

# مطالعه تجربی اندازه قطره در ستون استخراج کوهنی

احمد رضا شیروانی فیل آبادی<sup>۱</sup>، احد قائمی<sup>۱\*</sup> و میثم تراب مستعدی<sup>۲</sup>

۱- گروه طراحی فرآیند، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

۲- پژوهشکده چرخه سوخت، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۳/۳/۳ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۰/۳

## چکیده

در این تحقیق میانگین اندازه قطره در ستون استخراج کوهنی نیمه صنعتی به صورت تجربی و تئوری مورد مطالعه قرار گرفت. در انجام آزمایش‌های تجربی اندازه قطره از دو سیستم شیمیایی استاندارد تولوئن-آب (کشش سطحی بالا) و نرمال بوتیل استات-آب (کشش سطحی متوسط) استفاده گردید. آزمایشات تجربی در شرایط مختلف عملیاتی شامل سرعت روتور، دبی فازهای گسسته و پیوسته انجام شده است. اندازه قطرات در دور همزن‌های ۹۰ تا ۲۴۰ rpm و در دبی‌های ۱۸ تا ۴۲ lit/hr از فازهای پراکنده و پیوسته اندازه‌گیری شده است. برای اندازه‌گیری میانگین اندازه قطره از روش عکس‌برداری و پردازش تصویر استفاده شده است. نتایج نشان داد که متوسط اندازه قطرات با افزایش دور همزن کاهش یافت. همچنین نتایج نشان داد که شدت جریان فازهای پراکنده و پیوسته باعث افزایش اندازه میانگین قطر قطره شده است. مقایسه اثر پارامترها نشان داد که اثر شدت جریان فازهای پراکنده و پیوسته بر میانگین اندازه قطره به مراتب ضعیف‌تر از اثر دور همزن موتور بر میانگین اندازه قطره می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** اندازه قطره، استخراج مایع-مایع، ستون استخراج کوهنی، تولوئن-آب، بوتیل استات-آب، استخراج کوهنی

## مقدمه

با اضافه کردن یک جز اضافی امتزاج ناپذیر یا با امتزاج‌پذیری جزیی می‌باشد. این فرآیند اغلب در یک تماس‌دهنده با جریان ناهمسو انجام می‌شود. جریان‌های از دو فاز مایع امتزاج‌ناپذیر به صورت ناهمسو که یکی در دیگری پراکنده می‌شود. در هر استخراج کننده‌ای تلاش بر این است که یک سطح تماس بزرگ‌تر ایجاد شود. این کار معمولاً به وسیله همزن‌های مکانیکی و برای بهتر پراکنده شدن فازها انجام می‌شود [۱].

استخراج با حلال یکی از پر کاربردترین عملیات‌های واحد در صنایع شیمیایی بوده که در صنایع مختلف از جمله در بازیافت زباله‌های فرآیندهای هسته‌ای و فرآیندهای هیدرومتالورژیکی و بازیابی چرخه سوخت به کار می‌رود. این عملیات شامل جداسازی یک یا چند جز حل شونده از یک فاز مایع مخلوط

نیز پیشنهاد شده است. تابع توزیع احتمال حجمی می‌تواند به وسیلهٔ یک تابع توزیع نرمال نمایش داده شود. چن و میدلمن<sup>۱</sup> یک تابع توزیع نرمال شده است که برای توزیع اندازهٔ قطره در یک پراکندگی زایلن/آب که به وسیلهٔ توربین‌های راشتون مخلوط می‌شوند، به صورت زیر نمایش دادند [۵]:

$$f_v \left( \frac{d}{d_{33}} \right) = \frac{1}{0.23 \sqrt{\pi}} \exp \left( -\frac{1}{2} \left( \frac{d}{d_{33}} - 1.06 \right)^2 \right) \quad (1)$$

که در آن  $d$  قطر قطره و  $d_{32}$  قطر متوسط ساتر می‌باشد. بران و پیت<sup>۲</sup> معادلهٔ زیر را برای توزیع اندازهٔ قطره در یک پراکندگی کروزن/آب که به وسیلهٔ توربین‌های راشتون مخلوط می‌شوند را به صورت زیر ارائه نمودند [۶]:

$$f_v \left( \frac{d}{d_{33}} \right) = \frac{1}{0.20 \sqrt{\pi}} \exp \left( -\frac{1}{2} \left( \frac{d}{d_{33}} - 1.07 \right)^2 \right) \quad (2)$$

در غیاب اختلاط یا در سطوح پایین اختلاط، شکست قطرات به وسیلهٔ نسبت نیروهای شناوری و کشش بین سطحی کنترل می‌شود. یک مقدار محدود اندازهٔ قطرات تحت چنین شرایطی ممکن است از رابطهٔ زیر پیش‌بینی شود:

$$d_{33} = C_1 (\gamma / \Delta \rho g)^{1/2} \quad (3)$$

که ثابت  $C_1$  یک تابع از هندسهٔ ستون و انتقال جرم بوده، که در برخی موارد ممکن است به سیستم مایع-مایع انتخاب شده نیز بستگی داشته باشد. به عنوان مثال چانگ-کاکوتی و همکاران<sup>۳</sup> مقدار  $C_1 = 1/0.3$  را برای  $n$ -بوتیل الکل پراکنده در آب در یک ستون دیسک چرخان گزارش نمودند [۷]، در حالی که لاگسدیل و اسلیتر<sup>۴</sup> مقدار  $0.92$  را برای ستون‌های صفحهٔ سوراخ‌دار ضربه‌ای گزارش نمودند [۸]. کالابرس و همکاران رابطهٔ غیر صریح زیر را برای تانک‌های بهم خورده پیشنهاد نمودند [۹]:

$$d_{33} = C_2 \varepsilon^{-0.4} \left( \frac{\gamma}{\rho_c} \right)^{0.6} + C_3 \left( \frac{\rho_c}{\rho_d} \right)^{1/2} \frac{\mu_d \varepsilon^{1/3} D_R^{1/3}}{\gamma} \quad (4)$$

در طراحی ستون‌های استخراجی علاوه بر بازده جداسازی پارامترهای هیدرودینامیکی مانند هلدآپ، سرعت طغیان و اندازهٔ قطره از پارامترهای کلیدی به منظور تعیین ظرفیت ستون و قطر لازم برای تأمین توان عملیاتی در ناحیه عملیاتی می‌باشد. توزیع تعادلی اندازهٔ قطره در ستون‌های استخراجی که معمولاً به صورت متوسط نسبت حجم به سطح نشان داده می‌شود به عنوان میانگین قطر ساتر قطره شناخته می‌شود. میانگین قطر ساتر قطره به علت تأثیر آن بر توان عملیاتی و سطح ویژه در دسترس برای انتقال جرم و همچنین تأثیر آن بر ضریب انتقال جرم و موجودی فاز پراکنده در شرایط طغیان برج یک پارامتر کلیدی در طراحی ستون‌های استخراج می‌باشد. به منظور توسعه مناسب یک الگوریتم طراحی برای انواع ستون‌های استخراج آگاهی از میانگین اندازهٔ قطره مانند سایر متغیرهای عملیاتی، هندسی ستون و خواص فیزیکی فاز مایع دارای اهمیت بسزایی می‌باشد [۴-۲].

در کاربردهای تخصصی پیش‌بینی مساحت سطح مشترک یک پراکندگی مهم می‌باشد و همچنین به علت اینکه سرعت قطرات درون ستون‌های استخراج و ته نشین شدن و پیوند همگی به اندازهٔ قطره بستگی دارد. علاوه بر این اندازهٔ میانگین قطره نمی‌تواند خصوصیات یک پراکندگی را به خوبی مشخص نماید، زیرا قطر میانگین یکسان می‌تواند برای پراکندگی‌ها با توزیع اندازهٔ قطرات متفاوت به دست آید. بنابراین برای توصیف یک پراکندگی، هم اندازهٔ میانگین قطره و هم توزیع اندازهٔ قطره مورد نیاز می‌باشد. کارهای زیادی برای مشخص نمودن توزیع اندازهٔ قطرات پراکندگی‌های مختلف انجام شده است و چندین تابع نیز پیشنهاد شده است. دو نوع اصلی از توزیع اندازهٔ قطرات که در مقالات پیشنهاد شده توزیع نرمال و غیر-نرمال می‌باشد. همچنین به علت بهبود روش‌های اندازه‌گیری اندازهٔ قطره و پوشش شرایط عملیاتی گسترده‌تر سیستم‌های پراکندگی، توزیع‌های دیگری

1. Chen and Middleman  
2. Brown and Pitt  
3. Chang Kakoti et al.  
4. Logsdail and Slater

غلام سامانی و همکاران دو رابطه برای پیش‌بینی میانگین اندازه قطره در ستون استخراج ضربه‌ای پر شده پیشنهاد کردند. یکی بدون نظر گرفتن ارتفاع ستون (رابطه ۱۰) و دیگری در نظر گرفتن ارتفاع ستون (رابطه ۱۱) می‌باشند [۱۵]:

$$d_{33} = 8.26 \cdot 10^{-5} \left( \frac{(af)^{\xi} \rho_c}{\sigma g} \right)^{-0.33\xi} \left( \frac{\mu_c^{\xi} g}{\epsilon \rho \sigma^{\xi}} \right)^{-0.51\xi} \left( 1 + \frac{Q_c}{Q_d} \right)^{0.33} \quad (10)$$

$$d_{33} = 7.1 \cdot 10^{-5} \left( \frac{(af)^{\xi} \rho_c}{\sigma g} \right)^{-0.33\xi} \left( \frac{\mu_c^{\xi} g}{\epsilon \rho \sigma^{\xi}} \right)^{-0.47\xi} \left( \frac{h}{H} \right)^{-0.16\xi} \quad (11)$$

تراب مستعدی و همکاران روابط زیر را برای پیش‌بینی میانگین اندازه قطره در ستون استخراج ضربه‌ای پر شده پیشنهاد کردند [۱۶]:

$$d_{33} = C_1 \left( \frac{\sigma}{\Delta \rho g} \right)^{0.5} \left( \frac{\sigma}{Af \eta_c} \right)^{C_2} \left( 1 + \frac{V_d}{V_c} \right)^{C_3} \quad (12)$$

تراب مستعدی و همکاران روابط زیر را برای پیش‌بینی میانگین اندازه قطره در ستون استخراج میکسر ستلر هنسون پیشنهاد کردند [۱۷]:

$$d_{32} = 0.23(1 + 2.24\Phi) W_c^{-0.66} \left( \frac{\eta_d}{\eta_c} \right)^{-1.14} \quad (13)$$

$$d_{32} = 0.197(1 + 3.04\Phi) W_c^{-0.66} \left( \frac{\eta_d}{\eta_c} \right)^{-1.23}$$

### شرح دستگاه و انجام آزمایشات

ستون استخراج کوهنی مورد استفاده در این تحقیق یک تماس‌دهنده در مقیاس نیمه صنعتی می‌باشد. قسمت فعال این ستون از شیشه ساخته شده که داخل ستون قابل مشاهده بوده و در برابر خوردگی مقاوم می‌باشد. قسمت فعال این ستون از ده مرحله تشکیل شده است. ستون کوهنی دارای یک محور بوده که از یک الکتروموتور جهت چرخاندن آن استفاده می‌شود. نمایی از ستون استخراج کوهنی در شکل (۱) نشان شده است. مشخصات هندسی ستون کوهنی استفاده شده در این تحقیق در جدول (۱) آورده شده است.

بر پایهٔ مباحث ارائه شده توسط هینز [۱۰] و کالابرس و همکاران [۹] معادلهٔ فوق را به صورت ساده‌تر ارائه نمودند:

$$d_{33} = C_4 \epsilon^{-0.4} \left( \frac{\gamma}{\rho_c} \right)^{0.6} \left( \frac{\rho_c}{\rho_d} \right)^{0.1} \frac{\mu_d \epsilon^{\xi} D_R^{\xi} m_{33}^{\xi}}{\gamma} \quad (5)$$

کومار و هارتلند<sup>۳</sup> نشان دادند که اثر موجودی فاز پراکنده بر اندازهٔ قطره در ستون‌های اختلاط ناچیز می‌باشد. تنها در ستون‌های Wirz-II که در آن هر مرحله به صورت یک میکسر-ستلر عمل می‌نماید، اندازهٔ قطره به موجودی فاز گسسته بستگی دارد. اگر اثر موجودی فاز گسسته برای این نوع ستون نیز ناچیز در نظر گرفته شود، یک رابطهٔ ساده برای یک دامنهٔ وسیع از سرعت‌های اختلاط قابل قبول به دست می‌آید [۱۱]:

$$d_{33} = C_5 e^n \cdot \left\{ \frac{1}{\Psi_1 \left( \frac{\gamma}{\Delta \rho g} \right)^{0.5}} + \frac{1}{\Psi_2 \left( \frac{\gamma}{\rho_c} \right)^{0.6}} \right\}^{-\frac{1}{\xi}} \quad (6)$$

رینکن-روبیو و همکاران<sup>۴</sup> نشان دادند که اندازهٔ قطره در ستون‌های Wirz-II، به موجودی فاز گسسته بستگی دارد. بنابراین رابطهٔ زیر برای این ستون با اضافه نمودن موجودی فاز پراکنده ارائه شده است [۱۲]:

$$d_{33} = (1 + 1.78\phi) \cdot \left\{ \frac{1}{\Psi_1 \left( \frac{\gamma}{\Delta \rho g} \right)^{0.5}} + \frac{1}{\Psi_2 \left( \frac{\gamma}{\rho_c} \right)^{0.6}} \right\}^{-\frac{1}{\xi}} \quad (7)$$

که این رابطه با داده‌های آزمایشگاهی ۱۴/۹٪ خطا دارد. عثمانه و همکاران<sup>۵</sup> روابط زیر را برای پیش‌بینی میانگین اندازه قطره در ستون استخراج ضربه‌ای پیشنهاد کردند [۱۳]:

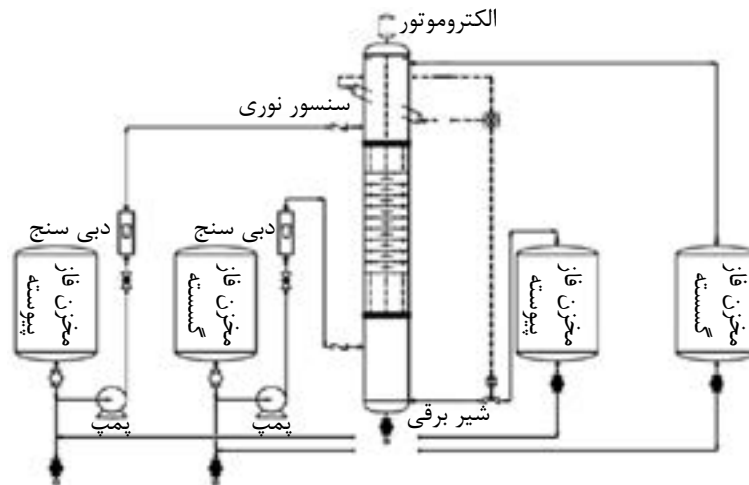
$$d_{33} = -0.33 + 4.275 \exp\left(\frac{-Af}{0.042}\right) \quad (8)$$

$$d_{33} = -0.69 + 4.849 \exp\left(\frac{-Af}{0.028}\right)$$

تراب مستعدی و همکاران روابط زیر را برای پیش‌بینی میانگین اندازه قطره در ستون استخراج دیسک و دونات ضربه‌ای پیشنهاد کردند [۱۴]:

$$\frac{d_{33}}{\sqrt{\frac{\sigma}{\Delta \rho g}}} = 33.52 \cdot 10^{-3} \left( \frac{Af^{\xi} \rho_c}{g \sigma} \right)^{-0.78\xi} \left( \frac{d_a \rho_c \sigma}{\mu_c^{\xi}} \right)^{0.29} \left( \frac{\rho_c \sigma^{\xi}}{\Psi \mu_c} \right)^{-0.13} \times \left( \frac{\Delta \rho}{\rho_c} \right)^{0.26} \left( \frac{\mu_d}{\mu_c} \right)^{0.15} \left( \frac{h_c}{d_a} \right)^{-0.72} (1 + R)^{0.32} \quad (9)$$

1. Hinze  
2. Calabrese et al.  
3. Kumar and Hartland  
4. Rincon-Rubio et al  
5. Osmane et al



شکل ۱ شماتیکی از ستون استخراج کوهنی.

نبوده و در نتیجه بر اندازه‌گیری اثر نگذاشت. در شکل (۲) تشکیل قطرات به همراه نمایی از ستون نشان داده شده است. برای قطرات بیضوی هر دو محور بزرگ و کوچک اندازه‌گیری شده و قطر معادل به صورت زیر محاسبه گردید.

$$d_e = (d_1^2 d_2)^{1/3} \quad (14)$$

که در آن  $d_1$ ، محور کوچک و  $d_2$ ، محور بزرگ می‌باشند. بعد از محاسبه اندازه قطره در نقاط مختلف (در وسط و بالای بخش فعال ستون) قطر میانگین ساتر قطره در شرایط آزمایشگاهی از رابطه زیر محاسبه شد.

$$d_{\text{م}} = \frac{\sum_1^n n_i d_i^3}{\sum_1^n n_i d_i^2} \quad (15)$$

#### ارائه نتایج و تحلیل یافته‌ها

##### اثر پارامترهای عملیاتی بر اندازه قطره

سرعت اختلاط دارای یک اثر قوی بر میانگین اندازه قطره می‌باشد و با افزایش اختلاط میانگین اندازه قطره به شدت کاهش می‌یابد. افزایش سرعت اختلاط موجب بهبود شکست قطرات و در نتیجه کاهش اندازه قطره می‌شود. تأثیر دور همزن بر میانگین اندازه قطرات در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت قطرات کوچک‌تر در دور همزن‌های بالاتر پیدا می‌شوند که این نتیجه شکست قطرات است.

جدول ۱ مشخصات هندسی یک ستون استخراج کوهنی.

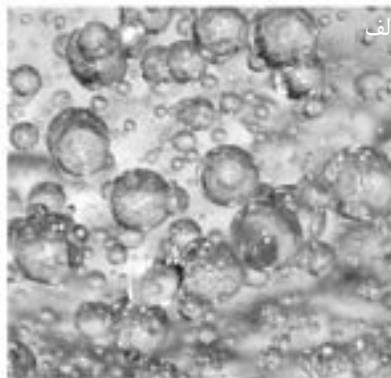
ابعاد	اجزای ستون
۰/۰۵۵ (m)	ارتفاع هر مرحله
۱۰	تعداد مراحل
۲۷	تعداد حفره در هر سینی
۰/۰۰۷۵ (m)	قطر حفره
۰/۷ (m)	ارتفاع ستون
۰/۰۰۲ (m)	ضخامت سینی
۰/۱۱۷ (m)	قطر ستون
۰/۰۰۷۵۲ (m <sup>3</sup> )	حجم فعال ستون

آزمایش‌ها بر روی دو سیستم شیمیایی تولوئن - آب (کشش بین سطحی بالا) و بوتیل استات - آب (کشش بین سطحی متوسط) در حالت بدون انتقال جرم انجام می‌شود. از آب به عنوان فاز پیوسته و تولوئن و بوتیل استات به عنوان فاز پراکنده استفاده شده است. خصوصیات فیزیکی سیستم‌های مورد استفاده در جدول (۲) ارائه شده است.

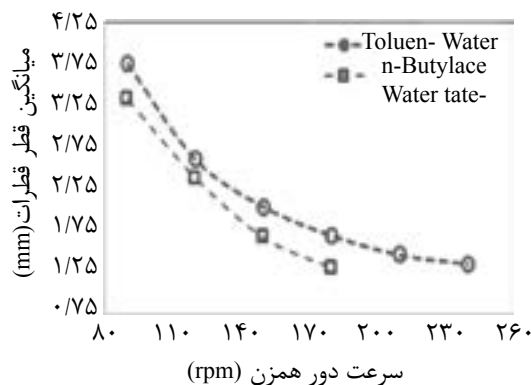
اندازه قطره به وسیله گرفتن عکس دیجیتالی از قسمت فعال ستون و مقایسه ابعاد قطره با اندازه مشخصی از داخل ستون به عنوان مرجع اندازه‌گیری می‌شود. برای این مقایسه دو پارامتر طولی داخلی مورد استفاده قرار گرفت - ضخامت و فاصله سینی‌ها و خمیدگی ستون قابل چشم‌پوشی

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی سیستم‌های مایع - مایع

خصوصیات فیزیکی	واحد	تولون - آب	بوتیل استات - آب
دانسیته فاز پیوسته	$\text{kgm}^{-3}$	۹۹۸/۲	۹۹۷/۶
دانسیته فاز گسسته	$\text{kgm}^{-3}$	۸۶۵/۲	۸۸۰/۹
ویسکوزیته فاز پیوسته	mpas	۰/۹۶۳	۱/۰۲۷۴
ویسکوزیته فاز گسسته	mpas	۰/۵۸۴	۰/۷۳۴
کشش سطحی	$\text{mNm}^{-1}$	۳۶	۱۴/۱



شکل ۲ قطرات تولید شده در سیستم تولون-آب: الف) شماتیک پخش قطرات در فاز پیوسته، ب) مراحل مختلف ستون استخراجی کوهنی.



شکل ۳ اثر دور همزن بر میانگین اندازه قطره.

ارائه شده است [۱۴-۱۷].

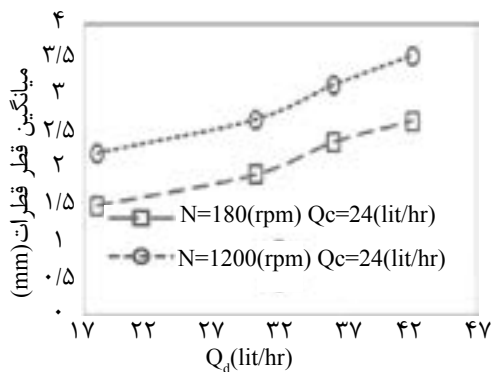
شکل ۳ همچنین نشان می‌دهد افزایش در میزان کشش سطحی باعث افزایش قطر قطرات می‌شود. اثر دور همزن بر روی میانگین اندازه قطره در سیستم تولون-آب (سیستم با کشش سطحی بالا) بیش‌تر از اثر آن رو سیستم نرمال بوتیل استات-آب است (کشش سطحی متوسط) زیرا شکستن قطرات پراکنده به کوچک‌تر در سیستم با کشش سطحی بالاتر محدود است.

با این حال در میزان دور همزن‌های بالا کاهش میانگین اندازه قطرات به صورت تدریجی است. به هم آمیختگی قطرات در دور همزن‌های بالا با افزایش احتمال برخورد قطرات افزایش می‌یابد. بنابراین در دور همزن‌های بالا با افزایش جریان، به هم آمیختگی قطرات بر افزایش تمایل قطرات برای تجزیه و شکسته شدن غلبه دارد. نتایج مشابهی برای اثر سرعت اختلاط بر میانگین اندازه قطره در ستون‌های استخراج مختلف توسط سایر محققین

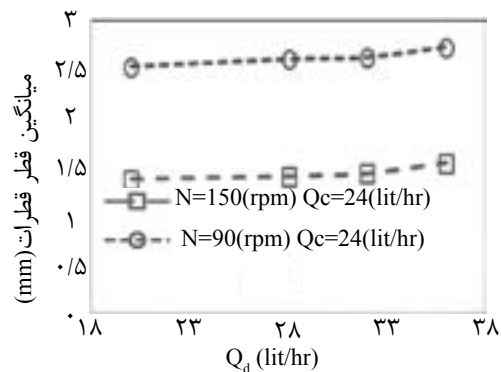
شدت جریان‌های بالاتر از فاز گسسته افزایش می‌یابد. نتایج مشابهی برای اثر دبی فاز پراکنده بر میانگین اندازه قطره در ستون‌های استخراج مختلف توسط سایر محققین ارائه شده است [۱۷-۱۴]. افزایش شدت جریان فاز پیوسته اثر کمی بر افزایش اندازه میانگین قطره دارد این اثر را می‌توان به افزایش زمان اقامت قطرات در اثر کاهش سرعت نسبی (قطره نسبت به فاز پیوسته) و در نتیجه افزایش احتمال برخورد قطرات و انعقاد آنها و ایجاد قطره بزرگ‌تر نسبت داد. تغییرات اندازه متوسط قطره با سرعت فاز پیوسته در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۷) دیده می‌شود تغییر شدت جریان فاز پیوسته تقریباً تغییر بسیار کمی در اندازه قطره در دامنه عملیاتی مورد نظر ایجاد می‌کند. نتایج مشابهی برای اثر دبی فاز پیوسته بر میانگین اندازه قطره در ستون‌های استخراج مختلف توسط سایر محققین ارائه شده است [۱۷-۱۴].

افزایش دبی فاز پراکنده موجب افزایش قطر میانگین قطره می‌شود. افزایش اندازه قطره می‌تواند نتیجه افزایش پیوند به علت موجودی بالاتر فاز پراکنده باشد. البته این موضوع مشخص است که اثر دبی فاز پراکنده به مراتب کمتر از اثر سرعت اختلاط می‌باشد. با افزایش ۱۰۰٪ دبی فاز پراکنده قطر میانگین ساتر قطره تنها حدود ۱۰٪ افزایش یافته است. اثر سرعت فاز پراکنده بر میانگین قطر قطره در شکل (۴) نشان داده شده است.

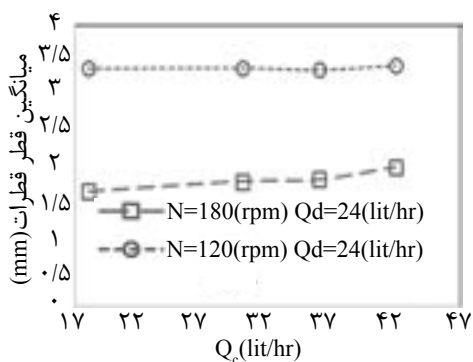
همان‌طور که در شکل (۵) دیده می‌شود با افزایش دبی فاز پراکنده اندازه میانگین قطرات تمایل به افزایش دارد اهمیت این اثر با افزایش کشش سطحی سیستم افزایش می‌یابد. شدت جریان فاز گسسته نه تنها باعث تشکیل قطرات با اندازه بزرگ‌تر می‌شود بلکه باعث ایجاد یک فرکانس بالای به هم پیوستگی قطرات می‌شود در نتیجه با افزایش برخورد قطرات به هم اندازه میانگین قطرات در



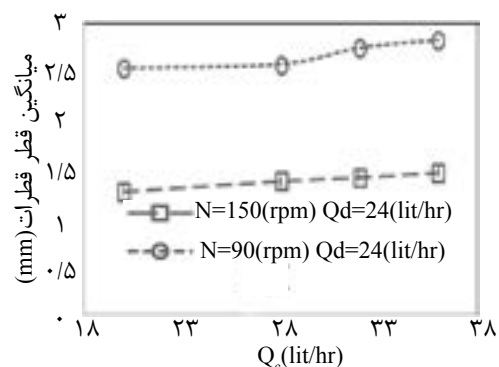
شکل ۵ اثر دبی فاز گسسته بر میانگین اندازه قطره در سیستم تولوئن - آب.



شکل ۴ اثر دبی فاز پراکنده بر میانگین اندازه قطره در سیستم نرمال بوتیل استات - آب.



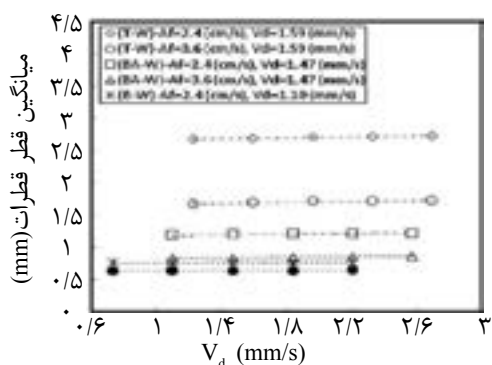
شکل ۷ اثر دبی فاز پیوسته بر میانگین اندازه قطره در سیستم تولوئن - آب.



شکل ۶ اثر دبی فاز پیوسته بر میانگین اندازه قطره در سیستم نرمال بوتیل استات - آب.

همکاران اثر سرعت همزن را بر اندازه قطره در ستون استخراج میکسر ستلر هنسون مورد بررسی قرار دادند که به نتایج زیر دست یافتند. همان طور که در شکل (۱۱) نشان داده شده است با افزایش سرعت میانگین اندازه قطره به طور چشم گیری کاهش پیدا می کند [۱۶].

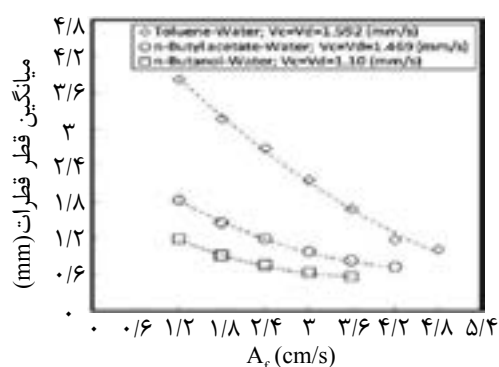
غلام سامانی و همکاران اثر سرعت فاز پیوسته و گسسته بر میانگین اندازه قطره را در ستون استخراج پر شده ضربه ای مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می دهد که با افزایش دبی فاز گسسته میانگین اندازه قطره افزایش می یابد. همچنین نتایج این محققین نشان می دهد که دبی فاز پیوسته اثر کمی بر میانگین اندازه قطره داشته است [۱۴].



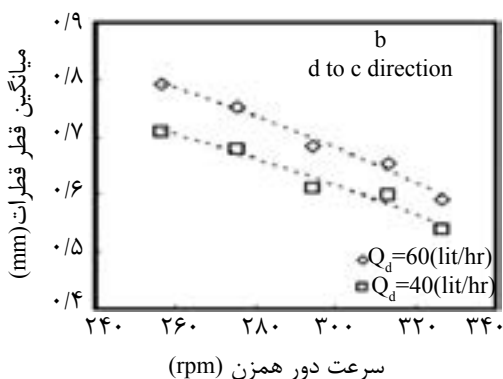
شکل ۹ اثر سرعت فاز پیوسته بر میانگین اندازه قطره در ستون استخراج دیسک و دونات ضربه ای [۱۳].

تراب مستعدی و همکاران اثر شدت ضربه، سرعت فاز گسسته و پیوسته را بر اندازه قطره در ستون استخراج دیسک و دونات ضربه ای مورد بررسی قرار دادند. همان طور که در شکل (۸) نشان داده شده است با افزایش شدت ضربه میانگین اندازه قطره به طور چشم گیری کاهش پیدا می کند [۱۳].

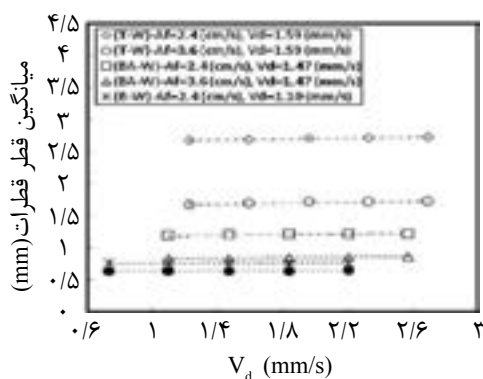
اثر سرعت فاز پیوسته و گسسته بر میانگین قطر قطرات در شکل های (۹ و ۱۰) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش سرعت هر یک از فازها میانگین اندازه قطره افزایش می یابد که اثر سرعت فاز گسسته به مراتب از اثر سرعت فاز پیوسته بیشتر است. نتایج مشابهی در کار حاضر برای اثر سرعت فاز گسسته و پیوسته بر میانگین قطر قطرات به دست آمد. تراب مستعدی و



شکل ۸ اثر سرعت ضربه بر میانگین اندازه قطره در ستون استخراج دیسک و دونات ضربه ای [۱۳].



شکل ۱۱ اثر سرعت روتور بر میانگین اندازه قطره در ستون استخراج میکسر ستلر هنسون [۱۶].



شکل ۱۰ اثر سرعت فاز گسسته بر میانگین اندازه قطره در ستون استخراج دیسک و دونات ضربه ای [۱۳].

## نتیجه گیری

ستون استخراجی کوهنی یکی از تماس دهنده‌های جدید در فرآیندهای استخراج مایع-مایع بوده که تحقیقات کمتری بر روی پارامترهای هیدرودینامیکی و انتقال جرمی آن صورت گرفته است. در این تحقیق، اثر شرایط مختلف عملیاتی به همراه سیستم‌های مورد آزمایش بر روی اندازه قطره در یک ستون استخراج کوهنی نیمه صنعتی به‌طور تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایش‌های انجام شده بر روی سیستم‌های استاندارد تولوئن-آب و بوتیل استات-آب انجام گرفت. نتایج نشان داد که اندازه قطره در ستون استخراج کوهنی به شدت به سرعت اختلاط و کشش بین سطحی وابسته می‌باشد. در سیستم‌های مورد آزمایش افزایش کشش سطحی باعث افزایش اندازه قطرات شده است. با افزایش دور همزن در هر دو سیستم باعث کاهش اندازه قطرات شده و باعث افزایش سطح تماس می‌شود. همچنین بررسی اثر دبی فازهای پراکنده و پیوسته بر اندازه قطره نشان داد که با افزایش دبی فازها اندازه قطره افزایش می‌یابد. پیشنهاد می‌گردد در تحقیقات بعدی برای ستون استخراج کوهنی پارامترهای انتقال جرمی و اثر پارامترهای هیدرودینامیکی بر انتقال جرم بین فازها بررسی گردد.

## علائم و نشانه‌ها

$C_1, C_2, C_3, C_4$ : ثوابت تجربی معادلات ۳ تا ۵

$C_{IP}, C_{\psi}, C_{\Omega}$ : ثوابت معادله ۶

$d$ : قطر قطره (m)

$da$ : قطر روزنه دونات (m)

$d_{32}$ : قطر متوسط ساتر (m)

$DR$ : حداکثر قطر قطره (m)

$f_v$ : تابع توزیع نرمال قطرات

$g$ : شتاب ثقل ( $m/s^2$ )

$hc$ : ارتفاع هر واحد (m)

$hd$ : ارتفاع هر واحد در ستون دیسک دونات (m)

$h$ : ارتفاع ستون در هر نقطه (m)

$H_0$ : ارتفاع کلی فعال ستون (m)

$n$ : تعداد قطرات یا نما

$n_i$ : تعداد قطرات دسته  $i$  ام

$m$ : توان معادله ۴

$Q_c$ : دبی حجمی فاز پیوسته ( $m^3/s$ )

$Q_d$ : دبی حجمی فاز پراکنده ( $m^3/s$ )

$V_c$ : سرعت ظاهری فاز پیوسته ( $m/s$ )

$V_d$ : سرعت ظاهری فاز پراکنده ( $m/s$ )

$R$ : نسبت جریان‌ها

## علائم یونانی

$\lambda$ : نسبت ویسکوزیته فازها

$\mu_c$ : ویسکوزیته فاز پیوسته ( $kg/m.s$ )

$\mu_d$ : ویسکوزیته فاز پراکنده ( $kg/m.s$ )

$\rho_c$ : جرم حجمی فاز پیوسته ( $kg/m^3$ )

$\rho_d$ : جرم حجمی فاز پراکنده ( $kg/m^3$ )

$\rho_m$ : جرم حجمی مخلوط دو فاز ( $kg/m^3$ )

$\Delta_\rho$ : اختلاف دانسیته دو فاز ( $kg/m^3$ )

$\rho, \gamma$ : کشش بین فاز ( $N/m$ )

$\varphi$ : موجودی فاز پراکنده

$We$ : عدد وبر

$\psi$ : توان پراکنده کردن بر واحد جرم ( $m^2.s^{-3}$ )

$\Phi$ : موجودی فاز پراکنده

$\varepsilon$ : انرژی پراکنده‌گی موضعی در واحد جرم یا کسر

آزاد سینی ( $m^2/s^3$ )



## مراجع

- [1]. Aoun Nabli M. S., Guiraud P. and Gourdon C., "CFD contribution to a design procedure for disc and doughnut extraction columns," *Chemical Engineering Research and Design (Part A)*, Vol. 76, pp. 951–960, 1998.
- [2]. Al-Rahawi A. M. I., "New predictive correlations for the drop size in a rotating disc contactor liquid–liquid extraction column," *Chemical Engineering Technology*, Vol. 2, pp. 184–192, 2007.
- [3]. Kumar A. and Hartland S., "Unified correlations for the prediction of drop size in liquid–liquid extraction columns," *Industrial Engineering Chemical Research*, Vol. 35, pp. 2682–2695, 1996.
- [4]. Oliveira N. S., Moraes Silva D., Gondim M. P. C. and Borges Mansur M., "A study of the drop size distributions and hold-up in short Kuhn columns," *Brazilian Journal Chemical Engineering*, Vol. 25, pp. 729–742, 2008.
- [5]. Chen H. S. and Middleman S., "Drop size distribution in agitated liquid-liquid systems," *AIChE Journal*, Vol. 13, pp. 989, 1967.
- [6]. Brown D. E. and Pitt K., "Drop size distribution of stirred non-coalescing liquid-liquid system," *Chem. Eng. Sci.* 27, 577, 1972.
- [7]. Chang-Kakoti D. K., Godfrey J. C. and Slater M. J., "Drop sizes and distributions in rotating disc contactors used for liquid-liquid extraction," *Journal of Separation and Process Technology*, Vol. 40, 1985.
- [8]. Logsdail D. H. and Slater M. J., *Pulsed perforated-plate columns*, In *Handbook of Solvent Extraction*, pp. 355-372, Wiley, New York, 1983.
- [9]. Calabrese R. V., Chang T. P. K. and Dang P. T., "Drop Breakup in turbulent stirred tank contactors, part I, effect of dispersed phase viscosity," *AIChE Journal*, Vol. 32, pp. 657, 1986.
- [10]. Hinze J. O., "Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes," *AIChE Journal*, Vol. 1289, 1955.
- [11]. Rincon-Rubio L. M., Kumar A. and Hartland S., "Characterization of flooding in wirz extraction column," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 71, pp. 844-851, 1993.
- [12]. Rincon-Rubio L. M., Kumar A. and Hartland S., "Drop size distribution and average drop size in a wirz extraction column," *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 72, pp. 493, 1994.
- [13]. Syll O., Mabilie I., Moscoca – Santillan M, Mamadou T. and Jacqueuse A. "Study of Mass Transfer and Determination of Drop Size Distribution in a Pulsed Extraction Column," *Chem.Eng. Research and Design*, Vol. 89, pp. 60 – 68. 2011.
- [14]. Torab-Mostaedi M., Ghaemi A. and Asadollahzadeh M., "Flooding and drop size in a pulsed disc and doughnut extraction column," *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 89, pp. 2742-2751, 2011.
- [15]. Gholam Samani M., Haghghi-Asl A., Safdari J. and Torab-Mostaedi M., "Drop size distribution and mean drop size in a pulsed packed extraction column," *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 90, pp. 2148-2154, 2012.
- [16]. Torab-Mostaedi M., Safdari J. and Torabi-Hokmabadi F., "Prediction of mean drop size in pulsed packed extraction columns," *Iranian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 8, No. 4, pp. 3-10, (autumn) 2011.
- [17]. Torab-Mostaedi M., Safdari. J. and Asadollahzadeh and M., "Mean drop size and drop size distribution in a hanson mixer-settler extraction column," *Iranian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 9, No. 2, pp. 54-65 (Spring), 2012.