



بررسی پارامترهای هیدرودینامیکی یک ستون استخراج پر شده همزن دار در استخراج یون‌های توریم از محلول آبی

مهدی اسداله‌زاده^{ID}، رضوان ترکمان^{ID}، میثم تراب مستعدی^{ID}

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

*Email: masadollahzadeh@aeoi.org.ir

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۳/۲۷ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۶/۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۶/۱۳

چکیده

در این پژوهش، رفتار هیدرودینامیکی ستون پر شده همزن دار حاوی بخش‌های هم‌زده و پر شده با پرکن‌های نامنظم مورد بررسی قرار گرفت. ارزیابی عملکرد ستون به منظور استخراج یون‌های توریم از محلول آبی انجام گردید. اثر پارامترهای عملیاتی بر شرایط هیدرودینامیکی ستون مورد تحقیق قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش پارامترهای عملیاتی شامل سرعت اختلاط، سرعت فاز پراکنده و سرعت فاز پیوسته با افزایش در درصد استخراج توریم همراه است. بیشینه درصد استخراج ۹۷/۵۴٪ در سرعت اختلاط برابر با ۲۲۰ rpm و سرعت‌های فاز پراکنده و فاز پیوسته برابر با ۰/۶۶ mm/s حاصل گردید. افزایش سرعت اختلاط موجب کاهش اندازه قطره و توزیع باریک‌تر از اندازه قطرات می‌گردد. با افزایش سرعت فاز پیوسته در شرایط ثابت برای سایر پارامترها، مقاومت در برابر حرکت قطرات فاز پراکنده ایجاد می‌شود و سرعت لغزشی کاهش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: استخراج مایع-مایع، ستون پر شده همزن دار، توریم، پارامترهای عملیاتی، شرایط هیدرودینامیکی

Investigation of hydrodynamic parameters in a packed-agitated extraction column for the extraction of thorium ions from aqueous solution

M. Asadollahzadeh*, R. Torkaman, M. Torab-Mostaedi

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

Research Article

Received: 17.6.2023, Revised: 26.8.2023, Accepted: 4.9.2023

Abstract

This research evaluates the hydrodynamic behavior of a packed-agitated column, which includes agitated and irregularly packed sections, for extracting thorium ions from an aqueous solution. The effects of various operating parameters on the column's hydrodynamic conditions were investigated. Results indicate that increasing operating parameters such as agitation speed, dispersed phase velocity, and continuous phase velocity enhances thorium extraction efficiency. The maximum extraction efficiency achieved was 97.54% at an agitation speed of 220 rpm, with dispersed and continuous phase velocities of 0.66 mm/s. Increasing the agitation speed results in smaller droplet sizes and a narrower droplet size distribution. Additionally, an increase in continuous phase velocity, while keeping other parameters constant, creates resistance to the movement of dispersed phase droplets, leading to a decrease in slip velocity.

Keywords: Liquid-liquid extraction, Packed-agitated column, Thorium, Operating parameters, Hydrodynamic condition



۱. مقدمه

فرایند استخراج مایع-مایع، امروزه به طور قابل توجهی یک عملیات جداسازی بالغ محسوب می‌شود. اگرچه رشد آن به اندازه فرایندهای تقطیر، جذب و دفع نیست، اما انواع مختلف ستون‌های استخراج در صنعت ساخته و راه‌اندازی شده‌اند. استخراج مایع-مایع وقتی به کار می‌رود که تقطیر عملی نمی‌باشد، یا بسیار گران تمام می‌شود. این فرایند به دلیل رشد تقاضا برای محصولات حساس به دما، نیاز به مواد خالص‌تر، تجهیزات مؤثرتر آن و نیز وجود حلال‌هایی با انتخاب‌پذیری بالاتر، اهمیت بسیاری یافته است [۱، ۲].

در یک کاربرد صنعتی معمولی، یک فرایند از یک مرحله استخراج استفاده می‌کند که در آن املاح از یک فاز آبی به یک فاز آلی منتقل می‌شوند. در ادامه، یک مرحله شستشو استفاده می‌شود که در آن املاح نامطلوب از فاز آلی حذف می‌شوند و سپس املاح مورد نظر از فاز آلی در مرحله بازیابی حذف می‌شوند. سپس می‌توان فاز آلی را تصفیه کرد تا دوباره برای استفاده مجدد، به کار گرفته شود. فرایندهای استخراج مایع-مایع ناهمسو، انتقال جرم بالاتری را در مقایسه با فرایند همسو به دلیل ایجاد گرادیان غلظت بالاتر بین دو فاز آلی و آبی ایجاد می‌کنند. در فرایندهای صنعتی، استخراج مایع-مایع در یک یا چند محفظه و یا ستون‌های استخراج مایع-مایع انجام می‌شود [۳-۷].

دامنه انواع استخراج‌کننده‌ها بسیار متنوع و پیچیده می‌باشد که هر یک بنا بر اصول خاصی طراحی و عمل می‌کنند. معیارهای زیادی در زمینه انتخاب نوع تماس‌دهنده برای یک کاربرد خاص وجود دارد.

معیارهای مختلفی مانند تعداد مراحل ثنوری، فضای مورد نیاز برای تجهیزات، ظرفیت استخراج، کنترل فرایند، هزینه کل و نگهداری، پایداری و زمان اقامت، ویژگی‌های ته‌نشینی سیستم حلال و میزان اطمینان در طراحی در هنگام انتخاب یک تماس‌دهنده برای یک کاربرد خاص باید در نظر گرفته شوند [۸].

ستون‌های استخراج مایع-مایع معمولاً برای تأمین جریان نزولی مایع سنگین‌تر از قسمت بالایی برج و جریان صعودی مایع سبک‌تر از قسمت پایین برج به دلیل گرادیان انتقال جرم بالاتر ساخته می‌شوند. راندمان بالا از معیارهای مهم طراحی در عملیات استخراج حلالی هستند و به سطح کافی بین دو فاز وابسته است. اغلب اوقات، لازم است که آرایه‌ای از پرکن‌ها در

داخل ستون قرار بگیرد تا موجب هدایت مایع سنگین به سمت پایین و مایع سبک به سمت بالا گردد [۹].

ستون‌های استخراج مایع-مایع از نوع پرشده می‌توانند به صورت استاتیک طراحی شوند. در ستون‌های استخراج استاتیک، فرایند جداسازی به نوع پرکن‌های درون ستون و سرعت جریان سیال برای ایجاد تلاطم و قطرات وابسته است. مهمترین مزایای این ستون‌ها عبارتند از: (۱) قابلیت کاربرد در فرایندها با قطره‌های بزرگ و نرخ بالای تولید، (۲) عملکرد ساده بدون قطعات متحرک و آب‌بندی خاص، (۳) کنترل فرایند تنها از یک سطح عملیاتی و (۴) نیاز به فضای کاری کمتر در مقایسه با میکسر-ستلرها [۱۰]. این نوع ستون‌ها با محدودیت‌هایی مواجه هستند و کانالیزه شده به دلیل تماس ناچیز دو فاز مایع رخ می‌دهد. مشکل دیگر این است که به طور کلی فقط قطرات نسبتاً کم و با سایز بزرگ از فاز مایع اول برای دوره‌های زمانی نسبتاً کوتاه در فاز مایع پیوسته دوم پراکنده می‌شوند. در نتیجه کاهش انتقال جرم و کاهش بازده مرحله‌ای در این ستون‌ها مشاهده می‌شود [۱۱].

بازده انتقال جرم این نوع ستون‌ها برای سیستم‌هایی با اختلاف کشش سطحی و یا اختلاف دانسیته متوسط و یا بالا بسیار پایین است و لازم است فرایند اختلاط با همزن مکانیکی و یا ضربه به ستون اعمال گردد. با اعمال اختلاط در داخل ستون، اندازه قطرات و موجودی فاز پراکنده به طور دقیق کنترل می‌شوند. ستون‌های استخراج همزن‌دار متفاوتی برای بالا بردن فرایند انتقال جرم تعریف شده‌اند، این ستون‌ها مانند ستون اولدشو-راشتون، کوهنی، دیسک چرخان نامتقارن و دیسک چرخان سینی‌دار برای سیستم‌های با کشش سطحی متوسط و بالا و با هدف بالا بردن نرخ تولید مناسب هستند [۱۲-۱۵].

ایجاد اختلاط مناسب در ستون‌های استخراج همزن‌دار بسیار مهم است. اختلاط بالا، مقاومت به انتقال جرم را در حین استخراج به حداقل می‌رساند، اما با تشکیل قطرات با سایز کوچک، امکان جداسازی دو فاز به سختی فراهم می‌شود و پدیده طغیان و یا وارونگی در ستون رخ می‌دهد. در طراحی یک فرایند استخراج مایع-مایع، به طور معمول هدف ایجاد پراکندگی ناپایدار است که سطح بالایی را برای انتقال جرم در حین استخراج فراهم می‌کند و به راحتی شکسته می‌شود تا جدایی دو فاز به طور سریع فراهم شود. بنابراین، ممکن است زمان‌های زیادی برای جداسازی و ته‌نشینی فازها مورد نیاز باشد [۱۱].

ستون شیبیل حاوی بخش‌های همزده و پرکن‌ها از نوع منظم در فرایند جداسازی یون‌های لانتانیم و سرب توسط اسداله‌زاده



است. پژوهشگران استخراج و خالص سازی توریم از محیط های مختلف را به طور وسیعی بررسی کرده اند و برای استخراج حلالی توریم از محیط نیتراتی با استفاده از استخراج کننده های فسفری تحقیقات زیادی انجام داده اند [۱۷-۲۱]. اما تاکنون تحقیقاتی در ارتباط با استخراج یون های توریم در ستون های چرخشی به ویژه ستون پرشده همزن دار انجام نگردیده است.

در این پژوهش، ستون پرشده همزن دار با هدف دستیابی به دانش فنی افزایش راندمان ستون های استخراج طراحی، ساخته و راه اندازی گردید و عملکرد آن در استخراج یون های توریم از محلول آبی با بررسی تغییر پارامترهای عملیاتی مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲. روش انجام آزمایش ها

۱.۲ مواد

در این پژوهش از استخراج کننده تری بوتیل فسفات (TBP, Merck, ۹۸٪) با غلظت ۵٪ حجمی و استخراج کننده دهپا (Industrial-Grade, D2EHPA, ۹۸٪) با غلظت ۱۵٪ حجمی رقیق شده در حلال کروزن صنعتی تهیه شده از پالایشگاه تهران به عنوان منبع تأمین فاز آلی ستون استفاده گردید. نمک نیترات توریم (Merck, ۹۹٪)، به منظور تهیه یون های محلول آبی با غلظت ۵۰ ppm مورد استفاده قرار گرفت. خواص فیزیکی خوراک آلی و آبی در جدول ۱ آورده شده است.

۲.۲ ستون پرشده همزن دار

ستون پرشده همزن دار از هفت مرحله اختلاط حاوی همزن های توربینی و شش مرحله تهنشینی پر شده حاوی پرکن های نامنظم تشکیل شده است.

یک طرحواره از این ستون همراه با اجزاء جانبی آن، در شکل ۱ آورده شده است و مشخصات هندسی آن در جدول ۲ ذکر گردیده است.

جدول ۱. مشخصات خوراک فاز آبی و آلی

مقدار	خواص فیزیکی
۰/۹۹۸	دانسیته فاز پیوسته (ρ_c (kg/m ³))
۰/۸۷۲	دانسیته فاز پراکنده (ρ_d (kg/m ³))
۰/۹۸۸	ویسکوزیته فاز پیوسته (μ_c (mPa.s))
۰/۸۷۴	ویسکوزیته فاز پراکنده (μ_d (mPa.s))
۲۱/۵	کشش سطحی (σ (mN/m))

و همکاران مورد بررسی قرار گرفته است [۱۲]. انتقال جرم در میکسر اتفاق می افتد و پرکن نقش ائتلاف کننده قطرات را دارد. به طور کلی بازده انتقال جرم ستون شیب بالا است، با این حال ستون استخراج شیب بهترین ستون برای جداسازی سیستم های مایع-مایع است. نتایج بررسی رفتار انتقال جرمی ستون با یک سیستم استاندارد شیمیایی (خالص سازی یون های روی از محلول آبی) نشان می دهد که این ستون با استفاده از مدل سازی جریان رو به جلو از ضرایب انتقال جرم بالایی برخوردار است [۱۶].

یک مشکل اساسی در ستون شیب این است که بسیاری از خصوصیات فیزیکی مانند کشش سطحی، ویسکوزیته و دانسیته ها با تغییر در غلظت شیمیایی در هنگام استخراج به طور قابل توجهی تغییر می کنند و به شدت بر انتقال جرم و در نتیجه عملکرد استخراج تأثیر می گذارند. تغییر در این خصوصیات باعث ایجاد مشکلات در شکل گیری امولسیون در داخل ستون می گردد. فرایندهای استخراج با عملکرد انتقال جرم بالا در معرض تغییرات در خصوصیات فیزیکی در طول ستون می باشند. ستون استخراج پرشده و یا ستون های استخراج همزن دار به تنهایی قادر به پاسخگویی به چنین تغییراتی نیستند [۱۱].

این ستون از قابلیت خاص جهت اختلاط به منظور رسیدن به یک غلظت خاص و یا تنظیم غلظت ورودی فرایند با هدف رسیدن به غلظت نهایی مناسب نمی باشند. بنابراین لازم است یک ستون که برای سیستم ها با تغییرات قابل توجه خصوصیات فیزیکی همراه است، طراحی گردد تا از بازدهی بالا با کاهش مشکلات تشکیل امولسیون همراه باشد.

بر اساس بررسی های صورت گرفته علی رغم کاربرد ستون های چرخشی، تحقیقاتی پیرامون مشخصات ستون های استخراج پر شده همزن دار با پرکن های نامنظم در مقالات و پتنت ها منتشر نشده است. استفاده از آنها در ساختار ستون، کمک می کند که شرایط نامتقارن بهتری ایجاد شوند که در استخراج سیستم ها با تغییر خواص فیزیکی مناسب تر است. افزایش خواص ترشوندگی با حضور پرکن های نامنظم، امکان استفاده از انواع مختلف آنها و ویژگی خاص این پرکن ها در بالا بردن سطح انتقال جرم موجب شده است که ستون پر شده همزن دار از راندمان بالایی برخوردار باشد.

خالص سازی نیترات توریم ناخالص با استفاده از روش استخراج با حلال یکی از مراحل کلیدی در حلقه فراوری توریم

1. Drop Coalescence



حداقل ۱۰۰۰ قطره در هر آزمایش آنالیز گردید. برای مشخص نمودن اندازه قطرات از نرم‌افزار اتوکد استفاده گردید. در نهایت اندازه قطرات به دامنه‌های ۰/۱ میلی‌متری دسته‌بندی گردیدند و قطر میانگین ساتر قطره از رابطه زیر محاسبه گردید.

$$d_{\text{م}} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n n_i d_i^3}{\sum_{i=1}^n n_i d_i^2} \right] \quad (1)$$

در معادله بالا، $d_{\text{م}}$ قطر میانگین ساتر قطره، d_i قطر قطرات با دامنه مشخص، n_i تعداد قطرات در دامنه مشخص هستند.

توزیع اندازه قطرات به روش عکس‌برداری مستقیم از ستون و آنالیز تصاویر با استفاده از نرم‌افزار به‌دست آمده است. اندازه قطرات در طول ستون به کلاس‌های مساوی طبقه‌بندی شده و سپس با استفاده از رابطه زیر توزیع اندازه قطرات به توزیع حجمی تبدیل گردیدند.

$$f(d_i) = \frac{n_i d_i^3}{\sum_{i=1}^N n_i d_i^3} \quad (2)$$

در رابطه بالا، $f(d_i)$ توزیع اندازه قطرات است. موجودی فاز پراکنده در این آزمایش‌ها با استفاده از روش جابه‌جایی یا بستن اندازه‌گیری گردید. به منظور استفاده از این روش، در انتهای هر آزمایش، شیرهای ورودی و خروجی مربوط به هر یک از فازها به طور هم‌زمان بسته می‌شدند، تا قطرات فاز پراکنده در محل فصل مشترک در بالای ستون جمع‌آوری گردند. سپس موجودی فاز پراکنده با محاسبه حجم فاز آلی جمع شده در بالای ستون و تقسیم آن بر حجم فعال ستون محاسبه گردید.

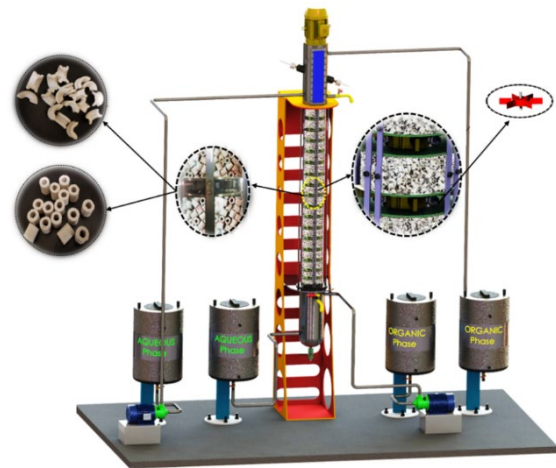
برای جریان متقابل از دو فاز غیرقابل امتزاج در یک ستون استخراج، سرعت لغزشی به وسیله رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$V_{\text{slip}} = \frac{V_d}{\phi} + \frac{V_c}{(1-\phi)} \quad (3)$$

در معادله بالا، V_d ، V_c ، ϕ به ترتیب موجودی فاز پراکنده، سرعت فاز پیوسته و سرعت فاز پراکنده هستند. راندمان استخراج (%E) یون‌های توریم از فاز آبی به فاز آلی با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$\%E = \frac{C_{LP}}{C_{Tot}} \times 100 \quad (4)$$

که در معادله بالا C_{Tot} غلظت کلی یون‌ها در محلول و C_{LP} غلظت فلز در فاز سبک (فاز آلی) است.



شکل ۱. طرح‌واره از ستون پر شده همزن‌دار به همراه اجزاء جانبی آن.

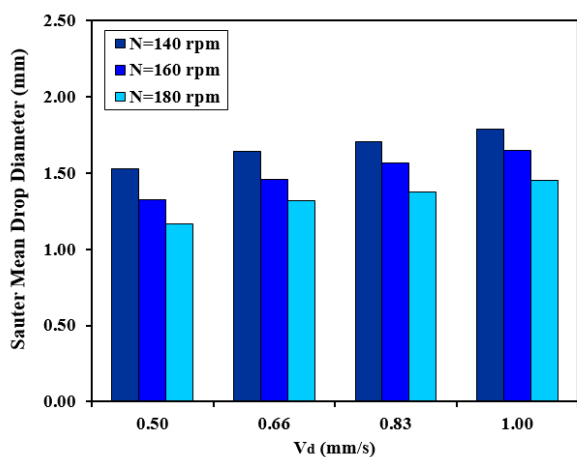
جدول ۲. مشخصات هندسی ستون

ابعاد	اجزاء ستون
۱۱٫۳ cm	قطر ستون
۷۰ cm	ارتفاع بخش فعال ستون
۶٫۷ cm	ارتفاع مرحله
۷ لیتر	حجم فعال ستون
۷	تعداد مراحل اختلاط
۶	تعداد مراحل ته‌نشینی
توربینی شش پره	نوع همزن
۵ cm	قطر همزن
۱ cm	ارتفاع پره
۱۶٫۹ cm	قطر ته‌نشین‌کننده بالا و پایین ستون
۵۴٫۵ cm	ارتفاع ته‌نشین‌کننده بالای ستون
۳۷٫۵ cm	ارتفاع ته‌نشین‌کننده پایین ستون
۸۵ لیتر	حجم مخازن خوراک و پسماند
راشینگ رینگ	پرکن مورد استفاده
سرامیک	جنس پرکن

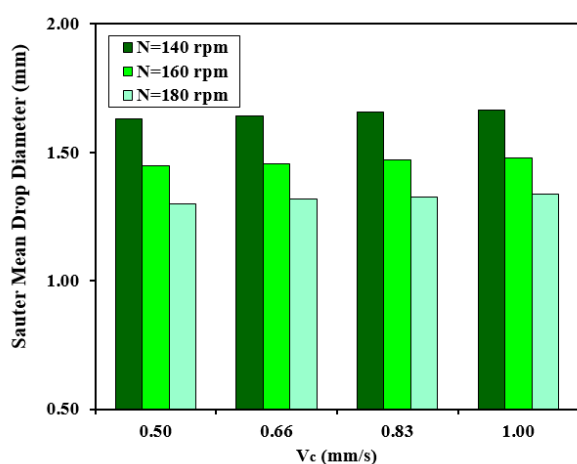
برای اندازه‌گیری قطر قطرات در داخل ستون، پس از برقرار شدن حالت یکنواخت، با استفاده از یک دوربین دیجیتالی ۱۲/۱ مگاپیکسلی نیکون ۱ مدل D۵۰۰۰، عکس‌های متعددی از بخش‌های مختلف قسمت فعال ستون در ارتفاعات ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ سانتی‌متر گرفته شده و از اجزاء داخلی ستون به عنوان مرجع جهت تعیین اندازه قطرات استفاده گردید. برای مقایسه، دو طول مشخص از اجزاء داخلی شامل قطر همزن و ارتفاع هر مرحله مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور در نظر گرفتن اثر انحناء ستون روی اندازه قطرات، عکسی از محتویات ستون تهیه و ابعاد اجزاء داخلی روی عکس اندازه‌گیری گردید. سپس اندازه اجزاء داخلی براساس هر طول مشخص و نتایج با اندازه‌های واقعی مقایسه و مورد ارزیابی قرار گرفتند.

1. Nikon





شکل ۳. اثر سرعت فاز پراکنده بر قطر ستر قطره در سیستم استخراج توریم از محلول آبی (سرعت فاز پیوسته برابر با ۰/۶۶ mm/s).



شکل ۴. اثر سرعت فاز پیوسته بر قطر ستر قطره در سیستم استخراج توریم از محلول آبی (سرعت فاز پراکنده برابر با ۰/۶۶ mm/s).

تأثیرات سرعت اختلاط در توزیع اندازه قطرات در سیستم استخراج توریم از محلول آبی در شکل ۵ آورده شده است. سرعت‌های اختلاط بالاتر منجر به یک توزیع باریک‌تر و متقارن‌تر در این سیستم نیز می‌گردد. انرژی برخورد و آشفتگی سیستم با افزایش سرعت هم‌زدن زیاد می‌شود، در نتیجه این افزایش، ادی‌های جریان مایع کوچک‌تر می‌شوند. ادی‌های کوچک‌تر موجب شکست قطره می‌گردند، در حالی که ادی‌های بزرگ، فقط قطره را با خود حمل می‌کنند و در شکست قطره نقشی ندارند. اهمیت انرژی برخورد و انرژی موجود در ادی‌های کوچک به اندازه‌ای است که سبب می‌شود تا سرعت اختلاط در شکل‌گیری و نحوه توزیع اندازه قطرات، نقش کلیدی را بازی کند، به نحوی که با افزایش سرعت اختلاط، دامنه باریک‌تری از توزیع اندازه قطره حاصل می‌گردد.

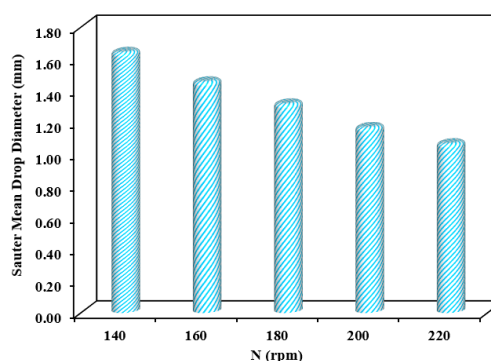
۳. نتایج و بحث

۱.۳ قطر و توزیع اندازه قطرات

نتایج حاصل از تغییرات قطر قطرات در داخل ستون در شکل‌های ۲ تا ۴ آورده شده است. شکل ۲ اثر سرعت اختلاط بر قطر میانگین قطره را در سیستم استخراج توریم از محلول آبی نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، سرعت اختلاط دارای یک اثر قوی بر اندازه قطره است و با افزایش سرعت اختلاط، اندازه قطره به شدت کاهش یافته است. سارکر و فیلیپس^۱ به بررسی اثر سرعت اختلاط و ارتفاع ستون بر روی تغییرات اندازه قطره و میزان موجودی فاز پراکنده برای سیستم آب/تولون در ستون هم‌زده پرداختند. آنها دریافتند که افزایش سرعت اختلاط موجب بهبود شکست قطرات و در نتیجه کاهش اندازه قطره می‌شود [۲۲]. با کاهش اندازه قطرات، سرعت آنها نسبت به فاز پیوسته کاهش یافته و با افزایش تعداد قطرات، میزان موجودی فاز پراکنده افزایش می‌یابد.

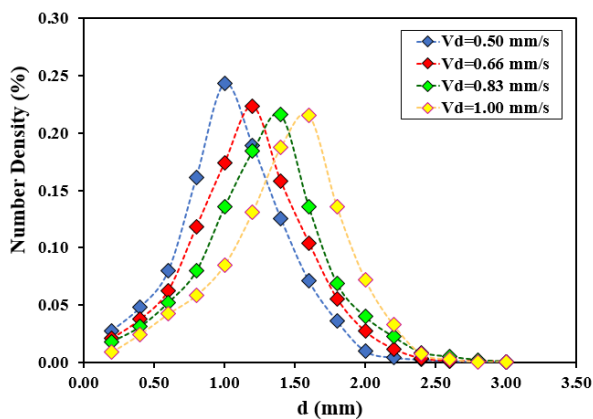
در شکل ۳، اثر سرعت فاز پراکنده بر قطر میانگین ستر قطره در سیستم استخراج توریم از محلول آبی نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، افزایش سرعت فاز پراکنده موجب افزایش قطر میانگین ستر قطره شده است. افزایش اندازه قطره، نتیجه افزایش پیوند به علت موجودی فاز پراکنده بیشتر است.

شکل ۴، اثر سرعت فاز پیوسته بر قطر میانگین ستر قطره را در سیستم استخراج توریم از محلول آبی نشان می‌دهد، افزایش سرعت فاز پیوسته موجب تغییرات نامحسوسی در سایز قطرات می‌شود و به عبارتی اثر این پارامتر بر سایز قطرات در این سیستم ناچیز است.



شکل ۲. اثر سرعت اختلاط بر قطر میانگین ستر قطره در سیستم استخراج توریم از محلول آبی (سرعت فازهای پراکنده و پیوسته برابر با ۰/۶۶ mm/s).





شکل ۶. تأثیر سرعت فاز پراکنده بر روی توزیع اندازه قطرات در سیستم استخراج توریم از محلول آبی (سرعت فاز پیوسته برابر با ۰/۶۶ mm/s و $N=160$ rpm).

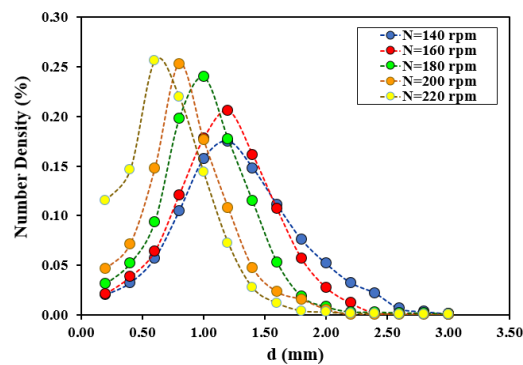
تأثیر سرعت فاز پیوسته بر توزیع اندازه قطرات در سیستم استخراج توریم از محلول آبی در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که افزایش سرعت فاز پیوسته، اثر چندانی بر شکل توزیع اندازه قطره ندارد و منحنی‌های توزیع تقریباً دارای نقاط مشابه هستند.

۲.۳ موجودی فاز پراکنده

شکل ۸، اثر سرعت اختلاط بر موجودی فاز پراکنده درون ستون را برای سیستم استخراج توریم از محلول آبی نشان می‌دهد. افزایش سرعت اختلاط موجب افزایش موجودی فاز پراکنده می‌گردد و با افزایش سرعت اختلاط، شکست قطرات افزایش یافته و در نتیجه اندازه قطرات کاهش می‌یابد. کاهش اندازه قطرات موجب کاهش سرعت آنها نسبت به فاز پیوسته شده و با افزایش تعداد قطرات درون ستون، موجودی فاز پراکنده افزایش می‌یابد.

مطالعات سارکر و فیلیپس نشان داد که در یک دبی ثابت از فاز پیوسته، با افزایش دبی فاز پراکنده و سرعت اختلاط، به ترتیب در اثر افزایش تعداد قطرات و کاهش سرعت نسبی در اثر کاهش اندازه قطره، کسر حجمی فاز پراکنده زیاد می‌گردد و در نتیجه موجودی فاز پراکنده افزایش می‌یابد [۲۲].

شکل ۹ اثر سرعت فاز پراکنده بر موجودی فاز پراکنده را در سیستم استخراج توریم از محلول آبی نشان می‌دهد. با افزایش سرعت فاز پراکنده، موجودی فاز پراکنده افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت فاز پراکنده، تعداد قطرات افزایش یافته و مطابق تعریف موجودی فاز پراکنده، کسر حجمی فاز پراکنده افزایش خواهد یافت.



شکل ۵. تأثیر سرعت اختلاط روی توزیع اندازه قطرات در سیستم استخراج توریم از محلول آبی (سرعت فازهای پراکنده و پیوسته برابر با ۰/۶۶ mm/s).

تیسوریس و همکاران^۱، اثر سرعت اختلاط را در یک ستون چرخشی مورد بررسی قرار دادند و نتایج تحقیقات آنها نشان داد که در پایین ستون با افزایش سرعت اختلاط قطر قطرات افزایش می‌یابد و دارای توزیع وسیعی از قطرات با اندازه‌های متفاوت می‌شوند، در حالی که در بالای ستون، با افزایش سرعت اختلاط، قطر قطرات کاهش یافته و دارای توزیع باریک‌تر و متقارن‌تر می‌گردد.

در بررسی دیگر، آنها به بررسی اثر دبی فازهای پراکنده و پیوسته بر توزیع اندازه قطره پرداختند و نتایج تحقیقات آنها نشان داد که در یک حجم ورودی ثابت از فاز پیوسته و پراکنده، اثر افزایش دبی فاز پراکنده بر افزایش اندازه قطر قطرات نسبت به اثر افزایش دبی فاز پیوسته بیشتر می‌باشد [۲۳].

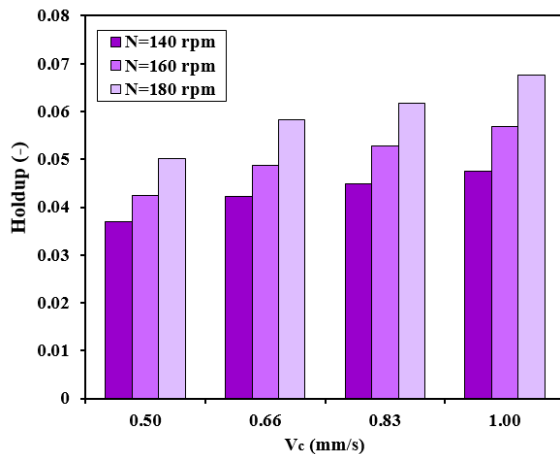
تأثیر سرعت فاز پراکنده بر توزیع اندازه قطرات در سیستم استخراج توریم از محلول آبی در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که شدت جریان فاز پراکنده تأثیر کمی در توزیع اندازه قطرات دارد و با افزایش سرعت فاز پراکنده، توزیع اندازه قطرات پهن‌تر می‌گردد که نشان از افزایش در قطر متوسط سائر قطره است. با افزایش شدت جریان فاز پراکنده، موجودی فاز پراکنده در ستون افزایش پیدا می‌کند که این افزایش، خود منجر به زیاده‌تر شدن تعداد برخوردهای قطره‌های فاز پراکنده با هم می‌شود که نتیجه آن افزایش فرکانس به هم پیوستن است، بنابراین منحنی توزیع اندازه قطره با افزایش شدت جریان فاز پراکنده، پهن‌تر می‌شود اما به هر جهت متوسط اندازه قطره کمتر از ۱۰٪ تغییر می‌کند. از دیدگاه عملی می‌توان به این نتیجه رسید که در موجودی فاز پراکنده پایین، توزیع اندازه قطره مستقل از شدت جریان فاز پراکنده می‌باشد.



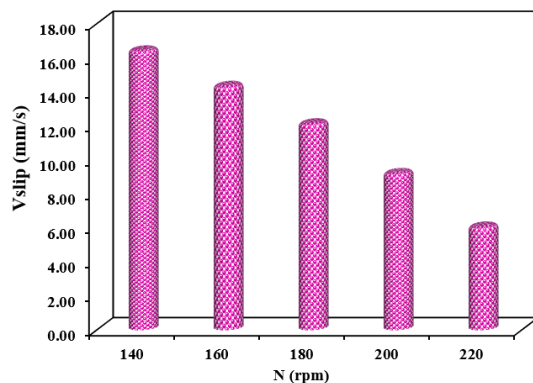
۳.۳ سرعت لغزشی

اثر سرعت اختلاط بر سرعت لغزشی درون ستون در سیستم استخراج توریم از محلول آبی در شکل ۱۱ نشان داده شده است، با افزایش دور همزن در دبی حجمی ثابت فاز پراکنده و پیوسته، سرعت لغزشی کاهش می‌یابد. با افزایش دور همزن در اثر افزایش نیروهای برشی، شکست قطرات بیشتر اتفاق می‌افتد، در نتیجه قطر قطرات کاهش یافته و سرعت لغزشی کاهش می‌یابد.

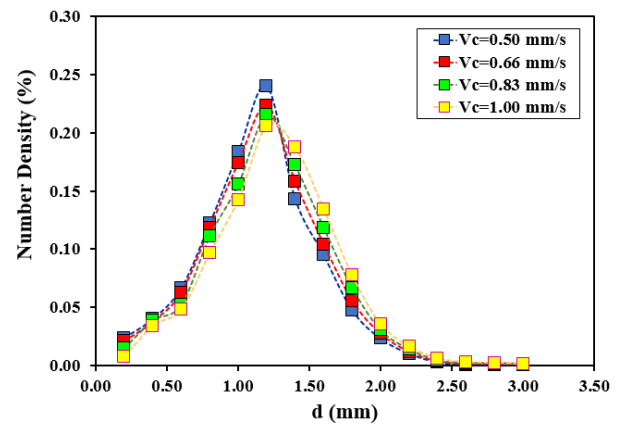
شکل ۱۲ اثر سرعت فاز پراکنده بر سرعت لغزشی را درون ستون برای سیستم استخراج توریم از محلول آبی نشان می‌دهد. با افزایش سرعت فاز پراکنده در دور ثابت همزن و سرعت ثابت فاز پیوسته، سرعت لغزشی افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت فاز پراکنده، قطر قطرات تشکیل شده افزایش یافته و در نتیجه سرعت لغزشی نیز افزایش می‌یابد.



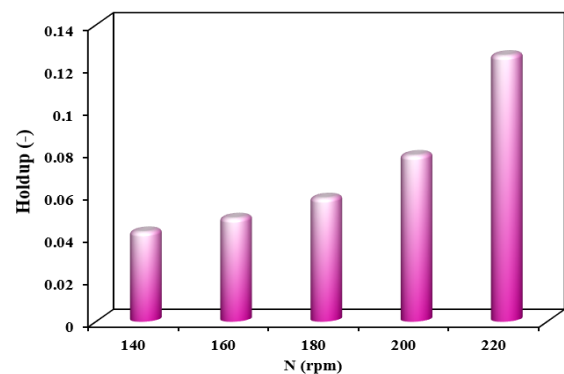
شکل ۱۰. اثر سرعت فاز پیوسته بر موجودی فاز پراکنده در سیستم استخراج توریم از محلول آبی (سرعت فاز پراکنده برابر با ۰.۶۶ mm/s).



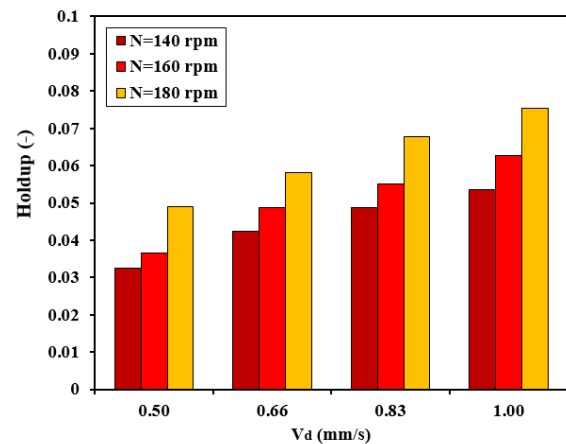
شکل ۱۱. اثر سرعت اختلاط بر سرعت لغزشی در سیستم استخراج توریم از محلول آبی (سرعت فاز پیوسته و پراکنده برابر با ۰.۶۶ mm/s).



شکل ۷. تأثیر سرعت فاز پیوسته روی توزیع اندازه قطرات در سیستم استخراج توریم از محلول آبی (سرعت فاز پراکنده برابر با ۰.۶۶ mm/s و N=۱۶۰ rpm).



شکل ۸. اثر سرعت اختلاط بر موجودی فاز پراکنده در سیستم استخراج توریم از محلول آبی (سرعت فاز پیوسته و پراکنده برابر با ۰.۶۶ mm/s).

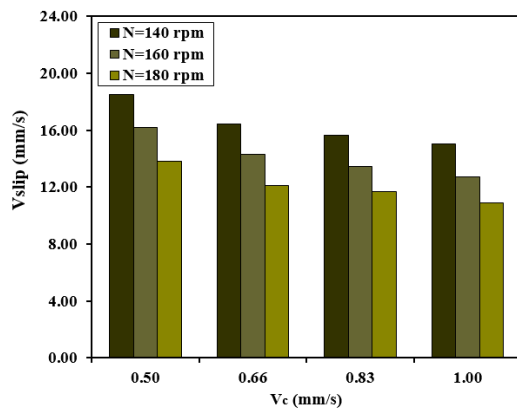


شکل ۹. اثر سرعت فاز پراکنده بر موجودی فاز پراکنده در سیستم استخراج توریم از محلول آبی (سرعت فاز پیوسته برابر با ۰.۶۶ mm/s).

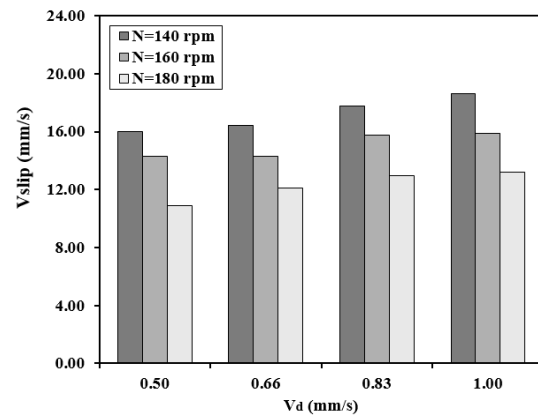
شکل ۱۰ اثر سرعت فاز پیوسته بر موجودی فاز پراکنده را در سیستم استخراج توریم از محلول آبی نشان می‌دهد. افزایش سرعت فاز پیوسته موجب کاهش سرعت نسبی فازها به علت افزایش نیروی دراگ بین قطرات و فاز پیوسته شده و در نتیجه موجودی فاز پراکنده افزایش می‌یابد.



یافته و موجودی فاز پراکنده افزایش می‌یابد. افزایش سرعت اختلاط موجب بهبود شکست قطرات و در نتیجه کاهش اندازه قطره می‌شود.



شکل ۱۲. اثر سرعت فاز پیوسته بر سرعت لغزشی برای سیستم استخراج توریم از محلول آبی (سرعت فاز پراکنده برابر با ۰/۶۶ mm/s).



شکل ۱۳. اثر سرعت فاز پراکنده بر سرعت لغزشی در سیستم استخراج توریم از محلول آبی (سرعت فاز پیوسته برابر با ۰/۶۶ mm/s).

شکل ۱۴، اثر سرعت فاز پیوسته را بر سرعت لغزشی درون ستون را برای سیستم استخراج توریم از محلول آبی نشان می‌دهد. در این سیستم نیز سرعت لغزشی کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت فاز پیوسته در دور ثابت هم‌زن و سرعت ثابت فاز پراکنده، به علت افزایش موجودی فاز پیوسته مقاومتی در برابر حرکت قطرات فاز پراکنده ایجاد می‌شود و سرعت لغزشی کاهش می‌یابد.

جدول ۳. نتایج حاصل از بررسی عملکرد ستون در استخراج توریم از محلول آبی

درصد استخراج	سرعت فاز پیوسته (mm/s)	سرعت فاز پراکنده (mm/s)	سرعت اختلاط (rpm)	آزمایش‌ها
۷۰/۳۴	۰/۶۶	۰/۶۶	۱۴۰	۱
۷۷/۷۹	۰/۶۶	۰/۶۶	۱۶۰	۲
۸۶/۲۸	۰/۶۶	۰/۶۶	۱۸۰	۳
۹۰/۱۵	۰/۶۶	۰/۶۶	۲۰۰	۴
۹۷/۵۴	۰/۶۶	۰/۶۶	۲۲۰	۵
۶۵/۶۳	۰/۶۶	۰/۵۰	۱۴۰	۶
۷۴/۱۲	۰/۶۶	۰/۸۳	۱۴۰	۷
۸۰/۶۸	۰/۶۶	۱/۰۰	۱۴۰	۸
۷۰/۱۸	۰/۶۶	۰/۵۰	۱۶۰	۹
۸۳/۶۴	۰/۶۶	۰/۸۳	۱۶۰	۱۰
۸۹/۵۳	۰/۶۶	۱/۰۰	۱۶۰	۱۱
۸۱/۰۷	۰/۶۶	۰/۵۰	۱۸۰	۱۲
۹۲/۳۴	۰/۶۶	۰/۸۳	۱۸۰	۱۳
۹۳/۴۷	۰/۶۶	۱/۰۰	۱۸۰	۱۴
۶۹/۰۳	۰/۵۰	۰/۶۶	۱۴۰	۱۵
۷۳/۰۵	۰/۸۳	۰/۶۶	۱۴۰	۱۶
۷۵/۱۶	۱/۰۰	۰/۶۶	۱۴۰	۱۷
۷۳/۶۵	۰/۵۰	۰/۶۶	۱۶۰	۱۸
۸۱/۷۵	۰/۸۳	۰/۶۶	۱۶۰	۱۹
۸۳/۶۴	۱/۰۰	۰/۶۶	۱۶۰	۲۰
۸۴/۱۲	۰/۵	۰/۶۶	۱۸۰	۲۱
۸۸/۸۹	۰/۸۳	۰/۶۶	۱۸۰	۲۲
۹۰/۴۵	۱/۰۰	۰/۶۶	۱۸۰	۲۳

۴.۳ عملکرد ستون جهت استخراج یون‌های توریم از محلول آبی
نتایج حاصل از بررسی عملکرد ستون در استخراج توریم در جدول ۳ آورده شده است. نتایج بررسی عملکردی نشان می‌دهد که افزایش پارامترهای عملیاتی شامل سرعت اختلاط، سرعت فاز پراکنده و سرعت فاز پیوسته با افزایش درصد استخراج ۹۷/۵۴٪ یون‌های توریم همراه است و بیشینه درصد استخراج ۹۷/۵۴٪ در سرعت اختلاط برابر با ۲۲۰ rpm و سرعت‌های فاز پراکنده و فاز پیوسته برابر با ۰/۶۶ mm/s حاصل گردید.

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت بررسی پارامترهای هیدرودینامیکی در بحث طراحی و افزایش مقیاس، اثر پارامترهای عملیاتی بر روی قطر میانگین قطرات، توزیع قطرات، موجودی فاز پراکنده، سرعت لغزشی و درصد استخراج مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج آزمایش‌ها نشان داد که توزیع اندازه قطرات به شدت وابسته به سرعت اختلاط درون ستون است و با افزایش سرعت اختلاط، توزیع قطرات باریک‌تر شده و به سمت چپ منحنی متمایل می‌گردد.

همچنین، سرعت اختلاط دارای یک اثر قوی بر اندازه قطره می‌باشد. با افزایش سرعت اختلاط، اندازه قطره به شدت کاهش



8. Yi H, Smith K.H, Fei W, Stevens G.W. CFD Simulation of Two-Phase Flow in a Hybrid Pulsed Sieve-Plate Solvent Extraction Column: Prediction of Holdup and Axial-dispersion Coefficients. *Solvent Extract. Ion Exch.* 2020;38:88-102.
9. Sovilj M.N, Nikolovski B.G, Spasojević M.Đ. Hydrodynamics in spray and packed liquid-liquid extraction columns: A review. *Mac. J. Chem. Chem. Eng.* 2019;38:267-282.
10. Thornton J.D. Science and Practice in liquid-Liquid Extraction Column. *Clarendon Press, New York.* 1992.
11. Lo T.C, Baird M.H.I, Hanson C. Handbook of Solvent Extraction. *Krieger Pub Co, New York.* 1992.
12. Asadollahzadeh M, Torkaman R, Torab-Mostaedi M. Assessment of population balance approach and maximum entropy on drop size behavior of vanadium extraction from sulfate solution in continuous pilot plant column. *Chem. Eng. Process.* 2021;169:108608.
13. Asadollahzadeh M, Torkaman R, Torab-Mostaedi M, Moazami F. Estimation of performance with the two truncated probability density functions, case study: using mixco column to extract samarium and gadolinium. *Sep. Sci. Technol.* 2021;56:1241-1252.
14. Asadollahzadeh M, Torkaman R, Torab-Mostaedi M, Saremi M. Removal of cerium ions in pilot scale agitated column with sieve structure, case study: Evaluation of mass transfer models. *Inter. J. Heat Mass Trans.* 2022;188:122638.
15. Shakib B, Torkaman R, Torab-Mostaedi M, Saremi M, Asadollahzadeh M. Performance evaluation during extraction technique in modified rotating disc column: Experimental and mathematical modeling. *Chem. Eng. Process.* 2022;171:108762.
16. Shakib B, Torkaman R, Saremi M, Torab-Mostaedi M, Asadollahzadeh M. Reactive extraction of zinc ions in the Scheibel column; A case study by applying the mathematical modelling of mass transfer with forward mixing. *Chem. Eng. Process.* 2021;169:108606.
17. Sert Ş, Yusan S. Extraction and separation of thorium from cerium and lanthanum by Cyphos® IL 101 ionic liquid. *J. Radioanal. Nucl. Chem. Article in Press.* 2023.
18. Deshmukh S, Bhatt A.M, Boda A, Chauhan R.S, Ali S.M, Sengupta A. Experimental and theoretical insight into biphasic extractive mass transfer of thorium into ionic liquid phase using chloroamide ligands. *J. Mol. Liq.* 2023;371:121074.
19. Zeng Z, Gao Y, Ni S, Zhang S, Fu X, Sun X. Investigation on the recovery of thorium and rare earth from radioactive waste residue by functionalized ionic liquids. *Sep. Purif. Technol.* 2023;317:123901.
20. Wang H, Kuang S, Liao W. Synergistic extraction and separation of thorium from rare earths in chloride media using mixture of Cextrant 230 and Cyanex 923. *J. Rare Earths.* 2023.

افزایش سرعت فاز پراکنده موجب افزایش قطر میانگین ساتر قطره شده و اثر سرعت فاز پیوسته بر سایز قطرات ناچیز است. تعداد قطرات فاز پراکنده با افزایش سرعت فاز پراکنده افزایش یافته و موجودی فاز پراکنده افزایش می‌یابد. افزایش سرعت فاز پیوسته موجب کاهش سرعت نسبی فازها به علت افزایش نیروی دراک بین قطرات و فاز پیوسته شده و در نتیجه موجودی فاز پراکنده افزایش می‌یابد.

نتایج حاصل از بررسی استخراج یون‌های توریم از محلول آبی نشان داد که سیستم از عملکرد مناسب برای انتقال یون‌ها از یک فاز به فاز دیگر با راندمان استخراج بالا برخوردار است.

مراجع

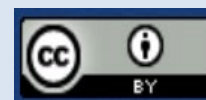
1. Yu X, Zhou H, Jing S, Lan W, Li S. Experimental and numerical study of liquid-liquid interphase mass transfer in a pilot-scale extraction column. *Chem. Eng. Sci.* 2021;230:116184.
2. Asadollahzadeh M, Torkaman R, Torab-Mostaedi M. Optimization of lanthanum extraction in asymmetric rotation pilot plant column by using central composite methodology. *Geosystem Eng.* 2020;23:101-111.
3. Asadollahzadeh M, Torkaman R, Torab-Mostaedi M, Heydari A. Feasibility of pilot-scale disc-donut column for continuous cadmium extraction with the perspective of droplet size distribution. *Geosystem Eng.* 2021;24:265-274.
4. Shakib B, Asadollahzadeh M, Outokesh M, Torkaman R, Torab-Mostaedi M. Reactive extraction evaluation for vanadium (V) removal in the MRDC column using axial dispersion and central composition approach. *Korean J. Chem. Eng.* 2022;39:3399-3411.
5. Saremi M, Torkaman R, Safdari J, Rafiei V, Mallah M.H, Asadollahzadeh M. Determination of mass transfer coefficient in an L-shaped pulsed column with sieve-plate structure: Application of best-fit technique, drop size distribution, and forward mixing model. *Chem. Eng. Process.* 2022;170:108706.
6. Sarkar S, Sen N, Singh K.K, Mukhopadhyay S, Shenoy K.T. Liquid-liquid dispersion in pulsed disc and doughnut column and pulsed sieve plate column: A comparative study. *Prog. Nucl. Energy.* 2019;116:76-86.
7. Shakib B, Ghaemi A, Hemmati A, Asadollahzadeh M. Experimental modeling and uncertainty analysis of dispersed phase holdup at flooding in a pulsed disc-doughnut column, case study: Response surface methodology and Monte-Carlo simulation. *Prog. Nucl. Energy.* 2021;141:103969.



21. Yacouba A.-R.C, Oral A.E, Bawa A.S, Sert S, Kaptanoglu I.G, Turkozu D.A, Natatou I, Yusan S, Aytas S. Determination of optimum conditions for the extraction and separation of lanthanum, cerium, yttrium and thorium using Taguchi method. *J. Radioanal. Nucl. Chem. Article in Press*. 2023.
22. Sarkar S, Phillips C.R, Mumford C.J. Characterization of hydrodynamic parameters in rotating disc and oldshue-rushton columns, hydrodynamic modelling, drop Size, hold-up and flooding. *Can. J. Chem. Eng.* 1985;63:701-709.
23. Tsouris C, Ferreira R, Tavlarides L.L. Characterization of hydrodynamic parameters in a multistage column contactor. *Can. J. Chem. Eng.* 1990;68:913-923.

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

اسداله‌زاده، مهدی، ترکمان، رضوان، تراب مستعدی، میثم. (۱۴۰۳)، بررسی پارامترهای هیدرودینامیکی یک ستون استخراج پرشده همزن‌دار در استخراج یون‌های توریم از محلول آبی. مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای، ۱۱۰ (۴)، ۳۷-۲۸. DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1598>.
 Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1598.html

