



بررسی اثر پارامترهای عملیاتی روی پارامترهای انتقال جرم مدل پراکندگی محوری به منظور طراحی
ستون‌های ضربه‌ای سینی دار افقی

سیده لیلا میرمحمدی، سید جابر صفدری، محمد حسن ملاح*

پژوهشکده مواد و سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی:

۸۴۸۶-۱۱۳۶۵

*mmallah@aeoi.org.ir

چکیده:

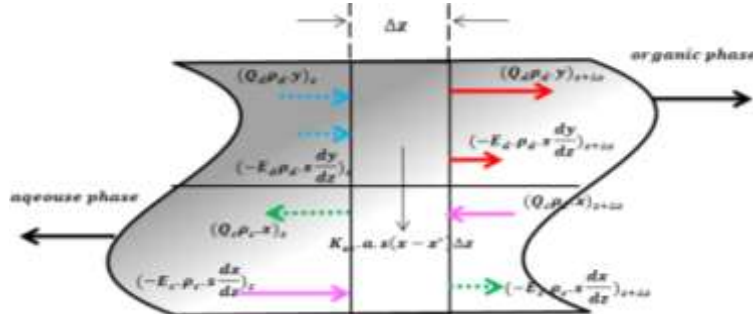
در این مقاله، اثر پارامترهای عملیاتی روی پارامترهای انتقال جرم ($K_{oc.a}$, E_c) مدل پراکندگی محوری در فرآیند دفع اورانیوم از آلومین ۳۳۶ با استفاده از آمونیوم کربنات در یک ستون ضربه‌ای افقی از نوع سینی دار بررسی شده است. نتایج به دست آمده از این بررسی نشان داد که با افزایش شدت ضربه (af)، دبی جریان فازهای پیوسته (Q_c) و پراکنده (Q_d) ضریب انتقال جرم کلی حجمی افزایش می‌یابد، اما ضریب پراکندگی محوری روندی متفاوت دارد. در انتها با روش آنالیز ابعادی روابطی تئوری-تجربی برای پیش بینی ضریب انتقال جرم کلی حجمی و ضریب پراکندگی محوری فاز پیوسته به ترتیب با درصد خطای مطلق ۱۴/۵۹٪ و ۱۲/۷۰٪ ارائه گردید که خود بیانگر دقت روابط و کارا بودن آنها برای طراحی ستون است. لازم به ذکر است که از E_d به علت مقادیر بسیار پایین در این فرآیند صرف نظر گردید.

کلمات کلیدی: پارامترهای انتقال جرم مدل پراکندگی محوری ($K_{oc.a}$, E_c)، ستون ضربه‌ای افقی از نوع سینی دار



۱- مقدمه

استخراج حلالی به عنوان یک فرایند جداسازی انتخابی، به طور گسترده در اکثر صنایع شیمیایی، هسته‌ای و دارویی به کار می‌رود. در صنایع هسته‌ای برای جداسازی اورانیوم از محلول‌های آبی حلال‌های مختلفی به کار گرفته شده‌است و به تبع آن عریان‌سازهای متفاوتی نیز برای دفع اورانیوم از این فازها موجود است، که می‌توانند ماهیت اسیدی، بازی و خنثی داشته باشند. آلومین ۳۳۶ یک حلال مناسب برای استخراج اورانیوم از محیط اسید سولفوریک است. عمل عریان‌سازی از چنین حلالی توسط عامل‌های مختلفی انجام می‌شود که از این میان آمونیوم کربنات به دلیل راندمان دفع بالا و انتخاب‌پذیری اورانیوم نسبت به سایر عناصر انتخاب گردید [۱-۳]. در صنعت از میان ۳ دسته ستون‌های عمودی، افقی و افقی-عمودی ستون‌های ضربه‌ای افقی با توجه به ساختار افقی برای نگهداری نیاز به ساختمان‌هایی با سقف‌های بلند و همین امر منجر به کاهش هزینه‌ها در تعمیر و نگهداری ستون می‌باشد. بازده انتقال جرم ستون‌های استخراج ضربه‌ای افقی قابل قیاس با ستون‌های ضربه‌ای عمودی است [۴-۶]. پارامترهای انتقال جرم نقشی تعیین کننده در طراحی ستون دارد. برای شناسایی و به دست آوردن این پارامترها معمولاً ستون‌هایی در مقیاس آزمایشگاهی و یا نیمه صنعتی ساخته شده است. پارامترهای انتقال جرم از مدل‌های ریاضی با اساس موازنه جرم و مومنتم، شرایط عملیاتی و مشخصات هر ستون به دست می‌آیند. مقدار عددی این پارامترها چنان انتخاب می‌شود که نتایج مدل کمترین اختلاف را نسبت به نتایج آزمایشات داشته باشد. این عمل را اصطلاحاً بهینه‌سازی می‌گویند. در این کار تحقیقاتی مدل‌سازی انتقال جرم برای ستون‌های استخراج افقی در حالت پایا بررسی خواهد شد. مدل‌های انتقال جرم شامل پلاگ، اختلاط کامل، پراکندگی محوری، جریان برگشتی و اختلاط پیشرو است. رایج‌ترین شیوه مدل‌سازی بعد از مدل پلاگ، مدل پراکندگی محوری است و بیشتر برای ستون‌ها با تماس دیفرانسیلی به کار می‌رود. در این مدل تمام عواملی که باعث انحراف از حالت پلاگ می‌شوند به وسیله یک پارامتر ضریب پراکندگی محوری بیان می‌شود. در پراکندگی محوری فرض بر این است ضریب پراکندگی فقط در راستای محور ستون و در جهت شعاعی جریان یکنواخت است و سه پارامتر (Ed, Ec و Noc) باید بهینه‌سازی شوند. [۸-۱۳]. شکل (۱) موازنه جرم در یک ستون استخراج با استفاده از مدل پراکندگی محوری را نشان می‌دهد.



شکل ۱: انتقال جرم در مقطع دیفرانسیلی (d → c) در مدل پراکندگی محوری

در نهایت معادلات توزیع غلظت بدون بعد فاز پیوسته و پراکنده به صورت روابط (۸-۴) و (۹-۴) بدست می آید:

$$\frac{1}{Pe_c} \frac{d^2 X}{dZ^2} + \frac{dX}{dZ} + NTU_{oc} [X + Y - 1] = 0$$

$$\frac{1}{Pe_d} \frac{d^2 Y}{dZ^2} - \frac{dY}{dZ} + \frac{NTU_{oc}}{\Omega} [X + Y - 1] = 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Z = 0, X = 0, Y = Y_{out}, \frac{dY}{dZ} = 0, \frac{dX}{dZ} = -Pe_c X_{out} \\ Z = 1, X = X_{out}, Y = Y_{in}, \frac{dX}{dZ} = 0, \frac{dY}{dZ} = Pe_d Y_{out} \end{array} \right. \text{شرایط}$$

مرزی

در جدول (۱) روابط ارائه شده به ترتیب برای ضریب انتقال جرم و ضرایب پراکندگی محوری در ستون‌های افقی در سیستم‌های بدون واکنش شیمیایی ارائه شده است [۱۴-۱۵].

جدول ۱: معادلات پیشنهاد شده برای ضریب انتقال جرم و ضرایب پراکندگی محوری در ستون‌های ضربه ای افقی

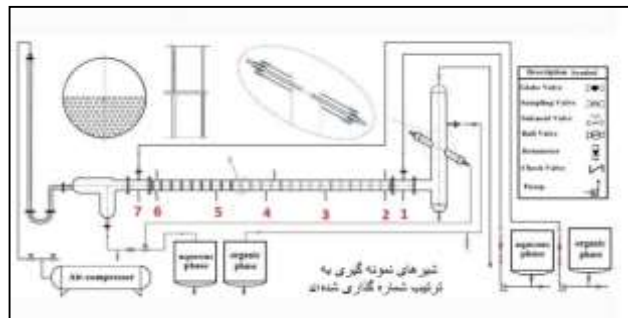
پارامتر	رابطه
K_{oc}	$\frac{\mu_c K_{oc} a}{\rho_c A f^2} = K_1 \exp(K_2 (Af) - (Af)_m) \left(\frac{\mu_c}{\mu_d}\right)^{2.279} \left(\frac{Af \mu_c}{\sigma}\right)^{-0.183} \left(\frac{Af}{u_c}\right)^{-0.749} \left(\frac{Af}{u_d}\right)^{-0.468} \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_c}\right)^{-0.457}$ $, K_2 = -102.19 \quad (Af)_m = 0.0105 \left(\frac{\sigma \Delta\rho^{1/4}}{\mu_d^{1/3}}\right) K_1 = 3.45 \times 10^{-5}$
K_{oc}	$\frac{\mu_c K_{oc} a}{\rho_c A f^2} = 2.3 \times 10^{-5} \left(\frac{\sigma}{Af \mu_c}\right)^{0.545} \left(\frac{Af}{u_c}\right)^{-0.288} \left(\frac{Af}{u_d}\right)^{-0.564}$

E_c	$\frac{E_c \rho_c A f}{\sigma} = K_1 \exp(K_2 (Af) - (Af)_m) \left(\frac{\mu_c}{\mu_d}\right)^{0.885} \left(\frac{Af \mu_c}{\sigma}\right)^{1.133} \left(\frac{Af}{u_c}\right)^{-0.386} \left(\frac{Af}{u_d}\right)^{0.365} \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_c}\right)^{-4.097}$ $, K_2 = 135.86 \quad (Af)_m = 0.0105 \left(\frac{\alpha \sigma \Delta\rho^{\frac{1}{4}}}{\mu_d^{\frac{3}{4}}}\right) K_1 = 6.77 \times 10^{-5}$
E_c	$\frac{E_c \rho_c A f}{\sigma} = 1.564 \times 10^4 \left(\frac{\sigma}{Af \mu_c}\right)^{2.192} \left(\frac{Af}{u_c}\right)^{0.537} \left(\frac{Af}{u_d}\right)^{0.069}$

۲- روش کار

۲-۱- تجهیزات

ستون استخراج مورد استفاده در این تحقیق یک ستون استخراج افقی ضربه‌ای از نوع سینی دار (شکل ۱) می‌باشد. در محفظه شیشه‌ای این ستون ۲۴ جفت صفحه سوراخ دار از جنس فولاد ضد زنگ قرار دارد. فاصله میان سینی‌ها در هر جفت صفحه ۱ cm و فاصله میان خود جفت سینی ۵ cm در نظر گرفته می‌شود. صفحات به گونه‌ای مشبک شده‌اند که فقط یکی از دو نیمه بالایی یا پایینی صفحه سوراخ دارد و قرار گرفتن دو صفحه یکی با سوراخ در نیمه بالایی و دیگری در نیمه پایینی باعث اختلاط بسیار خوب دو فاز سبک و سنگین می‌شود. دبی هر دو فاز با دو روتامتر تنظیم می‌شود و شدت ضربه به کار برده شده توسط یک کمپرسور هوا تولید و با شیرهای سلونوئیدی تنظیم می‌گردد. دو محفظه ته نشین کننده در دو انتهای ستون برای جدا کردن دو فاز مایع استفاده می‌شود.



شکل ۲: شماتیک ستون استخراج افقی ضربه‌ای

۲-۲- مواد مصرفی

در این کار آلومین ۳۳۶ حاوی اورانیوم (آلومین ۳۳۶ با ۶٪ وزنی + کروزن با ۸۹٪ وزنی به عنوان رقیق کننده + ایزودکانول با ۵٪ وزنی به عنوان اصلاح کننده + ۲۵۰ ppm اورانیوم) به عنوان خوراک است. این خوراک محصول استخراج با حلال "محلول مادر" کارخانه تولید کیک زرد بندر عباس است. همچنین برای دفع اورانیوم از نمک آمونیوم کربنات تولیدی کمپانی مرک برای ساخت محلول آمونیوم کربنات ۰/۶۴ مولار استفاده شده است. برای اندازه‌گیری غلظت اورانیوم و سایر عناصر موجود در محلول‌های آبی، از دستگاه طیف سنج نشر اتمی - پلاسما جفت شده القایی (ICP-AES) و برای



اندازه‌گیری خواص فیزیکی فازها از جمله ویسکوزیته، دانسیته فازها و کشش بین فازی به ترتیب از دستگاه DVI-Prime viscometer, Picnometer و Krüss tensiometer استفاده شده است.

۲-۳- روش انجام آزمایشات

بعد از راه‌اندازی ستون و انجام آزمایشات و به دست آوردن داده‌های هیدرودینامیکی نظیر موجودی فاز پراکنده و غلظت‌های ورودی و خروجی و با استفاده از شرایط مرزی مناسب و شیب منحنی تعادلی، معادلات انتقال جرم مدل‌های پلاگ، پراکندگی محوری و جریان برگشتی با استفاده از روش حل معادلات دیفرانسیل معمولی (ODE) در نرم افزار Matlab حل شدند. همچنین X و Y به ترتیب غلظت فاز پیوسته و پراکنده می‌باشد و مورد استفاده برای ورودی نرم افزار متلب برای محاسبه ضرایب مدل‌ها است، از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$X = \frac{x - x_{in}}{x^*_{out} - x_{in}} \quad (۴)$$

$$Y = \frac{y - y_{in}}{y^*_{out} - y_{in}} \quad (۵)$$

که در این روابط x_{in} و y_{in} به ترتیب غلظت فاز آلی و آبی ورودی به ستون و x^*_{out} و y^*_{out} غلظت‌های تعادلی خروجی فاز آلی و آبی از ستون می‌باشند که از رابطه‌های (۳) و (۴) به دست می‌آیند و x_n و y_n نیز غلظت فاز آلی و آبی در هر شیر نمونه‌گیری می‌باشد که برای x_n ($n = 1, \dots, 7 = out$) با نمونه‌گیری در حدود ۵ میلی‌لیتر از هر شیر نمونه‌گیری از ستون و با استفاده از آنالیز ICP به دست می‌آوریم و y_n مربوط به آن را از رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$y^*_{out} = mx_{in} \quad (۶)$$

$$y_{in} = mx^*_{out} \quad (۷)$$

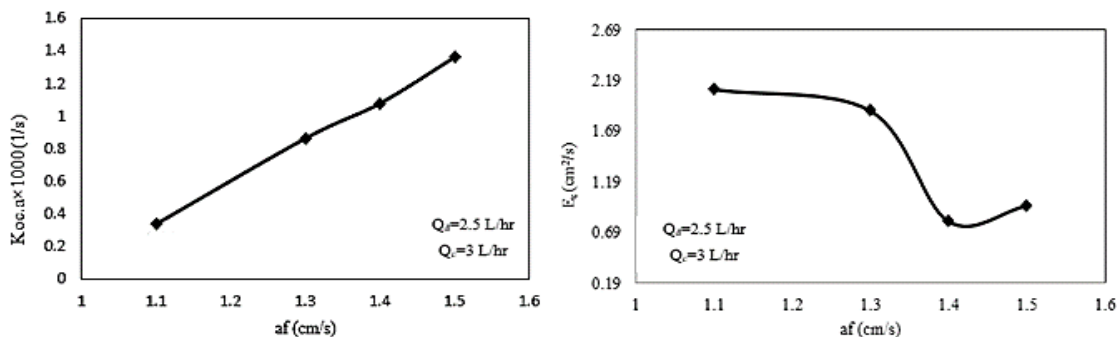
$$\frac{y_n}{1 - y_n} - \frac{y_{in}}{1 - y_{in}} = \frac{\rho_{c,out} Q_{c,out} (1 - x_{out})}{\rho_{d,in} Q_{d,in} (1 - y_{in})} \left(\frac{x_n}{1 - x_n} - \frac{x_{out}}{1 - x_{out}} \right) \quad (۸)$$

که در اینجا m شیب منحنی تعادلی به دست آمده از طریق آزمایشات انجام شده در نسبت فازی‌های متفاوت است. شیب این منحنی ۰/۸۱ محاسبه شد. از این روابط و شیب به دست آمده از منحنی تعادلی برای به دست آوردن پارامترهای انتقال جرم استفاده می‌شود که ورودی کد می‌باشند. عملکرد کد به این صورت است که ابتدا بازه‌ای از حدس اولیه‌ای برای ضرایب انتقال جرم مجهول مدل‌ها در نظر گرفته می‌شود. سپس با حل معادلات انتقال جرم و حدس‌های اولیه هر مدل توزیع غلظت را به دست آورده و با توزیع غلظت داده‌های تجربی مقایسه انجام می‌گیرد. هر حدس اولیه‌ای که کمترین خطا را از مقایسه توزیع غلظت به دست آمده و توزیع غلظت داده‌های تجربی داشته باشد به عنوان جواب نهایی در نظر گرفته می‌شود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی اثر شدت ضربه بر روی پارامترهای انتقال جرم مدل پراکندگی محوری

عملکرد کلی یک ستون استخراج می‌تواند بر حسب ضریب انتقال جرم و مساحت سطح مشترک ($K_{oc}a$) بیان گردد. بررسی اثر تغییرات شدت ضربه بر مساحت سطح مشترک و ضریب کلی حجمی انتقال جرم مدل پراکندگی محوری در شکل (۳) آورده شده است. عملکرد انتقال جرم ستون با افزایش شدت ضربه، افزایش می‌یابد. این امر به دلیل این است که افزایش شدت ضربه موجب کاهش اندازه قطره شده و به تبع منجر به افزایش سطح مشترک و میزان انتقال جرم می‌شود. از طرفی افزایش شدت ضربه ابتدا منجر به کاهش ضریب پراکندگی محوری و سپس افزایش آن می‌گردد. افزایش شدت ضربه منجر به کاهش موجودی فاز پراکنده و کاهش ورودی سیستم شده که این تغییرات منجر به کاهش در ضرایب پراکندگی محوری می‌گردد. در شدت ضربه‌های بالا به دلیل کاهش چرخش درونی قطرات ضرایب پراکندگی محوری افزایش می‌یابد. مقادیر ضریب پراکندگی محوری فاز پراکنده بسیار کوچکتر از ضریب پراکندگی محوری فاز پیوسته می‌باشد. به همین دلیل از بررسی تغییرات پارامترهای عملیاتی و ارائه رابطه پیش‌بینی کننده برای ضریب پراکندگی محوری فاز پراکنده صرف‌نظر شده است.

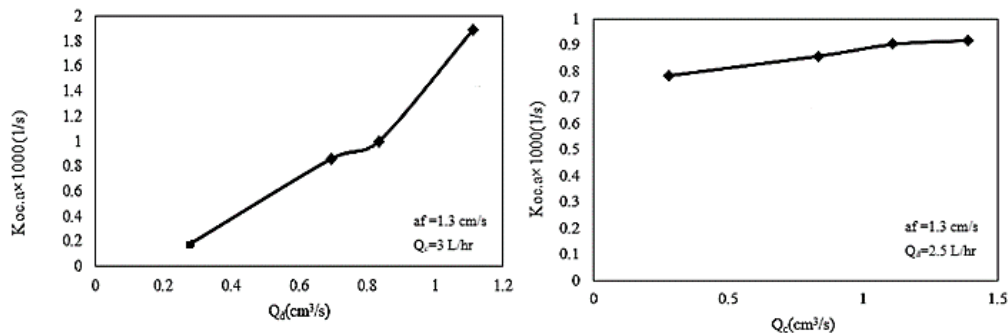


شکل ۳: اثر شدت ضربه بر ضریب کلی انتقال جرم مدل پراکندگی محوری و ضریب پراکندگی محوری فاز پیوسته

۳-۲- بررسی اثر دبی فاز های پیوسته و پراکنده روی پارامترهای انتقال جرم مدل پراکندگی محوری

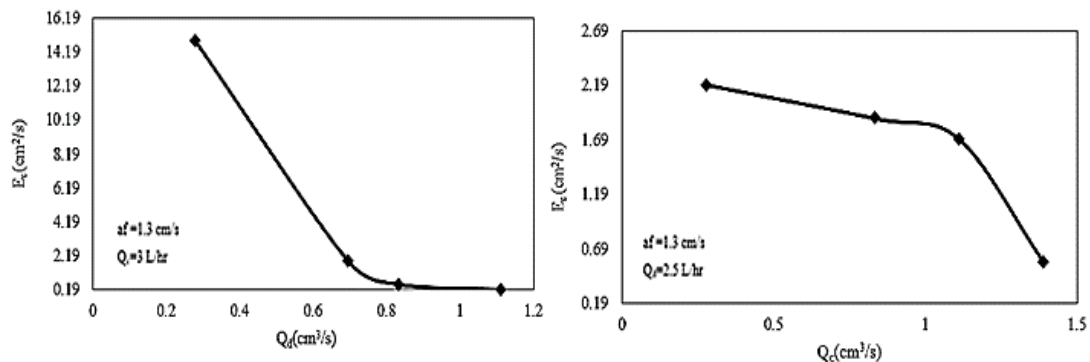
مقایسه تغییرات ضریب کلی حجمی انتقال جرم و مساحت سطح مشترک با دبی فاز پیوسته و پراکنده در شکل ۳ مشاهده می‌شود. همانطور که مشخص است مساحت سطح مشترک با افزایش دبی فازها افزایش می‌یابد. موجودی فاز پراکنده نیز با افزایش دبی فازها به علت افزایش نیروی دراگ بین قطرات و فاز پیوسته و در نتیجه کاهش سرعت لغزشی بین فازها افزایش می‌یابد. اثر موجودی فاز پراکنده بر مساحت سطح مشترک بیشتر از قطر میانگین قطرات است. بنابراین مساحت سطح مشترک با افزایش موجودی فاز پراکنده افزایش می‌یابد. این افزایش در مساحت سطح مشترک و نیروی

دراگ منجر به افزایش ضریب کلی انتقال جرم با افزایش دبی فاز پیوسته و پراکنده می‌شود. اما تاثیر دبی فاز پیوسته بر ضریب کلی انتقال جرم، نسبت به تاثیر دبی فاز پراکنده ملایم‌تر می‌باشد.



شکل ۴: اثر دبی فاز پیوسته و پراکنده روی ضریب کلی انتقال جرم مدل پراکندگی محوری

همانطور که ذکر گردید، به دلیل اینکه با افزایش دبی فازها قطره‌های غیر یکنواخت بیشتری تولید می‌گردد که این امر در حین افزایش ضریب کلی انتقال جرم موجب کاهش ضریب پراکندگی محوری فاز پیوسته می‌گردد.



شکل ۵: اثر دبی فاز پراکنده و پیوسته بر ضریب پراکندگی محوری فاز پیوسته

۳-۳- رابطه پیشنهادی برای پیش بینی ضرایب انتقال جرم

در این بخش برای مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های بدست آمده از یک رابطه تئوری- تجربی از میانگین خطای نسبی مطلق (AARE) استفاده می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\% AARE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|X_i(exp) - X_i(theo)|}{X_i(exp)} \quad (9)$$

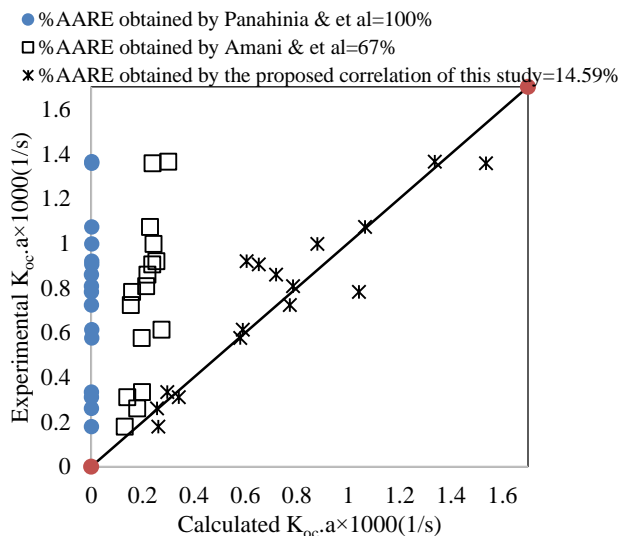
که $X_i(exp)$ پارامتر تجربی بدست آمده از آزمایشات و $X_i(theo)$ داده بدست آمده از روابط تئوری- تجربی می‌باشد.

بر اساس بررسی‌های به عمل آمده در ستون‌های افقی برای این سیستم مورد تحقیق روابطی برای پیش بینی ضرایب انتقال جرم ارائه نشده است. این ضرایب تابعی از خواص فیزیکی و پارامترهای عملیاتی می‌باشد. در صورت استفاده از

روش آنالیز ابعادی و داده‌های به‌دست آمده از آزمایشات، رابطه (۷) و (۸) برای پیش‌بینی پارامترهای انتقال جرم مدل پراکندگی محوری به‌دست می‌آید. میانگین درصد خطای مطلق این روابط برای ضریب انتقال جرم کلی حجمی و ضریب پراکندگی محوری فاز پیوسته به ترتیب ۱۴/۵۹٪ و ۱۲/۷۰٪ می‌باشد که مناسب برای پیش‌بینی پارامترهای انتقال جرم مدل پراکندگی محوری این سیستم می‌باشند:

$$K_{oc} a_{axial dispersion} \cdot \frac{\sigma}{af^3 \rho_d} = 0.82 \cdot \left(\frac{\rho_d^2 \cdot Q_d \cdot af^3}{\sigma^2} \right)^{1.11} \left(\frac{\rho_d^2 \cdot Q_c \cdot af^3}{\sigma^2} \right)^{-0.34} \quad (۷)$$

$$E_c \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_d}{\sigma Q_d}} = 0.14 \cdot \left(\frac{Q_c}{Q_d} \right)^{3.43} \left(\sqrt[3]{\frac{\rho_d^2 \cdot Q_d}{\sigma^2}} \cdot af \right)^{-0.12} \quad (۸)$$



شکل ۱: مقایسه داده‌های تجربی $K_{oc,a}$ به‌دست آمده از مدل پراکندگی محوری ارائه شده در این تحقیق و مقالات

مقایسه بین داده‌های تجربی و مقادیر محاسبه شده از رابطه (۷) در شکل (۶) آورده شده است. خطای نسبی این رابطه از داده‌های تجربی به‌دست آمده از انجام آزمایش‌ها در پیش‌بینی ضریب کلی انتقال جرم بالا می‌باشد، زیرا تفاوت شرایط عملیاتی ستون دلالت بر تفاوت‌های به‌دست آمده دارد. تاکنون، فقط دو رابطه برای پیش‌بینی ضریب پراکندگی محوری فاز پیوسته در ستون‌های ضربه‌ای افقی از نوع سینی‌دار ارائه شده است، مقایسه بین داده‌های تجربی و مقادیر محاسبه شده نشان داد خطای هر رابطه بسیار بالا است و برای پیش‌بینی در سیستم این تحقیق مناسب نیست.

بحث و نتیجه‌گیری

- افزایش ضریب انتقال جرم با افزایش شدت ضربه به دلیل کاهش اندازه قطره، افزایش سطح مشترک



- روند کاهش - افزایشی ضرایب پراکندگی محوری با افزایش شدت ضربه: کاهش ضریب پراکندگی محوری به دلیل کاهش موجودی فاز پراکنده و کاهش ورودی سیستم و افزایش در شدت ضربه‌های بالا به دلیل کاهش چرخش درونی قطرات
- افزایش ضریب کلی انتقال جرم با افزایش دبی فاز پیوسته و پراکنده به دلیل افزایش نیروی دراک منجر
- کاهش ضریب پراکندگی محوری فاز پیوسته با افزایش دبی فازها به دلیل تولید قطره‌های غیر یکنواخت بیشتر

Reference

1. Rydberg, J. (Ed.). (2004). Solvent extraction principles and practice, revised and expanded. CRC Press.
2. Ramadevi, G., Sreenivas, T., Navale, A. S., & Padmanabhan, N. P. H. (2012). Solvent extraction of uranium from lean grade acidic sulfate leach liquor with alamine 336 reagent. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 294(1), 13-18
۳. محمد قنادی مراغه چرخه سوخت هسته‌ای. ۱۳۸۸، نشریات زلال کوثر با همکاری روابط عمومی پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای
۴. رقیه محمودی، کامران نظری، جداسازی اورانیوم از محلول فروشویی آنومالی ۶ منطقه خشومی. معاونت تولید سوخت هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، ۱۳۸۵.
5. Jyothi Rajesh Kumar, Joon-Soo Kim, Jin-Young Lee, and Ho-Sung Yoon, 'Solvent Extraction of Uranium (VI) and Separation of Vanadium (V) from Sulfate Solutions Using Alamine 336', *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, 285 (2010), 301-08.
6. FJ Hurst, and DJ Crouse, 'Recovery of Uranium from Amine Extractants with Ammonium Carbonate', (Oak Ridge National Lab., Tenn., 1961).
7. Thornton, J. D. (1992). *Science and Practice of Liquid-liquid Extraction: Process chemistry and extraction operations in the hydrometallurgical, nuclear, pharmaceutical, and food industries (Vol. 2)*. Oxford University Press, USA.
8. Godfrey, J. C., & Slater, M. J. (Eds.). (1994). *Liquid-liquid extraction equipment*. Chichester, UK: Wiley.
9. Safari, A., Safdari, J., Abolghasemi, H., Forughi, M., & Moghaddam, M. (2012). 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(2), 193-200.
10. Göebel, J. C., Booij, K., & Fortuin, J. M. H. (1986). Axial dispersion in single-phase flow in pulsed packed columns. *Chemical engineering science*, 41(12), 3197-3203.
11. Wang, Y. Y., Shan, J. I. N. G., Wu, G. L., & Wei, W. U. (2006). Axial mixing and mass transfer characteristics of pulsed extraction column with discs and doughnuts. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 16(1), 178-184.



12. Slater, M. J. (1985). Liquid-liquid extraction column design. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 63(6), 1004-1004.
13. Baird, M. H. I. (1974). Axial dispersion in a pulsed plate column. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 52(6), 750-757.
14. Panahinia, F., Safdari, J., Ghannadi-Maragheh, M., Amani, P., & Mallah, M. H. (2017). Modeling and simulation of a horizontal pulsed sieve-plate extraction column using axial dispersion model. *Separation Science and Technology*, 52(9), 1537-1552.
15. Amani, P., Safdari, J., Gharib, A., Badakhshan, H., & Mallah, M. H. (2017). 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, 71-84.