

# بررسی پارامترهای مؤثر بر اندازه قطره در ظروف اختلاط همزن دار

حسین ابوالقاسمی، مریم ظاهری\*، محمد فنادی مراغه، پریسا ظاهری

تهران، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی شیمی، دانشکده فنی

پیام‌نگار: comet.zaheri@gmail.com

## چکیده

فرآیند استخراج با حلال به دلیل کاربرد فراوان در صنایع مهندسی همواره مورد توجه محققان بوده است. فرایند استخراج با حلال در دستگاه‌های مختلفی از قبیل ستونهای پر شده، ضربه ای، RDC، میکسر ستلر<sup>۱</sup> و... انجام می‌شود. به طور کلی بررسی پارامترهای مؤثر بر میزان انتقال جرم در فرایندهای استخراج، بسیار حائز اهمیت است. یکی از پارامترهای اصلی تأثیرگذار بر میزان انتقال جرم وجداسازی، اندازه قطرات است که اندازه گیری آن بسیار مهم می‌باشد. بنابراین بررسی عوامل مؤثر بر اندازه قطرات بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله عوامل عملیاتی مؤثر بر اندازه قطرات از جمله سرعت همزن، هندسه پره و موقعیت آن، کسر حجمی فاز پراکنده<sup>۲</sup>، فعال کننده سطحی<sup>۳</sup> در دستگاههایی که شامل همزن هستند، مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

**کلمات کلیدی:** اندازه قطره، سرعت همزن، هندسه پره، کسر حجمی فاز پراکنده، فعال کننده سطحی

## ۱- مقدمه

است. پدیده‌های شیمیایی و فیزیکی که در ظروف اختلاط به وقوع می‌پیوندند، به مقدار زیاد، وابسته به اندازه قطره می‌باشند. در حالت کلی، اندازه قطره به پارامترهای متعددی از جمله خواص فیزیکی فازها، مشخصات هندسی تجهیزات، کشش بین سطحی، ماندگی، حضور مواد فعال کننده سطحی (سورفکتانت‌ها) و دما بستگی دارد. در اینجا تاثیر تعدادی از این پارامترها را مورد بازنگری قرار می‌دهیم.

ظروف اختلاط بطور وسیعی در صنایع شیمیایی، مورد استفاده قرار می‌گیرند. تحلیل الگوهای جریان و مکانیزم‌های اختلاط در ظروف همزده موضوع تحقیقات نظری و آزمایشگاهی است. همچنین نشان داده شده است که شرایط جریان و اختلاط در ظرف‌های همزن دار بشدت با هندسه ظرف و پره و همچنین خصوصیات فیزیکی فازهای مخلوط شده تغییر می‌کنند. این متغیرها نرخ‌های نسبی شکست و ائتلاف را تعیین می‌کنند که موجب توزیع اندازه قطره فاز پراکنده می‌گردد. توزیع اندازه قطره مشخصه مهم پراکندگی‌های مایع- مایع

1. Mixer settler
2. Hold up
3. Surfactant

۲- قطر میانگین ساتر<sup>۱</sup>

قطر میانگین ساتر به  $d_{\min}$  و  $d_{\max}$  و چگونگی توزیع اندازه قطرات بستگی دارد [۲۱]. مطالعات زیادی در زمینه اثر شرایط هیدرودینامیکی بر روی اندازه قطرات انجام شده است که همه این مطالعات بر پایه تئوری هینزه-کولموگروف<sup>۲</sup> استوار است. طبق این تئوری، ماکزیمم قطرات پایدار در امولسیون‌ها با توان  $0/4$ - به میانگین از بین رفتن انرژی در ظرف اختلاط و یا با توان  $1/2$ - به سرعت همزن وابسته است. بر طبق نتایج تجربی، قطر میانگین ساتر از این تئوری تبعیت می‌کند و با توان  $0/6$ - به عدد وبر<sup>۳</sup> وابسته است:

$$\frac{d_{32}}{D} \propto (We)^{-0.6} \quad (2)$$

این رابطه برای تعداد زیادی از سیستم‌های مایع-مایع و سیستم‌های بدون ائتلاف بررسی شده است [۳۴]. بیشترین روابط گزارش شده برای قطر میانگین ساتر به شکل زیر است:

$$\frac{d_{32}}{D} = C f(\phi)(We)^{-0.6} \quad (3)$$

که  $\phi$  کسر حجمی فاز پراکنده است. در جدول (۲) تعدادی از این روابط که توسط محققان در شرایط مختلف حاصل شده، ارائه شده است.

## ۳- سرعت همزن

چاتزی<sup>۴</sup> و همکارانش، در مورد سیستم شامل یک درصد استیرین در آب، تثبیت شده با  $0/1 \text{ g/l}$  پلی وینیل الکل (PVA) به عنوان عامل امولسیون ساز، اثر سرعت همزن را بر قطر میانگین ساتر بررسی کردند. بعد از اینکه سیستم به حالت یکنواخت رسید، با یک افزایش پله‌ای در سرعت همزن (از  $200 \text{ rpm}$  تا  $300 \text{ rpm}$ )، قطر میانگین ساتر سریعاً به یک مقدار جدیدی که متناظر با قطر میانگین ساتر در  $300 \text{ rpm}$  است، کاهش یافت [۵].

اسکلند<sup>۵</sup> و همکارانش برای داده‌های آزمایشگاهی اثر سرعت پره در

پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی که در یک ظرف اختلاط به وقوع می‌پیوندد، به مقدار قابل توجهی وابسته به اندازه قطرات می‌باشند که توسط مکانیسم‌های شکست و ائتلاف تعیین می‌شود. قطره‌ها در معرض تنش‌های برشی و سرعت تلاطم و تغییرات فشار در سطح مشترکشان می‌باشند. این فرایندها قطره‌ها را تغییر شکل می‌دهند و اگر نیروهای دینامیک از نیروهای کشش سطحی تجاوز کنند، قطره‌ها ممکن است به قطرات کوچکتر شکسته شوند. در عین حال، این قطرات در معرض برخورد با یکدیگر هستند و اگر قطرات در حال برخورد در یک مدت به اندازه کافی طولانی در کنار هم بمانند بطوری که فیلم موجود بین سطح مشترک آنها گسیخته شود، این برخوردها می‌توانند سبب ائتلاف شوند. این قطره‌ها دائماً و بطور همزمان شکسته می‌شوند و ائتلاف می‌یابند و بعد از زمان معینی یک تعادل دینامیک حاصل می‌شود. از آنجا که اندازه قطرات در پراکندگی‌های مایع-مایع یکنواخت نیستند، محققان معمولاً فرض می‌کنند که یک ماکزیمم اندازه قطره ( $d_{\max}$ ) وجود دارد که بالاتر از آن، قطرات پایدار وجود ندارند و یک مینیمم اندازه قطره ( $d_{\min}$ ) وجود دارد که پایین تر از آن، قطرات پایدار وجود ندارند. بسته به شرایط جریان، قطره‌ها می‌توانند شکل‌های گوناگونی داشته باشند. به کار بردن اندازه میانگین قطره‌ها در محاسباتی که شامل قطره‌های ناهمبسته است، مانند جریان چند فازی یا فرایند انتقال جرم، بسیار مناسب است. تعریف‌های گوناگونی برای اندازه میانگین قطرات در کاربردهای مختلف ارائه شده است. از میان قطرهای میانگین تعریف شده، از قطر میانگین ساتر ( $d_{32}$ ) برای توصیف پراکندگی‌های مایع-مایع و مایع-گاز استفاده می‌شود و کاربرد زیادی دارد. دلیل مهم بودن قطر میانگین ساتر این است که سطح واحد حجم یا سطح جانبی ویژه قطرات ( $a$ ) را به نرخ‌های انتقال انرژی، انتقال جرم و واکنش شیمیایی مربوط می‌کند، لذا در مطالعات آزمایشگاهی اثر عامل مؤثر بر قطر میانگین ساتر را بررسی می‌کنند. قطر میانگین ساتر بصورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i d_i^3}{\sum_{i=1}^k n_i d_i^2} \quad (1)$$

1. Sauter Mean Diameter

2. Kolmogoroff-Hinze

3. Weber.no

4. Chatzi

5. Skelland

فسفات و سولوسو (۱۰۵) است. در سیستم اول، فاز پراکنده محلول اسید کلریدریک و بدون ائتلاف، و در سیستم دوم، سیستم ائتلاف  $NiCl_2$  است. همانطور که در شکل (۱) مشاهده می‌کنیم رفتار خطی پیشنهاد شده توسط تئوری هینزه - کولموگروف برای هر دو سیستم صادق است [۱۰]

رایبرو<sup>۸</sup> و همکارانش برای ظروف اختلاط پیوسته و ناپیوسته شامل تولون در آب، اثر سرعت همزن را مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که در مورد سیستم پیوسته، افزایش سرعت همزن منجر به توزیع اندازه قطرات ریزتر می‌شود و قطر ساتر کاهش می‌یابد. در مقایسه با سیستم پیوسته، سیستم ناپیوسته، توزیع اندازه قطرات باریکتر را نتیجه می‌دهد که به سرعت همزن بسیار حساس است، این نتیجه کمبود جریان خوراک در سیستم‌های ناپیوسته است [۱۱].

در کاری که توسط جایپس<sup>۹</sup> و همکارانش در مورد یک سیستم ناپیوسته شامل نفت سفید به عنوان فاز پراکنده و آب مقطر به عنوان فاز پیوسته انجام شده است، رابطه‌ای به صورت زیر برای سرعت همزن بدست آمده است:

$$d_{32} \propto N^{-\beta} \quad (5)$$

مقادیر  $\beta$  در محدوده ۰/۶۲ تا ۱/۲۳ تغییر می‌کنند که وابسته به میزان هلدآپ<sup>۱۰</sup> می‌باشد [۱۲].

#### ۴- شکل هندسی پره و موقعیت آن:

پکک<sup>۱۱</sup> و همکارانش اندازه میانگین قطره و توزیع اندازه قطرات در یک سیستم شامل آب به عنوان فاز پیوسته و کلروبنزن یا روغن آفتابگردان<sup>۱۲</sup>، به عنوان فاز پراکنده با دو نوع پره دیسکی و چهار پره با عدد توان پایین را مطالعه کردند. آنها مشاهده کردند که در نرخ انرژی پراکندگی متوسط ( $\bar{\epsilon}_T$ ) یکسان، این چهار پره، قطراتی با اندازه یکسان تولید می‌کنند که بسیار کوچکتر از قطراتی هستند که توسط دو پره دیسکی تولید شده‌اند. به عبارت دیگر، مشاهده کردند که همزن‌های با عدد توان پایین از نوع "با نیروی برشی بسیار بالا"<sup>۱۳</sup> یا

غیاب فعال‌کننده سطحی را بر روی قطر میانگین ساتر ناپایدار برای جهت‌های مختلف انتقال جرم، بررسی و مشاهده کردند که با افزایش سرعت پره، قطر میانگین ساتر کاهش می‌یابد [۶].

رویز<sup>۱</sup> و همکارانش اثر سرعت همزن در یک ظرف اختلاط ناپیوسته شامل فاز آلی، مخلوطی به نسبت یک به یک از سالیکیلالدوکسیم<sup>۲</sup> (LIX 860N-IC) و کتوکسیم<sup>۳</sup> (LIX 64-IC) را در یک رقیق‌کننده آلیفاتیک (Escaid 103) و فاز آبی (محلول ۰/۲۵-M سولفات سدیم) با کسر فاز پراکنده خیلی پایین (۰/۰۰۶) به منظور کاهش ائتلاف بین قطرات تا یک مقدار قابل چشم‌پوشی، مورد بررسی قرار دادند. آنها مشاهده کردند هنگامی که سرعت همزن افزایش می‌یابد تمایل قطرات آلی به شکسته شدن بیشتر شده و منحنی توزیع اندازه قطرات به قطرات کوچکتر جابجا می‌شود [۷].

در کارآزمایشگاهی که توسط بن<sup>۴</sup> و همکارانش انجام شده، نمودارهای تغییرات قطر میانگین ساتر  $d_{32}$  برای سیستم‌های دو جزئی (هپتان-آب) و سه جزئی (هپتان-TOPO-آب) در مقابل سرعت همزن (N) رسم شده است. برای سیستم دوجزئی (هپتان-آب) و سیستم سه جزئی (هپتان-TOPO-آب) با غلظت پایین TOPO این وابستگی با تئوری توربولنسی ایزوتروپیک کولموگروف، که در آن قطر میانگین ساتر با توان ۱/۲- سرعت همزن متناسب است ( $N^{-1.2}$ )، سازگاری دارد. لیکن در غلظت بالای TOPO که اثر شکست غالب است، این وابستگی با تئوری کولموگروف همخوانی ندارد [۸].

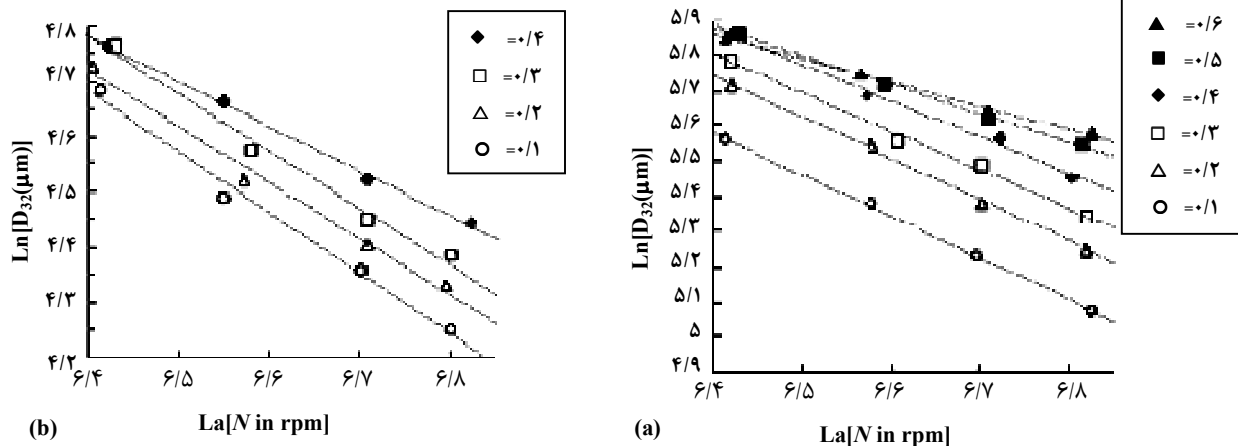
در کاری که توسط اکی<sup>۵</sup> و همکارانش با سیستم اتیل مالونات<sup>۶</sup> و آب به ترتیب به عنوان فازهای پراکنده و پیوسته انجام شده، مشاهده شده است که رابطه بین قطر میانگین ساتر و قطر ماکزیمم با سرعت همزن (N) بصورت زیر است [۹]:

$$\begin{aligned} d_{32} &= 60N^{-1.2} \\ d_{\max} &= 160N^{-1.2} \end{aligned} \quad (4)$$

در کاری که توسط دسنویر و ماسبرانت و گوردون<sup>۷</sup> انجام شده است، در هر دو سیستم، فاز پیوسته یک حلال آلی (مخلوطی از تری بوتیل

- 1 Ruiz
- 2 Salicylaldehyde
3. Ketoxime
4. Ban
5. Ok
6. Ethyl Malonate
7. Desnoyer, Masbernat, Gourdon

8. Ribeiro
9. Giapos
10. Holdup
11. Pacek
12. Sunflower
13. Ultra-High Shear



شکل ۱- (a) سیستم  $NiCl_2$ ، (b) سیستم  $HCl$

انجام شده است که در آن نفت سفید، فاز پراکنده و آب مقطر، فاز پیوسته می‌باشد. در این کار، اثر تعداد پره‌های همزن براندازه قطره مورد بررسی قرار گرفته است. پره‌های مورد استفاده در این مطالعه از نوع توربینی دیسکی با  $۸۰،۴،۲$  تیغه می‌باشد. در پایان آزمایش‌ها، همانطور که انتظار می‌رفت به ازای سرعت همزن یکسان، پره‌های با تعداد تیغه‌های بیشتر، در مقایسه با پره‌هایی که تعداد تیغه‌های کمتری داشتند، قطرات ریزتری ایجاد کردند [۱۲].

داگلاس و استاماتودیس<sup>۴</sup> دریافتند که علاوه بر هندسه پره موقعیت عمودی آن نیز نقش مهمی در توزیع اندازه قطره بازی می‌کند [۱۶].

کریستالو زو توزیع اندازه قطره را در پراکندگی‌های مایع-مایع رقیق ( $\phi = 0.003$ ) برای پره نوع توربینی (RT) و سه پره با جریان محوری (PBT، HE3، A310) مورد پژوهش قرار دادند. تغییر قطر هر کدام از این چهار پره تأثیر قابل توجهی بر  $\mathcal{E}_{max}$  دارد و برای بررسی اثر قطر پره بر اندازه قطر میانگین ساتر و توزیع اندازه قطره بکار می‌رود. همچنین اثر نسبت فاصله کف طرف از محور مرکزی پره به قطر پره  $\mathcal{E}_{max}$  بر (C/D) در مورد پره نوع توربینی (RT) زیاد است و برای پره A310 قابل توجه نیست [۲].

اگر رابطه (۲) برای قطر میانگین ساتر بصورت زیر نوشته شود:

$$\frac{d_{32}}{D} = AWe^{-0.6} \quad (6)$$

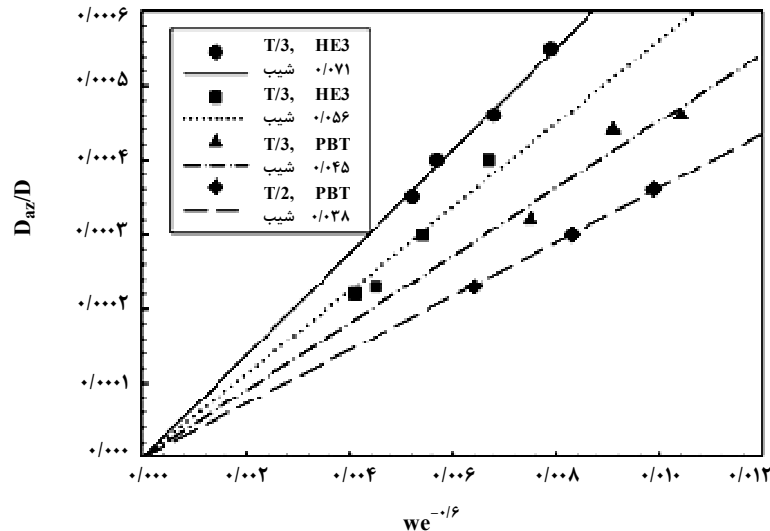
"فلو بالا"، قطره‌های کوچکتر و توزیع اندازه قطره باریکتر، در مقایسه با همزن‌های با عدد توان بالا تولید می‌کنند [۱۳].

سرجملی<sup>۲</sup> و همکارانش مقایسه‌ای در مورد قطر قطرات تولید شده بوسیله یک پره شش تیغه‌ای باز و یک پره شش تیغه‌ای دیسکی که قطر، عرض و سرعت چرخش یکسان دارند انجام دادند. در این مقایسه مشاهده شد که در هلدآپ و سرعت چرخش ثابت، قطر قطرات ایجاد شده توسط پره شش تیغه‌ای باز، بین ۶ تا ۸۲ درصد بزرگتر از قطر قطرات ایجاد شده توسط پره دیسکی است، زیرا عدد رینولدز پره در این کار ( $N_{Re} = 39000 - 87000$ ) متناظر با عدد توان  $N_{Po} = 5$  برای پره دیسکی و عدد توان  $N_{Po} = 4$  برای پره باز است. عدد توان بزرگتر برای پره دیسکی، ماکزیمم انرژی پراکندگی متلاطم در هر واحد جرم ( $\mathcal{E}_{max}$ ) را نتیجه می‌دهد و بنابراین نرخ شکست قطرات، بزرگتر و یا نرخ ائتلاف، کوچکتر است. در این کار مشاهده شد که به ازای هلدآپ، قطر، عرض و سرعت همزن یکسان، قطرات تولید شده توسط پره دیسکی کوچکتر و بسیار یکنواختر از قطرات تولید شده توسط پره باز بودند. نتایج این کار با نتایج حاصل از کار پیت و بران<sup>۳</sup> که دریافتند هندسه پره (نسبت‌های متفاوت  $D_{pw}/D$ )، هنگامیکه قطر و سرعت همزن ثابت است، بر اندازه قطر میانگین تأثیر نمی‌گذارد، در تضاد است [۱۴ و ۱۵].

آزمایش‌هایی توسط جایس و همکارانش در یک سیستم ناپیوسته

1. High Flow
2. Sechremeli
3. Pitt and Brown

4. Daglas and Stamatoudis



شکل ۲- رابطه اندازه قطره با عدد وبر برای پره‌های مختلف

کسر حجمی، به علت بالا رفتن نرخ ائتلاف، افزایش می‌یابد [۳]. اسکلند و همکارانش برای دو قطر پره در سیستم‌های بدون فعال کننده سطحی، برای داده‌های آزمایشگاهی اثر  $\phi$  را بر قطر میانگین ساتر در حالت ناپایدار و برای جهت‌های مختلف انتقال جرم بررسی و مشاهده کردند که به ازای  $\phi$  ( $0.07 \leq \phi \leq 0.3$ ) قطر میانگین ساتر ذاتا مستقل از آن است، که دلیل آن، مقادیر پایین کسر حجمی فاز پراکنده می‌باشد [۶].

در کار آزمایشگاهی که توسط کومار<sup>۵</sup> و همکارانش برای سیستم شامل تولوئن پراکنده شده در محلول ۳ درصد لوریل سولفات<sup>۶</sup> در آب انجام شده، مشاهده شده است که با افزایش کسر حجمی فاز پراکنده مقدار  $d_{max}$  ابتدا افزایش می‌یابد، از یک مقدار ماکزیمم (تقریباً در هلدآپ ۰/۴) عبور می‌کند و سپس کاهش می‌یابد [۲۱ و ۱۹].

در کار تجربی که بوی<sup>۷</sup> و همکارانش در مورد سیستم شامل آب مقطر و زایلین به ترتیب به عنوان فاز پراکنده و فاز پیوسته و حدود ۰/۳ درصد سدیم دو سدیل سولفات (SDS) در فاز پیوسته برای حداقل کردن ائتلاف انجام داده‌اند، در مورد تغییرات اندازه میانگین قطره با کسر حجمی فاز پراکنده مشاهده کردند که با افزایش  $\phi$  تا حدود ۵۰ درصد

در اینجا  $A = f(D/T, P_o, \Phi_{max})$  است. کالابرس<sup>۱</sup> و همکارانش برای توربین‌های راشتون<sup>۲</sup>  $T/2$ ،  $A = 0.053$  را بدست آوردند. نینو<sup>۳</sup> برای دو نوع پره، هر کدام با دو نسبت متفاوت  $D/T$ ، چهار مقدار  $A$  بدست آورد [۱۷ و ۱۸].

#### ۵- کسر حجمی فاز پراکنده (هلدآپ)

هلدآپ ( $\phi$ )، کسر حجمی فاز پراکنده در استخراج کننده را نشان می‌دهد و در ستونهای استخراج استاندارد می‌تواند تابعی از دبی (شدت جریان) فازها و شدت اختلاط باشد.

بروک و زرفا<sup>۴</sup> یک سری آزمایش برای سیستم پراکنده‌گی تثبیت شده وینیل کلراید (VCM) در محلول آبی پلی هیدرولیز (وینیل استات) انجام داده و مشاهده کردند که یک افزایش در کسر حجمی فاز پراکنده، توزیع اندازه وسیع‌تری ایجاد می‌کند، زیرا افزایش در کسر حجمی فاز پراکنده این احتمال را که دو قطره برخورد داشته باشند افزایش می‌دهد. در نتیجه این افزایش در تعداد برخورد ها، نرخ ائتلاف، بسیار معنی‌دارتر می‌شود. همچنین در مورد تغییرات قطر میانگین ساتر با کسر حجمی فاز پراکنده، دریافتند که اندازه قطرات با افزایش

5. Kumar  
6. Lauryl Sulphate  
7. Boye

1. Calabrese  
2. Rushton  
3. Nienow  
4. Zerfa and Brooks

باعث بزرگ شدن فرکانس شدت برخورد بین قطرات می‌شود، بنابراین، اندازه قطرات، افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که این کار آزمایشگاهی برای هلدآپ‌های کمتر از ۵ درصد انجام شده است [۱۱]. اما در مورد رابطه قطر میانگین ساتر با هلد آپ، بیشتر روابط ارائه شده جدول (۲) توسط محققان، بصورت رابطه خطی زیر است:

$$d_{32} = c_0 (1 + c_x \phi) We^{-0.6} \quad (7)$$

که در آن،  $c_0$  وابسته به شکل هندسی همزن و بطور ویژه وابسته به عدد توان  $P_0$  می‌باشد.  $c_x$  ثابت هلدآپ است که تأثیر ائتلاف قطره - قطره و کاهش توربولنسی را که نتیجه قابل توجه بودن جزء حجمی فاز پراکنده می‌باشد نشان می‌دهد که در محدوده ۱۰-۳ قرار دارد. پکک و همکارانش برای ظروف اختلاط مقدار  $c_x = 22/8$  را بدست آورده اند، محققان این مقدار خیلی بزرگ را به سیستم هایی با ائتلاف بالا نسبت داده اند (آب - کلروبنزن) [۲۴].

برای مقادیر بالاتر هلدآپ، گادفری<sup>۴</sup> و همکارانش نشان دادند که اثر هلدآپ نسبت به اندازه قطره برای همزنهای نوع پمپی، غیر خطی است و بصورت زیر بیان می‌شود.

$$\frac{d_{32}}{D} = c_0 (1 + c_x \phi^n) We^{-0.6} \quad (8)$$

که در آن مقدار  $n$  در بازه ۰/۸-۰/۸۵ قرار می‌گیرد [۲۵].

حجمی، قطر میانگین قطره، افزایش و به ازای مقادیر بالاتر از ۵۰ درصد حجمی، قطر میانگین قطره کاهش می‌یابد این نتایج با پژوهش‌هایی که پیش از این توسط بی و شاملو<sup>۱</sup>، کلارک و ساویستوسکی<sup>۲</sup> و کومار و همکارانش (همانطور که قبل از این ذکر شد) انجام شده سازگاری دارند. کلارک و ساویستوسکی علت این رفتار را چنین بیان کردند که با افزایش کسر حجمی فاز پراکنده و در نتیجه نزدیک شدن قطرات به هم، پدیده وارونگی فاز اتفاق می‌افتد. اما در کار آزمایشگاهی که توسط بوی و همکارانش انجام گرفت دلیل قاطعی برای وقوع پدیده وارونگی فاز یافت نشد و به این نتیجه رسیدند که با افزایش کسر حجمی فاز پراکنده تا ۵۰ درصد حجمی، ویسکوزیته پراکندگی بطور خطی افزایش می‌یابد و رفتار نیوتنی خود را حفظ می‌کند و برای مقادیر  $\phi$  بالاتر از ۵۰ درصد، رفتار جریان، غیر نیوتنی می‌شود و بنابراین رژیم جریان داخل ظرف اختلاط تغییر می‌کند. به ازای مقادیر  $\phi$  کمتر از ۵۰ درصد حجمی، رژیم جریان کاملاً متلاطم و برای مقادیر بالاتر از ۵۰ درصد، رژیم جریان غیر متلاطم خواهیم داشت و رفتار مشاهده شده با متفاوت بودن مکانیسم شکست قطره در این دو رژیم جریانی توجیه گردید [۲۲].

بالملی<sup>۳</sup> و همکارانش معادلات تجربی زیر را برای قطر میانگین ساتر بدست آوردند، که نتایج در جدول (۱) آورده شده است [۲۳]. رایبیرو و همکارانش در کار آزمایشگاهی برای ظرف‌های اختلاط پیوسته و ناپیوسته شامل تولوئن در آب، اثر هلدآپ فاز پراکنده را مورد بررسی قرار دادند. آنها مشاهده کردند که هلدآپ‌های بزرگتر منجر به قطرات بزرگتر می‌شوند. نظر به اینکه بزرگ بودن این کسر حجمی

جدول ۱- روابط تجربی برای قطر میانگین ساتر

(آب/اورتو زایلین)	(تولوئن / آب)	
$8.5\phi^{0.42} N^{-1.04}$	$10.7\phi^{0.43} N^{-1.04}$	معادله قطر میانگین ساتر ( $d_{32}$ (mm))
۵-۲۰	۵-۲۰	هلدآپ فاز پراکنده (%)
۱۸۰-۳۰۰	۲۰۰-۴۵۰	سرعت همزن (rpm)

1. Shamluo
2. lauryl sulphate
3. Balmelli
4. Godfrey

$$\frac{d_{32}}{D} = f(\phi)We^{-n(\phi)/2} \quad (11)$$

### ۶- اثر ماده فعال کننده سطحی

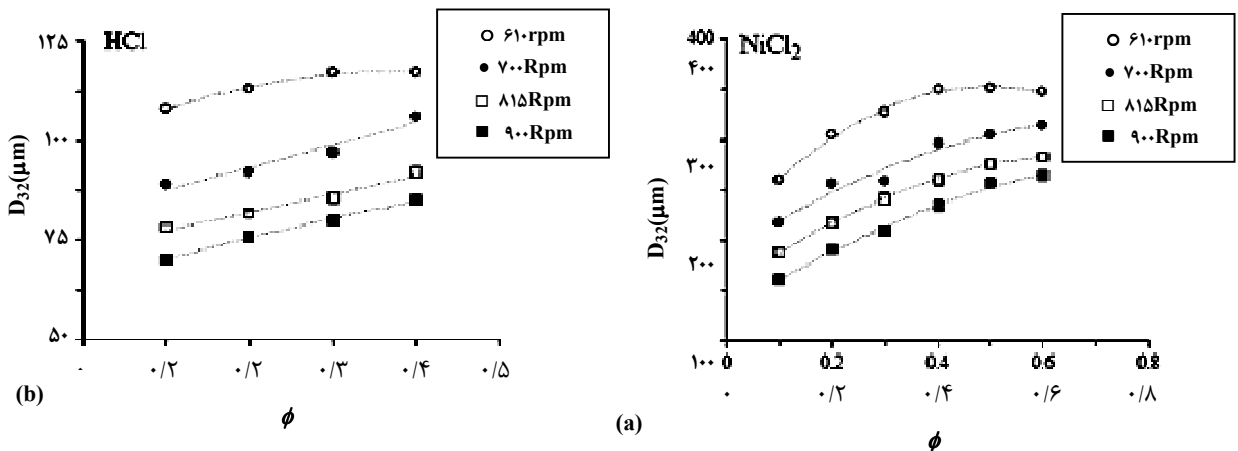
در بیشتر تجهیزات استخراج صنعتی مقادیر کم و اجتناب ناپذیر آلاینده‌های فعال در سطح می‌توانند اثرات عمیقی روی رفتار قطرات و حباب‌ها داشته باشند. همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود وقتی که دو قطره در فرایند ائتلاف باهم تماس پیدا می‌کنند، مایع بین آنها به سمت بیرون جریان می‌یابد و همزمان سطح قطره کشیده می‌شود. در محلول شامل ماده فعال کننده سطحی، کشش سطحی در منطقه بین دو قطره به علت کشیده شدن سطح مشترک، بزرگتر خواهد شد. جابجایی سطح، مولکول‌های فعال کننده سطحی جذب شده را به سمت بیرون سطح دو قطره جاروب می‌کند و کشش سطحی در آنجا کاهش می‌یابد. نیروی خالص روی سطح مشترک، از این ناحیه با کشش سطحی پایین به سمت ناحیه تماس بین قطرات رانده می‌شود و تنش مارانگونی<sup>۲</sup> را اعمال می‌کند که مقاومت دراگ<sup>۳</sup> برای تخلیه مایع را افزایش می‌دهد. در نتیجه از ائتلاف جلوگیری می‌شود. برای یک سیستم شامل فعال کننده سطحی، اندازه قطره با کاهش کشش سطحی و جلوگیری از ائتلاف قطرات پراکنده، کاهش می‌یابد [۲۶]

در تحقیقاتی که توسط دسنویر و ماسبرانت و گوردون انجام شده است، در هر دو سیستم، فاز پیوسته یک حلال آلی است که مخلوطی از تری بوتیل فسفات و سولوسو ۱۰۵ است. در سیستم اول فاز پراکنده، محلول اسید کلریدریک و بدون سیستم ائتلاف است و در سیستم دوم، سیستم ائتلاف  $NiCl_2$  است همانطور که در شکل (۳) می‌بینیم برای هر دو سیستم، به ازای سرعت‌های متفاوت همزن، قطر میانگین ساتر با افزایش  $\phi$  زیاد می‌شود. برای این دو سیستم معادلات زیر به دست آمده‌اند:

$$\frac{d_{32}}{D} = 0.28(1 + 0.92\phi)We^{-0.6} \quad (9)$$

$$\frac{d_{32}}{D} = 0.14(1 + 0.48\phi)We^{-0.6} \quad (10)$$

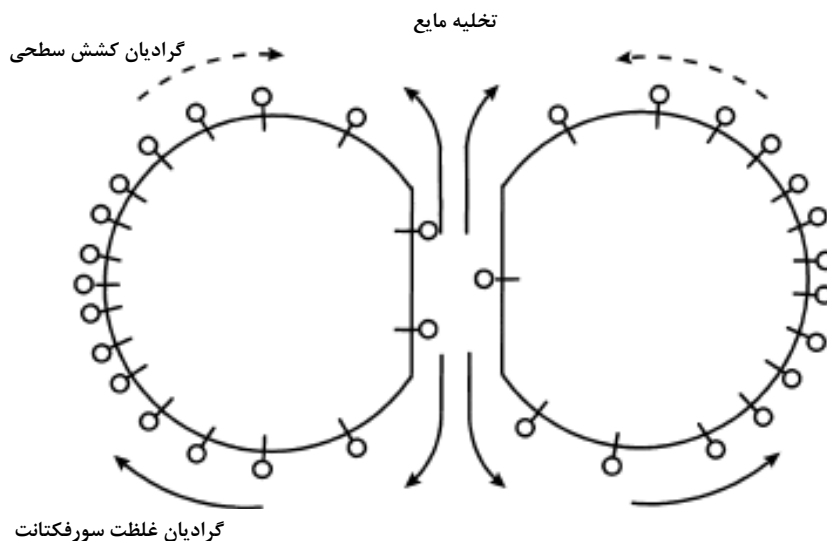
معادله (۹) برای سیستم (a) و معادله (۱۰) برای سیستم (b) می‌باشد. مقایسه معادلات بالا با نتایج تجربی نشان می‌دهد که معادلات ارائه شده تطابق بسیار خوبی با داده‌های تجربی دارند. دسنویر و همکارانش نشان دادند اگرچه قطر میانگین ساتر را می‌توان با استفاده از چارچوب روابط ارائه شده توسط هینز و دوللا<sup>۱</sup> نوشت، ولی رابطه بهتر برای آن، معادله (۱۱) است که در آن عدد وبر بصورت تابعی از مقدار هلد آپ می‌باشد [۱۰].



شکل ۳- تغییر قطر میانگین ساتر بر حسب کسر حجمی فاز پراکنده ( $\phi$ ) در سرعت‌های متفاوت همزن

(a) سیستم  $NiCl_2$ ، (b) سیستم  $HCl$

1. Hinz and Dolluh  
2. Marangoni  
3. drag



شکل ۴- جریان مایع بین دو قطره نزدیک شونده در محلول حاوی فعال کننده سطحی

تغییرات  $d_{32}$  در مقابل زمان افت می کند [۶]. اثر حضور عوامل فعال در سطح بصورت تغییر در میزان کشش بین سطحی نمایان می شود. در کاری که توسط چولاکوا<sup>۴</sup> و همکارانش در مورد وابستگی قطر میانگین ساتر به غلظت فعال کننده سطحی انجام شده، برای امولسیون ها در حضور فعال کننده های سطحی یونی (SDS)<sup>۵</sup> و غیر یونی (Brij 58)<sup>۶</sup>، (حاوی ۱۰ یا ۱۵۰ میلی مول  $NaCl$  برای تغییر غلظت الکتروولیت) دو ناحیه مشاهده شده است (شکل ۵)، در غلظت پایین فعال کننده سطحی (کمتر از ۰/۱wt%)،  $d_{32}$  بطور قابل توجهی با کاهش غلظت آن افزایش می یابد، در حالی که در غلظت بالای فعال کننده سطحی (بیشتر از ۰/۱wt%) مستقل از آن است و بیشتر به نوع فعال کننده سطحی وابسته است و نشان می دهد که کاهش کشش سطحی بعد از میزان مشخصی، تاثیری در توزیع اندازه قطرات ندارد [۲۹]. در پایان این بحث و قبل از نتیجه گیری، تعدادی از معادلات ارائه شده توسط بعضی محققان در جدول (۲) آورده شده است.

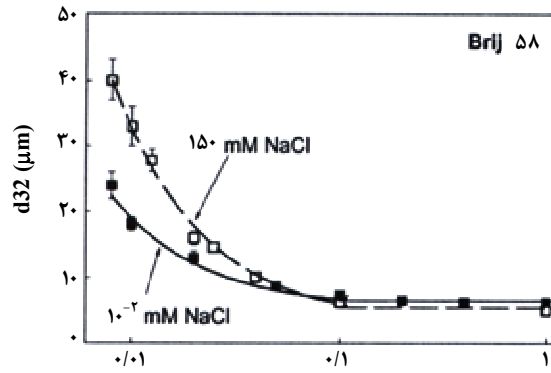
مهندس- تاتسیس واگبل<sup>۱</sup> دریافتند که بویژه فعال کننده های سطحی غیر یونی، از قبیل تریتن<sup>۲</sup> X-100، شدت بالایی برای جذب در سطح مشترک نشان می دهند و بنابراین یک سطح مشترک بسیار صلب ایجاد می گردد که از جابجایی اش جلوگیری می شود [۲۷]. سونگ و لی<sup>۳</sup> اثر نوع فعال کننده سطحی و غلظت آنرا روی قطر میانگین ساتر در حالت یکنواخت با رابطه زیر بدست آوردند:

$$\frac{d_{32}}{D} = 0.05 C_s (1 + 2.316\phi) \left(\frac{D}{T}\right)^{-0.75} N_{Fr}^{-0.13} N_{We}^{-0.6} \quad (12)$$

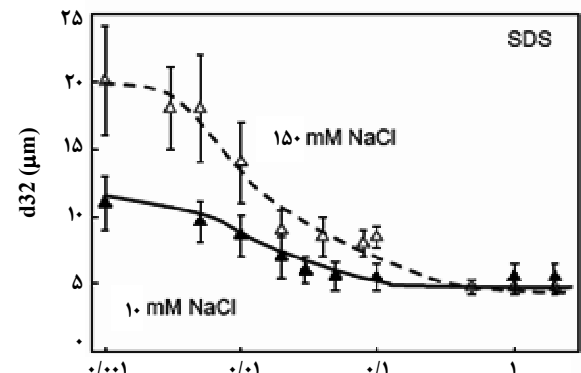
$C_s$  ضریب تصحیح برای فعال کننده های سطحی معادل ۰/۶۳ و صرف نظر از نوع فعال کننده سطحی می باشد [۲۸]. اسکند و همکارانش تغییرات قطر میانگین ساتر با غلظت فعال کننده سطحی تریتن X-100 را در مقابل زمان نشان داده اند. بطور کلی مشاهده می شود که با افزایش غلظت فعال کننده سطحی، منحنی

4. Tcholakova  
5. Sodium Dodecyl Sulfate  
6. Polyoxyethylene-20 Cetyl Ether

1. Agble and Mendes-Tatsis  
2. Triton  
3. Lee and Soong



غلظت آغازی Brij 58 (درصد وزنی)



غلظت آغازی SDS (درصد وزنی)

شکل ۵- تغییرات قطر میانگین ساتر بر حسب غلظت دو نوع فعال‌کننده سطحی

جدول ۲- روابط ارائه شده توسط بعضی از محققان برای قطر میانگین ساتر ( $d_{32}$ ) [۳۱ و ۳۰ و ۳۱]

$\phi$	روابط	محققان
۰/۰۵-۰/۲۵	$d_{32} = 0.053(1 + 4.6\phi)(\sigma / \rho_c)^{3/5} N^{6/5} D^{4/5}$	بوروانکار و همکاران <sup>۱</sup> (۱۹۸۶)
۰/۱۰	$\frac{d_{32}}{D} = 0.118\phi^{0.27}(\mu_d/\mu_c)^{-0.056}(We)^{-0.4}$	لاسو و همکارانش <sup>۲</sup> (۱۹۸۷)
۰/۰۱-۰/۰۳	$\frac{d_{32}}{D} = 0.056(1 + 10.97\phi)(We)^{-0.6}$	چاتزی و همکارانش (۱۹۸۹)
۰/۰۱	$\frac{d_{32}}{D} = 0.045(\pm 0.003)(We)^{-0.6}$	چاتزی و همکارانش (۱۹۹۱)
۰/۰۱	$\frac{d_{32}}{D} = 5 \times 10^4 (We^3 Nt)^{-1/4}$	کونو و همکاران <sup>۳</sup> (۱۹۹۳)
-	$\frac{d_{32}}{D} = 0.027(1 + 3.1\phi)We^{-0.6}$	بروک و زرفا (۱۹۹۵)
۰/۱-۰/۱۶	$\frac{d_{32}}{D} = 0.28We^{-0.6}(1 + 0.92\phi)$ $\frac{d_{32}}{D} = 0.14We^{-0.6}(1 + 0.48\phi)$ $\frac{d_{32}}{D} = f(\phi)We^{-n(\phi)/2}$	دسنویر و همکارانش (۲۰۰۳)
۰/۰۶۱-۰/۱۶۶	$d_{32} = 6\phi \left\{ 1 + \left( \frac{c_1}{We\phi} \right)^2 \right\} (c_2\phi^2 + c_3\phi)$ $\frac{d_{32}}{D} = 0.0336We^{-0.6}(1 + 13.76\phi)$ $\frac{d_{32}}{D} = 0.0286We^{-0.6}(1 + 13.24\phi)$	کوادرئوس و بابتیسا <sup>۴</sup> (۲۰۰۳)

1. Borwankar et al.  
2. Laso et al.

3. Konno et al.  
4. Quadros and Baptista

## ۷- نتیجه گیری

بطور کلی از مقایسه کارهای مطالعاتی و تحقیقاتی انجام شده می توان نتایج زیر را بیان نمود:

- با افزایش سرعت همزن، قطر میانگین ساتر کاهش می یابد و این کاهش در بیشتر موارد از تئوری کلاسیکی کولموگروف تبعیت می کند. لیکن در کار آزمایشگاهی بن و همکارانش، مشاهده شده است که با وارد کردن حل شونده به سیستم و افزایش غلظتش، توان منفی سرعت همزن بیشتر می شود و از تئوری هینز-کولموگروف تبعیت نمی کند. همچنین برخی از محققان با توجه به داده های آزمایشگاهی مشاهده کرده اند که توان منفی همزن، تابعی از میزان هلدآپ است.

- شکل هندسی همزن، عدد توان و موقعیت پره در ظرف اختلاط تاثیر بسزایی بر قطر میانگین ساتر و توزیع اندازه قطره دارد.

- اثر کسر فاز پراکنده بر قطر میانگین ساتر پژوهش شده و نتایج، اغلب نشان داده اند که قطر قطره به صورت یک افزایش خطی یا یک تابع توانی برحسب  $\phi$  می باشد. لازم به ذکر است که بیشتر نویسندگان در مورد تأثیر عدد وبر بر قطر قطره، موافق هم هستند. درحالیکه تاثیرات هلدآپ فاز پراکنده بر قطر قطره برای محققان مختلف با هم فرق دارند. بنابراین می توان گفت که رفتار ائتلاف قطره به سیستم های مایع-مایع و خصوصیات شیمی فیزیکی آنها وابسته است و نهایتاً، مکانیسم شکست حاکم نقش مهمی در کنترل قطر قطره دارد.

- اصلی ترین پارامتری که در توزیع اندازه قطرات موثر است، کشش بین سطحی است. در واقع با افزایش غلظت ماده فعال در سطح، کشش سطحی و همچنین میانگین اندازه قطره تا مقدار معینی کاهش می یابد و بعد از این مقدار معین، به غلظت فعال کننده سطحی بستگی ندارد، بلکه به نقش اصلی شرایط هیدرودینامیکی در فرایند اختلاط و نوع فعال کننده سطحی وابسته است.

## فهرست علائم:

$a$  سطح جانبی ویژه قطرات

$d$  قطر قطره

$d_{32}$  قطر میانگین ساتر

$D_{11}$  عرض تیغه پره

$N_{Fr}$  عدد فرود پره

$N$  سرعت همزن

$\phi$  هلدآپ

$N_{Re}$  عدد رینولدز

$N_{Fo}$  عدد توان

$W_e$  عدد وبر پره

$T$  قطر ظرف اختلاط

$\varepsilon$  نرخ انرژی پراکندگی ویژه

$\bar{\varepsilon}$  نرخ انرژی پراکندگی ویژه متوسط

$\mu_c$  ویسکوزیته فاز پیوسته

$\mu_d$  ویسکوزیته فاز پراکنده

$\sigma$  کشش سطحی

$\nu_c$  دانسیته فاز پیوسته

## مراجع

- [1] A. W. Pacek ; C.C. Man; A. W. Nienow , "On the sauter Mean Diameter and Size Distribution in Turbulent Liquid-Liquid Dispersions in Stirred Vessel", Chemical Engineering Science, Vol ,No 11, pp. 2005-2011, (1998) .
- [2] G. Zhou and S.M. Kresta, "Evolution of drop size distribution in liquid-liquid dispersions for various impellers", Chemical Engineering Science, Vol 53, No 11, pp. 2099-2113, (1998) .
- [3] M. Zerfa and B.W. Brooks, "Prediction of vinyl chlorid drop sizes in stabilized liquid-liquid agitated dispersion", Chemical Engineering Science, Vol. 51, No. 12, pp. 3223-3233, (1996) .
- [4] Takahiko Ban, Fumio Kawaizumi, Susumu Nii, and katsuroku Takahashi, "Effect of surface activities of extractants on drop coalescence and breakage in a mixer settler", Industrial Engineering Chemical Research., vol. 41, No 22, (2002) .
- [5] Eleni G. Chatzi, Costas J. Boutris, and Costas Kiparissides, "On-Line Monitoring of Drop Size Distributions in Agitated Vessels. 1. Effect of Temperature and Impeller Speed", Industrial Engineering Chemical Research. 30, 536-543, (1991) .
- [6] A.H.P. Skelland and Jeffrey S. Kanel, "Transient Drop Size in Agitated Liquid-Liquid Systems, As Influenced the Direction of Mass Transfer and Surfactant Concentration ", Industrial Engineering Chemical Research. 31, 2556-2563, (1992) .
- [7] M.C. Ruiz, P. Lermada, R. Padilla, "Drop size distribution in batch mixer under breakage conditions ", Hydrometallurgy 63, 65-74, (2002) .

- [8] Takahiko Ban, Fumio Kawaizumi, Susumu Nii, and Katsuroku Takahashi, "Effect of surface activities of extractants on drop coalescence and breakage in a mixer settler", *Industrial Engineering Chemical. Research*, vol. 41, No 22, (2002).
- [9] Taejun Ok, Shinichi Ookwara, Shiro Oyoshikawa and Kohei Ogawa, "Drop Size Distribution in Liquid-Liquid Mixing", *Journal of Chemical Engineering of Japan* Vol. 36, No. 8, pp. 940-945, (2003).
- [10] C. Desnoyer, O. Masbernat, C. Gourdon, "Experimental study of drop size distributions at high phase ratio in liquid-liquid dispersions", *Chemical Engineering Science* 58, 1353 – 1363, (2003).
- [11] M. M. M. Ribeiro, M. M. L. Guimaraes, C. M. N. Madureira, J.J.C. Cruz Pinto, "Non-invasive system and procedures for the characterization of liquid-liquid dispersions", *Chemical Engineering Journal* 97, 173-182, (2004).
- [12] A. Giapos, C. Pachatouridis, M. Stamatoudi, "Effect of the number of impeller blades on the drop sizes in agitated dispersions", *Chemical Engineering Research Des.* 83 (A12), 1425–1430, (2005).
- [13] A. W. Pacek, S. Chamsart, A. W. Nienow and A. Bakker, "The influence of impeller type on mean drop size and drop size distribution in an agitated vessel", *Chemical Engineering Science*, 54, (1999).
- [14] D. Sechremeli, A. Stampouli, M. Stamatoudis, "Comparison of mean drop sizes and drop size distributions in agitated liquid-liquid dispersions produced by disk and open type impellers", *Chemical Engineering Journal* 117, 117-122, (2006).
- [15] D.E. Brown and K. Pitt, "Effect of impeller geometry on drop break-up in a stirred liquid-liquid contactor", *Chemical Engineering Science*. 29, p. 345, (1974).
- [16] D. Douglas and M. Stamatoudis, "Effect of Impeller Vertical Position on Drop Sizes in Agitated Dispersions", *Chemical Engineering Technol.* 23, p. 43, (2000).
- [17] R.V. Calabrese, T.P.K. Chang, P.T. Dang, "Drop breakup in turbulent stirred tank contactors, Part-I: effect of dispersed phase viscosity", *AIChEJ.* 32, 657–666, (1986).
- [18] A.W. Nienow\*, "Break-up, coalescence and catastrophic phase inversion in turbulent contactors", *Advances in Colloid and Interface Science* 108–109, 95–103, (2004).
- [19] J. A. Wieringa, F. Van Dieren, J. J. M. Janssen & W. G. M. Agterof, "Droplet breakup mechanisms during emulsification in colloid mills at high dispersed phase volume fraction", *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 74A, 554–562, (1996).
- [20] S. Kumar, V. Ganvir, C. Satyanand, R. Kumar and K.S. Gandhi, "Alternative mechanisms of drop breakup in stirred vessels", *Chemical Engineering Science*, Vol. 53, No. 18, (1998).
- [21] S. Kumar, R. Kumar, & K. S. Ghandi, "Alternative mechanisms of drop breakage in stirred vessels". *Chemical Engineering Science*, 46 (10), 2483–2489, (1991).
- [22] A. M. boye, M-Y. A. lo and P. ayazi shamlou, "The Effect of Two-Liquid Phase Rheology on Drop Breakage Mechanically stirred Vessels", *Chemical Engineering Commercial*. Vol. 143, pp. 149-167, (1996).
- [23] M. Balmelli, L. Steiner, S. Hartland, "Behaviour of turbulent dispersions in a stirred single-stage cell", *Chemical Engineering Science*, 55, (2000).
- [24] T. Lemenand, D. Della Valle, Y. Zellouf, H. Peerhossaini, "Droplets formation in turbulent mixing of two immiscible fluids in a new type of static mixer", *International Journal of Multiphase Flow* 29, 813–840, (2003).
- [25] J. C. Godfrey & M. J. Slater (1994). "Liquid-liquid extraction" equipment. New York: Wiley.
- [26] Liang-Huei Chen, Yuh-Lang Lee, "The effects of a surfactant on the mass transfer in spray-tower extraction column", *Chemical Engineering Journal* 73, (1999).
- [27] D. Agble, M.A. Mendes-Tatsis, "The prediction of Marangoni convection in binary liquid-liquid systems with added surfactants", *Int. J. Heat Mass Transfer* 44, 1439-1449, (2001).
- [28] J.M. Lee; Y. Soong, "Effect of Surfactants on the liquid-liquid dispersions in agitated vessels". *Industrial Engineering Chemical Process Des. Dev.*, 24, 118-121, (1985).
- [29] Slavka Tcholakova, Nikolai D. Denkov, and Thomas Danner, "Role of surfactant type and concentration for the mean drop size during emulsification in turbulent flow", *Langmuir*, Vol. 20, No. 18, (2004).
- [30] K.K. Singh, S.M. Mahajani, K.T. Shenoy, S.K. Ghosh., "Representative drop sizes and drop size distributions in A/O dispersions in continuous flow stirred tank", *Hydrometallurgy* xx (2007) xxx-xxx.
- [31] G. Zhou and S. M. Kresta, "Correlation of mean drop size and minimum drop size with the turbulence energy dissipation and the flow in an agitated tank", *Chemical Engineering Science*, Vol. 53, No. 11, (1998).