



آنالیز تشکیل قطره آب در روغن در کانال جریان هم‌محور به روش دینامیک سیالات محاسباتی

فروزان رستمی^۱، محمد رحمانی^{۲*}

۱- دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، واحد دانشگاهی ماهشهر، ماهشهر، ایران
۲- دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۳۰
بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۲۳
پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۴
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۱/۱۴

کلمات کلیدی:

تشکیل قطره
جریان دوفازی
کانال جریان هم‌محور
روش حجم سیال
دینامیک سیالات محاسباتی

خلاصه: سیستم‌های دوفازی ابزاری مهم برای تشکیل قطرات محسوب می‌شوند که به دلیل کاربردهای متنوع در چند دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. در پژوهش حاضر، فرآیند تشکیل قطره‌ی آب در روغن در یک هندسه هم‌محور با استفاده از روش حجم سیال شبیه‌سازی می‌گردد و تأثیر پارامترهای مؤثر بر این فرآیند مانند سرعت و دانسیته فاز گسسته و همچنین کشش سطحی مورد بررسی قرار می‌گیرد. از نتایج حاصل برای تولید ذرات کروی گاما-آلومینا به روش قطره‌ی روغن استفاده می‌شود. در این پژوهش با ساخت یک سامانه آزمایشگاهی، عوامل مؤثر بر فرآیند تشکیل قطره بررسی گردد. نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده است. خطای اندازه‌گیری برای اندازه قطره حدود ۰.۵٪ و برای کرویت حدود ۰.۴٪ است. مطالعات نشان می‌دهد که اگر چه پارامترهای ذکر شده تأثیر زیادی روی اندازه قطرات و زمان جدایش دارند اما وابستگی اندازه قطرات به کشش سطحی و دانسیته فاز گسسته بیشتر است. افزایش کشش سطحی موجب افزایش اندازه قطرات و زمان جدایش می‌شود. همچنین، با افزایش دانسیته فاز گسسته، اندازه قطرات کاهش اما زمان جدایش افزایش یافته است. افزایش سرعت نیز با وجود تأثیر ناچیز، منجر به افزایش اندازه و کاهش زمان جدایش قطرات شده است.

۱- مقدمه

جریان‌های چندفازی^۱ جریان هم‌زمان چند فاز در کنار هم می‌باشد که این فازها اثرات متقابلی بر روی یکدیگر دارند. جریان‌های دوفازی ساده‌ترین حالت جریان‌های چندفازی است و از مهم‌ترین آنها می‌توان به فرآیند تشکیل قطره در فاز مایع اشاره کرد. نقطه شروع برای بیشتر مباحث میکروسیالی^۲ مبتنی بر قطره، تشکیل قطره است که از جمله عناوین جالب و بحث برانگیز است و در طول ده‌های گذشته مورد توجه پژوهشگران، محققین و صاحبان صنایع قرار گرفته است. سیستم‌های میکروسیالی مبتنی بر قطره نقش مهمی در زمینه‌های شیمیایی، دستگاه‌های آزمایشگاه تراشه‌ای^۳، دارو رسانی^۴، واکنش‌های بیوشیمیایی، کپسوله‌سازی^۵ و سنتز نانو مواد ایفا می‌کنند [۱].

شکل‌گیری قطره در میکروکانال‌ها بسیار مهم است، زیرا نیاز به ایجاد

- 1 Multiphase
- 2 Microfluidic
- 3 Lab-on-Chip
- 4 Drug delivery
- 5 Encapsulation

قطرات مایع با اندازه‌های دقیق وجود دارد. فهم عوامل مختلف مؤثر در فرآیند شکست قطره از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا امکان کنترل این پارامترها را فراهم می‌کند. به طور کلی تشکیل قطره به دو روش فعال یا غیرفعال در این کانال‌ها انجام می‌شود. روش فعال تولید قطره نیاز به یک منبع خارجی برای تأمین انرژی دارد، اما در روش غیرفعال تشکیل قطره تنها تحت تأثیر هندسه کانال بر جریان دوفازی است [۲].

دو دیدگاه مطالعات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی در این مسئله وجود دارد. بررسی‌های آزمایشگاهی با محدودیت‌هایی مانند دشواری ساخت به دلیل هندسه بسیار کوچک، هزینه زیاد و زمان‌بر بودن آزمایشات مواجه هستند. شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی می‌تواند بر این محدودیت‌ها غلبه کند و می‌توان مقدار پارامترها را بدون تأثیر بر دیگری در دامنه وسیعی تغییر داد و این بیانگر کارآمدی شبیه‌سازی عددی در تکمیل مطالعات آزمایشگاهی است.

در سال ۲۰۲۰ رحیمی و همکاران [۳] phase-dispersed the (۳) در سال ۲۰۲۰ رحیمی و همکاران [۳] phase-d) به شبیه‌سازی عددی فرآیند تشکیل قطره آب در روغن در

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.rahmani@aut.ac.ir



و تأثیر کشش سطحی و سرعت‌های جریان را روی فرآیند تشکیل امولسیون بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش کشش سطحی اندازه قطرات کاهش و فرکانس تولید افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت جریان هم‌جهت مکانیزم نیروی محرکه به تدریج از نیروی لاپلاس به نیروی درگ جریان هم‌جهت تغییر می‌کند؛ اندازه قطرات کاهش و فرکانس تولید افزایش می‌یابد زیرا نیروی درگ با سرعت جریان فاز پیوسته افزایش می‌یابد. افزایش سرعت فاز پراکنده (در سرعت ثابت جریان فاز پیوسته) نیز موجب افزایش اندازه و فرکانس تولید قطرات می‌شود.

در سال ۲۰۱۸ ژئی کینگ^۶ و وانگ [۷] به بررسی شبیه‌سازی دو بعدی تشکیل قطره‌ی تولون در آب پرداختند. آن‌ها از روش حجم سیال بر پایه نیروی سطحی پیوسته^۷ استفاده کردند و تأثیر خواص فیزیکی روی سرعت صعود قطره را بررسی کردند. نتایج شبیه‌سازی آنها نشان داد که با افزایش اختلاف دانسیته دو فاز سرعت صعود قطره افزایش می‌یابد زیرا اختلاف دانسیته بیشتر بویانسی بیشتری تولید می‌کند. در سال ۲۰۱۸ چکیفی^۸ [۸] شبیه‌سازی عددی فرآیند تشکیل قطره آب در روغن را در یک میکروکانال جریان هم‌محور مورد بررسی قرار داد و از نرم‌افزار فلونت با بکارگیری روش حجم سیال استفاده شد. او تأثیر پارامترهای شرایط جریان و قطر کانال بیرونی را روی حالت شکست قطره، فرکانس تولید و سایز قطره مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که افزایش سرعت فاز گسسته منجر به تشکیل رژیم جتی می‌شود و جدایش قطرات از انتهای جت به دلیل ناپایداری جت اتفاق می‌افتد. همچنین کاهش نسبت قطر کانال بیرونی به کانال فاز گسسته نیز موجب فرکانس بیشتر می‌شود.

در سال ۲۰۱۸ منگ^۹ و همکاران [۹] به بررسی شبیه‌سازی عددی تشکیل قطره آب در روغن به روش حجم سیال پرداختند. آن‌ها تأثیر زاویه تماس دیواره روی اندازه قطره را در طی فرآیند تشکیل امولسیون بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که کاهش زاویه تماس باعث افزایش اندازه قطره می‌شود. آن‌ها همچنین تغییرات فشار را در امتداد محور مرکزی و در یک نقطه ثابت در زوایای مختلف تماس مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. در سال ۲۰۱۷ ونجی‌لن و همکاران [۱۰] به فرآیند تشکیل قطره در یک دستگاه میکروسیالی جریان هم‌محور پرداختند و یک مکانیزم جدید برای فرآیند شکست قطره در یک میکروکانال جریان هم‌محور کشف کردند. آن‌ها از

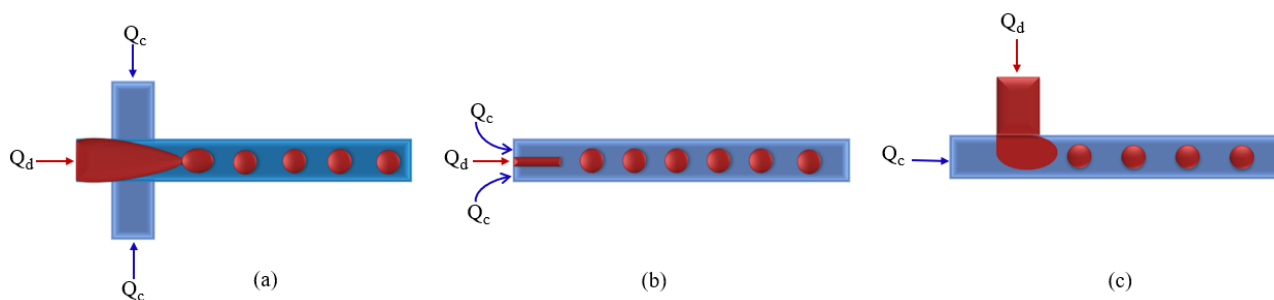
یک هندسه جریان متمرکز هم‌محور پرداختند. برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار فلونت با بکارگیری روش حجم سیال^۱ استفاده شد. تأثیر ویسکوزیته فازها و دبی حجمی، کشش سطحی، قطر نازل و قطر اوریفیس روی سایز قطره بررسی شد. نتایج عددی و تجربی آنها مطابقت قابل قبولی داشتند. در سال ۲۰۲۰ دستیار و همکاران [۴] به صورت تجربی تأثیر سورفکتانت روی فرآیند تشکیل قطره مایع در هوا را بررسی کردند. آن‌ها از محلول آب-گلیسرول با غلظت‌های مختلف گلیسرول به عنوان مایع فاز قطره استفاده کردند. افزایش غلظت سورفکتانت باعث کاهش کشش سطحی می‌شود و در نتیجه زمان کمتری برای تعادل نیروهای عمل کننده روی قطره نیاز می‌باشد که منجر به کاهش زمان تشکیل قطره می‌شود.

در سال ۲۰۲۰ سوماسخارا^۲ و همکاران [۱] تشکیل قطرات امولسیون و دینامیک شکست قطرات را با استفاده از روش کوپل حجم سیال و سطح هم‌تراز^۳ در یک میکروکانال جریان متمرکز شده بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که با اضافه کردن سورفکتانت کشش سطحی کاهش و گرانیوی (فاز پیوسته) افزایش می‌یابد که موجب کاهش طول و حجم قطره می‌شود. کاهش طول قطره نیز موجب کروی‌تر شدن قطرات تولیدی شد. همچنین کاهش کشش سطحی که موجب افزایش عدد مویینگی می‌شود باعث تغییر رژیم جریان از چکیدن به جتی شد. آن‌ها همچنین به بررسی تأثیر نسبت دبی جریان پرداختند؛ افزایش دبی فاز پیوسته موجب اعمال نیروی برشی بیشتر بر فاز پراکنده شد که منجر به تولید قطرات با طول و حجم کوچکتر شد.

در سال ۲۰۱۹ اوآنجلیا^۴ و همکاران [۵] تأثیر سورفکتانت در فرآیند تشکیل قطره آب در روغن را در یک میکروکانال جریان متمرکز مورد بررسی قرار دادند. چهار رژیم جریان فشرده‌گی، چکیدن، جتی و رگه‌ای را مشاهده کردند. نتایج نشان داد که با افزودن سورفکتانت محدوده‌ی سرعت‌های مورد نیاز برای رژیم‌های مختلف جریان تغییر کرد. محدوده برای رژیم‌های فشرده‌گی و چکیدن کاهش یافت اما برای رژیم‌های جتی و رگه‌ای افزایش یافت. افزایش دبی جریان فاز پیوسته نیز موجب کاهش سایز قطره شد. در سال ۲۰۱۹ لیان^۵ و همکاران [۶] اثرات هندسه میکروسیالی هم‌محور را بر روی تشکیل امولسیون بررسی کردند. آن‌ها از یک تراشه جدید با ترکیب هندسه هم‌محور و امولسیون سازی مرحله‌ای استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار فلونت و با بکارگیری روش حجم سیال شبیه‌سازی را انجام دادند

- 1 Volum Of Fluid (VOF)
- 2 Somasekhara
- 3 Coupling Level Set And Fluid Of Volume (CLSVOF)
- 4 Evangelia
- 5 Lian

- 6 Zhe Qing
- 7 Continuum Surface Force (CFS)
- 8 Chekifi
- 9 Meng



شکل ۱. انواع سیستم‌های تشکیل قطره

Fig. 1. Types of droplet formation systems

می‌شود و این تأثیر نیز در رژیم چکیدن بیشتر از رژیم جتی است. در سال ۲۰۱۴ لیانگ‌هو^۳ و همکاران [۱۳] فرآیند تشکیل قطره آب در روغن را در یک هندسه جریان هم‌محور مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها رژیم‌های چکیدن، جتی و موجی و همچنین گذر از رژیم چکیدن به جتی را تجزیه و تحلیل کردند. نتایج آنها نشان داد که رژیم چکیدن در دبی جریان پایین فاز پیوسته و گسسته اتفاق می‌افتد؛ همچنین جریان جتی در دبی‌های زیاد جریان دو سیال ظاهر می‌شود که می‌تواند به جت باریک در دبی جریان بالای فاز پیوسته و جت پهن در دبی جریان بالای فاز گسسته تقسیم شود. تشکیل قطره در هر دو رژیم منظم و پایدار نیست. در سال ۲۰۱۲ نیچنگ^۴ و همکاران [۱۴] شبیه‌سازی فرآیند تشکیل قطره آب در روغن در یک میکروکانال تی‌شکل پهن را با استفاده از نرم افزار فلوئنت و با بکارگیری روش حجم سیال، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تأثیر مقدار عدد موینگی، خاصیت ترشوندگی و دبی جریان فاز گسسته را روی فرآیند تشکیل قطره بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش عدد موینگی در هر دو رژیم چکیدن و جتی اندازه قطرات کاهش می‌یابد. همچنین نتایج شبیه‌سازی به وضوح نشان داد که قطرات فقط زمانی می‌توانند تشکیل شوند که سیال فاز پیوسته دیواره کانال را مرطوب کند یعنی زاویه تماس روی دیوار کوچکتر از ۹۰ درجه باشد.

در میکروسیالات سه هندسه رایج برای تشکیل قطرات وجود دارد: جریان هم‌محور^۵، تی‌شکل^۶ و جریان متمرکز^۷ که در شکل ۱ نشان داده

چند مایع به عنوان فاز گسسته و پیوسته استفاده کردند و فرآیند تشکیل قطره را در سه دستگاه که دارای ابعاد مشابه ولی ساخته شده از مواد متفاوت پلی‌پروپیلن، تفلون و شیشه بود انجام دادند. زمانی که از کانال فاز گسسته با جنس تفلون و شیشه استفاده کردند، گردن خارج از کانال فاز پیوسته تشکیل شد ولی وقتی از کانال ساخته شده با پلی‌پروپیلن که دارای زاویه تماس 150° استفاده کردند پدیده متفاوت بود و فرآیند تشکیل گردن و شکستن داخل کانال فاز گسسته انجام می‌شود. در سال ۲۰۱۷ چائوجون^۱ و همکاران [۱۱] به بررسی شبیه‌سازی عددی روی فرآیند تشکیل قطره با بکارگیری روش حجم سیال در یک هندسه جریان هم‌محور پرداختند. آن‌ها تأثیر ویسکوزیته و سرعت‌های دو فاز پیوسته و گسسته، کشش سطحی، تأثیر دیواره و همچنین خاصیت ترشوندگی لوله موین روی اندازه قطره را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که تشکیل قطره به تعادل بین نیروی درگ جریان فاز پیوسته، نیروی اینرسی فاز گسسته و کشش سطحی روی قطره بستگی دارد. همچنین دریافتند که عدد موینگی فاز گسسته در گذر از رژیم چکیدن به جتی تأثیر بیشتری داشت. نتایج عددی و تجربی آنها مطابقت قابل قبولی داشتند.

در سال ۲۰۱۵ ونجی‌لن^۲ و همکاران [۱۲] به مطالعه‌ی تشکیل قطره آب در روغن در یک هندسه جریان هم‌محور پرداختند. آن‌ها دو رژیم چکیدن و جتی را در فرآیند تشکیل قطره مشاهده کردند و پی بردند که سرعت جریان و ویسکوزیته دو فاز تأثیر مهمی بر الگوی جریان دارند. نتایج نشان داد که افزایش سرعت و ویسکوزیته فاز پیوسته موجب تشکیل قطرات کوچکتری

3 Liangyu
4 Nicheng
5 Co-Flow
6 T junction
7 Flow focusing

1 Chaojun
2 Wenjie Lan

[۱۶]. شکل ۲ شماتیک دستگاه آزمایش مورد استفاده برای تولید ذرات گاما-آلومینا را نشان می‌دهد.

امینول^۳ و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۱، سنتز ذرات کروی گاما آلومینای را به روش ستون روغن مورد بررسی قرار دادند. مقادیر مختلف پودر بوهمیت به طور جداگانه در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب دی‌یونیزه سوسپانسی شدند. سپس سوسپانسیون‌ها به روش اولتراسونیک گسسته شدند. پس از تبدیل سل به ژل، ژل به صورت قطره‌ای توسط یک پمپ به ستون مایع شامل یک روغن پارافین در بالا و محلول آمونیاک در لایه زیرین منتقل شدند. قطرات بوهمیت به خاطر اثرات کشش سطحی روغن تشکیل شدند و قطرات ژل به مدت ۱ ساعت در محلول آمونیاک قرار می‌گیرند. آمونیاک اسید موجود در دانه‌های ژل را خنثی می‌کند و قطرات ژل سفت و سخت می‌شوند. سپس ذرات با روش ساده فیلترینگ جدا شده و با آب شست و شو شدند. ذرات به مدت ۱۲ ساعت در دمای اتاق خشک و سپس در دماهای مختلف کلسینه می‌شوند. نتایج آنها نشان داد که کرویت قطرات تزریق شده تابعی از غلظت بوهمیت است و در غلظت‌های پایین بوهمیت که کشش سطحی نسبتاً زیاد و ویسکوزیته پایین است گرانول‌های کروی با قطر حدود ۲ میلی‌متر تشکیل می‌شود.

در پژوهش حاضر شبیه‌سازی تشکیل قطره در اثر اختلاط دو سیال مخلوط نشدنی با استفاده از روش اوایلرین برای هر دو فاز در یک هندسه هم‌محور مطالعه می‌شود. هدف از انجام این پژوهش استفاده از نتایج حاصل برای تولید ذرات کروی گاما-آلومینا به روش قطره روغن است که در پژوهش‌های پیشین بررسی نشده است. استفاده از دانش دینامیک سیالات محاسباتی و مدل کردن سقوط قطرات در ستون روغن می‌تواند در طراحی سیستم تولید قطرات، طراحی نازل ایده‌آل برای تولید قطرات کروی یک اندازه و همچنین کنترل کرویت آن‌ها مؤثر باشد. برای تسخیر فصل مشترک^۴ نیز از روش کسر حجمی سیال که یک روش اوایلرین می‌باشد، استفاده شده است. تأثیر سرعت فاز گسسته، دانسیته فاز گسسته و کشش سطحی فاز گسسته با لوله موئین بررسی می‌شود.

۲- روش عددی

۲-۱- تئوری مدل حجم سیال

با توجه به اینکه دامنه جریان ما شامل دو مایع غیرقابل اختلاط است، از تکنیک تسخیر فصل مشترک و روش عددی حجم سیال جهت مدل‌سازی

شده‌اند. تحقیقات بر روی هندسه‌های گوناگون چون هندسه هم‌محور، هندسه تی‌شکل و هندسه جریان متمرکز نشانگر آن است که فرآیند تولید و کنترل قطرات بسیار پیچیده است و دلیل این پیچیدگی حضور پارامترهای متعدد مانند کشش سطحی، لزجت، ناپایداری، گرانش و... در مسئله است که هر کدام نقشی تعیین‌کننده و کلیدی دارند.

در جریان هم‌محور، فاز پراکنده از طریق یک لوله موئین که به طور هم‌محور درون لوله موئین بزرگتر قرار دارد و به موازات جریان فاز پیوسته، تزریق می‌شود. با رشد قطره‌ای در حال ظهور، نیروی درگ ویسکوزیته فاز پیوسته افزایش می‌یابد و این ادامه می‌یابد تا زمانی که نیروی درگ با نیروی کشش سطحی که قطره را به دهانه لوله موئین می‌چسباند برابر باشد؛ در این لحظه یک قطره تشکیل شده و به پایین دست جریان منتقل می‌شود. در کانال‌های هم‌محور لوله موئین خارجی بسیار بزرگتر از لوله موئین داخلی است و به همین دلیل قطرات تشکیل شده در این کانال‌ها نامحصور^۱ هستند. در نتیجه مکانیسم تشکیل قطره عمدتاً به برش ویسکوزیته و کشش سطحی بستگی دارد. با افزایش سرعت جریان در هندسه میکروسیالی شاهد تشکیل رژیم جتی هستیم که جریان فاز پراکنده در پایین دست جریان و به دلیل بی‌ثباتی ریلی-پلات^۲ شکسته و باعث تشکیل قطرات غیریکنواخت می‌شود [۱۵].

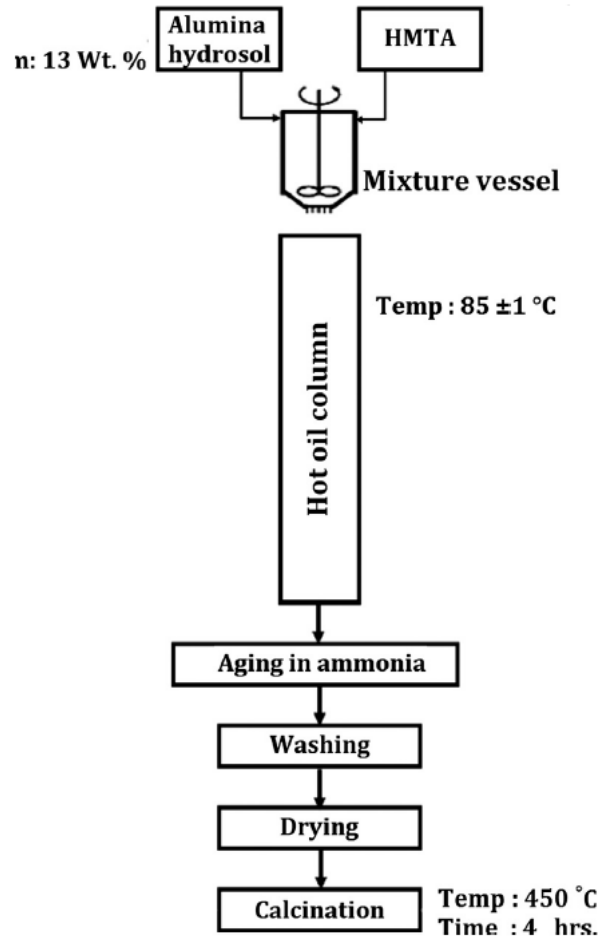
یکی از اشکالات این هندسه‌ها این است که معمولاً قطرات تولید شده به وسیله آن‌ها کاملاً یکنواخت نیست. از نتایج این شبیه‌سازی در تولید قطرات کروی در داخل فاز روغن برای کاربرد در ساخت ذرات کروی گاما-آلومینا می‌توان استفاده کرد. برای تولید این ذرات کروی می‌توان از روش سل-ژل و روش گرانول‌سازی ستون روغن استفاده کرد. پس از سنتز ذرات سل، این ذرات برای شکل‌دهی در داخل یک ستون روغن سقوط کرده و ذرات ژل کروی شکلی را به خاطر تنش سطحی به وجود می‌آورد. در این مرحله بخاطر نیروی گرانش و نیروی برشی این ذرات به صورت کروی در می‌آیند. بخاطر وجود گرما در داخل روغن، لایه بیرونی و سطحی ذرات به صورت ژل در می‌آید. سپس برای صلب شدن وارد لایه‌ای از محلول آمونیاک می‌شوند. آمونیاک به ژل ایجاد شده نفوذ می‌کند تا اسید موجود در ذرات را خنثی کرده و صلب شدن ذرات بهتر و بیشتر صورت می‌گیرد. پس از صلب شدن، ذرات به مرحله شست و شو و خشک‌سازی منتقل می‌شوند و برای جداسازی ناخالصی‌هایی (مانند نیترات آمونیوم، اسید نیتریک، آمونیاک و هیدروکربن‌ها) توسط آب و الکل شسته می‌شوند و سپس وارد مرحله خشک‌سازی می‌شوند

3 Aminul

4 Interface capture

1 Unconfined

2 Rayleigh-Plateau instability



شکل ۲. شماتیک دستگاه آزمایش برای تولید ذرات گاما-آلومینا [۱۷]

Fig. 2. Schematic of an experimental device for the production of gamma-alumina particles [17]

شده‌اند و فرآیند بدون هیچ اعمال نیروی خارجی انجام شده است؛ بنابراین معادلات ریاضی حاکم بر سیستم به معادلات بقای جرم و مومنتوم کاهش می‌یابند که در زیر ارائه شده‌اند.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{U}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \bar{U} \cdot \Delta \bar{U} \right) = -\nabla P + \mu \Delta^2 \bar{U} + \rho g + F_\sigma \quad (2)$$

در جریان‌های چندفازی، تنها معادله مومنتوم که در بالا نشان داده شده

تشکیل و جدایش یک قطره استفاده شده است. این روش در چارچوب روش‌های اولترین است. روش حجم سیال اولین بار توسط هرت و نیکولز برای تسخیر فصل مشترک به صورت ضمنی با کمک تابع کسر حجمی ابداع شد [۱۹]. این روش برای محاسبه‌ی موقعیت فصل مشترک دو سیال غیرقابل اختلاط از یک شبکه ثابت حجم محدود استفاده می‌کند. اساس روش حجم سیال بر تابع کسر حجمی استوار است.

۲-۲ معادلات حاکم

معادلات ناویر استوکس مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل جزئی است که دینامیک سیالات را توصیف می‌کند. به طور دقیق‌تر، مجموعه‌ای از معادلات وابسته به زمان است و شامل معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی می‌باشد. در این پژوهش سیالات غیرقابل تراکم و نیوتنی در نظر گرفته

و δ به صورت تقریبی $|n|$ به گونه‌ای که نیروی ناشی از کشش سطحی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد.

$$F_\sigma = \sigma K \nabla \varphi \quad (7)$$

انحنا توسط دو شعاع اصلی در جهت‌های متعامد (R_1 و R_2) با استفاده از معادله یانگ-لاپلاس تعیین می‌شود.

دانسیتته و ویسکوزیته سیال در هر فاز ثابت است اما در فصل مشترک ممکن است ثابت نباشد [۲۲]. در روش حجم سیال معادلات برای دو سیال درگیر حل می‌شود و حرکت فصل مشترک با حل معادله‌ی انتقال برای تابع مشخصه φ حل می‌شود.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla \varphi = 0 \quad (8)$$

این معادله امکان محاسبه خواص فیزیکی متغیرها در هر حجم کنترل را فراهم می‌کند. در حقیقت مقادیر میانگین دانسیتته و ویسکوزیته سیال همان‌طور که در زیر نشان داده شده است به دست می‌آید.

$$\rho = \sum_1^q \rho_q \cdot \varphi = \rho_1 \cdot \varphi + \rho_2 (1 - \varphi) \quad (9)$$

$$\mu = \sum_1^q \mu_q \cdot \varphi = \mu_1 \cdot \varphi + \mu_2 (1 - \varphi) \quad (10)$$

بازسازی فصل مشترک از مقادیر کسر حجمی سیال، برای روش حجم سیال بسیار مورد توجه است. در سلول‌هایی که مقدار کسر حجمی فاز، عددی بین صفر و یک است با استفاده از روش محاسبه رابط خطی تکه‌ای^۱ فصل مشترک بازسازی می‌شود. این روش فصل مشترک بین دو فاز را با یک خط شیبدار تقریب می‌زند که شیب این خط توسط داده‌های به دست آمده از سلول‌های مجاور تعیین می‌گردد. این روش باعث می‌شود که سطح بازسازی شده به طور طبیعی با فصل مشترک واقعی تراز شود. برای افزایش دقت محاسبات فصل مشترک بین آب و روغن از تکنیک بازسازی فصل مشترک استفاده شده است [۲۳].

است در منطقه محاسباتی حل می‌شود و میدان سرعت حاصل از آن بین فازها به اشتراک گذاشته می‌شود. در این معادلات ρ نشان‌دهنده دانسیتته مخلوط (kg/m^3)، μ ویسکوزیته دینامیکی مخلوط (kg/m.s)، \vec{U} بردار سرعت (m/s)، P فشار (Pa)، F_σ نیروی کشش سطحی (N/m)، t زمان (s) و g شتاب گرانش (m/s^2) هستند. ترم F_σ در معادله‌ی ناویر-استوکس بیانگر نیروی کشش سطحی است. روش نیروی سطح پیوسته یک روش معمول برای پیاده‌سازی کشش سطحی است. در مدل نیروی سطح پیوسته، کشش سطحی نه به عنوان شرط مرزی در فصل مشترک، بلکه به عنوان یک نیروی حجمی پیوسته در سراسر فصل مشترک تفسیر می‌شود؛ که می‌تواند در فاصله کمی از فصل مشترک اعمال شود. در این مدل، براساس قانون لاپلاس، کشش سطحی تحمیل شده بر روی فصل مشترک که با استفاده از محاسبه‌ی انحناى سطح می‌باشد به صورت زیر نوشته می‌شود [۲۰ و ۲۱].

$$F_\sigma = \sigma nk \delta \quad (3)$$

σ ضریب کشش سطحی، k انحناى سطح، \hat{n} بردار نرمال بر سطح مشترک و به سمت داخل آن و δ تابع دلتای دیراک روی سطح مشترک دو سیال است که در همه جا به جز فصل مشترک صفر است. سیالات توسط تابع مشخصه φ مشخص می‌شوند بطوری که:

$$\hat{n} = \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|} \quad (4)$$

گرادیان تابع مشخصه برای محاسبه‌ی بردار نرمال سطح استفاده می‌شود.

$$\hat{n} = \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|} \quad (5)$$

انحنا به عنوان واگرایی بردار نرمال سطح واحد محاسبه می‌شود.

$$k = -\nabla \cdot \hat{n} \quad (6)$$

جدول ۱. خواص سیال فاز گسسته و پیوسته

Table 1. Dispersed and continuous phase fluid information

ماده	چگالی (kg/m^3)	ویسکوزیته (kg/m.s)	کشش سطحی (kg/m^2)	زاویه تماس
آب	۹۹۸/۲	۰/۰۰۱۰۰۳	۰/۰۱۳۱۵	۶۲/۱
روغن	۸۸۰	۰/۰۰۵۲۸		

۲-۳- خصوصیات سیال و شرایط مرزی

در این شبیه‌سازی از آب دیونیزه به عنوان فاز گسسته و از روغن به عنوان فاز پیوسته استفاده شده است. اطلاعات دو سیال در جدول ۱ قابل مشاهده است.

برای شبیه‌سازی فرآیند از نرم‌افزار تجاری انسیس فلوئنت نسخه ۱۹/۲ استفاده شده است. در این مقاله از حلگر فشار-مینا استفاده شده است. برای حل همزمان معادلات فشار-سرعت از الگوریتم کوپل شده، گسسته‌سازی فشار از روش پرستو^۱، گسسته‌سازی گردان از روش گرین-گوس بر مبنای سلول^۲ و برای گسسته‌سازی مومتموم از روش مرتبه دوم استفاده شده است. فرضیات مورد استفاده در این پژوهش به صورت زیر می‌باشند:

- جریان مورد بررسی جریانی متقارن محور، آرام و ناپایا از دو سیال غیرقابل اختلاط است.
- جریان تراکم‌ناپذیر، تحت اثر نیروی گرانش و هم دما است.
- از تغییرات خواص فیزیکی از جمله چگالی، ویسکوزیته و کشش سطحی صرف‌نظر می‌شود.
- کشش سطحی موجود در فصل مشترک آب-روغن، مقداری ثابت بوده و با زمان تغییر نمی‌کند.

شرایط مرزی استفاده شده برای ورودی آب و روغن سرعت ورودی، شرط مرزی خروجی فشار اتمسفریک و برای دیوارها شرط عدم لغزش استفاده شده است. ارتفاع کانال فاز پیوسته ۱۰۰ و قطر آن ۱۱ میلی‌متر است و ارتفاع نازل فاز گسسته ۱۰ میلی‌متر و دارای قطر داخلی ۰/۸ میلی‌متر و ضخامت ۰/۱۸ میلی‌متر است. شکل ۳-ب تصویر هندسه استفاده شده در شبیه‌سازی و ابعاد آن را نشان می‌دهد و شکل ۳-الف نحوه‌ی مش زنی را نشان داده است.

- 1 Pressure Staggering Option (PRESTO)
- 2 Green Gauss cell based

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی

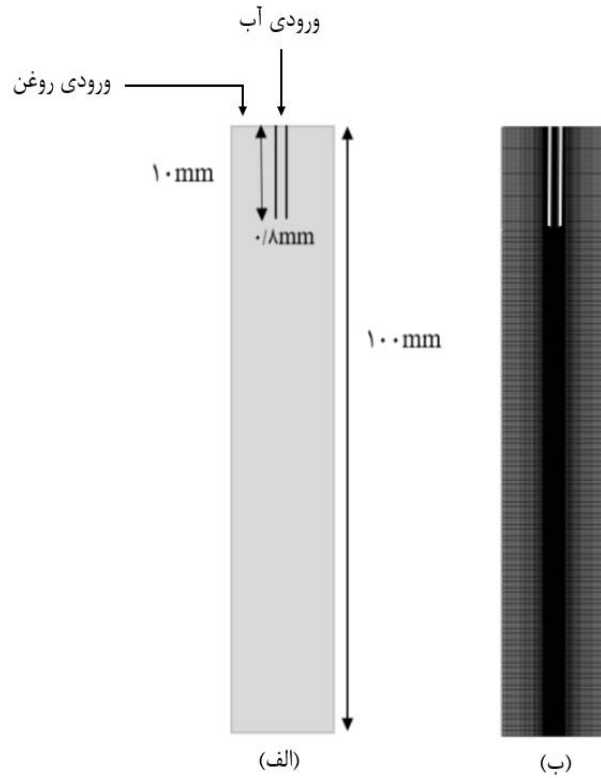
در این بخش برای بررسی استقلال از شبکه محاسباتی، پنج شبکه انتخاب شد و قطر و کرویت قطره به عنوان شاخصی برای استقلال از شبکه بررسی شد. با توجه به نتایج مندرج در جدول ۲ افزایش تعداد شبکه از ۴۱۰۸۲ به ۴۴۶۲۸ تغییر بسیار کمی در شاخص قطر قطره و کرویت ایجاد کرده است و بنابراین شبکه با ۴۱۰۸۲ سلول، به منظور کاهش حجم محاسبات و زمان لازم برای شبیه‌سازی به عنوان شبکه مطلوب در نظر گرفته شده است.

۳-۲- اعتبارسنجی

اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی بررسی شده است. اندازه قطره با استفاده از شبیه‌سازی ۴ میلی‌متر می‌باشد و قطر قطره تشکیل شده در آزمایشگاه با استفاده از نرم‌افزار ایمیج‌جی^۲، ۴/۲۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. کرویت قطره تشکیل شده در شبیه‌سازی ۰/۷۲۵ و قطر تشکیل شده در آزمایشگاه ۰/۶۹۵ است. بنابراین خطای اندازه‌گیری برای اندازه قطره حدود ۰/۵٪ و برای کرویت حدود ۰/۴٪ است؛ که نتایج بیانگر دقت و توانایی مدل در شبیه‌سازی این پدیده است. شکل ۴ نتیجه اعتبارسنجی را نشان می‌دهد.

۳-۳- بررسی تأثیر پارامترهای مهم بر فرآیند تشکیل قطره

فرآیند تشکیل قطره و حرکت آن در ستون مایع دارای کاربردهای بسیاری است. کنترل رفتار تشکیل قطره و پارامترهای مختلف تاثیرگذار بر این فرآیند به منظور استفاده برای کاربردهای مختلف ضروری می‌باشد. از ویژگی‌های کار حاضر انجام همزمان مطالعه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی است. این یک مطالعه‌ی هدفمند است که برای تولید ذرات گاما-



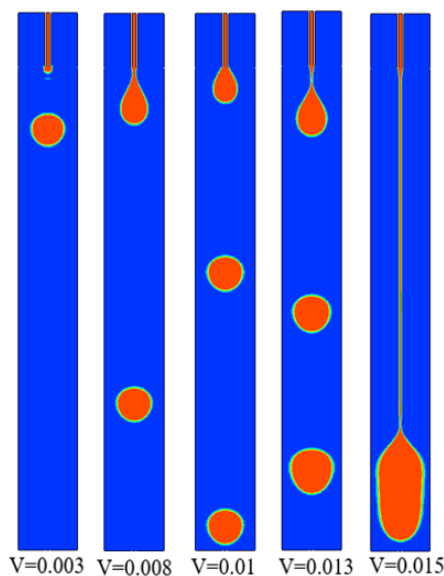
شکل ۳. (الف) نحوه‌ی مش‌زنی و (ب) هندسه

Fig. 3. (A) The method of meshing and (b) the geometry

جدول ۲. مطالعه استقلال نتایج از شبکه محاسباتی

Table 2. Mesh independency study

شاخص ۲		شاخص ۱		تعداد مش	
کرویت	درصد خطا نسبی	اندازه قطره (میلی‌متر)	درصد خطا نسبی		
۰/۹۷۵	-	۵/۶۸	-	۲۳۰۴۰	۱
۰/۹۶۸	7×10^{-3}	۵/۷۱	۰/۵۲	۲۹۰۵۴	۲
۰/۹۵۳	$15/7 \times 10^{-3}$	۵/۷۹	۱/۳۸	۴۱۰۸۲	۳
۰/۹۵۰	$3/15 \times 10^{-3}$	۵/۸	۰/۱۷	۴۴۶۲۸	۴



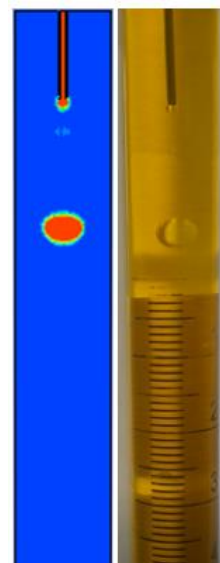
شکل ۵. تأثیر سرعت فاز گسسته بر اندازه قطره در $t=16$ ثانیه

Fig. 5. Effect of dispersed phase velocity on droplet size at $t = 16$ s

، کشش سطحی دو سیال و g نیروی گرانش است. در ادامه به بررسی و تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی تأثیر برخی از پارامترها می‌پردازیم. در همه‌ی شبیه‌سازی‌های انجام شده فاز پیوسته ساکن در نظر گرفته شد.

۳-۳-۱- تأثیر سرعت فاز گسسته

سرعت ورودی فاز گسسته یکی از پارامترهای مؤثر بر روند شکل‌گیری قطرات و رژیم تولید قطرات در کانال‌ها است. تغییر سرعت فاز گسسته موجب تغییر نیروی اینرسی فاز گسسته و همچنین باعث تغییر رژیم جریان می‌شود که خود عامل تأثیرگذاری بر روی فرآیند تولید قطره است. زمانی که سرعت فاز گسسته افزایش می‌یابد، با توجه به مفهوم عدد بی بعد و بر نیروی اینرسی بر کشش سطحی غالب می‌شود و تعادل بین این دو نیرو گذر از رژیم چکیدن به جتی را تعیین می‌کند. همانطور که در شکل ۵ فرآیند تشکیل قطره بعد از گذشت ۱۶ ثانیه نشان داده شده است؛ نتایج بررسی تأثیر سرعت فاز گسسته نشان می‌دهد که اندازه قطرات با افزایش سرعت فاز گسسته افزایش می‌یابد. با افزایش رشد قطرات در نقطه‌ای که نیروهای کمک‌کننده به شکست بر نیروهای مقام بر شکست غلبه می‌کنند، نیروی درگ افزایش می‌یابد. در این نقطه، در حالیکه قطر ستون فاز گسسته به صفر می‌رسد، انحنا‌ی شعاعی تا بی‌نهایت افزایش می‌یابد و این منجر به گسستگی‌هایی در تجزیه قطرات می‌شود. پس از این نقطه، کشش سطحی (که دیگر نیروی



شکل ۴. اعتبار سنجی با نتایج آزمایشگاه

Fig. 4. Validation with laboratory data

آلومینا به روش قطره روغن استفاده می‌شود. بنابراین نوع و دامنه‌ی پارامترها که مورد مطالعه قرار گرفته است هدفمند در راستای استفاده در تولید ذرات گاما-آلومینا است.

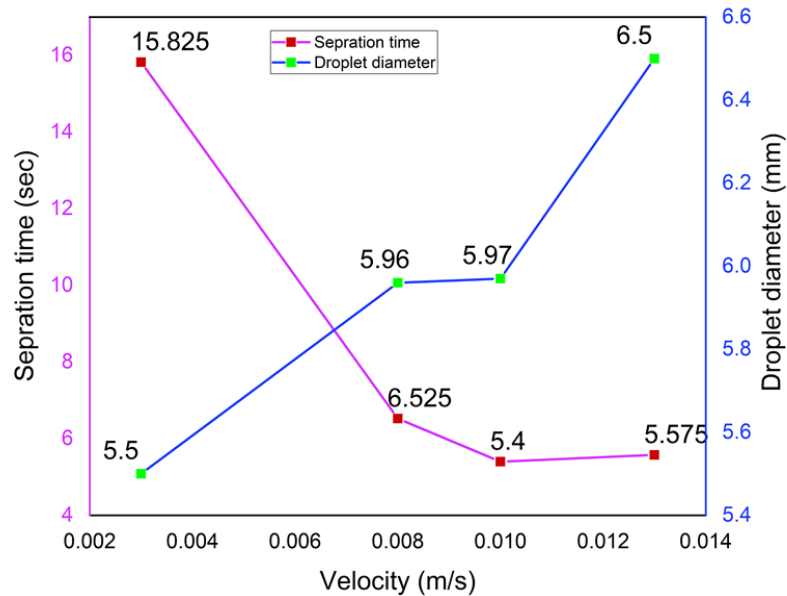
جریان در مینی‌کانال‌ها توسط پارامترهای کشش سطحی دو فاز، سرعت‌های متوسط فازها در هر ورودی و ویسکوزیته‌های دو فاز تعیین می‌شود. برای بررسی رفتار جریان تحت شرایط مختلف، اغلب از اعداد بدون بعد استفاده می‌شود که اهمیت ارتباط بین این پارامترها را نشان می‌دهد. عدد وبر پارامتر بدون بعدی است که بیانگر ارتباط بین تأثیر نیروی اینرسی و کشش سطحی می‌باشد و به صورت رابطه (۱۱) تعریف می‌شود.

$$We = \frac{\rho U^2 D_d}{\sigma} \quad (11)$$

عدد باند نیز بیانگر ارتباط بین نیروی گرانش و نیروی کشش سطحی است که به صورت رابطه (۱۲) تعریف می‌شود.

$$Bo = \frac{\rho g D_d^2}{\sigma} \quad (12)$$

که ρ چگالی سیال، D_d قطر قطره تشکیل شده، U سرعت سیال



شکل ۶. تأثیر سرعت فاز گسسته بر اندازه قطره و زمان جدایش

Fig. 6. Effect of dispersed phase velocity on droplet size and separation time

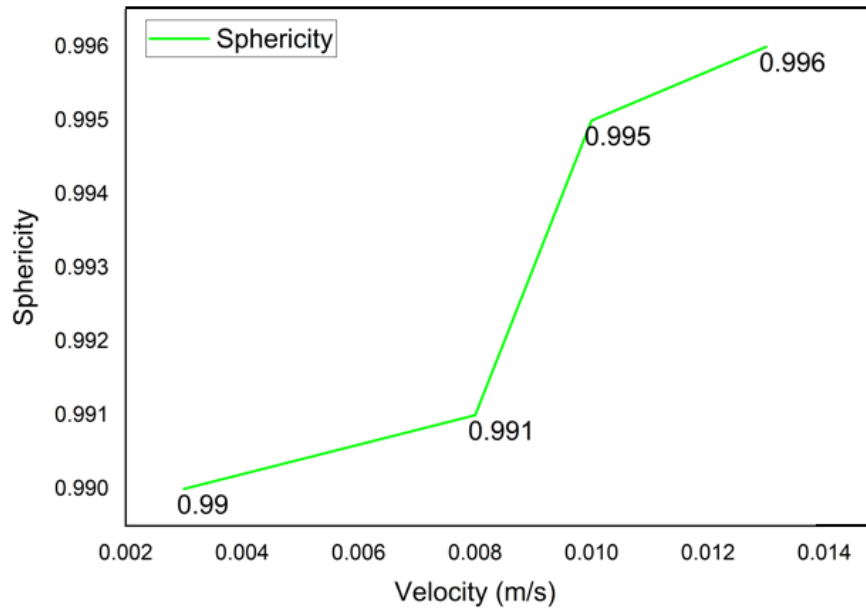
۳-۳-۲- تأثیر کشش سطحی

نیروی کشش سطحی در واقع نیروی بین ذرات در فاز یکسان است که نقش مهمی را در فرآیند تشکیل قطره در کانال‌ها ایفا می‌کند. تغییر ضریب کشش سطحی منجر به تغییر این نیرو می‌شود که در نتیجه بر روی روند جدایش قطره و سایز آن تغییراتی را به وجود می‌آورد. در مقیاس‌های کوچک نقش اثرات سطحی به دلیل نسبت سطح به حجم زیاد برجسته می‌شود. با افزایش ضریب کشش سطحی مقدار عدد وبر و باند کاهش می‌یابد در نتیجه نیروی کشش سطحی بر نیروی اینرسی و گرانش غلبه می‌کند و نیروی غالب در فرآیند تشکیل قطره می‌شود. چنانچه نیروی کشش سطحی افزایش یابد نیروی بین ذرات بیشتر شده و موجب می‌شود که جدایش قطره با تأخیر مواجه شود و در نتیجه اندازه قطره تشکیل شده افزایش یابد. برای بررسی تأثیر این نیرو شبیه‌سازی‌هایی در ضرایب مختلف کشش سطحی انجام شد تا تأثیر کشش سطحی روی فرآیند تشکیل قطره مشاهده شود. شکل ۸ نتایج شبیه‌سازی کشش سطحی را بعد از گذشت ۱۱ ثانیه در ضرایب کشش سطحی متفاوت نشان می‌دهد. نیروهای کشش سطحی تمایل دارند انسجام بین ذرات موجود در سطح آزاد سیستم را افزایش دهند و برای تعادل با نیروهای گرانشی و اینرسی رقابت کنند.

در شکل ۹ نمودار روند تغییرات قطر و زمان جدایش قطرات را در طول فرآیند تشکیل قطره در ضرایب کشش سطحی مختلف نشان داده

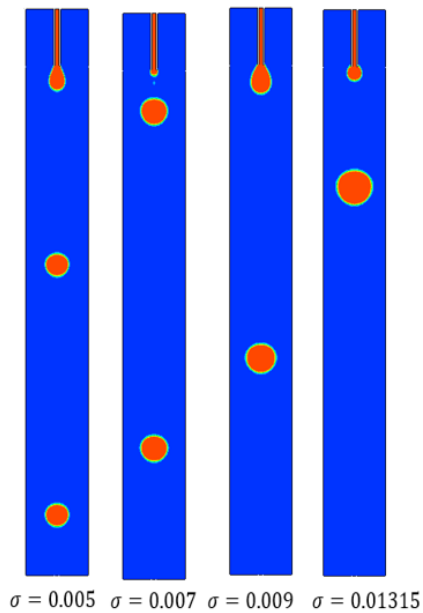
مقاوم در برابر شکست نیست) انرژی سطح را به حداقل می‌رساند و قطره را تشکیل می‌دهد. تحت شرایط ثابت دبی جریان فاز گسسته و پیوسته، نیروی برشی و کشش سطحی ثابت باقی می‌ماند و تعادل نیرو در حجم خاصی رخ می‌دهد که منجر به تولید قطرات با اندازه یکنواخت می‌شود. زمانی که سرعت به 0.13 متر بر ثانیه می‌رسد رژیم تشکیل قطره از حالت چکیدن به رژیم جتی تغییر می‌کند. در رژیم جتی قطرات از انتهای فاز گسسته تشکیل می‌شوند و زمانی که سرعت به 0.15 متر بر ثانیه می‌رسد رژیم جتی پهن تشکیل شده است و هیچ قطره‌ای از انتهای فاز پراکنده جدا نمی‌شود. فنگ بای و همکاران [۲۴] و کارستن و همکاران [۲۵] نیز در بررسی‌های خود به نتایج مشابهی دست یافتند.

همان‌طور که چائوچون و همکاران [۱۱] و او و همکاران [۲۶] نیز اشاره کردند؛ افزایش سرعت فاز گسسته اگر چه موجب افزایش اندازه قطرات شده است اما موجب تأثیر بسیار کمی در قطر قطرات می‌شود. تغییر سرعت فاز گسسته تأثیر کمی در نیروی درگ ایجاد می‌کند اما طول جت در رژیم جتی را افزایش می‌دهد زیرا باعث غلبه نیروی اینرسی بر نیروی کشش سطحی در خروجی لوله موئین می‌شود [۱۱]. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت فاز گسسته زمان جدایش قطرات کاهش و قطر قطرات افزایش یافته است. کرویت قطرات نیز با افزایش سرعت افزایش یافته است که در شکل ۷ قابل مشاهده است.



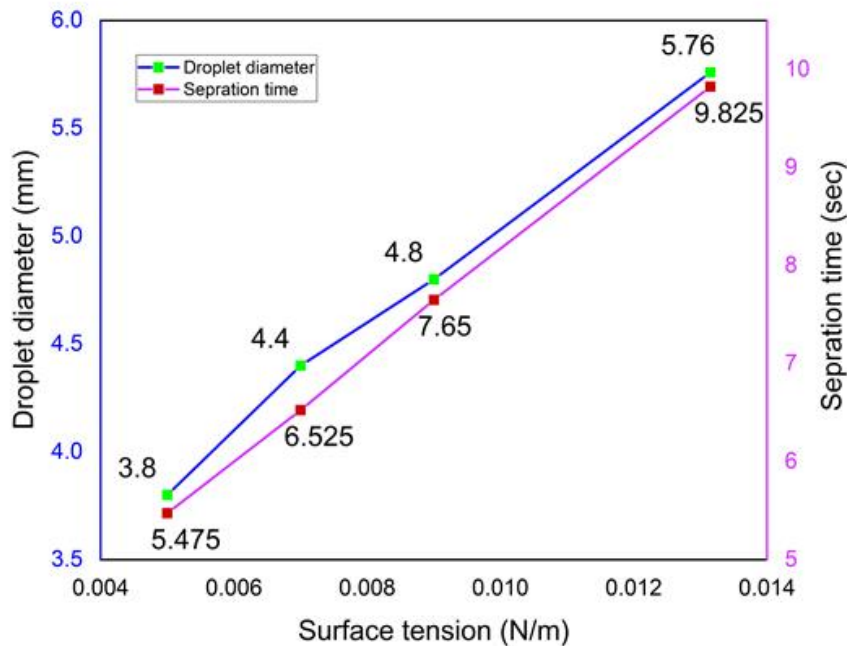
شکل ۷. تأثیر سرعت فاز گسسته بر کرویت

Fig. 7. Effect of dispersed phase velocity on sphericity



شکل ۸. تأثیر کشش سطحی بر اندازه قطره در $t=11$ ثانیه

Fig. 8. Effect of surface tension on droplet size at $t = 11$



شکل ۹. تأثیر کشش سطحی بر اندازه قطره و زمان جدایش

Fig. 9. Effect of surface tension on droplet size and separation time

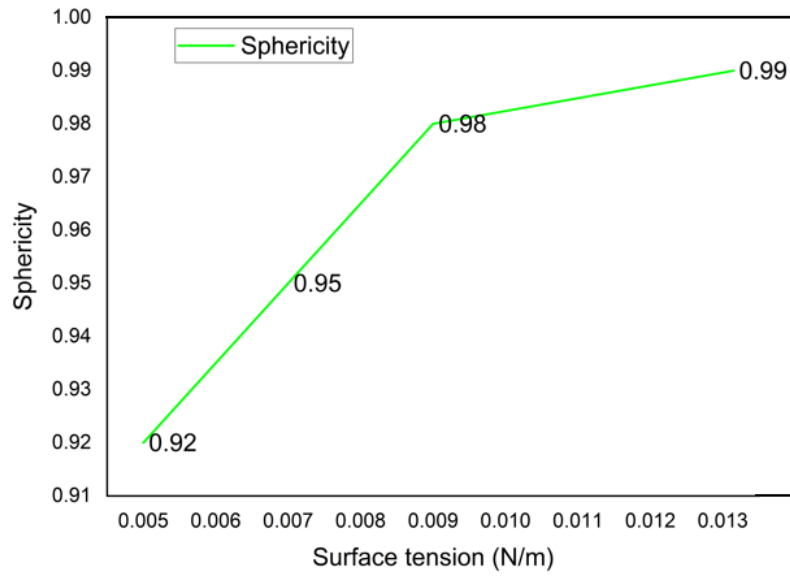
۳-۳-۳- تأثیر چگالی فاز گسسته

پارامتر دیگری که می‌تواند بر فرآیند تشکیل قطره مؤثر باشد چگالی فاز گسسته است که در مقالات پیشین کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. افزایش چگالی فاز گسسته موجب افزایش عدد بی‌بعد وبر و باند و در نتیجه افزایش نیروی اینرسی فاز گسسته می‌شود و بر نیروی کشش سطحی غلبه می‌کند که موجب جدایش سریعتر قطره می‌شود. در این پژوهش اهمیت چگالی سیال فاز گسسته با اجرای شبیه‌سازی‌هایی با مقادیر مختلف بررسی شده است. شکل ۱۱ نتایج شبیه‌سازی فرآیند تشکیل قطره در چگالی‌های متفاوت را بعد از گذشت ۱۱ ثانیه نشان داده است. همان‌گونه که در شکل مشخص است با افزایش چگالی فاز گسسته اندازه قطرات کاهش یافته است. افزایش دانسیته فاز گسسته باعث می‌شود که تأثیر نیروی گرانش از نیروی بویانسی روی قطره بیشتر شود و باعث جدایش سریعتر قطره از لوله موئین شده و قطره امکان رشد پیدا نمی‌کند.

در شکل ۱۲ نمودار تغییرات اندازه و زمان جدایش قطرات با تغییرات

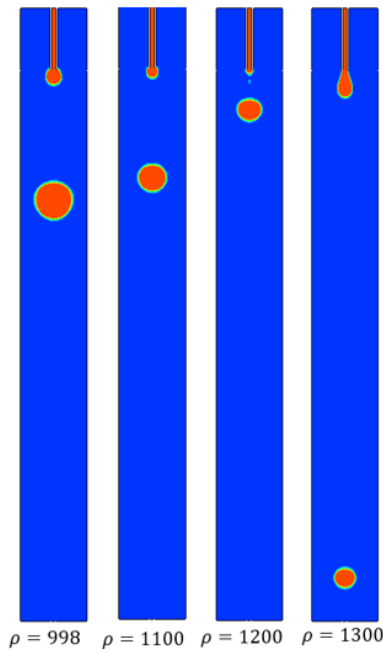
است. مطابق با آنچه در شکل مشخص است، هنگامی که ضریب کشش سطحی افزایش می‌یابد، به دلیل اینکه شکست و جدا شدن قطره به نیروی بیشتری نیاز دارد؛ بنابراین زمان جدایش قطره افزایش می‌یابد و قطرات اندازه بزرگتری خواهند داشت. شکل ۱۰ نیز نتایج تأثیر کشش سطحی بر کرویت قطرات را نشان می‌دهد که با افزایش کشش سطحی کرویت افزایش یافته است.

چینسونگ و همکارانش نیز به نتایج مشابهی دست یافتند. آن‌ها عنوان کردند که کشش سطحی بیشتر قطره را روی خروجی لوله موئین نگه می‌دارد. زمانیکه سیال بیشتری از لوله موئین خارج می‌شود، فصل مشترک جلوی مایع به سمت بیرون رشد می‌کند. مساحت فصل مشترک دو سیال نیز افزایش می‌یابد و نیروی ویسکوز بیشتری روی قطره مایع حاصل می‌شود. وقتی اندازه قطره به اندازه کافی بزرگ باشد، نیروی ویسکوز بر کشش سطحی غلبه خواهد کرد و قطره از لوله موئین جدا شده و قطره‌ای با اندازه بزرگتر تشکیل می‌دهد [۲۷].



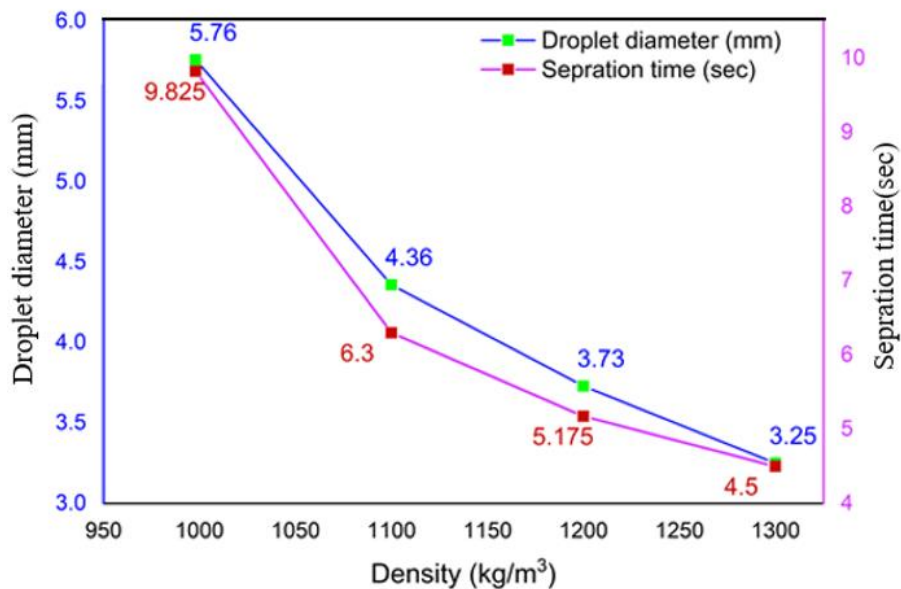
شکل ۱۰. تأثیر کشش سطحی بر کرویت

Fig. 10. Effect of surface tension coefficient on sphericity



شکل ۱۱. تأثیر چگالی فاز گسسته بر اندازه قطره در $t = 11$ ثانیه

Fig. 11. Effect of dispersed phase density on droplet size at $t = 11$



شکل ۱۲. تأثیر دانسیته فاز گسسته بر اندازه قطره و زمان جدایش

Fig. 12. Effect of dispersed phase density on droplet size and separation time

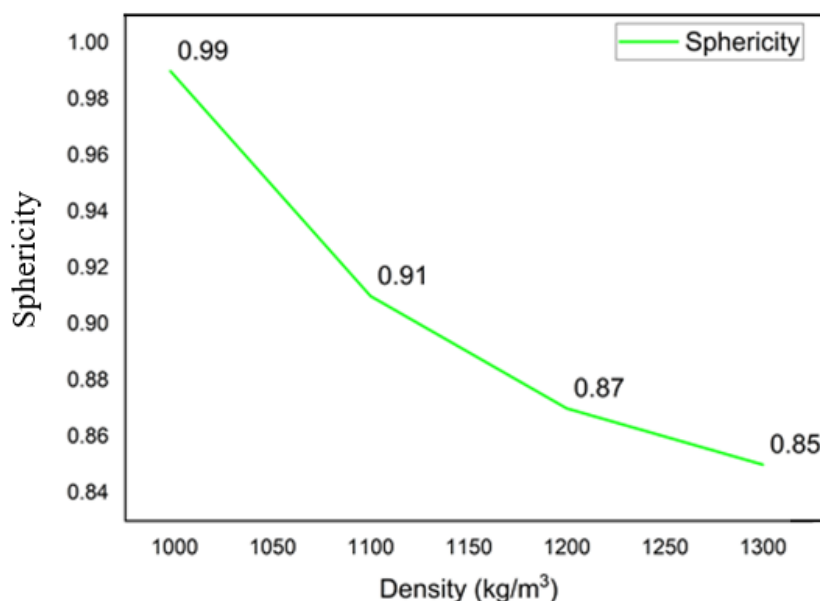
تأثیر پارامترهای سرعت و دانسیته فاز گسسته و کشش سطحی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که افزایش سرعت فاز گسسته در سیال ساکن فاز پیوسته با وجود تأثیر کم روی اندازه قطره اما موجب افزایش اندازه و نیز کاهش زمان جدایش قطرات شده است. این موضوع نشان‌دهنده‌ی افزایش نیروی برشی فاز گسسته است که موجب جدایش سریعتر قطرات از فاز گسسته شده است. افزایش بیشتر سرعت فاز گسسته تا ۰/۱۵ متر بر ثانیه موجب تغییر رژیم جریان از چکیدن به جتی می‌شود. نتایج نشان داد که با افزایش ضریب کشش سطحی که موجب افزایش نیروی مقاوم در مقابل جدایش می‌شود، اندازه قطرات و زمان جدایش نیز افزایش می‌یابد افزایش دانسیته سیال فاز گسسته نیز نشان داد که با افزایش دانسیته تأثیر نیروی گرانش بر قطره افزایش می‌یابد و موجب کاهش اندازه قطرات و زمان جدایش می‌شود. نتایج این پژوهش برای کاربرد در ساخت ذرات کروی گاما-آلومینا مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از این نتایج می‌تواند در طراحی سیستم تولید قطرات، طراحی نازل ایده‌آل برای تولید قطرات کروی یک اندازه و همچنین کروییت آن‌ها مؤثر باشد.

دانسیته فاز گسسته نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش دانسیته زمان جدایش و اندازه قطرات کاهش یافته است. زی‌کینگ و همکاران [۷] نیز به نتایج مشابهی دست یافتند.

شکل ۱۳ نمودار تغییرات کروییت در طول فرآیند تشکیل قطره در مقادیر مختلف دانسیته فاز گسسته نشان داده است. با توجه به نمودار این نتیجه حاصل می‌شود که با افزایش دانسیته فاز گسسته کروییت کاهش می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش فرآیند تشکیل قطره در یک هندسه هم‌محور با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و با استفاده از روش حجم سیال شبیه‌سازی شده است. مدل حجم سیال به خوبی قادر به پیش‌بینی پدیده تشکیل قطره در فرآیندهای دوفازی می‌باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی شد. خطای اندازه‌گیری برای اندازه قطره حدود ۰/۵٪ و برای کروییت ۰/۴٪ محاسبه شد که بیانگر تطبیق مدل با روش آزمایشگاهی بود. آب دیونیزه به عنوان سیال فاز گسسته و روغن به عنوان سیال فاز پیوسته استفاده شده است. در این پژوهش،



شکل ۱۳. تأثیر دانسیته فاز گسسته بر کرویت

Fig. 13. Effect of dispersed phase density on sphericity

منابع

- [1] S. G. Sontti and A. Atta, Numerical Insights on Controlled Droplet Formation in a Microfluidic Flow-Focusing Device, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59(9)(2020) 3702–3716.
- [2] C. N. Baroud, F. Gallaire, and R. Dangla, Dynamics of microfluidic droplets, *Lab on a Chip*, 10(16)(2010) 2032–2045.
- [3] M. Rahimi, S. Yazdanparast, and P. Rezai, Parametric study of droplet size in an axisymmetric flow-focusing capillary device, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 28(4)(2020) 1016–1022.
- [4] P. Dastyar, M. S. Salehi, B. Firoozabadi, and H. Afshin, Experimental investigation of the effects of surfactant on the dynamics of formation process of liquid drops, *Journal Industrial and Engineering Chemistry*, 89(2020) 183–193.
- [5] E. Roumpea, N. M. Kovalchuk, M. Chinaud, E. Nowak, M. J. H. Simmons, and P. Angeli, Experimental studies

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

انحنا سطح مشترک	K
بردار سرعت	\bar{U}
بردار نرمال	n
فشار، Pa	P
نیروی کشش سطحی، N	F_{σ}

علائم یونانی

تابع مشخصه	φ
تابع دلتای سطح	δ
چگالی، kg/m ^۳	ρ
زاویه تماس، s	θ
ضریب کشش سطحی، N/m	σ
ویسکوزیته، kg/m.s	μ

زیرنویس

فاز پیوسته	c
فاز گسسته	d

- and technology., 33(11)(2012) 1635–1641.
- [15] T. M. Tran, F. Lan, C. S. Thompson, and A. R. Abate, From tubes to drops: Droplet-based microfluidics for ultrahigh-throughput biology, *Journal of Physics D: Applied Physics.*, 46(11)(2013), 114004.
- [16] G. Buelna and Y. . Lin, Preparation of spherical alumina and copper oxide coated alumina sorbents by improved sol–gel granulation process, *Microporous and mesoporous materials.*, 42(1) (2001)67-76.
- [17] M. Abdollahi, H. Atashi, and F. Farshchi Tabrizi, Parametric investigation of γ -alumina granule preparation via the oil-drop route, *Advanced Powder Technology.*, 28(5)(2017) 1356–1371.
- [18] A. Islam, Y. H. Taufiq-Yap, C. M. Chu, E. S. Chan, and P. Ravindra, Synthesis and characterization of millimetric gamma alumina spherical particles by oil drop granulation method, *Journal of Porous Materials.*, 19(5) (2012) 807–817.
- [19] C. W. Hirt and B. D. Nichols, Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *Journal of computational physics.*, 39(1) (1981) 201–225.
- [20] E. Arai, A. Tartakovsky, R. G. Holt, S. Grace, and E. Ryan, Comparison of surface tension generation methods in smoothed particle hydrodynamics for dynamic systems, *Computers & Fluids*, 203 (2020) 104540.
- [21] R. Duan, C. Sun, and S. Jiang, A new surface tension formulation for particle methods, *International Journal of Multiphase Flow*, 124 (2019) 103187.
- [22] M. Renardy, Y. Renardy, Numerical simulation of moving contact line problems using a volume-of-fluid method, *Journal of Computational Physics*, 171(1) (2012) 243-263.
- [23] J. Sivasamy, T. N. Wong, N. T. Nguyen, and L. T. H. Kao, An investigation on the mechanism of droplet formation in a microfluidic T-junction, *Microfluidics and nanofluidics*, 11(1) (2011) 1-10.
- [24] F. Bai, X. He, X. Yang, R. Zhou, Three dimensional phase-field investigation of droplet formation in microfluidic flow focusing devices with experimental on droplet formation in a flow-focusing microchannel in the presence of surfactants, *Chemical Engineering Science*, 195(2019) 507–518.
- [6] J. Lian, X. Luo, X. Huang, Y. Wang, Z. Xu, and X. Ruan, Investigation of microfluidic co-flow effects on step emulsification: Interfacial tension and flow velocities, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 568(2019)123733.
- [7] Z. Q. Huang and H. Wang, VOF Simulation Studies on Single Droplet Fluid Dynamic Behavior in Liquid–Liquid Flow Process, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 51(1)(2018) 33-48.
- [8] T. Chekifi, Computational study of droplet breakup in a trapped channel configuration using volume of fluid method, *Flow Measurement and Instrumentation*, 59(2017) 118–125.
- [9] M. Wang et al., Numerical simulations of wall contact angle effects on droplet size during step emulsification, *RSC advances.*, 8(58) (2018) 33042–33047.
- [10] W. Lan, S. Jing, X. Guo, and S. Li, Study on ‘interface – shrinkage – driven’ breakup of droplets in co-flowing microfluidic devices, *Chemical Engineering Science.*, 158 (2017) 58–63.
- [11] C. Deng, H. Wang, W. Huang, and S. Cheng, Numerical and experimental study of oil-in-water (O/W) droplet formation in a co-flowing capillary device, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.*, 533(2017) 1–8.
- [12] W. Lan, S. Li, and G. Luo, Numerical and experimental investigation of dripping and jetting flow in a coaxial micro-channel, *Chemical Engineering Science.*, 134 (2015) 76–85.
- [13] L. Wu and Y. Chen, Visualization study of emulsion droplet formation in a coflowing microchannel, *Chem. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification.*, 85 (2014) 77-85.
- [14] N. Chen, J. Wu, H. Jiang, and L. Dong, CFD Simulation of Droplet Formation in a Wide-Type Microfluidic T-Junction, *Journal of dispersion science*

- G. S. Luo, The dynamic effects of surfactants on droplet formation in coaxial microfluidic devices, *Langmuir*, 28(25) (2012) 9250–9258.
- [27] J. Hua, B. Zhang, and J. Lou, Numerical simulation of microdroplet formation in coflowing immiscible liquids, *AIChE Journal*, 53(10)(2007) 2534–2548.
- validation, *International Journal of Multiphase Flow*, 93 (2017) 130-141.
- [25] C. Cramer, P. Fischer, and E. J. Windhab, Drop formation in a co-owing ambient fluid, *Chemical Engineering Science*, 59 (2004) 3045–3058.
- [26] J. H. Xu, P. F. Dong, H. Zhao, C. P. Tostado, and

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Rostami, M. Rahmani, Computational Fluid Dynamics Analysis of Water-in-Oil Droplet Formation within a Co-Flow Channel, Amirkabir J. Mech Eng., 54(5) (2022) 1029-1046.

DOI: 10.22060/mej.2022.20515.7262



