

## موجودی فاز پراکنده در ستون استخراج میکسر-ستلر هنسون

الهه هشت و چهار؛ علی حقیقی اصل\*؛ مینا ناپیدا

دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه سمنان

سیدجابر صفدری؛ میثم تراب مستعدی

پژوهشکده چرخه سوخت هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای

### چکیده

در این مقاله موجودی فاز پراکنده در یک ستون استخراج میکسر-ستلر هنسون هفت مرحله ای در مقیاس نیمه صنعتی برای دو سیستم شیمیایی مختلف اندازه گیری شده است. اثر متغیرهای عملیاتی نظیر دور همزن، سرعت فاز پراکنده و پیوسته بر موجودی فاز پراکنده مورد بررسی قرار گرفت. پروفایل محوری موجودی فاز پراکنده با استفاده از روش نمونه گیری تعیین شد و عدم یکنواختی شدیدی را در طول ستون نشان داد. همچنین نتایج نشان داد که موجودی فاز پراکنده به شدت با جهت انتقال جرم تغییر می کند. در نهایت رابطه ای تجربی برای موجودی فاز پراکنده بر اساس خصوصیات فیزیکی سیستم و متغیرهای عملیاتی ارائه گردید که این رابطه تطابق خوبی را میان داده های تجربی و مقادیر پیش بینی شده موجودی فاز پراکنده نشان داد.

حقوق ناشر محفوظ است.

### مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله :

دریافت ۲۰ مهر ۱۳۸۷

دریافت پس از اصلاحات ۲۷ آبان ۱۳۸۷

پذیرش نهایی ۱۴ آذر ۱۳۸۷

کلمات کلیدی :

موجودی فاز پراکنده

ستون استخراج میکسر-ستلر هنسون

انتقال جرم

\* عهده دار مکاتبات

## ۱- مقدمه

MIXET<sup>4</sup> میکسر و ستلر به طور عمودی روی هم قرار گرفته اند و توسط صفحاتی مشبک جدا شده اند. این ستون دارای بازده مرحله ای بالا است، اما ظرفیت کمی دارد [۳]. ستون هنسون نیز میکسر-ستلری با سطح مقطع مستطیلی است که در هر مرحله میکسر و ستلر به صورت افقی قرار گرفته و مجموعه هر میکسر و ستلر (هر مرحله) به صورت عمودی و یک در میان روی هم چیده شده اند [۹].

موجودی فاز پراکنده<sup>۵</sup> یکی از مهم ترین پارامترهای موجود در ستون های استخراج است که هم بر مشخصات طغیان و هم بر انتقال جرم ستون تأثیر می گذارد. همچنین موجودی فاز پراکنده برای محاسبه مساحت سطح مشترک به ازای واحد حجم، سرعت مطلق فازها و زمان اقامت قطرات استفاده می شود [۱۰]. ورود حلال به درون استخراج کننده موجب ایجاد قطراتی می شود که این قطرات در ستون دستخوش پیوند و شکست مداوم می شوند و به توزیع اندازه قطرات تعادلی منتهی می شود. کسر حجمی ایجاد شده (موجودی فاز پراکنده)، به صورت نسبت حجم اشغال شده توسط فاز پراکنده به حجم فعال ستون تعریف می شود [۱۱]:

$$\phi = \frac{V_d}{V_d + V_c} \quad (1)$$

متداول ترین روش های اندازه گیری موجودی فاز پراکنده در ستون های استخراج روش از کار اندازی دستگاه یا جابجایی فصل مشترک<sup>۶</sup>، روش افت فشار<sup>۷</sup> و روش نمونه گیری از ستون<sup>۸</sup> می باشد. علاوه بر روش های فوق روش های دیگری برای بدست آوردن موجودی فاز پراکنده وجود دارد که کمتر مورد استفاده قرار می گیرند [۱۲]، [۱۳].

مشخصات موجودی فاز پراکنده در اغلب ستون های استخراج مورد بررسی قرار گرفته است و برای پیش بینی آن روابط تجربی بسیاری ارائه شده است [۱۴] - [۱۷]. برخی از این روابط بر اساس سرعت مشخصه برای ارتباط موجودی فاز پراکنده و سرعت لغزشی تعریف شده

ستون های استخراج مایع-مایع به طور گسترده در صنایع شیمیایی، نفتی، سوختی، غذایی و دارویی استفاده می شوند، اما به غیر از چند استثناء (نظیر استفاده از ستون های ضربه ای) میکسر-ستلرها در تمامی فرآیندهای استخراج فلزات و صنایع هسته ای و هیدرومتالورژی [۱]، [۲] به کار می روند، زیرا این استخراج کننده ها دارای عملیات پایدار، ظرفیت و بازده مرحله ای بالا می باشند. البته در میکسر-ستلرهای چند مرحله ای افقی به علت نوع ترتیب مراحل، فضای (مساحت) بزرگی مورد نیاز است و انتقال فازها از مرحله ای به مرحله بعد نیازمند پمپاژ فازها است. بنابراین نوع ستونی این استخراج کننده (میکسر-ستلرهای عمودی) که مساحت کمتری را اشغال می کند و نیازی به پمپاژ فازها ندارد، مطلوب است. به علاوه در ستون های میکسر-ستلر خطرات ناشی از تشعشع در صورت استفاده در صنعت هسته ای به سبب سهولت در حفاظ گذاری، نسبت به میکسر-ستلرهای افقی کمتر است [۳]. بطور کلی میکسر-ستلرها از دو قسمت میکسر و ستلر تشکیل شده اند که میکسر به منظور اختلاط دو فاز و ستلر نیز جهت ائتلاف قطرات و جداسازی فازها به کار می - رود. با توجه به آرایش میکسر و ستلر و چگونگی جدا شدن فازها در ستلر انواع مختلفی از ستون های استخراج میکسر-ستلر پیشنهاد شده اند. ستون میکسر-ستلر شیبیل از دو بخش میکسر و پرکن تشکیل شده است که به صورت یک در میان بر روی هم قرار گرفته اند و پرکن ها به عنوان ائتلاف دهنده قطرات هستند [۴]. ستون Wirz II از میکسری در مرکز ستون و ستلر بزرگتری در اطراف آن، تشکیل شده است [۵]. در ستون MS<sup>1</sup> در میان مراحل از لوله هایی مجزا برای جریان فازها استفاده می شود، بنابراین سرعت نسبی میان دو فاز وجود ندارد و می توان همزمان به بازده و ظرفیت بالا دست یافت [۶]. در ستون SHE<sup>2</sup> استفاده از مخروطی هم مرکز، ائتلاف قطرات فاز پراکنده را بهبود می بخشد [۷]. در ستون EC<sup>3</sup> بین مراحل اختلاط، شبکه ای سه بعدی به کار می رود که توسط فاز پراکنده مرطوب شده و جریان های محوری را کاهش می دهد [۸]. در ستون میکسر-ستلر

<sup>4</sup> Mixer-Settler-Extraction Column

<sup>5</sup> Dispersed Phase Holdup

<sup>6</sup> Shutdown or Displacement Method

<sup>7</sup> Differential Pressure Method

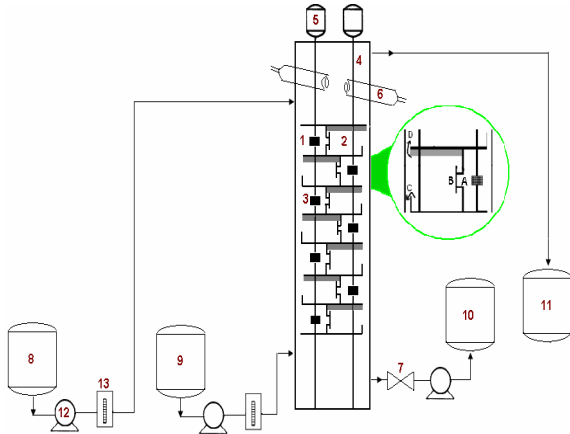
<sup>8</sup> Sampling Method

<sup>1</sup> Mixer-Settler Column

<sup>2</sup> Self-stabilizing High Performance Extractor

<sup>3</sup> Enhanced-Coalescence-Column

ستون هنسون دارای دو محور می باشد که از دو الکتروموتور جهت چرخاندن آنها استفاده می شود. بر روی یک محور چهار همزن و بر روی محور دیگر سه همزن از نوع توربینی شش پره با تیغه های عمودی قرار دارد. نمایی از ستون میکسر-ستلر هنسون در شکل (۱) آورده شده است.



شکل (۱): شماتیکی از ستون میکسر-ستلر هنسون:

- ۱: بخش میکسر، ۲: بخش ستلر، ۳: همزن، ۴: محور،  
 ۵: الکتروموتور، ۶: سنسور نوری، ۷: شیر برقی، ۸: مخزن فاز پیوسته، ۹: مخزن فاز پراکنده، ۱۰: مخزن فاز پیوسته،  
 ۱۱: مخزن فاز پراکنده، ۱۲: پمپ، ۱۳: دبی سنج

با توجه به این شکل در میکسر دو فاز با یکدیگر مخلوط شده و امولسیون ناپایدار تشکیل شده از طریق دریاچه A وارد ستلر می گردد. روبروی این دریاچه صفحه عمودی B به منظور کاهش انتقال اثر چرخش قطرات به داخل ستلر و ائتلاف بهتر قطرات تعبیه شده است. در ستلر دو فاز از یکدیگر جدا شده و فاز سنگین با عبور از بند C به میکسر مرحله قبلی و فاز سبک از طریق دریاچه D به میکسر مرحله بعد وارد می گردد.

مشخصات هندسی میکسر-ستلر هنسون در جدول (۱) آورده شده است:

جدول (۱): مشخصات هندسی ستون هنسون

Column Components	Dimensions
Mixer dimensions (length × width)	0.13×0.13 (m <sup>2</sup> )
Settler dimensions	0.26×0.13(m <sup>2</sup> )
Stage height	0.12 (m)
Column height	1.71 (m)
Number of stages	7
Column active volume	55.36 (Lit)
Agitator diameter	0.065 (m)
Blade height	0.013 (m)

است که این روابط توسط گادفری واسلیتر در سال ۱۹۹۱ گردآوری شده اند [۱۸]. پیش بینی موجودی فاز پراکنده با استفاده از این روابط نیازمند حل معادله پیچیده ای می باشد که حل آن به صورت دستی مشکل است [۱۶]. علاوه بر این روابط صریحی برای پیش بینی موجودی فاز پراکنده بر اساس پارامترهای عملیاتی استخراج کننده و خواص فیزیکی سیستم ها ارائه شده است. این دسته روابط نسبت به گروه قبلی دقت بیشتری داشته و راحت تر مورد استفاده قرار می گیرند. تعداد بسیار زیادی از این روابط برای انواع مختلف ستون های استخراج توسط کومار و هارتلند [۱۹] جمع آوری شده است. به علاوه کومار و هارتلند با استفاده از دامنه وسیعی از داده های تجربی رابطه یکسانی با ضرایب ثابت متفاوت، برای پیش بینی موجودی فاز پراکنده در ستون های ARDC، RDC، Karr، Wirz II، ضربه ای سینی دار، پاششی و پر شده ارائه نموده اند [۱۰]. همچنین Takahashi و همکاران [۲۰] در میکسر-ستلر MS به بررسی توزیع موجودی فاز پراکنده در بخش میکسر پرداختند. تفاوت بزرگی میان موجودی فاز پراکنده بالا و پایین همزن مشاهده کردند و روابطی برای تخمین موجودی فاز پراکنده بالا و پایین میکسر ارائه کردند.

در این مقاله، موجودی فاز پراکنده در ستون میکسر-ستلر هنسون در شرایط با و بدون انتقال جرم اندازه گیری شده و تأثیر دور همزن، سرعت فاز پراکنده و پیوسته بر موجودی فاز پراکنده و پروفایل تغییرات آن در طول ستون مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین یک رابطه تجربی بر اساس خصوصیات فیزیکی سیستم و متغیرهای عملیاتی برای پیش بینی موجودی فاز پراکنده ارائه شده است.

## ۲- بخش تجربی

### ۲-۱- شرح دستگاه

استخراج کننده مورد استفاده در آزمایش ها ستون میکسر-ستلر هنسون با سطح مقطع مستطیلی در مقیاس نیمه صنعتی است. دو ضلع این ستون از فولاد ضد زنگ و دو ضلع دیگر آن از شیشه پلکسی ساخته شده است. مزیت شیشه پلکسی مشاهده داخل ستون و مقاومت آن در برابر خوردگی است. این ستون از هفت مرحله تشکیل شده که در هر مرحله حجم ستلر دو برابر میکسر است.

و تولوئن و بوتانل به عنوان فاز پراکنده استفاده شد، اسید ساکسینیک با ۳ و استن با حدود ۳ و ۵ درصد وزنی جزء منتقل شونده بودند. تمامی حلال های مورد استفاده در آزمایش ها ساخت شرکت ریسل دی هائین (Riedel-deHaën) با درصد خلوص بیش از ۹۹٪ بودند. اسید ساکسینیک مورد استفاده در آزمایش ها ساخت شرکت مرک (Merck) آلمان با درصد خلوص بیش از ۹۹/۵٪ بوده و همچنین از استن با درصد خلوص ۹۹/۹٪ استفاده شد. خصوصیات فیزیکی سیستم های مورد استفاده در جدول (۲) آورده شده است.

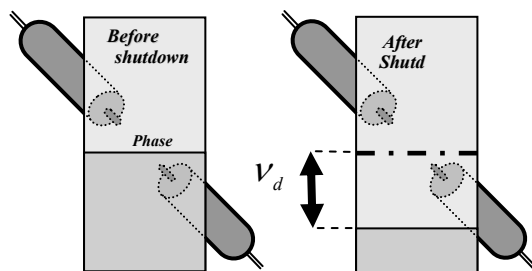
## ۲-۲- سیستم های شیمیایی مورد استفاده در آزمایش

آزمایش ها بر روی دو سیستم تولوئن-استن-آب (کشش بین سطحی بالا) و بوتانل-اسید ساکسینیک-آب (کشش بین سطحی پایین) در دو حالت با و بدون انتقال جرم انجام می شود. جهت انتقال جرم در سیستم تولوئن-استن-آب از فاز پیوسته به پراکنده و در سیستم بوتانل-اسید ساکسینیک-آب از فاز پراکنده به پیوسته است. سیستم های مذکور توسط فدراسیون مهندسی شیمی اروپا پیشنهاد شده است. از آب مقطر به عنوان فاز پیوسته

جدول (۲): خصوصیات فیزیکی سیستم های مایع-مایع [۲۱]

Physical Property	Toluene/Water	Toluene/Acetone/Water	Butanol/Water	Butanol/Succinic Acid/Water
$\mu_d \times 10^3 (Pa.s)$	0.57	0.567-0.587	3.364	3.364-3.569
$\mu_c \times 10^3 (Pa.s)$	0.96	1.017-1.137	1.426	1.436-1.470
$\rho_d (kg / m^3)$	898	862.8-865.4	846.0	847.9-858.4
$\rho_c (kg / m^3)$	996	991.48-997	985.6	986.6-990.8
$\sigma \times 10^3 (N / m)$	36.1	22.75-33	1.75	1.1-1.6

موجودی فاز پراکنده مطابق معادله (۱) از نسبت حجم فاز پراکنده به حجم کل نمونه مایع حاصل می شود. لازم به ذکر است که کلیه آزمایش ها در شرایط دور از طغیان انجام می شود.



شکل (۲): اندازه گیری موجودی فاز پراکنده به روش جابجایی فصل مشترک

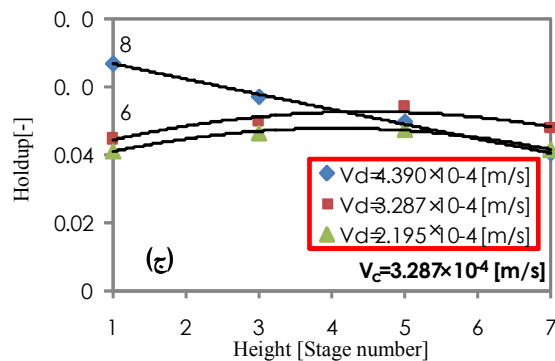
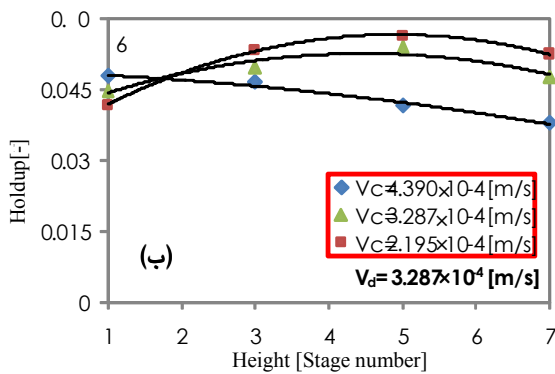
## ۳-۲- روش انجام آزمایش

با استفاده از روش از کار اندازی دستگاه یا جابجایی فصل مشترک موجودی فاز پراکنده اندازه گیری می شود. به این ترتیب که پس از برقراری شرایط پایا در ستون (ثابت ماندن فصل مشترک فاز پیوسته و پراکنده توسط عملکرد صحیح سنسور نوری با شیر برقی) مکان فصل مشترک را مشخص کرده و به طور همزمان شیرهای ورودی و خروجی فازها را بسته و همزن خاموش می شود. بر اثر تجمع قطرات فاز پراکنده در بالای ستون و فشار آن ها بر روی فاز پیوسته، فصل مشترک پایین می آید. هنگامی که مکان فصل مشترک ثابت شد، مطابق شکل (۲) تغییر ارتفاع فصل مشترک را اندازه گیری کرده و از تقسیم آن بر ارتفاع فعال ستون (ارتفاع هفت مرحله میکسر-ستلر) موجودی فاز پراکنده به دست می آید (مطابق معادله (۱)). اما در بررسی موجودی فاز پراکنده در طول ستون از روش نمونه گیری از ستون استفاده می شود. برای این منظور پس از برقراری شرایط پایا از مراحل اول، سوم، پنجم و هفتم به طور همزمان به میزان ۱۰۰ میلی لیتر نمونه گیری می شود.

### ۳- ارائه نتایج و تحلیل یافته‌ها

#### ۳-۱- پروفایل موجودی فاز پراکنده

موجودی فاز پراکنده در طول ستون هنسون (مراحل اول، سوم، پنجم و هفتم) برای شرایط عملیاتی مختلف اندازه گیری شده است. شکل (۳) تغییرات موجودی فاز پراکنده را برای سیستم تولوئن-استن-آب در حالت انتقال جرم از فاز پیوسته به پراکنده نشان می‌دهد. شکل (۳) (الف) اثر دور همزن بر تغییرات موجودی فاز پراکنده را نشان می‌دهد. همان گونه که در این شکل قابل مشاهده است در سرعت های اختلاط پائین، موجودی فاز پراکنده در مراحل بالاتر، بیشتر از مراحل ابتدایی ستون می‌باشد. اما با افزایش سرعت اختلاط مقدار بیشینه موجودی فاز پراکنده به مراحل میانی و سپس مراحل ابتدایی ستون انتقال می‌یابد. این نتیجه بطور مشابه برای افزایش سرعت فازهای پیوسته و پراکنده نیز مشاهده می‌شود. شکل های (۳) (ب) و (ج) نشان می‌دهند که برای سرعت های پائین جریان، پروفایل موجودی فاز پراکنده یک مقدار بیشینه در مراحل بالایی یا میانی ستون را نشان می‌دهد. اما با افزایش مقدار سرعت فازهای پیوسته یا پراکنده، مقدار بیشینه به سمت انتهای ستون انتقال می‌یابد. بنابراین با توجه به نتایج می‌توان بیان نمود که پروفایل موجودی فاز پراکنده در طول ستون دارای یک عدم یکنواختی شدید است و سرعت اختلاط و سرعت فازهای پیوسته و پراکنده دارای یک اثر تقریباً مشابه بر تغییرات موجودی فاز پراکنده می‌باشند. بنابراین با توجه به بیشینه شدن مقدار موجودی فاز پراکنده در پائین ستون می‌توان نتیجه گرفت که طغیان در این ستون برای تمام حالات از پائین ستون (مرحله اول یا دوم) آغاز می‌شود.



شکل (۳): اثر پارامترهای عملیاتی بر تغییرات موجودی فاز پراکنده در طول ستون (سیستم تولوئن-استن-آب، مسیر انتقال جرم  $(c \rightarrow d)$ )

(الف) سرعت اختلاط،  $V_d = V_c = 2/287 \times 10^{-4}$  (ب) سرعت فاز

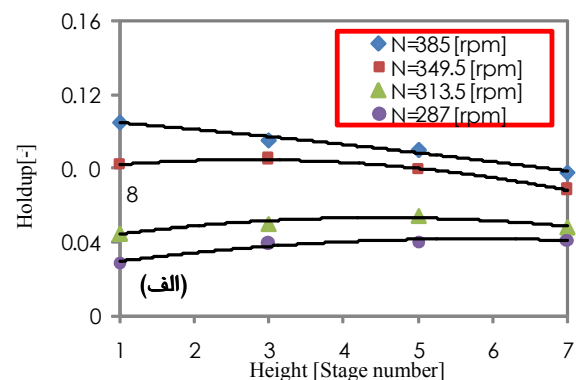
پیوسته،  $N = 212.5 \text{ rpm}$  (ج) سرعت فاز پراکنده،  $N = 212.5 \text{ rpm}$

#### ۳-۲- اثر پارامترهای عملیاتی بر موجودی فاز پراکنده

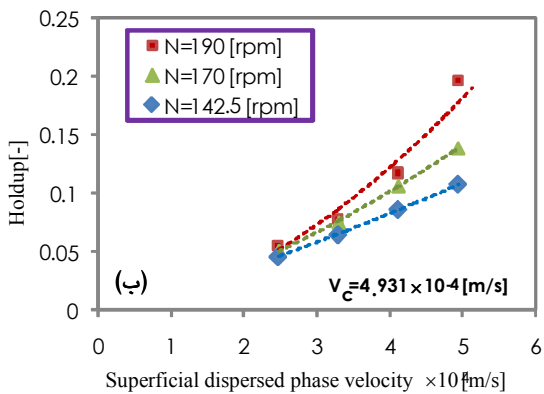
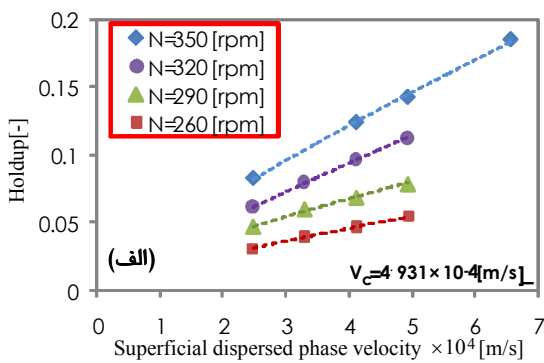
در این بخش اثر متغیرهای عملیاتی نظیر دور همزن، سرعت فاز پراکنده و پیوسته و همچنین انتقال جرم بر موجودی فاز پراکنده در دو سیستم مورد آزمایش، بررسی می‌شود.

##### ۳-۲-۱- اثر دور همزن بر موجودی فاز پراکنده

شکل (۴) اثر شدت اختلاط بر موجودی فاز پراکنده را نشان می‌دهد. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، افزایش دور همزن در سرعت ثابت فاز پراکنده و پیوسته، موجب افزایش موجودی فاز پراکنده می‌شود. با افزایش شدت اختلاط شکست قطرات افزایش یافته و در نتیجه اندازه قطرات کاهش می‌یابد. با کاهش اندازه قطرات، سرعت آن‌ها نسبت به فاز پیوسته کاهش یافته و با افزایش تعداد قطرات درون ستون موجودی فاز پراکنده افزایش می‌یابد. همچنین



شکل (۵) اثر سرعت فاز پراکنده بر موجودی فاز پراکنده را نشان می دهد. مطابق این شکل، افزایش سرعت فاز پراکنده در هر دو سیستم سبب افزایش موجودی فاز پراکنده می شود. در دور ثابت همزن و سرعت ثابت فاز پیوسته، با افزایش سرعت فاز پراکنده، تعداد قطرات افزایش یافته و مطابق تعریف موجودی فاز پراکنده (معادله (۱))، مقدار موجودی فاز پراکنده در ستون افزایش می یابد.



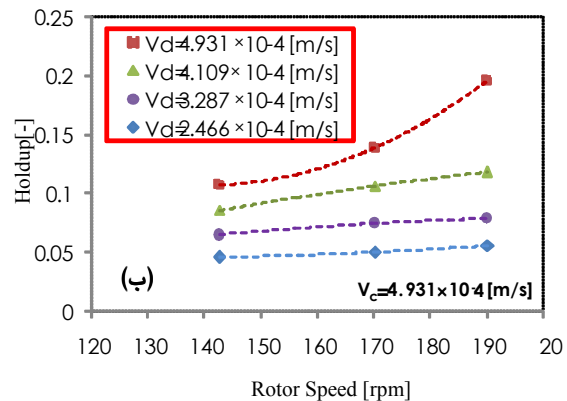
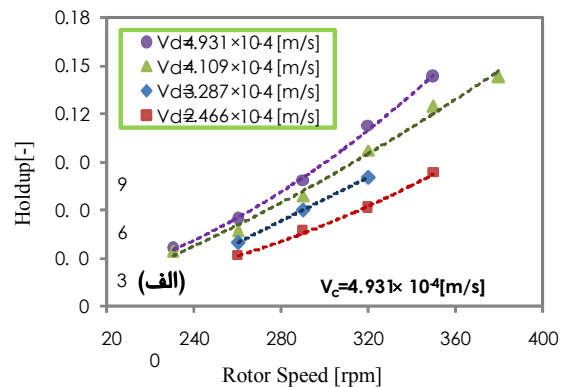
شکل (۵): اثر سرعت فاز پراکنده بر موجودی فاز پراکنده برای سیستم (الف) تولوئن-آب (ب) بوتانل-آب

### ۳-۲-۳- اثر سرعت فاز پیوسته بر موجودی فاز پراکنده

در شکل (۶) اثر سرعت فاز پیوسته بر موجودی فاز پراکنده مشاهده می شود. با افزایش سرعت فاز پیوسته در دور ثابت همزن و سرعت ثابت فاز پراکنده، مقاومتی در برابر حرکت قطرات فاز پراکنده ایجاد می شود و نیروی درگ افزایش می یابد، در نتیجه موجودی فاز پراکنده افزایش می یابد.

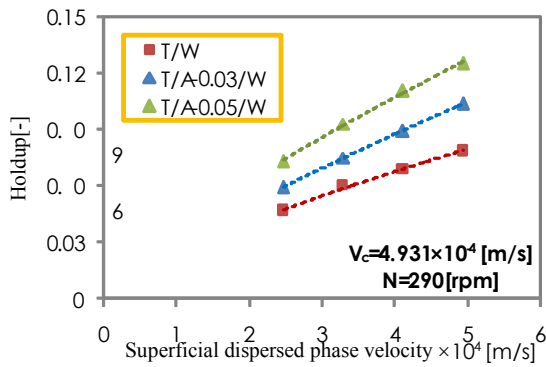
البته مقایسه شکل های (۵) و (۶) نشان می دهد که اثر

مقایسه شکل های (۴) (الف) و (ب) نشان می دهد که با افزایش کشش بین سطحی، موجودی فاز پراکنده کاهش می یابد. با افزایش کشش بین سطحی قطر قطرات افزایش یافته و در نتیجه سرعت نسبی فازها افزایش می یابد که این امر موجب کاهش موجودی فاز پراکنده می شود. به علاوه مقایسه تغییرات موجودی فاز پراکنده با شدت اختلاط برای دو سیستم نشان می دهد که اثر افزایش شدت اختلاط بر موجودی فاز پراکنده در سیستم بوتانل-آب (با کشش بین سطحی پایین) کمتر از سیستم تولوئن-آب (با کشش بین سطحی بالا) است که این موضوع به علت محدود بودن شکست قطرات در سیستم با کشش بین سطحی پایین تر است.



شکل (۴): اثر دور همزن بر موجودی فاز پراکنده برای سیستم (الف) تولوئن-آب (ب) بوتانل-آب

### ۳-۲-۲- اثر سرعت فاز پراکنده بر موجودی فاز پراکنده

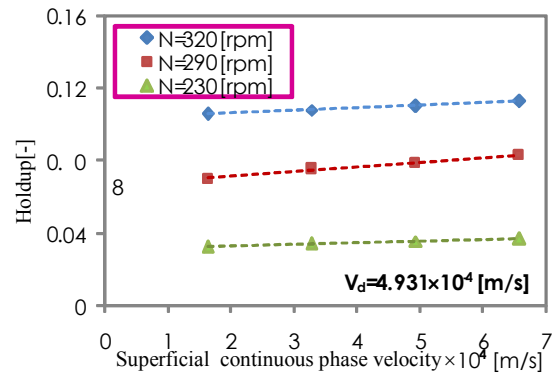


شکل ۷- اثر انتقال جرم بر موجودی فاز پراکنده در سیستم تولوئن-استن-آب (انتقال جرم از فاز پیوسته به پراکنده)

همان طور که در شکل (۸) مشاهده می‌گردد در حالت انتقال جرم از فاز پراکنده به پیوسته نیز با افزایش سرعت فاز پراکنده در دور ثابت همزن و سرعت ثابت فاز پیوسته، موجودی فاز پراکنده افزایش می‌یابد. البته موجودی فاز پراکنده در حالت با انتقال جرم کمتر از حالت بدون انتقال جرم است. بر اثر انتقال جرم از فاز پراکنده به پیوسته، بین دو قطره ناحیه‌ای با غلظت بالا بوجود می‌آید که غلظت آن از غلظت اطراف قطره بیشتر است. در نتیجه کشش بین سطحی بین دو قطره از کشش بین سطحی در اطراف قطره کمتر بوده و همین امر موجب می‌شود که بر اثر پدیده مارانگونی مایع از ناحیه بین قطرات به اطراف جاری شده و بر اثر تخلیه مایع و ایجاد خلأ نسبی، قطرات به هم بپیوندند و ائتلاف قطرات افزایش یابد و در نتیجه با کاهش تجمع قطرات در بخش فعال ستون، موجودی فاز پراکنده کاهش می‌یابد [۲۳]. مقایسه شکل (۷) و (۸) نشان می‌دهد که اثر انتقال جرم بر سیستم تولوئن-استن-آب بیشتر از سیستم بوتانل-اسید ساکسینیک-آب است. در سیستم دوم به علت ایجاد قطرات کوچک تر اثرات مارانگونی محدود می‌شود، در حالی که سیستم تولوئن-استن-آب با کشش بین سطحی بالا، سیستمی مشهور در تأثیر پذیری از اثرات مارانگونی است [۲۳].

یکی از اهداف تحقیق حاضر ارائه یک رابطه تجربی برای پیش بینی موجودی فاز پراکنده است، زیرا پیش بینی موجودی فاز پراکنده اهمیت ویژه‌ای در طراحی ستون میکسر-ستلر هنسون (به ویژه در محاسبه مساحت سطح مشترک) دارد. با توجه به اینکه پارامترهایی از قبیل سرعت اختلاط، سرعت فازها، دانسیته و ویسکوزیته فازها و

سرعت فاز پراکنده بر موجودی فاز پراکنده بیشتر از اثر سرعت فاز پیوسته است.



شکل (۶) اثر سرعت فاز پیوسته بر موجودی فاز پراکنده در سیستم تولوئن-آب

### ۳-۲-۴- اثر مسیر انتقال جرم بر موجودی فاز پراکنده

شکل (۷) اثر انتقال جرم (از فاز پیوسته به پراکنده) بر موجودی فاز پراکنده در سیستم تولوئن-استن-آب را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل روند تغییرات موجودی فاز پراکنده نسبت به سرعت فاز پراکنده در حالت انتقال جرم از فاز پیوسته به پراکنده مشابه حالت بدون انتقال جرم است. همچنین در حالت با انتقال جرم موجودی فاز پراکنده بیشتر از حالت بدون انتقال جرم است. بر اثر انتقال جرم از فاز پیوسته به فاز پراکنده، بین دو قطره ناحیه‌ای با غلظت کم به وجود می‌آید که غلظت این ناحیه از غلظت در اطراف قطره کمتر است. بنابراین مشاهده می‌شود کشش بین سطحی بین دو قطره از کشش بین سطحی در اطراف قطره بیشتر بوده و همین امر موجب می‌شود که بر اثر پدیده مارانگونی، مایع از اطراف به ناحیه بین قطرات جاری شده و در نتیجه قطرات از هم فاصله گرفته و به هم پیوستن آنها کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر موقعی که انتقال جرم از فاز پیوسته به پراکنده است، پدیده مارانگونی با تقویت شکست قطرات باعث کاهش قطر قطرات و در نتیجه افزایش موجودی فاز پراکنده می‌شود [۲۲].

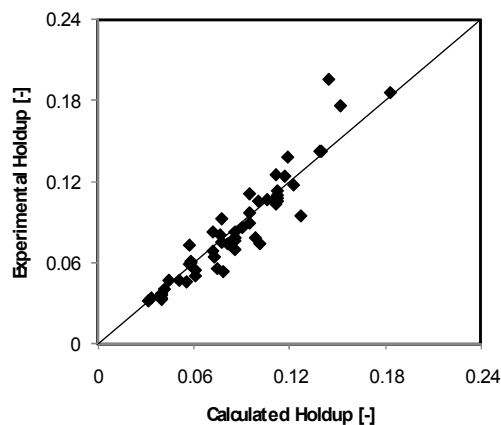
برای اولین بار پیشنهاد شد:

$$\phi = \left[ 42.59 + 1136.5 \exp\left(\frac{-0.28g}{N^2 D}\right) \right] \left(\frac{\mu_d}{\mu_c}\right)^{0.59} \times \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_c}\right)^{0.95} \left(\frac{V_d \rho_c^{0.25}}{g^{0.25} \sigma^{0.25}}\right)^{0.95} \quad (2)$$

که در آن:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (3)$$

این معادله بر اساس ۵۳ داده تجربی در شرایط با و بدون انتقال جرم بدست آمده است و قادر به پیش بینی موجودی فاز پراکنده با خطای میانگین ۱۱/۲۸ درصد است. شکل (۹) مقایسه داده‌های تجربی و مقادیر محاسبه شده موجودی فاز پراکنده از معادله (۲) را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود رابطه پیشنهاد شده با داده‌های تجربی تطابق خوبی دارد. همچنین داده‌های تجربی و مقادیر محاسبه شده موجودی فاز پراکنده از مدل در پیوست (۱) آورده شده است.

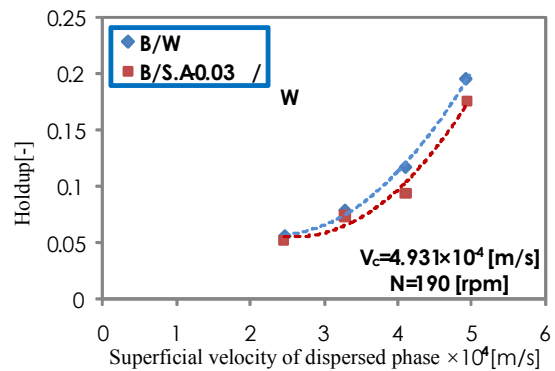


شکل (۹): مقایسه موجودی فاز پراکنده محاسبه شده از مدل با داده‌های تجربی

### ۴- نتیجه گیری

آزمایش‌های انجام شده در ستون میکسر-ستلر هنسون برای سیستم تولوئن-استن-آب نشان داد که سرعت اختلاط و سرعت فازهای پیوسته و پراکنده دارای یک اثر تقریباً مشابه بر تغییرات موجودی فاز پراکنده در طول ستون می‌باشند، به گونه‌ای که بیشینه موجودی فاز پراکنده با افزایش متغیرهای عملیاتی به سمت پایین ستون رفته و بنابراین قابل پیش بینی است که در این ستون طغیان از مراحل ابتدایی

همچنین کشش بین سطحی فازها بر روی موجودی فاز پراکنده اثر بسزایی دارند می‌توان فرض کرد که موجودی فاز پراکنده تابعی از متغیرهایی نظیر  $N$ ،  $V_d$ ،  $V_c$ ،  $\rho_c$ ،  $\sigma$ ،  $\mu_d$ ،  $\mu_c$ ،  $\Delta\rho$  است و رابطه‌ای بر اساس گروه‌های بی بعد ارائه نمود.



شکل (۸): اثر انتقال جرم بر موجودی فاز پراکنده در سیستم بوتانل-اسید ساکسینیک-آب (انتقال جرم از فاز پراکنده به پیوسته)

در این پژوهش برای ارائه چنین رابطه‌ای از روشی مناسب و متداول با نام حداقل مربعات (Ordinary Least Square) OLS استفاده شده است. این روش بر اساس حداقل کردن مجموع مجذورهای باقی مانده (تفاوت بین مدل و مقدار واقعی) است. برای استفاده از این روش از نرم افزار Eviews3 استفاده شده است. از پارامترهای مهمی که در روش OLS برای ارائه رابطه‌ای مناسب وجود دارد،  $R^2$  (R-Squared) و  $R^2_{adj}$  (Adjusted R-Squared) هستند.  $R^2$  اغلب معیار مناسبی برای مقایسه اعتبار نتایج الگوهای رگرسیونی که متغیرهای مستقل مختلفی دارند، است. این پارامتر بین ۰ و ۱ قرار دارد و هرچه به ۱ نزدیک تر باشد رابطه دقیق تری ارائه می‌شود. همچنین  $R^2_{adj}$  به جای انحراف‌ها، از واریانس‌ها در محاسبه میزان انطباق مدل و داده‌های آزمایشگاهی استفاده می‌کند. لازم به ذکر است که هر چه مقادیر  $R^2$  و  $R^2_{adj}$  به هم نزدیک تر باشند می‌توان به درستی رابطه ارائه شده اطمینان بیشتری داشت. در نهایت پس از بررسی‌های فراوان، بهترین و کامل ترین رابطه ( $R^2 = 0.89$  و  $R^2_{adj} = 0.88$ ) برای پیش بینی موجودی فاز پراکنده در ستون میکسر-ستلر هنسون



[3] M. Horvath, S. Hartland, "Mixer-Settler- Extraction Column: Mass Transfer Efficiency and Entrainment", *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 24 (1985) 1220.

[4] S.M. Yih, U.M. Wu, R.K. Pan, Y.F. Wu, T.F. Chen, "Holdup Measurement in a Scheibel Extraction Column", *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 5 (1987) 353.

[5] L.M. Rincon Rubio, S. Hartland, "Characterization of Flooding in a Wirz Extraction Column", *Can. J. Chem. Eng.* 71 (1993) 844.

[6] K. Takahashi, S. Nii, "Behavior of Multistage Mixer-Settler Extraction Column", *Memoirs of School of Eng.*, 51 (1999) 1.

[7] W. Gaubinger, G. Husung, R. Marr, "Operating Behavior of the Self-Stabilizing High Performance SHE", *Ger. Chem. Eng.* 6 (1983) 74

[8] L. Steiner, S. Hartland, "A New Type of Agitated Liquid-Liquid Extraction Column with Enhanced Coalescence Plate", *Separation Science and Technology*, 15 (1980) 907.

[9] P.A. Schweitzer, "Hanson Mixer- Settler", *Handbook of Separation Techniques for Chemical Engineering*, 3rd ed., McGraw Hill, New York, (1997) 461.

[10] A. Kumar, S. Hartland, "A Unified Correlation for the Prediction of Dispersed-Phase Holdup in Liquid-Liquid Extraction Columns", *Indrstral Engineering Chemical Research*, 34 (1995) 3925.

[11] R.E. Treybal, "Liquid Extraction", McGraw Hill Pub. Co., New York (1963).

[12] J. Chen, R. Fu, S. Xu, Q. Wu, C. Song, "Measurement of Interface Level, Holdup, Pulsation Frequency, and Amplitude in a Pulsed Column by Air Purge", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 41 (2002) 1868.

[13] M.M.M. Ribeiro, C. Concolves, P.F. Regueiras, M.M.L. Guimaraes, J.J.C. Cruze Pinto, "Measurements of Toluene-Water Dispersions Hold-up Using a Non-Invasive Ultrasonic Technique", *Chem. Eng. J.* 118 (2006) 47

[14] A. Kumar, S. Hartland, "Prediction of Drop Size, Dispersed Phase Holdup, Slip Velocity, and Limiting Throughputs in Packed Extraction Columns", *Trans IChemE*, 72 (1994) 89.

[15] L.M. Prvcic, H. R. Pratt, W. Geoffrey, "Dispersed Phase Holdup in Pulsed Perforated Plate Columns", *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 8 (1990) 695.

[16] A. Kumar, S. Hartland, "Prediction of Dispersed Phase Hold-up in Rotating Disc Extractors", *Chemical Engineering Communications*, 56 (1987) 87

[17] A. Kumar, S. Hartland, "Independent Prediction of Slip Velocity and Holdup in Liquid-Liquid Extraction

شروع می شود. همچنین بررسی های انجام گرفته بر روی سیستم های مورد آزمایش نشان داد که موجودی فاز پراکنده با افزایش شدت اختلاط، سرعت فاز پراکنده و پیوسته افزایش می یابد. نتایج نشان داد که مسیر انتقال جرم دارای یک اثر قابل توجه بر موجودی فاز پراکنده بوده و موجودی فاز پراکنده برای انتقال جرم از فاز پیوسته به پراکنده افزایش می یابد در حالی که مسیر مقابل دارای یک اثر معکوس است. در نهایت یک معادله تجربی برای پیش بینی موجودی فاز پراکنده پیشنهاد گردید و تطابق خوبی میان داده های تجربی و مقادیر محاسبه شده موجودی فاز پراکنده مشاهده شد. این رابطه می تواند موجب کاهش آزمایش های تجربی برای طراحی و افزایش مقیاس این ستون گردد.

## ضمائم

$A$	سطح مقطع ستون (متر مربع)
$D$	قطر همزن (متر)
$N$	دور همزن (دور بر دقیقه)
$Q$	دبی فاز (لیتر بر ساعت)
$V$	سرعت ظاهری فاز (متر بر ثانیه)
<b>علائم یونانی</b>	
$\mu$	ویسکوزیته (پاسکال.ثانیه)
$\rho$	دانسیته (کیلو گرم بر متر مکعب)
$\Delta\rho$	اختلاف دانسیته بین فاز پراکنده و پیوسته (کیلو گرم بر متر مکعب)
$\phi$	موجودی فاز پراکنده (-)
$\nu$	حجم (مترمکعب)
$\sigma$	کشش بین سطحی فازها (نیوتن بر متر)
<b>زیر نویس ها</b>	
$c$	فاز پیوسته
$d$	فاز پراکنده

## مراجع

[1] G.M. Ritcey, "Solvent Extraction in Hydrometallurgy, Present and Future", *Tsinghua Science Technology* 11 (2006) 37.

[2] A.M.I. Ali, I.M. Ahmad, J.A.Daoud, "CYANEX 272 for The Extraction and Recovery of Zinc from Aqueous Waste Solution Using a Mixer-Settler Unit", *Separation and Purification Technology*, 47(2006) 135.

- [21] T. Misek, R. Berger, J. Schroter, "Recommended Systems for Liquid Extraction Studies", European Federation of Chemical Engineering, Institution of Chemical Engineers, Rugby (1978).
- [22] C. Gourdon, G. Casamatta, "Influence of Mass Transfer Direction on the Operation of a Pulsed Sieve-Plate Pilot Column", Chem. Eng. Sci. 46 (1991) 2799.
- [23] M. Wegener, J. Grünig, J. Stüber, A.R. Paschedag, M. Kraune, "Transient Velocity and Mass Transfer of a Single Drop with Interfacial Instabilities-Experimental Investigations", Chem. Eng. Sci. 62 (2007) 2967.
- Columns", Can. J. Chem. Eng. 67 (1989) 17.
- [18] J.C. Godfrey, M.J. Slater, "Slip Velocity Relationships for Liquid-Liquid Extraction Columns", Trans IChemE, 69, Part A (1991) 130.
- [19] A. Kumar, S. Hartland, "Prediction of Dispersed Phase Hold-up in Rotating Disc Extractors", Chem. Eng. Comm, 56 (1987) 87.
- [20] K. Takahashi, H. Takeuchi, "Holdup of Dispersed Phase in a Mixer-Settler Extraction Column", J. Chem. Eng. Japan, 23 (1990) 12.

## Dispersed Phase Holdup in Hanson Mixer-Settler Extraction Column

**E. Hashtochahar, A. Haghighi Asl, M. Napeida**

*Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Semnan University*

**S. J. Safdari, M. Torab-Mostaedi**

*Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute.*

---

### ARTICLE INFO

*Article history :*

Received 11 October 2008

Received in revised form 17 November 2008

Accepted 4 December 2008

*Keywords:*

Dispersed phase holdup

Hanson mixer-settler extraction column

Mass transfer

---

### ABSTRACT

In the present work, dispersed phase holdups have been measured in a Hanson mixer-settler extraction pilot plant with seven stages for two different liquid-liquid systems. The effects of agitation speed, dispersed and continuous phase flow rates have been investigated under a variety of operating conditions. Dispersed phase axial holdup profiles, determined by a sampling method, showed a strong nonuniformity. The results also showed that the dispersed phase holdup changes largely with the direction of mass transfer. Finally, an empirical correlation in terms of physical properties of liquid systems and operating variables was proposed to predict the holdup and good agreement between experimental data and calculated values of holdup was obtained.

All rights reserved.