

## تعیین عدد شروود فاز پیوسته در ستون استخراج مایع - مایع از نوع پر شده نامنظم و ارایه یک معادله تجربی

زهره خیرجوی محمدی، حسین ابوالقاسمی\*<sup>+</sup>، محمد اسماعیلی

تهران، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی شیمی

**چکیده:** بررسی پارامترهای انتقال جرم و اثر متغیرهای عملیاتی متفاوت از قبیل جریان های حجمی فاز پراکنده و پیوسته، قطر متوسط ساتر و ماندگی فاز پراکنده روی آنها، در دستگاه‌های استخراج کننده با حلال، به عنوان پارامترهای مهمی در طراحی و انتخاب شرایط بهینه به حساب می‌آیند. یکی از دستگاه‌های مهم استخراج با حلال ستون پر شده است که به دلیل انعطاف پذیری به طور گسترده‌ای در فرایندهای متفاوت مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله، متغیرهای هیدرودینامیکی و انتقال جرمی فاز پیوسته در دو نوع از سیستم‌ها، تولوئن/استیک اسید/آب (با کشش بین سطحی بالا) و نرمال بوتانول/استیک اسید/آب (با کشش بین سطحی پایین)، تحت رفتار قطره در یک ستون پر شده به وسیله‌ی حلقه‌های راشیگ مورد بررسی قرار گرفته است. بنابر نتیجه‌های به دست آمده از آزمایش‌ها مشاهده می‌شود که میزان جریان‌های حجمی فازها، چگونگی پراکندن فازها و نوع سیستم‌های شیمیایی به کار رفته، اثر شدیدی بر میزان انتقال جرم دارد. به طور کلی در این کار پژوهشی، مقادیر تجربی عدد بی بعد شروود برای فاز پیوسته محاسبه شده و همچنین یک معادله‌ی ریاضی برای آن به دست آمده است. نتیجه‌ها نشان داده‌اند که معادله‌ی به دست آمده خطایی کم‌تر از ۸ درصد را برای هر دو سیستم شیمیایی داشته و این نشان از هم‌پوشانی قابل قبول معادله‌ی تجربی و داده‌های تجربی دارد.

**واژه‌های کلیدی:** استخراج مایع - مایع، ضریب انتقال جرم، فاز پیوسته، ستون پر شده.

**KEY WORDS:** Liquid-liquid extraction, Mass transfer coefficients, Continuous phase, Packed column.

### مقدمه

یک محلول مایع در صنعت به کار گرفته می‌شوند. ستون پر شده<sup>(۱)</sup> یکی از این تجهیزات است که در آن بازدهی ستون‌های پاششی می‌تواند با استفاده از به‌کارگیری آکنه‌های<sup>(۲)</sup> مناسب در داخل پوسته‌ی ستون خالی تماس دهنده افزایش یابد تا مخلوط شدن معکوس<sup>(۳)</sup> فاز پیوسته کاهش یابد.

نیاز روز افزون به منظور کاهش مصرف سوخت های فسیلی در سال‌های اخیر باعث شده که مطالعه‌های دقیقی روی استخراج مایع - مایع انجام شود. استخراج با حلال، استفاده‌ی گسترده‌ای در پتروشیمی، داروسازی، هیدرومتالورژی و صنایع مربوط دارد. بدین منظور دستگاه‌های متعددی برای جداسازی اجزای متفاوت

\*عهده دار مکاتبات

+E-mail: hoab@ut.ac.ir

(۱) Packed bed

(۳) Back mixing

(۲) Packing

انجام می‌شود که نتیجه گیری‌های عنوان شده، گاهی به نظر می‌رسد که فقط برای شرایط آن مسأله ویژه قابل اجرا می‌باشد. ضریب انتقال جرم در دستگاه‌های استخراج براساس نحوه تغییرهای غلظت (در طول ستون یا مراحل) به دست می‌آید و مقادیرهای متغیرهای عملیاتی با استفاده از انجام آزمایش‌های مربوط محاسبه می‌شوند. مقدار ضریب‌های کلی انتقال جرم با مقادیرهای به دست آمده از تصحیح‌های انجام شده برای قطره تنها، مقایسه می‌شود [۶].

تصحیحات انجام شده برای قطره تنها، بیشتر با جای‌گذاری سرعت لغزشی به جای سرعت حد و همچنین جای‌گذاری قطر میانگین ساتر به جای قطر تغییر می‌کند، بنابراین، عدد رینولدز چنین تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{d_{\text{TP}} V_{\text{slip}} \rho_c}{\mu_c} \quad (1)$$

که سرعت لغزشی نیز عبارت است از:

$$V_{\text{slip}} = \frac{V_d}{\varepsilon \phi} + \frac{V_c}{\varepsilon(1-\phi)} \quad (2)$$

سیبرت<sup>(۶)</sup> و فیر<sup>(۷)</sup> [۷] معادله‌ی زیر را برای تصحیحات تجربی بر داده‌های ضریب‌های انتقال جرم در فاز پیوسته ارائه داده اند:

$$Sh_c = 0.698 Re^{1/5} Sc_c^{1/4} (1-\phi) \quad (3)$$

در این مقاله نیز به کمک داده‌های تجربی به دست آمده برای فاز پیوسته معادله‌ی شرود، مدل‌سازی ریاضی شده و با مدل دیگران مقایسه شده است.

### دستگاه مورد استفاده

ستون پر شده مورد آزمایش، لوله شیشه‌ای از جنس پیرکس است که فلنج شده و دارای قطر داخلی ۶ و ارتفاع ۱۲۰ سانتی‌متر می‌باشد. روی ستون ۵ عدد نمونه‌گیر به فاصله‌های یکسان برای نمونه‌گیری تعبیه شده است. شکل ۱ شمای دستگاه مورد آزمایش است که سیستم و لوازم مورد استفاده در آن نشان داده شده است.

قسمت‌های یک ستون پر شده عبارت‌اند از: پوسته، آکنه، صفحه‌های نگه‌دارنده، توزیع کننده‌های مایع، نگه‌دارنده میانی و نازل‌های ورودی و خروجی برای دو فاز [۱]. پیشنهاد می‌شود که آکنه‌ها به گونه‌ای انتخاب شوند که به وسیله‌ی فاز پیوسته مرطوب شوند. برای کاهش اثرهای کاناله شدن و توزیع مناسبی از مایعات به‌طور معمول باید برج‌های پر شده بلند باشند. اندازه‌ی آکنه‌ها باید کم‌تر از ۱/۸ قطر ستون باشد تا بتوان از اثرهای دیواره‌ای صرف‌نظر کرد و ستون بتواند به‌صورت چگال از آکنه‌ها پر شود [۲]. همان‌طور که در بالا ذکر شد، اندازه‌گیری ضریب‌های انتقال جرم، به وسیله‌ی آزمایش‌های تک قطره‌ای (قطره‌ی منفرد) یک روش مناسب در حل مشکل مربوط به طراحی واحد و سرمایه‌گذاری اقتصادی می‌باشد. پژوهشگران بسیاری از جمله لادا<sup>(۱)</sup> و اسمیت<sup>(۲)</sup> در سال ۱۹۷۶ میلادی، اسلیتر<sup>(۳)</sup> در سال ۱۹۹۴ میلادی، کومار<sup>(۴)</sup> و هارتلند<sup>(۵)</sup> در سال ۱۹۹۹ میلادی [۳ و ۵] مطالعات گسترده‌ای را تحت بررسی ضریب‌های انتقال جرم در حالت قطره منفرد ارائه کرده‌اند و معادله‌های نظری و تجربی را در ارزیابی ضریب‌های انتقال جرم پیشنهاد می‌کنند. در هر حال بیشتر این معادله‌ها منحصر به شرایط آزمایش آنها بوده و از نظر قابلیت اجرا دارای محدودیت هستند. گذشته از این، آزمایش‌های قطره منفرد را نمی‌توان در مورد قطراتی که به انتقال جرم در ستون‌های کاربردی اثر می‌گذارند مورد توجه قرار داد. آزمایش‌ها در حالت تجمع قطره‌ها، برای از بین بردن محدودیت کاربرد آزمایش‌های قطره منفرد طراحی شده‌اند.

### پارامترهای هیدرودینامیکی و ضریب‌های انتقال جرم

در حال حاضر، به دست آوردن یک مدل عمومی برای انتقال جرم که قادر باشد هم خواص شیمی فیزیکی و هم دینامیکی سیال را منظور کند، در سیستم استخراج امکان ندارد. به علت نامطمئن بودن نتیجه‌های به دست آمده در حین آزمایش‌ها که می‌تواند ناشی از عدم دقت در جداسازی مراحل انتقال جرم، عدم کنترل دما، انتخاب نادرست نیروی محرکه‌ی واقعی و وجود آلوده کننده‌های سطحی باشد، کم و بیش با مشکلاتی در حین مدل کردن مواجه می‌شویم. بیشتر کارهای تجربی، برای سیستم‌ها و قطره‌ها به گونه‌ای

(۱) Laddah

(۲) Smith

(۳) Slater

(۴) Kumar

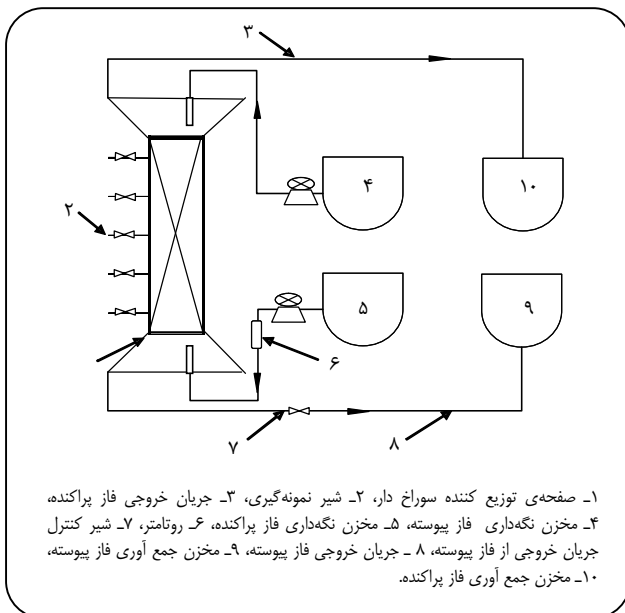
(۵) Hartland

(۶) Seibert

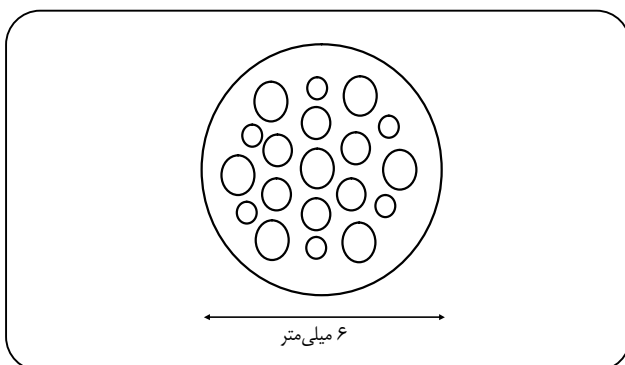
(۷) Fair

جدول ۱- ویژگی‌های ستون پر شده.

ویژگی‌های ستون پر شده‌ی مورد آزمایش	مقدار
طول ستون	۱۲۰ سانتی متر
قطر ستون	۶ سانتی متر
جنس ستون	شیشه ای
تعداد نمونه گیر ها	۵ عدد
فاصله نمونه گیر ها	۲۰ سانتی متر
جنس صفحه توزیع کننده	آلومینیومی



شکل ۱- شمای دستگاه مورد آزمایش.



شکل ۲- صفحه توزیع کننده.

توزیع کننده مورد استفاده از پایین ستون به منظور تولید قطره، از نوع صفحه‌های سوراخ دار از جنس آلومینیم است. نوع توزیع کننده‌ی مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است. در مورد اتصال‌های متفاوت از هیچ نوع ماده نرم‌کننده‌ای استفاده نشده تا در حد ممکن از ایجاد آلودگی ممانعت شود و همچنین قبل از انجام هر آزمایش قسمت‌های متفاوت سیستم، به وسیله‌ی آب و صابون چندین بار شسته شده و به وسیله‌ی آب مقطر آب‌کشی می‌شوند. البته، روتامتر قبل از استفاده در مورد هر سیستم کالیبره شده تا هیچ گونه خطایی به وجود نیاید. در این روش آکنه‌ها به طور اتفاقی و بدون نظم به درون برج ریخته می‌شوند تا پس از سقوط به طور نامنظم روی هم انباشته شوند. برای آکندن برج ابتدا آن را از آب پر می‌کنند و سپس آکنه‌ها را به درون آن می‌ریزند تا با کاهش سرعت سقوط از شکسته شدن آنها ضمن انباشته شدن در برج جلوگیری شود. جدول ۱ جزئیات ستون را نشان می‌دهد.

### سیستم های شیمیایی مورد آزمایش

در این تحقیق دو سیستم شیمیایی متفاوت استفاده شده است:  
 ۱- نرمال بوتانول (فاز قطره) با خلوص ۹۹ درصد - استیک اسید (جزء انتقال یابنده) - آب مقطر دوبار تقطیر شده (فاز پیوسته).  
 ۲- تولوئن (فاز قطره) با خلوص ۹۹ درصد - استیک اسید (جزء انتقال یابنده) - آب مقطر دوبار تقطیر شده (فاز پیوسته).  
 در تمام آزمایش‌ها، دو فاز پراکنده و پیوسته به طور کامل از یکدیگر اشباع شده، تا از هر گونه حلالیت متقابل جلوگیری شود و سپس جزء انتقال یابنده در فاز پراکنده با یک غلظت مشخصی حل شده است. مواد شیمیایی از نوع استاندارد و از شرکت مرک<sup>(۱)</sup> آلمان می‌باشند. در جدول ۲ ویژگی‌های سیستم‌های شیمیایی مورد آزمایش نشان داده شده است.

اندازه‌گیری خواص فیزیکی سیستم‌های مورد آزمایش مانند چگالی، گرانی، کشش بین سطحی و ضریب نفوذ مولکولی [۸] در شرایط اولیه شروع آزمایش، زمانی که دو فاز از یکدیگر به طور کامل اشباع شده و جزء انتقال یابنده با غلظت اولیه به فاز پراکنده اضافه شده است در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام شده است.

### روش انجام آزمایش

روش‌های متعددی برای راه اندازی دستگاه ستون پر شده وجود دارد که انتخاب نوع روش، بستگی به امکانات دستگاه دارد

(۱) Merck

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی سیستم مورد آزمایش [۸].

واحد	نرمال بوتانول - استیک اسید - آب	تولون - استیک اسید - آب	نماد	خواص فیزیکی
(cp)	۰٫۹۹۵۹	۰٫۹۳۰۷	$\mu_c$	گرانروی فاز پیوسته
(cp)	۲٫۲۵۴	۰٫۶۴۳۴	$\mu_d$	گرانروی فاز پراکنده
(g/cm <sup>۳</sup> )	۰٫۸۱۲۷	۰٫۸۵۷۹	$\rho_d$	چگالی فاز پراکنده
(g/cm <sup>۳</sup> )	۰٫۹۷۹۴	۰٫۹۹۵۶	$\rho_c$	چگالی فاز پیوسته
(dyne/cm)	۱٫۲	۲۲	$\sigma$	کشش بین سطحی
(cm <sup>۲</sup> /s)	$۴٫۵۶۱ \times ۱۰^{-۶}$	$۲٫۲۷۱ \times ۱۰^{-۵}$	$D_m$	ضریب نفوذ مولکولی

فاز پراکنده و ضریب انتقال جرم، به ازای دبی ۳۰۰، ۲۰۰، ۱۰۰ و ۴۰۰ میلی‌لیتر در دقیقه (ml/min) از فاز پراکنده و دبی‌های ۶۰، ۷۰ و ۸۰ میلی‌لیتر در دقیقه (ml/min) از فاز پیوسته انجام شده‌اند. برای اندازه‌گیری ماندگی فاز پراکنده، نمونه‌ها جمع‌آوری می‌شوند و با اندازه‌گیری حجم کل و حجم فاز پراکنده ماندگی طبق فرمول زیر محاسبه می‌شود [۹]:

$$\text{ماندگی فاز پراکنده} \quad (۴)$$

$$= \text{حجم کل} / (\text{حجم فاز پیوسته} - \text{حجم کل}) = \text{حجم کل} / \text{حجم فاز پراکنده}$$

سرعت حد قطره به وسیله‌ی کرومومتر از لحظه رها شدن یک قطره تا لحظه رسیدن قطره به نمونه‌گیرها در فاصله‌های معین اندازه‌گیری می‌شود. همچنین برای اندازه‌گیری قطر قطره‌ها داخل ستون با استفاده از یک دوربین دیجیتال با لنز ماکرو، عکس‌های زیادی از سیستم قطره‌ها در طول ستون گرفته شده است. با اندازه‌گیری قطر چندین قطره از این عکس‌ها، قطر ساتر قطره‌ها محاسبه شده است. اندازه‌گیری غلظت به کمک دستگاه کروماتوگرافی گازی (GC) انجام شده است. ضریب تخلخل ستون نیز برابر با ۰٫۷۴ اندازه‌گیری شده است.

### روش محاسبه عدد شرود و ارایه یک معادله برای آن

عدد شرود فاز پیوسته تابع پارامترهای متفاوت از قبیل ماندگی، قطر قطره‌ها، سرعت لغزشی، چگالی، کشش بین سطحی و ضریب نفوذ فازها است [۱۰] برای محاسبه عدد شرود از معادله‌ی زیر استفاده شده است:

$$Sh_c = \frac{k_c d}{D_c} \quad (۵)$$

و اثر آن روی مدت زمان راه اندازی دستگاه و زمان پایدار شدن فازهاست، ولی در نهایت نتیجه کار برای تمام روش‌ها یکسان خواهد بود.

برای انجام آزمایش‌ها، بعد از نصب دستگاه و پر شدن ستون از پرکن‌های حلقه راشیگ، در ابتدا ستون به وسیله‌ی یک پمپ دیافراگمی از فاز پیوسته پر شده و سپس به وسیله‌ی یک پمپ سانتریفوژی فاز قطره از پایین بعد از عبور از روتامتر وارد ستون می‌شود. با استفاده از روتامتر، می‌توان شدت‌های حجمی متفاوتی را برای فاز پراکنده تنظیم کرد. استفاده از شدت‌های حجمی متفاوت، امکان دستیابی به زمان‌های صعود متفاوت و همچنین سرعت‌های متفاوتی را فراهم می‌کند. فاز آلی پس از طی مسافت ستون از بالای ستون خارج می‌شود، همچنین فاز پیوسته از پایین ستون خارج می‌شود. ائتلاف قطره‌ها در فصل مشترک آب و فاز آلی در بالای ستون اثر ناچیزی روی ضریب انتقال جرم دارد. با کنترل کردن مکان سطح فصل مشترک کل ستون پایدار می‌شود، لذا برای حذف این اثرها، مکان فصل مشترک باید در حد امکان کم ارتفاع نگه‌داشته شود. بهترین راه تنظیم کردن، بازیابی فاز آلی به وسیله‌ی پمپ یا سیفون است. اما در مورد آزمایش انجام شده، فاز آلی به راحتی و به صورت اتوماتیک (نیروی جاذبه) به وسیله‌ی تغییرهای حجمی بازیابی می‌شود. برای جلوگیری از این اتفاق، میزان جریان پمپ نیز تنظیم شده است. بنابراین، قطره‌ها در حدود ۲ تا ۳ ثانیه تولید می‌شوند و در طول ستون شروع به حرکت می‌کنند. از طرف دیگر برای اینکه نتیجه‌های به دست آمده دقیق باشند، به سیستم زمان کافی داده می‌شود تا ستون به حالت پایا برسد و بعد از آن شروع به نمونه‌برداری از هر دو فاز در طول ستون می‌شود. سنجش جریان حجمی فازها با روتامتر و جریان حجمی سنج پمپ انجام می‌شود. به طور کلی ۱۲ مجموعه آزمایش به منظور بررسی ماندگی

جدول ۳- متغیر های به دست آمده برای سیستم شیمیایی تولوئن / استیک اسید / آب.

Exp No.	$V_d(\text{ml/min})$	$V_c(\text{ml/min})$	$\phi$	$D_{32}(\text{m})$	$V_{slip}(\text{m/s})$	$U_i(\text{m/s})$	$N_{Re}$	$Sc_c$	$Sh_c$
۱	۳۰۰	۶۰	۰٫۱۰۸۹	۰٫۰۰۴۸	۰٫۰۷۹۶	۰٫۰۴۳۷	۰٫۴۱۶۷	۴۱٫۱۸۱	۶٫۴۱
۲	۱۰۰	۷۰	۰٫۱۲۰۳	۰٫۰۰۲۹	۰٫۰۲۸۲	۰٫۰۳۴۱	۰٫۳۴۰۱	۴۱٫۱۸۱	۵٫۴۵
۳	۲۰۰	۷۰	۰٫۱۳۹۰	۰٫۰۰۲۸	۰٫۰۶۰۵	۰٫۰۳۸۱	۰٫۱۷۸۳	۴۱٫۱۸۱	۳٫۲۴
۴	۳۰۰	۷۰	۰٫۲۱۶۷	۰٫۰۰۳۳	۰٫۰۵۹۳	۰٫۰۴۰۲	۰٫۲۱۲۵	۴۱٫۱۸۱	۵٫۸۳
۵	۳۰۰	۸۰	۰٫۳۷۳۵	۰٫۰۰۴۵	۰٫۰۵۸۷	۰٫۰۲۸۱	۰٫۲۸۹۶	۴۱٫۱۸۱	۱۲٫۰۴
۶	۲۰۰	۸۰	۰٫۳۹۱۳	۰٫۰۰۴۲	۰٫۰۴۵۶	۰٫۰۳۱۴	۰٫۲۰۶۶	۴۱٫۱۸۱	۱۱٫۴۱

جدول ۴- متغیر های به دست آمده برای سیستم شیمیایی نرمال بوتانول / استیک اسید / آب.

Exp No.	$V_d(\text{ml/min})$	$V_c(\text{ml/min})$	$\phi$	$D_{32}(\text{m})$	$V_{slip}(\text{m/s})$	$U_i(\text{m/s})$	$N_{Re}$	$Sc_c$	$Sh_c$
۱	۱۰۰	۷۰	۰٫۰۰۹۷	۰٫۰۰۱۲	۰٫۰۳۶۱	۰٫۰۵۸۰	۰٫۷۹۲۹	۲۲۲٫۹	۱۶٫۸۳
۲	۲۰۰	۷۰	۰٫۰۱۱۶	۰٫۰۰۱۴	۰٫۰۶۷۵	۰٫۰۶۱۴	۰٫۸۸۱۷	۲۲۲٫۹	۱۷٫۹۱
۳	۱۰۰	۶۰	۰٫۰۱۶۵	۰٫۰۰۱۶	۰٫۰۳۲۷	۰٫۰۴۰۵	۰٫۴۷۸۶	۲۲۲٫۹	۱۰٫۲۹
۴	۲۰۰	۶۰	۰٫۰۱۶۵	۰٫۰۰۱۶	۰٫۰۳۳۶	-	۰٫۴۹۶۷	۲۲۲٫۹	۱۰٫۷۸
۵	۱۰۰	۸۰	۰٫۰۱۶۶	۰٫۰۰۱۴	۰٫۰۴۳۴	۰٫۰۷۲۵	۰٫۶۲۰۸	۲۲۲٫۹	۱۳٫۴۸
۶	۲۰۰	۸۰	۰٫۰۱۹۸	۰٫۰۰۱۶	۰٫۰۳۳۸	۰٫۰۵۶۲	۰٫۵۲۵۴	۲۲۲٫۹	۱۱٫۲۸

جدول ۴ برای سیستم شیمیایی نرمال بوتانول / استیک اسید / آب آورده شده است.

از جدول ۳ مشاهده می شود که اثر افزایش ماندگی فاز پراکنده روی عدد شروود فاز پیوسته و در نتیجه روی ضریب انتقال جرم فاز پیوسته بیشتر از اثر قطر قطره است و از جدول ۴ مشاهده می شود که اثر افزایش ماندگی فاز پراکنده و اثر اندازه قطر قطره روی عدد شروود فاز پیوسته و در نتیجه ضریب انتقال جرم به یک اندازه است. به عبارت دیگر، قطر قطره و ماندگی فاز پراکنده ارتباط مستقیم با میزان انتقال جرم دارند.

به طور کلی با توجه به مقدارهای تجربی و جدول های به دست آمده برای دو سیستم شیمیایی، و به کمک نرم افزار Ewiews معادله ی کلی زیر برای تعیین عدد شروود ارائه شده است:

$$Sh_c = k Re^n Sc_c^m (\lambda - \phi)^p \quad (۸)$$

برای تعیین ضریب های  $k$ ،  $n$ ،  $m$  و  $p$  از مقدارهای آزمایشگاهی جدول های ۳ و ۴ استفاده شده و معادله ی تجربی نهایی (۹) ارائه شده است:

ضریب کلی انتقال جرم در فاز پیوسته به وسیله ی موازنه جرم برای هر مرحله و براساس غلظت های ورودی و خروجی این فاز از معادله ی (۶) محاسبه می شود. با این شرط که در این جا فاصله هر نمونه گیر به عنوان یک مرحله در نظر گرفته شده است.

$$K_{Ea} = \frac{E'}{HA\rho_{avg,E}} \int_{y_{Er}}^{y_E} \frac{dy_E}{(y_E - y_E^*)(1 - y_E)^2} \quad (۶)$$

بعد از انتگرال گیری و با استفاده از فرضیه های مناسب معادله ی (۶) را می توان به صورت معادله ی (۷) نوشت:

$$\dot{m}_E (y_{in} - y_{out}) = K_{Ea} \rho_{av} (y^* - y_{out}) V \quad (۷)$$

به طور کلی با استفاده از معادله ی (۷) و منحنی تعادلی مربوط به هر سیستم شیمیایی و همچنین غلظت های اندازه گیری شده، می توان ضریب کلی حجمی انتقال جرم را برای فاز استخراج کننده به دست آورد.

مقدارهای  $\phi$ ،  $D_{32}$ ،  $V_{slip}$  و  $N_{Re}$  برای همه آزمایش ها طبق معادله های ذکر شده در مباحث قبلی محاسبه شده و مقدار آن ها در جدول ۳ برای سیستم شیمیایی تولوئن / استیک اسید / آب و در

جدول ۵ - میزان خطا نسبت به رابطه تجربی ارایه شده و رابطه سیبرت و فیر برای سیستم تولوئن.

Exp No.	Sh <sub>c,exp</sub>	Sh <sub>c,correlation</sub>	Sh <sub>c,Seibert</sub>	for correlation ARE%	%ARE for Seibert
۱	۳,۲۴	۳,۴۸	۱,۱۲	۷,۴	۶۵
۲	۵,۴۵	۵,۸۴	۱,۵۸	۷,۱	۷۱
۳	۵,۸۳	۵,۴۱	۱,۱۲	۷,۲	۸۱
۴	۶,۴۱	۶,۷۴	۱,۷۸	۵,۲	۷۲
۵	۱۱,۴۱	۱۱,۲۵	۰,۸۵	۱,۴	۹۳
۶	۱۲,۰۴	۱۳,۹۷	۱,۰۴	۱,۶	۹۱

جدول ۶ - میزان خطا نسبت به رابطه تجربی ارایه شده و رابطه سیبرت و فیر برای سیستم نرمال بوتانول.

Exp No.	Sh <sub>c,exp</sub>	Sh <sub>c,correlation</sub>	Sh <sub>c,Seibert</sub>	for correlation ARE%	%ARE for Seibert
۱	۱۰,۲۹	۱۱,۱۶	۴,۱۳	۸,۵	۶۰
۲	۱۰,۷۸	۱۱,۵۴	۴,۲۱	۷,۱	۶۱
۳	۱۱,۲۸	۱۲,۲۶	۴,۳۱	۸,۷	۹۲
۴	۱۳,۴۸	۱۴,۱۱	۴,۷	۴,۷	۶۵
۵	۱۶,۸۳	۱۷,۲۲	۵,۳۵	۳/۴	۶۸
۶	۱۷,۹۱	۱۹,۰۵	۵,۶۳	۶,۴	۶۹

به ترتیب مشاهده شده است، مقادیرهای تجربی با مقادیرهای حاصل از معادله‌ی (۳) اختلاف بیشتری در مقایسه با مقادیرهای حاصل از معادله‌ی تجربی دارند. همچنین با توجه به نتیجه‌های به دست آمده از مقایسه میزان خطاها مشاهده می‌شود که داده‌های سیستم شیمیایی نرمال بوتانول / استیک اسید / آب با نتیجه‌های حاصل از معادله‌ی سیبرت و فیر نزدیکی بیشتری دارند. دلیل اختلاف با معادله‌ی سیبرت و فیر بنا بر تفاوت در ارتفاع و قطر ستون آزمایش آنها با قطر ۱۰,۲۴ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۷۰ سانتی‌متر در مقایسه با ستون آزمایش به کار رفته و همچنین تفاوت در ضریب تخلخل، جنس آکنه‌ها و سیستم‌های شیمیایی می‌باشد. برای مقایسه عدد شروود شرایط آزمایش آنها به آزمایش‌های ما نزدیک‌تر بوده است. در ضمن معادله‌ی پیشنهادی توسط سیبرت و فیر بر اساس آنالوژی با معادله‌ی کیزر<sup>(۳)</sup> [۱۲] در انتقال حرارت به دست آمده است و با توجه به این که به کارگیری از آنالوژی احتیاج به شرایط خاصی دارد. بنابراین چنین اختلافی بین معادله‌ی تجربی ارایه شده و معادله‌ی سیبرت و فیر قابل پیش‌بینی بوده و همچنین ممکن است

$$Sh_c = \frac{4,2}{\sqrt{\pi}} Re^{0,9} Sc_c^{1/4} \frac{1}{(1-\phi)^2} \quad (9)$$

میانگین مطلق خطای نسبی (AARE)<sup>(۱)</sup>، برای مقایسه‌ی مقادیرهای پیش‌بینی شده از معادله‌ی تجربی با نتیجه‌های تجربی استفاده می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۱]:

$$AARE = \frac{1}{NDP} \sum_{i=1}^{NDP} \frac{|\text{Predicted value} - \text{Experimental value}|}{\text{Experimental value}} \quad (10)$$

NDP تعداد داده‌های به کار رفته است. مقادیرهای مطلق خطای نسبی (ARE)<sup>(۲)</sup> که از معادله‌ی (۱۱) محاسبه می‌شود، به کمک معادله‌ی (۹) و معادله‌ی (۳) به دست آمده و در جدول‌های ۵ و ۶ آورده شده است.

$$ARE = \frac{|\text{Predicted value} - \text{Experimental value}|}{\text{Experimental value}} \quad (11)$$

با توجه به جدول‌های ۵ و ۶ مربوط به سیستم شیمیایی تولوئن / استیک اسید / آب و سیستم شیمیایی بوتانول / استیک اسید / آب

(۱) Average absolute of the relative error

(۲) Absolute relative error

(۳) Kays

جدول ۷- میزان خطاهای به دست آمده.

% AARE	سیستم شیمیایی تولوئن / استیک اسید / آب
۷,۳۸	% AARE for correlation
۷۸,۸۹	% AARE for Seibert

جدول ۸- میزان خطاهای به دست آمده.

% AARE	سیستم شیمیایی نرمال بوتانول / استیک اسید / آب
۶,۲۶	% AARE for correlation
۶۴,۰۹	% AARE for Seibert

شیمیایی نرمال بوتانول با افزایش ماندگی فاز پراکنده عدد شروود فاز پیوسته، یعنی ضریب انتقال جرم فاز پیوسته کاهش می‌یابد. این تغییرها مربوط به ویژگی‌های فیزیکی - شیمیایی سیستم‌ها است. لازم به ذکر است که تا یک نقطه ویژه با افزایش دبی حجمی فاز پراکنده، ضریب انتقال جرم فاز پیوسته افزایش می‌یابد. چون با افزایش دبی حجمی فاز پراکنده در سیستم تولوئن تعداد قطره‌ها زیاد شده، و چرخش‌های درونی در قطره حاکم بر مکانیسم انتقال جرم است، در نتیجه مقاومت در مقابل انتقال جرم افزایش می‌یابد و باعث کاهش ضریب انتقال جرم فاز پراکنده می‌شود. ولی در سیستم شیمیایی بوتانول نرمال با افزایش دبی فاز پراکنده قطر قطره‌ها بزرگ‌تر می‌شود که نفوذ پذیری قطره افزایش یافته و مکانیسم نفوذ مولکولی حاکم است، ضریب انتقال جرم فاز پراکنده افزایش می‌یابد.

- خطاهای AARE محاسبه شده برای هر دو سیستم شیمیایی با استفاده از معادله‌ی (۱۰) کم‌تر از ۸ درصد می‌شوند و همچنین در مقایسه با رابطه سائیرت و فیر چندان رضایت بخش نیستند. این میزان تفاوت به دلیل تفاوت در شرایط آزمایش، ویژگی‌های ستون آزمایش، نوع سیستم‌های به کار رفته، نوع و جنس آکنه‌ها و شرایط به دست آمدن رابطه سائیرت و فیر است.

- در تمامی سیستم‌ها با افزایش جریان حجمی فاز پراکنده، ماندگی فاز پراکنده زیاد می‌شود و همچنین قطر سائر  $D_{32}$  و پارامتر مهم اثر گذار روی میزان انتقال جرم سطح تماس و میزان نفوذ پذیری قطره است (روند تغییرهای میزان ضریب انتقال جرم در هر دو فاز همانند و تابع یکدیگر است). با توجه به معادله‌ی  $a = 6\phi\varepsilon/D_{32}$ ، در مقدارهای کم ماندگی‌های فاز پراکنده چون صورت کسر از مخرج بیشتر بزرگ می‌شود، لذا  $a$  زیاد و ضریب انتقال جرم هم زیاد می‌شود، ولی در ماندگی‌های بالا میزان افزایش  $\phi$  از  $D_{32}$  کم‌تر است و ضریب انتقال جرم کاهش می‌یابد.

### فهرست علائم

a	مساحت فصل مشترک ( $m^2/m^3$ )
A	مساحت سطح مقطع متناسب با جهت جریان ( $m^2$ )

شرایط آزمایش ما چندان به شرایط استفاده در معادله‌ی سائیرت و فیر نزدیک نباشد. معادله‌ی ارائه شده توسط کیزر به صورت زیر می‌باشد:

$$Nu_c = 0.698 Pr_c^{1/4} Re_c^{1/5} \quad (12)$$

مقدار خطای AARE % عدد شروود حاصل از معادله‌ی تجربی و عدد حاصل از معادله‌ی سائیرت و فیر نیز به دست آمده و برای دو سیستم شیمیایی به صورت جدول‌های ۷ و ۸ ارائه شده است. با توجه به جدول‌های ۷ و ۸ مربوط به سیستم شیمیایی تولوئن / استیک اسید / آب و سیستم شیمیایی بوتانول / استیک اسید / آب به ترتیب، خطاهای محاسبه شده برای هر دو سیستم شیمیایی با استفاده از معادله‌ی (۱۰) کم‌تر از ۸ درصد می‌شوند و همچنین در مقایسه با معادله‌ی (۳) چندان رضایت بخش نیستند.

### نتیجه گیری نهایی

به طور کلی براساس آزمایش‌های انجام شده نتیجه‌های زیر به دست آمده است:

- با افزایش جریان حجمی فاز پراکنده مشاهده می‌شود که ماندگی فاز پراکنده نیز افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که در جریان حجمی پایین از فاز پیوسته تغییرهای زیادی در پارامترهای هیدرو دینامیکی و انتقال جرمی صورت نمی‌گیرد.
- تغییرهای قطر قطره در سیستم شیمیایی نرمال بوتانول چندان شدید نیست و همچنین اثر آن روی ضریب انتقال جرم فاز پیوسته به تقریب از نظر بزرگی همانند اثر ماندگی فاز پراکنده بر ضریب انتقال جرم فاز پیوسته است.
- میزان تغییرهای قطر قطره در سیستم شیمیایی تولوئن بیشتر از سیستم بوتانول نرمال است و در این سیستم شیمیایی اثر تغییرهای قطر قطره روی ضریب انتقال جرم بیشتر از اثر تغییرهای ماندگی فاز پراکنده است.
- با افزایش ماندگی فاز پراکنده در سیستم شیمیایی تولوئن عدد شروود فاز پیوسته افزایش می‌یابد، یعنی با افزایش فاز آلی ضریب انتقال جرم فاز پیوسته افزایش می‌یابد و برعکس در سیستم

$y$	جزء جرمی حل شونده در فاز استخراج کننده	$D_{32}$	قطر متوسط ساتر (m)
$y^*$	جزء جرمی تعادلی حل شونده در فاز استخراج کننده	$H$	ارتفاع ستون (m)
	متناظر با فاز غنی از حل شونده	$K_{EA}$	ضریب کلی انتقال جرم فاز استخراج کننده (۱/s)
$y_{in}$	جزء جرمی ورودی به ستون در فاز استخراج کننده	$m_E$	دبی جرمی فاز استخراج کننده (Kg/s)
$y_{out}$	جزء جرمی خروجی از ستون در فاز استخراج کننده	$Re$	عدد رینولدز $(\rho_c V_{slip} d_{32} / \mu_c)$
$\rho_{av} = \sum w_i \rho_i$	متوسط چگالی در هر فاز (Kg/m <sup>3</sup> )	$Sc_c$	عدد/شمیت فاز پیوسته $(\mu_c / \rho_c D_c)$
$\phi$	هدلآپ فاز پراکنده	$Sh_c$	عدد شروود فاز پیوسته $(k_c d_{32} / D_c)$
$\varepsilon$	ضریب تخلخل	$V_{slip}$	سرعت لغزشی (m/s)
		$V_c$	سرعت جریان حجمی فاز پیوسته (m <sup>3</sup> /s)
		$V_d$	سرعت جریان حجمی فاز پراکنده (m <sup>3</sup> /s)

تاریخ دریافت: ۱۵/۸/۲۹ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۵/۱۲/۱۴

## مراجع

- [1] Stevens, G.W., Packed columns, In: J. C. Godfrey, M. J. Slater. "Liquid-Liquid Extraction Equipment", pp.227-246 (1994).
- [2] Treybal, R. E., "Mass Transfer Operations", McGraw Hill, Liquid Extraction p. 543 (1980).
- [3] Laddha, G.S., Smith, J.M., "Transport Phenomena in Liquid Extraction", Tata McGraw-Hill, New Dehli, (1976).
- [4] Slater, M.J., Rate Coefficients in Liquid-Liquid Extraction Systems, In: J. C. Godfrey, M. J. Slater, "Liquid-Liquid Extraction Equipment", John Wiley and Sons, New York, pp. 45-94 (1994).
- [5] Kumar, A., Hartland, S., Correlations for Prediction of Mass Transfer Coefficients in Single Drop Systems and Liquid-Liquid Extraction Columns, *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **77**, p. 372 (1999).
- [6] Steiner, L., Mass Transfer Rates from Single Drops and Drop Swarms, *Che. Eng. Sci.*, **41**(8), p. 1979 (1986).
- [7] Seibert, A.F., Fair, J.R., Hydrodynamic and Mass Transfer in Spray and Packed Liquid-Liquid Extraction Columns, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **27**, p. 470 (1988).
- [8] Wilke, C.R., Chang, P., Correlation of Diffusion Coefficients in Dilute Solutions, *AIChE J.*, **1**, p. 264 (1955).
- [9] Arsalani, V., Rostemi, Kh., Lipoxygenase-1 Mass Transfer Coefficient in Aqueous Two Phase System Using Spary Extraction Column, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **44**, p. 7469 (2005).
- [10] Yu Jie, Fei Weiyang, Huai Z. Li., Effect of Packing on Drop Swarms Extraction of High Viscosity Solvents, *Hydrometallurgy*, **78**, p. 30 (2005).
- [11] Laraci, F., A Unified Approach to the Hydraulics and Mass Transfer in Randomly Packed Towers, *Che. Eng. Sci.*, **56**, p. 6003 (2001).
- [12] Kays, W. M., "Convective Heat Mass Transfer", McGraw-Hill: New York, (1966).