



Numerical Study of the Formation of Compound Droplets in a Three-Phase Glass Capillary Microfluidic System

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Pourahmadian S.¹,
Bijarchi M.A.^{1*}

How to cite this article

Pourahmadian S, Bijarchi M.A, Numerical Study of the Formation of Compound Droplets in a Three-Phase Glass Capillary Microfluidic System. Modares Mechanical Engineering; 2024;24(07):433-441.

¹ Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

bijarchi@sharif.edu

Article History

Received: March 29, 2024

Accepted: October 11, 2024

ePublished: October 31, 2024

ABSTRACT

The compound droplets resulting from water-in-oil-in-water emulsions have many applications, including in the food, pharmaceutical and cosmetic industries. Investigating the effective parameters in the production of these droplets plays an important role in their controlled production. In this numerical study, the production of compound droplets in a three-phase axisymmetric glass capillary microfluidic device is investigated. The structure of this system consists of two co-flow and one flow-focusing devices. In this study, the volume of fluid (VOF) method is used to solve the governing equations in different phases. 5 dimensionless parameters are selected to check the effect of each component on the diameter, the generation frequency, and the breakup length of the compound droplets. This study has successfully predicted the formation of compound droplets in the droplet regime. The simulation results show that with increasing the ratio of inner nozzle diameter to outer tube diameter, the core diameter enhances and the shell thickness decreases. By decreasing the angle of the inner nozzle tip, the drop regime changes to the jet regime. By increasing the contact angle of the middle phase with respect to the outer phase in the outer tube wall from 90 to 120 degrees, the frequency of droplet generation increases by 22%. The results of this study can be used for applications such as 3D cell culture.

Keywords Compound Droplet, Double Emulsion, Droplet Microfluidics, Capillary Tube, Numerical Solution.

CITATION LINKS

1- Monodisperse double emulsions generated from a microcapillary device. Science. 2- Numerical Simulation of droplet collision in the two phase... 3- Continuous drop formation at a capillary... 4- Two-phase microfluidic flows. 5- Microfluidic methods for generating continuous... 6- The generation of highly monodisperse droplets... 7- Rapid formation of multicellular spheroids in double-emulsion... 8- Double emulsion production in glass capillary... 9- Numerical investigation of fluid property effects on formation... 10- Hydrodynamics of triple emulsion droplet generation in a flow-focusing... 11- Understanding the microfluidic generation... 12- A novel microfluidic device for double emulsion... 13- Numerical Investigation of Double Emulsion... 14- An analysis of transport resistances in the operation of Blacore;... 15- Volume of fluid (VOF) method... 16- A continuum method for modeling...

مطالعه عددی تشکیل قطرات مرکب در یک سیستم میکرو سیال مویین شیشه‌ای سه فازی

سعید پوراحمدیان^۱، محمدعلی بیجارچی^{۲*}

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

چکیده

قطرات مرکب حاصل از قطره آب در روغن در آب امولسیون های دوگانه‌ای هستند که کاربردهای متعددی از جمله در صنایع غذایی، دارویی و آرایشی دارند. بررسی مولفه های موثر در تولید این قطرات نقش مهمی در تولید کنترل شده آن ها دارد. در این مطالعه عددی تولید قطرات مرکب در دستگاه مویین شیشه-ای میکروسیال تقارن محوری سه فازی بررسی شده است. ساختار این سیستم از ترکیب دو جریان هم جهت (co-flow) و یک جریان متمرکزشونده (flow-focusing) تشکیل شده است. در این مطالعه از روش حجم سیال (volume of fluid) برای حل معادلات حاکم در فاز های مختلف استفاده شده است. ۵ مولفه بی بعد انتخاب شده تا تاثیر هر مولفه با ثابت ماندن سایر مولفه ها بر قطر قطره مرکب، فرکانس تولید قطره مرکب و طول جدایش (breakup length) قطره مرکب بررسی شود. این مطالعه به طور موفقیت آمیزی تشکیل قطرات مرکب در رژیم قطره‌ای را پیش بینی کرده است. نتایج شبیه سازی نشان داده است که با افزایش نسبت قطر نازل داخلی به قطر لوله خارجی، قطر هسته افزایش و ضخامت پوسته کاهش می‌یابد. با کاهش زاویه نوک نازل داخلی، رژیم قطره به رژیم جت شونده تغییر می‌کند. با افزایش زاویه تماس فاز میانی نسبت به فاز خارجی در دیواره لوله خارجی از ۹۰ به ۱۲۰ درجه، فرکانس تولید قطرات ۲۲ درصد افزایش یافت. از نتایج این مطالعه می توان برای کاربردهایی مانند کشت سلولی سه بعدی بهره برد.

کلیدواژه‌ها: قطره مرکب، امولسیون دوگانه، میکروسیال قطره‌ای، لوله مویین، حل عددی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۰

*نویسنده مسئول: bijarchi@sharif.edu

۱- مقدمه

قطرات مرکب آب در روغن در آب امولسیون های دوگانه‌ای هستند که از پراکنده شدن (dispersion) یک فاز آب درون فاز روغنی بزرگتری که خود درون فاز آب دیگری پراکنده شده است تشکیل شده‌اند. فاز میانی در امولسیون های دوگانه نقش پوششی و محافظ برای فاز داخلی یا هسته را دارد و از تماس هسته با فاز خارجی جلوگیری می‌کند. این خاصیت سبب شده است که قطرات مرکب حاصل از امولسیون های دوگانه کاربردهای متعددی در صنایع غذایی، آرایشی، دارویی و رهاسازی کنترل شده داشته باشند [1,2].

برای تولید این قطرات مرکب روش‌های متعددی وجود دارد که با توجه به کاربرد انتخاب می‌شوند. یک روش مکانیکی تولید قطرات مرکب حاصل از امولسیون دوگانه، استفاده از دستگاه میکروسیال

(microfluidic) است؛ این روش بین محققان زمینه کشت سلولی اقبال چشم گیری پیدا کرده است زیرا سایر روش ها در روند تولید شرایطی را تجربه می‌کنند که قابل تحمل برای سلول ها نیست [3]؛ در میکروسیال از جریان کنترل شده دو سیال مخلوط نشدنی، تشکیل قطره صورت می‌گیرد؛ زمانی که فاز گسسته از یک سوزن بسیار باریک در محدوده اعداد رینولدز کم درون فاز پیوسته تزریق می شود قطرات در دو رژیم اصلی قطره و یا رژیم جت ممکن است تولید شوند [3]. مزیت استفاده از دستگاه میکروسیال قطره‌ای، کنترل پذیری قابل توجه آن است به نحوی که با تغییر دسته ای از مولفه های دستگاه مانند دبی فازها می‌توان ابعاد قطرات تولیدی را کنترل کرد؛ به عبارت دیگر دقت و حساسیت بالا، ابعاد کوچک و یکنواخت قطرات و هزینه اندک محصول این روش توجه بسیاری را به خود جلب کرده است و برای تولید انبوه به کار می‌رود [4].

دستگاه‌های میکروسیال قطره ای در یک تقسیم بندی با توجه به ماهیت جریان سیال در محل جدایش قطره، به سه گروه اصلی شامل جریان هم‌راستا، جریان متقاطع (cross-flow) و جریان متمرکزشونده تقسیم می‌شوند [5]. در جریان هم‌راستا فاز گسسته درون نازل داخلی و فاز پیوسته در اطراف آن جریان دارد؛ فاز گسسته به درون فاز پیوسته که به صورت موازی با آن جریان دارد تزریق می‌گردد و تشکیل قطره در دو رژیم قطره و جت صورت می‌گیرد. در دسته جریان متقاطع بیش از آنکه محصول تولیدی قطره باشد پلاگ هایی است که در فواصل یکسان تولید می شود. در دو دسته جریان هم راستا و جریان متقاطع برای تولید و جدایش قطره بیشتر از جریان های برشی بهره گرفته می‌شود. در دسته جریان متمرکز شونده بیشتر از کشیدگی جریان فاز گسسته برای تولید قطرات کوچک با فرکانس تولید بالا استفاده می‌شود [6].

دسته‌بندی ذکر شده برای دستگاه‌های میکروسیال قطره‌ای برای تولید قطرات ساده آب در روغن استفاده می‌شود. می‌توان دستگاه‌های متنوعی را با ترکیب این سه روش برای تولید قطرات مرکب به کار برد. چان و همکاران [7] توانستند محیط کشت سه بعدی سلول ها را به کمک یک دستگاه میکروسیال قطره ای چند مرحله ای در تعداد بالا تولید کنند که جنس این محیط کشت سلولی به صورت آب در روغن در آب است. فرکانس تولید قطره مرکب ۲۰ هرتز و ابعاد آن حدود ۱۰۰ میکرومتر است. ایراد این روش چند مرحله ای بودن آن است زیرا تولید چند مرحله ای قطرات مرکب امولسیون دوگانه سبب کنترل پذیری معیوب ساختار قطرات در فرایند تولید می شود. یوتادا و همکاران [11] یک دستگاه میکروسیال مویین شیشه‌ای سه فازی که ترکیبی از دو جریان هم راستا و متمرکز شونده بود را توسعه دادند و توانستند قطرات مرکبی با ابعاد حدود ۲۰۰ میکرومتر و هسته تکدانه و فرکانس تولید قطرات مرکب از ۱۰۰ تا ۵۰۰۰ هرتز بسته به نرخ تزریق فازها و با پوسته نازک تولید کنند. آن ها کنترل پذیری این روش در تولید

محوری جدید را توسعه دادند که برای تولید قطرات مرکب از ۳ جریان هم جهت استفاده می‌کند. آن‌ها به بررسی مولفه‌های هندسی مختلف به صورت عددی و با روش لیتیس بولتزمان پرداخته‌اند. قطرات مرکب تولید شده تک هسته بوده و قطر قطره مرکب حدود ۲۰۰ میکرومتر و طول جدایش آن حدود ۲۵۰ میکرومتر است. فرکانس تولید قطرات مرکب گزارش نشده است. رینالدو و همکاران^[۱۳] یک مدل عددی دستگاه مویین ریزسیال تقارن محوری را توسعه دادند و با استفاده از روش حجم سیال کوپل شده با نیروی سطح پیوسته توانستند تولید قطرات مرکب را شبیه‌سازی کنند. در این مدل فاز خارجی به صورت اتصال تی وارد می‌شود و تزریق سایر فازها نیز در ناحیه‌ای بسیار کوچک صورت می‌پذیرد. قطرات مرکب تولیدی با این روش دارای فرکانس تولید حدود ۹۷۰ هرتز و قطر حدود ۳۰ میکرومتر و به صورت تک هسته می‌باشند. در این مطالعه مولفه‌های موثر تولید قطره مرکب مطالعه نشده‌اند و صرفاً به معرفی یک ساختار ریزسیال جدید پرداخته شده است. علی‌رغم مطالعات عددی انجام شده تاکنون مطالعه جامعی انجام نشده است که تأثیر تمامی مولفه‌ها را در یک گروه و به طور هم‌زمان بررسی کند. همچنین برخی مولفه‌های هندسی و فیزیکی تاکنون بررسی نشده‌اند. بدین منظور در این مطالعه به شبیه‌سازی عددی تولید قطرات مرکب در یک مدل تقارن محوری متشکل از دو جریان هم‌جهت و یک جریان متمرکزشونده پرداخته شده و معادلات پیوستگی، مومنتوم و حجم سیال حل شده است. ۱۵ مولفه بی‌بعد موثر در تشکیل قطره مرکب در نظر گرفته شده و تأثیر هر مولفه انتخابی را با ثابت نگه داشتن ۱۴ مولفه دیگر بر فرکانس تولید قطره مرکب قطر قطره داخلی و خارجی و طول جدایش قطره مرکب بررسی کرده است. به دلیل کمبود فضا از میان این ۱۵ مولفه ۵ مولفه که دارای جذابیت فیزیکی بیشتری بوده‌اند و یا تاکنون بررسی نشده‌اند بررسی شده است. این مولفه‌ها در بخش نتایج قابل مشاهده است.

۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم برای پیوستگی جرم (۱) و پایستگی تکانه (۲) به صورت زیر بیان می‌شوند (پتینکار و همکاران^[۱۴]):

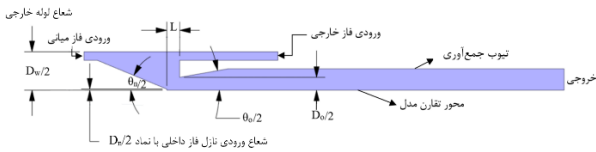
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{U}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{U}) + \nabla \cdot (\rho \bar{U} \bar{U}) = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu (\nabla \bar{U} + \nabla \bar{U}^T)] + F_b \quad (2)$$

F_b نیروهای حجمی موثر در مسئله هستند که شامل نیروی گرانش و نیروی تنش بین‌سطحی می‌شود؛ چون طول مشخصه مسئله در مقیاس میکرو است می‌توان از شتاب گرانش در این مسئله صرف نظر کرد. در مدل حجم سیال، معادله پایستگی تکانه (۲) برای تمام فازها حل شده و ردیابی بین‌سطحی با حل معادله پیوستگی برای

قطرات مرکب را بی‌سابقه توصیف کردند زیرا در این روش قطرات مرکب به صورت تک مرحله‌ای تولید می‌شوند و با کم و زیاد کردن نرخ تزریق فازها توانستند ضخامت پوسته و نرخ تولید قطرات مرکب را کنترل کنند. علی‌رغم مطالعات تجربی بسیاری که در این زمینه وجود دارد مطالعات عددی کمی انجام شده است. نبوی و همکاران^[۸] در دستگاه مویین شیشه‌ای ریزسیال به تولید قطرات مرکب در دو رژیم قطره‌ای و جت شونده پرداختند. آن‌ها توانستند برای اولین بار با ارائه یک مدل عددی تقارن محوری دو جریان هم‌جهت و یک جریان متمرکز شونده و به کارگیری روش حجم سیال کوپل شده با نیروی سطح پیوسته (continuum surface force) مطالعه عددی تولید قطرات مرکب انجام دهند و نتایج به دست آمده را با داده‌های تجربی خود اعتبارسنجی کنند؛ بخش عددی مقاله شامل مطالعه پارامتری تولید قطرات مرکب است. در این مطالعه بسته به دبی فازهای ورودی فرکانس تولید قطرات مرکب میان ۱۰ تا ۲۰۰ هرتز و قطر آن‌ها بین ۱۵۰ تا ۴۵۰ میکرومتر تغییر می‌کند و به صورت یک هسته است. ژنگ و همکاران^[۹] با تمرکز بر اثرات خواص سیال مانند سرعت جریان، ویسکوزیته و کشش سطحی به بررسی عددی تشکیل قطرات مرکبی در مقیاس میلی‌متری در یک دستگاه سه جریان هم‌جهت پرداختند. این مطالعه با استفاده از مدل حجم سیال کوپل شده با نیروی سطح پیوسته به بررسی چگونگی تأثیر این عوامل بر تشکیل قطرات و انتقال بین رژیم‌های قطره‌ای، جت شونده و انتقالی می‌پردازد. برای پیش‌بینی این رژیم‌های جریان، یک عدد بی‌بعد معرفی کردند. این مطالعه فاقد بررسی مولفه‌های هندسی در رژیم‌های مختلف بر تشکیل قطره می‌باشد. یو و همکاران^[۱۰] تشکیل امولسیون سه‌گانه را در یک دستگاه تقارن محوری ریزسیال بر پایه جریان متمرکزشونده به صورت عددی و با استفاده از روش حجم سیال بررسی کرده‌اند و هیدرودینامیک تشکیل قطره در سه رژیم قطره‌ای، جت شونده و انتقالی بررسی شده است. در این مطالعه قطرات مرکب به صورت تک هسته تشکیل و بسته به مقدار دبی جریان فازهای مختلف در دستگاه ریزسیال، قطرات مرکب با قطر بیرونی حدود ۴۰۰ میکرومتر و فرکانس تولید حدود ۳۵ هرتز تولید شدند. در واقع در این مطالعه نسبت به مطالعات عددی قبلی یک قدم فراتر رفته و امولسیون‌های چندگانه را به صورت عددی بررسی کرده است. هوانگ و همکاران^[۱۱] تولید امولسیون دوگانه دو هسته را در یک دستگاه ریزسیال دو مرحله‌ای جریان هم‌جهت بررسی کرده‌اند که جنس پوسته از الجینات (alginate) است که در کاربرد های دارورسانی استفاده می‌شود. آن‌ها علاوه بر مطالعه تجربی دینامیک جدایش قطره را به صورت عددی و با استفاده از روش حجم سیال بررسی کرده‌اند. بررسی عددی این مقاله بسیار محدود است و فقط به دینامیک جدایش قطره‌ها پرداخته شده و نمودار عددی و داده‌های عددی شامل ابعاد قطره ترکیبی و فرکانس تولید وجود ندارد. یوسفوند و همکاران^[۱۲] یک ساختار ریزسیال تقارن

از شرط عدم لغزش (no-slip wall) و همچنین شرط تقارن محوری (axis) تعریف شده است.



شکل ۱) شماتیک مدل تقارن محوری. مولفه \$L\$ ۱۵۰ میکرومتر است.

در تنظیمات حلگر نرم افزار، برای کوپلینگ فشار و سرعت از الگوریتم سیمپل (SIMPLE) استفاده شده است. برای محاسبه جمله فشار، از طرح پرستو (PRESTO) استفاده شده است که به صورت مستقیم جمله فشار را روی سطوح (faces) محاسبه می‌کند و از خطای میانابایی جلوگیری می‌کند. همچنین معادلات تکانه به کمک طرح بادسو مرتبه دوم (second order upwind) گسسته-سازی شده و میانابایی بین‌سطحی با طرح جنو-ریکانستراکت (Geo-Reconstruct) انجام شده است.

۴- نتایج

در این مطالعه به منظور بررسی مولفه‌های موثر در تولید قطرات مرکب در سیستم ریزسیال مورد نظر، تعداد ۱۵ مولفه هندسی و سیالاتی بی بعد انتخاب شده‌اند که عبارتند از:

- ۱) U_i/U_r نسبت سرعت فاز داخلی به فاز خارجی
- ۲) U_m/U_r نسبت سرعت فاز میانی به فاز خارجی
- ۳) μ_i/μ_r نسبت ویسکوزیته دینامیکی فاز داخلی به فاز خارجی
- ۴) μ_m/μ_r نسبت ویسکوزیته دینامیکی فاز میانی به فاز خارجی
- ۵) ρ_i/ρ_r نسبت چگالی فاز داخلی به فاز خارجی
- ۶) ρ_m/ρ_r نسبت چگالی فاز میانی به فاز خارجی
- ۷) We_m عدد وبر فاز میانی
- ۸) Ca_i عدد کپیلاری فاز داخلی
- ۹) Ca_m عدد کپیلاری فاز میانی
- ۱۰) D_n/D_w نسبت قطر نازل فاز داخل به قطر لوله خارجی
- ۱۱) D_o/D_w نسبت قطر تیوب جمع‌آوری به قطر لوله خارجی
- ۱۲) L/D_w نسبت فاصله نوک نازل فاز داخل تا تیوب جمع-آوری به قطر لوله خارجی
- ۱۳) θ_o زاویه ورودی تیوب جمع‌آوری
- ۱۴) θ_n زاویه نوک نازل فاز داخل
- ۱۵) α_w زاویه تماس فازهای میانی و خارجی در دیواره لوله خارجی

روندی که برای مطالعه این مولفه‌ها به کار گرفته شده است به این صورت است که در بررسی یک مولفه، ۱۴ مولفه دیگر در طول

کسر حجمی (volume fraction)، f' ، از یک یا چند فاز به دست می‌آید (هرت و همکاران [15]).

$$\frac{\partial f'}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla f' = 0 \quad (3)$$

بخشی از هر سلول که با سیالات پر شده به کمک روش کسر حجمی در هر سلول تعیین فاز می‌شود به این صورت که اگر کسر حجمی برابر صفر باشد سلول مدنظر با سیال ۱ پر شده است و اگر کسر حجمی بین صفر و یک باشد در این صورت خط رابط بین‌فازی از سلول رد شده (interface) و اگر کسر حجمی برابر یک باشد سلول مورد نظر با سیال ۲ پر شده است. ویسکوزیته دینامیکی و چگالی در معادله پایستگی تکانه (۲) به ترتیب به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\mu = f' \mu_1 + (1 - f') \mu_2 \quad (4)$$

$$\rho = f' \rho_1 + (1 - f') \rho_2 \quad (5)$$

اندیس‌های ۱ و ۲ فاز اول و دوم را در هر سلول مشخص می‌کنند. به کمک روش نیروی سطح پیوسته جمله نیروی بین‌سطحی (interfacial surface force) در سطح آزاد حل شده است (برکبل و همکاران [16]).

$$F_\sigma = \sigma \kappa \nabla f' \quad (6)$$

در معادله (۶) σ نشانه تنش بین‌سطحی است و κ نشانه انحنا محلی بین‌سطحی است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\kappa = \nabla \cdot \hat{n} \quad (7)$$

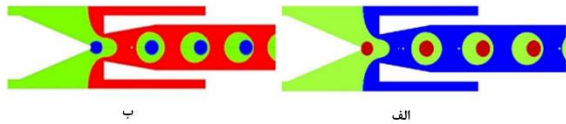
و \hat{n} بردار یکه عمود بر بین دو فاز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$(8)$$

۳- روش عددی

هندسه مدل به صورت تقارن محوری طراحی شده که در شکل ۱ شروط مرزی به همراه مولفه های هندسی قابل مشاهده است. هندسه نشان داده شده شبکه‌بندی شده و با تعیین شرایط مرزی برای حل معادلات حاکم در نرم افزار انسیس فلونت (ANSYS Fluent) بارگذاری شده است. در شبکه‌بندی هندسه، به منظور کاهش حجم محاسبات و بهینه سازی، در نزدیک محل تشکیل قطره و داخل تیوب جمع‌آوری شبکه بندی ریز زده شده ولی در سایر نواحی مش درشت تری زده شده است. در نرم افزار فلونت از حلگر فشار پایه (pressure-based) با فرمول بندی سرعت مطلق استفاده شده است. برای زمان، مدل ناپایا استفاده شده و همچنین مولفه های کسر حجمی به صورت صریح (explicit) فرمولبندی شده‌اند. برای مدل‌سازی بهتر نیروهای حجمی نیز از فرمول بندی ضمنی (implicit) برای آن‌ها استفاده شده است. برای مدل‌سازی، جریان آرام (laminar) استفاده شده است که این فرض با توجه به عدد رینولدز پایین، فرض قابل قبولی است. شرایط مرزی تعریف شده برای مرزهای ورودی، ورودی سرعت (velocity inlet)، برای مرزهای خروجی، فشار نسبی صفر (pressure outlet) برای دیوارها

جمع‌آوری ۱۵۰ میکرومتر است. رژیم تشکیل قطره در شکل ۲-الف با دقت خوبی مشابه شکل ۲-ب است و در جدول ۲ مقایسه به صورت کمی انجام شده است. خطا در مولفه‌های قطر هسته ۷/۸ درصد، قطر قطره مرکب ۸/۶ درصد، طول جدایش فاز داخلی ۶/۷ درصد و طول جدایش قطره مرکب ۳/۲ درصد است که اعداد قابل قبولی هستند. اختلاف مشاهده شده را می‌توان به نحوه اندازه‌گیری و تعریف قطر معادل و طول جدایش مربوط دانست.



شکل ۲) بخش الف، کانتور فازی حل عددی در مطالعه حاضر و بخش ب کانتور فازی حل عددی در مقاله [۸] است. در الف، رنگ آبی، سبز، و قرمز به ترتیب نشان دهنده فاز خارجی، میانی، و داخلی است و در ب رنگ قرمز، سبز، و آبی به ترتیب نشان دهنده فاز خارجی، میانی، و داخلی است.

جدول ۲) مقایسه نتایج حل عددی با نتایج حل عددی مقاله [۸] و بررسی درصد خطای مولفه‌های قطر هسته (D_i)، قطر قطره مرکب (D_m)، طول جدایش فاز داخلی (L_i) و طول جدایش قطره مرکب (L_m).

مولفه	D_i (μm)	D_m (μm)	L_i (μm)	L_m (μm)
مقاله [۷]	۱۶۰	۳۳۰	۲۲۵	۳۷۲
مقاله حاضر	۱۷۲/۵	۳۵۸/۵	۲۴۰	۳۸۴
درصد خطا (%)	۷/۸	۸/۶	۶/۷	۳/۲

۴-۳- بررسی مولفه‌ها

۵ مولفه منتخب از میان ۱۵ مولفه مطالعه شده عبارتند از:

- نسبت قطر نازل فاز داخل به قطر لوله خارج
- نسبت سرعت فاز داخلی به خارجی
- نسبت سرعت فاز میانی به خارجی
- زاویه نوک نازل فاز داخلی
- زاویه تماس بین فازهای میانی و خارجی در دیواره لوله خارجی

در بررسی هرکدام از این مولفه‌ها، ۱۴ مولفه دیگر ثابت نگه داشته می‌شوند.

۴-۳-۱- مولفه نسبت قطر نازل فاز داخل به قطر لوله

خارجی

D_w و D_n به ترتیب نشان دهنده قطر نازل داخلی و قطر لوله خارجی هستند که در شکل ۱ نمایش داده شده‌اند. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است با افزایش D_n/D_w اندازه قطر هسته افزایش یافته اما قطر و فرکانس تولید قطره مرکب ثابت باقی می‌ماند. به بیان عددی، فرکانس میانگین تولید قطره مرکب ۱۳/۴۲ قطره بر ثانیه است و با تغییر نسبت قطر نازل فاز داخل به قطر لوله خارجی، فرکانس بین ۱۲/۲۵ و ۱۴/۲۹ در نوسان است و نظم یکنواختی

مطالعه ثابت نگه داشته شده‌اند و اثر تغییر آن مولفه بر خواص زیر بررسی شده است:

- فرکانس تولید قطره مرکب (F_m)
- قطر قطره داخلی (D_i)
- قطر قطره خارجی (D_m)
- طول جدایش قطره مرکب (L_m)

طول جدایش قطره مرکب همان فاصله‌ی میان نوک نازل فاز داخل تا محل جدایش یک قطره مرکب است.

در این مطالعه یک مدل به عنوان مبنا در نظر گرفته شده و خواص سه فاز به کار رفته در مدل مبنا در جدول ۱ آورده شده است. این خواص بر اساس داده‌های عددی موجود در مرجع [۸] انتخاب شده است.

جدول ۱) خواص فازهای مدل مبنا

فاز	چگالی (kg/m^3)	ویسکوزیته ($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	دبی (mL/h)	سرعت (m/s)
داخلی	۱۱۸۰	۰/۰۳۹۶	۰/۱۲	۰/۰۶۸
میانی	۱۱۷۰	۰/۰۶۴۸۲	۰/۹۲	۰/۰۰۱
خارجی	۱۲۰۰	۰/۰۴۸۲	۲/۴	۰/۰۰۳

در ادامه به بررسی ۵ مولفه منتخب از میان ۱۵ مولفه پرداخته شده است که دارای جذابیت فیزیکی بیشتری بوده و قبلاً بدین صورت بررسی نشده‌اند. بدین منظور مدل تقارن محوری ارائه شده در شکل ۱ را شبکه بندی و استقلال از شبکه آن را بررسی کرده و سپس شبکه بندی منتخب را مشابه شرایط حاکم بر مدل عددی نبوی و همکاران [۸] حل عددی و اعتبارسنجی کرده و در نهایت به تحلیل نتایج پرداخته شده است. این مطالعه در شرایط جریان آرام انجام شده است.

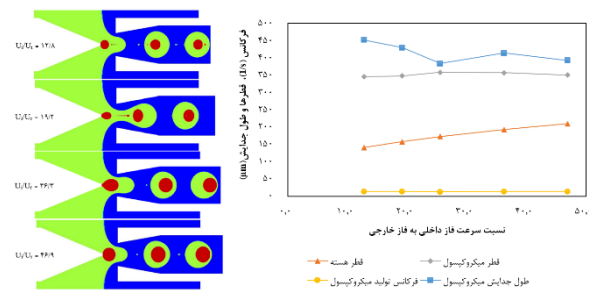
۴-۱- استقلال از شبکه

برای بررسی استقلال از شبکه مدل، ۳ شبکه بندی از هندسه موردنظر با اندازه‌های مختلف انجام شده است و قطر قطره مرکب تولیدی در آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. برای ایجاد شبکه بندی‌های مورد نظر، اندازه سلول‌های بخشی از مدل که شبکه بندی ریزتری داشته که شامل بخش‌های اطراف ورودی و داخل تیوب جمع‌آوری می‌شود، تغییر داده شده است. شبکه بهینه انتخابی شامل ۲۰۶،۲۸۷ گره است که نسبت به ریزترین شبکه بندی دارای ۰/۷ درصد خطا است که قابل صرف نظر کردن است.

۴-۲- اعتبارسنجی مدل

برای یک حالت خاص مشابه حل عددی مقاله [۸] شبیه‌سازی انجام شده و نتایج با نتایج عددی مقاله [۸] مقایسه و اعتبارسنجی شده است. خواص فازهای مختلف در جدول ۱ آورده شده است. هندسه مدل دارای قطر لوله جمع‌آوری ۳۰۰ میکرومتر و قطر نازل فاز داخلی ۲۵ میکرومتر و فاصله نوک نازل فاز داخلی تا ورودی لوله

قطره مرکب اثر نداشته است. به عبارت دیگر با افزایش سرعت فاز داخلی نیروی اینرسی افزایش یافته و باعث می‌شود جدایش هسته داخلی دیرتر انجام شود بنابراین قطره دیرتر تشکیل شده و قطر آن افزایش می‌یابد. همچنین خواص فازهای میانی و خارجی ثابت است بنابراین فرکانس تولید قطره مرکب تقریباً ثابت است، اما ضخامت پوسته قطره مرکب به دلیل افزایش قطر هسته کاهش می‌یابد. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود در این بازه از تغییرات تشکیل قطره مرکب در رژیم قطره‌ای اتفاق می‌افتد. در نمودار شکل ۴ فرکانس تولید قطره مرکب با دایره زرد رنگ مشخص شده است روند ثابتی دارد و مقدار میانگین آن $13/56$ قطره بر ثانیه می‌باشد؛ قطر هسته با مثلث قرمز رنگ مشخص شده است و با افزایش نسبت سرعت فاز داخلی به خارجی از $12/8$ تا $46/9$ ، قطر هسته از 141 به 209 میکرومتر ($48/24$ درصد افزایش) می‌رسد؛ قطر قطره مرکب با لوزی خاکستری رنگ مشخص شده است و روند تقریباً ثابتی را نشان می‌دهد و دامنه نوسان آن بسیار کوچک است (حدود $3/75$ درصد) و قابل نظر کردن است. مقدار میانگین قطر قطره مرکب $352/1$ میکرومتر است؛ طول جدایش قطره مرکب با کاهش حدود 13 درصدی همراه است که در شکل ۳ با نمودار مربع آبی رنگ مشخص شده است و روندی کاهشی دارد یعنی از حدود 452 میکرومتر به حدود 391 میکرومتر می‌رسد.

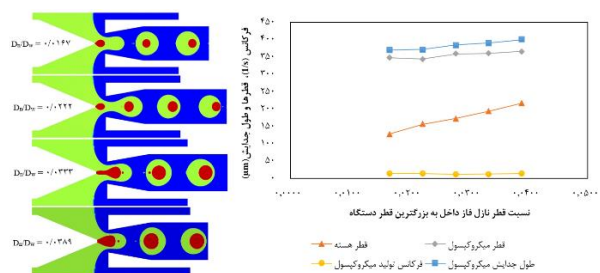


شکل ۴ کانتورهای فازی حل عددی برای نسبت سرعت فاز داخلی به فاز میانی های به ترتیب $12/8$ و $19/2$ و $36/3$ و $46/9$ و نمودار تغییرات فرکانس تولید قطره مرکب، قطر هسته، قطر قطره مرکب و طول جدایش قطره مرکب بر حسب مولفه نسبت سرعت فاز داخلی به فاز میانی نشان داده شده است. رنگ‌بندی کانتور فازی مشابه رنگ بندی تعریف شده در شکل ۲-الف می‌باشد.

۴-۳-۳- مولفه نسبت سرعت فاز میانی به فاز خارجی

U_m سرعت فاز میانی و U_r سرعت فاز خارجی است، همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود با افزایش U_m/U_r دبی فاز میانی افزایش و قطر هسته کاهش یافته همچنین قطر قطره مرکب افزایش یافته است. در واقع با افزایش دبی فاز میانی اینرسی آن افزایش یافته و جدایش آن توسط فاز خارجی سخت‌تر اتفاق می‌افتد، بنابر این قطر قطره مرکب افزایش می‌یابد. در نتیجه با افزایش دبی فاز میانی ضخامت پوسته قطره مرکب افزایش یافته است و فرکانس تولید قطره مرکب تقریباً ثابت مانده است. همچنین مشاهده می‌شود به

ندارد و دامنه نوسان نیز کوچک است و قابل نظر کردن می‌باشد. در شکل ۳ نمودار دایره‌ای زرد رنگ نشان دهنده روند فرکانس تولید قطره مرکب است که تقریباً ثابت است. قطر قطره مرکب روند افزایشی ضعیف دارد و نمودار آن نمودار لوزی خاکستری رنگ در شکل ۳ است و به طور متوسط $355/3$ میکرومتر است. در واقع قطر قطره مرکب در کل حدود 5 درصد افزایش یافته و قابل نظر کردن است. نمودار مثلثی قرمز رنگ در شکل ۳ با افزایش نسبت قطر نازل فاز داخل به قطر لوله خارجی از $0/167$ تا $0/389$ ، قطر هسته $68/75$ درصد، از 128 تا 216 میکرومتر افزایش پیدا کرده است و روند افزایشی یکنواخت مشاهده شده است. به عبارت دیگر قطر قطره تابعی از قطر نازل بوده و با افزایش قطر نازل داخلی قطر هسته افزایش یافته است، در حالی که قطر و فرکانس قطره مرکب به دلیل آنکه تغییری در هندسه خارجی رخ نمی‌دهد ثابت باقی می‌ماند. بنابراین ضخامت پوسته قطره مرکب با افزایش این مولفه کاهش می‌یابد. نمودار مربع آبی رنگ در شکل ۳ روند طول جدایش قطره مرکب را نشان می‌دهد که تقریباً ثابت است و در کل حدود 8 درصد افزایش یافته است. به دلیل اینکه تشکیل قطره مرکب بیشتر در ارتباط با فازهای میانی و خارجی است و چون این فازها بدون تغییر بودند، طول جدایش قطره مرکب تقریباً ثابت مانده است. و طول جدایش قطره مرکب به طور متوسط $383/2$ میکرومتر می‌باشد. لازم به ذکر است که اندازه گیری فرکانس تولید قطره مرکب زمانی انجام گرفته است که روند تولید قطره به تعادل رسیده و همگن شده است. برای محاسبه فرکانس تولید قطره مرکب بعد از رسیدن به تعادل، با داشتن فاصله زمانی تولید یک قطره مرکب فرکانس آن محاسبه شده است. در این بازه از تغییرات رژیم کلی قطره‌ای مشاهده شده است.

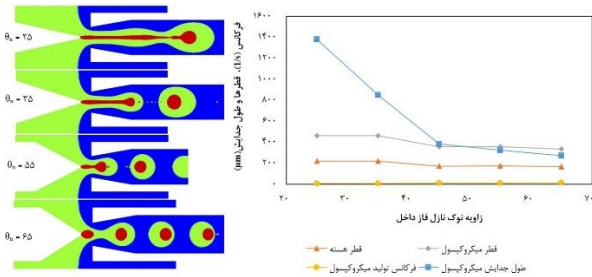


شکل ۳ کانتورهای فازی حل عددی برای نسبت قطر نازل فاز داخل به قطر لوله خارجی های به ترتیب $0/167$ ، $0/211$ ، $0/333$ و $0/389$ و نمودار تغییرات فرکانس تولید قطره مرکب، قطر هسته، قطر قطره مرکب و طول جدایش قطره مرکب بر حسب مولفه نسبت قطر نازل فاز داخل به قطر لوله خارجی نشان داده شده است. رنگ‌بندی کانتور فازی مشابه رنگ بندی تعریف شده در شکل ۲-الف می‌باشد.

۴-۳-۲- مولفه نسبت سرعت فاز داخلی به خارجی

U_i سرعت فاز داخلی و U_r سرعت فاز خارجی است، همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود با افزایش مولفه نسبت سرعت فاز داخلی به فاز خارجی قطر هسته افزایش پیدا کرده است اما در اندازه قطر

۸۰/۳۲ درصد کاهش یافته است و از ۱۳۸۲ به ۲۷۲ میکرومتر رسیده است. قطر هسته نیز روند کاهشی داشته و به میزان ۲۳/۸۵ درصد کاهش یافته است و از مقدار ۲۱۸ به ۱۶۶ میکرومتر رسیده است. در نتیجه این مولفه هندسی برای تغییر رژیم جریان از جت به قطره‌ای مناسب است.



شکل ۴ کانتورهای فازی حل عددی برای زاویه نوک نازل فاز داخلی‌های به ترتیب ۲۵ و ۳۵ و ۴۵ و ۵۵ درجه و نمودار تغییرات فرکانس تولید قطره مرکب، قطر هسته، قطر قطره مرکب و طول جدایش قطره مرکب بر حسب مولفه زاویه نوک نازل فاز داخلی نشان داده شده است. رنگ‌بندی کانتور فازی مشابه رنگ بندی تعریف شده در شکل ۲-الف می‌باشد.

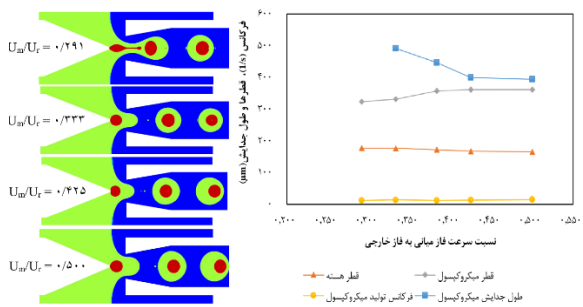
۴-۳-۵- مولفه زاویه تماس بین فازهای میانی و خارجی در دیواره لوله خارجی

این مولفه زاویه تماس بین فازهای میانی و خارجی در محل دیواره لوله خارجی است. در این مطالعه به صورت عددی تاثیر تغییر این مولفه بررسی می‌شود در حالی که تغییر این مولفه در مطالعات تجربی دیده نشده است. ابتدا یک حالت مبنا با زاویه ۹۰ درجه و سپس یک مدل با زاویه تماس ۱۲۰ درجه تنظیم و شبیه سازی شده است و نتایج و مقایسه این دو حالت در جدول ۳ آورده شده است. در این جدول از میان ۱۵ مولفه تنها مولفه زاویه تماس بین فازهای میانی و خارجی در دیواره لوله خارجی تغییر داده شده است و سایر ستون‌های این جدول نشان دهنده خروجی‌های مختلف هستند. در حالت آبریزتر مقدار اندکی قطر هسته و قطر قطره مرکب تولیدی کاهش یافته و طول جدایش هر دو فاز میانی و داخلی نیز کاهش یافته و قطر سریعتر جدا شده است. همچنین فرکانس تولید قطره مرکب حدود ۲۲/۴۹ درصد افزایش یافته است که این موضوع می‌تواند برای تولید صنعتی مفید باشد. از لحاظ عملی افزایش زاویه تماس در سطح امکان پذیر است، نبوی و همکاران^[۸] در ستاپ آزمایشگاهی خود نوک لوله موئین را با استفاده از ماده اکتا-دسیل-تری-متوکسی-سیلان (octadecyltrimethoxysilane) آبریزتر کرده‌اند. در واقع با پوشش سطح توسط ترکیبات شیمیایی خاص می‌توان زاویه تماس را در سطوح را به مقدار دلخواه تنظیم نمود.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

این مطالعه عددی به بررسی مولفه‌ی تولید قطرات مرکب در یک دستگاه میکروسیال موئین شیشه‌ای سه فازی پرداخته است.

دلیل جدایش سختتر فاز میانی توسط فاز خارجی، طول جدایش قطره مرکب با افزایش دبی فاز میانی کاهش می‌یابد. در ضمن انتظار می‌رود با افزایش بیشتر این نسبت از ۰/۵ قطر قطره مرکب نیز افزایش یافته تا جایی که کاملاً دیواره داخلی را لمس می‌کند (slug). در شکل ۵ فرکانس تولید قطره مرکب با دایره زرد رنگ مشخص شده است و روند تقریباً ثابتی دارد یعنی با افزایش نسبت سرعت فاز میانی به فاز خارجی از ۰/۲۹۱ تا ۰/۵۰۰، نوساناتی با دامنه تغییرات کم دارد و میانگین فرکانس تولید قطره مرکب حدود ۱۳/۷۸ قطره بر ثانیه می‌باشد؛ قطر قطره مرکب با لوزی خاکستری رنگ مشخص شده است و با افزایش ۱۱/۸ درصدی همراه بوده و از مقدار حدود ۳۲۴ به ۳۶۲ میکرومتر رسیده است همچنین قطر هسته که با مثلث قرمز رنگ نشان داده شده است روندی کاهشی داشته و مقدار کاهش آن حدود ۷/۱ درصد می‌باشد و از ۱۷۸ میکرومتر به حدود ۱۶۵ میکرومتر می‌رسد؛ طول جدایش قطره مرکب کاهش شدید ۱۹/۷ درصدی داشته و از ۴۹۱ میکرومتر به حدود ۳۹۴ میکرومتر رسیده است. در شکل ۵ با مربع آبی رنگ مشخص شده و روند کاهشی آن قابل مشاهده است.



شکل ۵ کانتورهای فازی حل عددی برای نسبت سرعت فاز میانی به فاز خارجی‌های به ترتیب ۰/۲۹۱ و ۰/۳۳۳ و ۰/۴۲۵ و ۰/۵۰۰ و نمودار تغییرات فرکانس تولید قطره مرکب، قطر هسته، قطر قطره مرکب و طول جدایش قطره مرکب بر حسب مولفه نسبت سرعت فاز میانی به فاز خارجی نشان داده شده است. رنگ‌بندی کانتور فازی مشابه رنگ بندی تعریف شده در شکل ۲-الف می‌باشد.

۴-۳-۴- مولفه هندسی زاویه نوک نازل فاز داخلی

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده θ_n بیانگر زاویه نوک نازل فاز داخلی است. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش این زاویه به بیش از ۴۵ درجه، رژیم جریان از حالت جت به قطره‌ای تبدیل می‌شود. در واقع، با افزایش زاویه θ_n ، فاز میانی بیشتر به صورت عمودی با فاز داخلی برخورد کرده و وارد ارفیس می‌شود در واقع میدان جریان در مدل‌های مختلف به گونه‌ای است که سبب افزایش نیروی برشی شده و قطر سریعتر تشکیل می‌شود. همانطور که در نمودار شکل ۶ مشاهده می‌شود با افزایش θ_n از ۲۵ تا ۶۵ درجه، قطر قطره مرکب ۲۷/۶ درصد کاهش یافته و از ۴۶۴ به ۳۳۶ میکرومتر رسیده است و فرکانس تولید آن نیز ۱۴۰ درصد افزایش یافته و از ۶/۵ به ۱۵/۶ هرتز رسیده است. همچنین به دلیل سریعتر تشکیل شدن قطره مرکب، طول جدایش آن نیز

مرکب و هسته آن کاهش، فرکانس تولید قطرات مرکب افزایش و طول جدایش کاهش یافته است.

با توجه به نتایج امیدبخش این مطالعه، می‌توان در مطالعات آینده به بررسی تشکیل قطرات ماهواره‌ای (satellite droplets) پرداخت. همچنین با دستگاه ارائه شده در این مقاله می‌توان قطرات مرکب مغناطیسی تولید نمود و از آن در دارو رسانی (drug delivery) استفاده کرد. بعلاوه در حین تشکیل قطره می‌توان تشکیل آن را کنترل نمود.

تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: این مقاله هیچگونه تعارض منافع با سازمان یا اشخاص حقیقی و حقوقی ندارد.

منابع مالی/حمایت‌ها: هزینه‌های این پژوهش از بودجه شخصی و پژوهانه دانشگاه تامین شده است.

فهرست علائم

F	فرکانس تولید قطره (1/s)
f'	کسر حجمی
U	سرعت برحسب (m/s)
P	فشار بر حسب (Pa)
We	عدد وبر
Ca	عدد مویبگی
D	قطر برحسب میکرومتر
L	بدون پایین نویسن نشان دهنده فاصله نوک نازل فاز داخل تا تیوب جمع آوری بر حسب میکرومتر
L	به همراه پایین‌نویس به معنای طول جدایش قطره است بر حسب میکرومتر
t	ضخامت پوسته
علائم یونانی	
σ	تنش بین سطحی (N/m)
κ	انحنای محلی بین سطحی (1/m)
μ	ویسکوزیته دینامیکی (kg/m s)
ρ	چگالی (kg/m ³)
θ	زاویه شیب ابتدای تیوب یا نازل
زیرنویس‌ها	
i	فاز داخلی یا هسته
m	فاز میانی (در مولفه فرکانس به معنای قطره مرکب)
r	فاز خارجی
b	حجمی
n	نازل فاز داخلی
w	دیواره لوله خارجی
o	اریفیس یا تیوب جمع آوری

هندسه مدل به صورت تقارن محوری طراحی شده و شبکه‌بندی مناسبی روی هندسه انجام گرفته است. معادلات پیوستگی، تکانه و سه فازی حل شده است و از روش حجم سیال برای حل معادلات **جدول ۳** مقایسه نتایج زاویه تماس بین فازهای میانی و خارجی. مولفه‌ها شامل قطر قطره مرکب Dm و قطر هسته Di و طول جدایش قطره مرکب و هسته به ترتیب Li و Lm و فرکانس تولید قطره مرکب Fm و ضخامت پوسته قطره مرکب t می‌باشند.

مدل	زاویه تماس	Dm	Di	Li	Lm	Fm	t
مبنا	۹۰	۳۵۸/۵	۱۷۲/۵	۲۴۰	۳۸۴	۱۲/۲۵	۹۳
آبگریزتر	۱۲۰	۳۳۷/۱۲	۱۶۱/۵۸	۲۱۷	۳۴۰	۱۵	۸۷/۷۷
درصد تغییرات	۳۳/۳۳	-۵/۹۶	-۶/۳۳	-۹/۵۸	-۱۱/۴۶	۲۲/۴۹	-۵/۶۲

سه فازی استفاده شده است. مولفه‌هایی که در این مطالعه بررسی شده‌اند به صورت بی بعد در آمده‌اند و شامل نسبت سرعت فاز داخلی به فاز خارجی، نسبت سرعت فاز میانی به فاز خارجی، نسبت قطر نازل فاز داخل به قطر لوله خارجی، زاویه نازل فاز داخلی و زاویه تماس میان فازهای میانی و خارجی در دیواره لوله خارجی می‌شوند. در هر حالت با ثابت نگه‌داشتن سایر مولفه‌ها تاثیر آن مولفه بر قطر هسته، قطر قطره مرکب، فرکانس تولید قطره مرکب و طول جدایش قطره مرکب بررسی شده است. این مدل به طور موفقیت‌آمیزی تولید قطرات مرکب را در دو جریان جت و قطره‌ای شبیه‌سازی کرد. از نتایج این مطالعه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- در مولفه نسبت قطر نازل فاز داخلی به قطر لوله خارجی، قطر قطره مرکب تابعی از قطر نازل بوده و با افزایش این نسبت قطر هسته افزایش یافته است در حالی که قطر قطره مرکب، فرکانس تولید و طول جدایش آن ثابت می‌ماند.
- در مولفه نسبت سرعت فاز داخلی به خارجی، با افزایش آن قطر هسته افزایش پیدا کرده است و این مولفه بر اندازه قطر قطره مرکب، طول جدایش و فرکانس تولید آن اثر نداشته است.
- در مولفه نسبت سرعت فاز میانی به سرعت فاز خارجی، با افزایش آن قطر هسته کاهش یافته همچنین قطر قطره مرکب و طول جدایش آن افزایش یافته است. در حالیکه فرکانس تولید ثابت است.
- در مولفه زاویه نازل فاز داخلی، مشاهده می‌شود که با افزایش این زاویه به بیش از ۴۵ درجه، رژیم جریان از حالت جت به قطره‌ای تبدیل می‌شود و فرکانس تولید قطره مرکب افزایش، طول جدایش کاهش می‌یابد.
- در مولفه زاویه تماس بین فازهای میانی و خارجی در دیواره لوله خارجی، با آبگریزتر کردن سطح، قطر قطره

- 15- Hirt CW, Nichols BD. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of computational physics*. 1981 Jan 1;39(1):201-25.
- 16- Brackbill JU, Kothe DB, Zemach C. A continuum method for modeling surface tension. *Journal of computational physics*. 1992 Jun 1;100(2):335-54.

منابع

- 1- Utada AS, Lorenceau E, Link DR, Kaplan PD, Stone HA, Weitz DA. Monodisperse double emulsions generated from a microcapillary device. *Science*. 2005 Apr 22;308(5721):537-41.
- 2- Bijarchi M, Rahimian MH. Numerical Simulation of droplet collision in the two phase flow using Lattice Boltzmann Method. *Modares Mechanical Engineering*. 2014 May 10;14(2):85-96.
- 3- Cramer C. Continuous drop formation at a capillary tip and drop deformation in a flow channel. ETH Zurich; 2004.
- 4- Zhao CX, Middelberg AP. Two-phase microfluidic flows. *Chemical Engineering Science*. 2011 Apr 1;66(7):1394-411.
- 5- Christopher GF, Anna SL. Microfluidic methods for generating continuous droplet streams. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2007 Sep 21;40(19):R319.
- 6- Xu Q, Nakajima M. The generation of highly monodisperse droplets through the breakup of hydrodynamically focused microthread in a microfluidic device. *Applied Physics Letters*. 2004 Oct 25;85(17):3726-8.
- 7- Chan HF, Zhang Y, Ho YP, Chiu YL, Jung Y, Leong KW. Rapid formation of multicellular spheroids in double-emulsion droplets with controllable microenvironment. *Scientific reports*. 2013 Dec 10;3(1):3462.
- 8- Nabavi SA, Vladisavljević GT, Gu S, Ekanem EE. Double emulsion production in glass capillary microfluidic device: Parametric investigation of droplet generation behaviour. *Chemical Engineering Science*. 2015 Jul 7;130:183-96.
- 9- Zhang T, Zou X, Xu L, Pan D, Huang W. Numerical investigation of fluid property effects on formation dynamics of millimeter-scale compound droplets in a co-flowing device. *Chemical Engineering Science*. 2021 Jan 16;229:116156.
- 10- Yu W, Li B, Liu X, Chen Y. Hydrodynamics of triple emulsion droplet generation in a flow-focusing microfluidic device. *Chemical Engineering Science*. 2021 Nov 2;243:116648.
- 11- Huang L, Wu K, Cai S, Yu H, Liu D, Yuan W, Chen X, Ji H. Understanding the microfluidic generation of double emulsion droplets with alginate shell. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2023 Feb 1;222:113114.
- 12- Yousofvand R, Ghasemi K. A novel microfluidic device for double emulsion formation: The effects of design parameters on droplet production performance. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2022 Feb 20;635:128059.
- 13- Raynaldo K, Irwansyah R. Numerical Investigation of Double Emulsion Droplets using Modified Flow Focusing Microfluidic Device for Drug Delivery. *CFD Letters*. 2022 Jul 17;14(7):31-41.
- 14- Yarmush ML, Patankar DB, Yarmush DM. An analysis of transport resistances in the operation of BIAcore™; implications for kinetic studies of biospecific interactions. *Molecular Immunology*. 1996 Oct 1;33(15):1203-14.