مطالعه و شبیهسازی اندازه متوسط قطره و توزیع اندازه قطره ایجاد شده در سامانههای متلاطم پراکنده مایع ـ مایع در درصدهای بالای فاز پراکنده در حالت پایا

حسین جان ملکی، منصور کلباسی*⁺ تهران، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، دانشکده مهندسی شیمی، صندوق پستی ۱۵۸۷۵₋۲۴۱۳

مهاری ارجمنار تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، گروه مهندسی شیمی

چکیده: در این تحقیق، اندازه متوسط قطره و توزیع اندازه قطره که مهم ترین عامل ها در سامانه های پراکنده مایع _مایع می باشند در گستره ی وسیعی از درصد فاز پراکنده برای چهار سامانه متفاوت فاز پراکندهٔ غیر ویسکوز (یعنبی اتیل هگزانوآت، تولوئز، کروزن و فنیتول) در آب مطالعه شده است. فازهای پراکندهای که در غلظتهای ۵ تا ۵۰ درصد حجمی استفاده شدهاند، به وسیله ی همزن توربینی راشتون با سرعت های گردشی متغیر بین ۳۰۰ تـ ۷۰۰ دور بـر ثانیـه متلاطم شدهاند. توزیع اندازه قطره به وسیلهی یک روش آندوسکویی اندازه گیری شده است. توزیع های اندازه قطره در سامانه های به همخور از تعادل پویایی که بین بهم پیوستن و شکسته شدن قطره ها وجود دارد به دست می آید. از آنجا که رابطه تصحیح شدهی مرسوم d_{۲۲} ~ (۱+ constø) W e^{-۰,۶} قطر ساتر را به ویژه در نسبت های بالای فاز پراکنده تا حدودی غیر دقیق تخمین می زند و وابستگی خطی قطر ساتر به درصد فاز پراکنده مورد تردید قرار گرفته است؛ در چهار چوب نظریهی کلاسیک هاینز - کولمو گروف یک معادلهی دو پارامتری جدید معرفی شده است که قطر متوسط ساتر را به عدد وبر در درصدهای بالای فاز پراکنده به طور بسیار قابل اطمینان تدی رابطه می دهد. همچنین در این مطالعه تابع توزیع نرمال خطی در شکل تجمعی آن برای تطبیق با داده های تجربی با توافق مطلوبی به کار رفته است. برای تغییرات انحراف استاندارد نسبی با قطر متوسط ساتر و درصد فاز پراکنده نیز رابطه ای بهدست آمده است. برای تشریح ریاضی توزیع های اندازهی قطره، با استفاده از روش تقسیم بندی متغیرها، معادلهی موازنهی جمعیتی حل شده است. برای بیان فرکانس شکستن و بهم پیوستن قطره ها از مدل معروف کولالو گلو و تاولاریدس استفاده شده است و پارامترهای مدل با استفاده از روش مربع کمته بن خطاها به دست آمده است. نتیجه ها نشان داد در صورتی که پارامترهای مدل برای یک سرعت دورانی به ویژه به دست آمده باشند، شبیه سازی توزیع های اندازه قطره با داده ای تجربی دارای توافق خوبی می باشد، اما از آنجا که پارامتر های مدل به صورت تابعی از انرژی اعمال شده می باشد، لذا با یستی این مدل ها بهبود یابند.

واژه های کلیدی: توزیع اندازه قطره، به هم پیوستن قطره ها، شکسته شدن قطره ها، سامانه پراکنده مایع ـ مایع، اختلاط.

KEY WORDS: Drop size distribution, Coalescence, Breakup, Liquid-liquid dispersion, Mixing.

+E-mail:mkalbasi@aut.ac.ir

*عهده دار مکاتبات

مقدمه

یک روش مرسوم برای ایجاد و افزایش سطح تماس بین دو فاز مایع امتزاج ناپذیر، پراکنده سازی یکی از فازها در فاز دیگر بهوسیله همزدن می باشد. برای بهینه سازی و کنترل فرایندهای اختلاط مایع _ مایع، ضروری است تا مشخصات توزیع اندازه قطره پیشبینی شود. توزیع اندازه قطرههای بهوجود آمده در یک ظرف اختلاط در نتیجه دو فرایند رقابت کننده شکسته شدن قطرهها ناشى از ميدان توربلانسى و بههم پيوستن قطرههاى حاصل از برخورد بین قطرهها می باشد. نرخ به هم پیوستن قطرهها بستگی به فرکانس برخورد و همچنین ضریب کارآیی برخورد دارد که این ضریب نیز وابسته به زمان تماس بین قطرههای بههم پیوند کننده می باشد. در سامانه های با تمایل پایین برای بههم پیوستن قطرهها؛ یعنی سامانههایی با درصد فاز پراکنده کم و یا سامانه هایی حاوی عوامل پایدار کننده، پارامتره ایی نظیر سرعت بالای همزدن و یا کشش بین سطحی پایین به طور اغلب فركانس شكسته شدن قطرهها را افزایش میدهد [۱]. از طرف دیگر افزایش در درصد فاز پراکنـده منجـر بـه افـزایش در اندازه قطره خواهد شد. اما مقدار زیاد فاز پراکنـده مـی توانـد خواص تلاطمی فاز پیوسته را تغییـر دهـد [۲]. در یـک سـامانه پراکندہ مایع _ مایع، پارامترھای مھمی کے وابستگی نزدیکی به نرخ شکسته شدن و بهم پیوستن قطرهها دارند، عبارتند از کوچکترین و بزرگترین اندازه قطره پایدار که به ترتیب با d_{min} و d_{max} نشان داده می شوند. در یک میدان تلاطمی هر قطره بزرگتر از d_{max} شکسته خواهد شد و این در حالی است که قطرههای کوچکتر از d_{min} با قطرههای دیگر پیوند خواهند کرد. پژوهشگران زیادی به صورت تجربی بزرگترین قطره پایدار را در ظرف به هم خور تعیین کرده اند و رابط ه های مختلفی برای پیش بینی کردن آن ارایه داده اند که به صورت تابعی از ویژگیهای میدان جریان و خواص فیزیکی سامانه میباشند [۶_]]. بیشتر آنها از مفهوم انرژی توربلانسی آبشاری برای این امر استفاده کردهاند که از تئوری کولمرگروف _ هانیز استفاده می کند [۷]. در سامانههای فاز پراکنده با ویسکوزیته پایین فازها می توان با موازنه بین نیروهای پایدار کننده که از کشش بین سطحی، γ، بوجود می آیند، با نیروهای شکننده ناشی از فاز پیوسته با دانسیته p؛ برای بزرگترین قطرهی پایدار رابطهای بهدست أورد که اندازه أن را به بزرگترین توان بههدر رونده، æ_{max}، با رابطه زیر مرتبط می کند [۸،۹].

$$d_{\max} \sim (\varepsilon_{\max})^{-\sqrt{r}} \left(\frac{\gamma}{\rho_c}\right)^{\sqrt{r}}$$
 (1)

در شرایطی که نرخهای انرژی به هدر رونده درون ظرف به همخور از لحاظ فضایی یکنواخت باشد، می توان ε_{max} را متناسب با نرخ انرژی متوسط در نظر گرفت. بنابراین می توان معادله (۱) را به صورتی دوباره نویسی کرد که در آن از عدد وبر استفاده شود. اگر همچنین فرض شود که در تعادل دینامیک قطره داشته باشیم d_{min} (۱۰] همانطور که اولین بارتوسط *شینار* (۱۰] پیشنهاد شده است) آنگاه معادله (۱) به معادله (۲) تبدیل می شود:

$$\frac{d_{\gamma\gamma}}{D} = C_t W e^{\gamma \beta}$$
(Y)

که در آن $P_{c}N^{r}D^{r}/\gamma$ قطر همزن و C₁ یک ثابت بدون بعد است که بستگی به نوع همزن بویژه عدد توان آن دارد و بهعنوان یک ضریب هندسی تعبیر می شود.

کمترین اندازهی قطر پایدار از شرایطی تخمین زده می شود که در آن شرایط میزان انرژی وارد شده به یک جفت قطره هنگامی که در تماس با هم هستند ناکافی باشد تا نتواند جلوی بههم چسبیدن و ادغام نهایی بین آنها را بگیرد [۱۰]. در این شرایط ثابت شده است [۱۱]:

 $rac{{
m d}_{
m min}}{
m D}\sim {
m We}^{-r/{
m A}}$ شین*ار* [۱۰] همچنین فرض کرد که برای ســامانههـایی کـه

اندازه قطره بهوسیله فرایند بههم پیوستن قطرهها کنترل میشود، d_{min} با d_{min} است، لذا معادله (۳) به فرم ذیل در می آید:

 $\frac{d_{rr}}{D} \sim We^{-r/\lambda}$ (*)

از طرف دیگر *اسپارو* [۵] فرض نمود که قطر ساتر تنها به بزرگترین قطر قطره پایدار وابسته است و این تناسب بهوسیله بسیاری از پژوهشگران، [۱۳_۱۰]، به کار برده شده و اغلب رابطهها ارایه شده برای قطر ساتر در سامانه های رقیق بهوسیله معادله (۲) ارایه شده است. حتی برای سامانه غلیظتر که در آنها نرخ بارایه شده است. حتی برای سامانه غلیظتر که در آنها نرخ اندازه قطره بوسیله موازنه نیروهای مخالف درست نمی باشد، اما در اغلب کارهای انجام گرفته، معادله اصلاح شده (۲) به شکل زیر پیشنهاد شده است:

$$\frac{d_{\gamma\gamma}}{D} = C_{\gamma} \left(\gamma + C_{\gamma} \phi \right) W e^{-\gamma/2}$$
 (d)

علمی _ پژوهشی

و توابع توزیع نرمال لگاریتمی [۲۱] خطاهای کمتری داشتهاند. *ژو و کرستا* [۲۰] برای محدودهای از انواع همزن مشاهده کردند که شکل توزیع با افزایش سرعت همزن از حالت تک بیشینه در

قطرههای کوچک اندازه به حالت دو بیشینه در قطرههای کوچک

و بزرگ اندازه و در نهایت به حالت تک بیشینه در قطرههای

متوسط اندازه تغییر می کند. توابع توزیع نرمال و نرمال لگاریتمی هنگامی که که به صورت تجمعی استفاده می شود با داده های

تجربی خیلی خوب توافق دارند ولی اگر به صورت فرکانس تعدادی قطرهها به کار برده شوند، جواب خیلی رضایت بخشی

نمىدهند. اين امر بدان خاطر است كه تمام دامن، توزيع اندازه

قطره بهویژه دو سر انتها آنرا نمی توان تنها با یک تابع توزیع

سامانه اختلاط استفاده شده است یک مخزن استوانهای

شیشهای میباشد که ارتفاع مایع (H) در آن برابر با قطر آن

D_T=•/۱۵m میباشد. برای جلوگیری از تشکیل گردابه عمیق،

ظرف مجهز به ۴ بافل شیشه ای با عرض D_T/۱۰ بوده و برای

کنترل دما در C° ۲۰، درون یک حمام آب قرار گرفته است.

سرعت دورانی همزن در محدوده ۷۰۰rpmـد. این

دو محدوده سرعت مربوط به حداقل سرعت لازم برای ایجاد

سوسپانیسیون کامل قطرهها و حداکثر سرعت مجاز برای جلوگیری از ورود هوا به داخل سامانه پراکنده می باشد. توربین راشتون با ابعاد $D_w = D/4$ و $D_{\rm T}/7$, $D_{\rm d} = TD/7$, $D_{\rm L} = D/4$ و $D_w = 0$. شکل ۱، استفاده شده است که در فاصله 1/3 ارتفاع مایع از کف

در تمام آزمایشها از آب خالص با دانسیته $\rho_c=۹۹Ykg/m^{7}$ و

ویسکوزیتهی دینامیک µ_c=۰/۹۹۳mpas استفاده شده است.

فازهای آلی استفاده شده عبارتند از، اتیلهگزانوات، کروزن،

تولوئن و فنیتول که از شرکت مرک^(۱) آلمان با خلوص

بالای۹۸٪ خریداری شده است. خواص فیزیکی این مواد

در جدول ۱ آورده شدهاست. کشش بین سطحی سامانههای

آلے /آب ب_موس_یلہ دس_تگاہ Fisher Surface Tensiomat

اندازهگیری شده و دانسیته و ویسکوزیته مایعات به ترتیب از طریق اندازهگیری گراویته ویژه و با ویسکوزیته متر استوالد^(۲)

بهصورت دقيق بيان نمود.

بخش تجربي

مخزن قرار دارد.

بهدست آمده است.



شکل ۱_ همزن توربین راشتون.

بر اساس این معادله، افزایش درصد فاز پراکنده باعث ایجاد قطرههای بزرگتر در سامانه اختلاط شونده می شود. این نوع رفتار در نرخهای پایین و بالای بههم پیوستن قطرهها مشاهده شده است [۲۴، ۴]. از جمله ۲۹٫۵ می توان دو تعبیر داشت: این که آن را تنها بهعنوان یک عامل میرایی در توربلانسی در نظر گرفت، هنگامی که غلظت فاز پراکنده هنوز به نسبت پایین است و ۲٫۵ مقداری در حدود ۳ می گیرد [۲۰،۴]، و یا این که بهخاطر بههم پیوستن قطرههای ۲٫۵ دارای مقدارهای بین ۳ تا ۲۰ برخی تردیدها از جنبه اعتبار نظری معادله (۵) بهوسیله پژوه شگران برخی تردیدها از جنبه اعتبار نظری معادله (۵) بهوسیله پژوه شگران معادله (۵) برای سامانه های غلیظ پراکنده مناسب نمی باشد، درنتیجه معادله (۵) برای سامانه های غلیظ پراکنده مناسب نمی باشد، درنتیجه ۲ رابطههای دیگری مدنظر قرار گرفته است؛ معادلاتی که دارای

$$\frac{d_{\gamma\gamma}}{D} = C_{\gamma}'(\gamma + C_{\gamma}'\phi) We^{-\alpha}$$
(8)

$$\frac{d_{\gamma\gamma}}{D} = C_{\gamma} \left(1 + C_{\delta} \phi\right)^{n} W e^{-\gamma \beta}$$
(Y)

معادلههای (۵) تا (۲) با افزایش درصد فاز پراکنـده، افـزایش در قطر ساتر را پیش بینی میکنند.

علی رغم این واقعیت که توزیع اندازه قطره بر اندازه متوسط و مساحت بین سطحی کل مؤثر است؛ اطلاعات کمی وجود دارد تا بتوان از آن برای پیش بینی منحنی توزیع و چگونگی رفتار پراکنده، استفاده کرد. ژو و کرستا [۲۰]، عنوان کردهاند که بایستی رابطهای بین توزیع اندازه قطره و اندازه متوسط قطره وجود داشته باشد تا بتوان رفتار اختلاط را پیش بینی نمود. برای مخازن اختلاط با طراحی استاندارد، توابع توزیع نرمال [۱۰،۸

(1) Merck Co Ltd. (Darmstadt, Germany)

	$\rho_d [kg/m]$	µ _d [mPas]	γ[\• ⁻ " N/m]
فنيتول	954	۱٬۰۵	٣٩٫۴
تولوئن	٨۶٨	۶۵۶ + ا	۳۵٫۶
كروزن	٨٣٠	۰ <i>٬</i> ۵۴	۴۴٫۱
اتيل هگزانوآت	۸۷۱	١/١٧	۲۰,۲

جدول ۱ ـ خواص فیزیکی مایعات آلی استفاده شـده بـهعنـوان فـاز یراکنده در دمای ۲۰°۲۰ .

توزیعهای اندازه قطره با روش اندوسکوپی تشریح شده توسط ریتر و کر*امه* [۲۲] اندازه گیری شده است. بهطور عمومی در حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ قطره شمرده و اندازه گیری شده تا یک توزیع قابل قبولی و اعتماد به دست آید. در این مطالعه به منظور اینکه ناهمگونی فضایی توزیع اندازه قطرهها در نظر گرفته شود، اندازه گیری در دو ناحیه صورت گرفته و با ترکیب دادههای به دست آمده از ناحیه همزن و بالک، میانگین حسابی اندازه قطرههای متوسط برای نتیجههای بهتر و قابل اطمینان تر محاسبه شده است. محل قرار گیری اندوسکوپ در ۲۵ /۰۰–۲۵ در سطح تیغه همزن (برای ناحیه همزن) و اطمینان تر محاسبه شده است. محل قرار گیری اندوسکوپ تر مکار*ا*ن [۲۳] در نظر گرفته شده است. اندازهٔ متوسط قطره و و همکار*ا*ن [۲۳] در نظر گرفته شده است. اندازهٔ متوسط قطره و اندازه گیری شده است. هر آزمایش با روند ذیل صورت گرفته است: اندازه گیری شده است. هر آزمایش با روند ذیل صورت گرفته است.

۱_ ابتدا مخزن با آب دی یونیزه پرشده است،

۲ سرعت چرخشی همزن مطابق مقدار دلخواه تنظیم شده و بعد از ۱۵ دقیقه فاز پراکنده بهوسیله پیپت نزدیک نوک همزن اضافه شده است،

۳_ بعد از ۳ ساعت از تزریق، توزیع اندازه قطره اندازه گیری شده است.

بهطور کلی بعد از یک دورهٔ مشخص زمانی از شروع بههم خوردن سامانه مایع – مایع، یک تعادل دینامیک باین فرایندهای شکسته شدن و بهم پیوستن قطرهها بهوجود میآید که بعد از آن دیگر تغییری در اندازه متوسط قطره و توزیع اندازه قطره رخ نخواهد داد. زمان لازم برای رسیدن به این تعادل از سامانه ای به سامانه دیگر متغیر است و به علاوه به نوع همزن به کار رفته، متغیرهای عملیاتی از نظیر دور هم زدن و درصد فاز پراکنده نیز وابسته است. به نوعی برای توربین راشتون

در سامانهها با ویسکوزیته پایین قطره این زمان در حدود ۲ تا ۳ ساعت می باشد (۲۴، ۲۰]. درنتیجه در تمام آزمایش های انجام گرفته بعد از ۳ ساعت از تزریق فاز پراکنده، اندازه گیری انجام شده است؛ اگرچه در غالب آزمایشهای زمانهای کمتری برای رسیدن به تعادل لازم بود. مطابق با کارهای انجام شده توسط دسنویر و همکاران [۱۹]، برای سامانههای با تمایل بیشتر برای بههم پیوستن قطرهها؛ یعنی کروزن و اتیلهگزانوات، نسبت به سامانه های با تمایل کمتر برای بههم پیوستن قطرهها؛ یعنی تولوئن و فنیتول، زمان لازم برای رسیدن به تعادل کمتر بود. این اختلاف می تواند به این واقعیت برگردد که در سامانههایی که نرخ بهم پیوستن قطرهها بالاتر است، فرایند بههم پیوستن خیلی سریعتر با فرایند شکسته شدن به تعادل می رسد.

نتيجهها و بحث

برای درصد پایین فاز پراکنده و در نتیجه نرخهای پایین بههم پیوستن قطرهها، معادله تئوری (۲) معتبر است. هنگامی که احتمال بههم پیوستن قطرهها به نسبت کم است، فرایند شکسته شدن غالب است و درنتیجه فرضیههای صورت گرفته برای بهدست آوردن معادله (۲) صادق می باشند. اما با حضور مقدار بیشتر فاز پراکنده، اندازه قطره تعادلی از دو طریق تحت تأثیر قرار می گیرد:

۱۔ هنگامی که قطره ها در مجاورت هم قرار می گیرند، ساختار مقیاس کوچک توربلانسی فاز پیوسته تغییر کرده و انرژی توربلانسی آن برای شکست قطرهها کم می گردد،

۲ از طرف دیگر نرخ به هم پیوستن قطره ها به علت افزایش احتمال برخورد قطره ها شدت می گیرد. اگر درصد حجمی فاز پراکنده خیلی بالا نباشد، می توان مدلی را برای مقدارهای پایین تا مقدارهای متوسط φ ارایه داد که تنها تأثیر میرایی انرژی توربلانسی را شامل شود. در مقدارهای بالای φ هر مدلی که بهم پیوستن قطره ارا نادیده بگیرد حتی در ناحیهٔ همزن که شکسته شدن غالب است، کاربردی نخواهد بود.

دولا [۱۴] به بررسی اثر φ در انرژی توربلانسی مؤثر در شکستن قطرهها پرداخته و آنرا با رابطه ذیل به انرژی بههدر روندهی متوسط مربوط دانسته است:

$$\varepsilon_{\phi} = \varepsilon \left(\rho_{e} / \rho_{c} \right)^{r} \left(1 + \Upsilon_{/} \Delta \phi \right)^{-r} \tag{A}$$

اگر این معادله برای نرخ انرژی به هـدر رونـده بـهکار رود و فرض شود که ρ_d ≈ ρ_c میباشـد و جملـههای φ^۲ و از درجـه بزرگتر از ۲ در نظر گرفته نشود، آنگاه برای قطرههایی که نیروی ویـسکوزیته مـانعی در شکـستن آنها نمـیباشـد، معادلـه زیـر بهدست میآید [۹]:

$$\frac{d_{\gamma\gamma}}{D} = C_{\gamma} \left(\gamma + \gamma \phi \right) W e^{-\gamma \beta}$$
(9)

برخی پژوهشگران برای سامانهها با ویسکوزیته کم قطره و همزن توربین راشتون این معادله را به کار برده و مقدارهای بهدست آمده آنها برای یارامتر هندسی C۱ (۰٬۰۵۱ تا ۰٫۰۷۱) با مقدار ۰٬۰۵۴ که برای معادله (۲) در سامانه های رقیق پیشنهاد شده تفاوت خاصى نداشته است. اما همانطور كه قبلاً گفته شد اين معادله تنها برای شرایطی قابل استفاده است که فقط میرایی انرژی توربولانسی پدیدهٔ رخ داده باشد و بههم پیوستن قطرهها وجود نداشته باشد (به جدول ۲ توجه شود). همانطورک ه در این جدول مشاهده می شود توافق نسبی در جزء های حجمی پایین فاز یراکنده تولوئن/آب بـهدسـت آمـده اسـت؛ امـا در جزءهـای حجمی بالاتر، معادلـه (۹) مقـدارهای خیلـی کمتـری از مقـادیر واقعی برای قطر ساتر پیشبینی میکند. در جزعهای حجمی بالاتر، بههم پیوستن قطرهها اجتناب نایذیر است و لذا برای بحساب آوردن آن فرم عمومی تری از معادله (۹)، یعنی معادله (۵) استفاده شده و مقادیر بزرگتری از ۳ یعنی تا حدود ۲۰ بـرای C_۲ در نظر گرفته شده است. بنابراین نتایج تمام سامانه های مورد مطالعه با معادله (۵) فیت شده و بهترین مقادیر پارامترهای آن در جـدول ۳ آورده شده است.

تأثیر جزء حجمی بر قطر متوسط در سامانههایی که در آنها قطرهها تمایل بیشتری برای بههم پیوستن دارند دارای شیب بیشتری (مقادیر بالاتر C_γ) است تا سامانههایی که در آنها تمایل به بههم پیوستن کمتر است. اما این رفتار خطی وابستگی قطر ساتر به جزء حجمی همواره برقرار نیست و با افزایش φ، تأثیر آن بر قطر ساتر ضعیفتر می شود. همانطور که انتظار می رود، ضریب تعیین چندگانه R^۲ دارای مقدارهای به نسبت مقبولی بین ضریب تعیین چندگانه ۲ دارای مقدارهای به نسبت مقبولی بین مریب تعیین حیاره در می شود. ممانطور که انتظار می رود، نوسیا معادله ۲ می این امر از شکل ۲ – الف نیز مشخص است که در آن مقادیر واقعی بر حسب مقادیر محاسبه شده توسط معادله (۵) برای سامانه اتیلهگزانوآت/آب نمایش داده شده است. بنابراین معادله (۵) هنگامی که برای مقدارهای φ بالا به کار برده شود تقریباً جوابهای ضعیفی می دهدد که

علمی _ پژوهشی

تجربی بـرای سیـستم تولـوئن/أب	مدول ۲_ مقایـسه داده هـای
	ا نتیجههای حل از معادله (۹).

N(rpm)	d _{rr} (µm) تجربی		d _{rr} (μm) محاسبه شده با معادله (۹)	
	$\phi= {\boldsymbol{\cdot}_{\scriptscriptstyle /}}{\boldsymbol{\cdot}} \delta$	$\phi= {{\boldsymbol{\star}}_{\scriptscriptstyle /}} {\boldsymbol{\Delta}}$	$\phi= {{\color{black}{\bullet}}_{/}}{{\color{black}{\bullet}}} \Delta$	$\phi= \star_{/} \Delta$
۴۰۰	۱۹۸	۶۱۹	١٧۵	۳۵۵
۶۰۰	142	401	۱۱۳	717
٧٠٠	١٢۵	4.1	٩۴	١٨١

جدول ۳- پارمترهای و ضرایب تعیین چندگانه برای معادلههای (۵) و (۱۱) برای تمام سیستم های مورد مطالعه.

	پارامترهای معادله (۵)			پارامترهای معادله (۱۱)		
	C,	C۲	R	C″,	β	R۲
فنيتول	۶، _۱ ۰۶	۱۲٫۵	۰,۸۲	۰/۱۲	+،۵۲	۰ _/ ۹۵
تولوئن	۶, ۰ ۶	۵٫۴	٠٫٧٨	۰ /۱۲	•/77	٠ _/ ٩١
اتيلهگزانوأت	۰,۰Y	١٩	۰٫۷۵	٠؍١٩	• /۳۷	۰ _/ ۸۸
كروزن	۰,۰۵	١٩	۰,۷۴	•,• \	٠,٧٢	۰٬۸۶

با مطالعههای براون و پیت [۱۵] نیز در توافق است. آنها اندازه قطره را در نوک همزن از طریق عکس برداری بهدست آورده و دریافتند که وابستگی خطبی d_{۳۲} به φ در مقدارهای φ =۰٫۴ و بیشتر برقرار نیست. علاوہ بر این موضوع چگونگی وابستگی قطر ساتر به عدد وبر توسط برخی پژوه شگران مورد سؤال قرار گرفته است. بروکس [۲۵]، پاسک و همکاران [۱۸] و کول و همکاران [۲۶] مقدارهای بالاتری از ۰۰٫۶- (یعنی ۲۰٫۳-) را برای توان عدد وبر در سامانه هایی که جزء حجمی آنها تا ۲۰٪ رسیده است، پیشنهاد دادهاند. هارتلند و همکاران [۲۷] مقدار ۲۰٫۴ را بهدست آورده و این در حالی است، ۴۳،۰۰ مقداری است که توسط نیونو و همکاران [۲۸] پیشبینی شده است. این افزایش توان با مطالعههای دسنویر و همکاران [۱۹] در توافق می باشد. آنها بیان داشتند که این رفتار را نمی توان با تئوری کلاسیک *هانیز– کولموگروف* بیان نمود چرا که علت آن را نمیتوان تنهـا به تغییر مکانیسم شکسته شدن و یا تنها به میرایی توربلانیسی در سامانه های غلیظ مربوط دانست؛ بلکه یک مکانیسم متفاوت از برهم کنش قطره-گردابه توربلانسی نسبت به آنچه که هانیز _ کولموگروف مفروض داشته است، لازم است. براونر [۲۹] اظهار داشته است که اگرچه در سامانه رقیق اندازه قطره



شکل ۲_قطر ساتر اندازه گرفته شده برای سیستم اتیلهگزانوات بر حسب قطر محاسبه شده با الف) معادله (٥) و ب) معادله (١١).

از موازنه نیروهای استاتیک بر روی قطره تعیین میشود اما در سامانههای غلیظ شار انرژی جنبشی توربلانسی بایستی از نرخ تولید انرژی سطحی لازم برای شکـسته شـدن قطـرههـا بالاتر باشد تا قطرہ بشکند. بنابراین یےک معادلے ی ۳ یےارامتری یعنی معادله (۶) منطقی است تا در جزءهای بالای فاز پراکنده بهکار برده شود. اما این معادله از پایه تئوری ضعیفی برخوردار است چرا که در جزءهای حجمی پایین توانی غیر از ۰٫۶-خواهد داشت. به عبارت دیگر کاربرد این معادله با تئوری یایهای هاینز در تناقض است و قابلیت تبدیل به معادله (۲) را ندارد. پس مدلی بایستی ارائه شود که علاوه بر این که در φهای بالا برای سامانههای مستعد به بههم پیوستن قطرهها جوابهای خوبی دهد، بلکه معادله (۲) را نیز در φهای پایین نقض نکند و با افزایش φ توان وبر از ۶٫۰– به مقادیر بزرگتـری تبديل شود؛ به عبارت ديگر وابستگي توان عدد وبر به جزء حجمی فاز پراکنده را نشان دهد. بنابراین یک فرم عمومی تری به شکل معادله (۱۰) بیان می شود:

$$\mathbf{d}_{\boldsymbol{\gamma}\boldsymbol{\gamma}} = \mathbf{C}_{\boldsymbol{\gamma}}^{\boldsymbol{\prime}} \mathbf{D} \left(\boldsymbol{\gamma} + \mathbf{C}_{\boldsymbol{\gamma}}^{\boldsymbol{\prime}} \boldsymbol{\varphi}\right) \mathbf{W} e^{-\boldsymbol{\gamma}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\beta}\boldsymbol{\varphi}} \tag{(1.)}$$

بر اساس کارهای انجام شده در این مطالعه معلوم شد که مقدار پارمتر $C_{\tau}^{"}$ بسیار نزدیک به صفر می باشد، لذا حذف آن یک معادله دو پارمتری جدید به فرم معادله (۱۱) بیان می شود: $d_{\tau\tau} = C_{\tau}^{"} DW e^{-\cdot/s+\beta\phi}$ (۱۱)

باید توجه داشت که این نتیجه تعجب آور نمی باشد. براساس آنالیزهای مختلف انجام شده، فاز پراکنده باعث کاهش طیفی از انرژی

جنبشی در ناحیه به هدر رونده یا ویسکوز می شود و این در حالی است که حداکثر اندازه قطره پایدار از مقیاس طول کولموگروف بزرگتر و براساس نظریه هاینز سهم انرژی ناحیه ویسکوز در فرایند شکسته شدن ناچیز است. بنابراین در سامانههای پراکنده مایع – مایع با اختلاف کم دانسیته، طیف انرژی توربلانسی دو فازی در ناحیه ماند با حضور فاز پراکنده حتی در جزعهای حجمی بالا تحت تأثیر قرار نمی گیرد [۳۰، ۳۰].

بنابراین استفاده از معادله (۸) برای اصلاح تئوری هاینز در سامانه غلیظ صحیح نبوده و در معادلاتی که برای پیش بینی قطر ساتر و یا قطر ماکزیمم استفاده می شوند، معرفی عبارت (φ-۱+contsφ) بهعنوان عامل میرایی توربلانسی منطقی نمیباشد. پس دیگر حتی احتیاجی نیست معادله (۷) یا معادلاتی نظیر آن بررسی شود. با نگاهی اجمالی به جدول ۳ و شکل ۲ برتری معادله (۱۱) نسبت به معادله (۵) مشهود است و ریبهای تعیین چندگانه مقدارهای بالاتری بین ۸۶، تا ۹۵، دارند. بنابراین یک معادله دو پارامتری جدیدی معرفی شد که علیرغم اینکه جوابهای خوبی میدهد به تئوری هاینز نیز در φ ها پایین برگشت میکند.

همانطور که قبلاً بیان شد، توزیع اندازه قزرهها اغلب بهصورت توابع توزیع نرمال بیان می شوند. در شکل ۳ توزیعهای تعدادی تجمعی Q برای سامانه اتیل هگزانوات/آب، در شبکهی احتمالاتی برای جزعهای حجمی متفاوت فاز پراکنده رسم شده است. توزیعهای اندازه گیری شده تقریباً خطی بوده و لذا می توان آنها را توزیع نرمال خطی انگاشت. با افزایش قطر ساتر، انحراف استاندارد افزایش یافته و توزیع گستردهتر میشود.

علمی _ پژوهشی



شکل ۳ـ توزیع تجمعی اندازهٔ قطره، \mathbf{Q}_{0} ،بر حسب قطر قطـره بـرای سیستم اتیلهگزانواَت/اَب برای درصد حجمی فاز پراکنده ۵ تا ۵۰٪.

با این حال هنگامی که افزایش قطر ساتر تنها به دلیل افزایش درصد پراکنده باشد و عدد وبر ثابت باشد، روند افزایش انحراف استاندارد کندتر شده و نسبت σ/d_{۳۲} (انحراف استاندار نسبی) از مقدار ۲۹٫۰۹ در سامانه های رقیق به ۲۵٫۰۵ در سامانههای غلیظ کاهش مییابد. این رفتار را میتوان در شکل ۴ مشاهده کرد که در آن ۲۳٫۵ مرحسب φ برای تمام آزمایشهای صورت گرفته ترسیم شده است. همچنین معادلهٔ (۱۲) از تطبیق با نتایج آزمایشی بهدست آمده که در شکل ۴ نیز نشان داده شده است.

$$\frac{\sigma}{d_{\tau\tau}} = \cdot_{/} \tau \Delta \phi^{-\gamma \cdot \Delta} \tag{17}$$

شبيه سازي فرايند ديناميك جمعيتي

هدف از این شبیه سازی بررسی چگونگی رفتار پارامترهای مدل کولالوگلـو – تاولاریـدس [۳۲] در بیان فرکانسهای شکسته شدن و بههم پیوستن قطرهها با تغییر سرعت دورانی یا همان انرژی اعمال شده به سامانه میباشد. بهوسیله شبیه سازی سیستماتیک میتوان به بررسی این موضوع پرداخت کـه کـدام پارامترها تأثیر در توزیع اندازه قطره دارند. این دانش و آگاهی را آنگاه می توان در کنتـرل و بهینـه سازی توزیـع انـدازه قطـره بهکار برد.

معادلهٔ موزانهٔ جمعیتی در یک سامانه پراکندهٔ مایع _مایع _ مایع _ مایع _ مایع _ مارت ذیل می باشد [۳۳]. $\partial f(d,t)/\partial t = s(d,t)$

علمی _ پژوهشی



شکل ۴- انحراف استاندارد نسبی، ۵/d۳۲، برای توزیعهای انـدازه قطره اندازهگیری شده بر حسب درصد حجمی فاز پراکنده.

s جمله ایجاد و امحاء قطرههای ناشی از شکسته شدن و بههم پیوستن قطرهها میباشد، که برابر است با:

$$s = s_{\text{coal}}^{+} + s_{\text{coal}}^{-} + s_{\text{break}}^{+} + s_{\text{break}}^{-}$$
(14)

این عبارات بیانگر افزایش و یا کاهش دانسیته جمعیتی ناشی از بههم پیوستن و شکستهشدن قطرهها است که مقدارهای آنها به ترتیب برابر با معادلههای (۱۵) تا (۱۸) میباشند [۳۴].

$$s_{\text{coal}}^{+}(d,t) = \frac{1}{2} \int_{d_{\min}}^{d} \Gamma(d',d-d') f(d',t) f(d-d',t) dd' \quad (\)$$

$$s_{\text{coal}}^{-}(d,t) = -f(d,t) \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \Gamma(d,d') f(d',t) dd' \qquad (18)$$

$$s_{\text{break}}^{+}(d,t) = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \upsilon(d')\beta f(d,d')g(d')f(d',t)dd' \qquad (1V)$$

$$s_{break}^{-}(d,t) = -g(d)f(d,t)$$
 (1A)

این معادلهها به طور شمایی در شکل ۵ نشان داده شدهاند. توجه شود که احتمال بهم پیوستن سه گانه ناچیز در نظر گرفته شده است. (g(d) نرخ شکسته شدن قطره با اندازه b و $\Gamma(d,d')$ نرخ بهم پیوستن دو قطره با اندازهای b و 'b میباشند. ($\nu(d)$ تعداد قطرههایی است که از شکسته شدن قطره با اندازهٔ 'b و با حجم 'v به وجود می آید و میتوان مقدار آن را به طور متوسط برای تمام اندازه قطرهها برابر با ۲ در نظر گرفت.



شکل ۵_ جملههای ایجاد و امحاء ناشی از شکسته شدن و بهم پیوستن.

β(d,d') توزیع اندازهٔ قطرههای دختر یا قطرههایی که از شکـستن قطره مادر بهوجود می آیند، می باشد که احتمال بـهوجـود آمـدن قطرهای با قطر d را از شکسته شدن قطرهای با قطر 'd می دهد.

شرایط اولیه و مرزی معادلهی (۱۳)

شرط اوليه عبارت است از:

$$f(d,\circ) = f_{\circ}(d) \tag{19}$$

(d) یک تابع دلخواه که معمولاً یک تـابع گوسـی اسـت. شرط مرزی عبارت است از:

$$f(d_{\min}, t) = f(d_{\max}, t) = 0$$
 (Y.)

بهطور کلی، توزیع اندازه قطره در سامانه های مایع – مایع به متغیرهای مختلفی بستگی دارد که به چهار دسته تقسیم بندی میشوند: ۱ – توان ورودی یا دور همزن، ۲ – درصد فاز پراکنده، ۳ – پارامترهای هندسی از قبیل نسبت بین قطر مخزن و قطر پروانه، نسبت بین فاصله بین پروانه تا کف مخزن و ارتفاع مخزن و نوع و شکل همزن و ۴ – خواص فیزیکی از قبیل کشش بین سطحی، ویسکوزیته فازها و دانسیته فازها. به صورت آشکار تأثیر این متغیرها را میتوان بهوسیله مدلهای ریاضیای که فرایندهای بهم پیوستن شکسته شدن قطره را تشریح می کنند، بیان نمود. با این حال در اغلب مدلهای مقالات، تمام این متغیرها لحاظ نشدهاند. در عوض پارامترهای تطبیقی برای کاربردهای معین استفاده شده است. مسئله موجود در این روش این است که اگر مقدارهای دیگری برای پارامترهای ورودی خاصی

(مثلاً سرعت ایمپلر) استفاده شود، شبیهسازی با یک دسته از این پارامترها را شاید نتوان برای شبیه سازی موارد دیگر بهکاربرد.

اما همانطور که بیان شد در شبیه سازی انجام گرفته از مدل کولالوگلو و تاولاریدس [۳۲] برای نرخ های شکسته شدن و بههم پیوستن استفاده گردیده است، چرا که این مدل بهترین تطابق را با دادههای تجربی داشته است و برای توزیع قطرههای دختر نیز از توزیع نرمال گوسین استفاده شده است، که به ترتیب به صورت زیر میباشند:

$$f(d) = \frac{C_{brea\lambda} \epsilon^{\lambda/\gamma} d^{-\gamma/\gamma}}{\lambda + \varphi} exp\left(\frac{-C_{break\gamma} \sigma(\lambda + \varphi)^{\gamma}}{\rho_d d^{\lambda/\gamma} \epsilon^{\lambda/\gamma}}\right)$$
(71)

$$\Gamma(\mathbf{d},\mathbf{d}') = \frac{C_{\text{coal}}}{1+\varphi} \left(\mathbf{d}^{\mathsf{r}},\mathbf{d}^{\mathsf{r}}\right) \left(\mathbf{d}^{\mathsf{r}/\mathsf{r}},\mathbf{d}^{\mathsf{r}/\mathsf{r}}\right)^{1/\mathsf{r}} \varepsilon^{1/\mathsf{r}} \times$$
(YY)

$$\exp\left(-\frac{C_{\text{coaly}}\mu_{c}\rho_{c}\epsilon}{\sigma^{r}(\lambda+\phi)^{r}}\left(\frac{dd'}{d+d'}\right)^{r}\right)$$
$$\beta(d,d') = Y_{/}Y\frac{d^{r}}{d'^{r}}\exp\left(-F_{/}\Delta\left(\frac{rd^{r}-d'^{r}}{d'^{r}}\right)^{r}\right)$$
(YT')

از آنجا که قطرههای دختر دارای حجم برابر با قطرهٔ مادر میباشند، لذا انتگرال ذیل باید برقرار باشد؛ که در واقع تساوی حجم قطرهٔ مادر با قطرههای دختر را بیان میدارد [۳۵]:

$$\mathbf{v}' = \upsilon \int_{\circ}^{\mathbf{d}'} \beta(\mathbf{d}, \mathbf{d}') \frac{\pi}{\varepsilon} \mathbf{d}^{\mathsf{r}} \mathbf{d} \mathbf{d}$$
(YY

برای حل معادله (۱۳) با توجه به معادله های (۱۴) تا (۲۳) از روش تقسیم بندی متغیرهای شرح داده شده توسط کومار و رامکریشنا [۳۳] استفاده شده است. این روش در واقع نوعی روش المان محدود میباشد که در آن اندازه قطره به زیر دامنه هایی تقسیم بندی می شود. ریزتر بودن این زیر دامنه ها دقت بیشتر این روش را موجب می شود. شبیه سازی انجام شده برای درصد فاز پراکنده ۱۰ درصد بوده است و پارامترهای تطبیق شونده ی دامه داه بهینه شده اند تا اختلاف بین داده های توش مربع کمترین خطاها بهینه شده اند تا اختلاف بین داده های مقدارهای به دست آمده از شبیه سازی انجام شده (نقاط) به همراه مقدارهای تجربی (خطوط) برای چهار ماده ی مورد مطالعه در سرعت دورانی ۵۵۰ دور بر دقیقه ترسیم شده است، که موفقیت مدل سازی انجام شده را به خوبی نشان می دهد.



شکل ۶ ـ مقدارهای تجربی (خطوط) و مقدارهای محاسبه شـده بـا مدلسازی (نقاط) برای چهار مادهٔ مورد مطالعـه در سـرعت دورانـی ۵۵۰ rpm.

همچنین حساسیت پارامترهای معادلات نسبت به توان ورودی برای سرعت های چرخش متفاوت ۴۰۰، ۴۷۵، ۵۵۰، ۶۲۵ و ۷۰۰ دور بر دقیقه مورد مطالعه قرار گرفته است. در شکل ۷ مقدارهای بهدست آمده برای پارامترهای مدل برای دورهای مختلف برای تمام مواد مورد آزمایش نشان داده شده است. با توجه به تغییرات قابل ملاحظه و وابستگی این پارامترها به سرعت چرخش پروانه، میتوان بهطور کلی استنباط کرد که شبیهسازی انجام شده تنها در دورهای مورد مطالعه معتبر است. این امر تعجب آور نمی باشد چرا که اگر پارامترها درست انتخاب گردد؛ در این حالت شکل توزیع میتواند خود را با داده های تجربی وفق دهد. با این حال اگر یک دسته از پارامترها برای سرعت چرخش بالاتر (یا پایینتر) استفاده گردد، به احتمال

نتيجهگيري

در این مقاله بررسی هایی بر روی اندازه قطره و توزیع اندازه قطره در سامانه های پراکنده مایع مایع در یک مخزن بههم خور انجام گرفته است. نتیجهها نشان داد که فرمولاسیون ماکروسکوپیک توزیع از تئوری مرسوم هاینز برای بهحساب آوردن تأثیر فاز پراکنده در بهدست آوردن قطر بیشینه و در نتیجه آن قطر ساتر به صورت خطی پیروی نمی کند. با بررسی

علمی _ پژوهشی

معادلههای سایر پژوهش گران اثبات شد کـه در بـهدسـت آوردن معادله (۵) مفروضات نامناسبی به کار برده شده است و این معادله بنیان نظری ضعیفی دارد، چرا که انرژی جنبشی در ناحیه ماند حتبی در درصدهای بالای فاز پراکنده تحت تاثیر قرار نمی گیرد و این در حالی است که قطر قطرهها در محدوده ماند قرار دارند. در واقع فاز پراکنده باعث می شود که طیف انرژی در ناحیه بههدر رونده کاهش یابد که اثر خاصی در شکستن قطرهها ندارد، لذا به کار بردن یارامتر تصحیح کننده (ι+constφ) منطقی نمی باشد. با توجه به این نتیجه و اینکه در مطالعه انجام شده یارامتر $C_r^{"}$ در معادله (۱۰) مقدارهای صفر یا نزدیک به صفر را داشت و همچنین توجه به این واقعیت که توان عدد وبر با افزایش ϕ افزایش می یابد، یک معادله دو یارامتری جدید، یعنی معادله (۱۱)، ارایه گردید که نتایج به مراتب بهتری نسبت به معادله مرسوم (۵) ارایه می کند. بنابراین ضریبهای تعیین چندگانیه R از محدوده ۰٬۷۸ تیا ۰٬۸۴ بیرای معادلیه (۵) به محدوده ۰٬۸۶ تا ۰٬۹۵ برای معادله (۱۱) افزایش پیدا کرد. بهطور کلی پذیرفته شده است که توابع توزیع نرمال خطی به فرم تجمعي أن توزيعهاي اندازه قطره را بهخوبي بيان مينمايند. با به کار بردن این توابع در تطبیق دادن پارامترها، انحراف استاندارد، σ، برای هر توزیع بهدست آمده و به تبع آن انحـراف نسبی استاندارد، σ/d_{rr} ، نیز محاسبه و مشخص شد که انحراف استاندارد نیسبی σ/d_{۲۲} دارای مقدار ثیابتی نبوده و با افزایش *φ* از ۰٬۰۵ تا ۰٫۵ از ۰٫۲۹ به ۰٫۲۵ کاهش پیـدا کـرد. با معرفی معادله (۱۲) یک رابطه جدید که این رفتار را پیشبینی می کند نیز ارایه شد.

همچنین با حل معادله موازنه جمعیتی به روش تقسیم بندی متغیرها و با استفاده از مدل معروف کولالوگلو و تاولاریدس در بیان فرکانسهای شکسته شدن و به هم پیوستن قطره ها؛ نتیجهها نشان داد که شبیهسازی توزیعهای اندازه قطره با داده ای تجربی دارای توافق خوبی می باشد، اما از آنجا که پارامترهای مدل به صورت تابعی از انرژی اعمال شده می باشد، لذا بایستی این مدل ها بهبود یابند. بنابراین دیگر این مدل ها را نمی توان به عنوان مدل ها پیش بینی کننده برای سایر سرعتهای دورانی به کار برد. این مسئله دلیل این است که چرا بایستی شبیهسازی های نظام مند به کار برده شود تا مدل های موجود در مقاله ها را با در نظر گرفتن بیشتر وابستگی به پارامترهای فیزیکی اصلاح کرد.



شکل ۷- وابستگی پارامترهای فرکانس شکسته شدن و بهم پیوستن قطرههای مدل *کولالو گلو و تائلاریدس* به سرعت دورانی پروانه.

نمادها

C_{1} , C_{7} , C_{1} , C_{7} , C_{7} , C_{7}	ثوابت ، ۲٫ ۲٬
Ccoaly Ccoaly Cbreaky	C_{break} L^{-r}
d_{rr}	قطر ساتر (L)
d _{max}	حداكثر اندازهٔ قطرهٔ پایدار (L)
d_{\min}	حداقل اندازهٔ قطرهٔ پایدار (L)
D	قطر پروانه (L)
D _T	قطر مخزن (L)
f(d,t)	دانسیته جمعیتی (^۳ 'L)
g(d)	نرخ شکسته شدن قطره با اندازه d ('L)
Н	ارتفاع مخزن (L)
Ν	سرعت دورانی همزن (^{`-} T)

\mathbf{Q}_{\circ}	توزيع اندازه تجمعي
R ^۲	ضريب تعيين چندگانه
S	جمله ايجاد و امحاء قطرهها
	ناشی از شکسته شدن و بههم پیوستن (^۲ ^{-۲} 'L)
$We = \rho_c$	عدد وبر پروانه N ^۲ D ^۳ /γ
α,β	پارامتر
$\beta(d,d')$	توزیع اندازه قطرههای دختر (L)
$\Gamma(d,d')$	نرخ بهم پیوستن دو قطره با اندازهای (d',d',d) ($\mathrm{L}^{\mathrm{v}}\mathrm{T}^{-1}$
ε _φ ,ε	توان بههدر رونده به ازای واحد جرم (${ (T^{7})}$)
ϵ_{max}	حداکثر توان بههدر رونده به ازای واحد جرم (${ m (L^{7}/T)}$
$\mu_{\rm c}$	ويسكوزيته فاز پيوسته (M/LT)
$\mu_{\rm d}$	ويسكوزيته فاز پراكنده (M/LT)

۱+

σ	انحراف استاندارد $(L^{-'})$	φ	درصد حجمى فاز پراكنده
(v(d')	تعداد قطرههای دختر	$ ho_{c}$	دانسیته فاز پیوسته ${ m M/L}^{ m imes}$
		$ ho_c$	دانسیته فاز پراکنده ^۳ M/L
	تاریخ دریافت : ۸۷٫۴٫۲۹ ؛ تاریخ پادیرش : ۱۱٫۱۲	γ	کشش بین سطحی (F/L or M/T

مراجع

- Chatzi E.G., Kiparissides C., Steady-State Drop-Size Distributions in High Holdup Fraction Dispersion Systems, *AIChE J.*, 41, p. 1640 (1995).
- [2] Pal R., Pipeline Flow of Unstable and Surfactant-Stabilized Emulsions, AIChE J., 39, p. 1754 (1993).
- [3] Kumar S., Kumar R., Ghandi K. S., Alternative Mechanisms of Drop Breakage in Stirred Vessels, *Chem. Eng. Sci.*, 46, p. 2483 (1991).
- [4] Lagissety J.S., Das P.K., Kumar R., Gandhi K.S., Breakage of Viscous and Non-Newtonian Drops in Stirred Dispersions, *Chem. Eng. Sci.*, 41, p. 65 (1986).
- [5] Sprow F.B., Distribution of Drop Size Produced in Turbulent Liquid-Liquid Dispersion, *Chem. Eng. Sci.*, 22, p. 435 (1967).
- [6] Lam A., Sathyagal A. N., Kumar S., Ramkrishna D., Maximum Stable Drop Diameter in Stirred Dispersions, AIChE J., 42, p. 1547–1552 (1996).
- [7] Hinze J.O., Fundamentals of the Hydrodynamic Mechanism of Splitting Dispersion Process, *AIChE J.*, **1**, p. 289 (1955).
- [8] Chen H. T., Middleman S., Drop Size Distribution in Agitated Liquid-Liquid Systems, AIChE J., 13, p. 989 (1967).
- [9] Calabrese R. V., Wang C. Y., Bryner N. P., Drop Breakup in Turbulent Stirred-Tank Contactors, Part III Correlations for Mean Size and Drops, *AIChE J.*, **32**, p. 677 (1986).
- [10] Shinnar R., On the Behavior of Liquid Dispersions in Mixing Vessel, *J of Fluid Mechanics*, 10, p. 259 (1961).
- [11] Godfrey J.C., Hanson C., Liquid-liquid Systems, "In Handbook of Multiphase Systems", ed. Hestroni G., Hemisphere Pub. Co., Washington, DC, U.S.A. 4-1 (1982).
- [12] Davies G. A., Mixing and Coalescence Phenomena in Liquid-Liquid Systems, "In Science and Practice of Liquid-Liquid Extraction", ed. Thornton J.D., Oxford, U.K: Clarendon Press, 1, pp. 245-342 (1992).
- [13] Peters D. C., "Dynamics of Emulsification, In Mixing in the Process Industries", Paperback Edition, Chap. 14, eds. Harnby N., Edwards M.F., Nienow A.W., pp. 294-321. Butterworth-Heinemann's, Oxford, 294 (1997).
- [14] Doulah M. S., An Effect of Hold-Upon Drop Sizes in Liquid-Liquid Dispersions, *Industrial* and Engineering Chemistry, Fundamentals, 14, p. 137 (1975).

- [15] Brown D.E., Pitt K., Drop Size Distribution of Stirred Noncoalescing Liquid-Liquid System, *Chem. Eng. Sci.*, 27, p. 577 (1972).
- [16] Godfrey J.C., Obi F.I.N., Reeve, R. N., Measuring Drop Size in Continuous Liquid-Liquid Mixers, *Chemical Engineering Progress*, 85, p. 61 (1989).
- [17] Nishikawa M., Mori F., Kayama T., Nishikawa S., Drop Size Distribution in a Liquid-Liquid Phase Mixing Vessel, J. of Chemical Engineering of Japan, 24, p. 88 (1991).
- [18] Pacek A.W., Man C.C., Nienow A.W., On the Sauter Mean Diameter and Size Distributions in Turbulent Liquid-Liquid Dispersions in a Stirred Vessel, *Chem. Eng. Sci.*, 53, p. 2005 (1998).
- [19] 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).
- [20] Zhou G., Kresta S.M., Evolution of Drop Size Distribution in Liquid-Liquid Dispersions for Various Impellers, *Chem. Eng. Sci.*, 53, p. 2099 (1998).
- [21] Keey R.B., Glen J.B., Area-Free Mass Transfer Coefficient for Liquid Extraction in a Continuously Worked Mixer, AIChE J., 15, p. 942 (1969)
- [22] Ritter J., Kraume M., On-line Measurement Technique for Drop Size Distributions in Liquid-Liquid Systems at High Dispersed Phase Fractions, *Chemical Engineering Technology.*, 23, p. 579 (2000).
- [23] Kraume M., G\u00e4bler A., Schulze K., Influence of Physical Properties on Drop Size Distributions of Stirred Liquid-Liquid Dispersions, *Chemical Engineering Technology*, 27, p. 330 (2004).
- [24] Calabrese R.V., Pacek A.W., Nienow A.W., Coalescence of Viscous Drops in Stirred Dispersions, The Institution of Chemical Engineers Research Event, Birmingham, January, "Institution of Chemical Engineers", Rugby, UK, pp. 642-644 (1993).
- [25] Brooks B.W., Drop Size Distributions in an Agitated Liquid-Liquid Dispersion, *Transaction of the Institution of Chemical Engineers*, 57, p. 210 (1979).
- [26] Cull S., Lovick J.W., Lye G.J., Angeli P.A., Scale Down Studies on the Hydrodynamics of Two-Liquid Phase Biocatalytic Reactors, *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 25, p. 143 (2002).
- [27] Hartland S., Laso M., Steiner L., 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).
- [28] Nienow A.W., Pacek A.W., Man C.C., On the Sauter Mean Diameter and Size Distributions in Turbulent Liquid/Liquid Dispersions in a Stirred Vessel, *Chem. Eng. Sci.*, 53, p. 2005 (1998).
- [29] Brauner N., The Prediction of Dispersed Flows Boundaries in Liquid-Liquid and Gas-Liquid Systems, *International J of Multiphase Flow*, 27, p. 885 (2001).
- [30] Masbernat O., Gourdon C., Casamatta G., Local Measurements in a Dense Two-Phase Liquid Flow: Continuous-Phase Point Velocity and Phase Ratio, *Chem. Eng. Sci.*, 48, p. 3225 (1993).
- [31] Jairazbhoy V., Tavlarides L L., A Cascade Model for Neutrally Buoyant Dispersed Two-Phase Homogeneous Turbulence, *International J of Multiphase Flow*, 21, p. 485 (1995).

علمی _ پژوهشی

- [32] Coulaloglou C.A. and Tavlarides L.L., Description of Interaction Processes in Agitated Liquid-Liquid Dispersions, *Chemical Engineering Science*, **32**, p. 1289 (1977).
- [33] Ramkrishna D., "Population Balances" Academic Press, San Diego (2000).
- [34] Schlauch S., Modeling of Stirred Liquid-Liquid Dispersions, Preprint 41-2004, Institut für Mathematik, Technische Universität Berlin, (2004).
- [35] Wang T., Wang J. and Jin Y., A Novel Theoretical Breakup Kernel Function for Bubbles/ Droplets in a Turbulent Flow, *Chemical Engineering Science*, 58, p. 4629 (2003).
- [36] Kumar S., Ramkrishna D., On the Solution of Population Balance Equations by Discretization-I. A ;xed pivot technique, *Chemical Engineering Science*, **51**, p. 1311 (1996).