

# بررسی تأثیر غلظت جزء منتقل شونده بر اندازه‌ی قطره‌ها در دستگاه مخلوط کن - ته نشین کن و ارایه مدل ریاضی

مریم ظاهری\*<sup>+</sup>، حسین ابوالقاسمی

تهران، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی شیمی، صندوق پستی ۴۵۶۳ - ۱۱۳۶۵

محمد فنادی مراغه

تهران، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی ۱۴۸۶ - ۱۱۳۶۵

پریسا ظاهری

تهران، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی شیمی، صندوق پستی ۴۵۶۳ - ۱۱۳۶۵

**چکیده:** در این کار آزمایشگاهی، اثر حضور جزء منتقل شونده بر میانگین اندازه قطره‌ها در استخراج مایع - مایع مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، دو سری آزمایش در یک دستگاه مخلوط کن - ته نشین کن افقی با امولسیون تولوئن - آب انجام شده است. در سری اول آزمایش‌ها، اثر دور همزن و ماندگی بر میانگین اندازه قطره‌ها در غیاب جزء منتقل شونده (استن) و در سری دوم آزمایش‌ها، این اثرها در حضور جزء منتقل شونده بررسی شده است. نتیجه‌ها نشان می‌دهند در شرایط هیدرودینامیکی ثابت، اندازه‌ی قطره‌ها با افزایش غلظت جزء منتقل شونده کم می‌شوند. همچنین نرخ کاهش قطر میانگین ساتر با افزایش دور همزن کاهش می‌یابد. برای غلظت‌های مختلف جزء منتقل شونده، یک مدل ریاضی کلی برای قطر میانگین ساتر ارایه شده است. این مدل همخوانی خوبی با نتیجه‌های آزمایشگاهی دارد.

**واژه‌های کلیدی:** مخلوط کن - ته نشین کن، میانگین اندازه‌ی قطره‌ها، جزء منتقل شونده، دور همزن، ماندگی.

**KEY WORDS:** Mixer-Settler, Mean drop size, Solute, Impeller speed, Hold-up.

## مقدمه

با عبور قطره‌های فاز پراکنده از میان فاز پیوسته، آشفته‌گی ایجاد شده در دو فاز، باعث افزایش ضریب انتقال جرم می‌شود. به‌دست آوردن میزان انتقال جرم بین دو فاز مایع امتزاج ناپذیر، یکی از مسئله‌های مهم در فرایندهای استخراج است. میزان انتقال جرم در ظرف‌های همزن دار تحت تأثیر پارامترهای گوناگونی مانند

دستگاه‌های استخراج کاربرد فراوانی در عملیات انتقال جرم مایع - مایع دارند. مخلوط کن - ته نشین کن تک مرحله‌ای کوچک‌ترین دستگاه استخراج پیوسته‌ای است که می‌توان با آن کار کرد. در این دستگاه‌ها، به منظور افزایش سطح انتقال جرم دو فاز، یک فاز به صورت قطره‌های ریزی درون فاز دیگر پراکنده می‌شود.

+E-mail: comet.zaheri@gmail.com

\*عهده دار مکاتبات

بر طبق نتیجه‌های تجربی قطر میانگین ساتر از این نظریه پیروی می‌کند و با توان ۰٫۶- به عدد وبر وابسته است:

$$\frac{D_{33}}{D} \propto (We)^{-0.6}, \quad We = \frac{\rho_c N^2 D^3}{\sigma} \quad (2)$$

در این معادله  $D_{33}$  قطر میانگین ساتر،  $D$  قطر همزن،  $\sigma$  کشش بین سطحی،  $\rho_c$  چگالی فاز پیوسته و  $N$  دور همزن می‌باشد. این رابطه برای تعداد زیادی از سیستم‌های مایع - مایع و سیستم‌های بدون ائتلاف بررسی شده است. بیشترین روابط گزارش شده برای قطر میانگین ساتر به شکل زیر است:

$$\frac{D_{33}}{D} = C_1 f(\phi) (We)^{-0.6} \quad (3)$$

$\phi$  ماندگی (موجودی فاز پراکنده) می‌باشد [۸ - ۶]. اثر ماندگی بر قطر میانگین ساتر مورد بررسی قرار گرفته است که نتیجه‌ها نشان می‌دهند که اندازه‌ی قطره‌ها به صورت خطی به ماندگی وابسته است:

$$\frac{D_{33}}{D} = C_1 (1 + C_2 \phi) We^{-0.6} \quad (4)$$

در این رابطه  $C_1$  و  $C_2$  عددهایی ثابت می‌باشند [۹، ۱۰]. مدل‌های زیادی برای پیش‌بینی اندازه قطره‌ها در مخازن همزن‌دار ارائه شده است که تعدادی از این مدل‌ها در جدول ۱ آورده شده است. بیشتر مدل‌های به‌دست آمده برای سیستم‌های مایع - مایع ناپیوسته می‌باشند و تنها تعداد کمی از آنها برای حالت پیوسته ارائه شده‌اند.

در کار انجام شده اثر حضور جزء منتقل شونده بر میانگین اندازه‌ی قطره‌ها در یک دستگاه مخلوط‌کن - ته‌نشین‌کن پیوسته انجام شده است. همچنین پره مورد استفاده در این کار از نوع دو پره چهار تیغه‌ای بوده است که تا کنون در این ظرف‌های همزده استفاده نشده است.

بعد از بررسی اثر دور همزن و ماندگی بر میانگین اندازه قطره‌ها در حضور جزء منتقل شونده، یک مدل کلی بر حسب غلظت جزء منتقل شونده ارائه شده است.

### بخش تجربی

#### مواد شیمیایی استفاده شده

در آزمایش‌های انجام شده سیستم تولوئن - آب به‌عنوان فاز آلی - آبی انتخاب شده است که از تولوئن به‌عنوان فاز پراکنده و

ویژگی‌های فیزیکی مایعات، اندازه قطره‌ها و شرایط عملیاتی می‌باشد. بنابراین، پیش‌بینی اندازه‌ی قطره‌ها در پراکنندگی‌های مایع - مایع از اهمیت بالایی در فرایندهای استخراج برخوردار است. اندازه‌ی قطره‌ها به عوامل گوناگونی مانند هندسه‌ی پره، سرعت پره، محل پره در ظرف، نسبت فاز خوراک و خواص فیزیکی فازها بستگی دارد [۱].

پژوهش‌های زیادی برای بررسی میانگین اندازه‌ی قطره‌ها در سیستم‌های اختلاط انجام شده است که در کار کولولوگلو و تاوولاریدس و کومار به طور خلاصه آورده شده است. هافر و رسنیک اندازه‌ی قطره و ماندگی فاز پراکنده را در حضور جزء منتقل شونده و ماده فعال سطحی در سیستم‌های مایع - مایع همزده ناپیوسته مورد مطالعه قرار دادند [۳، ۲]. برخی پژوهشگران اثر کشش سطحی و جهت انتقال جرم بر روی اندازه قطره‌ها را مورد توجه قرار داده‌اند.

اسکلند و همکاران اثر ترکیبی ماده فعال سطحی و انتقال جرم و جهت آن را بر روی اندازه قطره‌ها آزمایش کردند [۴]. بن و همکاران اثر انتقال جرم بر رفتار کمی ائتلاف و شکست قطره‌ها را در سیستم تولوئن/ استن/ آب مورد بررسی قرار دادند. به‌طور کلی پژوهش‌های زیادی برای بررسی اثر انتقال جرم و یا حضور ماده فعال سطحی و یا اثر هر دوی آنها بر روی اندازه قطره‌ها انجام نشده است [۵].

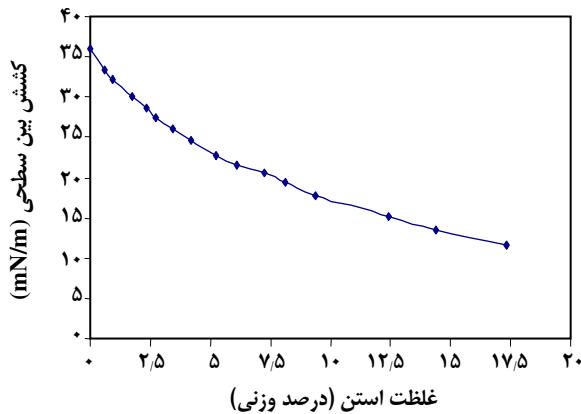
برای مطالعه‌ی اندازه قطره‌ها برای کاربردهای گوناگون، انواع متفاوتی از قطر میانگین تعریف شده است. از میان همه قطرهای میانگین تعریف شده قطر میانگین ساتر یا حجم - سطح،  $D_{33}$  کاربرد فراوانی دارد. دلیل مهم بودن قطر میانگین ساتر این است که سطح واحد حجم یا جانبی ویژه قطره‌ها،  $a$ ، را به نرخ‌های انتقال انرژی، انتقال جرم و واکنش شیمیایی مربوط می‌کند. قطر میانگین ساتر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D_{33} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i d_i^3}{\sum_{i=1}^k n_i d_i^2} \quad (1)$$

مطالعه‌های زیادی بر روی اثر شرایط هیدرودینامیکی بر روی اندازه قطره‌ها انجام شده است که همه این مطالعه‌ها بر پایه تئوری هینزه - کولموگروف استوار است. بر طبق این نظریه بزرگ‌ترین قطره‌های پایدار در امولسیون‌ها با توان ۰٫۴- به میانگین از بین رفتن انرژی در ظرف اختلاط و یا با توان ۱٫۲- به سرعت همزن وابسته است.

جدول ۱- رابطه‌های ارایه شده توسط بعضی از محققان برای قطر میانگین ساتر ( $D_{32}$ ) [۱۴ - ۱۱، ۷].

محدوده ماندگی	نوع پره	روابط	محققان
۰/۱	توربینی مسطح	$D_{32}/D = 0.118\phi^{0.27} (\mu_d/\mu_c)^{-0.56} (We)^{-0.4}$	لسو و همکاران (۱۹۷۹ میلادی)
۰/۰۱	توربینی ۶ پره	$D_{32}/D = 0.045(\pm 0.003)(We)^{-0.6}$	چاتزری و همکاران (۱۹۹۱ میلادی)
۰/۱-۰/۰۶	۴ پره با زوایای ۴۵ درجه	۱) $D_{32}/D = 0.28We^{-0.6}(1+0.92\phi)$ ۲) $D_{32}/D = 0.14We^{-0.6}(1+0.48\phi)$ ۳) $D_{32}/D = f(\phi)We^{-n(\phi)/2}$	دسنویر و همکاران (۲۰۰۳ میلادی)
۰/۰۶۱-۰/۱۶۶	دو و چهار تیغه‌ای	۱) $D_{32} = 6\phi \left\{ 1 + \left( \frac{c_1}{We\phi} \right)^2 \right\} (c_2\phi^2 + c_3\phi)$ ۲) $D_{32}/D = 0.336We^{-0.6}(1+13.76\phi)$ ۳) $D_{32}/D = 0.286We^{-0.6}(1+13.24\phi)$	کوادروس و باپتیسا (۲۰۰۳ میلادی)
۰/۳-۰/۰۶	حلزونی	۱) $D_{32}/D = 0.453(1+0.612\phi) \left( 1 + 2215.377 \left( \frac{D_{32}}{D} \right)^{1.828} \right) We^{-0.63}$ ۲) $D_{32}/D = 0.467(1+0.224\phi) \left( 1 + 27176.97 \left( \frac{D_{32}}{D} \right)^{1.926} \right) We^{-0.59}$	خاکپای و همکاران (۲۰۰۸ میلادی)



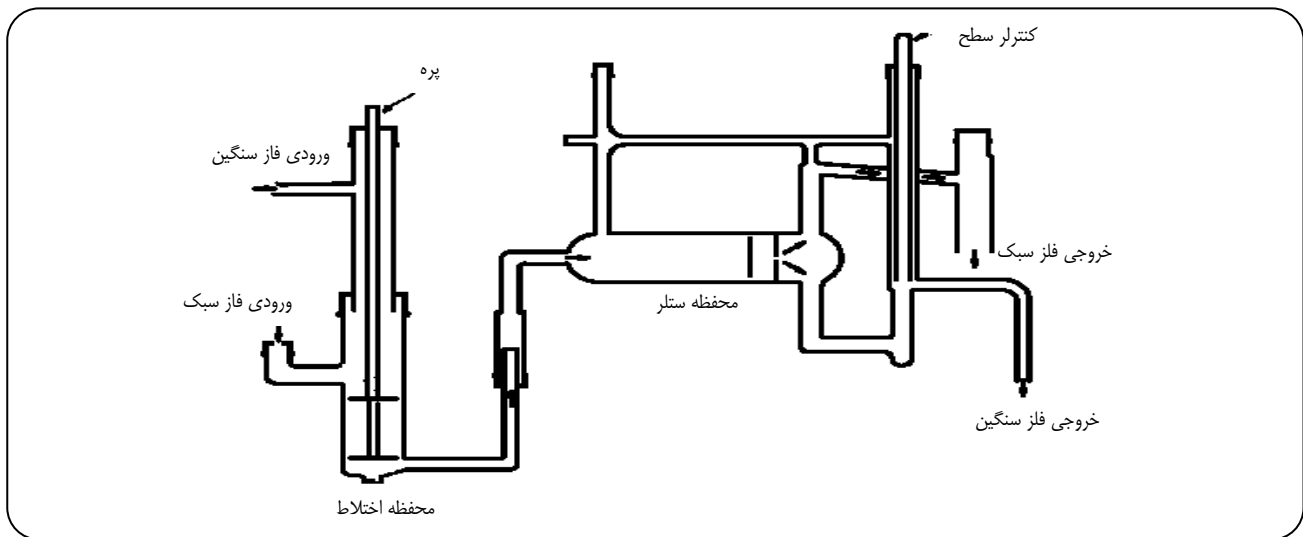
شکل ۱- تغییرهای کشش بین سطحی تولوئن - آب در حضور استن.

جدول ۲- ویژگی‌های مواد شیمیایی مورد استفاده [۱۵].

ماده شیمیایی	ویسکوزیته (mPa.s)	دانسیته (kg/m <sup>۳</sup> )	خلوص (%)
آب مقطر	۰.۹۶	۹۹۶	>۹۹
تولوئن	۰.۵۷	۸۷۰	>۹۹
استن	۰.۳	۷۹۰	>۹۹

کشش سطحی دیجیتال کروس مدل k10T اندازه‌گیری شده است. نتیجه‌های به‌دست آمده بر حسب غلظت استن در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود با افزایش غلظت استن، کشش بین سطحی کاهش می‌یابد، به طوری که

از آب مقطر به‌عنوان فاز پیوسته استفاده شده است. همچنین از استن به‌عنوان ماده حل شونده در فاز پراکنده استفاده شده است. ویژگی‌های مواد شیمیایی استفاده شده در جدول ۲ آورده شده است. کشش بین سطحی دو فاز با استفاده از یک دستگاه اندازه‌گیر



شکل ۲- شمای کلی از مخلوط کن - ته نشین کن مورد استفاده.

جدول ۳- ویژگی‌های مخلوط کن - ته نشین کن مورد استفاده.

مشخصه	نوع و مقدار
ظرفیت حجمی محفظه اختلاط	۲۰۰ میلی لیتر
قطر داخلی محفظه اختلاط	۴ سانتی متر
قطر همزن	۲۲/۷۳ میلی متر
نوع همزن	دو پره ۴- تیغه ای
طول ته نشین کننده	۱۹/۵ سانتی متر
ظرفیت حجمی ته نشین کننده	۲۵۰ میلی لیتر

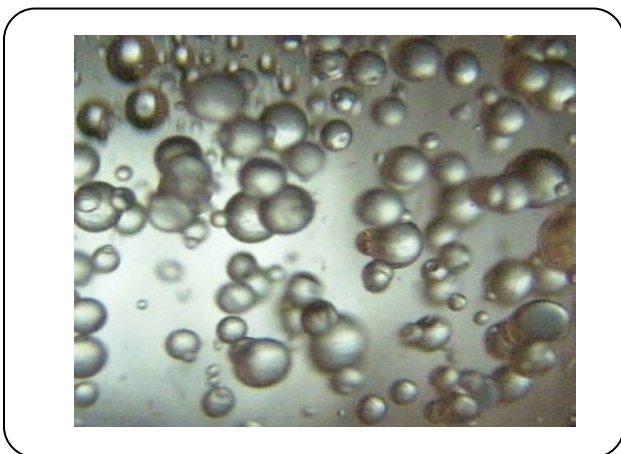
با افزایش غلظت استن تا ۶ درصد وزنی، کشش بین سطحی تا ۳۸ درصد کاهش می‌یابد.

### مشخصات دستگاه مورد استفاده و روش انجام آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها از یک دستگاه مخلوط کن - ته‌نشین کن تک مرحله‌ای پیوسته استفاده شده است. همزن مورد استفاده از نوع دو پره ۴ تیغه ای می باشد که تیغه های آن به فاصله معینی از هم قرار گرفته‌اند. جنس تمام مراحل از شیشه بوده و همه‌ی مرحله‌های آزمایش به‌طور کامل قابل دیدن می باشند. شمای کلی مخلوط کن - ته نشین کن مورد استفاده در شکل ۲ و ویژگی‌های هندسی آن در جدول ۳ ارایه شده است.

پمپ مورد استفاده، ساخت شرکت فیشر آلمان بوده و از نوع پالسی است و خطای آن حدود  $\pm 0.2\%$  میلی لیتر در ثانیه می‌باشد. کنترل کننده دور همزن مورد استفاده نیز ساخت شرکت فیشر آلمان می‌باشد و دور آن به‌طور دیجیتالی قابل تغییر می‌باشد.

پیش از انجام آزمایش‌ها، آب و تولوئن به‌طور کامل در یکدیگر اشباع می‌شوند تا از انتقال جرم بین آنها و اثر احتمالی آن بر نتیجه‌ها جلوگیری شود. به منظور انجام آزمایش‌ها، ابتدا همه‌ی مرحله‌ها را از فاز پیوسته پر کرده و سپس مخلوط کن و پمپ مربوط به فاز پراکنده را روشن کرده و با کنترل کردن سطح فصل مشترک در ته نشین کن، کل مراحل پایدار می‌شوند. منظور از پایدار کردن مرحله‌ها در حقیقت کنترل و ثابت نگه داشتن مکان فصل مشترک دو فاز در ته نشین کن می باشد.



شکل ۳- نمونه‌ای از عکس‌های گرفته شده از خروجی مخلوط‌کن.

جدول ۴- محدوده متغیرها برای انجام آزمایش‌ها.

محدوده دبی فاز پیوسته (mL/s)	محدوده دبی فاز پراکنده (mL/s)	غلظت استن (W%)	دور همزن	ماندگی	
۱-۱٫۵	۰٫۶-۰٫۹	۰	۶۰۰-۸۰۰	۰٫۲۷-۰٫۳۳	سری اول
۱-۱٫۵	۰٫۶-۰٫۹	۲-۶	۶۰۰-۸۰۰	۰٫۲۷-۰٫۳۳	سری دوم

میانگین ساتر، دو سری آزمایش‌ها انجام شده است. در سری اول، میانگین اندازه قطره‌ها در غیاب جزء منتقل شونده مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها در سه ماندگی و پنج دور همزن متفاوت انجام شده است. در سری دوم، میانگین اندازه قطره‌ها در حضور چهار غلظت مختلف استن مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها در سه ماندگی و پنج دور همزن متفاوت انجام شده است. در سری اول ۱۵ آزمایش و در سری دوم ۶۰ آزمایش انجام شده است. محدوده پارامترهای آزمایش‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است. آزمایشگاه مجهز به یک دستگاه تهویه هوا برای کنترل دما می‌باشد و دمای آزمایشگاه در حدود  $25^{\circ}\text{C}$  برای همه آزمایش‌ها ثابت نگه داشته شده است.

### نتیجه‌ها و بحث

#### اثر غلظت استن بر قطر میانگین ساتر

شکل‌های ۴، ۵ و ۶ اثر غلظت استن بر قطر میانگین ساتر را در سه ماندگی مختلف برای پنج دور همزن مختلف نشان می‌دهند. همان‌گونه که دیده می‌شود اندازه قطره‌ها با افزایش غلظت استن کاهش می‌یابد. یکی از پارامترهایی که اندازه قطره‌ها به آن وابسته است کشش بین سطحی می‌باشد. با کاهش کشش بین سطحی، قطره‌های بزرگتر به راحتی شکسته و به قطره‌های کوچکتر تبدیل می‌شوند که نتیجه آن کوچکتر شدن قطر میانگین ساتر است. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد (شکل ۱)، هنگامی که استن به سیستم اضافه می‌شود کشش بین سطحی کاهش یافته و اندازه قطره‌ها کوچکتر می‌شود.

#### اثر دور همزن بر قطر میانگین ساتر

شکل ۷ تأثیر لگاریتم دور همزن بر قطر میانگین ساتر را در سه ماندگی مختلف و در حضور و در نبود استن نشان می‌دهد. نتیجه‌ها نشان می‌دهند که وقتی قطر میانگین ساتر بر حسب دور همزن برای غلظت‌های مختلف استن رسم می‌شود، منحنی‌ها روند مشابهی دارند. بنابراین منحنی‌ها در ۶ درصد وزنی استن رسم شده‌اند و نتیجه‌ها در شکل ۷ گزارش شده است.

برای اندازه‌گیری قطر قطره‌های داخل مخلوط کن، با استفاده از یک دوربین دیجیتالی سونی هشت مگا پیکسل مدل DSC-F828 با سرعت  $1/2000$  ثانیه و با به کارگیری لنز ماکرو، عکس‌های زیادی از قطره‌ها در خروجی مخلوط‌کن در حالت پایدار گرفته شده است. شکل ۳ نمونه‌ای از عکس‌های گرفته شده را نشان می‌دهد. در این کار پژوهشی ماندگی متوسط هر مرحله برای انجام محاسبه‌ها استفاده شده است و برای اندازه‌گیری آن در پایان هر آزمایش پمپ‌ها و مخلوط‌کن به‌طور همزمان خاموش شده و به کمک یک پمپ مکش دو فاز از هر مرحله تخلیه شده و سپس نسبت حجم فاز پراکنده به حجم کل طبق معادله ۵ محاسبه شده است. که بدین روش میزان ماندگی در هر آزمایش به دست آمده است.

$$\phi = \frac{V_o}{V_o + V_w} \quad (5)$$

$V_o$  حجم فاز آلی و  $V_w$  حجم فاز آبی می‌باشد.

از آنجایی که هر سری از آزمایش‌ها در نسبت دبی حجمی یکسان از دو فاز پیوسته و پراکنده انجام شده است و در این نسبت ثابت دور همزن تغییر یافته و اندازه‌گیری‌ها انجام شده است، در نتیجه ماندگی متوسط هر مرحله به تقریب ثابت می‌باشد، چون نسبت حجمی دو فاز ثابت است.

برای اندازه‌گیری قطر قطرات، عکس‌های گرفته شده توسط نرم افزار Auto CAD آنالیز شده‌اند. از یک روش ساده برای اندازه‌گیری قطر قطره‌ها استفاده شده است. در این روش، در ابتدا از قطره‌ها عکسبرداری شده است. سپس اندازه واقعی قطره‌ها با مقایسه اندازه قطره‌ها با یک مقیاس واقعی، که در اینجا قطر خروجی محفظه میکسر می‌باشد، به دست می‌آید. اندازه‌گیری‌ها توسط نرم افزار Auto CAD انجام شده است. بعد از اندازه‌گیری قطر همه قطرات، قطر میانگین ساتر با استفاده از معادله (۱) محاسبه شده است.

### شرایط عملیاتی

به منظور مطالعه‌ی تأثیر غلظت جزء منتقل شونده بر قطر

همان گونه که اشاره شد، برای امولسیون مایع - مایع که دارای سورفکتانت و یا جزء منتقل شونده نباشد، قطر میانگین ساتر با توان ۱/۲ - دور همزن متناسب است [۱۴]. شکل ۷ نشان می‌دهد که با افزودن استن به سیستم، به دلیل کاهش کشش بین سطحی، نرخ کاهش قطر میانگین ساتر با افزایش دور همزن نسبت به حالت بدون استن کاهش می‌یابد و شیب نمودار از ۱/۲۵ - (مقدار میانگین در شکل ۷ برای حالت بدون استن) به ۱/۰۷ - (مقدار میانگین در شکل ۷ برای حالت بدون استن) افزایش می‌یابد.

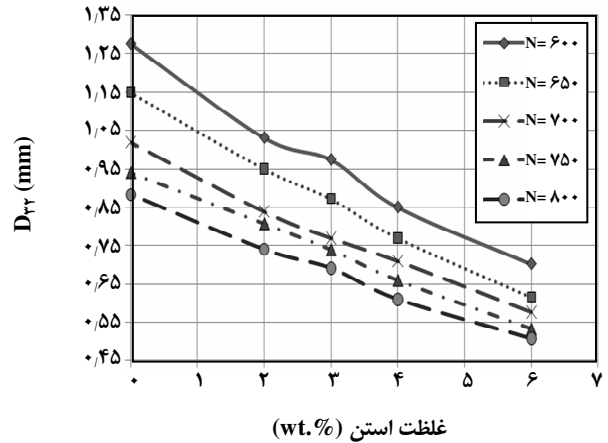
نتیجه‌ها نشان می‌دهد که برای سیستم حاوی استن، مقدار توان دور همزن ۱۴ درصد نسبت به حالت بدون استن افزایش می‌یابد. بنابراین مشاهده می‌شود انحراف از نظریه هینزه کلموگروف در حضور استن بسیار کم است.

#### اثر ماندگی بر قطر میانگین ساتر

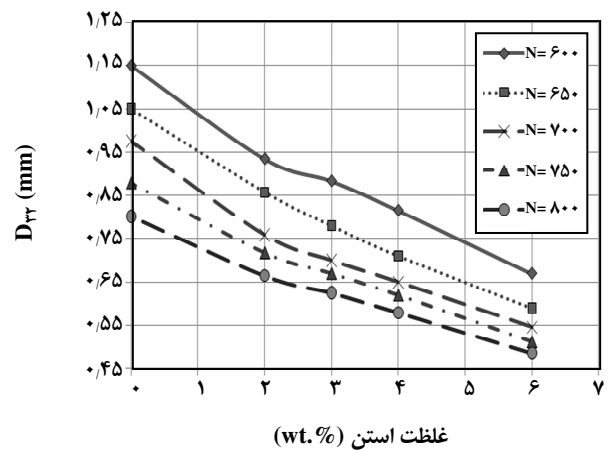
شکل‌های ۸ و ۹ تأثیر ماندگی بر قطر میانگین ساتر را در پنج دور همزن مختلف و در حضور و عدم حضور استن نشان می‌دهند. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که وقتی قطر میانگین ساتر بر حسب ماندگی برای غلظت‌های مختلف استن رسم می‌شود، منحنی‌ها روند مشابهی دارند. بنابراین منحنی در ۶ درصد وزنی استن رسم شده و نتیجه‌ها در شکل ۹ گزارش شده است.

زمانی که امولسیون مایع - مایع حاوی جزء منتقل شونده نباشد، افزایش ماندگی منجر به افزایش قطر میانگین ساتر می‌شود و این افزایش به تقریب خطی است (شکل ۸). افزایش ماندگی در سیستم، ائتلاف قطره‌ها در محفظه اختلاط را افزایش می‌دهد، و در نتیجه تعداد قطرات بزرگ در محفظه اختلاط افزایش می‌یابد. نتیجه‌های مشابهی توسط مسبرانت و همکاران به دست آمده است [۱۱].

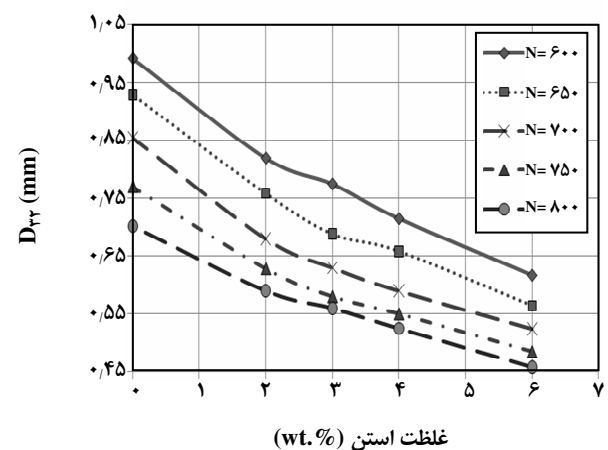
با افزودن استن به سیستم، افزایش ماندگی منجر به کاهش نرخ افزایش قطر میانگین ساتر می‌شود (شیب خطوط در شکل ۹). زیرا با حضور استن، ائتلاف قطره‌ها کاهش می‌یابد و در نتیجه اندازه قطره‌ها کوچکتر می‌شود. همچنین، کشش بین سطحی در این شرایط کمتر است و قطره‌ها به راحتی شکسته می‌شوند. شیب خطها در شکل ۹ با شیب قطر میانگین ساتر بر حسب ماندگی برای حالت بدون استن مقایسه شده است. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که برای سیستم حاوی استن، شیب قطر میانگین ساتر بر حسب ماندگی حدود ۷۳ درصد در مقایسه با حالت بدون استن کاهش می‌یابد.



شکل ۴- تغییرهای قطر میانگین ساتر بر حسب غلظت استن در  $\phi = 0.3253$ .



شکل ۵- تغییرهای قطر میانگین ساتر بر حسب غلظت استن در  $\phi = 0.3030$ .



شکل ۶- تغییرهای قطر میانگین ساتر بر حسب غلظت استن در  $\phi = 0.2738$ .

### مدلسازی اندازه قطره‌ها

مدلسازی اندازه قطره‌ها در دو حالت گوناگون انجام شده است. در حالت اول مدلسازی اندازه قطره‌ها با نتیجه‌های آزمایشگاهی که بدون حضور استن به دست آمده است، انجام شده است. در حالت دوم مدلسازی اندازه قطره‌ها با نتیجه‌های آزمایشگاهی که در حضور چهار غلظت مختلف استن به دست آمده، انجام شده است. برای مدل‌سازی اندازه قطره‌ها از شکل معادله (۴) استفاده شده است.

### مدلسازی اندازه قطرات در حالت بدون استن

در این حالت برای به دست آوردن ثابت‌های  $C_1$  و  $C_2$  معادله از نرم افزار Eviews و روش حداقل مربعات استفاده شده است. نتیجه‌های به دست آمده در جدول ۵ نشان داده شده است. مطابق با ثابت‌های به دست آمده، شکل مدل در این حالت به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{D_{rr}}{D} = 0.285(1 + 44.99\phi) We^{-0.6} \quad (6)$$

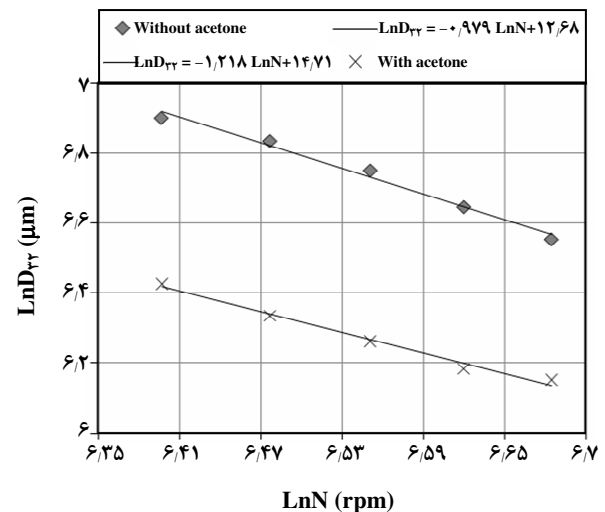
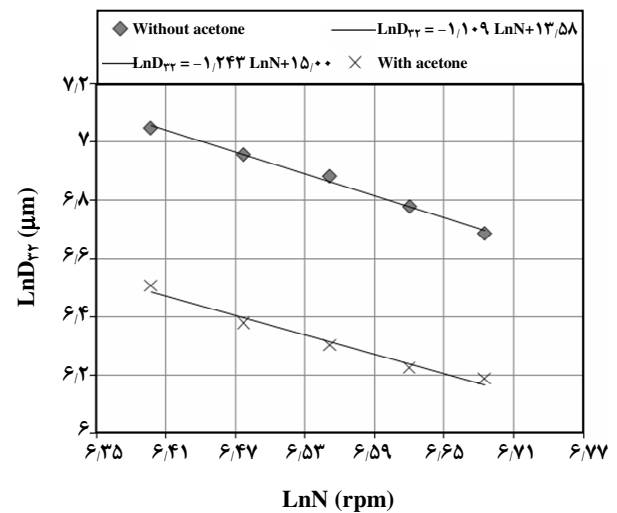
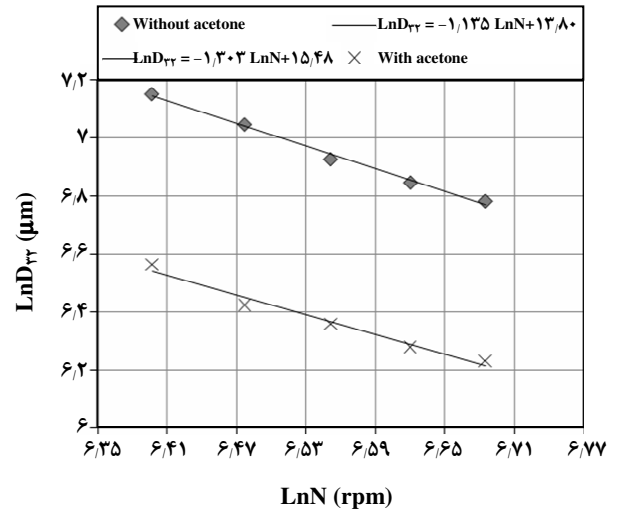
به منظور بررسی صحت مدل به دست آمده، مقدار متوسط خطای نسبی مطلق (AARD%) به کمک رابطه زیر محاسبه شده است.

$$\%AARD = \frac{1}{NE} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\left(\frac{D_{rr}}{D}\right)_i^{exp} - \left(\frac{D_{rr}}{D}\right)_i^{model}}{\left(\frac{D_{rr}}{D}\right)_i^{exp}} \right| \times 100 \quad (7)$$

NE تعداد آزمایش‌ها،  $(D_{rr})_{exp}$  قطر میانگین ساتر اندازه گیری شده در آزمایش‌ها و  $(D_{rr})_{model}$  قطر میانگین ساتر به دست آمده از مدل می‌باشد.

مقدار AARD% به دست آمده در این حالت برابر با ۲/۱۲ بوده است که نشان دهنده تطابق خوب نتیجه‌های آزمایشگاهی با مدل به دست آمده می‌باشد.

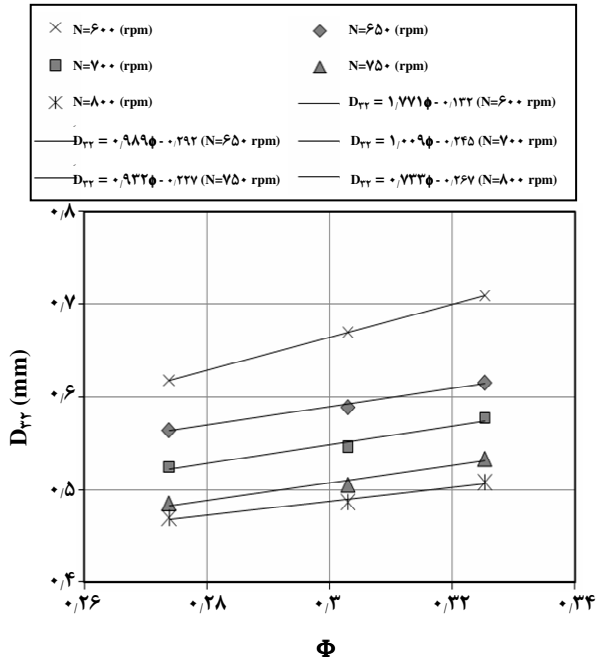
علاوه بر این، تغییرهای قطر میانگین ساتر به دست آمده از معادله (۶) بر حسب تغییرهای قطر میانگین ساتر به دست آمده از نتیجه‌های آزمایشگاهی در شکل ۱۰ رسم شده است. همان‌گونه که از این شکل نیز قابل مشاهده است نقاط روی شکل به خط نیمساز خیلی نزدیک هستند و نتیجه‌های به دست آمده از مدل تطابق قابل قبولی با نتیجه‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهند که با توجه به مقدار AARD% نیز قابل پیش‌بینی بود.



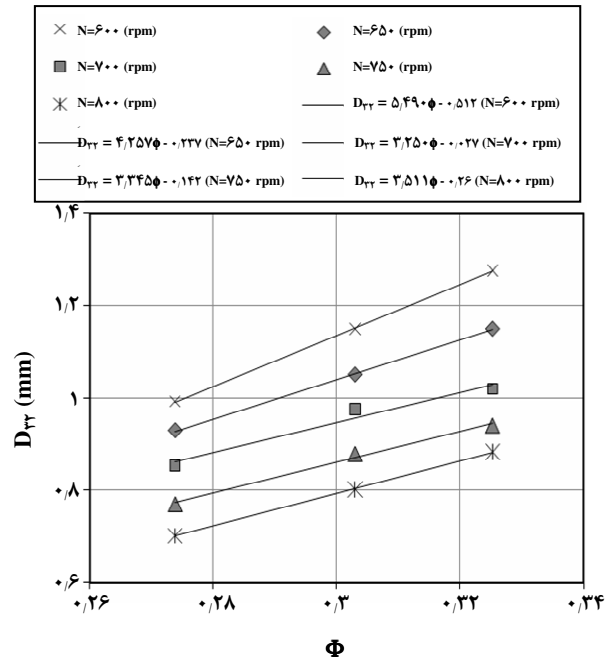
شکل ۷- تأثیر لگاریتم دور همزن بر لگاریتم قطر میانگین ساتر در (الف)  $\phi=0.3253$  (ب)  $\phi=0.303$  (ج)  $\phi=0.2738$ .

جدول ۵ - نتیجه‌های به‌دست آمده برای حالت بدون استن.

$R^2$	AARD%	$C_2$	$C_1$	بدون حضور استن
۰/۹۸	۲/۱۲	۴۴/۹۹	۰/۰۲۸۵	



شکل ۹- تاثیر ماندگی بر قطر میانگین ساتر در حضور ۶ درصد وزنی استن.



شکل ۸ - تاثیر ماندگی بر قطر میانگین ساتر در غیاب استن.

که می‌تواند دلیل دیگری برای اختلاف بین نتیجه‌های آزمایشگاهی با این دو مدل باشد.

### مدلسازی اندازه قطره‌ها در حضور استن

در این حالت مدلسازی اندازه قطره‌ها با نتیجه‌های آزمایشگاهی که در حضور چهار غلظت مختلف استن به‌دست آمده، انجام شده است. بدین منظور شکل کلی معادله به‌صورت معادله (۴) در نظر گرفته شده است تا اثر افزایش استن به سیستم در ثابت‌های  $C_2$  و  $C_3$  دیده شود. مقادیرهای  $C_2$  و  $C_3$  با استفاده از نرم افزار Eviews و روش حداقل مربعات به‌دست آمده است. مطابق با ثابت‌های به‌دست آمده، شکل مدل در این حالت به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{D_{37}}{D} = 0.248(1 + 42.5\phi)We^{-0.6} \quad (8)$$

به منظور بررسی صحت مدل به‌دست آمده، مقدار متوسط خطای نسبی مطلق (AARD%) محاسبه شده و نتیجه‌های آن

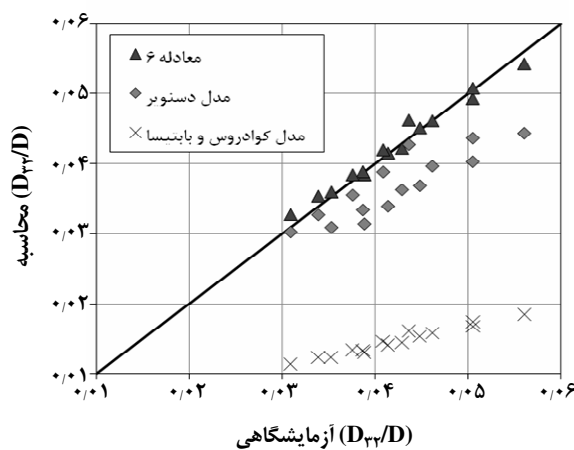
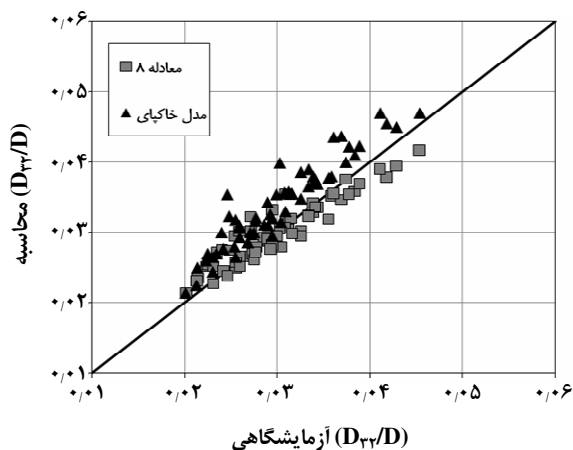
نتیجه‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده در این حالت با مدل دسنویر و مدل کولدروس و باپتیسسا مقایسه شده است (این دو مدل در جدول ۱ آورده شده است). نتیجه‌های به‌دست آمده از این مقایسه در شکل ۱۰ و AARD% به‌دست آمده در جدول ۶ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۱۰ نقاط در مدل دسنویر به خط نیمساز نزدیک‌ترین مقدارهای AARD% در جدول ۶ نشان می‌دهند که نتیجه‌های آزمایشگاهی تطابق خوبی با مدل دسنویر در مقایسه با مدل کولدروس و باپتیسسا دارند که دلیل آن را می‌توان نزدیک بودن شرایط آزمایشگاهی دسنویر از نظر بازه‌ی هلدآپ و ویژگی‌های فیزیکی سیستم به سیستم مورد استفاده در این پژوهش دانست. وجود خطای به نسبت بالای نتیجه‌های آزمایشگاهی با مدل کولدروس و باپتیسسا به دلیل کاربرد این مدل برای هلدآپ‌های پایین می‌باشد همچنین نوع همزن مورد استفاده برای آزمایش‌های دسنویر از نوع چهار پره ای مورب با زاویه ۴۵ درجه و برای آزمایش‌های کولدروس و باپتیسسا از نوع پره مستقیم با ۲ یا ۴ پره می‌باشد



جدول ۶- مقایسه نتیجه‌های آزمایشگاهی در حالت بدون استن با مدل‌های دسنویر و کوادروس.

رابطه	AARD%
دسنویر	۱۲٫۳
کوادرورس و باپتیسا	۶۵٫۲



شکل ۱۱- مقایسه قطر میانگین ساتر به دست آمده از نتیجه‌های آزمایشگاهی با قطر میانگین ساتر به دست آمده از مدل‌ها در حضور استن.

شکل ۱۰- مقایسه قطر میانگین ساتر به دست آمده از نتیجه‌های آزمایشگاهی با قطر میانگین ساتر به دست آمده از مدل‌ها.

به دلیل استفاده از پره حلزونی قطره‌های بزرگتری در دستگاه داشته‌اند. دلیل دیگر این اختلاف وجود ماده فعال سطحی در امولسیون مورد آزمایش خاکپای و همکاران می‌باشد.

در جدول ۷ آورده شده است. با توجه به مقدارهای به دست آمده، نتیجه‌های آزمایشگاهی تطابق خوبی با مدل به دست آمده دارند. علاوه بر این تغییرات قطر میانگین ساتر به دست آمده از معادله ۸ بر حسب تغییرات قطر میانگین ساتر به دست آمده از نتیجه‌های آزمایشگاهی در شکل ۱۱ رسم شده است. همان‌گونه که از شکل نیز قابل مشاهده است نقاط بر روی شکل به خط نیمساز کاملاً نزدیک هستند.

### نتیجه‌گیری

- با افزایش غلظت استن میانگین اندازه قطرات کاهش می‌یابد که دلیل آن کاهش کشش بین سطحی می‌باشد. به‌طور کلی با افزایش ۶ درصد وزنی استن، میانگین اندازه قطره‌ها حدود ۴۱ درصد کاهش می‌یابد.
- با افزایش دور همزن در ماندگی ثابت، در حضور و بدون حضور استن قطر میانگین ساتر کاهش می‌یابد. ولی در حضور استن نرخ کاهش قطر میانگین ساتر کاهش می‌یابد و شیب لگاریتم قطر میانگین ساتر نسبت به دور همزن حدود ۱۴ درصد نسبت به حالت بدون استن افزایش می‌یابد.
- در حضور و عدم حضور استن، با افزایش ماندگی قطر میانگین ساتر افزایش می‌یابد و این افزایش به تقریب خطی است. در حضور استن، نرخ افزایش قطر میانگین ساتر حدود ۷۳ درصد کاهش می‌یابد.

از این مدل می‌توان برای پیش بینی اندازه‌ی قطره‌ها در سیستم‌هایی که خواص شیمیایی مشابهی با سیستم به کار برده شده دارند و مجهز به دو پره چهار تیغه‌ای می‌باشند، استفاده کرد. نتیجه‌های آزمایشگاهی به دست آمده در این حالت با مدل خاکپای و همکاران (این مدل در جدول ۱ آورده شده است) که با یک دستگاه میکسر - ستلر مشابه مجهز به پره ای از نوع حلزونی و در حضور ماده فعال سطحی آنیلین انجام شده، مقایسه شده است. نتیجه‌های حاصل از این مقایسه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به مقدار AARD% به دست آمده که برابر با ۲۹ می‌باشد می‌توان نتیجه گرفت خطای نسبتاً کمی بین مدل خاکپای و نتیجه‌های آزمایشگاهی وجود دارد. یکی از دلایل وجود خطا تفاوت در نوع پره مورد استفاده بوده است. خاکپای و همکاران

We	عدد وبر	● مدل ارایه شده برای قطر میانگین ساتر در غیاب جزء منتقل شونده، تطابق خوبی با نتیجه‌های آزمایشگاهی داشته و از تئوری هینزه کلموگروف پیروی می‌کند. مقایسه این مدل با مدل دسنویر خطای به نسبت کمی را نشان می‌دهد که دلیل آن نزدیک بودن شرایط آزمایشگاهی دسنویر از نظر بازه‌ی هلدآپ و ویژگی‌های فیزیکی به سامانه‌ی استفاده شده در این پژوهش می‌باشد.
$\phi$	ماندگی	● در حضور غلظت‌های مختلف استن، یک مدل کلی برای قطر میانگین ساتر ارایه شده است. مقدار AARD% برای این مدل ۵/۸ می‌باشد که نشان دهنده تطابق خوب مدل با نتیجه‌های آزمایشگاهی است. مقایسه این مدل با مدل خاکپای که در غلظت‌های مختلف ماده فعال سطحی آنیلین انجام شده، خطای به نسبت کمی را نشان می‌دهد.
$\sigma$	کشش سطحی، mN/m	
$\rho_c$	دانسیتیه فاز پیوسته، kg/m <sup>۳</sup>	
$\mu_d$	ویسکوزیته فاز پراکنده، Pa.s	
$\mu_c$	ویسکوزیته فاز پیوسته Pa.s	
AARD%	میانگین خطای مطلق نسبی	
$(D_{۳۳}/D)_{exp}$	قطر میانگین ساتر به قطر پره به دست آمده از آزمایش‌ها	
$(D_{۳۳}/D)_{model}$	قطر میانگین ساتر به قطر پره به دست آمده از مدل	
NE	تعداد آزمایش‌ها	
$C_1$	ضریب عددی	
$C_2$	ضریب عددی	
$C_3$	ضریب عددی	$D_{۳۳}$
$V_o$	حجم فاز آلی، mL	D
$V_w$	حجم فاز آبی، mL	$d_i$
		n
		N
		قطر میانگین ساتر، mm
		قطر پره، mm
		قطر قطره I، mm
		تعداد قطره‌ها با اندازه $d_i$
		دور همزن، rpm

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۹/۲۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۳/۱۷

### فهرست نمادها

### مراجع

- [1] Singh K.K., Mahajani S.M., Shenoy K.T., Ghosh S.K., Representative Drop Sizes and Drop Size Distributions in A/O Dispersions in Continuous Flow Stirred Tank, *Hydrometallurgy*, **90**, p. 121 (2008).
- [2] Hoffer M.S., Resnick W.A., Study of Agitated Liquid/Liquid Dispersions: Part I-Dynamic Response of Dispersion Geometry to Changes in Composition and Temperature, *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **57**, p. 1 (1979a).
- [3] Hoffer M.S., Resnick W.A., Study of Agitated Liquid/Liquid Dispersions: Part II-Dependence of Steady-State Dispersion Geometry on Phase Composition and Location, *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **57**, p. 8 (1979b).
- [4] Skelland A.H.P., S.Kanel Jeffrey, Transient Drop Size in Agitated Liquid-Liquid Systems, As Influenced the Direction of Mass Transfer and Surfactant Concentration, *Ind. and Eng. Chem. Res.*, **31**, p. 2556 (1992).
- [5] Ban T., Kawaizumi F., Nii S., Takahashi K., Study of Drop Coalescence Behavior for Liquid-Liquid Extraction Operation, *Chem. Eng. Sci.*, **55**, p. 5385 (2000).

- [6] Ribeiro M.M.M., Guimaraes M.M.L., Madureira C.M.N., Cruz Pinto J.J.C., Non-Invasive System and Procedures for the Characterization of Liquid-Liquid Dispersions, *Chem. Eng. Journal*, **97**, p. 173 (2004).
- [7] Desnoyer C., Masbernat O., Gourdon C., Experimental Study of Drop Size Distributions at High phase Ratio in Liquid-Liquid Dispersions, *Chem. Eng. Sci.*, **58**, p. 1353 (2003).
- [8] Zerfa M., Brooks B.W., Prediction of Vinyl Chloride Drop Sizes in Stabilized Liquid-Liquid Agitated Dispersion, *Chem. Eng. Sci.*, **51**, p. 3223 (1996).
- [9] Hinze J.O., Fundamentals of the Hydrodynamic Mechanism of Splitting in Dispersion Processes, *A.I.Ch.E. Journal*, **3**, p. 289 (1955).
- [10] Lagisetty J.S., Das P.K., Kumar R., Ghandi K.S., Breakage of Viscous and Non-Newtonian Drops in Stirred Dispersions, *Chem. Eng. Sci.*, **41**, p. 65 (1986).
- [11] Laso M., Steiner L., Hartland S., Dynamic Simulation of Agitated Liquid-Liquid Dispersions-II. Experimental Determination of Breakage and Coalescence Rates in a Stirred Tank, *Chem. Eng. Sci.*, **42**, p. 2437 (1987).
- [12] Khakpay A., Abolghasemi H. and Salimi-Khorshidi A., The Effects of a Surfactant on Mean Drop Size in a Mixer Settler Extractor, *Chem. Eng. Process.*, **48**, p. 1105 (2009).
- [13] Quadros P.A., Baptista C.M.S.G., Effective Interfacial Area in Agitated Liquid-Liquid Continuous Reactors, *Chem. Eng. Sci.*, **58**, p. 3935 (2003).
- [14] Chatzi E.G., Boutris C.J., Kiparissides C., Online Monitoring of Drop Size Distributions in Agitated Vessels. Effect of Temperature and Impeller Speed, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **30**, p. 536 (1991).
- [15] Perry R.H., Green D.W., "Perry's Chemical Engineers' Handbook" (7th Edition), McGraw-Hill (1997).