



اندازه‌گیری ضریب پراکندگی محوری فاز پیوسته در ستون استخراج ضربه‌ای دیسک و دونات با استفاده از مدل پراکندگی با ردیاب پرتوزا

یاسر یعقوبی کارنامی^۱، محسن طیبی^{۲*}، محمد اتوکش^۱، میثم تراب مستعدی^۲

۱. دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، صندوق پستی: ۸۶۳۹-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

۲. پژوهشکده‌ی چرخه‌ی سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

چکیده: کارایی بالا و فضای کم مورد نیاز برای ستون‌های ضربه‌ای، باعث شده است که با وجود احتمال پرتودهی و نیاز به حفاظت در برابر اشعه، به ویژه در صنایع هسته‌ای مورد توجه و استفاده قرار گیرند. در این پژوهش، ضریب پراکندگی محوری فاز پیوسته در یک ستون استخراج ضربه‌ای دیسک و دونات برای سیستم آب-نفت بی‌بو با استفاده از روش ردیاب پرتوزا اندازه‌گیری شده است. پراکندگی که توسط پارامتر بدون بُعد عدد پکلت مشخص می‌شود، با عکس ضریب پراکندگی متناسب است. در روش ردیاب پرتوزا از دو آشکارساز گایگر-مولر در بالا و پایین ناحیه‌ی فعال ستون و نیز از ردیاب پرتوزای ^{99m}Tc به ترکیب شیمیایی NaTcO_4 استفاده می‌شود. عوامل مؤثر بر اختلاط محوری و ضریب پراکندگی شامل تغییرات دبی فازهای پیوسته و پراکنده، دامنه و بسامد ضربه مطالعه شدند. نتایج و مشاهدات تجربی نشان می‌دهد با افزایش دبی فاز پیوسته، ضریب پراکندگی محوری فاز پیوسته کاهش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش دبی فاز پراکنده، دامنه و بسامد ضربه، ضریب پراکندگی فاز پیوسته افزایش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: ستون‌های ضربه‌ای دیسک و دونات، ردیاب پرتوزا، پراکندگی محوری

Measurement of Axial Dispersion Coefficient of the Continuous Phase in a Pulsed Disc and Doughnut Column Using Dispersion Model with Radiotracer Technique

Y. Yaghoubi¹, M. Tabasi^{2*}, M. Outokesh¹, M. Torab-Mostaedi²

1. Department of Energy Engineering, Sharif University of Technology, P.O.Box: 11365-8639, Tehran – Iran

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

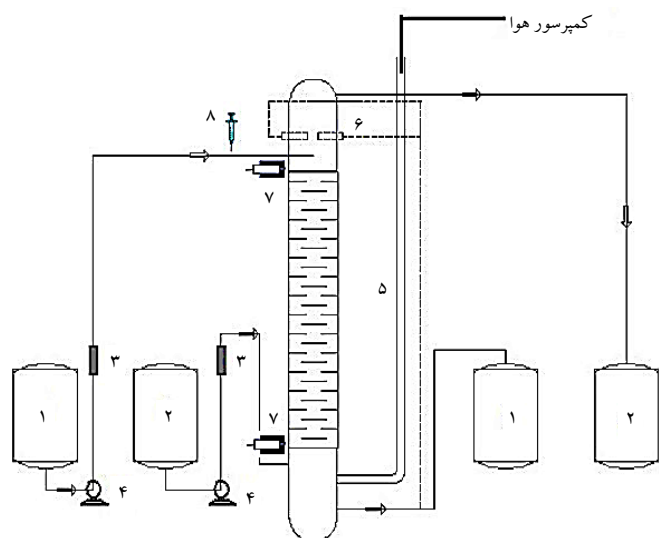
Abstract: High efficiency and low required area for the pulsed columns are interesting and useful especially in nuclear industries in spite of exposure and radiation protection requirements. In this research, dispersion coefficient in a typical disc and doughnut pulsed column in a two phase system (water and kerosene) was determined via radiotracer technique. In the radiotracer method, two Geiger-Mueller detectors at the top and bottom of the active section of the pulsed column and ^{99m}Tc in the form of NaTcO_4 as radiotracer are used. Dispersion is introduced by Peclet dimensionless number which is inversely proportional to the dispersion coefficient. The continuous and dispersed phase flow rate, amplitude and frequency of pulse as the effective parameters on axial mixing and dispersion coefficient magnitude have been studied. Experimental results indicate that by increasing the continuous phase flow rate, the dispersion coefficient decreases. Also, by increasing the dispersion phase flow rate as well as the amplitude and frequency of the pulse, the dispersion coefficient will increase.

Keywords: Pulsed Disc and Doughnut Columns, Radiotracer, Axial Dispersion

*email: mtabasi@aeoi.org.ir

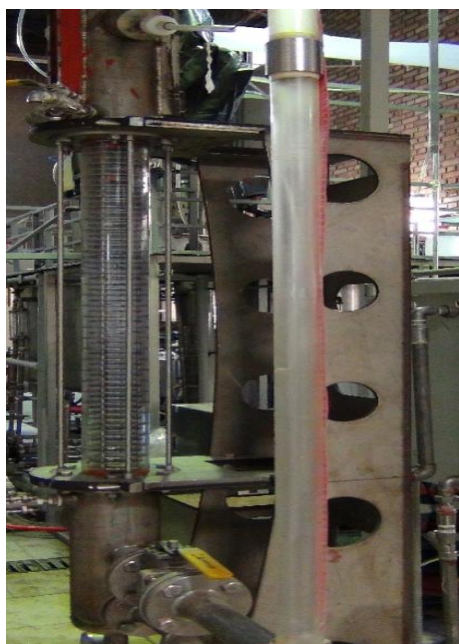
۱. مقدمه

ترک می‌کنند. یک سطح جدایش بین دو فاز در ته‌نشین‌کننده‌ی بالایی در نظر گرفته شده است که به وسیله‌ی یک حس‌گر نوری کنترل می‌شود. از دو دبی‌سنج^(۳) برای اندازه‌گیری دبی فاز پیوسته و پراکنده استفاده شده است.



شکل ۱. نمایی طرح‌وار از ستون استخراج مایع-مایع ضربه‌ای دیسک و دونات.

(۱) مخازن ورودی و خروجی فاز پیوسته (۲) مخازن ورودی و خروجی فاز پراکنده (۳) دبی‌سنج‌ها (۴) دو دستگاه پمپ جهت انتقال فاز پیوسته و پراکنده به بالا و پایین ستون (۵) ایجادکننده‌ی ضربه (۶) حس‌گر نوری نصب شده در ناحیه‌ی ته‌نشین‌کننده‌ی بالایی (۷) دو آشکارساز گاما از نوع گایگر-مولر در بالا و پایین قسمت فعال ستون (۸) محل تزریق ردیاب پرتوزا



شکل ۲. نمایی از ستون ضربه‌ای دیسک و دونات.

استخراج مایع-مایع فرایندی است که در آن اجزای یک مایع به وسیله‌ی تماس با یک مایع غیرقابل امتزاج دیگر از هم جدا می‌شوند. این فرایند کاربرد وسیعی در صنایع شیمیایی، بیوشیمیایی، معدنی، پتروشیمی، نفت، محیط زیست، صنایع غذایی و هسته‌ای دارد [۱، ۲، ۳].

ستون‌های ضربه‌ای، اولین بار به توسط وِن‌دیجک در سال ۱۹۳۵ معرفی شده‌اند [۴]. از آن‌جا که در ستون ضربه‌ای، اجزای متحرک وجود ندارد و ستون به صورت یکپارچه است، به تعمیر و نگهداری کم‌تری نیاز دارد، در نتیجه برای کار با مواد خورنده یا پرتوزا قابل استفاده است [۵].

توزیع زمان اقامت^(۱) (RTD) روش مناسبی برای مطالعه‌ی الگوی جریان و تخمین پراکندگی محوری است که توسط دانکوروت در سال ۱۹۵۳ مطرح شده است [۶]. افزایش پراکندگی محوری موجب کاهش کارایی ستون استخراج می‌شود، بنابراین پیش‌بینی ضریب پراکندگی محوری ضروری است. چندین رابطه‌ی تجربی برای پیش‌بینی ضریب پراکندگی فاز پیوسته در ستون‌های استخراج گوناگون گزارش شده است [۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱]، اما تاکنون مطالعاتی در مورد پراکندگی فاز پیوسته در ستون‌های استخراج دیسک و دونات با ردیاب پرتوزا انجام نشده است.

۲. مشخصات سیستم

طبق شکل‌های ۱ و ۲، دستگاه مورد استفاده در آزمایش‌ها، یک ستون استخراج ضربه‌ای دیسک و دونات در مقیاس نیمه‌صنعتی است که قسمت‌های مختلف آن به شرح زیر می‌باشند:

قسمت فعال ستون از جنس شیشه به طول ۷۲ cm و قطر داخلی ۷۶ mm است. ۳۰ جفت دیسک و دونات به صورت متوالی (یک در میان) در ستون قرار گرفته‌اند که فاصله‌ی بین دیسک و دونات ۱۰ mm است. قطر دیسک ۶۷ mm و قطر سوراخ دونات ۳۶ mm است. دو ته‌نشین‌کننده به قطر ۱۱۲ mm به منظور جداسازی دو فاز در بالا و پایین قسمت فعال ستون قرار گرفته‌اند. آب به صورت فاز پیوسته از بالا و نفت بی‌بو^(۲) به صورت فاز پراکنده از پایین وارد ستون می‌شوند. فاز سبک در اثر پالس پراکنده شده و از لابه‌لای دیسک و دونات عبور کرده، به سمت بالای ستون حرکت می‌کند. قطرات فاز پراکنده در ته‌نشین‌کننده‌ی بالایی به هم می‌پیوندند و با سرریز شدن، ستون را



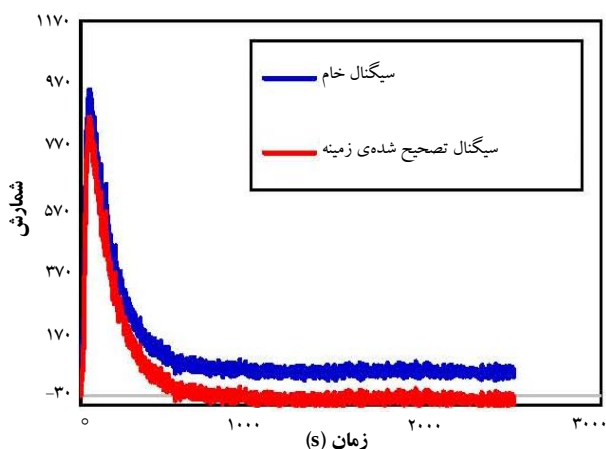
زمان مرده یا قدرت تفکیک یک شمارنده عبارت است از زمان کمینه ای که باید بین ورود پی درپی دو ذره به آشکارساز سپری شود تا دو تپ متمایز تولید شوند. به عبارتی دیگر، زمان لازم بین لحظه ی برخورد ذره به آشکارساز و لحظه ای است که تپ ولتاژ به درون شمارشگر می رود. مقدار تابش تصحیح شده از رابطه ی (۱) به دست می آید، که در آن، n_m تابش اندازه گیری شده، t_d زمان مرده و $n_{c1}(t)$ تابش تصحیح شده است:

$$n_{c1}(t) = \frac{n_m(t)}{1 - t_d \cdot n_m(t)} \quad (1)$$

چون در هر محیطی، تابش زمینه از اشعه ی گاما وجود دارد، بنابراین نیاز است پس از انجام آزمایش ها، مقدار آن اندازه گیری شود. سپس مقدار اشعه ی گامای اندازه گیری شده در آزمایش ها از آن مقدار زمینه کم شود. شکل ۳ نمونه ای از منحنی های تابش را قبل و بعد از اصلاح تابش زمینه نشان می دهد.

از آنجا که ردیاب پرتوزا به صورت تابع نمایی با زمان واپاشی می کند، ضروری است که مقدار تابش های به دست آمده از آزمایش ها تصحیح شوند. مقدار تابش تصحیح شده ناشی از واپاشی $n_{c1}(t)$ از رابطه ی (۲) به دست می آید، که در آن، $n_{c1}(t)$ واپاشی شمارش تصحیح شده از رابطه ی (۱)، λ ثابت واپاشی ردیاب ^{99m}Tc و t زمان طی شده از شروع اندازه گیری است:

$$n_{c1}(t) = n_{c1}(t) \cdot \exp(\lambda t) \quad (2)$$



شکل ۳. منحنی تابش قبل و بعد از اصلاح تابش زمینه (خام).

سیستم مورد استفاده برای آزمایش ها، آب/ نفت بی بو است که آب، فاز پیوسته و نفت بی بو، فاز پراکنده را تشکیل می دهند. تمام آزمایش ها بدون انتقال جرم انجام شد. در آزمایش ها از نوع ردیابی استفاده می شود که دارای نیمه عمر و انرژی تابش مناسبی برخوردار باشد. هم چنین باید خواص فیزیکی مشابه با مخلوط داشته باشد، به طور کامل در فاز مورد نظر حل شود و در طول فرایند اختلاط دو فاز در ستون، به فاز دیگر منتقل نشود. ^{99m}Tc ردیاب پرتوزای مناسب است که به صورت ترکیب سدیم پرتکتات استفاده می شود. تکسسیم از دوشیدن ژنراتور $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ به دست می آید که انرژی گامای آن ۱۴۰٫۵ KeV و نیمه عمر آن ۶٫۰۲h است [۱۲، ۱۳].

۳. روش انجام آزمایش

ابتدا پمپ فاز پیوسته، روشن و دبی آن تنظیم و ستون تا نزدیک فصل مشترک دو فاز، از فاز پیوسته ی (آب) پر می شود. سپس با تنظیم فرکانس و دامنه، سیستم ضربه راه اندازی می شود. با روشن کردن پمپ فاز پراکنده، دبی آن تنظیم، و اجازه داده می شود از پایین وارد ستون شود و با عبور از میان فاز پیوسته روی سطح آن جمع و پس از سرریز، در جداکننده ی فاز بالایی ستون خارج شود.

بعد از رسیدن ستون به حالت پایا، حدود ۱۸٫۵ MBq از ^{99m}Tc در ورودی فاز پیوسته تزریق می شود که ردیاب تزریق شده به همراه فاز پیوسته به سمت پایین جریان می یابد. مقدار تزریق ردیاب به گونه ای است که تأثیری در جریان سیال عبوری ندارد. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، دو آشکارساز گایگر-مولر تعبیه شده در دستگاه GR-130 که مجهز به موازی ساز پرتو هستند، در بالا و پایین قسمت فعال ستون قرار دارند و با عبور ردیاب پرتوزا (فاز پیوسته) از مقابل آنها، اطلاعات RTD به صورت شمارش پرتوهای گامای ردیاب در واحد زمان در آشکارسازها ثبت می شود. اطلاعات ثبت شده با استفاده از نرم افزار Specview به کامپیوتر انتقال می یابد. داده های ذخیره شده در دو آشکارساز از نظر زمان مرده، شمارش زمینه، واپاشی پرتوزا و نرمالیزاسیون نسبت به پرتوزایی تصحیح، و سپس پردازش می شوند.



که در آن، $C = \frac{c(t)}{c(0)}$ غلظت بدون بُعد ردیاب، $Z = \frac{x}{L}$ مختصات محوری بدون بُعد، و $\theta = \frac{t}{\tau}$ بدون بُعد، $c(t)$ غلظت ردیاب در زمان t ، و $c(0)$ غلظت اولیه‌ی ردیاب تزریقی است. معادله‌ی (دیفرانسیل) در شرایط مرزی باز^(۶) به صورت معادلات (۶) و (۷) توسط لون اشپیل و اسمیت در سال ۱۹۵۷ استنتاج شده‌اند [۱۴]:

$$E(t) = \frac{u}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{\frac{-(L-ut)^2}{4Dt}} \quad (6)$$

$$E(\theta) = \frac{1}{2} \left(\frac{pe}{\pi\theta} \right)^{\frac{1}{2}} e^{\frac{-pe(\theta-\theta)^2}{4\theta}} \quad (7)$$

هنگامی که یک تزریق آنی در ورودی سیستم انجام شود، غلظت ورودی ردیاب (C_{in}) پس از عبور از درون سیستم، به غلظت خروجی (C_{out}) تبدیل می‌شود. تبدیل منحنی، به وسیله‌ی تابع تبدیل (پاسخ) صورت می‌گیرد که به صورت معادله‌ی (۸) تعریف می‌شود و به انتگرال پیچش^(۷) معروف است:

$$C_{out}(t) = \int_0^t C_{in}(t-t') \cdot E(t') dt' \quad (8)$$

اگر غلظت ورودی C_{in} و تابع پاسخ $E(t)$ مشخص باشند، تابع خروجی با رابطه‌ی (۹) قابل محاسبه است. در این رابطه، t_i و t_j زمان‌های لحظه‌ای مجزا و Δt فاصله‌ی زمانی بین دو اندازه‌گیری متوالی است:

$$C_{out}(t_i) = \Delta t \cdot \sum_{j=1}^{i-1} C_{in}(t_{i-j}) \cdot E(t_j) \quad (9)$$

با جای‌گذاری منحنی غلظت ورودی C_{in} که در تمام آزمایش‌ها مشخص است و معادله‌ی (۷) مربوط به منحنی E در معادله‌ی (۹)، می‌توان منحنی خروجی مدل شده را به دست آورد. منحنی خروجی مدل شده با منحنی خروجی آزمایشگاهی مقایسه می‌شود و اختلاف این دو منحنی با بهینه کردن عدد پکلت و به روش کمینه مجذور مربع‌های خطا، کمینه می‌شود. مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار متلب^(۸) انجام شده است.

در آزمایش‌ها، برای بررسی هر یک از پارامترها، سه پارامتر دیگر ثابت نگه داشته، و فقط پارامتر مورد نظر تغییر داده می‌شود. RTD با تزریق ضربه‌ای ردیاب در ورودی رآکتور در زمان $t=0$ و اندازه‌گیری غلظت ردیاب در جریان خروجی به صورت تابعی از زمان، قابل محاسبه است. تابع توزیع زمان اقامت $E(t)$ طبق رابطه‌ی (۳) تعریف می‌شود:

$$E(t) = \frac{n(t)}{\int n(t) dt} \quad (3)$$

که در آن، $n(t)$ نرخ شمارش و $E(t)$ تابع توزیع نرمال شده است.

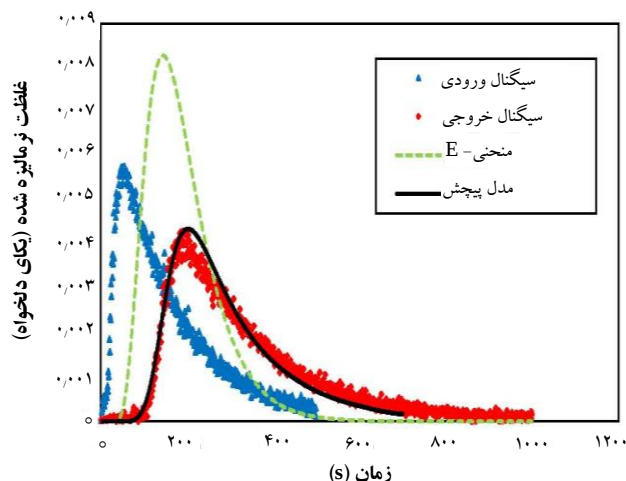
در ستون استخراج واقعی، به علت وجود ورودی ناودانی، و نیز پالس و نوع ستون که دیسک و دونات است، جریان از الگوی غیریکنواخت^(۴) پیروی می‌کند که از جریان لوله‌ای انحراف دارد و باعث ایجاد پراکندگی در جریان می‌شود. پراکندگی فاز پیوسته توسط پارامتر بدون بُعد عدد پکلت^(۵) مشخص می‌شود که با رابطه‌ی (۴) قابل محاسبه است:

$$Pe = \frac{UL}{D} \quad (4)$$

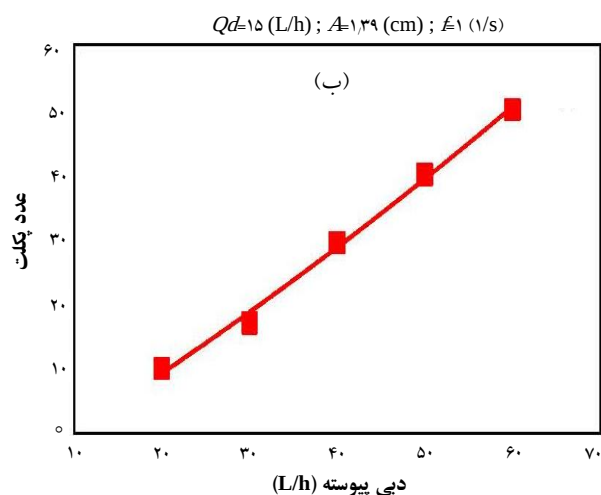
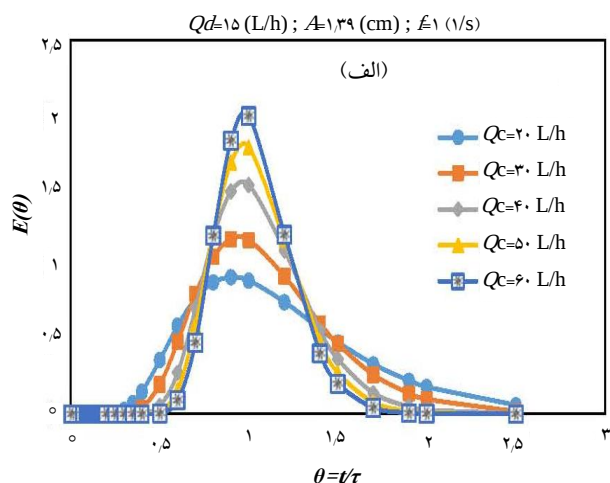
در این جا، L طول ستون، U سرعت فاز و D ضریب پراکندگی محوری بر حسب (m^2/s) است.

وقتی $D \rightarrow 0$ ، پراکندگی کاهش یافته و به مدل پیستونی نزدیک می‌شود و زمانی که $D \rightarrow \infty$ (پراکندگی زیاد و عدد پکلت کم)، به مدل اختلاط کامل تبدیل می‌شود. معادله‌ی دیفرانسیل بدون بُعد مربوط به مدل پراکندگی محوری به صورت معادله‌ی (۵) تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial c}{\partial \theta} = \frac{1}{Pe} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \frac{\partial c}{\partial z} \quad (5)$$



شکل ۴. منحنی نرمال شده‌ی غلظت ورودی C_{in} و خروجی C_{out} ، همراه با منحنی مدل شده‌ی خروجی $C_{out-model}$ و منحنی E برای فاز پیوسته.



شکل ۵. اثر افزایش دبی فاز پیوسته بر (الف) منحنی تابع تبدیل و (ب) عدد پیکل.

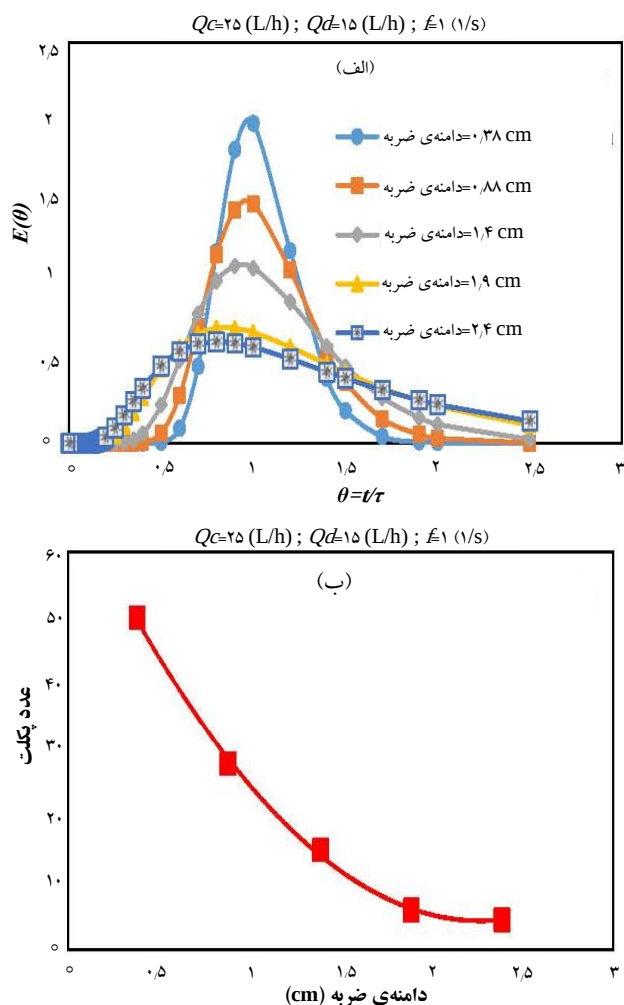
$$RMS = \left[\left\{ \frac{1}{n} \sum |C_{out}(t) - C_{out}(t, model)|^2 \right\}^{1/2} \right] = \text{Minimum} \quad (10)$$

در شکل ۴، منحنی نرمال شده‌ی ورودی و خروجی، همراه با منحنی مدل شده و منحنی E برای فاز پیوسته نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، سازگاری خوبی بین منحنی خروجی آزمایشگاهی با منحنی مدل شده توسط مدل پراکندگی وجود دارد.

۴. نتایج و بحث

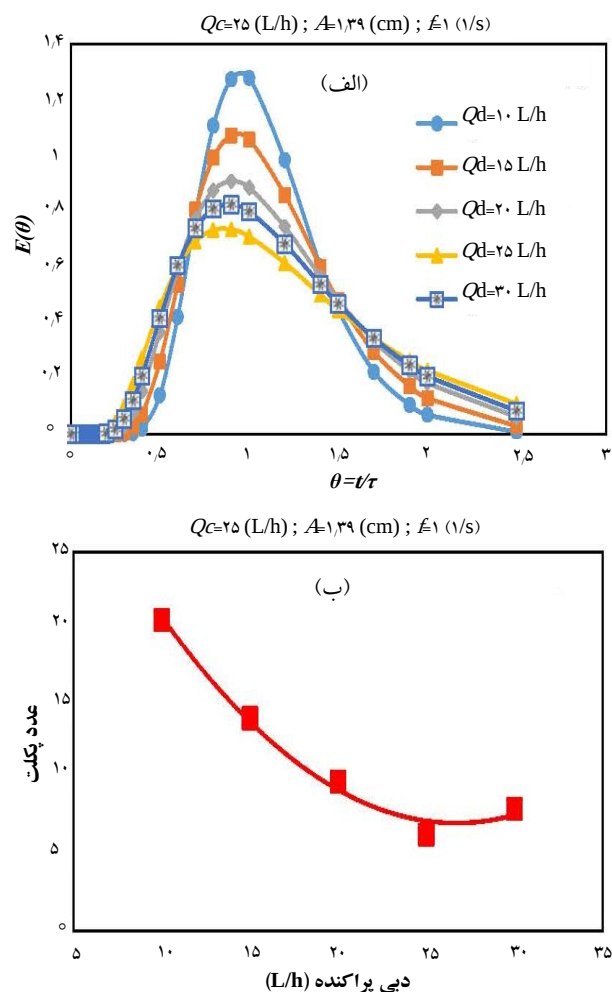
شکل‌های ۵ الف و ب اثر افزایش دبی فاز پیوسته بر پراکندگی محوری و عدد پیکل را در شرایطی که دبی فاز پراکنده، دامنه و بسامد پالس ثابت نگه داشته شده‌اند نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود با افزایش دبی فاز پیوسته، از پهنای منحنی‌های تابع تبدیل $E(\theta)$ کاسته می‌شود، که نشان‌دهنده‌ی کاهش پراکندگی فاز پیوسته است. (شکل ۵-الف). هم‌چنین شکل (۵-ب) نشان می‌دهد با افزایش دبی فاز پیوسته، عدد پیکل افزایش، و به عبارتی ضریب اختلاط محوری کاهش می‌یابد. این به علت آن است که با توجه به ثابت بودن شدت جریان فاز پراکنده، با افزایش دبی فاز پیوسته، نیرویی که توسط فاز پراکنده بر واحد حجم فاز پیوسته وارد می‌شود کاهش، و در نتیجه پراکندگی فاز پیوسته کاهش و عدد پیکل افزایش می‌یابد.

اثر افزایش دبی فاز پراکنده بر پراکندگی محوری فاز پیوسته در شکل‌های ۶-الف و ب نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود با افزایش دبی فاز پراکنده، منحنی‌های تابع تبدیل پهن‌تر شده‌اند و به عبارتی پراکندگی فاز پیوسته افزایش یافته است. علاوه بر این، در شکل ۶-ب مشاهده می‌شود افزایش دبی فاز پراکنده موجب کاهش عدد پیکل شده است. با افزایش شدت جریان فاز پراکنده و ثابت بودن شدت جریان فاز پیوسته، نیرویی که به وسیله‌ی فاز پراکنده بر واحد حجم فاز پیوسته وارد می‌شود افزایش می‌یابد، در نتیجه پراکندگی فاز پیوسته بیش‌تر می‌شود و عدد پیکل کاهش می‌یابد.



شکل ۷. اثر افزایش دایره‌ی ضربه بر (الف) منحنی تابع تبدیل و (ب) عدد پیکل.

اثر افزایش بسامد ضربه بر پراکندگی محوری فاز پیوسته و عدد پیکل در شکل‌های ۸-الف و ب نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود با افزایش بسامد ضربه، منحنی‌های تابع تبدیل پهن‌تر شده‌اند، به عبارتی پراکندگی فاز پیوسته افزایش یافته است (شکل ۸-الف). علاوه بر این، در شکل ۸-ب مشاهده می‌شود افزایش بسامد ضربه موجب کاهش عدد پیکل شده است. این به آن علت است که با افزایش بسامد ضربه، نیرویی که توسط سیستم ضربه به فاز پیوسته وارد می‌شود افزایش می‌یابد، که این عامل باعث می‌شود پراکندگی آن بیش‌تر شود و ضریب پراکندگی افزایش یابد. در نتیجه عدد پیکل کاهش می‌یابد و منحنی‌های تابع تبدیل پهن‌تر می‌شوند.



شکل ۸. اثر افزایش دبی فاز پراکنده بر (الف) منحنی تابع تبدیل و (ب) عدد پیکل.

شکل‌های ۷-الف و ب اثر افزایش دایره‌ی ضربه بر پراکندگی محوری و عدد پیکل در شرایطی که دبی فازهای پیوسته و پراکنده، و بسامد پالس ثابت نگه داشته شده است را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود با افزایش دایره‌ی ضربه، پهنای منحنی‌های تابع تبدیل $E(\theta)$ افزایش می‌یابد، که نشان‌دهنده‌ی افزایش پراکندگی فاز پیوسته است (شکل ۷-الف). هم‌چنین شکل ۷-ب نشان می‌دهد با افزایش دایره‌ی ضربه، عدد پیکل کاهش و به عبارتی ضریب اختلاط محوری افزایش می‌یابد. علت این حالت آن است که با افزایش دایره‌ی ضربه، نیرویی که توسط سیستم ضربه به فاز پیوسته وارد می‌شود افزایش می‌یابد و در نتیجه پراکندگی آن بیش‌تر می‌شود و ضریب پراکندگی افزایش می‌یابد که این کار باعث کاهش عدد پیکل و پهن‌تر شدن منحنی‌های تابع تبدیل شده است.

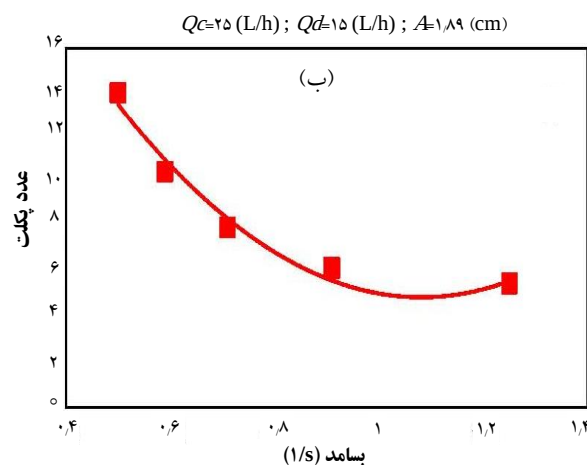
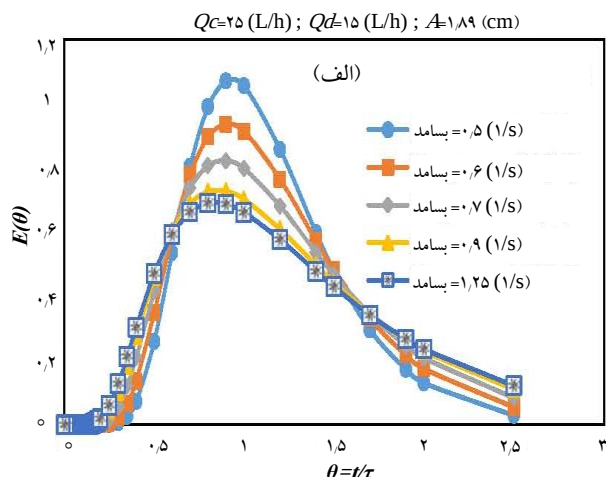


بالا و امکان اندازه گیری پارامترها، بدون نیاز به سایر روش ها استفاده کرد.

۵) به دلیل نیمه عمر کوتاه و انرژی کم تکنسیم و با توجه به مدت زمان کوتاه آزمایش های انجام شده، به علاوه عدم انتقال آن با ترکیب شیمیایی NaTcO_4 از فاز آبی به آلی در این فعالیت، می توان با انجام تصحیح هایی در محاسبات، از پاسخ آشکارساز ناشی از اندازه گیری فعالیت تکنسیم استفاده کرد.

پی نوشت ها

1. Residence Time Distribution
2. Kerosene
3. Rotameter
4. Non Uniform Pattern Flow
5. Peclet Number
6. Open-Open Vessel Boundary Condition
7. Convolution Integral
8. Matlab



شکل ۸. اثر افزایش بسامد بر (الف) منحنی تابع تبدیل و (ب) عدد پکلت.

۵. نتیجه گیری

آنچه از آزمایش ها و محاسبات در این پژوهش به عنوان نتیجه گیری می توان ارائه داد به قرار زیر است:

۱) منحنی مدل شده توافق خوبی با منحنی خروجی آزمایشگاهی دارد، در نتیجه مدل پیشنهادی برای محاسبه ی پراکندگی در ستون های استخراج مناسب است.

۲) در یک روند کلی، با افزایش دبی فاز پیوسته، ضریب پراکندگی فاز پیوسته کاهش می یابد، در حالی که با افزایش دبی فاز پراکنده، دامنه و بسامد ضربه و ضریب پراکندگی فاز پیوسته افزایش می یابند.

۳) مدل پراکندگی، مدل مناسبی برای توصیف هیدرودینامیک فاز پیوسته در ستون استخراج دیسک و دونات است.

۴) علاوه بر نتایج مستقیمی که از فعالیت حاضر گرفته شد و با توجه به بالا بودن خطرات ناشی از پرتودهی در صنایع هسته ای، می توان روش ردیاب پرتوزا را به علت سهولت، حساسیت، دقت



- [1] P.J. Bailes, A. Winward, Progress in Liquid-Liquid Extraction, *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **3** (1972) 240.
- [2] C. Hanson, Solvent Extraction: The Current Position, in Recent Advances in Liquid-Liquid Extraction, C Hanson, Ed., Pergamon Press, Oxford, (1971).
- [3] R.E. Treybal, Liquid Extraction, 2nd ed., McGraw-HillBook Co., Inc., New York, (1963).
- [4] W.J.D. VAN DIJCK, Process and apparatus for intimately contacting fluids, U.S. Patent., US **2011186** (August 1935).
- [5] A.A. Hussain, T.-B. Liang, M.J. Slater, Characteristic velocity of drops in a liquid-liquid extraction pulsed sieve plate column, *Chem. Eng. Res. Des.*, **66 (6)** (1988) 541-554.
- [6] P.V. Danckwerts, Continuous flow systems, distribution of residence times, *Chem. Eng. Sci.* **2 (1)** (1953) 1-13.
- [7] J.C. Godfrey, M.J. Slater, Liquid-Liquid Extraction Equipment, John Wiley & Sons, Chichester, England (1994).
- [8] A. Kumar, S. Hartland, Prediction of Axial Mixing Coefficients in Rotating Disc Extraction Columns, *Can. J. Chem. Eng.* **70** (1992) 77-87.
- [9] J. Breyse, U. Buhlmann, J.C. Godfrey, Axial Mixing Characteristics of industrial and Pilot Scale KUhni Column, *AIChESymp. Ser.*, **80 (238)** (1984) 94-101.
- [10] A. Kumar, S. Hartland, Prediction of Continuous Phase Axial Mixing Coefficients in Pulsed Perforated-Plate Extraction Column, *Ind. Eng. Chem. Res.* **28** (1989) 1507-1513.
- [11] D. Venkata Narasaiah, Y.B.G. Varma, Dispersed phase holdup and mass transfer in liquid pulsed column, *Bioprocess Eng.* **18 (2)** (1998) 119-126.
- [12] International Atomic Energy Agency, Guidebook on radioisotope tracers in industry. *Technical Report Series No. 316*. IAEA, Vienna, Austria. (1990).
- [13] International Atomic Energy Agency. Radiotracer Generators for Industrial Applications. *IAEA Radiation Technology, Series No. 5*. IAEA, Vienna, Austria. (2013).
- [14] O. Levenspiel, W.K. Smith, Notes on the diffusion type model for the longitudinal mixing of fluids in flow, *Chem. Eng. Sci.* **8** (1957) 227-223.