



## بررسی عملکرد انتقال جرم ستون ضربه‌ای افقی در استخراج اورانیم از محلول فروشویی سولفات بندرعباس توسط آل‌امین ۳۳۶ با استفاده از مدل پراکندگی محوری

فرشته خان‌رمکی<sup>۱\*</sup>، رضوان ترکمان<sup>۱</sup>، امیرسعید شیرانی<sup>۲</sup>، سید جابر صفدری<sup>۱</sup>

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

۲. دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، کدپستی: ۱۹۸۳۹۶۹۴۱۱، تهران - ایران

\*Email: fkhanramaki@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۱/۱۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۲/۱۵

### چکیده

در این پژوهش، عملکرد انتقال جرم ستون ضربه‌ای افقی نوع سینی‌دار در استخراج اورانیم از محلول فروشویی سولفات بندرعباس توسط آل‌امین ۳۳۶ با استفاده از مدل پراکندگی محوری مورد بررسی قرار گرفت. فاز آلی حاوی ۶٪ حجمی استخراج‌کننده آل‌امین ۳۳۶، ۵٪ حجمی اصلاح‌کننده ایزودکانول و کروزن به‌عنوان رقیق‌کننده بود. محلول فروشویی بندرعباس حاوی سولفات و اورانیم با غلظت‌های ۰.۲۲ M و ۲۵۰ ppm به‌عنوان فاز آبی استفاده شد. از مدل اختلاط محوری به‌منظور تعیین پارامترهای انتقال جرم و مدل‌سازی این سیستم استفاده شد. هم‌چنین اثر پارامترهای عملیاتی مؤثر ستون مانند شدت ضربه، دبی حجمی فازها بر پارامترهای انتقال جرم مانند ضرایب کلی حجمی انتقال جرم فاز پیوسته (Koc) و ضرایب پراکندگی محوری فاز پیوسته و پراکنده (Ed و E<sub>d</sub>) نیز مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که پارامترهای انتقال جرم ستون شدیداً وابسته به شدت ضربه و میزان آشفتگی سیستم می‌باشند. هم‌چنین عملکرد انتقال جرم این ستون برای استخراج اورانیم از محلول فروشویی سولفات بالا می‌باشد. علاوه بر این روابط تجربی جدیدی براساس پارامترهای عملیاتی و مشخصات فیزیکی سیستم به روش آنالیز ابعادی به‌منظور پیش‌بینی پارامترهای انتقال جرم پیشنهاد شدند؛ این روابط با دقت بسیار بالایی مقادیر تجربی را در این سیستم پیش‌بینی می‌کنند.

**کلیدواژه‌ها:** ستون ضربه‌ای افقی، آل‌امین ۳۳۶، محلول فروشویی بندرعباس، انتقال جرم، مدل‌سازی

## Evaluation of mass transfer performance of uranium extraction from sulfate medium of Bandar Abbas with Alamine 336 in horizontal pulsed column by using axial dispersion model

F. Khanramaki<sup>1,2</sup>, R. Torkaman<sup>1</sup>, A.S. Shirani<sup>2</sup>, J. Safdari<sup>1</sup>

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

2. Nuclear Engineering Faculty, Shahid Beheshti University, Postalcode: 1983969411, Tehran - Iran

Research Article

Received 5.4.2019, Accepted 5.5.2019

### Abstract

In this study, the mass transfer performance of the Horizontal pulsed sieve plate column for the extraction of uranium from Bandar Abbas sulfate leach solution with Alamine 336 was investigated using a dispersion model. The organic phase contained 6% (v/v) Alamine 336 as extractant and 5% (v/v) isodecanol as a modifier in kerosene as diluent. The sulfate solution of Bandar Abbas containing 0.22 M sulfate and 250 ppm Uranium was used as the aqueous phase. The axial dispersion model was used to determine the mass transfer parameters and modeling of this system. Also, the effect of operating parameters such as pulsation intensity, the rate of phases flow on the volumetric overall mass transfer parameters was investigated; namely total volumetric coefficients of continuous phase mass transfer (Koc) and axial scattering coefficients of continuous and scattered phase (Ec and Ed). The obtained results showed that the mass transfer parameters are strongly dependent on the pulse intensity and turbulence degree of the system. In addition, the mass transfer performance of this column is high for the uranium extraction from sulfate leach liquors. Moreover, the practical and novel correlations have been determined for prognostication of mass transfer parameters which are closely matched with the experimental results in the horizontal pulsed column.

**Keywords:** Horizontal pulsed column, Alamine 336, Sulfate leach liquor of Bandar Abbas, Mass transfer, Modeling



## ۱. مقدمه

در طراحی استخراج‌کننده‌های مایع-مایع، انتقال جرم و هیدرودینامیک نقشی تعیین‌کننده در طراحی ستون‌های استخراج دارند و پیش از ساختن هر ستون باید پارامترهای آن‌ها از قبیل ضریب انتقال جرم، ضریب پراکندگی محوری فازها، موجودی فاز پراکنده و اندازه متوسط قطرات فاز پراکنده تا حدودی مشخص باشد. بنابراین روابط تجربی جدید برای پیش‌بینی پارامترهای موردنظر در هر شرایط کاری برای طراحی ستون‌های استخراج در مقیاس صنعتی ضروری است.

پارامترهای هیدرودینامیکی مانند اندازه متوسط قطرات، موجودی فاز پراکنده و سرعت لغزشی با استفاده از نمونه‌گیری مستقیم و تأثیر پارامترهای عملیاتی ستون در هر آزمایش محاسبه می‌شوند. اما برای تعیین پارامترهای انتقال جرم مانند ضریب انتقال جرم و ضرایب پراکندگی محوری فازها لازم است از مدل‌های ریاضی استفاده شود. این مدل‌ها براساس موازنه جرم و تکانه، شرایط عملیاتی و مشخصات هر ستون نوشته می‌شوند.

مهم‌ترین فرض‌هایی که در کلیه روش‌های مدل‌سازی در نظر گرفته می‌شوند عبارتند از ثابت بودن دبی حجمی جریان هر دو فاز در طول ستون، عدم تغییر در اندازه متوسط قطرات، موجودی فاز پراکنده و ضریب انتقال جرم در طول ستون، مشخص بودن غلظت جزء موردنظر در ورودی فازها به ستون و خطی بودن منحنی تعادلی غلظت فازها [۶، ۱۵، ۱۹-۲۲].

مطالعات در زمینه مدل‌سازی جریان فازها در ستون‌های استخراج نشان داده است که اغلب از مدل پراکندگی محوری استفاده می‌شود. در این زمینه کاروالهو و همکارانش در بررسی استخراج مس از فاز آبی به وسیله حلال آلی LIX 84-I یا Acorga M۵۶۴۰ از مدل پراکندگی محوری استفاده کردند. بونام و همکارانش نیز این مدل را در استخراج کروم با Aliquat ۳۳۶ به کار بردند. اگرچه این مدل رفتار واقعی هیدرودینامیکی ستون را توصیف نمی‌کند، اما یک روش اجرایی در به دست آوردن نتایج انتقال جرم با صحت مناسب است [۱۶، ۲۲، ۲۳]. در ادامه تعدادی از روابط تجربی به منظور مدل‌سازی فازها در ستون‌های استخراج مایع-مایع ضربه‌ای نوع عمودی و افقی به روش پراکندگی محوری در جدول ۱ ارائه شده است. بیش‌تر مطالعات در این زمینه برای ستون‌های پالس عمودی انجام شده و در مورد ستون‌های پالس افقی مطالعات بسیار محدودی انجام پذیرفته است.

در پژوهش حاضر، عملکرد انتقال جرم در ستون ضربه‌ای افقی نوع سینی‌دار به منظور استخراج اورانیم از محلول فروشویی سولفات‌ها با مدل ریاضی پراکندگی محوری مورد ارزیابی قرار گرفت. در این روش، جریان فازهای پیوسته و پراکنده به صورت متقابل بوده و بررسی در حالت پایا انجام شد. با استفاده از مدل پراکندگی محوری ضرایب کلی حجمی انتقال جرم فاز پیوسته ( $K_{ocd}$ ) و ضرایب پراکندگی محوری فازها ( $E_d$  و  $E_c$ ) از طریق بهینه‌سازی غلظت جزء موردنظر در طول ستون با استفاده از نتایج مدل‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی محاسبه شدند. برای بهینه‌سازی این پارامترها از روش الگوریتم ژنتیک و برای حل معادلات دیفرانسیل حاکم از روش‌های عددی استفاده گردید. هم‌چنین تأثیر پارامترهای عملیاتی بر پارامترهای انتقال جرم بررسی شده

استخراج اورانیم از سنگ‌های معدنی، به علت سمیت و رادیواکتیویته این فلز در آب‌های سطحی و زیرزمینی، از اهمیت بالایی برخوردار است [۱]. روش‌های مختلفی برای استخراج و بازیابی اورانیم از محلول‌های آبی وجود دارد که روش استخراج حلالی در مقایسه با سایر روش‌ها بسیار آسان، کم‌هزینه و با احتمال تولید پسماند کم‌تر می‌باشد [۲]. یکی از مهم‌ترین اجزای اصلی در فرایند استخراج با حلال، انتخاب استخراج‌کننده است. بر اساس مطالعات انجام شده، ترکیبات آمینی، به‌ویژه آمین‌های نوع سوم، ترکیبات بسیار مناسبی برای استخراج اورانیم از محلول سولفات‌ها می‌باشند [۳-۵]. بنابراین می‌توان گفت روش استخراج حلالی یکی از روش‌های کاربردی در مقیاس صنعتی و یکی از فنون مهم جداسازی می‌باشد. بنابراین انتخاب دستگاه مناسب برای این منظور از اهمیت خاصی برخوردار است. معیارهای متعددی برای انتخاب یک تماس‌دهنده باید مدنظر قرار گیرد و البته تمام این ملاحظات نمی‌توانند به طور هم‌زمان تأمین گردند. مهم‌ترین معیارهایی که برای انتخاب تماس‌دهنده باید در نظر گرفته شوند عبارتند از بحرانیت، ظرفیت، عملکرد، تجزیه و اکسیدگری، نگاهداری، حفاظ‌گذاری، کنترل فرایند و هزینه [۶].

استخراج‌کننده‌های مایع-مایع به دو صورت دیفرانسیلی و مرحله‌ای عمل می‌کنند. تماس‌دهنده‌های دیفرانسیلی خود به دو نوع جریان هم‌سو و جریان غیرهم‌سو دسته‌بندی می‌شوند [۷]. ستون‌های ضربه‌ای به‌عنوان یک تماس‌دهنده دیفرانسیلی به دلیل داشتن بازدهی بالا، نداشتن قسمت‌های متحرک داخلی، عملکرد کاملاً خودکار، پیوسته بودن فرایند، فضای کم و پایین بودن هزینه نگاهداری و عملیات از مهم‌ترین دستگاه‌های مورد استفاده در صنعت می‌باشند. لذا با توجه به مزیت‌های ستون‌های ضربه‌ای، انواع مختلف این ستون‌ها به‌عنوان اصلی‌ترین دستگاه استخراج در صنعت خالص‌سازی فلزات شناخته شده‌اند. بنابراین کاربرد آن‌ها در صنعت به‌صورت روزافزون در حال گسترش می‌باشد [۸-۱۳]. در ستون‌های ضربه‌ای، انرژی مکانیکی به صورت پالس ورودی به برج تأمین می‌شود. بهبود بازده در ستون به‌واسطه افزایش در اغتشاش و سطح تماس، از طریق خرد کردن فاز پراکنده صورت می‌گیرد. ستون‌های ضربه‌ای به دو دسته کلی ستون‌های ضربه‌ای عمودی و ستون‌های ضربه‌ای افقی تقسیم‌بندی می‌شوند. اگرچه ستون‌های ضربه‌ای عمودی بسیاری از معیارهای لازم برای کاربرد صنعتی را برآورده می‌کند، با این حال ساختار افقی ستون‌های ضربه‌ای دارای مزایای مهم و قابل توجهی می‌باشند. با توجه به ساختار افقی این ستون‌ها، جهت نگاهداری آن‌ها نیاز به ساختمان‌هایی با سقف‌های بلند در مقایسه با نوع عمودی آن نیست و همین امر منجر به کاهش هزینه‌ها به‌ویژه هزینه‌های مربوط به حفاظت در برابر پرتوها می‌شود. مزیت دیگر آن سهولت در تعمیر و نگاهداری ستون است. مطالعات گوناگون نشان می‌دهد که بازده انتقال جرم ستون‌های ضربه‌ای افقی (HPC) قابل مقایسه با ستون‌های ضربه‌ای عمودی (VPC) می‌باشد [۶، ۹، ۱۲].



ستون به‌وسیله خط هوای فشرده تأمین می‌شود. نمایی از ستون ضربه‌ای افقی نوع سینی‌دار همراه با اجزاء جانبی آن در شکل ۱ نمایش داده شده است.

**۲.۲ روش انجام آزمایش‌ها**

برای بررسی پارامترهای عملیاتی روی بازده استخراج اورانیم و تعیین پارامترهای انتقال جرم، استخراج اورانیم از محلول فروشویی بندرعباس با آل‌امین ۳۳۶ انجام شد. فاز آبی محلول فروشویی بندرعباس با غلظت ۰.۲۲ M سولفات و اورانیم با غلظت ۲۵۰ ppm بود و فاز آلی حاوی استخراج‌کننده آل‌امین ۳۳۶ با غلظت ۰.۶ درصد حجمی، اصلاح‌کننده ایزودکانول با غلظت ۰.۵٪ حجمی و کروزن به‌عنوان رقیق‌کننده بود. مقادیر غلظت‌های انتخاب شده بر مبنای نتایج بهینه به دست آمده از انجام آزمایش‌ها در مقیاس آزمایشگاهی به روش ناپیوسته بودند [۲۴].

است و در نهایت روابط تجربی دقیق و جدیدی برای پیش‌بینی پارامترهای انتقال جرم به‌منظور استخراج اورانیم از محلول فروشویی سولفات‌دار در ستون استخراج ضربه‌ای افقی نوع سینی‌دار پیشنهاد شد.

**۲. مطالعات تجربی**

**۱.۲ مشخصات ستون ضربه‌ای افقی نوع سینی‌دار**

ستون استخراج ضربه‌ای افقی مورد استفاده در این پژوهش یک ستون شیشه‌ای با طول ۱.۵ m و قطر داخلی ۶.۲ cm، که حاوی ۲۴ جفت سینی سوراخ‌دار از جنس فولاد ضد زنگ می‌باشد، است. فاصله میان سینی‌ها در هر جفت سینی ۱ cm و فاصله میان خود جفت سینی‌ها ۵ cm است. سینی‌ها به‌گونه‌ای سوراخ‌کاری شده‌اند که فقط یکی از دو نیمه بالایی یا پایینی سینی سوراخ دارد شیر برقی در مسیر خروج فاز سنگین سطح مشترک دو فاز را کنترل می‌کند. ضربه موردنیاز برای حرکت فاز پراکنده در طول

**جدول ۱.** نتایج گزارش شده برای مدل‌سازی فازها در ستون‌های استخراج ضربه‌ای به روش پراکندگی محوری

مراجع	رابطه تجربی	نوع ستون
	ستون ضربه‌ای عمودی	
[۱۴]	$k_{oc} \alpha = 5.04 \left( \frac{\alpha f d_c \rho d}{\mu_d} \right)^{0.4} \left( \frac{u_c}{\alpha f} \right)^{-0.43} \left( \frac{U_c}{U_d} \right)^{-0.56} \left( \frac{d_c}{h} \right)^{-0.62} \left( \frac{u_c}{h} \right)$ $\frac{k_{oc} \alpha d_{33}}{\rho_c u_{slip}} = 1.9 \times 10^{-8} \frac{Re^{1.78}}{(1-\phi)^2} \left( \frac{Af}{U_{slip}} \right)^{0.9} \left( \frac{U_c}{U_d} \right)^{0.62}$	ستون ضربه‌ای سینی‌دار
[۱۵]	$\frac{E_c}{v_c} = 1.48 \frac{Re^{0.6}}{(1-\phi)^{0.5}} \left( \frac{Af}{U_{slip}} \right)^{0.36} \left( \frac{U_c}{U_d} \right)^{0.47}$ $\frac{E_d}{v_d} = 2.15 \frac{Re}{(1-\phi)^{0.8}} \left( \frac{Af}{U_{slip}} \right)^{0.62} \left( \frac{U_c}{U_d} \right)^{0.81}$ $E_c = E_s \left( 1 + \frac{V_c}{2(AF)} \right)$	ستون ضربه‌ای پر شده
[۱۶]	$E_d = \frac{d_s (Af) h^{0.7}}{\alpha D_{col}^{0.7}} \left( 1 + \frac{V_d}{2(AF) x_d} \right) x_d$	ستون ضربه‌ای سینی‌دار
[۱۷]	$E_c = \frac{12A^{1.7} f^{1.25}}{(u_d + u_c)^{1.7}}$	ستون ضربه‌ای غربالی
[۱۸]	$E_c = \frac{d_s \alpha f h^{0.7}}{\alpha D^{0.7}} \left[ 1 + \frac{u_c}{2 \alpha f (1-\phi)} \right] (1-\phi)$ $E_d = \frac{d_s \alpha f h^{0.7}}{\alpha D^{0.7}} \left[ 1 + \frac{u_d}{2 \alpha f \phi} \right] \phi$	ستون ضربه‌ای صفحه‌ای سوراخ‌دار
	ستون ضربه‌ای افقی	
[۱۲]	$\frac{\mu_c k_{oc} \alpha}{\rho_c (\alpha f)^2} = K_1 \exp(K_1  af - af_m ) \left( \frac{\mu_c}{\mu_d} \right)^{0.279} \left( \frac{af \mu_c}{\sigma} \right)^{-0.183} \left( \frac{af}{U_c} \right)^{-0.749} \left( \frac{af}{U_d} \right)^{-0.468} \left( \frac{\Delta \rho}{\rho_c} \right)^{-0.457}$ $\frac{E_c \rho_c \alpha f}{\sigma} = K_2 \exp(K_2  af - af_m ) \left( \frac{\mu_c}{\mu_d} \right)^{0.885} \left( \frac{af \mu_c}{\sigma} \right)^{0.133} \left( \frac{af}{U_c} \right)^{-0.386} \left( \frac{af}{U_d} \right)^{0.365} \left( \frac{\Delta \rho}{\rho_c} \right)^{-0.797}$ $(af)_m = 1.05 \times 10^{-2} \left( \frac{\sigma \alpha f^2 \alpha}{\mu_d^{0.7}} \right)^{0.1}$	ستون ضربه‌ای سینی‌دار
[۱۳]	$\frac{\mu_c k_{oc} \alpha}{\rho_c (\alpha f)^2} = 2.3 \times 10^{-5} \left( \frac{af}{U_c} \right)^{-0.288} \left( \frac{af}{U_d} \right)^{-0.564} \left( \frac{\sigma}{af \mu_c} \right)^{0.545}$ $\frac{E_c \rho_c U_c}{\sigma} = 1.562 \times 10^{-4} \left( \frac{af}{U_c} \right)^{-0.577} \left( \frac{af}{U_d} \right)^{-0.69} \left( \frac{\sigma}{af \mu_c} \right)^{-2.192}$ $\frac{E_d \rho_d U_d}{\sigma} = 5.1697 \left( \frac{af}{U_c} \right)^{-0.29} \left( \frac{af}{U_d} \right)^{-0.734} \left( \frac{\sigma}{af \mu_c} \right)^{-1.556}$	ستون ضربه‌ای سینی‌دار



### ۴.۲ اندازه‌گیری قطر قطرات

برای اندازه‌گیری قطر قطرات در داخل ستون، پس از برقرار شدن حالت پایا، با استفاده از یک دوربین دیجیتالی ۱۲٫۱ مگاپیکسلی نیکون مدل D۵۰۰۰ عکس‌های متعددی از بخش‌های مختلف ستون گرفته شد. برای مشخص نمودن اندازه قطرات از نرم‌افزار اتوکد استفاده شد. در هر آزمایش حداقل تعداد ۴۰۰ قطره آنالیز گردید. در نهایت قطر متوسط ساتر قطره<sup>۳</sup> از رابطه ۲ محاسبه گردید.

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

### ۵.۲ اندازه‌گیری موجودی فاز پراکنده

در این پژوهش از روش shut down به‌منظور اندازه‌گیری موجودی فاز پراکنده استفاده گردید. به این ترتیب که پس از رسیدن ستون به حالت پایا، به‌طور هم‌زمان ورودی و خروجی فازهای پیوسته و پراکنده قطع گردید و شدت ضربه نیز به آرامی متوقف شد. پس از گذشت زمان کافی برای ثابت شدن شرایط فازها در ستون، طول قوس فاز آلی در ستون (S) با استفاده از متر اندازه‌گیری شد و با به کارگیری رابطه‌های ۳ تا ۵ مطابق شکل ۲، موجودی فاز پراکنده در هر آزمایش محاسبه شد [۲۵].

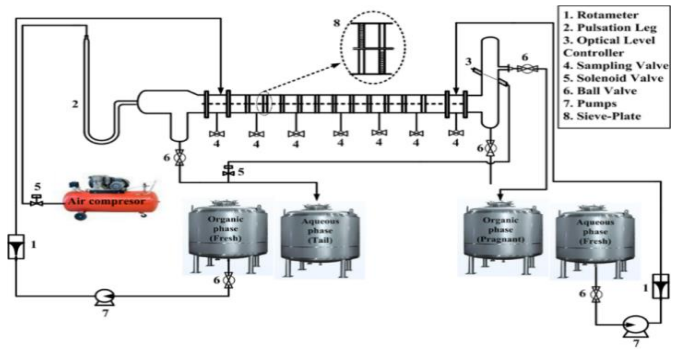
$$L_i = 2r_i \cos \left[ \frac{1}{2} \left( \pi - \frac{S}{r_i} \right) \right] \quad (2)$$

$$A_o = \frac{1}{2} \pi r_i^2 - r_i^2 \cos^{-1} \left( \frac{L_i}{2r_i} \right) - \frac{L_i}{2} \left( r_i^2 - \left( \frac{L_i}{2} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (3)$$

$$\phi = \frac{A_o}{\pi r_i^2} \quad (4)$$

### ۳. محاسبات ریاضی برای مدل‌سازی جریان فازها

مدل پراکندگی محوری رایج‌ترین شیوه مدل‌سازی برای ستون‌ها با تماس از نوع دیفرانسیلی می‌باشد. در این مدل فرض شده است که تمام عواملی که باعث انحراف از حالت ایده‌آل می‌شوند، به‌وسیله پارامتر ضریب پراکندگی محوری بیان شود. ضریب پراکندگی فقط در راستای محور ستون بوده و در جهت شعاعی فرض بر این است که جریان یکنواخت است. مقدار این ضریب به کمک بهینه‌سازی داده‌های غلظت در طول ستون استخراج به دست می‌آید [۶، ۱۵، ۲۶-۲۸]. بنابراین جهت محاسبه ضرایب انتقال جرم در این ستون، از مدل پراکندگی محوری فازها استفاده گردید. شکل ۳ موازنه جرم برای یک ستون استخراج افقی با استفاده از مدل پراکندگی محوری را نشان می‌دهد. در این مدل سه پارامتر  $(E_d, E_c, K_{oc})$  نیاز به بهینه‌سازی دارند. رابطه‌های ۵ و ۶، معادلات مربوط به مدل فوق، پارامترها و شرایط مرزی را نشان می‌دهند.



شکل ۱. نمایی از ستون ضربه‌ای افقی نوع سینی‌دار و تجهیزات جانبی.

با توجه به این‌که در شرایط عملیاتی همراه با انتقال جرم، خواص فیزیکی سیستم در طول ستون به‌علت تغییر غلظت اورانیم در فازها تغییر می‌کند، از متوسط‌گیری نمونه‌های ابتدا و انتهای ستون برای تعیین خواص فیزیکی استفاده شد. این مقادیر در جدول ۲ گزارش شده است.

### ۳.۲ روش انجام آزمایش‌ها

قبل از شروع آزمایش‌ها، کالیبراسیون دستگاه‌های اندازه‌گیری انجام شد. سپس با برقرار نمودن جریان فاز پیوسته به درون ستون، ستون از فاز پیوسته تا زیر محل فصل مشترک (پایین سنسور نوری) پر گردید. پس از آن جریان فاز پیوسته قطع شد و جریان فاز پراکنده برقرار گردید و اجازه داده شد تا سطح فاز آلی به‌طور کامل از محل سنسورها عبور نماید.

سپس با روشن نمودن کمپرسور هوای فشرده، جریان هوا به درون سیستم ضربه‌ساز برقرار گردید و پس از آن فرکانس ضربه و دامنه روی مقدار موردنظر در هر آزمایش تنظیم شد. پس از ثابت شدن فصل مشترک دو فاز، به سیستم زمان کافی داده شد (حدود ۱/۵ برابر زمان اقامت فاز سنگین) تا به حالت پایا برسد. پس از رسیدن سیستم به شرایط پایا، پارامترهای زیر مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند:

(۱) اندازه متوسط قطرات در طول ستون به روش عکس‌برداری.

(۲) موجودی فاز پراکنده به روش جابه‌جایی سطح مشترک<sup>۱</sup>.

(۳) غلظت در قسمت‌های ورودی، خروجی و در طول ستون به روش نمونه‌برداری و آنالیز با دستگاه طیف‌سنج نشری پلاسمای جفت القایی<sup>۲</sup>.

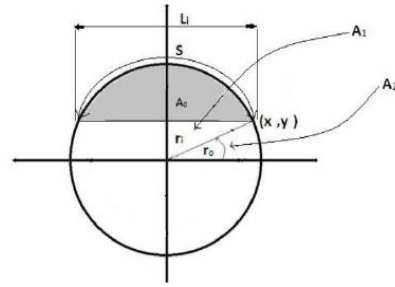
جدول ۲. خواص فیزیکی سیستم به کار رفته در ستون

نوع فاز	چگالی (kg/m <sup>۳</sup> )	ویسکوزیته (×۱۰ <sup>-۳</sup> kg/m.s)	کشش بین فازی (×۱۰ <sup>-۳</sup> N/m)
فاز پیوسته	۱۰۵۸	۰٫۸۶۱	۹٫۹
فاز پراکنده	۸۲۰	۱٫۸۴۱	

1. Shut Down Method
2. Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES)

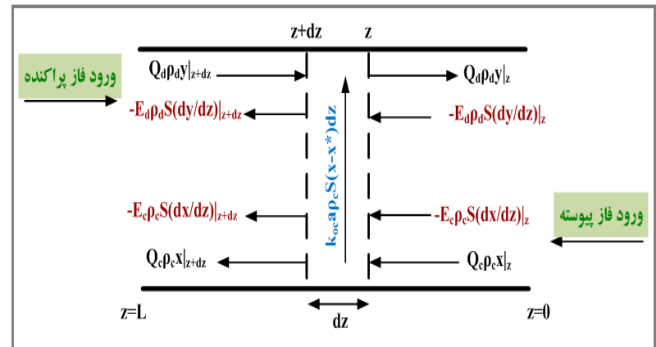


$$Z = L \rightarrow \begin{cases} X = X_{out} \\ \frac{dx}{dz} = 0 \\ Y = 0 \\ \frac{dY}{dz} = -P_{ed} Y \end{cases} \quad (14)$$



شکل ۲. نحوه تعیین موجودی فاز پراکنده در ستون‌های ضربه‌ای افقی.

سپس پارامترهای انتقال جرم با استفاده از داده‌های هیدرودینامیکی، شرایط مرزی مناسب و تغییرات غلظت جزء موردنظر در طول ستون محاسبه گردید. این معادلات با استفاده از روش حل معادلات دیفرانسیل معمولی و استفاده از روش المان محدود در نرم‌افزار MATLAB حل شدند. در ادامه با استفاده از روش آنالیز ابعادی (پی باکینگهام) و نرم‌افزار Eviews روابط تجربی برای تعیین پارامترهای انتقال جرم بر حسب پارامترهای عملیاتی و خواص فیزیکی سیستم شیمیایی برای استخراج اورانیم از محلول فروشویی بندرعباس با استخراج‌کننده آل‌امین ۳۳۶ پیشنهاد شدند.



شکل ۳. المان موازنه جرمی برای مدل پراکندگی محوری.

#### ۴. نتایج و بحث

##### ۴.۱. تعیین پروفایل غلظت اورانیم در طول ستون

به‌منظور تعیین پروفایل غلظت اورانیم در طول ستون، موازنه کلی روی ستون نوشته می‌شود و در نهایت روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\left( \frac{y_n}{1-y_n} - \frac{y_{in}}{1-y_{in}} \right) = \left[ \frac{Q_{c,out} \rho_{c,out} (1-x_{out})}{Q_{d,in} \rho_{d,in} (1-y_{in})} \right] \left( \frac{x_n}{1-x_n} \times \frac{x_{out}}{1-x_{out}} \right) \quad (15)$$

$$X = \frac{x - x_{in}}{x_{out} - x_{in}} \quad \& \quad Y = \frac{y - y_{in}}{y_{out} - y_{in}} \quad (16)$$

$X_{in}$ : درصد وزنی اورانیم در شیر ورودی فاز پیوسته

$X_{out}$ : درصد وزنی اورانیم در شیر خروجی فاز پیوسته

$X_n$ : درصد وزنی اورانیم در n امین شیر فاز پیوسته

$Y_{in}$ : درصد وزنی اورانیم در شیر ورودی فاز پراکنده

$Y_{out}$ : درصد وزنی اورانیم در شیر خروجی فاز پراکنده

$Y_n$ : درصد وزنی اورانیم در n امین شیر فاز پراکنده

با نمونه‌گیری در طول ستون برای هر آزمایش و آنالیز نمونه، غلظت و درصد وزنی اورانیم در طول ستون در فاز پیوسته تعیین شد. حال با استفاده از معادله فوق درصد وزنی اورانیم در فاز پراکنده در طول ستون محاسبه گردید.

بازده استخراج اورانیم در هر نقطه از ستون براساس درصد وزنی اورانیم موجود در آن نقطه، درصد وزنی اورانیم در خوراک ورودی در هر تست و درصد وزنی تعادلی هر نقطه از ستون (با استفاده از نمودار تعادلی در آزمایش‌های بخش ناپیوسته) با استفاده از رابطه ۱۷ محاسبه شد. در ادامه تغییرات غلظت اورانیم

$$\text{فاز پیوسته} \rightarrow \frac{E_c}{U_c} \frac{d^2 x}{dz^2} - \frac{dx}{dz} - \frac{k_{oc} \alpha}{U_c} (x - x^*) = 0 \quad (5)$$

$$\text{فاز پراکنده} \rightarrow \frac{E_d}{U_d} \frac{d^2 y}{dz^2} + \frac{dy}{dz} + \frac{k_{oc} a \rho_c}{\rho_c} (x - x^*) = 0 \quad (6)$$

حال با جای‌گذاری مقادیر بدون بعد غلظت در فاز پیوسته و پراکنده (X و Y) در رابطه‌های ۵ و ۶ خواهیم داشت:

$$\text{فاز پیوسته} \rightarrow \frac{1}{P_{ec}} \frac{d^2 X}{dz^2} - \frac{dX}{dz} - NTU_{oc} (X + Y - 1) = 0 \quad (7)$$

$$\text{فاز پراکنده} \rightarrow \frac{1}{P_{ed}} \frac{d^2 Y}{dz^2} + \frac{dY}{dz} - \frac{NTU_{oc}}{\Omega} (X + Y - 1) = 0 \quad (8)$$

که در روابط فوق خواهیم داشت:

$$\Omega = \frac{m Q_d \rho_d}{Q_c \rho_c} \quad (10) \quad , \quad NTU_{oc} = \frac{L k_{oc} \alpha}{U_c} \quad (9)$$

$$P_{ed} = \frac{L U_d}{E_d} \quad (12) \quad , \quad P_{ec} = \frac{L U_c}{E_c} \quad (11)$$

شرایط مرزی در مدل پراکندگی محوری برای حل معادلات ۷

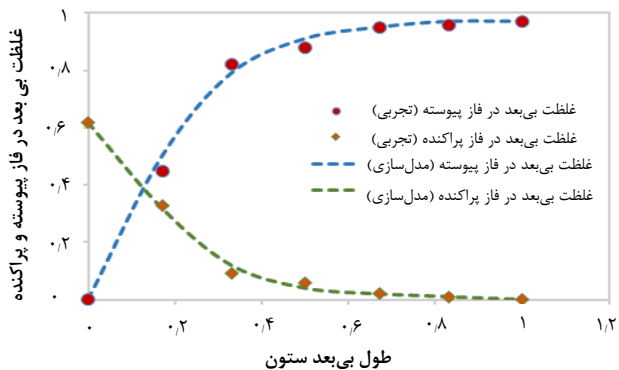
و ۸ به شرح زیر می‌باشند:

$$Z = 0 \rightarrow \begin{cases} X = 0 \\ \frac{dx}{dz} = P_{ec} (1 - X) \\ Y = Y_{out} \\ \frac{dY}{dz} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

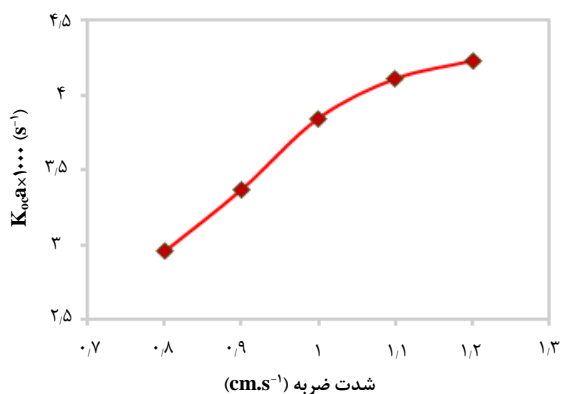


**جدول ۳.** تغییرات بازده استخراج اورانیم و پروفایل غلظت در طول ستون در یک آزمایش (af=۱ cm/s, Qc=Qd=۳ l/h)

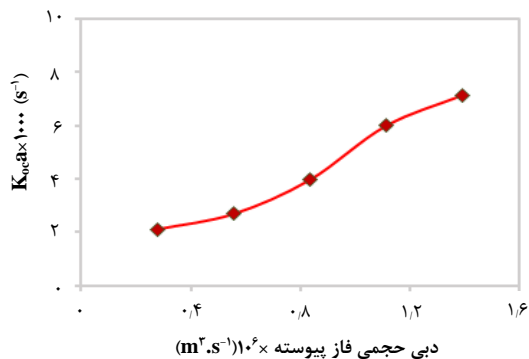
بازده استخراج اورانیم (%)	$Y_{theo.}$	$X_{theo.}$	$Y_{exp.}$	$X_{exp.}$	طول بی بعد ستون
۱۱,۳۴	۰,۶۲	۰	۰,۶۲	۰	۰
۷۰,۳۴	۰,۳۲	۰,۵	۰,۳۳	۰,۴۵	۰,۱۷
۹۱,۸۵	۰,۱۲	۰,۷۹	۰,۱۰	۰,۸۲	۰,۳۳
۹۴,۰۸	۰,۰۴	۰,۹۱	۰,۰۶	۰,۸۸	۰,۵
۹۶,۶۵	۰,۰۲	۰,۹۵	۰,۰۲	۰,۹۵	۰,۶۷
۹۷,۲۳	۰,۰۱	۰,۹۷	۰,۰۱	۰,۹۶	۰,۸۳
۹۷,۵۷	۰	۰,۹۷	۰	۰,۹۷	۱



**شکل ۴.** پروفایل غلظت بی بعد در طول ستون در فاز پیوسته و پراکنده (af=۱ cm/s, Qc=Qd=۳ l/h)



**شکل ۵.** اثر تغییرات شدت ضربه بر ضریب کلی حجمی انتقال جرم فاز پیوسته برای استخراج اورانیم (Qc=Qd=۳ l/h).



**شکل ۶.** اثر تغییرات دبی حجمی فاز پیوسته بر ضریب کلی حجمی انتقال جرم فاز پیوسته برای استخراج اورانیم (af=۱ cm/s, Qc=Qd=۳ l/h).

در طول ستون و نمودار پروفایل غلظت اورانیم در یک آزمایش در جدول ۳ و شکل ۴ نشان داده شده است.

$$\%E_U = \frac{x_{in} - x_n}{x_{in} - x_n^*} \times 100 \quad (17)$$

**۲.۴ بررسی ضریب کلی حجمی انتقال جرم فاز پیوسته**

**۱.۲.۴ بررسی تأثیر شدت ضربه**

اثر شدت ضربه بر ضریب کلی حجمی انتقال جرم فاز پیوسته در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، عملکرد انتقال جرم ستون با افزایش شدت ضربه افزایش می یابد. با افزایش شدت ضربه فرکانس برخورد قطرات با صفحات داخلی ستون بیش تر شده و در نتیجه قطر میانگین قطره و موجودی فاز پراکنده کاهش می یابد. نتایج نشان می دهد که کاهش قطر میانگین قطره بر مساحت سطح مشترک تأثیر بیش تری نسبت به کاهش موجودی فاز پراکنده دارد؛ این امر منجر به افزایش مساحت سطح مشترک دو فاز گردید و در نهایت عملکرد انتقال جرم افزایش یافت.

**۲.۲.۴ بررسی تأثیر دبی فاز پیوسته و پراکنده**

تأثیر تغییرات دبی حجمی فاز پیوسته در شدت ضربه و دبی حجمی فاز پراکنده ثابت بر روی ضریب کلی حجمی انتقال جرم فاز پیوسته در شکل ۶ نشان داده شده است. با افزایش دبی فاز پیوسته، نیروی دراگ بین قطرات و فاز پیوسته افزایش یافته و سرعت لغزشی بین فازها کاهش می یابد؛ در نتیجه مقدار موجودی فاز پراکنده افزایش می یابد. همچنین با افزایش دبی فاز پیوسته، افزایش در قطر میانگین قطرات مشاهده می شود. مطابق رابطه  $\alpha = \frac{6\phi}{d_{33}}$ ، تأثیر افزایش موجودی فاز پراکنده بر افزایش مساحت سطح مشترک دو فاز بزرگ تر از افزایش قطر میانگین قطره می باشد، در نتیجه عملکرد انتقال جرم افزایش می یابد. بنابراین می توان گفت که با افزایش دبی حجمی فاز پیوسته، ضریب کلی حجمی انتقال جرم فاز پیوسته افزایش می یابد. علاوه بر این، این نکته قابل توجه است که با افزایش بیش تر در دبی حجمی فاز پیوسته، سرعت حرکت فاز پیوسته افزایش یافته و زمان تماس فازها کوتاه تر می شود؛ در نتیجه ضریب کلی حجمی انتقال جرم فاز پیوسته به یک مقدار بیشینه می رسد [۲۹]. زیرا با افزایش دبی حجمی فاز پیوسته میزان آشفتگی در سیستم نیز افزایش می یابد که این امر منجر به افزایش پراکندگی محوری فاز پیوسته و کاهش بیشینه توان عملیاتی سیستم می شود. بنابراین با افزایش بیش از حد دبی حجمی فاز پیوسته، ضریب کلی حجمی انتقال جرم کاهش خواهد یافت.



همچنین آن‌ها رابطه ۱۹ را برای محاسبه شدت ضربه در حالت گذار از رژیم شبه‌پراکنده به رژیم امولسیون پیشنهاد کرده و مقادیر  $K_1$  و  $K_2$  در رابطه ۱۸ را به ترتیب برابر با  $2.84 \times 10^{-5}$  و  $1.59 \times 10^{-1}$  گزارش دادند.

$$(af)_m = 1.05 \times 10^{-2} \left( \frac{\sigma af \sqrt[3]{a}}{\mu_d \sqrt[3]{a}} \right)^{0.1} \quad (19)$$

مقدار متوسط مطلق خطای نسبی ضریب کلی حجمی انتقال جرم فاز پیوسته بین نتایج آزمایشگاهی پژوهش حاضر و مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه ۱۸ برابر با ۳۲.۷۴٪ به دست آمد. بنابراین می‌توان گفت که رابطه ارائه شده برای پیش‌بینی ضریب کلی حجمی انتقال جرم فاز پیوسته در سیستم استخراج واکنشی اورانیم از محلول فروشویی دقت قابل‌قبولی ندارد. امانی و همکارانش [۱۳] برای تعیین ضریب کلی حجمی انتقال جرم در ستون ضربه‌ای افقی نوع سینی‌دار برای استخراج اورانیم با استخراج‌کننده تری‌اکتیل آمین رابطه تجربی زیر را پیشنهاد کردند:

$$\frac{\mu_c k_{oc} a}{\rho_c (af)^2} = 2.73 \times 10^{-3} \left( \frac{af}{U_c} \right)^{-1.288} \left( \frac{af}{U_d} \right)^{-1.864} \left( \frac{\sigma}{af \mu_c} \right)^{0.525} \quad (20)$$

مقدار متوسط مطلق خطای نسبی ضریب کلی حجمی انتقال جرم فاز پیوسته بین نتایج آزمایشگاهی پژوهش حاضر و مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه ۲۱، برابر با ۷۰.۰۵٪ به دست آمد. این مقدار خطا نشان می‌دهد که رابطه ارائه شده برای پیش‌بینی ضریب کلی حجمی انتقال جرم فاز پیوسته در سیستم مورد بررسی از دقت قابل‌قبولی برخوردار نیست.

#### ۴.۲.۴. ارائه رابطه تجربی جدید برای پیش‌بینی ضریب انتقال جرم فاز پیوسته با استفاده از مدل پراکندگی محوری

با توجه به بالا بودن مقدار متوسط مطلق خطای نسبی داده‌های پژوهش حاضر با نتایج حاصل از روابط ارائه شده در مطالعات گذشته، برای پیش‌بینی ضریب کلی حجمی انتقال جرم فاز پیوسته، رابطه تجربی جدیدی به روش آنالیز ابعادی پیشنهاد شد:

$$\frac{(\sigma k_{oc} a)}{(af^2 \rho_c)} = 4.85 \times 10^{-2} \left( \frac{U_c}{af} \right)^{0.75} \left( \frac{U_d}{af} \right)^{0.78} \left( \frac{af \mu_c}{\sigma} \right)^{-1.9} \left( \frac{\sigma a}{af^2 \rho_c} \right)^{-1.89} \quad (21)$$

نتایج نشان می‌دهد که رابطه ارائه شده از دقت کافی برای پیش‌بینی ضریب کلی حجمی انتقال جرم فاز پیوسته برخوردار بوده و متوسط مطلق خطای نسبی برای استخراج واکنشی اورانیم از محلول فروشویی بندرعباس با استخراج‌کننده آل‌امین ۳۳۶ در ستون ضربه‌ای افقی برابر با ۸.۰۸٪ است.

#### ۴.۴. بررسی ضرایب پراکندگی محوری فازها

در این بخش تأثیر پارامترهای عملیاتی ستون بر ضرایب پراکندگی محوری فاز پیوسته ( $E_c$ ) و فاز پراکنده ( $E_d$ )، بررسی شد.

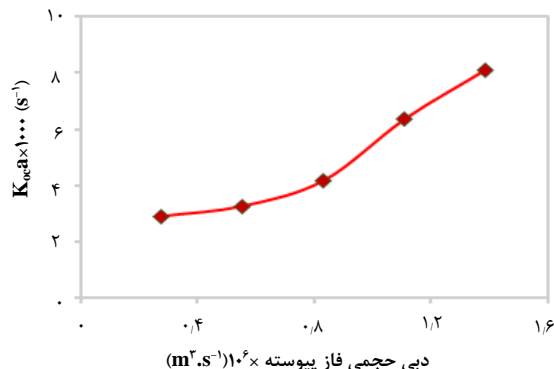
از سوی دیگر، شکل ۷ تأثیر دبی حجمی فاز پراکنده بر ضریب کلی حجمی انتقال جرم فاز پیوسته را نشان می‌دهد. معمولاً با افزایش سرعت فاز پراکنده، به هم‌پیوستگی قطرات و نیروهای دراگ بین توده فاز و قطرات فاز پراکنده بیشتر شده و در نتیجه موجودی فاز پراکنده و قطر میانگین قطرات افزایش می‌یابد. هم‌چنین مشاهده شد که اثر افزایش موجودی فاز پراکنده بر مساحت سطح مشترک دو فاز بیش از اثر اندازه قطره بوده و در نتیجه مساحت سطح مشترک و نیروی محرکه انتقال جرم با افزایش سرعت فاز پراکنده افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت که با افزایش سرعت فاز پراکنده، افزایش در مقدار ضریب کلی حجمی انتقال جرم فاز پیوسته مشاهده می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر دبی حجمی فاز پراکنده بر ضریب کلی حجمی انتقال جرم بیشتر از دبی حجمی فاز پیوسته است.

با توجه به مطالعات گذشته، مؤثرترین پارامترهای عملیاتی در عملکرد انتقال جرم ستون استخراج ضربه‌ای عبارتند از شدت ضربه و دبی حجمی (سرعت) فاز پراکنده [۳۰، ۳۱]. اگرچه در اغلب مطالعات نشان داده شده است که فاکتور شدت ضربه تأثیر بالاتری دارد، اما در پژوهش حاضر اثر دبی حجمی فاز پراکنده بر ضریب کلی حجمی انتقال جرم بیشتر است. این امر می‌تواند به دلیل تغییرات معکوس موجودی فاز پراکنده با افزایش توان ورودی در ستون ضربه‌ای افقی نوع سینی‌دار در مقایسه با سایر استخراج‌کننده‌ها باشد.

۳.۲.۴. مقایسه روابط موجود در محاسبه ضریب انتقال جرم با استفاده از مدل پراکندگی محوری با نتایج پژوهش حاضر پناهی‌نیا و همکارانش [۱۲] رابطه تجربی ۱۸ را برای پیش‌بینی ضریب کلی حجمی انتقال جرم در ستون ضربه‌ای افقی نوع سینی‌دار برای سیستم بدون واکنش شیمیایی و انتقال جرم از فاز پیوسته به پراکنده پیشنهاد کردند.

$$\frac{\mu_c k_{oc} a}{\rho_c (af)^2} = K_1 \exp(K_2 |af - af_m|)$$

$$\left( \frac{\mu_c}{\mu_d} \right)^{2.779} \left( \frac{af \mu_c}{\sigma} \right)^{-1.182} \left( \frac{af}{U_c} \right)^{-1.749} \left( \frac{af}{U_d} \right)^{-1.468} \left( \frac{\Delta \rho}{\rho_c} \right)^{-1.457} \quad (18)$$

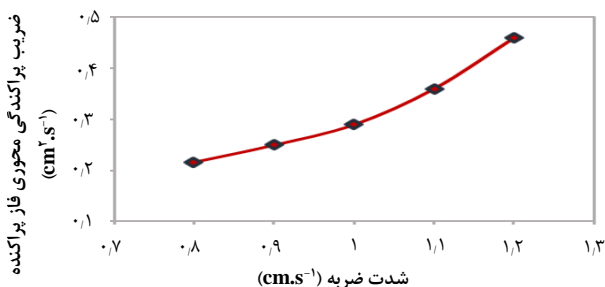
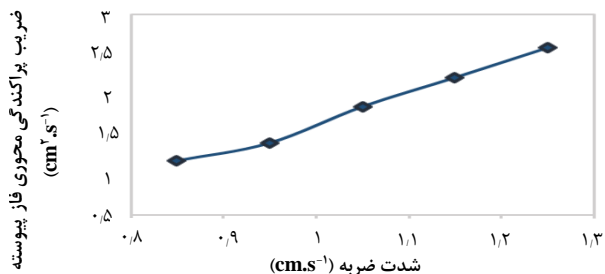


شکل ۷. اثر تغییرات دبی حجمی فاز پراکنده بر ضریب کلی حجمی انتقال جرم فاز پیوسته برای استخراج اورانیم ( $af=1$  cm/s,  $Q_c=3$  l/h).

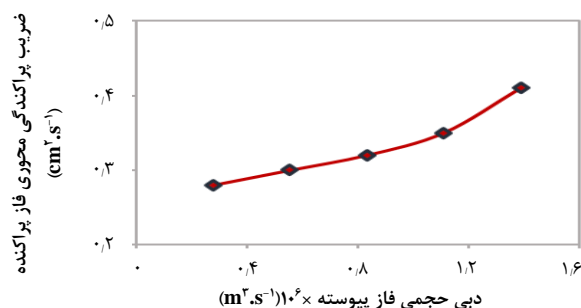
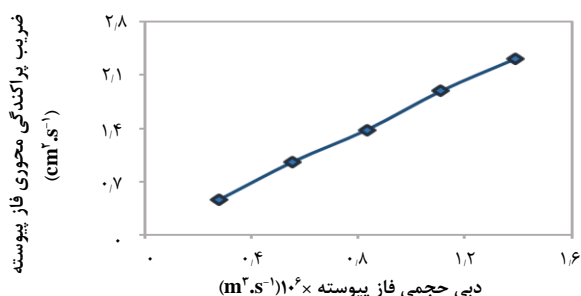


$$\frac{E_c \rho_c a f}{\sigma} = K_v \exp(K_v |af - af_m|)$$

$$\left(\frac{\mu_c}{\mu_d}\right)^{0.855} \left(\frac{af \mu_c}{\sigma}\right)^{0.133} \left(\frac{af}{U_c}\right)^{-0.389} \left(\frac{af}{U_d}\right)^{0.265} \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_c}\right)^{-0.97} \quad (22)$$



شکل ۸. اثر تغییرات شدت ضربه بر ضرایب پراکندگی محوری فازها برای استخراج اورانیم در ستون ضربه‌ای افقی (Qc=Qd=3 l/h).



شکل ۹. اثر تغییرات دبی حجمی فاز پیوسته بر ضرایب پراکندگی محوری فازها برای استخراج اورانیم در ستون ضربه‌ای افقی (Qd=3 l/h, af=1 cm/s).

۱.۳.۴ بررسی تأثیر شدت ضربه بر ضرایب پراکندگی محوری فازها  
تأثیر تغییرات شدت ضربه بر ضرایب پراکندگی محوری فازها در شکل ۸ نشان داده شده است. با افزایش شدت ضربه، ضریب پراکندگی محوری فاز پیوسته و پراکنده افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش شدت ضربه میزان آشفتگی سیستم بیش‌تر شده و در نتیجه تراکم قطرات و ایجاد گردابه در فاز پیوسته ستون افزایش می‌یابد [۳۲].

علاوه بر این، از مقایسه مقادیر ضرایب پراکندگی محوری فازها می‌توان نتیجه گرفت که ضریب پراکندگی محوری فاز پیوسته به‌طور قابل‌توجهی بیش‌تر از ضریب پراکندگی محوری فاز پراکنده است. این پدیده در پژوهش‌های قبلی با استفاده از ستون‌های استخراج مختلف نیز تأیید شده است [۱۲، ۳۳-۳۵].

### ۲.۳.۴ بررسی تأثیر دبی فاز پیوسته و پراکنده بر ضرایب پراکندگی محوری فازها

با مشاهده اثر تغییرات دبی حجمی فاز پیوسته بر روی ضرایب پراکندگی محوری فازها در شکل ۹ می‌توان گفت که با افزایش دبی حجمی فاز پیوسته، میزان پراکندگی محوری فازها افزایش می‌یابد، درحالی‌که افزایش در میزان پراکندگی محوری فاز پیوسته نسبت به فاز پراکنده قابل‌ملاحظه‌تر است. زیرا با افزایش سرعت فاز پیوسته، قطرات یکنواخت‌تری در سیستم تشکیل می‌شوند و برخورد قطرات با سطوح داخلی ستون بیش‌تر شده و این امر منجر به افزایش میزان پراکندگی محوری فازها در طول ستون می‌گردد.

تأثیر دبی حجمی فاز پراکنده بر ضرایب پراکندگی محوری فازها در شکل ۱۰ نشان داده شده است. از این نمودارها مشاهده می‌شود که افزایش در مقدار دبی حجمی فاز پراکنده منجر به افزایش مقدار اختلاط محوری فاز پراکنده می‌شود، درحالی‌که تأثیر تقریباً ناچیزی روی مقدار پراکندگی محوری فاز پیوسته دارد. تأثیر ناچیز دبی حجمی فاز پراکنده بر پارامتر  $E_c$  در مطالعات گذشته با ستون‌های استخراج مختلف نیز تأیید شده است [۱۳، ۳۲، ۳۳، ۳۶].

در اغلب پژوهش‌های پراکندگی محوری فاز پیوسته مورد بررسی قرار می‌گیرد و از پراکندگی محوری فاز پراکنده به علت ناچیز بودن مقدار این پارامتر صرف‌نظر می‌شود. با این حال، تعداد کمی از پژوهش‌گران پراکندگی محوری فاز پراکنده را مورد مطالعه و بررسی قرار داده‌اند [۳۲، ۳۷].

### ۳.۳.۴ مقایسه روابط موجود در محاسبه ضرایب پراکندگی محوری فازها با نتایج پژوهش حاضر

پناهی‌نیا و همکارانش [۱۲] رابطه تجربی ۲۲ را برای پیش‌بینی ضریب پراکندگی محوری فاز پیوسته در ستون ضربه‌ای افقی نوع سینی‌دار برای سیستم بدون واکنش شیمیایی و انتقال جرم از فاز پیوسته به پراکنده پیشنهاد کردند.





بندرعباس با استخراج‌کننده آل‌امین ۳۳۶ از دقت قابل‌قبولی برخوردار نیستند.

#### ۴.۲.۴. ارزیابی رابطه تجربی جدید برای پیش‌بینی ضرایب پراکندگی محوری فازها

به‌منظور پیش‌بینی ضرایب پراکندگی محوری فازهای پیوسته و پراکنده برای استخراج اورانیم از محلول فروشویی بندرعباس با استخراج‌کننده آل‌امین ۳۳۶ در ستون ضربه‌ای افقی نوع سینی‌دار، رابطه‌های تجربی به روش آنالیز ابعادی به شرح زیر پیشنهاد شد:

الف) ضریب پراکندگی محوری فاز پیوسته ( $E_c$ ):

$$\frac{(af \rho_c U_c)}{\sigma} = 5.12 \times 10^{-7} \left(\frac{U_c}{af}\right)^{0.78} \left(\frac{U_d}{af}\right)^{0.52} \left(\frac{af \mu_c}{\sigma}\right)^{2.81} \left(\frac{\sigma a}{af^2 \rho_c}\right)^{-1.81} \quad (25)$$

ب) ضریب پراکندگی محوری فاز پراکنده ( $E_d$ ):

$$\frac{(af \rho_d E_d)}{\sigma} = 2.5 \times 10^{-7} \left(\frac{U_c}{af}\right)^{0.78} \left(\frac{U_d}{af}\right)^{0.52} \left(\frac{af \mu_d}{\sigma}\right)^{2.81} \left(\frac{\sigma a}{af^2 \rho_d}\right)^{-1.81} \quad (26)$$

نتایج نشان می‌دهد متوسط مطلق خطای نسبی برای ضریب پراکندگی محوری فاز پیوسته در استخراج واکنشی اورانیم از محلول فروشویی بندرعباس با استخراج‌کننده آل‌امین ۳۳۶ در ستون ضربه‌ای افقی برابر با ۷/۴۸٪ است.

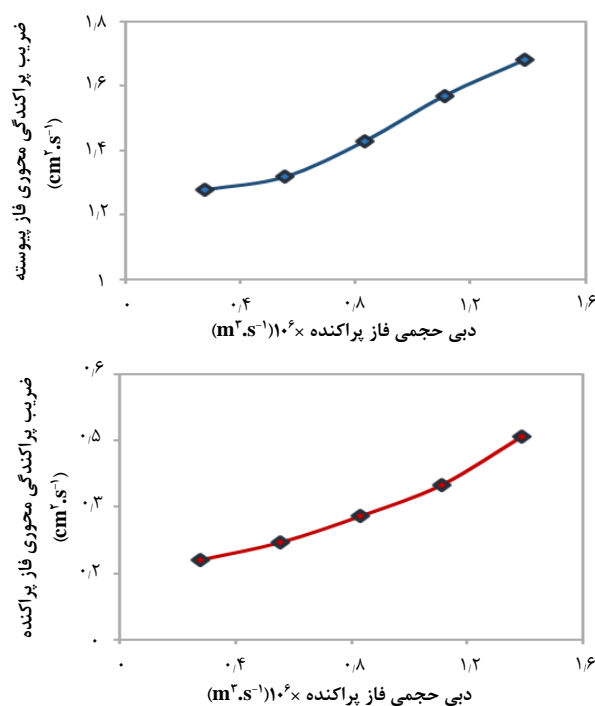
هم‌چنین برای ضریب پراکندگی محوری فاز پراکنده نیز مقایسه‌ای بین نتایج آزمایشگاهی ضریب پراکندگی محوری فاز پراکنده و مقادیر به دست آمده از رابطه جدید (۲۶) انجام شد. متوسط مطلق خطای نسبی برای این پارامتر در استخراج واکنشی اورانیم از محلول فروشویی بندرعباس با استخراج‌کننده آل‌امین ۳۳۶ در ستون ضربه‌ای افقی برابر با ۵/۴۸٪ به دست آمد.

#### ۵. نتیجه‌گیری

آزمایش‌های استخراج اورانیم از محلول فروشویی بندرعباس با استخراج‌کننده آل‌امین ۳۳۶ در ستون استخراج ضربه‌ای افقی نوع سینی‌دار انجام شد و از مدل اختلاط محوری به‌منظور تعیین پارامترهای انتقال جرم و مدل‌سازی این سیستم استفاده شد.

نتایج آزمایش‌ها و مدل‌سازی نشان داد که پارامترهای انتقال جرم ستون شدیداً وابسته به شدت ضربه و میزان آشفتگی سیستم می‌باشند. هم‌چنین با بررسی اثر دبی حجمی فازها بر پارامترهای انتقال جرم، مشاهده شده که پارامترهای انتقال جرم با افزایش این فاکتور، افزایش می‌یابند.

روابط تجربی جدید برای پیش‌بینی پارامترهای انتقال جرم برای استخراج اورانیم از محلول فروشویی سولفات با استخراج‌کننده آل‌امین ۳۳۶ در ستون ضربه‌ای افقی نوع سینی‌دار به‌صورت تابعی از اعداد بدون بعد ارائه شد. با مقایسه نتایج تجربی آزمایش‌ها و مقادیر به دست آمده از روابط تجربی جدید، مشاهده شد مدل‌های ارائه شده قادر به پیش‌بینی نتایج آزمایشگاهی با متوسط خطای قابل قبول می‌باشند.



شکل ۱۰. اثر تغییرات دبی حجمی فاز پراکنده بر ضرایب پراکندگی محوری فازها برای استخراج اورانیم در ستون ضربه‌ای افقی  $Q_c=3$  l/h. ( $af=1$  cm/s)

هم‌چنین رابطه ۱۹ برای محاسبه شدت ضربه در حالت گذار از رژیم شبه‌پراکنده به رژیم امولسیون پیشنهاد شد و مقادیر  $K_1$  و  $K_2$  در رابطه ۲۳ به‌ترتیب برابر با  $2.17 \times 10^{-5}$  و  $230.57$  گزارش شدند. مقدار متوسط مطلق خطای نسبی ضریب پراکندگی محوری فاز پیوسته بین نتایج آزمایشگاهی پژوهش حاضر و مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه ۲۲، برابر با ۲۰/۸٪ به دست آمد.

امانی و همکارانش [۱۳] برای تعیین ضریب پراکندگی محوری فاز پیوسته و پراکنده در ستون ضربه‌ای افقی نوع سینی‌دار برای استخراج اورانیم با استخراج‌کننده تری‌اکتیل آمین رابطه‌های تجربی زیر را پیشنهاد کردند:

$$\frac{E_c \rho_c U_c}{\sigma} = 1.562 \times 10^{-4} \left(\frac{af}{U_c}\right)^{-0.527} \left(\frac{af}{U_d}\right)^{-0.69} \left(\frac{\sigma}{af \mu_c}\right)^{-2.112} \quad (23)$$

$$\frac{E_d \rho_d U_d}{\sigma} = 51.697 \left(\frac{af}{U_c}\right)^{-0.29} \left(\frac{af}{U_d}\right)^{-0.774} \left(\frac{\sigma}{af \mu_c}\right)^{-1.556} \quad (24)$$

از مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی شده ضریب پراکندگی محوری فاز پیوسته و پراکنده با نتایج آزمایشگاهی پژوهش حاضر، مقدار متوسط مطلق خطای نسبی برای ضریب پراکندگی محوری فاز پیوسته با استفاده از رابطه ۲۳، برابر با ۴۲/۹۷٪ و برای ضریب پراکندگی محوری فاز پراکنده با استفاده از رابطه ۲۴، برابر با ۲۸/۳۷٪ به دست آمد. مقادیر متوسط مطلق خطای نسبی نشان می‌دهد که این روابط برای پیش‌بینی ضرایب پراکندگی محوری فازها در سیستم استخراج اورانیم از محلول فروشویی سولفات

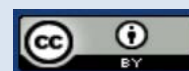


## مراجع

- J. Kumar, et al, *A Brief Review on Solvent Extraction of Uranium from Acidic Solutions*, *Separation & Purification Reviews*, **40**, 77–125 (2011).
- F. Habashi, *A textbook of hydrometallurgy: Metallurgy extractive Québec, Enr.*, (1993).
- F. Khanramaki, et al, *Equilibrium and kinetics of uranium(VI) extraction from a sulfate leach liquor solution by Alamine 336 using single drop technique*, *Chemical Engineering Research and Design*, **125**, 181–189 (2017).
- J.E. Quinn, D. Wilkins, K.H. Soldenhoff, *Solvent extraction of uranium from saline leach liquors using DEHPA/Alamine 336 mixed reagent*, *Hydrometallurgy*, **134**, 74–79 (2013).
- G. Ramadevi, et al, *Solvent extraction of uranium from lean grade acidic sulfate leach liquor with alamine 336 reagent*, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **294**, 13–18 (2012).
- J.D. Thornton, *Science and Practice of Liquid-Liquid Extraction*, New York, USA: *Oxford University Press*, **2**, (1992).
- T. Sato, *The back-extraction of uranyl nitrate from tributyl phosphate solution*, *Journal Inorganic Nuclear Chemistry*, **7**, 147–149 (1958).
- C.V. Ellison, *Study of Half Pulse Column with a TBP System*, *Oak Ridge National Laboratory (ORNL-912)*, (1951).
- M. Khajenoori, et al, *Prediction of drop size distribution in a horizontal pulsed plate extraction column*, *Chemical Engineering and Processing*, **92**, 25–32 (2015).
- M. Khajenoori, et al, *Slip and Characteristic Velocities in a Horizontal Pulsed-Plate Extraction Column*, *Chem. Eng. Technol.*, **38**, 1783–1792 (2015).
- F. Panahinia, et al, *Experimental investigation concerning the effect of mass transfer direction on mean drop size and holdup in a horizontal pulsed plate extraction column*, *RSC Advances*, **7**, 8908–8921 (2017).
- F. Panahinia, et al, *Modeling and simulation of a horizontal pulsed sieve-plate extraction column using axial dispersion model*, *Separation Science and Technology*, **52**, 73–81 (2017).
- P. Amani, et al, *Mass transfer studies in a horizontal pulsed sieve-plate column for uranium extraction by tri-n-octylamine using axial dispersion model*, *Progress in Nuclear Energy*, **98**, 1–14 (2017).
- L.D. Smoot, A.L. Babb, *Mass Transfer Studies in a Pulsed Extraction Column. Longitudinal Concentration Profiles*, *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, **1**, 93–103 (1962).
- A. Safari, *Axial mixing and mass transfer investigation in a pulsed packed liquid-liquid extraction column using plug flow and axial dispersion models*, *Chemical Engineering Research and Design*, **90**, 93–200 (2012).
- A.E. Ferreira, et al, *Extraction of copper from acidic leach solution with Acorga M5640 using a pulsed sieve plate column*, *Hydrometallurgy*, **104**, 66–75 (2010).
- S. Kagan, et al, *Longitudinal mixing and its effects on mass transfer in pulsed-screen extractors*, *Int. Chem. Eng.*, **13**, 217–225 (1973).
- T. Miyauchi, H. Oya, *Longitudinal dispersion in pulsed perforated-plate columns*, *AIChE J.*, **11**, 395–406 (1965).
- J.C. Godfrey, M.J. Slater, *Liquid-liquid extraction equipment*. Bradford: *John Wiley & Sons Ltd*, (1994).
- W.J. Korchinsk, Q.M. Sheikh, *Forward Mixing Model: Application to Pulsed Plate Extraction Column Operation in the Emulsion Region*, *Chemical Engineering Communications*, **115**, 95–115 (1992).
- X. Tang, *A dynamic interaction mass transfer model for simulating the mass transfer process in extraction columns*, *Computers and Chemical Engineering*, **30**, 978–988 (2006).
- M.L.F. Gameiro, et al, *Copper extraction from ammoniacal medium in a pulsed sieve-plate column with LIX 84-I*, *Journal of Hazardous Materials*, **183**, 165–175 (2010).
- D. Bonam, et al, *Liquid-liquid extraction in a rotating-spray column: removal of Cr(VI) by Aliquat 336*, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **48**, 7687–7693 (2009).
- F. Khanramaki, et al, *Investigations on the complete removal of iron(III) interference on the uranium(VI) extraction from sulfate leach liquor using Alamine 336 in kerosene*, *Radiochim. Acta*, **106**, (2018).
- A.J. Melnyk, *Hydrodynamic Characteristics of a Horizontal Pulsed Solvent Extraction Column*. Vol. Philosophy McMaster University Hamilton Ontario, Canada: *A Thesis Submitted to the School of Graduate Studies in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor*, (1989).
- P.V. Danckwerts, *Chemical Engineering Science Genie Chimique*, *Department of chemical Engineering*, England, (1953).
- J.C. Goebel, K. Booij, J.M.H. Fortuin, *Axial Dispersion in Single Phase Flow In Pulsed Packed Columns*, *Chemical Engineering Science*, **41**, 3197–3203 (1986).
- A.N.S. Mak, *Axial Dispersion In Single Phase Flow In A Pulsed Packed Column Containing Structured Packing*, *Chemical Engineering and Science*, **46**, 819–826 (1991).
- C. Jiao, S. Ma, Q. Song, *Mass transfer characteristics in a standard pulsed sieve-plate extraction column*, *Energy Procedia*, **39**, 348–357 (2013).
- R.L. Yadav, A.W. Patwardhan, *Design aspects of pulsed sieve plate columns*, *Chemical Engineering Journal*, **138**, 389–415 (2008).
- A. Kumar, S. Hartland, *Correlations for prediction of mass transfer coefficients in single drop systems and liquid-liquid extraction columns*, *Chemical Engineering Research and Design*, **77**, 372–384 (1999).
- G. Srinikethan, A. Prabhakar, Y.B.G. Varma, *Axial dispersion in plate-pulsed columns*, *Bioprocess Eng.*, **2**, 161–168 (1987).
- A. Kumar, S. Hartland, *Prediction of dispersed phase hold-up in pulsed perforated-plate extraction columns*, *Chem. Eng. Process. Process Intensif*, **23**, 41–59 (1988).
- X. Tang, G. Luo, J. Wang, *A dynamic forward mixing model for evaluating the mass transfer performances of an extraction column*, *Chem. Eng. Sci.*, **59**, 4457–4466 (2004).
- M. Asadollahzadeh, et al, *Use of axial dispersion model for determination of Sherwood number and mass transfer coefficients in a perforated rotating disc contactor*, *Chin. J. Chem. Eng.*, **25**, 53–61 (2017).
- G.A. Sehmel, A.L. Babb, *Longitudinal mixing studies in a pulsed extraction column*, *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **3**, 210–214 (1964).
- G.U. Din, et al, *Axial dispersion, holdup and slip velocity of dispersed phase in a pulsed sieve plate extraction column by radiotracer residence time distribution analysis*, *Appl. Radiat. Isot.*, **66**, 1818–1824 (2008).

## COPYRIGHTS

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



## استناد به این مقاله

فرشته خان‌رمکی، رضوان ترکمان، امیرسعید شیرانی، سید جابر صفدری (۱۳۹۹). بررسی عملکرد انتقال جرم ستون ضربه‌ای افقی در استخراج اورانیم از محلول فروشویی سولفات به بندرعباس توسط آمین ۳۳۶ با استفاده از مدل پراکندگی محوری، ۹۴، ۱۲۸–۱۳۷

DOI: 10.24200/nst.2020.1159

Url: [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1159.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1159.html)

