



مطالعه عددی فرآیند امولسیون‌سازی در دستگاه میکروسیال متقاطع

هادی دستورانی^۱، محمدرضا جهان‌نما^{۲*} و عبدالله اسلامی مجد^۳^۱ دانشجوی دکتری، پژوهشگاه هوافضا^۲ استادیار، پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران^۳ استادیار، مجتمع برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۵/۱۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۷/۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۱۶

چکیده

امولسیون مخلوطی از دو مایع ممزوج نشدنی است که یکی از مایعات به صورت ریزقطرات در مایع دیگر پراکنده شده است. به مایعی که به صورت ریزقطرات است، فاز گسسته و به مایع دیگر فاز پیوسته گفته می‌شود. یکی از روش‌های متداول برای امولسیون‌سازی، استفاده از دستگاه‌های میکروسیال است که مطالعه جریان در این دستگاه‌ها، اخیراً بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق، فرآیند تولید ریزقطره در دستگاه میکروسیال متمرکزکننده جریان با جریان‌های متقاطع و متعامد بر هم شبیه‌سازی شده است. در این راستا، تاثیر پارامترهای ویسکوزیته و دبی حجمی هر دو مایع در فرآیند امولسیون‌سازی بر تولید ریزقطره، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل نشان می‌دهند که افزایش دبی حجمی فاز گسسته به ازای دبی ثابتی از فاز پیوسته، به تولید ریزقطرات درشت‌تر می‌انجامد؛ در حالی که افزایش دبی حجمی فاز پیوسته به ازای دبی ثابتی از فاز گسسته، منجر به کاهش اندازه ریزقطرات می‌شود. بررسی نتایج همچنین نشان می‌دهند که نسبت دبی حجمی فاز پیوسته به فاز گسسته، از نقشی اساسی در تعیین اندازه ریزقطرات برخوردار است، صرف نظر از اینکه کدام یک از دبی حجمی فاز گسسته یا دبی حجمی فاز پیوسته در فرآیند ثابت فرض شده باشند. بررسی تاثیر ویسکوزیته نیز نشان می‌دهد که اندازه ریزقطرات با افزایش ویسکوزیته فاز گسسته افزایش می‌یابد؛ در حالی که افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته، موجب کاهش اندازه ریزقطرات می‌شود. مقایسه میان نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی حاکی از دستیابی به توافق مناسبی میان آنهاست که صحت روش شبیه‌سازی را مورد تایید قرار می‌دهد.

کلمات کلیدی: امولسیون؛ دبی حجمی؛ ریزقطره؛ شبیه‌سازی عددی؛ ویسکوزیته.

A Numerical Study of Emulsification Process in Microfluidic Flow-Focusing Devices

H. Dastourani¹, M. R. Jahannama^{2,*}, and A. Eslami Majd³¹ Ph.D. Student, Aerospace Research Institute, Tehran, Iran.² Assis. Prof., Space Transportation Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran.³ Assis. Prof., Electrical and Electronics Department, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract

An emulsion is a mixture of two immiscible liquids in which one liquid is dispersed in the form of small drops in the other one. The liquid in the form of droplets is called the discrete phase, whereas the other liquid is termed as a continuous phase. One of the common methods for emulsification is based upon using microfluidic devices. Currently, the study of flow in microfluidic devices is highly regarded due to having many applications in various fields including droplet generation in relation with the standard and quality of human life. In this work, the process of droplet generation in microfluidic flow-focusing devices with orthogonal and intersecting flows is simulated. The effects of viscosity and flow rate of the discreted and continuous phases on the droplet generation process are also investigated. Based on the simulation results, increasing the flow rate of the discreted phase (Q_d) at a fixed continuous phase leads to the increment of droplet size, whereas an increase in the flow rate of the continuous phase (Q_c) at a fixed discreted phase results in a smaller droplet size. Moreover, for a constant Q_c/Q_d ratio, regardless of whether the discrete or continuous phase flow rate is fixed, the equal droplet size is achieved. A higher viscosity of the discrete phase provides a larger droplet size, whereas an increase in the viscosity of the continuous phase leads to a smaller droplet size. The simulation results, in comparison with the experimental results, show a good agreement, confirming the accuracy of the proposed method.

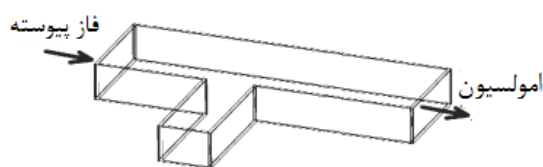
Keywords: Droplet; Emulsion; Flow rate; Numerical simulation; Viscosity.

۱- مقدمه

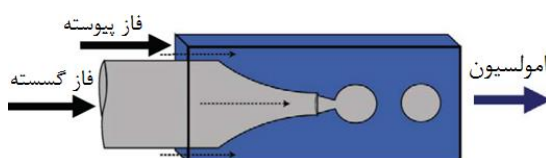
میکروسیال یک شاخه علمی بین رشته‌ای است که در برگرفته رشته‌های مهندسی، فیزیک، شیمی، بیوشیمی، نانو تکنولوژی و بیوتکنولوژی است. میکروسیال در طراحی سیستم‌های با حجم‌های پایین سیال کاربرد دارد. پیدایش میکروسیال به سال ۱۹۸۰ برمی‌گردد و امروزه از آن در توسعه مکانیزم پاشش در چاپگرهای جوهرافشان، تراشه‌های DNA، میکروپیشراشه‌ها و فناوری‌های میکروگرمایی استفاده می‌شود [۱]. این دستگاه‌ها همچنین از کاربردهای متنوعی در زمینه‌های انتقال جرم و گرما [۲]، اختلاط [۳-۵]، میکروواکنش [۶-۹]، امولسیون‌سازی [۱۰-۱۷]، تولید دارو [۱۸] و پزشکی [۱۹-۲۰] برخوردار هستند و از این رو، نقش مهمی در استاندارد و کیفیت زندگی انسان ایفا می‌نمایند. این موضوع سبب شده است تا مطالعه‌ی جریان در دستگاه‌های میکروسیال در سال‌های اخیر، بسیار مورد توجه قرار گیرد.

از میان کاربردهای مختلف دستگاه‌های میکروسیال، کاربرد آن‌ها در امولسیون‌سازی است که در این تحقیق، مورد توجه قرار گرفته است. امولسیون، مخلوطی از دو مایع است که یکی از مایعات به صورت ریزقطره در مایع دیگر پراکنده شده است. به مایعی که به صورت ریزقطرات است، فاز گسسته^۱ یا فاز ریزقطره^۲ و به مایع دیگر فاز پیوسته^۳ گفته می‌شود [۲۱-۲۵]. شایع‌ترین انواع امولسیون‌ها، مخلوط روغن (چربی) در آب، مثل شیر و آب در روغن، مثل کره، می‌باشند. این امولسیون‌ها در کاربردهایی همانند، استخراج ماکرومولکول‌ها [۲۶-۲۸]، بازیافت روغن [۲۹]، فرآیند غذایی [۳۰-۳۱] و انتقال فازی در مواد پر خطر [۳۲]، دارای اهمیت هستند. در دستگاه‌های میکروسیال امولسیون‌ساز، تجزیه یکی از مایعات به ریزقطرات در اثر نیروهای برشی ایجاد شده توسط مایع دیگر صورت می‌گیرد. کنترل این نیروهای برشی و هدایت آن‌ها در تولید امولسیون با ریزقطرات تک اندازه نقش مهمی دارند. همچنین در تولید ریزقطره با دستگاه‌های میکروسیال در هر لحظه (هر مرحله)، یک ریزقطره تولید می‌شود که این موضوع در دستیابی به امولسیونی تک اندازه

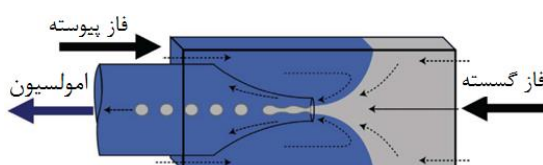
حائز اهمیت است. محل اختلاط دو مایع (موسوم به نقطه تمرکز) و مسیرهای انتقال دو مایع به آن نقطه، نقش مهمی در کنترل بهتر نیروهای برشی و تولید امولسیون تک اندازه دارند. بدین منظور، حالت‌های مختلفی از مسیر انتقال مایعات و نقطه تمرکز آن‌ها در دستگاه‌های میکروسیال توسعه داده شده است. از جمله این موارد می‌توان، دستگاه‌های میکروسیال T شکل، جریان همسو^۴ و جریان متمرکز^۵ را نام برد. شکل‌های این دستگاه‌های میکروسیال که در تولید امولسیون مورد استفاده قرار می‌گیرند، در شکل‌های ۱ تا ۳ ارائه شده‌اند.



شکل ۱- دستگاه میکروسیال T شکل [۲۳-۲۴]



شکل ۲- دستگاه میکروسیال جریان همسو [۳۵-۳۶]



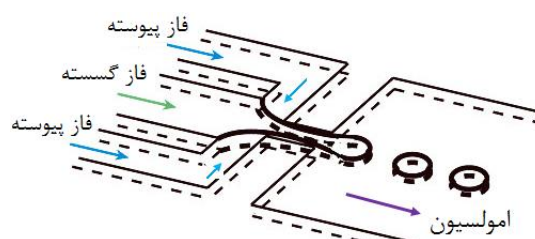
شکل ۳- دستگاه میکروسیال جریان متمرکز با جریان‌های موازی و خلاف جهت هم [۳۵-۳۷]

نوع دیگری از دستگاه میکروسیال در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، جریان‌های ورودی همسو هستند، اما در محل برخورد دو سیال تمرکز جریان وجود دارد. بسته به مسیری که هر کدام از سیال‌ها برای رسیدن به نقطه برخورد طی می‌کنند، دو جریان با

^۱ Dispersed Phase^۲ Droplet Phase^۳ Continuous Phase^۴ Co-Flow Microfluidic Device^۵ Microfluidic Flow-Focusing Devices

با صرف هزینه و زمان کمتر درک بهتری از تاثیر پارامترهای مختلف نظیر دبی حجمی دو مایع، ویسکوزیته مایعات و کشش سطحی بر اندازه ریزقطرات تولیدی به دست آورد. چاندرکار و پالیت^۱ از نرم افزار FLOW-3D برای شبیه‌سازی شکل‌گیری و دینامیک ریزقطره در دستگاه میکروسیال T شکل استفاده کردند. نرم افزار مذکور برای ردگیری سطح مشترک از رویکرد حجم سیال^۲ بهره می‌برد. نتایج شبیه‌سازی ایشان نشان می‌دهد که با افزایش دبی حجمی فاز گسسته، اندازه ریزقطرات بزرگ‌تر می‌شود. آن‌ها همچنین شبیه‌سازی از شکل‌گیری حباب در دستگاه میکروسیال جریان همسو ارائه کردند. برای این حالت، هندسه دستگاه یک میکروکانال است که از نیمی از ورودی آن مایع و از نصف دیگر گاز وارد می‌شود و این دو با مانعی از هم جدا شده‌اند. چاندرکار و پالیت، تاثیر تغییر دبی ورودی گاز روی اندازه و فرکانس حباب‌های به وجود آمده را مورد بررسی قرار دادند. نتایج مربوط به این حالت نشان می‌دهد که با افزایش دبی گاز، اندازه و فرکانس حباب‌ها به طور خطی افزایش یافته است [۴۴]. کانچاسو^۳ و همکارانش، از نرم افزار کامسول^۴ برای شبیه‌سازی جریان در دستگاه میکروسیال T شکل استفاده کردند. آن‌ها برای ردگیری سطح مشترک از روش میدان فاز^۵ی موجود در نرم افزار کامسول استفاده کردند. هدف ایشان، بررسی تاثیر هندسه کانال‌ها روی اندازه ریزقطرات و بهینه‌سازی هندسه کانال‌ها برای داشتن ریزقطرات کوچک‌تر بوده است [۴۵]. هاشم^۶ و همکارانش با استفاده از نرم افزار کامسول، جریان داخل میکروسیال متمرکزکننده با دو جریان متقاطع با زاویه حاده را شبیه‌سازی کردند. در این کار، آن‌ها چگونگی اختلاط دو مایع، توزیع غلظت و الگوی جریان را مورد بررسی قرار دادند [۴۶]. افخمی^۷ و همکارانش، روش عددی برای شبیه‌سازی تغییر شکل قطره در یک میکروکانال توسعه دادند. آن‌ها از روش ترکیبی حجم سیال و تابع ارتفاع با عنوان VOF-HF^۷ برای ردگیری سطح مشترک و محاسبه

زوایای مختلف برخورد خواهند داشت. از این رو به این نوع دستگاه میکروسیال، دستگاه میکروسیال جریان متمرکز با جریان‌های متقاطع گفته می‌شود. نمونه‌های مشابه دیگری از دستگاه میکروسیال جریان متمرکز با زوایای مختلف مسیر حرکت سیال‌ها در مراجع [۴۰-۴۳] معرفی شده‌اند.



شکل ۴- دستگاه میکروسیال جریان متمرکز با جریان‌های متقاطع [۳۸-۳۹]

مفهوم تولید قطره در دستگاه‌های میکروسیال را می‌توان با مثال شیر آب به صورت زیر تشریح کرد: وقتی شیر آب باز می‌شود و در نرخ دبی پایینی قرار می‌گیرد، قطرات آب از شیر می‌چکد و در هر لحظه یک قطره از آن می‌چکد. در این فرآیند، چکیدن قطره در اثر تعادل بین نیروی کشش سطحی و نیروی وزن قطره صورت می‌گیرد؛ بنابراین اندازه قطره وابسته به ضریب کشش سطحی مایع و قطر خروجی شیر است؛ چون این دو ثابت هستند، بنابراین اندازه قطرات تولید شده تقریباً یکسان است. اگر دبی آب از طریق شیر به تدریج افزایش یابد، ابتدا فرکانس تولید قطرات به تدریج افزایش می‌یابد و نهایتاً جت شکل گرفته و در پی آن تجزیه جت به قطره صورت خواهد گرفت.

مفهوم یکسانی را می‌توان برای کانال‌های میکروسیال تعمیم داد. تفاوت اصلی در تولید قطره از شیر آب و تولید قطره در دستگاه میکروسیال در این است که در اولی قطرات در محیط هوای ساکن به وجود می‌آیند؛ در حالی که در دومی قطرات در محیط مایع ممزوج نشدنی دیگر که در حال جریان است، شکل می‌گیرند و لذا ممکن است، نیروی وزن قطرات در مقابل نیروی برشی (اثر ویسکوزیته) ایجاد شده در اثر حرکت مایع اطراف قابل چشم‌پوشی باشد.

از آنجایی که مطالعه تولید امولسیون در دستگاه‌های میکروسیال به صورت تجربی با صرف هزینه و زمان زیاد همراه است، از اینرو شبیه‌سازی عددی کمک می‌کند تا بتوان

¹ Chandorkar and Palit

² Volume of Fluid

³ Conchouso

⁴ COMSOL Multiphysics

⁵ Hashim

⁶ Afkhami

⁷ VOF-HF: Volume Of Fluid-Height Function

نیروی کشش سطحی استفاده کردند. آن‌ها اثر نسبت سرعت دو مایع آب (فاز گسسته) و روغن (فاز پیوسته) را روی اندازه ریزقطرات مورد بررسی قرار دادند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که افزایش نسبت سرعت فاز گسسته به فاز پیوسته، موجب افزایش اندازه‌ی قطرات می‌شود [۵۲].

در مطالعات ارائه شده در زمینه امولسیون‌سازی در دستگاه‌های میکروسیال، بیشتر تمرکز بر شرایط و خواص فاز گسسته بوده است. در مطالعه حاضر با استفاده از رویکردی عددی علاوه بر بررسی خواص فاز گسسته روی شکل‌گیری ریزقطرات که برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی استفاده شده است، تاثیر دبی و ویسکوزیته فاز پیوسته نیز بر فرآیند تولید ریزقطرات، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- تئوری

در تحقیق حاضر، از نرم افزار کامسول برای شبیه‌سازی جریان داخل دستگاه میکروسیال استفاده شده است. در این راستا، از مدل دوفازی در حالت آرام همراه با روش مجموعه سطح همتراز^۳ برای ردگیری سطح مشترک استفاده شده است. دو مایع مورد استفاده آب و روغن هستند و فرآیند جریان دو مایع در دستگاه میکروسیال تراکم ناپذیر است. معادلات حاکم بر جریان شامل، معادلات بقاء جرم و ناویر-استوکس در حالت تراکم ناپذیر مطابق رابطه (۱) هستند [۵۳].

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \bar{u} \right) = -\nabla P + \nabla \cdot \left[\mu (\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T) \right] + \bar{F}_g + \bar{F}_{st} \quad (1)$$

که \bar{u} بردار سرعت، ρ چگالی، μ ویسکوزیته دینامیکی، P فشار، \bar{F}_g بردار نیروی گرانشی و \bar{F}_{st} بردار نیروی کشش سطحی است. برای ردگیری سطح مشترک از روش مجموعه سطح همتراز ابقایی استفاده شده است که توسط آلسون و کریس^۴ توسعه داده شده است [۵۴-۵۵]. این روش که با معضل ارضای بقاء جرم در روش مجموعه سطح همتراز کلاسیک مواجه نیست، از معادله (۲) تبعیت می‌کند،

بررسی قرار دادند [۴۷]. جمشید اصلی و عباسی، جریان و انتقال حرارت جابجایی آرام و دوفازی نانوسیال‌ها در یک میکروکانال را در حالت دوبعدی شبیه‌سازی کردند. ایشان از نرم افزار فلوئنت استفاده کرده، نشان دادند که با اضافه نمودن نانو ذرات به مایع انتقال حرارت نسبت به مایع خالص افزایش می‌یابد. ایشان همچنین مشاهده کردند که میزان افزایش انتقال حرارت به نوع نانو ذرات و غلظت آن‌ها بستگی دارد [۴۸]. تقی‌پور و کریمی‌پور، انتقال حرارت و جابجایی اجباری سیال متشکل از آب (به عنوان سیال پایه) و ذرات نانو لوله کربنی (به عنوان ذرات نانو معلق) را در یک ریزکانال و در شرایط دوبعدی شبیه‌سازی کردند. برای این کار، ایشان یک کد کامپیوتری مبتنی بر معادلات مومنوم به انضمام اثرات میدان مغناطیسی توسعه دادند. ایشان اثر شدت میدان مغناطیسی روی سرعت لغزشی سیال و انتقال حرارت را مورد بررسی قرار دادند [۴۹]. لی^۱ و همکارانش، تجزیه قطره در میکروکانال را با استفاده از نرم افزار فلوئنت شبیه‌سازی کردند. در کار ایشان، هندسه به این صورت است که در یک میکروکانال یک مانع با سطح مقطع‌های مستطیل، لوزی و دایره قرار گرفته، قطره در اثر برخورد با این مانع تجزیه می‌شود. در این کار، تاثیر هندسه مانع بر الگوی تجزیه قطره و اندازه ریزقطرات حاصل بعد از تجزیه، مورد بررسی قرار گرفته است [۵۰]. ادیبی و انصاری، جریان دوفازی در یک کانال افقی طویل را جهت تعیین فرکانس اسلاگ شبیه‌سازی کردند. برای این منظور، ایشان کدی را مبتنی بر مدل فشار آزاد و روش محدود کننده شار توسعه دادند. ایشان برای صحت‌گذاری کد توسعه داده شده، نتایج‌شان را با نتایج آزمایشگاهی بدست آمده توسط خودشان مقایسه کردند که حاکی از توانایی خوب کد در شناسایی پرش هیدرولیکی قبل از اسلاگ، تسخیر اسلاگ و تعیین فرکانس آن است [۵۱]. ابریشمکار^۲ و همکارانش، با استفاده از نرم افزار کامسول تولید قطره در دستگاه میکروسیال، جریان متمرکز با جریان‌های

³ level-set method
⁴ Olsson and Kreiss

¹ Lee
² Abrishamkar

نوع جریان متمرکز با جریان‌های متقاطع تحت زاویه ۹۰ درجه مطابق با کار نی^۱ و همکارانش [۵۶] انتخاب گردید تا بتوان در ابتدا نتایج شبیه‌سازی را اعتبارسنجی کرد. ابعاد هندسی ذکر شده در شکل ۵، مطابق کار نی و همکارانش [۵۶] بوده، مقطع جریان مستطیلی شکل با عمق ۸۶ μm است. مطابق شکل ۵، فاز گسسته از ورودی مرکزی و فاز پیوسته از دو ورودی کناری وارد دستگاه میکروسیال می‌شوند. در ورودی‌ها شرط مرزی دبی حجمی و در خروجی، شرط مرزی فشار اتمسفر و سایر مرزها دیوار بدون لغزش با زاویه تماس ۹۰ درجه در نظر گرفته شده است. در بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی، سه شبکه محاسباتی درشت با تعداد ۴۵۲۰ سلول، متوسط با تعداد ۱۳۸۶۰ سلول و ریز با تعداد ۴۰۹۱۰ سلول در نظر گرفته شد. کوچک‌ترین سلول‌ها در ناحیه گلویی بوده، اندازه آن‌ها به ترتیب برابر $10\ \mu\text{m}$ ، $3/47\ \mu\text{m}$ و $1/19\ \mu\text{m}$ بود. در ادامه مطابق خواص سیال‌ها در جدول ۲ در دبی فاز گسسته $0.4\ \text{mL/h}$ و نسبت دبی فاز پیوسته به فاز گسسته (Q_c/Q_d) ۱۰ شبیه‌سازی‌ها صورت گرفت. با توجه به اینکه قطر ریزقطره در کار تجربی برای شرایط مذکور برابر $156/318\ \mu\text{m}$ [۵۶] بود، نتایج شبیه‌سازی‌ها و مقایسه آن‌ها با نتایج تجربی در سه شبکه مذکور در جدول ۱ خلاصه شده است.

جدول ۱- بررسی استقلال حل از شبکه

تعداد سلول	$\frac{D_{d,simulation}}{D_{d,experiment}}$	خطا (%)
۴۵۲۰	۰/۹۳۶۴	۶/۳۶
۱۳۸۶۰	۰/۹۷۷۴	۲/۲۶
۴۰۹۱۰	۰/۹۸۲۲	۱/۷۸

به این ترتیب، با توجه به هزینه و زمان شبیه‌سازی‌ها و نیز میزان خطا در جدول ۱، شبکه با ۱۳۸۶۰ سلول برای استفاده در شبیه‌سازی‌های بعدی انتخاب گردید.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \phi = \lambda \nabla \cdot \left(\chi \nabla \phi - \phi(1-\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) \quad (2)$$

که ϕ تابع مجموعه سطح همتراز و λ و χ ، پارامترهای پایداری هستند. بازه تغییرات تابع ϕ از صفر تا یک است، به طوری که $\phi < 0.5$ متناظر با فاز یک و $\phi > 0.5$ متناظر با فاز دو است. خواص فیزیکی برای هر فاز ثابت در نظر گرفته می‌شوند که تغییرات این خواص در سطح مشترک بین دو فاز در لایه‌ی بسیار نازک (موسوم به لایه‌ی هموارکننده)، به طور هموار و پیوسته از یک فاز به فاز دیگر تغییر می‌کند. پارامتر χ ، ضخامت لایه هموارکننده بوده، اندازه آن از مرتبه شبکه محاسباتی است. به منظور حفظ صحت حل، تابع ϕ نیازمند مقداردهی اولیه مجدد بعد از هر گام زمانی است. پارامتر λ مقدار مقداردهی اولیه مجدد تابع ϕ را در ابتدای هر گام زمانی تعیین می‌کند و یک مقدار مناسب برای λ ماکزیمم مقدار بردار سرعت \vec{u} است. با مشخص شدن تابع ϕ ، خواص فیزیکی (چگالی و ویسکوزیته) مطابق رابطه (۳) میان‌یابی می‌شوند و این مقادیر میان‌یابی شده در معادله (۱) به کار گرفته می‌شوند.

$$\rho = \rho_1 + (\rho_2 - \rho_1)\phi \quad (3)$$

$$\mu = \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1)\phi$$

نیروی کشش سطحی در معادله ناویر-استوکس، مطابق رابطه (۴) تعیین می‌شود،

$$\vec{F}_{st} = \gamma \kappa \delta \hat{n} \quad (4)$$

که γ ضریب کشش سطحی، δ تابع دلتای دیراک، \hat{n} بردار واحد عمود بر سطح مشترک و κ انحنای سطح مشترک است. تابع دلتای دیراک، بردار واحد عمود بر سطح مشترک و انحنای سطح مشترک در ارتباط با تابع مجموعه سطح همتراز ϕ به ترتیب با استفاده از روابط (۵-۷) بدست می‌آیند

$$\delta = 6|\nabla \phi| |\phi(1-\phi)| \quad (5)$$

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

$$\kappa = -\nabla \cdot \hat{n} \Big|_{\phi=0.5} \quad (7)$$

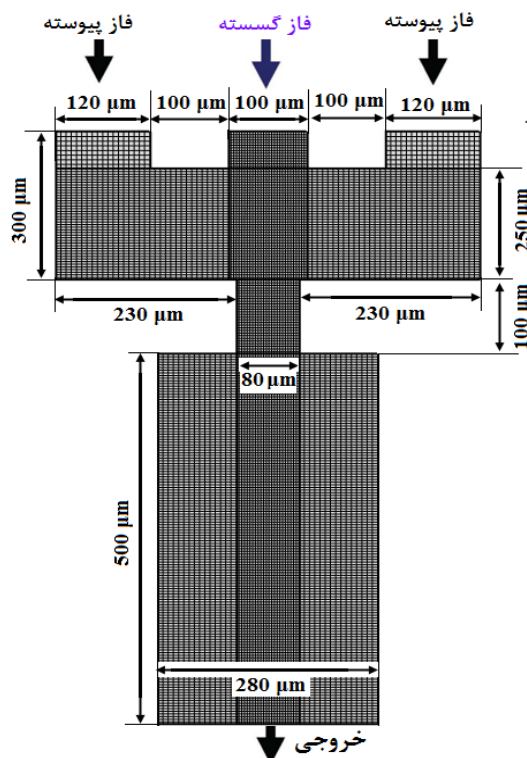
در این تحقیق، شبیه‌سازی‌ها در حالت دوبعدی انجام شده‌اند و دستگاه میکروسیال شبیه‌سازی شده و ابعاد هندسی آن مطابق شکل ۵ می‌باشد. پیکربندی دستگاه میکروسیال از

¹ Nie

جدول ۲- مشخصات مایعات مورد استفاده در شبیه‌سازی

مایع	چگالی (kg/m ³)	ویسکوزیته دینامیکی (mPa/s)	دبی حجمی (mL/h)	ضریب کشش سطحی در تماس با آب (mN/m)
روغن سیلیکون	۹۵۰	۲۰	۰/۰۴ (۱۰،۲۰،۵۰،۱۰۰)	۵/۵
آب	۱۰۰۰	۱	× ۰/۰۴	-

خواصی مطابق جدول ۲ می‌باشند. دبی ورودی روغن سیلیکون ثابت و برابر ۰/۰۴ mL/h در نظر گرفته شده است و برای نسبت‌های دبی فاز پیوسته به گسسته (Q_c/Q_d) ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ شبیه‌سازی‌ها انجام شده‌اند. شکل‌های ۶ تا ۸، نمونه‌هایی از فرآیند تجزیه روغن سیلیکون و شکل‌گیری ریزقطره را به ازای اعداد ۱۰، ۲۰ و ۱۰۰ برای نسبت دبی فاز پیوسته به گسسته نشان می‌دهند. در شکل ۸، مشاهده می‌شود که دو ریزقطره در یک زمان به وجود آمده است که به ریزقطره بزرگ‌تر، ریزقطره اولیه^۱ و به ریزقطره کوچک‌تر، ریزقطره ثانویه^۲ گفته می‌شود.



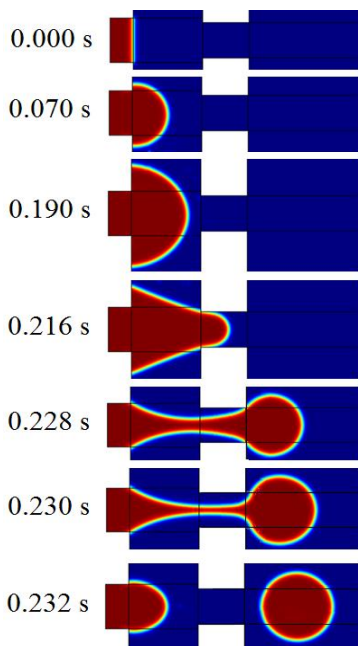
شکل ۵- هندسه و شبکه‌بندی دستگاه میکروسیال مورد استفاده در شبیه‌سازی حاضر

۳- بحث و بررسی نتایج

شبیه‌سازی‌ها برای هندسه ارائه شده در شکل ۵ انجام شده‌اند. در این شبیه‌سازی‌ها تاثیر دبی حجمی و ویسکوزیته فازهای پیوسته و گسسته، مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۳-۱- تاثیر دبی فاز پیوسته

در این بخش تاثیر دبی فاز پیوسته روی شکل‌گیری ریزقطرات در دستگاه میکروسیال شکل ۵، مورد بررسی قرار گرفته است. دو مایع مورد استفاده در شبیه‌سازی، روغن سیلیکون به عنوان فاز گسسته و آب به عنوان فاز پیوسته با

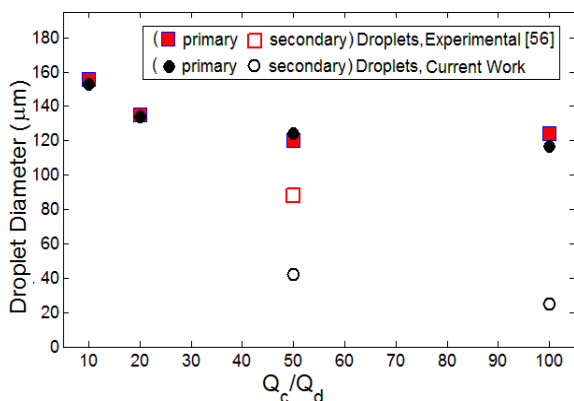


شکل ۶- فرآیند شکل‌گیری قطره برای نسبت $Q_c/Q_d = 10$ در دبی ثابت ۰/۰۴ mL/h برای فاز گسسته

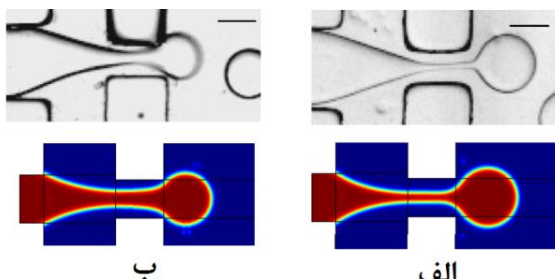
¹ Primary Droplet

² Secondary Droplet

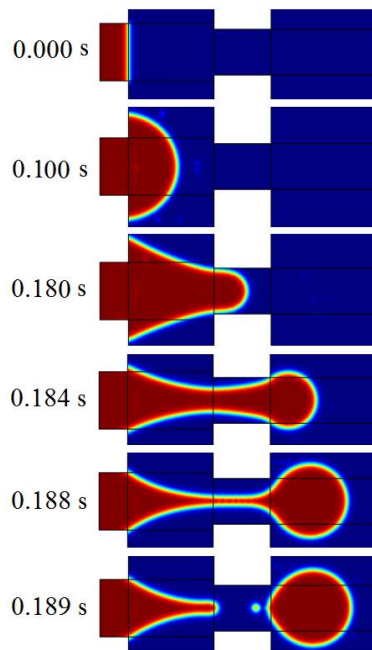
شده است که حاکی از توافق خوبی میان نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی است. طبق این شکل با افزایش نسبت دبی فاز پیوسته به گسسته (Q_c/Q_d)، مترادف با افزایش دبی فاز پیوسته، قطر ریز قطرات شکل گرفته از فاز گسسته کاهش می‌یابد که ناشی از افزایش سرعت و به دنبال آن تقویت نیروی برشی وارد از فاز پیوسته بر فاز گسسته است. در این حالت، ریزقطره زودتر از حجم مایع گسسته شده، اندازه‌ی آن کوچک‌تر خواهد شد. در شکل ۱۰ نیز، تصاویری از شکل‌گیری ریزقطره بر اساس نتایج تجربی و شبیه‌سازی نشان داده شده‌اند. در این شکل، می‌توان به وضوح تاثیر کاهش ویسکوزیته فاز گسسته را در کوتاه‌تر شدن طول گلویی و تولید ریز قطره کوچک‌تر مشاهده کرد.



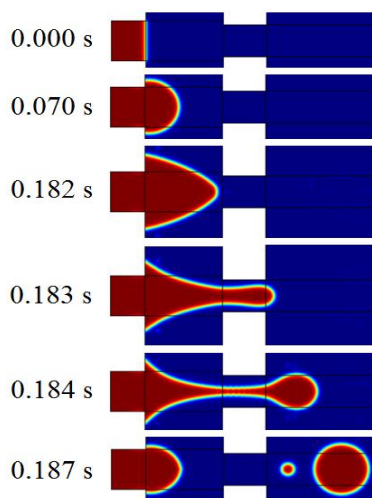
شکل ۹- قطر ریزقطرات روغن سیلیکون بر حسب نسبت دبی فاز پیوسته به فاز گسسته به ازای ثابت 0.04 mL/h برای فاز گسسته، نتایج تجربی از مرجع [۵۶]



شکل ۱۰- تصاویری از شکل‌گیری قطره بر اساس نتایج تجربی (بالا) [۵۶] و نتایج شبیه‌سازی (پایین) در شرایط $Q_d = 0.04 \text{ mL/h}$ و $Q_c/Q_d = 20$ برای دو مقدار مختلف از ویسکوزیته روغن معادل الف) 100 mPa.s (ب) 20 mPa.s



شکل ۷- فرآیند شکل‌گیری قطره برای نسبت $Q_c/Q_d = 20$ در دبی ثابت 0.04 mL/h برای فاز گسسته



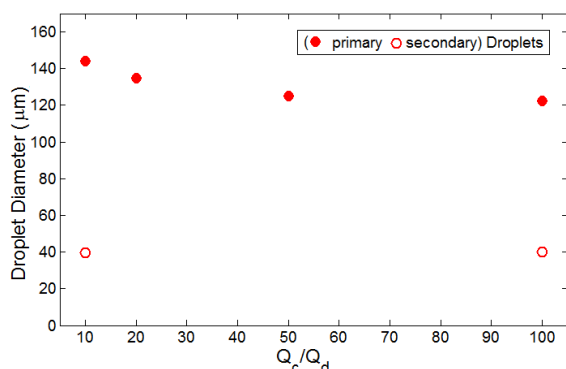
شکل ۸- فرآیند شکل‌گیری قطره برای نسبت $Q_c/Q_d = 100$ در دبی ثابت 0.04 mL/h برای فاز گسسته

جهت اعتبارسنجی روش شبیه‌سازی در این تحقیق، قطر ریز قطرات روغن سیلیکون حاصل از شبیه‌سازی حاضر در شرایطی مشابه با نتایج تجربی [۵۶] مقایسه شده است. قطر ریز قطرات حاصل در دستگاه میکروسیال برای مایع روغن سیلیکون در مقایسه با نتایج تجربی در شکل ۹ نشان داده

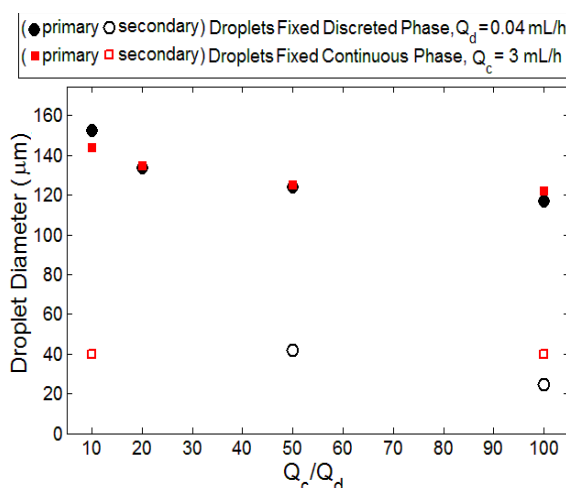
شکل ۱۳، تغییرات قطر ریز قطرات روغن سیلیکون بر حسب Q_c/Q_d را برای دو حالت نشان می‌دهد که در یکی دبی فاز گسسته ثابت و در دیگری دبی فاز پیوسته ثابت است. در این شکل دیده می‌شود که در نسبت دبی‌های Q_c/Q_d یکسان در هر دو حالت دبی فاز گسسته ثابت و یا دبی فاز پیوسته ثابت، قطر ریزقطره حاصل تقریباً یکسان است.

۳-۳- تاثیر خواص فیزیکی فاز گسسته

در این بخش، تاثیر خواص فیزیکی شامل ویسکوزیته و ضریب کشش سطحی فاز گسسته بر فرآیند شکل‌گیری ریز

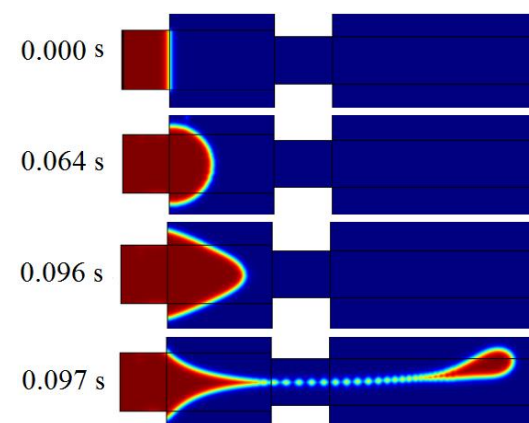


شکل ۱۲- قطر ریزقطرات روغن سیلیکون بر حسب نسبت دبی فاز پیوسته به ازای دبی ثابت ۳ mL/h برای فاز پیوسته



شکل ۱۳- قطر ریزقطرات روغن سیلیکون بر حسب نسبت دبی فاز پیوسته به فاز گسسته برای هر دو حالت فاز گسسته ثابت، ۰/۰۴ mL/h، و فاز پیوسته ثابت، ۳ mL/h

وقتی دبی فاز پیوسته خیلی زیاد می‌شود، فرآیند شکل‌گیری ریزقطرات مختل می‌شود. شکل ۱۱، برای نسبت دبی فاز پیوسته به فاز گسسته ۵۰۰ در دبی ثابت فاز گسسته ۰/۰۴ mL/h فرآیند تجزیه روغن سیلیکون را نشان می‌دهد. در این حالت، مشاهده می‌شود که در مقادیر بالای دبی فاز پیوسته، فرآیند شکل‌گیری ریزقطرات دچار انحراف می‌شود و در عمل فرآیند امولسیون‌سازی را مختل می‌سازد. این اختلال ناشی از ایجاد بی‌نظمی (اغتشاش) در خروج جریان دو فازی از گلوبی به وقوع می‌پیوندد. این بی‌نظمی با تاثیر بر الگوی میدان فشار و تبدیل آن به حالتی غیر متقارن تاثیر نهایی خود را در انحراف و اختلال در فرآیند قطره‌سازی ظاهر می‌کند.

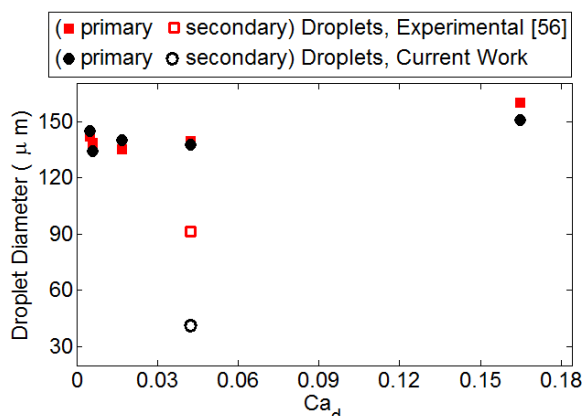


شکل ۱۱- فرآیند شکل‌گیری قطره در $Q_c/Q_d = 500$ به ازای دبی ثابت ۰/۰۴ mL/h برای فاز گسسته

۳-۲- تاثیر دبی فاز گسسته

در این بررسی، دبی ورودی فاز پیوسته ثابت و برابر ۳ mL/h در نظر گرفته شده است و برای مایعاتی مطابق با جدول ۲ و در نسبت‌های دبی فاز پیوسته به گسسته (Q_c/Q_d) ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰، شبیه‌سازی‌ها انجام گرفته است. در شکل ۱۲، تغییرات قطر ریز قطرات روغن سیلیکون بر حسب Q_c/Q_d حاصل از شبیه‌سازی، ارائه شده است. چنان که مشاهده می‌شود در این حالت نیز، با افزایش نسبت دبی‌ها قطر ریزقطرات روغن سیلیکون کاهش یافته است که علت آن، مانند حالت قبل، افزایش اختلاف سرعت بین دو مایع و تقویت نیروهای برشی است.

که این موضوع، تاثیر ماهیت مقاومتی ناشی از ویسکوزیته فاز گسسته را در برابر تجزیه آن به قطرات ریزتر نشان می‌دهد. در این شکل، همچنین نتایج شبیه‌سازی حاصل از مطالعه حاضر با نتایج تجربی ارائه شده در مرجع [۵۶] با یکدیگر مقایسه شده‌اند که تطابق مناسبی را از حیث اندازه ریزقطرات نشان می‌دهند.



شکل ۱۴- قطر ریزقطرات روغن سیلیکون بر حسب عدد موئینگی فاز گسسته

۳-۴- تاثیر ویسکوزیته فاز پیوسته

تاثیر ویسکوزیته فاز پیوسته روی فرآیند شکل‌گیری ریز قطره در دستگاه میکروسیال شکل ۵، در این قسمت ارائه شده است. برای این منظور، مانند حالت‌های قبلی روغن سیلیکون به عنوان فاز گسسته و آب به عنوان فاز پیوسته در نظر گرفته شده‌اند و مشخصات آن‌ها، مطابق جدول ۴ می‌باشند. لازم به ذکر است، ویسکوزیته‌های در نظر گرفته شده برای آب در جدول ۴ فرضی بوده، از جایی اقتباس نشده است.

جدول ۴- مشخصات مایعات مورد استفاده در بررسی تاثیر

ویسکوزیته فاز پیوسته				
ضریب کشش	دبی حجمی	وسکوزیته	چگالی	مایع
سطحی در تماس با آب (mN/m)	(mL/h)	دینامیکی (mPa.s)	(kg/m ³)	
۵/۵	۰/۰۴	۲۰	۹۵۰	روغن سیلیکون
-	(۲۰)×۰/۰۴	۱، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰، ۵۰۰	۱۰۰۰	آب

قطره در دستگاه میکروسیال شکل ۵ ارائه شده است. برای این منظور، روغن‌های سیلیکون با خواصی مطابق جدول ۳ به عنوان فاز گسسته و آب به عنوان فاز پیوسته در نظر گرفته شده‌اند. تاثیر خواص فیزیکی در قالب عدد موئینگی فاز گسسته، مورد بررسی قرار گرفته است که به صورت رابطه (۸) تعریف می‌شود [۴۷].

$$Ca_d = \frac{\mu_d u_d}{\gamma} \quad (8)$$

μ_d ویسکوزیته دینامیکی روغن سیلیکون، γ ضریب کشش سطحی و u_d سرعت روغن سیلیکون در اریفیس امولسیون بوده، بر مبنای دبی ورودی روغن سیلیکون و سطح مقطع اریفیس برابر ۱/۶۱۵ mm/s است. شبیه‌سازی‌ها در اعداد موئینگی مختلف، مبتنی بر مقادیر مختلف ویسکوزیته و کشش سطحی روغن سیلیکون، در جدول ۳ صورت گرفته است. لازم به ذکر است، در طی این شبیه‌سازی‌ها خواص دبی فاز پیوسته و نیر دبی فاز گسسته ثابت نگه داشته شده است.

جدول ۳- مشخصات مایعات مورد استفاده در بررسی تاثیر خواص فیزیکی فاز گسسته [۵۶]

ضریب کشش	دبی حجمی	وسکوزیته	چگالی	مایع
سطحی در تماس با آب (mN/m)	(mL/h)	دینامیکی (mPa.s)	(kg/m ³)	
۳/۳	۰/۰۴	۱۰	۹۳۰	
۵/۵	۰/۰۴	۲۰	۹۵۰	روغن سیلیکون
۴/۸	۰/۰۴	۵۰	۹۶۰	
۳/۸	۰/۰۴	۱۰۰	۹۶۰	
۴/۹	۰/۰۴	۵۰۰	۹۷۰	
-	(۲۰)×۰/۰۴	۱	۱۰۰۰	آب

شکل ۱۴، تغییرات قطر ریز قطرات روغن سیلیکون بر حسب عدد موئینگی را در دبی ورودی ۰/۰۴ mL/h برای روغن سیلیکون و نسبت دبی فاز پیوسته به فاز گسسته ۲۰ نشان می‌دهد. چنان که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش عدد موئینگی که مترادف با غلبه بیشتر نیروی چسبندگی ناشی از فاز گسسته بر نیروی کشش سطحی میان دو فاز مایع است، قطر ریزقطرات با افزایش مواجه می‌شوند

مقایسه شده است که توافق خوبی را نشان می‌دهند. در این تحقیق، تاثیر پارامترهای ویسکوزیته و دبی حجمی برای هر دو مایع مورد استفاده در امولسیون، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که افزایش دبی حجمی فاز گسسته به ازای دبی ثابتی از فاز پیوسته به تولید ریز قطرات درشت‌تر می‌انجامد؛ در حالی که افزایش دبی حجمی فاز پیوسته به ازای دبی ثابتی از فاز گسسته، منجر به کاهش اندازه ریزقطرات می‌شود. این موضوع حاکی از تقویت نیروهای گسست برشی وارد بر فاز گسسته در اثر افزایش اختلاف سرعت ناشی از افزایش دبی فاز پیوسته است که جدایش سریع‌تری را برای فاز گسسته در تولید ریز قطرات کوچکتر به دنبال خواهد داشت. نتایج بدست آمده در نسبت ثابتی از دبی فاز پیوسته به گسسته، صرف‌نظر از اینکه دبی فاز گسسته یا فاز پیوسته ثابت فرض شده باشد، نشان می‌دهند که اندازه ریز قطرات از مقدار تقریباً یکسانی برخوردارند. تاثیر ویسکوزیته مایعات نشان می‌دهد که افزایش ویسکوزیته فاز گسسته با تقویت نیروی مقاوم در برابر گسست، موجب افزایش اندازه ریزقطرات می‌شود؛ در حالی که افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته با تقویت نیروی گسست به کاهش اندازه ریز قطرات منجر می‌شود.

۴- علائم، نشانه‌ها و ارقام

سرعت سیال، m/s	u
فشار، Pa	P
بردار نیروی کشش سطحی، N	\vec{F}_{ST}
بردار نیروی گرانشی، N	\vec{F}_g
دبی، mL/h	Q
عدد بدون بعد موئینگی	Ca

علائم یونانی

تابع مجموعه سطح همتراز، m	ϕ
چگالی، kg/m ³	ρ
ویسکوزیته دینامیکی، Pa.s	μ
ضریب کشش سطحی، N/m	γ
انحنای سطح مشترک	κ

زیرنویس‌ها

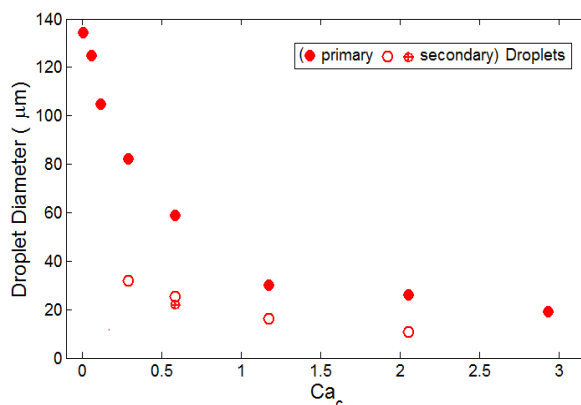
فاز گسسته	d
فاز پیوسته	c

تاثیر ویسکوزیته در قالب عدد موئینگی فاز پیوسته مورد بررسی قرار گرفته است که به صورت رابطه (۹) تعریف می‌شود [۴۷].

$$Ca_c = \frac{\mu_c \mu_c}{\gamma} \quad (9)$$

که μ_c ویسکوزیته دینامیکی آب، γ ضریب کشش سطحی و μ_c سرعت آب در اریفیس بوده، بر مبنای دبی ورودی آب و سطح مقطع اریفیس برابر $32/3$ mm/s است. در اعداد موئینگی مختلف مبتنی بر ویسکوزیته‌های مختلف، فاز پیوسته مطابق جدول ۴ شبیه‌سازی‌ها صورت گرفته است.

شکل ۱۵، تغییرات قطر ریز قطرات روغن سیلیکون بر حسب عدد موئینگی فاز پیوسته را در دبی ورودی روغن سیلیکون (فاز گسسته) برابر با 0.4 mL/h و نسبت ۲۰ برای دبی فاز پیوسته به فاز گسسته نشان می‌دهد. مطابق این شکل، افزایش عدد موئینگی فاز پیوسته که مترادف با تقویت نیروی برشی وارد از فاز پیوسته بر فاز گسسته و به تبع آن تقویت فرآیند گسست هیدرودینامیکی است، موجب کاهش قطر ریزقطرات فاز گسسته می‌شود.



شکل ۱۵- قطر ریزقطرات روغن سیلیکون بر حسب عدد موئینگی فاز پیوسته

۳-۵- نتیجه‌گیری کلی

یکی از روش‌های متداول برای تولید ریز قطرات یک مایع در مایع دیگر، فرآیند امولسیون‌سازی استفاده از دستگاه‌های میکروسیال است. در این تحقیق، فرآیند تولید ریز قطره در دستگاه میکروسیال جریان متمرکز با جریان‌های متقاطع شبیه‌سازی شده است و نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی

- ۵- مراجع
- [17] Ward T, Faivre M, Abkarian M, Stone HA (2005) Microfluidic flow focusing: Drop size and scaling in pressure versus flow-rate driven pumping. *Electrophoresis* 26(19): 3716-3724.
- [18] Nakano M (2000) Places of emulsions in drug delivery. *Adv Drug Deliver Rev* 45(1): 1-4.
- [19] Kang L, Chung BG, Langer R, Khademhosseini A (2008) Microfluidics for drug discovery and development: From target selection to product lifecycle management. *Drug Discov Today* 13(1): 1-13.
- [20] Li XJ, Zhou Y (2013) Microfluidic devices for biomedical applications. Elsevier.
- [21] Atencia J, Beebe DJ (2005) Controlled microfluidic interfaces. *Nature* 437(7050): 648-655.
- [22] Becher P (1965) *Emulsions: Theory and Practice*. Reinhold. New York.
- [23] Sebba F (1987) *Foams and Biliquid Foams-Aphrons*. John Wiley & Sons, Chichester.
- [24] Leal-Calderon F (2007) *Emulsion Science: Basic Principles*. Springer Verlag, New York.
- [25] Schramm LL (2005) *Emulsions, Foams and Suspensions: Fundamentals and Applications*. Wiley-VCH, Weinheim.
- [26] Tuncer Degim I, Çelebi N (2007) Controlled delivery of peptides and proteins. *Curr Pharm Design* 13(1): 99-117.
- [27] Davis SS, Walker IM (1987) Multiple emulsions as targetable delivery systems. *Method Enzymol* 149(1): 51-64.
- [28] Vasiljevic D, Parojcic J, Primorac M, Vuleta G (2006) An investigation into the characteristics and drug release properties of multiple W/O/W emulsion systems containing low concentration of lipophilic polymeric emulsifier. *International journal of pharmaceuticals* 309(1): 171-177.
- [29] Huang JS, Varadaraj R (1996) "Colloid and interface science in the oil industry. *Curr Opin Colloid In* 1(4): 535-539.
- [30] Muschiolik G (2007) Multiple emulsions for food use. *Current Opinion in Colloid & Interface Science* 12(4): 213-220.
- [31] Leal-Calderon F, Thivilliers F, Schmitt V (2007) Structured emulsions. *Curr Opin Colloid In* 12(4): 206-212.
- [32] Ouyang Y, Mansell RS & Rhue RD (1995) Emulsion mediated transport of nonaqueous phase liquid in porous media: A review. *Crit Rev Env Sci Tec* 25(3): 269-290.
- [33] De Menech M, Garstecki P, Jousse F, Stone HA (2007) Transition from squeezing to dripping in a microfluidic T-shaped junction. *Fluid Mech* 595(1): 141-162.
- [34] Garstecki P, Fuerstman MJ, Stone HA, Whitesides GM (2006) Formation of droplets and bubbles in a microfluidic T-junction scaling and mechanism of break up. *Lab on a Chip* 6(3): 437-446.
- [1] Nguyen NT, Wereley ST (2002) *Fundamentals and applications of microfluidics*. Artech House.
- [2] Hung LH, Lee AP (2007) Microfluidic devices for the synthesis of nanoparticles and biomaterials. *J Med Biol Eng* 27(1): 1-6.
- [3] Capretto L, Cheng W, Hill M, Zhang X (2011) *Micromixing within microfluidic devices*. Microfluidics Springer, Berlin Heidelberg, 27-68.
- [4] Lee CY, Chang CL, Wang YN, Fu LM (2011) Microfluidic mixing: a review. *INT J MOL Sci* 12(5): 3263-3287.
- [5] Suh YK, Kang S (2010) A review on mixing in microfluidics. *Micromachines* 1(3): 82-111.
- [6] Lewis PC, Graham RR, Nie ZH, Xu SQ, Seo M, Kumacheva E (2005) Continuous synthesis of copolymer particles in microfluidic reactors. *Macromolecules* 38(10): 4536-4538.
- [7] Nie ZH, Xu SQ, Seo M, Lewis PC, Kumacheva E (2005) Polymer particles with various shapes and morphologies produced in continuous microfluidic reactors. *J Am Chem Soc* 127(22): 8058-8063.
- [8] Nisisako T, Torii T, Higuchi T (2004) Novel microreactors for functional polymer beads. *Chem Eng J* 101(1): 23-29.
- [9] Seo M, Nie ZH, Xu SQ, Mok M, Lewis PC (2005) Continuous microfluidic reactors for polymer particles. *Langmuir* 21(25): 11614-11622.
- [10] Jensen K, Lee A (2004) The science and applications of droplets in microfluidic devices—Foreword. *Lab Chip* 4(1): 31-32.
- [11] Jeong WJ, Kim JY, Choo J, Lee EK (2005) Continuous fabrication of biocatalyst immobilized microparticles using photopolymerization and immiscible liquids in microfluidic systems. *Langmuir* 21(9): 3738-3741.
- [12] Li W, Nie ZH, Zhang H, Paquet C, Seo M, Garstecki P, Kumacheva E (2007) Screening of the effect of surface energy of microchannels on microfluidic emulsification. *Langmuir* 23(15): 8010-8014.
- [13] Sugiura S, Nakajima M, Itou H, Seki M (2001) Synthesis of polymeric microspheres with narrow size distributions employing microchannel emulsification. *Macromol Rapid Comm* 22(10): 773-778.
- [14] Sugiura S, Nakajima M, Seki M (2002) Effect of channel structure on microchannel emulsification. *Langmuir* 18(15): 5708-5712.
- [15] Sugiura S, Nakajima M, Seki M (2002) Prediction of droplet diameter for microchannel emulsification. *Langmuir* 18(10): 3854-3859.
- [16] Tan YC, Cristini V, Lee AP (2006) Monodispersed microfluidic droplet generation by shear focusing microfluidic device. *Sens Actuators B* 114(1): 350-356.

- [47] Afkhami S, Leshansky AM, Renardy Y (2011) Numerical investigation of elongated drops in a microfluidic T-junction. *Phys Fluids* 23(2): 022002_1-14.
- [48] جمشیداصلی د، عباسی ع (۱۳۹۲) شبیه‌سازی عددی دوفازی جریان و انتقال حرارت نانوسیال‌ها در میکروچاپ حرارتی با استفاده از مدل مخلوط همگن. *مجله مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها* ۳(۲): ۵۱-۶۳.
- [49] تقی‌پور ع، کریمی‌پور آ (۱۳۹۴) شبیه‌سازی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال متشکله از آب و نانو لوله کربنی در ریزکانال تحت میدان مغناطیسی در رژیم جریان لغزشی. *مجله مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها* ۵(۳): ۲۰۹-۲۲۲.
- [50] Lee J, Lee W, Son G (2013) Numerical study of droplet breakup and merging in a microfluidic channel. *Journal of Mechanical Science and Technology* 27(6): 1693-1699.
- [51] ادیبی پ، انصاری مر (۱۳۹۴ هـ ش) شبیه‌سازی عددی جریان دوفازی گاز-مایع در کانال افقی طویل و تعیین فرکانس اسلاگ با استفاده از مدل دوسیالی. *مجله مهندسی مکانیک شریف*، ۳(۲): ۶۷-۷۷.
- [52] Abrishamkar A, Rane AS, Elvira KS, Wootton RCR, Sainio TA (2013) COMSOL Multiphysics Model of Droplet Formation at a Flow Focusing Device. In COMSOL Conference Proceeding.
- [53] Multiphysics COMSOL manual, (1998-2013) "Introduction to the CFD Module User's Guide" COPYRIGHT COMSOL AB, Version COMSOL 4.3b.
- [54] Olsson E, Kreiss G (2005) A conservative level set method for two phase flow I. *J Comput Phys* 210(1): 225-246.
- [55] Olsson E, Kreiss G, Zahedi S (2007) A conservative level set method for two phase flow II. *J Comput Phys* 225(1): 785-807.
- [56] Nie Z, Seo M, Xu S, Lewis PC, Mok M, Kumacheva E, George M, Whitesides GM, Garstecki P, Stone HA (2008) Emulsification in a microfluidic flow-focusing device: effect of the viscosities of the liquids. *Microfluid Nanofluid* 5(5): 585-594.
- [35] Utada AS, Chu LY, Fernandez-Nieves A, Link DR, Holtze C, Weitz DA (2007) Dripping, jetting, drops, and wetting: the magic of microfluidics. *Mrs Bulletin* 32(9): 702-708
- [36] Shah RK, Shum HC, Rowat AC, Lee D, Agresti JJ, Utada AS (2008) Designer emulsions using microfluidics. *Materials Today* 11(4): 18-27.
- [37] Vladislavljević GT, Henry JV, Duncanson WJ, Shum HC, Weitz DA (2012) Fabrication of biodegradable poly (lactic acid) particles in flow-focusing glass capillary devices. *UK Colloids* 139(1): 111-114.
- [38] Anna SL, Bontoux N, Stone HA (2003) Formation of dispersions using flow focusing in microchannels. *Appl Phys Lett* 82(3): 364-366.
- [39] Link DR, Anna SL, Weitz DA, Stone HA (2004) Geometrically mediated breakup of drops in microfluidic devices. *Phys Rev Lett* 92(5): 054503_1-4.
- [40] Gu H, Duits MH, Mugele F (2011) Droplets formation and merging in two-phase flow microfluidics. *INT J MOL Sci* 12(4): 2572-2597.
- [41] Li Z, Leshansky AM, Pismen LM, Tabeling P (2015) Step-emulsification in a microfluidic device. *Lab on a Chip* 15(4): 1023-1031.
- [42] Nunes JK, Tsai SSH, Wan J, Stone HA (2013) Dripping and jetting in microfluidic multiphase flows applied to particle and fibre synthesis. *J Phys D Appl Phys* 46(11): 1-20.
- [43] EunáKim Y, SunáLee K, HyunáLee S, WookáOh K, YoonáKang J (2011) Generation of core-shell microcapsules with three-dimensional focusing device for efficient formation of cell spheroid. *Lab on a Chip* 11(2): 246-252.
- [44] Chandorkar A, Palit S (2009) Simulation of droplet dynamics and mixing in microfluidic devices using a VOF-based method. *Sens Transducers J* 7(1): 136-149.
- [45] Conchouso D, Al Rawashdeh E, Castro D, Arevalo A, Foulds IG (2013) Optimized Channel Geometry of a Flow-Focusing Droplet Generator for Parallelization. In COMSOL Conference Proceeding.
- [46] Hashim U, Diyana PNA, Adam T (2012) Numerical simulation of microfluidic devices. *J Appl Sci Research* 8(4): 26-29.