

شبیه‌سازی عددی الگوی جریان جتی متقارن در سیستم‌های مایع - مایع از یک نازل

محمد معماری، داریوش باستانی*⁺

تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، صندوق پستی ۹۴۶۵-۱۱۳۶۵

چکیده: در این مقاله به بررسی عددی هیدرودینامیک جت‌های متقارن مایع - مایع پرداخته شده است. روش VOF و نحوه انجام محاسبات عددی برای تشریح پدیده جت متقارن و معادلات بدون بعد حاکم بر پدیده بیان شده است. نتیجه‌های آزمایشگاهی به دست آمده برای دو سیستم استاندارد مایع - مایع، آب - تولوئن و آب - بوتانول توسط شبیه‌سازی انجام شده مورد تایید قرار گرفته است و در نهایت تاثیر اعداد بدون بعد حاکم بر سیستم‌های دو فازی از قبیل عدد رینولدز، عدد فرود، عدد وبر، نسبت دانسیته دو فاز و نسبت ویسکوزیته دو فاز بر روی پارامترهای هیدرودینامیکی جت متقارن مایع - مایع از قبیل طول بدون بعد جت، قطر بدون بعد جت و قطر قطره‌های بدون بعد حاصل از جت متقارن مورد مطالعه قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: جت‌های متقارن مایع - مایع، دو فازی، CFD، روش VOF، سطح آزاد.

KEY WORDS: Liquid-liquid symmetric jets, Two phase, CFD, VOF method, Free surface.

مقدمه

حفظ می‌کند سپس با افزایش سرعت، شکسته شدن جت در اثر توزیع‌های نامتقارن جت انجام شده و طول جت کاهش پیدا می‌کند. در سرعت‌های بالاتر، جت توسط اتمی شدن^(۳) شکسته شده که در این حالت قطرات به صورت خیلی غیر یکنواخت نزدیک نازل تشکیل می‌شوند.

اولین مطالعه نظری شکسته شدن جت مایع در مایع غیر قابل امتزاج در سال ۱۹۳۵ میلادی به وسیله Tomotika انجام شد [۲] که او آنالیز پایداری خطی Rayleigh [۳] را برای پایداری جت گسترش دارد. معادله Tomotika اغلب در تخمین طول جت و اندازه قطرات برای جت‌های واقعی در حالت جت‌های متقارن^(۴) استفاده شده است.

در سال ۱۹۸۲ میلادی Kitamura و همکارانش [۴]، در سال

شکستن یک جت به قطره‌ها در سیستم‌های مایع - مایع از یک نازل و بررسی هیدرودینامیک و انتقال جرم آن از اهمیت ویژه‌ای در مهندسی به ویژه مهندسی شیمی برخوردار است. در واقع در اغلب دستگاه‌های استخراج مایع - مایع، فاز پراکنده به صورت جت وارد فاز پیوسته شده و پس از شکسته شدن به قطره‌های سطح انتقال جرم، حرارت و حتی واکنش‌های شیمیایی را که در سطح دو سیال اتفاق می‌افتد، تامین می‌کند.

در سرعت‌های پایین فاز پراکنده به داخل نازل، قطره‌ها به طور تناوبی از روزنه خارج شده و جت ایجاد نمی‌شود، این الگوی جریان را قطره‌ای^(۱) نامیده‌اند. با افزایش سرعت مایع ورودی، حالت جتی^(۲) اتفاق می‌افتد. طول جت با افزایش سرعت تا سرعتی که جت به بیشترین طول خود برسد افزایش می‌یابد و حالت تقارن خود را

*عهدہ دار مکاتبات

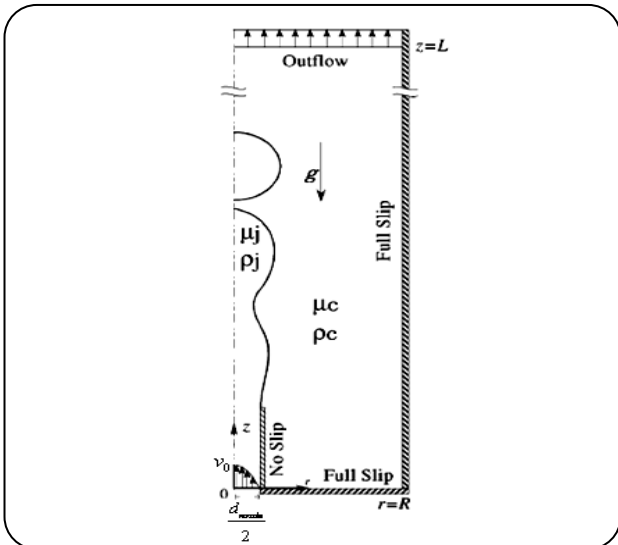
+ E-mail: Bastani@sharif.edu

(۱) Dripping

(۳) Atomization

(۲) Jetting

(۴) Axisymmetric jetting



شکل ۱- طرحی از پدیده تشکیل جت مایع - مایع از یک روزنه به همراه شرایط مرزی در نظر گرفته شده [۱].

ویسکوزیته آن متغیر است. با این فرض معادله اندازه حرکت به شکل زیر خواهد بود [۱۲].

$$\frac{D}{Dt}(\rho \bar{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu (\nabla \bar{v} + \nabla \bar{v}^T) \right] + \rho \bar{g} + \sigma \cdot \kappa \cdot n \cdot \delta(x - x_{\text{interface}}) \quad (1)$$

در معادله (۱)، ρ دانسیته سیال، μ ویسکوزیته سیال، σ کشش بین فازی^(۱) دو فاز، κ دومین انحناى سطح مشترک، n بردار یکه عمود بر سطح مشترک است. جمله آخر در معادله (۱) نشانگر نیروی حاصل از تنش بین فازی است که تنها در سطح مشترک اتفاق می افتد به همین دلیل از تابع دلتا ($\delta(x)$) در سطح مشترک استفاده شده است. با استفاده از عبارات بدون بعد زیر، معادله (۱) به را می توان به شکل بدون بعد معادله (۲) نوشت. شرایط مرزی نیز در شکل ۱ برای این پدیده به طور خلاصه بیان شده اند.

$$\zeta = \frac{r}{d_{\text{nozzle}}}, \xi = \frac{z}{d_{\text{nozzle}}}, \tau = \frac{v_0}{d_{\text{nozzle}}} t, \bar{U} = \frac{\bar{v}}{v_0} \quad (2)$$

$$Re_j = \frac{\rho_j v_0 d_{\text{nozzle}}}{\mu_j}, Fr_j = \frac{v_0^2}{d_{\text{nozzle}} g}, We_j = \frac{\rho_j v_0^2 d_{\text{nozzle}}}{\sigma}$$

$$\frac{D}{Dt} \left(\frac{\rho}{\rho_j} \bar{U} \right) = -\frac{\nabla p}{\rho_j v_0^2} + \nabla \cdot \left[\frac{\mu}{\mu_j \cdot Re_j} \left(\nabla \bar{U} + (\nabla \bar{U})^T \right) \right] +$$

$$\frac{\rho}{\rho_j} \frac{1}{Fr_j} + \frac{\kappa \cdot n \cdot \delta(x - x_{\text{interface}})}{We_j}$$

(۱) Interfacial tension

۱۹۹۵ میلادی Teng و همکارانش [۵]، در سال ۱۹۹۷ میلادی Das و همکارانش [۶] و در سال ۱۹۷۴ میلادی Skelland و همکارانش [۷]، با انجام آزمایش بروی پنج سیستم آب - بوتانول، آب - هپتان، آب - استات اتیل، آب - تتراکلریدکربن و آب - کلروبنزن در حداکثر طول ممکن در الگوی جریان جتی متقارن انجام دادند و برای این سیستم های مایع، روشی برای تعیین قطر قطره های حاصل از جت ارائه نمودند. [۳] Kitamura (۱۹۸۲) و همکارانش به طور آزمایشگاهی نشان دادند که تئوری Tomotika به خوبی پیش بینی می کند. Bright آنالیز پایداری را برای سیال غیر ویسکوز در نظر گرفتن توزیع سرعت دو فاز انجام داد. Das تئوری Tomotika را با مدل انبساطی جت و غلظت خود ترکیب کرد و اندازه قطرات را تخمین زد [۸]. Richard و همکارانش [۱۰] به طور مستقیم شبیه سازی عددی تشکیل یک جت متقارن و شکسته شدن به قطره ها را در سیستم های مایع - مایع با استفاده از روش حجم سیال (VOF) (Nichols و Hirt [۱۱]) انجام داد.

عمده تحقیقات انجام شده بر روی هیدرودینامیک جت های مایع - مایع، به طور آزمایشگاهی بوده و شبیه سازی های عددی و آنالیز CFD کمی در این زمینه انجام شده است. به دلیل تقارن برای دو الگوی جریان قطره ای و جتی متقارن می توان آنالیز عددی دو بعدی را انجام داد. در این مقاله با شبیه سازی و آنالیز عددی به صورت دو بعدی پدیده تشکیل جت متقارن از نازل، به بررسی هیدرودینامیک سیستم های مایع - مایع در الگوی جریان جتی متقارن از قبیل طول شکسته شدن جت، قطر قطره ها و قطر جت پرداخته شده است. نتیجه های حاصل از آنالیز عددی با نتایج آزمایشگاهی برای دو سیستم آب - تولوئن و آب - بوتانول مقایسه شده و شبیه سازی انجام شده مورد اطمینان می باشد.

بخش نظری

طرحی از پدیده تشکیل جت متقارن و شکسته شدن آن به قطره های در شکل ۱ نشان داده شده است. در واقع سیال غیر قابل تراکم و نیوتنی با دانسیته ρ_j و ویسکوزیته μ_j از نازل با سرعت متوسط v_0 وارد سیال ساکن، غیر مخلوط شدنی و نیوتنی با دانسیته ρ_c و ویسکوزیته μ_c می شود.

برای بررسی این پدیده با استفاده از CFD، میدان جریان سیال را برای دو فاز غیر قابل امتزاج به صورت میدان سیال تک سیال در نظر گرفته شده است که خواص سیال به ویژه دانسیته و

نشان داده شده است. با توجه به شکل، اجزاء تشکیل دهنده دستگاه شامل: ۱- مخزن سیال سبک (تولوئن یا بوتانول) به ظرفیت 1000 cm^3 ، ۲- لوله سیلیکونی با قطر داخلی 7 mm ، ۳- شیر سوزنی، ۴- اندازه گیر دبی^(۲) برای اندازه گیری دبی در حدود $9 \text{ cm}^3/\text{s}$ - 0 (دقت اندازه گیری در حدود $0.05 \text{ cm}^3/\text{s}$)، ۵- نازل با قطرهای 1.8 mm ، 2.3 mm و 2.8 mm ، ۶- ستون برج حاوی دو سیال سنگین (آب) و سبک (تولوئن یا بوتانول) به حجم $2355 \text{ cm}^3/\text{s}$ ، ۷- لوله خروجی موارد سبک از ظرف نگهداری مواد، ۸- لوله رابط سیلیکونی با قطر 7 mm ، ۹- ظرف مزور 250 cc (با دقت 2 cc) و 10 - دوربین دیجیتال عکاسی با تراکم 7 مگا پیکسل می باشد.

مخزن شماره (۱) در ارتفاع 9 m بالاتر از مخزن شماره (۶) قرار داده شده است تا هد مناسب را برای دبی لازم، مهیا سازد. سیال سبک از مخزن شماره (۱) با تنظیم شدن دبی توسط شیر سوزنی شماره (۳) وارد مخزن شماره (۶) که شامل سیال سنگین تر است می شود. برای هر دبی در حدود 6 یا 7 تصویر تهیه شده است که با آنالیز این تصویرها پارامترهای مورد بررسی از آنها استخراج می شود. برای دقت بیشتر در اندازه گیری دبی و داشتن حالت پایا^(۳) در دستگاه از یک مزور مدرج (شماره ۹) استفاده شده است. در واقع سیال سبک بعد از تماس با سیال سنگین از طریق لوله شماره (۷) وارد مزور می شود و درحالی که حالت پایا در سیستم ایجاد می شود، با اندازه گیری حجم سیال در زمان مشخص می توان دبی رواتر را در دستگاه چک نمود. همچنین بر روی نازل علامتی به طول 10 mm تهیه شده است که مبنایی برای اندازه گیری دقیق پارامترهای مورد نیاز از قبیل طول جت، قطر جت، قطر قطرات بالای جت و غیره از طریق آنالیز تصویرها می باشد. طول جت در این آنالیزها، از انتهای نازل تا جایی است که جت تقارن خود را حفظ می کند، در نظر گرفته شده است.

داده های آزمایشگاهی برای الگوی جریان جتی متقارن از سه نازل با قطرهای مختلف برای سیستم آب - تولوئن و آب - بوتانول انتخاب شده اند. نتیجه های عددی حاصل از شبیه سازی با نتیجه های آزمایشگاهی در شکل ۳ مقایسه شده است. در انتخاب داده های آزمایشگاهی سعی شده است که در هر نازل تمامی طول بدون بعد جت در محدوده الگوی جریان جتی متقارن مورد بررسی قرار گیرد. نمودارهای شکل ۳ نشان می دهند که اختلاف بین نتیجه های عددی و آزمایشگاهی 18 درصد می باشد

آنالیز CFD این پدیده توسط روش VOF^(۱) انجام شده است. در این روش فرض می شود که تغییرات خواص فیزیکی در سطح مشترک آبی نیست و یک تابعیت ملایم دارد به همین دلیل از پارامتر Φ استفاده می شود. این پارامتر برای یک فاز مقدار صفر و برای فاز دیگر مقدار یک را دارد اما مقدار آن روی سطح مشترک از صفر تا یک به طور ملایم متغیر است. به منظور تعقیب سطح مشترک از معادله پاره ای زیر استفاده می شود.

$$\frac{D}{Dt} \phi = C \quad (3)$$

معادله بالا بر اساس روش VOF سطح مشترک را تعقیب می کند. سطح مشترک در این مقاله، مقادیر 0.5 برای Φ در نظر گرفته شده است. با تعریف Φ ، مقدارهای دانسیته بدون بعد و ویسکوزیته بدون بعد تعریف می شود. در تعیین دانسیته و ویسکوزیته مقدار متوسطی بر اساس مقدار پارامتر Φ بیان کننده موقعیت هر فاز یا سطح مشترک استفاده شده است و برای این خواص در محدوده سطح مشترک، مقدارهای پیوسته به دست می آید. همچنین بردار n که بردار نرمال عمود بر سطح مشترک و پارامتر κ که تغییرهای بردار عمود بر سطح مشترک را بیان می کند را به صورت زیر که در محدوده سطح مشترک فعال می شوند بیان شده است.

$$\frac{\rho}{\rho_j} = \eta \phi + (1 + \phi), \quad \eta = \frac{\rho_c}{\rho_j} \quad (4)$$

$$\frac{\mu}{\mu_j \cdot \text{Re}_j} = \frac{\lambda}{\text{Re}_j} \phi + (1 - \phi) \frac{1}{\text{Re}_j}, \quad \lambda = \frac{\mu_c}{\mu_j} \quad (5)$$

$$n = \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \quad (6)$$

$$\kappa = \nabla \cdot n \quad (7)$$

برای شبیه سازی این فرایند از نرم افزار Fluent استفاده شده است. این نرم افزار بروی رایانه ای با سیستم پردازش 1800 Hz استفاده شده و هر اجرای برنامه در حدود 2 ساعت به طول می انجامیده است.

نتیجه ها و بحث

مقایسه نتیجه های آزمایشگاهی و نتیجه های عددی حاصل از شبیه سازی

برای تأیید و صحت شبیه سازی انجام شده، نتیجه های حاصل از آنالیز عددی با نتیجه های آزمایشگاهی [۱] مقایسه شده است. طرح دستگاه آزمایشگاهی مورد استفاده در آزمایشها در شکل ۲

(۱) Volume of fluid

(۲) Rotameter

(۳) Steady-state

و می‌توان به نتایج شبیه‌سازی عددی انجام شده اطمینان نمود. شکل ۴ نشان دهنده شکل جت حاصل از نتیجه‌های تجربی و نتیجه‌های عددی برای سیستم آب - بوتانول و آب - تولوئن برای نازل قطر ۱٫۸ mm است که تأیید کننده تطابق مناسب شکل جت حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی است و درستی شبیه‌سازی انجام شده برای پدیده جتی متقارن را نشان می‌دهد.

توزیع سرعت و فشار در اطراف جت مایع - مایع

شکل ۵ توزیع فشار و بردارهای سرعت در اطراف جت مایع و قطرات تشکیل شده از آن را نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشخص است مقدار فشار در داخل جت و قطره‌ها به دلیل اعمال نیروی تنش بین‌فازی بر روی سطح مشترک بیشتر از فشار محیط است. روی جت موج‌هایی دیده می‌شود که با ایجاد آنها، مقدار فشار در داخل جت مقداری کم می‌شود اما با اعمال نیروی تنش بین‌فازی که عمود بر سطح مشترک است این فشار احیاء می‌شود و موج به سمت بالا حرکت می‌کند.

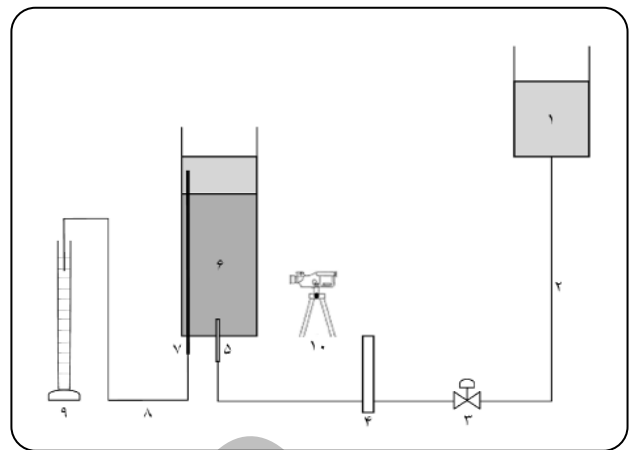
مقدار فشار در انتهای قطره‌ها نسبت به فشار در جلوی قطره در سیال محیط کمتر است. زمانی که قطره در سیال ساکن محیط صعود می‌کند، با کاهش سرعت در جلوی قطره مقدار فشار افزایش می‌یابد و با عبور جریان و افزایش سرعت در انتهای قطره و ایجاد گردابه در انتهای قطره، فشار کاهش خواهد یافت.

بردارهای سرعت در جت و سیال فاز پیوسته نزدیک به جت همواره رو به بالا هستند و حرکت سیال در داخل جت و قطرات همواره به دلیل نیروی شناوری و سرعت اولیه خروج فاز پراکنده از نازل صعودی است.

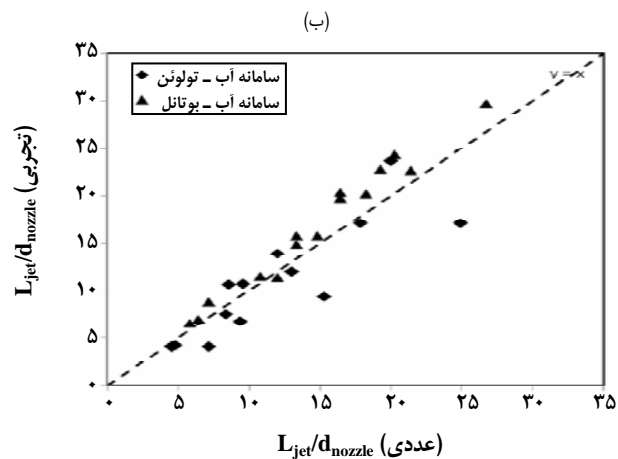
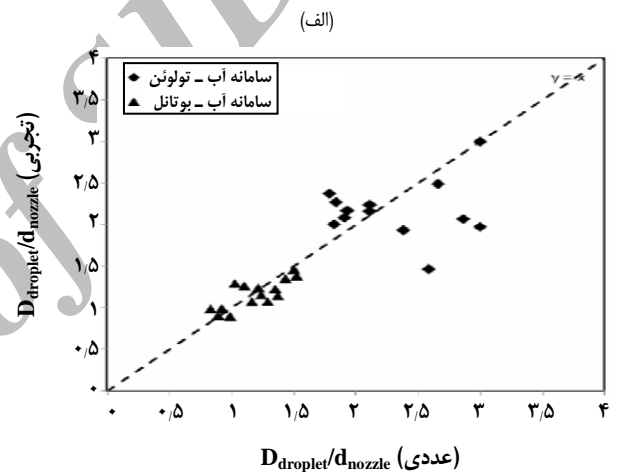
پیش‌بینی تغییرهای طول و قطر بدون بعد جت و شکل جت با تغییر η

یکی از عامل‌های مهم در حرکت نسبی سیالات دو فازی وجود اختلاف دانسیته و نیروی شناوری وارد بر آن می‌باشد. هر چه اختلاف دانسیته بیشتر باشد نیروی شناوری ایجاد شده قویتر و سرعت نسبی بین دو سیال بیشتر است.

شکل ۶ تغییرهای نسبت دانسیته فاز پیوسته به فاز پراکنده را بر طول بدون بعد جت و قطر قطره‌های بدون بعد و شکل جت در سامانه‌های مایع-مایع نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است با افزایش اختلاف دانسیته دو سیال طول بدون بعد جت افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش اختلاف دانسیته، نیروی رو به بالای شناوری بیشتر شده و در نتیجه مقدار طول بدون بعد جت افزایش می‌یابد.



شکل ۲ - شکل دستگاه آزمایشگاهی مورد استفاده.



شکل ۳- مقایسه نتیجه‌های تجربی و نتیجه‌های عددی برای (الف) قطر بدون بعد قطره‌های و (ب) طول بدون بعد جت در سیستم آب - تولوئن و آب - تولوئن.

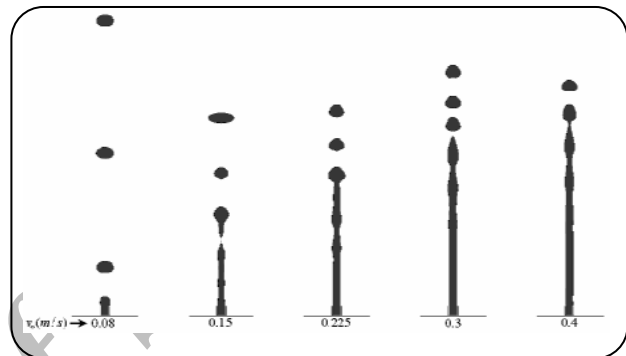
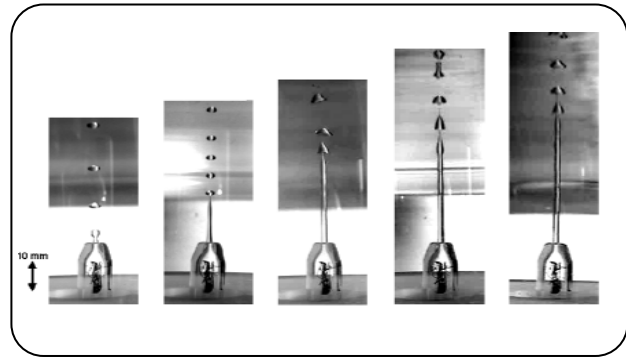
با توجه به شکل ۶ قطر قطره‌های بدون بعد و قطر بدون بعد جت با افزایش اختلاف دانسیته کاهش می‌یابد. سیال فاز پراکنده در هنگام ورود به فاز پیوسته دارای مقداری نیروی اینرسی می‌باشد. این مقدار نیروی اینرسی با افزایش طول جت کم شده تا مرحله‌ای که عمده آن را نیروی شناوری تشکیل می‌دهد. در این موقعیت هر چه مقدار نیروی شناوری (نسبت دانسیته دو سیال) کمتر باشد، زمان بیشتری برای قطرات فاز پراکنده در اختیار است تا بر حجم خود در هنگام جدایش از جت بیفزایند، اما زمانی که اختلاف دانسیته دو سیال افزایش یابد نیروی اینرسی در هنگام جدایش قطره از جت بیشتر بوده و قطره زمان کمتر برای افزایش حجم خود در اختیار دارد. تغییرهای اختلاف دانسیته بر قطر بدون بعد جت بسیار کم است و با افزایش اختلاف دانسیته جت منبسط‌تر شده و قطر جت افزایش می‌یابد.

پیش بینی تغییرهای طول و قطر بدون بعد جت و شکل جت با تغییر λ
نسبت ویسکوزیته فاز پیوسته به فاز پراکنده روی طول بدون بعد جت، قطر قطره‌های بدون بعد و شکل جت متقارن در شکل ۷ نشان داده شده است. بیشترین مقدار طول بدون بعد جت مربوط به زمانی است که نسبت ویسکوزیته دو فاز یک باشد.

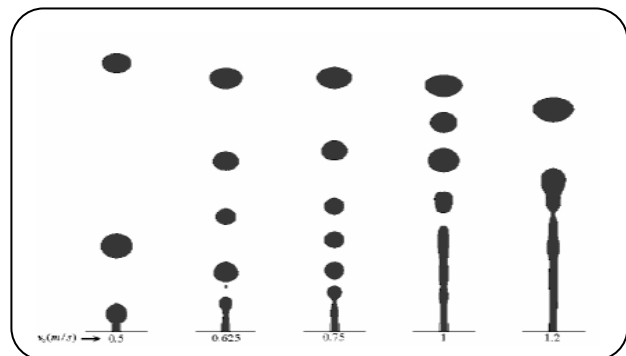
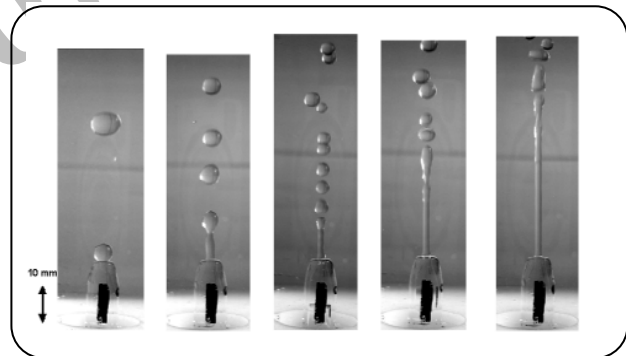
با افزایش اختلاف در مقدارهای ویسکوزیته دو فاز پراکنده و پیوسته طول بدون بعد جت کاهش می‌یابد. زمانی که مقدار ویسکوزیته فاز پراکنده نسبت به فاز پیوسته افزایش یابد یا ویسکوزیته فاز پیوسته نسبت به فاز پراکنده افزایش یابد، میزان نیروی ویسکوز روی سطح مشترک بیشتر شده و باعث کاهش در طول جت می‌شود. قطر قطره‌ها و قطر جت کمترین مقدار خود را در نسبت ویسکوزیته یک دارند.

هنگامی که مقدار نیروی ویسکوز بر سطح مشترک جت افزایش می‌یابد، زمان بیشتری برای افزایش حجم در اختیار قطره‌های در حال جدایش از جت گذاشته می‌شود و در نتیجه مطابق روند قطر قطرات بدون بعد در شکل ۷-ج با افزایش نسبت ویسکوزیته دو فاز، ابتدا کاهشی تا نسبت ویسکوزیته یک و سپس افزایشی می‌باشد. با توجه به میزان تغییرها در قطر قطره‌های بدون بعد با تغییرهای نسبت ویسکوزیته می‌توان نتیجه گرفت که مقدار این تغییرها با تغییر در مقدار نسبت ویسکوزیته، کم و برای تغییرهای کم، حتی ناچیز باشد.

پیش بینی تغییرهای طول و قطر بدون بعد جت و شکل جت با تغییر Re
عدد Re یکی از پارامترهای موثر بر دینامیک سیالات به ویژه



(الف)



(ب)

شکل ۴- مقایسه‌ای نمادین بین نتیجه‌های عددی (تصویرهای ردیف پایین) و نتیجه‌های آزمایشگاهی (تصویرهای ردیف بالا) برای (الف) سیستم آب - بوتانول و (ب) سیستم آب - تولوئن در سرعت‌های مختلف در قطر نازل ۱٫۸ mm.

دینامیک سیالات دو فازی است. تاثیر این عدد بر طول بدون بعد جت، قطر قطره‌ها بدون بعد و قطر بدون بعد جت در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۸ مشخص است با افزایش عدد Re ، طول بدون بعد جت ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد در حالی که قطر قطره‌ها بدون بعد و قطر بدون بعد جت کاهش می‌یابد. دلیل بالا بودن قطر قطره‌ها و قطر جت در Re پایین تاثیر زیاد نیروهای ویسکوز بین دو فاز می‌باشد. زمانی که ویسکوزیته دو فاز زیاد باشد، حرکت جت در سیال فاز پیوسته مشکل بوده و سرعت سیال جت سریعاً بعد از خروج از نازل کاهش می‌یابد و در نتیجه طول بدون بعد جت کاهش می‌یابد. از طرفی با کاهش سرعت مقدار انبساط سیال فاز پراکنده بیشتر شده و باعث افزایش در قطر جت و قطر قطره‌ها می‌شود.

پیش‌بینی تغییرهای طول و قطر بدون بعد جت و شکل جت با تغییر We

عدد بدون بعد We یکی از مهمترین اعداد بدون بعد در سامانه‌های دو فازی است.

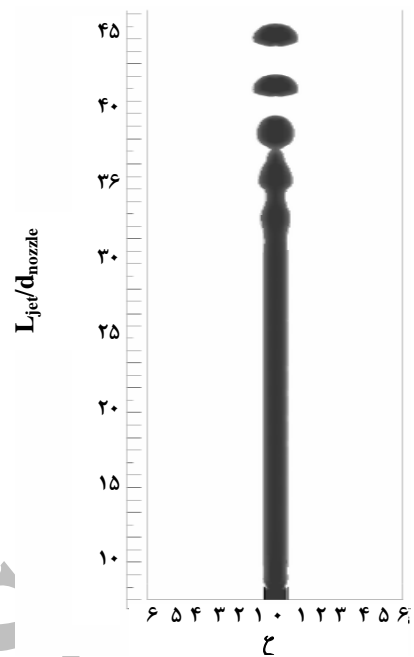
همانطور که از معادله (۲) مشخص است، عدد We نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای بین فازی را نشان می‌دهد.

هر چه مقدار We بیشتر باشد یعنی نیروی کمتری بر سطح مشترک بین دو فاز وارد می‌شود. تغییرهای شکل جت، طول بدون بعد جت، قطر قطره‌ها و قطر جت با عدد We در شکل ۹ نشان داده شده است.

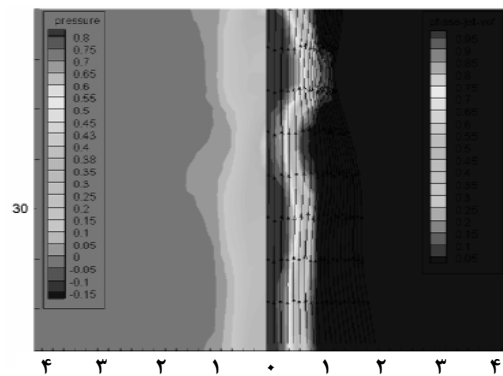
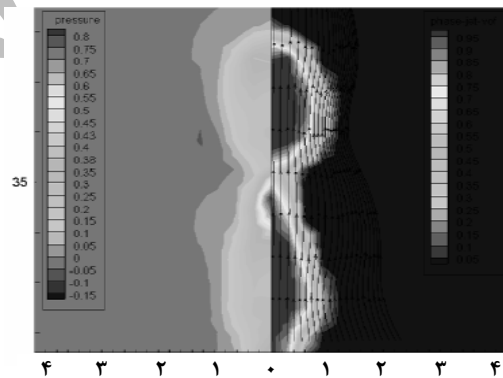
مطابق شکل ۹ با افزایش عدد We مقدار طول جت افزایش یافته در حالی که قطر قطره‌های و قطر جت کاهش می‌یابند. افزایش طول جت با افزایش We بیان کننده اعمال شدن نیروی کمتر کشش بین فازی بر سطح مشترک جت است و جت توانایی رشد و سرعت بیشتر را دارا می‌باشد. علت اینکه قطر قطره‌ها با کاهش We ، افزایش می‌یابند این است که با افزایش نیروی تنش بین فازی زمان بیشتری در اختیار افزایش حجم قطرات در هنگام شکسته شدن جت به قطره‌ها داده می‌شود و قطرات با کروی شدن بیشتر از جت تولید می‌شود.

نتیجه‌گیری

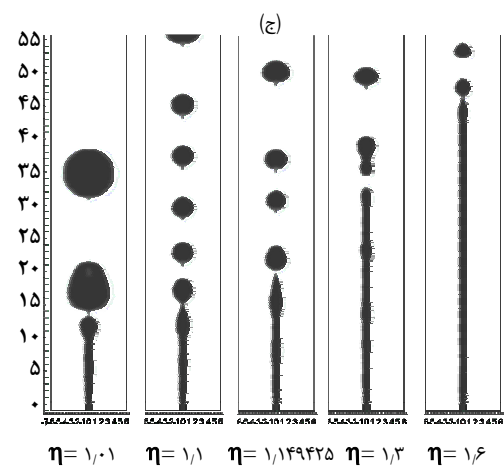
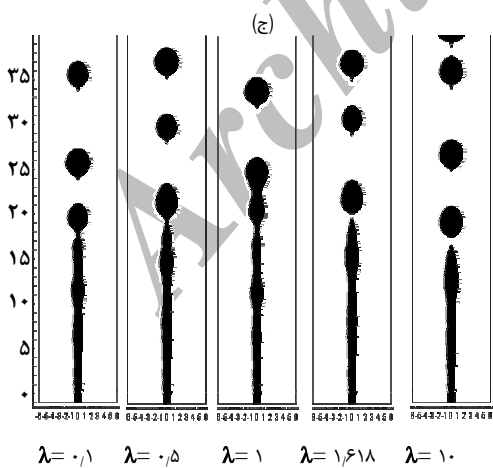
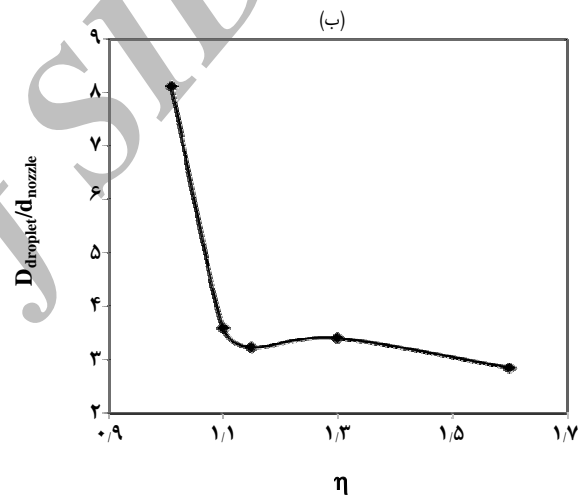
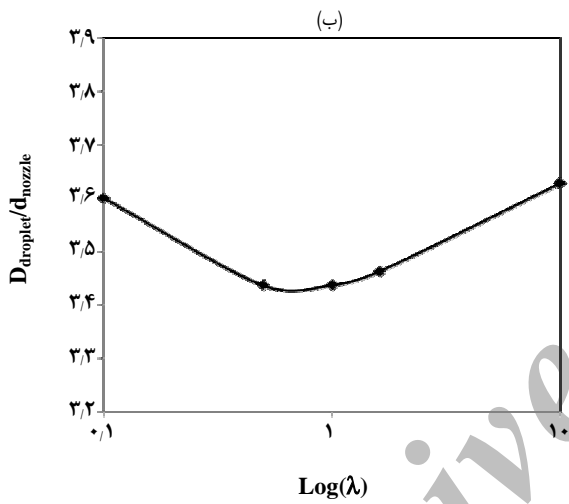
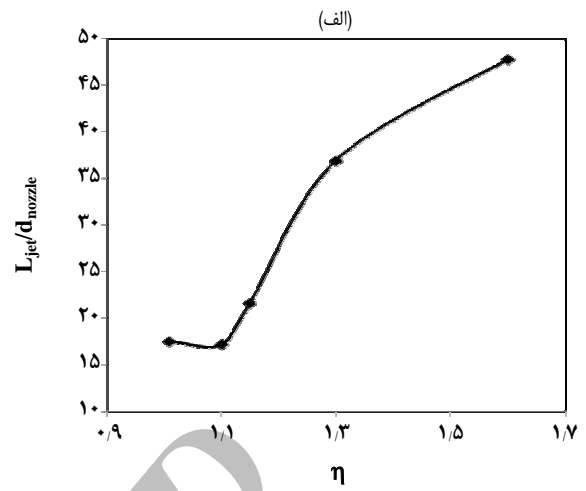
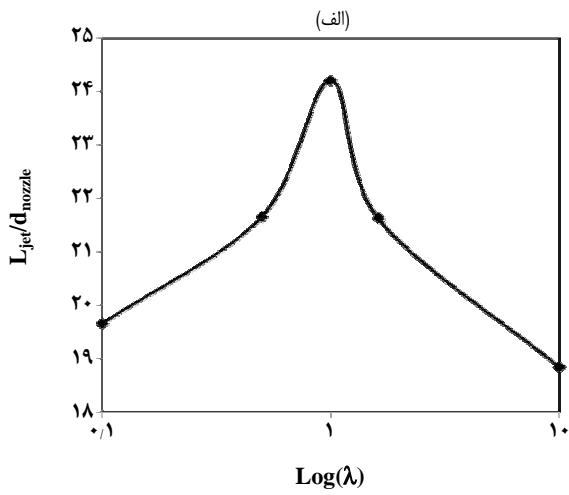
نتیجه حاصل از آنالیز عددی و آزمایشگاهی روی دو سامانه متفاوت آب - بوتانول و آب - تولوئن را می‌توان به‌طور زیر خلاصه نمود.
۱- با افزایش اختلاف دانسیته دو سیال طول بدون بعد جت افزایش می‌یابد و قطر قطره‌های بدون بعد و قطر بدون بعد جت با افزایش اختلاف دانسیته کاهش می‌یابد.



شکل ۵ - الف) شکل کلی جت متقارن با ویژگی‌های: $We=3,326$ ، $\lambda=1,618$ ، $Re=776,836$ ، $Fr=1$ ، $\eta=1,149$.

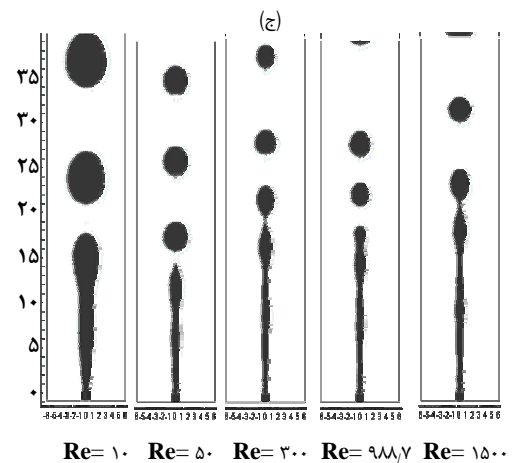
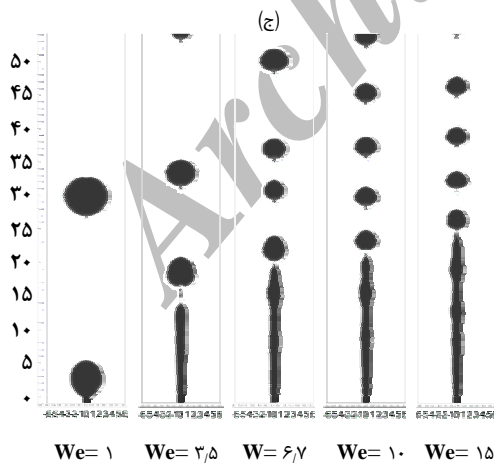
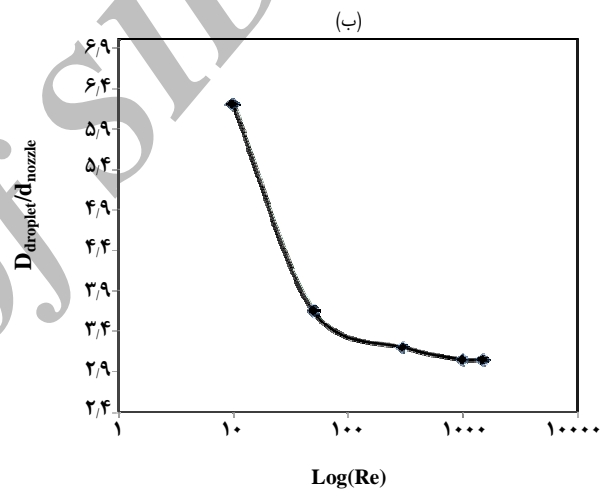
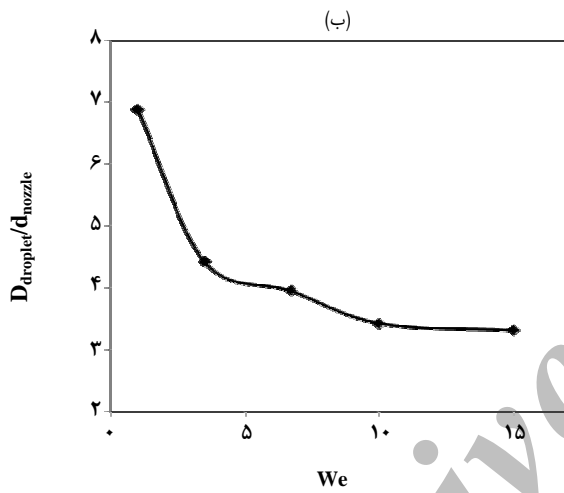
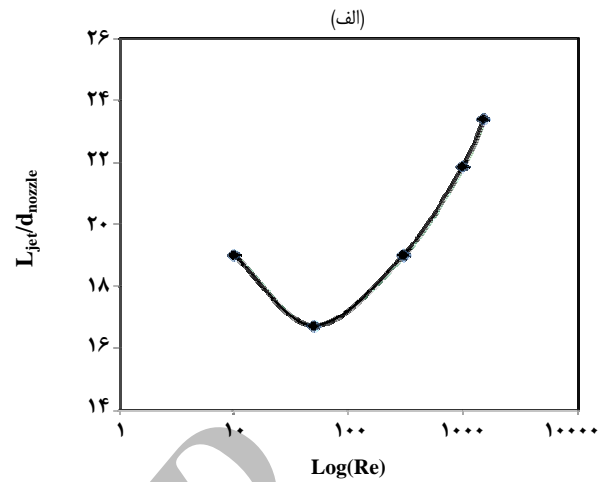
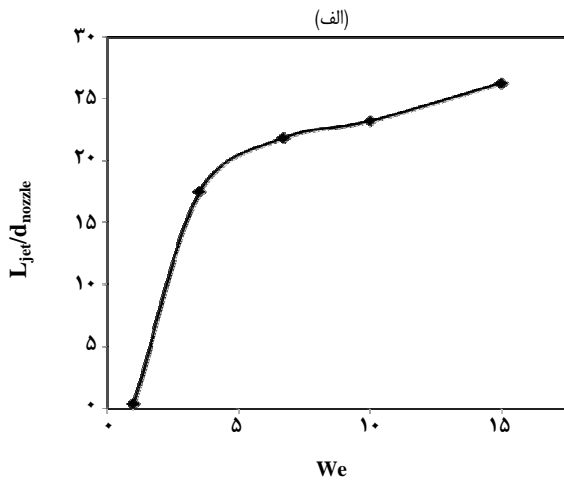


شکل ۵ - ب) پرفایل فشار و سرعت در اطراف جت مایع با ویژگی‌های: $We=3,326$ ، $\lambda=1,618$ ، $Re=776,836$ ، $Fr=1$ ، $\eta=1,149$.



شکل ۷- تغییرهای (الف) طول بدون بعد جت، (ب) قطر قطره‌های بدون بعد و (ج) شکل جت با تغییر نسبت ویسکوزیته فاز پیوسته به فاز پراکنده (λ) در $We = 6.7$ ، $Fr = 7.761$ ، $Re = 988.7$ ، $\lambda = 1.149$.

شکل ۶- تغییرهای (الف) طول بدون بعد جت، (ب) قطر قطره‌های بدون بعد و (ج) شکل جت با تغییر نسبت دانسیته فاز پیوسته به فاز پراکنده (η) در $We = 6.7$ ، $Fr = 7.761$ ، $Re = 988.7$ ، $\lambda = 1.618$.



شکل ۹- تغییرهای (الف) طول بدون بعد جت، (ب) قطر قطره‌های بدون بعد و (ج) شکل جت متقارن با تغییر عدد بدون بعد We در $We = 6.7$ ، $\lambda = 1.149$ ، $Re = 988.7$ ، $Fr = 7.761$

شکل ۸- تغییرهای (الف) طول بدون بعد جت، (ب) قطر قطره‌های بدون بعد و (ج) شکل جت با تغییر عدد بدون بعد Re در $We = 6.7$ ، $Fr = 7.761$ ، $\eta = 1.149$ ، $\lambda = 1.618$

P	فشار (Pa)	۲- با افزایش اختلاف در مقادیر ویسکوزیته دو فاز پراکنده و پیوسته طول بدون بعد جت کاهش می یابد و بیشترین مقدار طول بدون بعد جت مربوط به زمانی است که نسبت ویسکوزیته دو فاز، یک باشد.
Re	عدد رینولدز	۳- با افزایش عدد Re، طول بدون بعد جت ابتدا کاهش و سپس افزایش می یابد در حالی که قطر قطره های بدون بعد و قطر بدون بعد جت کاهش می یابد.
U	بردار بدون بعد سرعت	۴- با افزایش عدد We (کاهش کشش بین فازی) مقدار طول جت افزایش یافته در حالی که قطر قطره ها و قطر جت کاهش می یابند.
V	بردار سرعت (m/s)	
v ₀	سرعت متوسط سیال ورودی به نازل (m/s)	
VOF	حجم سیال	
We	عدد وبر	

نمادهای یونانی

ρ_j	دانسیتته فاز پراکنده (سبک) (kg/m^3)
μ_j	دانسیتته فاز پیوسته (سنگین) (kg/m^3)
ρ_c	دانسیتته فاز پیوسته (kg/m^3)
μ_c	ویسکوزیته فاز پیوسته (kg/m^3)
σ	کشش بین فازی (N/m^2)
κ	گرادیان بردار یکه عمود بر سطح مشترک
ζ	طول بدون بعد در جهت شعاع
ξ	طول بدون بعد در جهت ارتفاع
τ	زمان بدون بعد
λ	نسبت ویسکوزیته فاز پیوسته به فاز پراکنده
Φ	پارامتر ردیاب سطح مشترک
η	نسبت دانسیته فاز پیوسته به فاز پراکنده

تاریخ دریافت: ۱۷/۱۱/۸۷، تاریخ پذیرش: ۸/۹/۸۸

تشکر و قدردانی

بدینوسیله تهیه کنندگان این مقاله تشکر و قدردانی خود را از شرکت ملی پالایش و پخش فراورده های نفتی ایران به خاطر حمایت مالی از این تحقیق ابراز می دارند.

نمادها

CFD	دینامیک سیالات محاسباتی
d_{nozzle}	قطر نازل (m)
D_{droplet}	قطر قطره ها (m)
L_{jet}	طول جت (m)
Fr	عدد فرود
N	بردار یکه عمود بر سطح مشترک

مراجع

- [۱] باستانی، داریوش؛ معماری، م.، "بررسی آزمایشگاهی جت مایع - مایع و تعیین مشخصات هیدرودینامیکی آن"، دوازدهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران، دانشگاه صنعتی سهند (۱۳۸۷).
- [2] Tomotika S., On the Instability of a Cylindrical Thread of a Viscous Liquid Surrounded by Another Viscous Fluid, *Proceedings of the Royal Society of London a*, **150**, p. 322 (1935).
- [3] Rayleigh J.W.S, On the Instability of Jets, *Proceedings of the London Mathematical Society*, **10**, p. 4 (1879).
- [4] Kitamura Y., Mishima H., Takahashi T., Stability of Jets in Liquid-Liquid Systems, *Canadian Journal of Chemical Engineering* **60**, p. 723 (1982).
- [5] Teng H., Kinoshita C.M., Masutani S.M., Prediction of Droplet Size from Breakup of Cylindrical Liquid Jets, *International Journal of Multiphase Flow*, **21**, p. 129 (1995).

- [6] Das T.K., Prediction of Jet Breakup Length in Liquid-Liquid Systems Using the Rayleigh-Tomotika analysis, *Atomization and Sprays*, **7**, p. 549 (1997a).
- [7] Skelland A.H.P., Johnson K.R., Jet Break-up in Liquid-Liquid Systems, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, **52**, p. 732 (1974).
- [8] Bright A., Minimum Drop Volume in Liquid Jet Breakup, *Chemical Engineering Research and Design*, **63**, p. 59 (1985).
- [9] Das T.K., Prediction of Jet Breakup Length in Liquid-Liquid Systems Using the Rayleigh-Tomotika Analysis, *Atomization and Sprays*, **7**, p. 549 (1997b).
- [10] Richards J.R., Beris A.N., Lenhoff A.M., Steady Laminar Flow of Liquid-Liquid Jets at High Reynolds Numbers", *Physics of Fluids*, **A 5**, p. 1703 (1993).
- [11] Hirt C.W. and Nichols B.D., Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", *Journal of Computational Physics*, **39**, p. 201 (1981).
- [12] Shunji H., Jiro K., Shiro M., Museok S. and Grétar T., Breakup Mode of an Axisymmetric Liquid Jet Injected Into Another Immiscible Liquid, *Chemical Engineering Science*, **61**, p. 3986 (2007).