

## پیش‌بینی ضریب کلی انتقال جرم فاز پیوسته در ستون میکسر - ستلر هنسون

میثم تراب مستعدی<sup>۱\*</sup>، سید جابر صفدری<sup>۱</sup>، سید محمد علی موسویان<sup>۲</sup>، محمد قنادی مراغه<sup>۱</sup>

۱- تهران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای

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

پایان‌نگار: Email: mmostaedi@aeoi.org.ir

### چکیده

در این مقاله ضریب کلی حجمی انتقال جرم در یک ستون استخراج میکسر- ستلر هنسون در مقیاس نیمه صنعتی با استفاده از سیستم‌های تولوئن- استون- آب و بوتیل استات- استون- آب اندازه‌گیری شده است. اثر پارامترهای عملیاتی نظیر سرعت اختلاط، دبی فازهای پراکنده و پیوسته و ورودی کلی مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که اثر آنها بر عملکرد انتقال جرم ستون قابل توجه است. با استفاده از مساحت سطح مشترک، مقادیر ضریب کلی انتقال جرم فاز پیوسته با به کارگیری ضرایب کلی حجمی محاسبه شدند. یک رابطه تجربی بر پایه اعداد شروود و رینولدز برای پیش‌بینی ضریب کلی انتقال جرم فاز پیوسته در این ستون استخراج گردید و مشاهده شد که مقادیر بدست آمده از رابطه پیشنهادی توافق بسیار خوبی با داده‌های تجربی دارد.

**کلمات کلیدی:** ضریب کلی انتقال جرم، میکسر- ستلر (مخلوط‌کن - ته‌نشین‌کن) هنسون، مساحت سطح مشترک، موجودی فاز پراکنده

### ۱- مقدمه

استخراج مایع- مایع یکی از مهمترین فرایندهای جداسازی محسوب می‌شود که در صنایع مختلف، به ویژه در صنایع هسته‌ای و فرایندهای هیدرومتالورژیکی کاربرد دارد [۲ و ۱]. از میان انواع استخراج کننده‌ها، میکسر- ستلرهای چند مرحله‌ای افقی به طور گسترده در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند، زیرا دارای عملیات پایدار و بازدهی مرحله‌ای بالا می‌باشند. البته این استخراج کننده‌ها به علت ترتیب افقی مراحل،

نیازمند یک فضای (مساحت) بالا می‌باشند. بنابراین نوع ستونی این استخراج کننده (میکسر- ستلر عمودی) که مساحت کمتری را اشغال می‌کند و نیازی به پمپاژ فازها بین مراحل ندارد، مطلوب است. با توجه به نحوه قرار گیری میکسر و ستلر و همچنین نحوه پیوند قطرات درون ستلر، انواع مختلفی از ستونهای استخراج میکسر- ستلر نظیر ستون MS [۳]، استخراج کننده Wirz [۴]، ستون MIXET [۵]، تماس دهنده تریبال [۶]، میکسر- ستلر هنسون [۷]، ستون EC [۸] و ستون SHE [۹]

گزارش شده‌اند.

## ۲- بخش تجربی

### ۱-۲ مواد شیمیایی

سیستم مایع- مایع استفاده شده در آزمایشهای انجام شده شامل تولوئن- استون- آب و بوتیل استات - استون- آب بود، که استون در فاز آلی حل شده و غلظت آن در فاز آلی در تمام آزمایشها حدود ۳/۵٪ وزنی در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که سیستمهای مذکور توسط فدراسیون مهندسی شیمی اروپا به عنوان سیستمهای استاندارد برای مطالعات استخراج مایع- مایع پیشنهاد شده‌اند [۱۵]. در کلیه آزمایشها از آب مقطر به عنوان فاز پیوسته استفاده گردید و پیش از انجام هر آزمایش فازهای پراکنده و پیوسته کاملاً از یکدیگر اشیاع گردیدند. با توجه به اینکه در شرایط عملیاتی همراه با انتقال جرم، خواص فیزیکی سیستمها (به ویژه کشش بین سطحی) در طول ستون به علت تغییر غلظت جزء منتقل شونده در فازها تغییر می‌کنند، در این پژوهش، از غلظت میانگین بدست آمده در ابتدا و انتهای ستون برای تعیین خواص فیزیکی استفاده گردید. دامنه تغییرات خواص فیزیکی سیستمهای شیمیایی مورد استفاده در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی سیستمهای استفاده شده

در دمای ۲۰°C [۱۵]

بوتیل استات - استون - آب	تولوئن - استون - آب	خاصیت فیزیکی
۰,۷۴-۰,۷۲	۰,۵۸۷-۰,۵۶۶	$\mu_d \times 10^3 (Pa.s)$
۱,۱۳-۱,۰۷	۱,۱۴-۱,۰۱۷	$\mu_c \times 10^3 (Pa.s)$
۸۸۱,۵-۸۷۹,۴	۸۶۵,۴-۸۶۲,۶	$\rho_d (kg / m^3)$
۹۹۶,۲-۹۹۳,۳	۹۹۹,۱-۹۹۷	$\rho_c (kg / m^3)$
۱۳,۲-۱۲,۱	۳۲,۳-۲۲,۷	$\sigma \times 10^3 (N / m)$

### ۲-۲ شرح دستگاه و روش آزمایش

ستون استخراج میکسر - ستلر مورد استفاده در آزمایشها از نوع هنسون در مقیاس نیمه صنعتی و دارای سطح مقطع مستطیلی و شامل هفت مرحله است. جهت جریان فازها در کل دستگاه ناهمسو و درون هر میکسر همسو است. جنس دستگاه از فولاد ضد زنگ و شیشه پلکسی است، به گونه‌ای که دو ضلع آن از فلز و دو ضلع دیگر از شیشه

یک مرحله مهم در طراحی ستونهای استخراج مایع- مایع مشخص کردن ارتفاع ستون در مورد ستونهای دیفرانسیلی مانند ستونهای پاششی و پر شده یا تعداد مراحل در تماس دهنده‌های مرحله‌ای مانند ستونهای کوهنی و ستونهای میکسر- ستلر است، که با استفاده از ضرایب کلی انتقال جرم صورت می‌گیرد. بنابراین طراحی یک ستون استخراج برای دستیابی به یک جداسازی مشخص، دسترسی به روابط قابل اطمینان برای پیش بینی ضریب کلی انتقال جرم، ضروری به نظر می‌رسد و طراحی دقیق یک ستون استخراج در مقیاس صنعتی بدون دسترسی به داده‌های تجربی برای ضرایب انتقال جرم به ویژه در مقیاس نیمه صنعتی امکانپذیر نیست. پیش‌بینی ضرایب انتقال جرم برای قطرات در ستونهای استخراج، موضوعی همراه با عدم قطعیت بسیار است. در یک ستون استخراج، قطرات ممکن است متحمل پیوند و شکافت و یا حرکت نامنظم و اغتشاشی شوند، که همه این موارد، ناشی از حضور بلبها، پرکنها یا همزنهاست. بنابراین در یک ستون استخراج، قطر قطرات پراکنده و موجودی فاز پراکنده وابسته به وضعیت عمودی ستون [۱۲-۱۰] و تخمین دقیق این پارامترها دشوار است [۱۳]. علاوه بر این، انتقال جرم قطرات در ستونهای استخراج از حضور قطرات دیگر تأثیر می‌پذیرد. تمام این موارد، تخمین ضرایب انتقال جرم در ستونهای استخراج را با مشکل روبه‌رو می‌کند.

ستون میکسر- ستلر هنسون یک ستون استخراج با سطح مقطع مستطیلی است که در آن، مراحل به صورت عمودی بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند، اما آرایش میکسر و ستلر در هر مرحله بصورت افقی است. این ستون برای دستیابی به تماس مؤثر دو فاز و جداسازی مناسب بین مراحل، طراحی شده است [۱۴]. دستیابی به یک طراحی دقیق از این ستون، دسترسی به روابط قابل اطمینان برای پیش‌بینی ضریب کلی انتقال جرم را اجتناب ناپذیر می‌نماید.

در این مقاله، ضریب کلی حجمی انتقال جرم در یک ستون میکسر- ستلر هنسون اندازه‌گیری شده و اثر پارامترهای عملیاتی نظیر سرعت اختلاط و شدت جریان فازهای پیوسته و پراکنده بر آن، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با استفاده از اعداد بدون بعد رینولدز و شروود یک رابطه تجربی برای پیش‌بینی ضریب کلی انتقال جرم فاز پیوسته پیشنهاد شده است.

توجه به شدت جریان فازهای مورد استفاده در آزمایشها، مدت لازم برای رسیدن به حالت یکنواخت، بین ۸۰ تا ۱۰۰ دقیقه بود.

جدول ۲- مشخصات هندسی ستون میکسر - ستلر مورد آزمایش

ابعاد (سانتیمتر)	اجزاء ستون
۱۳×۱۳	ابعاد میکسر (طول × عرض)
۲۶×۱۳	ابعاد ستلر (طول × عرض)
۱۲	ارتفاع مرحله
۱۷۱	ارتفاع ستون
۶٫۵	قطر همزن
۱٫۳	ارتفاع پره

• حجم فعال ستون: Lit ۵۵/۳۶

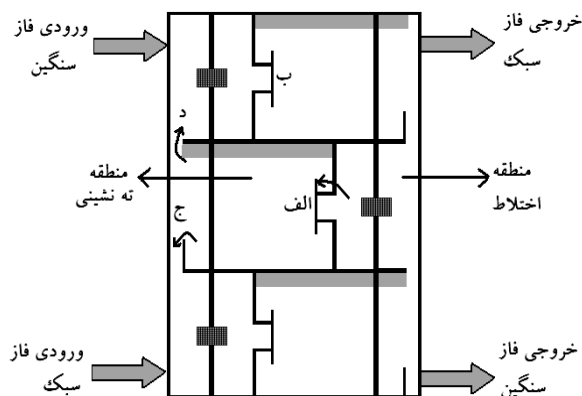
برای اندازه‌گیری قطر قطرات داخل میکسر، پس از برقرار شدن حالت پایدار، با استفاده از یک دوربین دیجیتالی سونی ۸ مگاپیکسلی مدل DSC-F828 با به کارگیری لنز ماکرو، عکسهای متعددی از میکسرهای مراحل مختلف گرفته شد که برای تعیین قطر میانگین ساتر قطره مورد استفاده قرار گرفت. سپس اندازه قطرات نسبت به یکی از اجزای درون میکسر که دارای اندازه مشخص بود سنجیده شد و قطر هر قطره با استفاده از نرم افزار اتوکد مشخص گردید و در نهایت، قطر میانگین ساتر قطرات با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=0}^n n_i d_i^3}{\sum_{i=0}^n n_i d_i^2}$$

یک نمونه از عکسهای گرفته شده از درون میکسر در شکل (۲) ارائه شده است.

موجودی فاز پراکنده در این ستون با استفاده از روش نمونه‌برداری انجام پذیرفت. بدین ترتیب که ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌لیتر از مخلوط دو فاز از درون میکسرها با استفاده از شیرهای نمونه‌گیری وارد استوانه مدرج شد و پس از جدا شدن فازها با تقسیم حجم فاز پراکنده بر حجم کل دو فاز، موجودی فاز پراکنده اندازه‌گیری گردید. غلظت استون در دو فاز نیز با استفاده از یک دستگاه کروماتوگرافی گازی اندازه‌گیری شد.

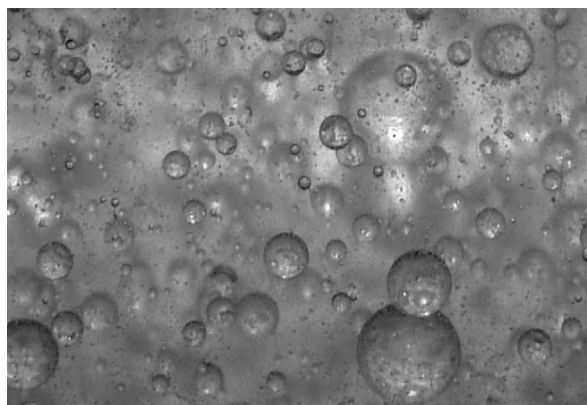
پلکسی می‌باشند. یک طرح اجمالی از سه مرحله این ستون در شکل (۱) ارائه شده است. پراکندگی در میکسر این ستون با استفاده از همزن شش پره توربینی با تیغه‌های عمودی به قطر ۶٫۵ سانتیمتر حاصل می‌گردد. همچنین فصل مشترک دو فاز در این ستون با استفاده از یک سنسور (حسگر) نوری کنترل می‌شود.



شکل ۱- طرح اجمالی سه مرحله ستون همراه با جریان‌های فازهای سبک و سنگین

نحوه عملکرد ستون بدین شکل است که مایعات برای تماس اولیه وارد محفظه اختلاط می‌شوند و سپس امولسیون ناپایدار ایجاد شده از طریق مجرای (الف) وارد منطقه ته نشینی می‌گردد. این مجرا در وسط دیواره جداکننده قرار دارد و برای کاهش اثر چرخش گریز از مرکز در ستلر به منظور بهبود پیوند قطرات، در مقابل آن، یک صفحه عمودی (ب) به شکل مربع دارای عرض کمتر از مجرای عبور جریان قرار گرفته که به وسیله دو صفحه افقی به دیواره پیچ شده است. در ستلر، فازها جدا شده‌اند و فاز سنگین از طریق بند (ج) وارد میکسر مرحله قبلی و فاز سبک از طریق بند (د) وارد میکسر مرحله بعد می‌شود. در جدول (۲) مشخصات هندسی دستگاه به صورت خلاصه آورده شده است.

برای تعیین مدت مورد نیاز به منظور دستیابی به حالت پایدار، نمونه‌هایی از محل خروج فاز پیوسته برداشت شده که غلظت جزء منتقل شونده در آنها مشخص گردید. هنگامیکه تغییری در غلظت جزء منتقل شونده مشاهده نشد، مدت بدست آمده، به عنوان مدت دستیابی به حالت پایدار در نظر گرفته شد. برای این ستون، مشاهده شد که هنگامی که حدود دو برابر حجم فعال ستون فازهای آلی و آبی از ستون خارج گردید، این ستون به حالت پایدار می‌رسد. در نتیجه با



شکل ۲- یک نمونه از عکسهای گرفته شده برای سیستم تولوئن-استون-آب

### ۳- نتایج و بحث

برای اندازه‌گیری ضریب کلی انتقال جرم در این ستون فرض شد که استخراج جزء منتقل شونده تنها درون میکسر صورت می‌پذیرد و غلظت‌های هر دو فاز پیوسته و پراکنده که میکسر را ترک می‌کنند برابر با مقدار آن در داخل میکسر می‌باشد (یعنی اختلاط کامل). بنابراین ضریب کلی حجمی انتقال جرم فاز پیوسته از رابطه زیر قابل محاسبه می‌شود:

$$K_c a (x_{out} - x_{out}^*) V_M = Q_c (x_{in} - x_{out}) \quad (1)$$

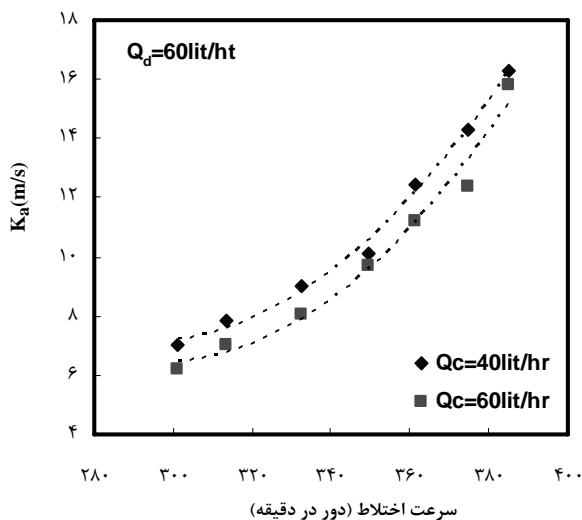
که در رابطه فوق  $x_{in}$  و  $x_{out}$  به ترتیب جزء وزنی جزء منتقل شونده در فاز پیوسته در نقاط ورود و خروج به هر مرحله،  $V_M$  حجم میکسر و  $Q_c$  شدت جریان پیوسته است.  $x_{out}^* (= y_{out} / m)$  غلظت جزء منتقل شونده در فاز آبی در تعادل با فاز آلی است. همچنین لازم بذکر است که فرض اختلاط کامل به معنی یک غلظت یکنواخت از فاز پراکنده نیست بلکه بدین معنی است که غلظت میانگین فاز پراکنده که میکسر را ترک می‌کند برابر با مقادیر آنها در داخل میکسر می‌باشد. قطرات پراکنده با توجه به مدت اقامت در داخل میکسر دارای غلظت‌های مختلف می‌باشند. در چند آزمایش اولیه مقدار ضریب کلی حجمی انتقال جرم در تمام مراحل، اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که این ضریب در مراحل میانی، تقریباً ثابت است و در مراحل ابتدایی و انتهایی ستون به شدت تغییر می‌کند. لذا به منظور کاهش تعداد نمونه‌ها جهت آنالیز و بهم نخوردن حالت یکنواخت ستون (نمونه‌گیری

زیاد از ستون موجب اختلال در عملکرد پایدار ستون می‌گردد)، مقدار میانگین ضریب کلی حجمی انتقال جرم با گرفتن میانگین حسابی بین مقادیر بدست آمده در مراحل اول، چهارم و هفتم بدست آمد.

آزمایشهای انجام شده بر روی ستون میکسر-ستلر هنسون نشان داد که انتقال جرم در این ستون وابستگی زیادی به شدت اختلاط است. شکل (۳) اثر سرعت اختلاط بر ضریب کلی حجمی انتقال جرم ستون را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود در سرعت‌های پائین روتور، اختلاط ناکافی منجر به ایجاد قطرات بزرگ و موجودی اندک فاز پراکنده (پائین بودن مساحت سطح مشترک) و در نتیجه، پائین بودن ضریب کلی حجمی انتقال جرم می‌گردد. با افزایش سرعت اختلاط، ضریب کلی حجمی انتقال جرم به علت افزایش مساحت سطح مشترک، افزایش می‌یابد و به یک مقدار بیشینه می‌رسد. اما پس از رسیدن به این مقدار، ضریب کلی حجمی انتقال جرم با افزایش بیشتر سرعت اختلاط، شروع به کاهش می‌کند. این کاهش می‌تواند به علت ایجاد قطرات کوچک در میکسر، که به صورت قطرات صلب رفتار می‌کنند، باشد. آزمایشهای انجام شده نشان داد که در این ستون استخراج، همانند سایر سیستم‌های مکانیکی هنگامیکه قطر قطرات به کمتر از قطر بحرانی کاهش می‌یابد، به علت از بین رفتن چرخشهای درونی قطره، مکانیسم نفوذ مولکولی بر انتقال جرم حاکم می‌گردد که موجب کاهش قابل توجه انتقال جرم می‌شود. علاوه بر این، در هنگام انجام آزمایشها بر روی این ستون به صورت بصری مشاهده شد که در سرعت‌های اختلاط بالا میزان اختلاط محوری، قابل توجه می‌شود. در سرعت‌های اختلاط بالا قطرات بسیار کوچک تمایل به ماندگی به وسیله فاز پیوسته (اختلاط معکوس فاز پراکنده) دارند که این موضوع موجب کاهش انتقال جرم به علت کاهش گرادیان غلظت در طول ستون می‌گردد. همچنین در سرعت‌های اختلاط بالا مشاهده گردید که چرخش سانتریفیوژی قطرات درون ستلر قابل توجه شده و تعداد زیادی از قطرات پراکنده بدون پیوند با یکدیگر از ستلر عبور می‌کنند که موجب کاهش ضریب انتقال جرم و حداکثر ورودی ستون می‌شوند.

شکل (۴) اثر شدت جریان فاز پراکنده بر ضریب کلی حجمی انتقال جرم را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، افزایش شدت جریان فاز پراکنده موجب افزایش ضریب کلی حجمی انتقال جرم می‌شود. افزایش شدت جریان فاز پراکنده در این ستون

شکل (۵) اثر شدت جریان فاز پیوسته بر ضریب کلی حجمی انتقال جرم را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل نشان داده شده است، با افزایش شدت جریان فاز پیوسته، ضریب کلی حجمی انتقال جرم کاهش می‌یابد. با افزایش شدت جریان فاز پیوسته در این ستون، موجودی فاز پراکنده کاهش و اندازه قطره افزایش می‌یابد که این هر دو پارامتر، موجب کاهش مساحت سطح مشترک و در نتیجه کاهش ضریب کلی حجمی انتقال جرم می‌شوند. مقایسه شکل‌های (۴) و (۵) نشان می‌دهد که اثر شدت جریان فاز پراکنده بر ضریب کلی حجمی انتقال جرم، بیش از اثر شدت جریان فاز پیوسته است.



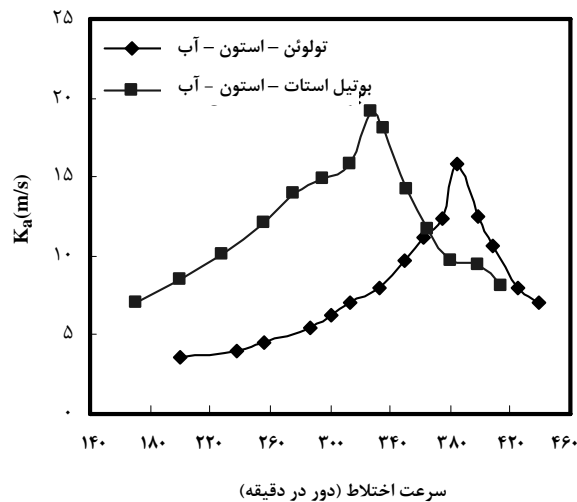
شکل ۵- اثر شدت جریان فاز پیوسته بر ضریب کلی حجمی انتقال جرم (سیستم تولوئن- استون- آب)

از تقسیم کردن ضریب کلی حجمی انتقال جرم بر مساحت سطح مشترک  $(a = 6\phi/d_{pp})$ ، ضریب کلی انتقال جرم تعیین می‌گردد. برای پیش‌بینی ضریب کلی انتقال جرم فاز پیوسته در این ستون استخراج از اعداد بدون بُعد شروود و رینولدز استفاده شد و روابط زیر با استفاده از روش حداقل مربعات پیشنهاد گردید:

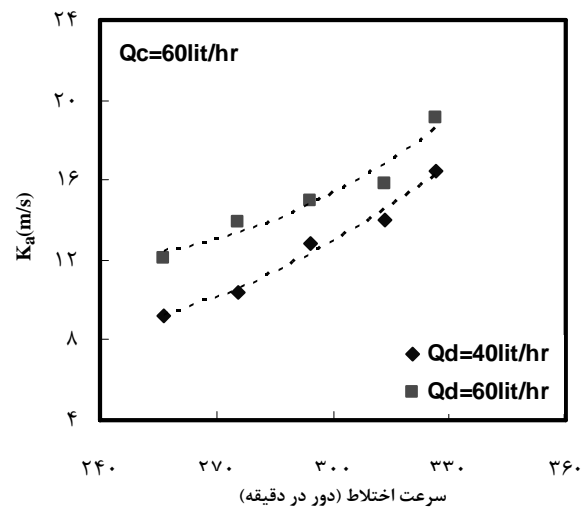
$$Sh_{Oc} = 6,71 + 2,82 Re^{0,74} \quad (2)$$

$$Sh_{Oc} = -3,09 + 1,06 Re^{1,41} \quad (3)$$

موجب افزایش موجودی فاز پراکنده و قطر میانگین ساتر قطره می‌گردد. با محاسبه مساحت سطح مشترک برای هر آزمایش، مشاهده گردید که اثر مثبت افزایش موجودی فاز پراکنده بر مساحت سطح مشترک بیش از اثر منفی افزایش قطر قطره بر آن است. بنابراین مساحت سطح مشترک با افزایش شدت جریان فاز پراکنده افزایش می‌یابد و در نتیجه ضریب کلی حجمی انتقال جرم، زیاد می‌شود.



شکل ۳- اثر سرعت اختلاط بر ضریب کلی حجمی انتقال جرم



شکل ۴- اثر شدت جریان فاز پراکنده بر ضریب کلی حجمی انتقال جرم (سیستم بوتیل استات- استون- آب)

## ۴- نتیجه گیری

با انجام آزمایش‌های متعدد مشاهده شد که انتقال جرم در این ستون به شدت وابسته به سرعت اختلاط است. نتایج نشان دادند که ضریب کلی حجمی انتقال جرم برای هر دو سیستم، با افزایش سرعت اختلاط افزایش می‌یابد و به یک مقدار بیشینه می‌رسد. اما پس از رسیدن به این مقدار، به علت ایجاد قطرات صلب در داخل میکسر و عبور قطرات پراکنده بدون پیوند با یکدیگر از درون ستلر، ضریب کلی حجمی انتقال جرم کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان دادند که ضریب کلی حجمی انتقال جرم با افزایش شدت جریان فاز پراکنده افزایش می‌یابد، در حالیکه با افزایش شدت جریان فاز پیوسته کمتر می‌شود. در نهایت، یک رابطه تجربی برای پیش‌بینی ضریب کلی انتقال جرم فاز پیوسته بر مبنای اعداد بدون بُعد شروود و رینولدز استخراج گردید و مشاهده شد که رابطه مذکور با مقادیر تجربی توافق خوبی دارد.

## مراجع

- [1] Bart, H. J., "Extraction Columns in Hydrometallurgy," Hydrometallurgy 78, 21-29 (2005).
- [2] Ritcey, G. M., "Solvent Extraction in Hydrometallurgy: Present and Future," Tsinghua Science & Technology 11, 137-152 (2006).
- [3] Takahashi, K. and Takeuchi, H., "Dispersed Phase Holdup in a Mixer-Settler Extraction Column," J. Chem. Eng. Japan 23, 12-17 (1990).
- [4] Wirz, W., German Patent 1918225 (1968).
- [5] Horvath, M. and Hartland, S., "Mixer-Settler Extraction Column: Mass Transfer Efficiency and Entrainment," Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. 24, 1220-1225 (1985).
- [6] Treybal, R. E., "A Versatile New Liquid Extractor," Chem. Eng. Progr., 60, 77-82 (1964).
- [7] Schweitzer, P. A., "Hanson Mixer-Settler," Handbook of Separation Techniques for Chemical Engineering, 3rd ed., pp. 461-469, McGraw-Hill: New York, U.S.A. (1997).
- [8] Steiner, L., Von Fisher, E. and Hartland, S., "Performance of a Liquid-Liquid Extraction with Enhanced Coalescence Lattice," AIChE Symp. Ser. 80, 230-238 (1984).
- [9] Scheibel, E. G., "Fractional liquid extraction, Chem. Eng. Progr., 44, 681-690 (1948).
- [10] Sarker, S. and Phillips, C.R., "Characterization of Hydrodynamic Parameters in Rotating Disc and Oldshue-Rushton Columns. Hydrodynamic Modeling, Drop Size, Holdup and Flooding," Can. J. Chem. Eng. 63, 701-709 (1985).

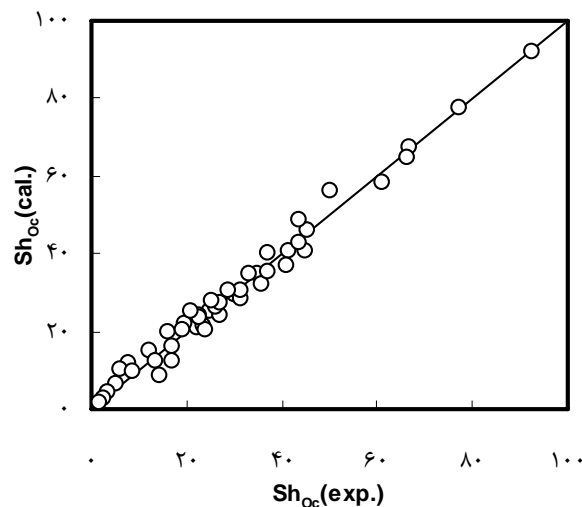
$$Sh_{Oc} = \frac{K_c d_{rr}}{D_c} \quad (4)$$

$$Re = \frac{d_{rr} V_{slip} \rho_c}{\mu_c} \quad (5)$$

که در روابط فوق  $d_{rr}$  قطر میانگین ساتر قطره و  $V_{slip}$  سرعت لغزشی فازها درون میکسر است. با توجه به اینکه در این ستون، فازها به صورت همسو از درون میکسر عبور می‌کنند، سرعت نسبی فازها از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$V_{slip} = \frac{Q_d}{A\phi} - \frac{Q_c}{A(1-\phi)} \quad (6)$$

روابط (۲) و (۳) نتایج آزمایشگاهی را با خطای میانگین ۱۰/۳۵٪ پیش‌بینی می‌کنند. شکل (۶) مقایسه داده‌های تجربی و مقادیر محاسبه شده از روابط (۲) و (۳) را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، روابط پیشنهادی دارای دقت مناسبی برای پیش‌بینی ضریب کلی انتقال جرم فاز پیوسته می‌باشند.



شکل ۶- مقایسه داده‌های تجربی و مقادیر محاسبه شده از روابط (۲) و (۳)

- [11] Nii, S., J. Suzuki, K. Tani and K. Takahashi, "Mass Transfer Coefficients in Mixer-Settler Extraction Column," *J. Chem. Eng. Japan* 30, 1083-1089 (1997).
- [12] Kirou, V. J., L. L. Tavlarides, J. C. Bonnet and Tsouris, C., "Flooding, Holdup and Drop Size Measurements in a Multistage Column Extractor," *AIChE J.* 34, 283-292 (1988).
- [13] Tsouris, C., V.I. Kirou and Tavlarides, L.L. "Drop Size Distribution and Holdup Profiles in a Multistage Extraction Column," *AIChE J.* 40, 407-418 (1994).
- [14] Torab-Mostaedi, M., Safdari, J., Moosavian, M. A. and Ghannadi Maragheh, M., "Stage Efficiency of Hanson Mixer-Settler Extraction Column" *Chem. Eng. Process.* 48, 224-228 (2009)
- [15] Míšek, T., R. Berger and J. Schroter, "Recommended Systems for Liquid Extraction Studies, European Federation of Chemical Engineering, Institution of Chemical Engineers, Rugby (1978).
- [16] Thornton, J. D., "Spray Liquid-Liquid Extraction Columns: Prediction of Limiting Holdup and Flooding Rates," *Chem. Eng. Sci.* 5, 201-208 (1956).