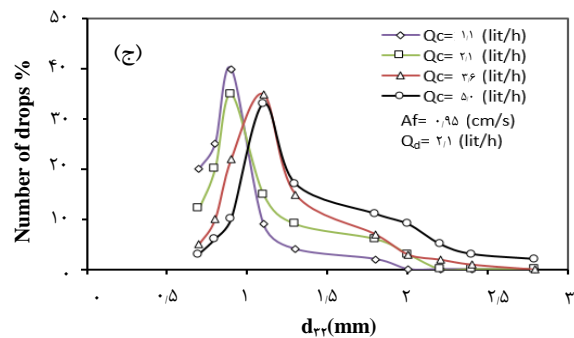
شکل ۳. تأثیر پارامترهای عملیاتی بر قطر میانگین قطرات، (الف) تأثیر شدت ضربه، (ب) تأثیر نرخ جریان فاز پراکنده (ج) تأثیر نرخ جریان فاز پیوسته.



شکل ۵. تأثیر پارامترهای عملیاتی بر موجودی فاز پراکنده، (الف) تأثیر شدت ضربه، (ب) تأثیر نرخ جریان فاز پراکنده، (ج) تأثیر نرخ جریان فاز پیوسته.



۴.۳ تأثیر پارامترهای عملیاتی بر درصد استخراج
 تأثیر پارامترهای عملیاتی شامل شدت ضربه و نرخ جریان فازها بر بازدهی استخراج اورانیم (E) توسط ستون استخراج ضربه‌ای افقی نوع سینی‌دار مطالعه گردید. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، افزایش شدت ضربه موجب تلاطم بیشتر در سطح مشترک دو فاز شده و سطح انتقال جرم به دلیل کاهش اندازه قطره بیشتر خواهد شد و از این‌رو درصد استخراج افزایش می‌یابد. با افزایش نرخ جریان فاز پراکنده به علت افزایش موجودی فاز پراکنده، مساحت سطح تماس بین دو فاز زیاد شده و درصد استخراج بهبود می‌یابد. همچنین با افزایش نرخ جریان فاز پیوسته، پیوند بین قطره‌های سریع‌تر رخ داده و قطرات بزرگ‌تری تشکیل خواهند شد. این قطرات بزرگ باعث کاهش مساحت سطح تماس دو فاز شده و درصد استخراج کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج حاصل، می‌توان گفت که استخراج زمانی کارآمدتر است که شدت ضربه و نرخ جریان فاز پراکنده افزایش یافته و نرخ جریان فاز پیوسته کاهش یابد. اطلاعات بیشتر از شرایط عملیاتی آزمایش و تغییر غلظت اورانیم در ورودی و خروجی فاز آبی همراه بازده استخراج در جدول ۴ گزارش شده است.



شکل ۴. تأثیر پارامترهای عملیاتی بر توزیع اندازه قطرات، (الف) تأثیر شدت ضربه، (ب) تأثیر نرخ جریان فاز پراکنده، (ج) تأثیر نرخ جریان فاز پیوسته.

پیش‌بینی دقیقی از اندازه قطره برای آزمایش‌های مورد نظر به‌دست نمی‌دهد. بنابراین به‌دلیل عدم ارتباط دقیق برای پیش‌بینی اندازه متوسط قطره و هم‌چنین اهمیت بالای اندازه قطره در استخراج اورانیم، یک رابطه تئوری- تجربی برای پیش‌بینی اندازه متوسط قطره اورانیم برحسب پارامترهای عملیاتی با روش آنالیز ابعادی پیشنهاد گردید.

$$\frac{d_{rr}}{\sqrt{\frac{Q_d}{Af}}} = 0.9 \times \left(1 + \frac{Q_c}{Q_d}\right)^{0.97} \left(\frac{g \sqrt{Q_d}}{\sqrt{(Af)^d}}\right)^{-0.284} \quad (10)$$

در شکل ۸ داده‌های تجربی به دست آمده از آزمایش‌ها با داده‌های پیش‌بینی شده از رابطه ۱۰ مقایسه شده و میانگین قدر مطلق خطا در حدود ۷.۷٪ به‌دست آمد. هم‌چنین این رابطه با مقادیر تجربی داده‌های آزمایشگاهی خواجه‌نوری و همکاران نیز مقایسه شد و میانگین قدر مطلق خطاها حدود ۱۱٪ به دست آمد که تطابق قابل‌قبولی را نشان می‌دهد.

۶.۳ روابط پیشنهادی برای موجودی فاز پراکنده

مشابه اندازه متوسط قطر قطره، روابط متعددی نیز برای موجودی فاز پراکنده برای ستون استخراج ضربه‌ای افقی از نوع سینی‌دار ارائه شده است. برای مثال ملنیک [۳۳] رابطه ۱۱ را برای پیش‌بینی موجودی فاز پراکنده ارائه داده است.

$$\phi = 0.87 \left(\frac{A \rho_c g}{\sigma}\right)^{-0.26} \left(\frac{f \sigma}{\rho_c g}\right)^{-0.9} \left(\frac{v_d \rho_c}{g \sigma}\right)^{0.12} \left(1 + \frac{v_c}{v_d}\right)^{0.17} \quad (11)$$

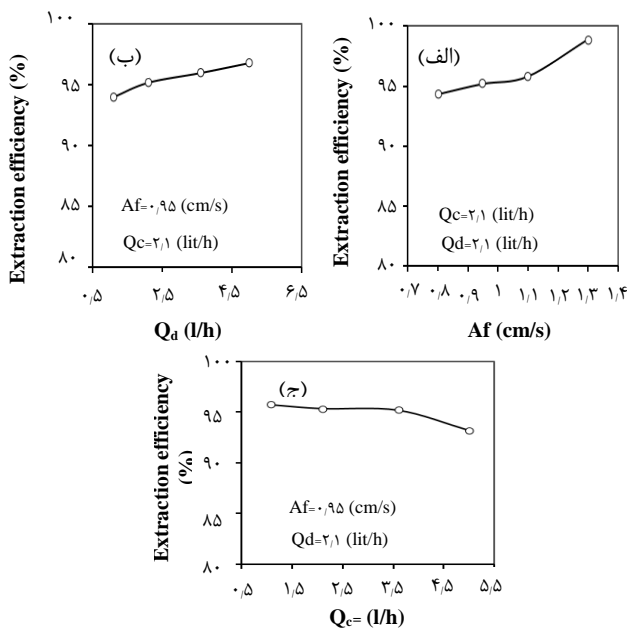
در این رابطه f و A و g به‌ترتیب نشان‌دهنده فرکانس ضربه برحسب هرتز، دامنه ضربه برحسب متر و شتاب گرانش برحسب متر بر مجذور ثانیه است. همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، با مقایسه نتایج داده‌های تجربی با رابطه ۱۱ که برای ستون‌های سینی‌دار ضربه‌ای افقی ارائه شده، نمی‌توان پیش‌بینی دقیقی از موجودی فاز پراکنده برای آزمایش‌های مورد بررسی ارائه نمود. متوسط خطای مطلق به دست آمده بر مبنای این رابطه ۲۲٪ بوده که مقداری بسیار بالا و غیرقابل‌قبول است.

خواجه نوری و همکاران [۳۲] رابطه ۱۲ را برای پیش‌بینی سرعت لغزشی در یک ستون ضربه‌ای افقی از نوع سینی‌دار ارائه داده‌اند:

(12)

$$v_{slip} = 0.88 \left(\frac{Af}{v_d}\right)^{-0.58} \left(1 + \frac{v_c}{v_d}\right)^{0.174} \left(\frac{\rho_d}{\rho_c}\right)^{0.52} \left(\frac{\mu_d v_d}{\sigma}\right)^{0.6}$$

$$v_{slip} = \frac{v_d}{\phi} + \frac{v_c}{1-\phi} \quad (13)$$



شکل ۶. تأثیر پارامترهای عملیاتی بر روی بازده استخراج، (الف) تأثیر شدت ضربه، (ب) تأثیر نرخ جریان فاز پراکنده، (ج) تأثیر نرخ جریان فاز پیوسته.

جدول ۴. شرایط عملیاتی آزمایش‌ها، ضریب توزیع (D)، بازده استخراج (E)

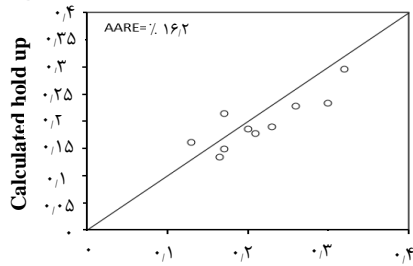
%E	X _{out} (ppm)	X _{in} (ppm)	Holdup	Q _c (Lit/h)	Q _d (Lit/h)	Af (cm/s)	Run
۹۵.۷۳	۸.۲۳	۱۹۳	۰.۱۶۵	۱.۱	۲.۱	۰.۹۵	۱
۹۵.۳۶	۹.۰۱	۱۹۴.۵	۰.۲	۲.۱	۲.۱	۰.۹۵	۲
۹۵.۲	۹.۰۸	۱۹۱.۸	۰.۲۱	۳.۶	۲.۱	۰.۹۵	۳
۹۳.۲۱	۱۳.۱۶	۱۹۴	۰.۲۳	۵	۲.۱	۰.۹۵	۴
۹۴	۱۱.۶۹	۱۹۵	۰.۲	۲.۱	۱.۱	۰.۹۵	۵
۹۵.۲	۹.۳۲	۱۹۴.۵	۰.۲۵	۲.۱	۲.۱	۰.۹۵	۶
۹۶	۷.۶۳	۱۹۱.۲	۰.۳	۲.۱	۳.۶	۰.۹۵	۷
۹۶.۸۲	۶.۱۳	۱۹۳.۳	۰.۳۲	۲.۱	۵	۰.۹۵	۸
۹۴.۳۴	۱۰.۹۲	۱۹۳.۲	۰.۲۶	۲.۱	۲.۱	۰.۸	۹
۹۵.۲	۹.۳۲	۱۹۴.۵	۰.۲	۲.۱	۲.۱	۰.۹۵	۱۰
۹۵.۸۷	۱۰.۹۲	۱۹۲.۱	۰.۱۷	۲.۱	۲.۱	۱.۱	۱۱
۹۸.۸۶	۲.۱۸	۱۹۲.۱	۰.۱۳	۲.۱	۲.۱	۱.۳	۱۲

۵.۳ روابط پیشنهادی برای توزیع اندازه‌ی قطرات

روابط زیادی برای پیش‌بینی اندازه قطرات برای ستون‌های استخراج ضربه‌ای عمودی موجود است که برای ستون‌های افقی مناسب نیستند. تنها رابطه‌ای که برای پیش‌بینی اندازه قطرات برای ستون افقی پیشنهاد شده، در سال ۲۰۱۵ توسط خواجه‌نوری و همکاران برای سیستم‌های آب/تولون، آب/بوتیل استات و آب/نرمال بوتانول در حالت بدون انتقال جرم ارائه شده است. این رابطه به‌صورت زیر می‌باشد [۳۱]:

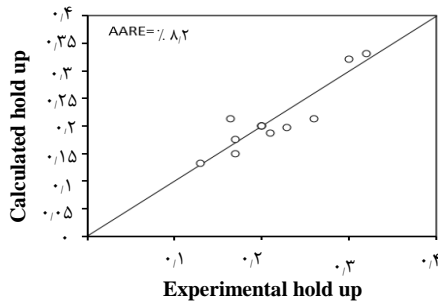
$$d_{rr} = 2.8 \times 10^{-4} \left(1 + \frac{Q_c}{Q_d}\right)^{-0.2} \left(\frac{\mu_d}{\mu_c}\right)^{0.25} \left(\frac{\sigma}{\rho_d \sqrt{Af} \sqrt{Q_d}}\right)^{0.444} \quad (9)$$

مقایسه مقادیر تجربی با داده‌های به‌دست آمده از رابطه ۹ در شکل ۷ نشان داده شده است. رابطه ۹ که توسط خواجه‌نوری و همکاران [۳۱] برای ستون‌های سینی‌دار ضربه‌ای افقی ارائه شده، همان‌طور که از شکل ۷ مشخص است،



شکل ۱۰. مقایسه تطابق داده‌های تجربی با داده‌های حاصل از رابطه تئوری

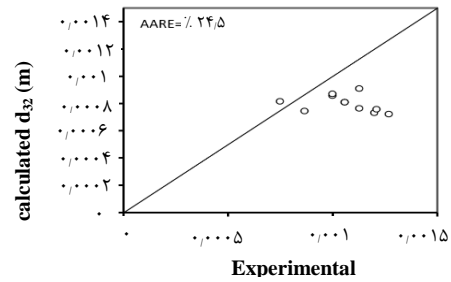
ارائه شده خواجه نوری [۳۲].



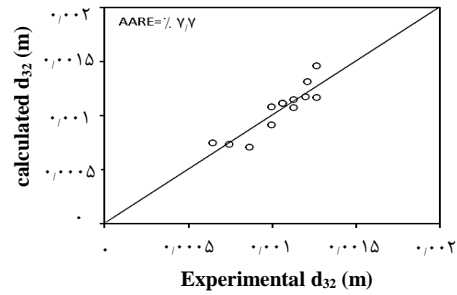
شکل ۱۱. مقایسه تطابق داده‌های تجربی با داده‌های حاصل از رابطه تئوری ۱۴.

نتیجه‌گیری ۴.

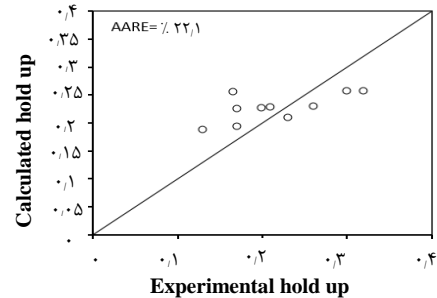
در این پژوهش استخراج اورانیم به‌وسیله یک ستون استخراج ضربه‌ای افقی مورد بررسی قرار گرفت. قبل از شروع آزمایش‌ها، شرایط بهینه برای حلال و خوراک مشخص گردید. در شرایط بهینه غلظت اسید در محلول آبی سولفات ۰٫۲۵ و غلظت تری‌اکتیل آمین ۵٪ حجمی، کروزمین ۹۰٪ حجمی و دکانول (اصلاح‌کننده فازی) ۵٪ حجمی می‌باشد. این آزمایش‌ها اطلاعات ارزشمندی را راجع به ستون استخراج ضربه‌ای افقی سینی‌دار در اختیار ما قرار داد. در این مطالعه، تأثیر پارامتر شدت ضربه در کنار نرخ جریان‌های پراکنده و پیوسته بر روی قطر میانگین قطرات، موجودی فاز پراکنده و بازده استخراج در ستون استخراج ضربه‌ای افقی سینی‌دار بررسی گردید. درصد استخراج اورانیم با افزایش نرخ جریان فاز پراکنده و شدت ضربه افزایش می‌یابد، و با افزایش نرخ جریان فاز پیوسته کاهش می‌یابد. افزایش شدت ضربه موجب اختلاط بیش‌تر بین فازها شده و درصد استخراج افزایش می‌یابد. با استفاده از نتایج تجربی به‌دست آمده از آزمایش‌ها، یک رابطه دقیق برای پیش‌بینی اندازه قطره و موجودی فاز پراکنده در این ستون با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای تأثیرگذاری ارائه گردید. مقدار خطای مطلق برای موجودی فاز پراکنده ۸٫۲٪ و مقدار خطای مطلق برای قطر متوسط قطرات ۷٫۷٪ به‌دست آمد. ستون ضربه‌ای افقی از نوع سینی‌دار با توجه به بازدهی استخراج بالای آن در شرایطی که امکان استفاده از ستون‌های ضربه‌ای عمودی وجود نداشته باشد، به‌عنوان یک استخراج‌کننده مناسب برای خالص‌سازی اورانیم پیشنهاد می‌شود.



شکل ۷. مقایسه تطابق داده‌های تجربی با داده‌های حاصل از رابطه تئوری ارائه شده توسط خواجه‌نوری [۳۱].



شکل ۸. مقایسه تطابق داده‌های تجربی با داده‌های حاصل از رابطه تئوری ۱۰.



شکل ۹. مقایسه تطابق داده‌های تجربی با داده‌های حاصل از رابطه تئوری ارائه شده توسط ملنیک [۳۳].

با استفاده از روابط ۱۲ و ۱۳، موجودی فاز پراکنده به دست می‌آید. مقایسه داده‌های تجربی با نتایج به‌دست آمده از رابطه فوق در شکل ۱۰ گزارش شده است که نشان‌دهنده تطابق نسبتاً قابل‌قبول داده‌های آزمایشگاهی با مقادیر به‌دست آمده توسط این رابطه می‌باشد. متوسط خطای مطلق به دست آمده برای این رابطه ۱۶٫۲٪ است که مقدار قابل‌قبولی می‌باشد.

بنابراین برای پیش‌بینی دقیق موجودی فاز پراکنده یک رابطه تئوری- تجربی برای پیش‌بینی موجودی فاز پراکنده برحسب پارامترهای عملیاتی با روش آنالیز ابعادی پیشنهاد گردید:

$$\varphi = 0.33 \left(1 + \frac{Q_c}{Q_d} \right)^{-0.225} \left(\frac{\sigma}{\rho_d \sqrt{(Af)^2 Q_d}} \right)^{-0.138} \quad (14)$$

در شکل ۱۱ مقادیر به‌دست آمده برای φ از طریق معادله ۱۴ با مقادیر تجربی آن مقایسه شد و میانگین قدر مطلق خطاها حدود ۸٫۲٪ به‌دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که نتایج مربوط به رابطه تئوری ارائه شده، تطابق خوبی با داده‌های تجربی دارد.

مراجع

1. M. Karve, R.V. Rajgor, Amberlite XAD-2 impregnated organophosphinic acid extractant for separation of uranium (VI) from rare earth elements, *Desalination*, **232**, 191-197 (2008).
2. O. Abderrahim, M. Didi, D. Villemin, A new sorbent for uranium extraction: polyethylenimine-phenylphosphonamidic acid, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **279**, 237-244 (2009).
3. H.S. Ferreira, M. de Almeida Bezerra, S.L.C. Ferreira, A pre-concentration procedure using cloud point extraction for the determination of uranium in natural water, *Microchimica Acta*, **154**, 163-167 (2006).
4. S. Girgin, N. Acarkan, A.A. Sirkeci, The uranium (VI) extraction mechanism of D2EHPA-TOPO from a wet process phosphoric acid, *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, **251**, 263-271 (2002).
5. Q. Jia, et al, Adsorption of heavy rare earth (III) with extraction resin containing bis (2, 4, 4-trimethylpentyl) monothiophosphinic acid, *Journal of alloys and compounds*, **374**, 434-437 (2004).
6. E. Karapinar, N. Kabay, Synthesis, characterization and liquid-liquid extraction properties of new methoxyaminobiphenylglyoxime derivatives and their complexes with some transition metals, *Transition Metal Chemistry*, **32**, 784-790 (2007).
7. M. Mahramanlioglu, Adsorption of uranium on adsorbents produced from used tires, *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, **256**, 99-105 (2003).
8. M. Radenković, et al, Chemical and radiochemical characterization of depleted uranium in contaminated soils, *Russian Journal of Physical Chemistry A*, **81**, 1448-1451 (2007).
9. V.S. Kislik, *Solvent extraction: classical and novel approaches*, Elsevier, (2012).
10. R. Torkaman, et al, Extraction of samarium and gadolinium from aqueous nitrate solution with D2EHPA in a pulsed disc and doughnut column, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **48**, 18-25 (2015).
11. R. Ring, Current practice for the milling of uranium ores, in *Uranium 2000: International symposium on the process metallurgy of uranium*, (2000).
12. M. Benedict, H. Levi, T. Pigford, *Nuclear chemical engineering*, Nucl. Sci. Eng. (United States), **82**, (1982).
13. J.D. Thornton, *Science and Practice of Liquid-liquid Extraction: Process chemistry and extraction operations in the hydrometallurgical, nuclear pharmaceutical and food industries*, **2**, Oxford University Press, USA, (1992).
14. M.L. Dietz, J.A. Dzielawa, Ion-exchange as a mode of cation transfer into room-temperature ionic liquids containing crown ethers: implications for the 'greenness' of ionic liquids as diluents in liquid-liquid extraction, *Chemical Communications*, 2124-2125 (2001).
15. G.-T. Wei, Z. Yang, C.-J. Chen, Room temperature ionic liquid as a novel medium for liquid/liquid extraction of metal ions, *Analytica Chimica Acta*, **488**, 183-192 (2003).
16. S. Bagawde, V. Ramakrishna, S. Patil, Complexing of tetravalent plutonium in aqueous solutions, *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry*, **38**, 1339-1345 (1976).
17. S. Bagawde, et al, The effect of temperature on the extraction of uranium (VI) from nitric acid by tri-n-butyl-phosphate, *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry*, **40**, 1913-1918 (1978).
18. T. Sato, The extraction of uranium (VI) from nitric acid solutions by di-(2-ethylhexyl)-phosphoric acid, *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry*, **25**, 109-115 (1963).
19. T. Sato, T. Nishida, The extraction of uranium (VI) from hydrochloric acid solutions by tri-n-octyl phosphine oxide, *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry*, **36**, 2087-2089 (1974).
20. Y. Yan-Zhao, et al, Synergistic extraction of uranium (VI) with mixtures of bis (hexylsulfanyl) ethane (BHxSE) and petroleum sulfoxides (PSO), *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, **258**, 403-408 (2003).
21. G. Zhijun, et al, Liquid-liquid extraction of uranium (VI) and thorium (IV) by two open-chain crown ethers with terminal quinolyl groups in chloroform, *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, **258**, 199-203 (2003).
22. P. Roberto Danesi, R. Chiarizia, C.F. Coleman, The kinetics of metal solvent extraction, (1980).
23. J. Goldenberg, C. Abbruzzese, Extraction of uranium from heap leach liquor with tri-n-octylamine: Equilibrium data and flow-sheet calculations, *International Journal of Mineral Processing*, **10**, 241-254 (1983).
24. J.R. Kumar, et al, A brief review on solvent extraction of uranium from acidic solutions, *Separation & Purification Reviews*, **40**, 77-125 (2011).
25. C. Coleman, et al, Solvent extraction with alkyl amines, *Industrial & Engineering Chemistry*, **50**, 1756-1762 (1958).
26. R. Movsowitz, R. Kleinberger, E. Buchalter, Application of Bateman pulse columns for uranium solvent extraction, *Bateman Projects Ltd., Israel*, (1997).
27. R. Movsowitz, et al, Comparison of the performance of full scale pulsed columns vs. mixer-settlers for uranium solvent extraction, in *Uranium 2000: International symposium on the process metallurgy of uranium*, (2000).
28. B. Grinbaum, Review Article: The Existing Models for Simulation of Pulsed and Reciprocating Columns—How Well do they Work in the Real World?, *Solvent extraction and ion exchange*, **24**, 795-822 (2006).
29. A. Jahya, G. Stevens, H. Pratt, Pulsed Disc-and-Doughnut Column Performance, *Solvent extraction and ion exchange*, **27**, 63-82 (2009).
30. M.F. Vancas, Pulsed column and mixer-settler applications in solvent extraction, *JOM*, **55**, 43-45 (2003).
31. M. Khajenoori, et al, Prediction of drop size distribution in a horizontal pulsed plate extraction column, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, **92**, 25-32 (2015).
32. M. Khajenoori, et al, Slip and Characteristic Velocities in a Horizontal Pulsed-Plate Extraction Column, *Chemical Engineering & Technology*, **38**, 1783-1792 (2015).
33. A. Melnyk, S. Vijayan, D. Woods, Hydrodynamic behaviour of a horizontal pulsed solvent extraction column. part 1: Flow characterization, throughput capacity and holdup, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **70**, 417-425 (1992).
34. L. Rinconrubio, A. Kumar, S. Hartland, Drop-size distribution and average drop size in a Wirz extraction column, *Chemical engineering research & design*, **72**, 493-502 (1994).

استناد به این مقاله

حسین بدخشان، احمد قریب، فرهاد پناهی نیا، محمد قنادی مراغه، سیدجابرصدفدری، محمدحسن ملاح (۱۳۹۹)، بررسی پارامترهای هیدرودینامیکی و بازده استخراج برای جداسازی اورانیوم با استفاده از حلال تری اکتیل آمین در یک ستون استخراج ضربه‌ای افقی از نوع سینی‌دار، ۹۴، ۱۶۲-۱۷۱

DOI: 10.24200/nst.2021.1167

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1167.html

www.SID.ir