



On the Experimental and Numerical Droplet Generation in the Ordinary and Modified Micro channels with Oval Obstacle

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Moghanlou F.S.^{*1} PhD,
Ghazanfari Jajin E.¹ MSc,
Vajdy Hokmabad M.¹ PhD,
Jafargholinejad Sh.² PhD

How to cite this article

Moghanlou F.S, Ghazanfari Jajin E, Vajdy Hokmabad M, Jafargholinejad Sh. On the Experimental and Numerical Droplet Generation in the Ordinary and Modified Micro channels with Oval Obstacle. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(9):2223-2234.

ABSTRACT

The study of micro-scale fluid behavior is known as microfluidics, which has received much attention in many scientific fields. In the current research, the droplet generation in the micro channel has been studied numerically and experimentally. Two micro channels were fabricated by soft lithography method and the results of generated droplets were compared. The process of droplet formation was investigated using two fluids including water (dispersed fluid phase), and oil (continuous fluid phase) at different flow ratios. The images of the droplet formation and crossing steps in the micro channels were analyzed using image processing. The results showed that by increasing the ratio of dispersed to continuous flow, the size of droplets was increased, the droplet formation distance (the distance of the produced droplets) was increased, and the frequency of droplets generation was decreased. Also, the proposed new geometry leads to the production of smaller droplets with higher production frequencies. In the basic geometry, the droplet diameter was observed to be between 117 and 700 micrometers while in the proposed geometry, the diameter of droplets is between 46 and 466 micrometers. In the proposed geometry, the size of the produced droplets decreases, and the production frequency increases.

Keywords Micro channel; Droplet Generation; Image Processing; Surface Tension

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran

²Department of Mechanical Engineering, Ardabil Branch, Islamic Azad University, Ardabil, Iran

*Correspondence

Address: Faculty of Engineering, Mohaghegh Ardabili University, Daneshgah Street, Ardabil, Iran.
Postal Code: 5619911367.
Phone: +98 (45) 31505728
Fax: -
f_moghanlou@uma.ac.ir

Article History

Received: February 15, 2020

Accepted: June 22, 2020

ePublished: September 20, 2020

CITATION LINKS

[1] Heat transfer and pressure drop in a ... [2] Double emulsion droplets as microreactors for ... [3] Nanoscale materials development-a food ... [4] Experimental study on ... [5] Microfluidic fabrication of microparticles for ... [6] Formation of dispersions using flow focusing ... [7] Advances in droplet-based microfluidic ... [8] Oscillating dispersed-phase co-flow ... [9] The atomization and burning of liquid fuel ... [10] Microfluidic rapid fabrication of tunable ... [11] Fuel spray burning regime and initial ... [12] Numerical studies of shear thinning droplet ... [13] Studies of droplets formation regime ... [14] Stability of parallel flows in a microchannel ... [15] Numerical simulation of immiscible liquid ... [16] The flow of suspensions in channels ... [17] Numerical investigation of emulsion process ... [18] The effect of oil viscosity on droplet generation ... [19] Effect of device geometry on droplet size ... [20] Numerical and experimental investigation ... [21] Numerical and experimental study of ... [22] Emulsion droplet formation in coflowing ... [23] Bengt sunden, effects of a dynamic injection flow ... [24] Droplet breakup at the entrance to a bypass channel ... [25] CO₂ laser fabrication of PMMA microfluidic double ... [26] Microfluidic device for high-throughput ... [27] Geometry effects of axisymmetric flow-focusing ... [28] Effects of wall velocity slip on droplet ... [29] Numerical study of droplet formation in the ... [30] A coupled level-set and volume-of-fluid method ... [31] A Comsol multiphysics® model of droplet formation ... [32] Lattice Boltzmann method for non-Newtonian ... [33] Formation of droplets and mixing in multiphase ... [34] Topology optimization of regions of Darcy and ... [35] Three-dimensional numerical simulation of droplet ... [36] Dynamics of double emulsion break-up in three ... [37] Hydrodynamic directional control of liquid metal ... [38] Micro-droplet formation with non-Newtonian ... [39] Numerical investigation effect of geometry in micro ...

بررسی تجربی و عددی تولید قطرات ریز در یک میکروکانال معمولی و اصلاح شده با موافق بیضی شکل

فرهاد صادق مغانلو* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

المیرا غضنفری جبین MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

محمد وجدی حکم آباد PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

شاپور جعفرقلی-نژاد PhD

گروه مهندسی مکانیک، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران

چکیده

مطالعه رفتار سیال در مقیاس میکرو، با نام میکروفلوئیدیک شناخته می‌شود که در بسیاری از زمینه‌های علمی مورد توجه قرار گرفته است. در تحقیق حاضر، تولید قطره در یک میکروکانال به صورت عددی و تجربی بررسی شده است. دو میکروکانال به روش لیتوگرافی نرم ساخته شدند و نتایج مربوط به تولید قطره در آنها مقایسه شد. با استفاده از دو سیال غیرقابل امتزاج آب (سیال پراکنده) و روغن (سیال پیوسته) و در نسبت‌های مختلف جریان، فرآیند تشکیل قطره بررسی شد. تصاویر حاصل از مراحل تشکیل و عبور قطرات در میکروکانال‌ها با استفاده از روش پردازش تصویر تحلیل شد. نتایج حاصل نشان دادند که با افزایش نسبت دبی سیال پراکنده به سیال پیوسته، ضمن افزایش سایز قطرات، فاصله تشکیل قطرات (فاصله بین قطرات تولید شده) افزایش یافته و فرکانس تولید قطرات کاهش می‌یابد. همچنین هندسه جدید پیشنهاد شده منجر به تولید قطراتی ریزتر با فرکانس تولید بیشتر می‌شود. با توجه به تغییرات در دبی جریان سیالات مورد بررسی، در هندسه پایه قطر قطرات بین ۱۱۷ تا ۷۰۰ میکرومتر و در هندسه پیشنهادی بین ۴۶ تا ۴۶۶ میکرومتر است. در هندسه پیشنهاد شده علاوه بر کاهش در اندازه قطرات تولیدی فرکانس تولید نیز افزایش می‌یابد.

کلیدواژه: میکروکانال، تولید قطره، پردازش تصویر، کشش سطحی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۰۲

*نویسنده مسئول: f_moghanlou@uma.ac.ir

مقدمه

مطالعه رفتار سیال در مقیاس میکرو، با نام میکروفلوئیدیک شناخته می‌شود که در بسیاری از زمینه‌های علمی مورد توجه قرار گرفته است. اصولاً مینیاتوری‌سازی تجهیزات تولید شده سبب بهبود در فرآیندهای انتقال حرارت، انتقال جرم و انجام واکنش‌های شیمیایی می‌شود^[1]. یکی از مباحث مهم در حوزه میکروفلوئیدیک تولید قطراتی با اندازه و فرکانس‌های مختلف است. تولید ریزقطرات در حوزه‌های مختلفی از جمله صنایع شیمیایی، زیستی، صنایع غذایی^[2] و تلفیق سلولی^[3] کاربرد دارد. هدف اصلی از تشکیل ریزقطرات در کانال‌های مینیاتوری که در

شرایط عادی و به سهولت قابل تولید نیستند؛ رسیدن به قطراتی با اندازه‌های کوچک و کنترل شده است^[4].

یکی از تحقیقات اصلی و پایه در حوزه میکروفلوئیدیک، مطالعه به منظور ایجاد یک آزمایشگاه روی تراشه جهت یکپارچه‌سازی همه فرآیندهای مورد نیاز برای تکمیل روبه‌های پزشکی، شیمیایی و زیستی بوده است^[5]. ارایه فناوری قالب‌ریزی میکروکانال‌های پلیمری مانند PDMS (Poly Dimethyl Siloxane) سبب کاهش هزینه و زمان تولید این دستگاه‌ها شد. از این‌رو، توجه ویژه پژوهشگران به تحقیق در این زمینه را به خود جلب کرد. ورود میکروفلوئیدیک به دستگاه‌های PCR (Polymerase Chain Reaction)، در اوایل دهه نود میلادی، باعث شد تا Ta و همکاران^[6] با استفاده از یک هندسه متقاطع به تولید فرآیند امولسیون پرداخته و محدوده‌ای از رفتار شکل‌گیری قطره را در میکروکانال‌های با مقطع مستطیل را ارایه دادند و اثر نسبت جریان دو سیال را بر روی روند تشکیل قطره مورد بررسی قرار دادند. برای تولید ریزقطرات در ابعاد میکرو به تجهیزات و امکانات کمتری نسبت به حالت نانو نیازمند است و در موارد متعدد صنعتی، دارویی و پزشکی این ریزقطرات می‌توانند به‌جای نانوقطرات استفاده شوند.

از مهم‌ترین کارکردهای تولید ریزقطرات در صنعت می‌توان به جریان نفت و آب در خطوط انتقال سوخت، تزریق سوخت مایع در محیط داغ جهت اشتعال در موتورهای احتراق، استخراج مایع-مایع، خنک‌کاری سطوح و پاشش رنگ صنعتی اشاره کرد که بیشتر آنها دارای رفتار غیرنیوتنی هستند و امکان تولید ریزقطرات در بستر آنها فراهم است^[7].

از دیگر کاربردهای صنعتی تولید ریزقطرات می‌توان به بحث خنک‌کاری با استفاده از جت اسپری در سطوح داغ اشاره کرد که در آنها قطرات کوچک با سطح برخورد می‌کنند و با جذب گرمای مورد نیاز برای تبخیر، آن را خنک می‌نمایند^[8]. با معرفی نسل جدید سوخت‌ها، تکنیک‌های پاشش و ریزکردن مایعات که شامل تبدیل سوخت به ریزقطرات است، کاربرد گسترده‌ای در احتراق سوخت‌ها پیدا کرده است^[9]. در حوزه‌های کاربردی، میکروسفرهای پلی‌وینیل‌الکل (Polyvinyl Alcohol; PVA) به‌طور گسترده‌ای برای تحویل دارو، آمبولیزاسیون (رگ‌بندی برای درمان بیماری‌ها) مورد هدف قرار گرفته‌اند. با این حال، ساخت سریع و آسان ریزقطرات PVA با اندازه یکنواخت و ساختار داخلی و کروی یک چالش جدید در دنیای سیالات است^[10]. از این‌رو، تولید قطرات با ابعاد و فرکانس‌های دلخواه کاربرد بسیار گسترده‌ای در صنایع مختلف دارد. در ادامه به معرفی چند پژوهش انجام شده در حوزه تولید قطرات پرداخته می‌شود.

بسیاری از پژوهشگران روش‌های مختلف تجربی و عددی را برای تولید قطرات در مواردی چون پاشش سوخت مورد مطالعه قرار داده و استفاده از روش‌های مختلف فیزیکی برای تولید قطره را بررسی نموده‌اند^[11, 12]. مطالعه درباره تشکیل قطره در میکروکانال

میکروکانال به‌صورت عددی و تجربی پرداخته شد و نتایج نشان دادند که فشار هیدرودینامیکی بر رژیم شکست جریان موثر بوده است [24]. ناصر و همکاران [25] با ارایه یک مدل جدید از میکروکانال با اتصال دوگانه ضمن اینکه توانستند قطراتی با اندازه کوچک‌تر تولید نمایند، فرکانس تولید را نیز افزایش دادند.

گلین و همکاران [26] یک سیستم میکروفلوئیدی برای تولید قطرات یکپارچه با حجم بالا را ارایه کردند. قطره‌های روغن با استفاده از دو سیستم تک و چهارنازله در سیال پیوسته آب تولید شد و اندازه قطرات و فرکانس تولید آنها به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. در سیستم چهارنازله، تاثیر سرعت جریان در اندازه قطرات تولیدشده مطالعه شد که نشان می‌داد فشار و رژیم جریان بیشترین تاثیر بر تولید قطره را دارد. در این سیستم، با حفظ یکنواختی قطر قطرات، توان تولید چهار برابری مشاهده شد.

در حوزه مهندسی زیستی نیز، میکروکپسول سلولی یک روش امیدوارکننده برای محافظت از سلول‌های زنده در زیست پزشکی است. در مطالعه‌ای توسط نورانی‌دوست و کومار [27] با استفاده از یک روش ردیابی جلوی عددی برای سه فاز سیال، اثرات هندسه کانون جریان را در اندازه قطرات، فراوانی تولید قطرات و تعداد سلول در هر قطره بررسی کرده و در نتایج خود تاثیر شعاع دیافراگم، طول دیافراگم و فاصله نازل تا هوا بر جریان شکل‌گیری قطرات را توجیه نمودند. همچنین مشخص شده است که مسافت‌های کوتاه‌تر بین نازل و دهانه باعث تولید کنترل‌شده و یکنواخت قطرات می‌شود. آنها گزارش کردند که با افزایش شعاع ورودی، اندازه قطره و تعداد آن کاهش و تعداد سلول‌های موجود در قطره افزایش یافته است. لی و همکاران [28]، تاثیر طول لغزش هر دوفاز پیوسته و پراکنده را (که خود بر روی میزان تنش برشی موثر است)، بر شکل‌گیری قطرات در معیارهای میکروسایالی با استفاده از حجمی از مایع مورد بررسی قرار دادند. نتایج کار این تیم تحقیقاتی نشان داد که در رژیم قطره‌ای، اندازه قطره عمدتاً تحت تاثیر طول لغزش فاز پیوسته است و با آن افزایش می‌یابد. در رژیم خزشی، اندازه قطرات با طول لغزش هر دو نوع سیال کاهش یافت و میزان کشیدگی می‌تواند موضوع مهمی باشد. با مطالعه شکل‌گیری قطرات توسط لی و همکاران [29]، در انواع مختلف اتصالات تی‌شکل، با ایجاد تغییراتی در میزان گرانشی سیالات عامل، کشش سطحی و مرطوب‌بودن دیواره‌ها، مشخص شد که عامل غالب هندسی موثر بر تشکیل قطرات ارتفاع مانع (نه عرض آن) است.

در این بخش تنها به گوشه‌ای از کارهای انجام‌شده در حوزه تولید ریزقطرات پرداخته شد. بررسی کارهای انجام‌شده حاکی از نیاز روزافزون برای معرفی روش‌های مختلف فعال و غیرفعال برای تولید ریزقطرات است. تولید قطره عمدتاً در میکروکانال‌های مینیاتوری تی‌شکل و وی‌شکل صورت می‌گیرد. این نوع از هندسه‌ها به‌طور متداول در هر دو روش تولید قطره در روش تجربی و عددی کاربرد دارند. روش‌های فعال معمولاً هزینه‌بر بوده

با هدف تولید قطرات آب در روغن نشان داده است که تشکیل قطره به تنش برشی و کشش سطحی بین دو جریان سیال وابسته است [13]. در یک کار تجربی نتایج حاصل از تولید قطره در یک میکروکانال تی‌شکل توسط گیولیت و کولین [14] نشان داد که هندسه، دبی جریان و خواص سیال از عوامل مهم در روند تولید قطره هستند. پیش‌بینی پنج الگوی مختلف در مدل‌سازی جریان دو سیال مخلوط‌نشده آب و روغن نیز توسط یانگ و همکاران [15] انجام شد. بررسی تاثیر فشار بر روی پارامترهای هیدرودینامیکی فازهای جریان به‌صورت تجربی توسط ژائو و پوزریکییدیس [16] انجام گرفت. آنها هفت نوع الگوی جریان در کانال‌های تی‌شکل را مشاهده نمودند و مکانیزم تشکیل قطره در هر نوع از جریان را مورد ارزیابی قرار دادند. علیزاده و همکاران [17] به بررسی عددی فرآیند امولسیون در میکروکانال با روش بولتزن پرداخته و نشان دادند که اعداد بی‌بعد در تعیین خواص جریان سیال رژیم‌های مختلف موثر بوده و مدل تابع مشخصه از دقت بالایی برای شبیه‌سازی جریان برخوردار است. یائو و همکاران [18] به بررسی تاثیر خواص روغن بر روند تولید قطره در میکروکانال پرداختند. آنها در نتایج خود گزارش کردند که با افزایش میزان لزجت در روغن‌های مختلف تحت شرایط یکسان آزمایشگاهی، اندازه قطرات تولیدشده و حجم تولید قطرات کاهش می‌یابد. بنابراین لازم است این موضوع در انتخاب روغن مناسب برای سیال پیوسته همواره مد نظر قرار گیرد. رحیمی و همکاران [19] به‌صورت عددی و تجربی تاثیر هندسه را در شکل‌گیری قطرات در یک سیستم تولید قطره هم‌محور جریان متمرکز (Co-axial Flow Focusing) بررسی کردند و در نتایج خود گزارش کردند که سایز قطرات وابسته به دبی جریان پیوسته است. علاوه‌بر این فاصله نازل و طول اریفیس نیز موثر بوده و این روش برای تولید قطرات با دقت بالا مناسب‌تر است.

لان و همکاران [20]، مراحل تولید قطره با توزیع فشار و میدان سرعت در دو رژیم چکه‌کردن و جتی (Jetting) را بررسی کرده و تاثیر گرانشی سیالات و سرعت را در اندازه قطرات بر پایه روش Level Set نشان دادند.

دنگ و همکاران [21] تولید قطرات آب در روغن را با روش حجم سیال تحلیل کرده و اثرات نرخ جریان، گرانشی و کشش سطحی را در تولید قطرات بررسی نمودند. چن و همکاران [22] با بررسی مکانیزم شکست قطره برای هر دو رژیم چکه‌کردن و جتی نشان دادند که شکل قطرات وابسته به اعداد بی‌بعد موینگی و وبر است.

یون و همکاران [23]، تاثیر نرخ جریان سیال ورودی به یک میکروکانال تی‌شکل را برای تولید ریزقطرات با استفاده از آب و بوتانول مورد تحلیل قرار دادند؛ با افزایش نرخ تزریق جریان سیال، اندازه قطر و فاصله بین قطرات تولیدشده کاهش یافت. در پژوهشی با استفاده از دو روغن سیلیکون و پارافین به‌عنوان فاز پیوسته و آب به‌عنوان فاز پراکنده، به بررسی تولید قطره در

مناسب، قطر و فرکانس قطرات تشکیل شده بررسی شده است. محل قرارگیری مانع و نوع هندسه آن بسیار مهم است زیرا مستقیماً بر روی قطر و فرکانس قطره تولیدی اثر می‌گذارد. بدین منظور قبل از ساخت نمونه تجربی، موانعی با شکل‌های مختلف و در محل‌های قرارگیری متفاوت طراحی و فرآیند تشکیل قطره شبیه‌سازی شد. با بررسی نتایج به دست آمده مانع بیضوی مطابق شکل ۲ معرفی شد. جزییات مربوط به هندسه‌های ساخته شده و نیز محل جریان‌های ورودی و خروجی در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده و ابعاد مربوطه در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

جدول ۱) ابعاد هندسه پایه

پارامتر	مقدار (میکرومتر)
D_1	۵۰۰
D_2	۳۰۰
D_3	۷۰۰
L_1	۲۰۰۰
L_2	۵۰۰
L_3	۲۰۰۰
L_4	۳۴۰۰

جدول ۲) ابعاد هندسه نوین پیشنهاد شده

پارامتر	مقدار (میکرومتر)
D_1	۵۰۰
D_2	۳۰۰
D_3	۱۸۰
D_4	۷۰۰
L_1	۲۰۰۰
L_2	۵۰۰
L_3	۲۰۰۰
L_4	۳۴۰۰
L_5	۶۴۰

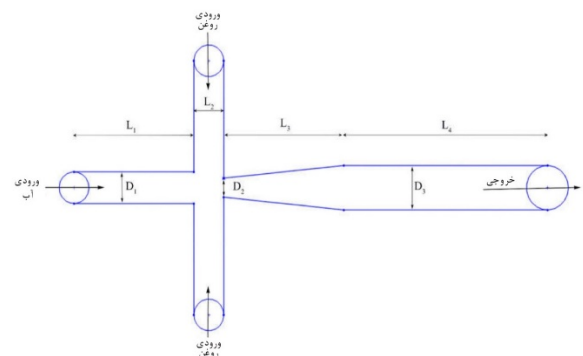
نمونه ساخته شده از هندسه‌های اشاره شده در شکل‌های ۱ و ۲ که به روش لیتوگرافی نرم ساخته شده‌اند، در شکل ۳ آورده شده است. شکل ۳- الف هندسه پایه را زیر میکروسکوپ نشان می‌دهد که مبنای کار محققان پیشین بوده است و شکل ۳- ب، هندسه کار حاضر است.

ابتدا بنا شد تا با استفاده از یک روش غیرفعال ابعاد قطره تولید شده در هندسه پایه کوچک‌تر شود، بنابراین سهم برش در هندسه معرفی شده افزایش یافت. از این‌رو، به بررسی ایجاد مانع در مسیر شکل‌گیری قطره پرداخته شد. محل قرارگیری مانع بسیار مهم است زیرا مانع باید در محل شکل‌گیری قطره قرار گیرد تا بتواند اثر خود را به‌طور مناسب اعمال کند. لذا در گام نخست با شبیه‌سازی عددی، محل مناسب قرارگیری مانع به دست آمده و سپس نسبت به ساخت نمونه تجربی اقدام شد. در این قسمت ابتدا به معرفی معادلات حاکم و جزییات حل عددی پرداخته می‌شود سپس به معرفی فرآیند تجربی پرداخته خواهد شد.

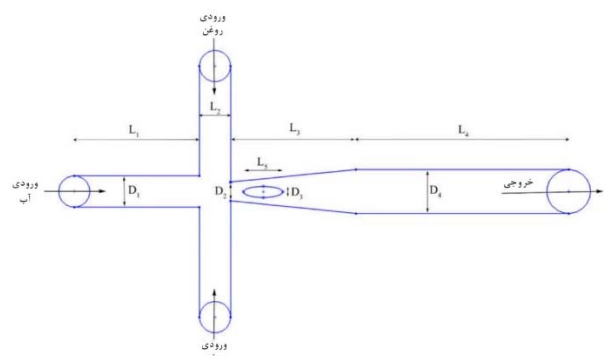
و از طرف پیچیدگی‌های مربوط به ساخت، استفاده از آنها را بامشکلاتی همراه می‌کند، پس استفاده از روش‌های غیرفعال مورد توجه زیادی قرار گرفته است. از طرفی ساخت هندسه دلخواه با ابعاد مورد نظر در ابعاد میکرو، مشکلات خاص خود را دارد. از این‌رو، سعی بر این است تا با ایجاد ساده‌ترین هندسه ممکن حداکثر کارایی به دست آید. کار حاضر بنا دارد تا با معرفی یک هندسه ساده در ابعاد میکرومتری، قطر قطرات تولیدی را کاهش داده و از طرفی فرکانس تولید را نیز افزایش دهد. بدین منظور ابتدا با شبیه‌سازی عددی فرآیند تولید قطره در نرم‌افزار کامسول، هندسه مورد نظر انتخاب شد، سپس نمونه‌ای از طرح مورد نظر به روش لیتوگرافی نرم ساخته و به‌صورت تجربی روند تولید قطره بررسی شد.

روش حل

به‌منظور تولید قطراتی با ابعاد ریزتر هندسه‌ای جدید با ابعاد میکرومتر طراحی و به روش لیتوگرافی نرم ساخته شد و نتایج حاصل از تشکیل قطره در آن با میکروکانال پایه مقایسه شد. جزییات مربوط به هندسه پایه و میکروکانال طراحی شده، در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱) شماتیک هندسه پایه



شکل ۲) شماتیک هندسه پیشنهاد شده

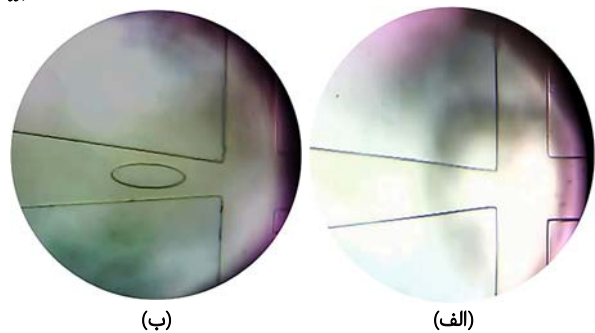
هندسه پایه یک میکروکانال تی‌شکل است که از دو ورودی بالا و پایین آن سیال فاز پیوسته و از یک ورودی دیگر سیال فاز گسسته وارد می‌شود. در طرح جدید با قراردادن یک مانع در یک مکان

کانال و شرایط عدم نفوذ جریان در دیواره‌های میکروکانال استفاده شده است [31]. در دیواره‌ها از شرط مرزی عدم لغزش سرعت استفاده شده و میزان زاویه ترشوندگی در دیواره‌ها ۲۵ درجه فرض شده است. سیال در خروجی به اتمسفر محیطی تخلیه می‌شود، از این‌رو، فشار نسبی در خروجی صفر در نظر گرفته شده است [6]. به دلیل قرارگیری کانال به صورت افقی، از اثرات نیروی گرانش صرف نظر شده است [32]. در ورودی کانال شرط مرزی سرعت با توجه به تنظیمات پمپ سرنگی اعمال شده است. در مرحله اعتبارسنجی کار عددی، سرعت ورودی سیال پراکنده و پیوسته به ترتیب در ورودی مجرای میکروکانال ۰/۰۹ و ۰/۰۶ متر بر ثانیه است.

معادلات مربوط به قانون بقای جرم (پیوستگی) با روش گالرکین گسسته‌سازی شده است. از آنجا که معادله مومنتوم ذاتاً غیرخطی است، استفاده از روش گالرکین ساده ممکن است منجر به واگرایی حل مخصوصاً در اعداد رینولدز بالاتر شود. علاوه بر این به دلیل استفاده از دوفاز متفاوت جریان، خطر واگرایی جریان بیشتر است پس برای گسسته‌سازی معادلات مومنتوم از روش حداقل مربعات گالرکین استفاده شده است.

در تولید ریزقطرات اعداد بی بعد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. در میکروکانال‌ها اثرات نیروی گرانش و اینرسی در مقایسه با نیروهای کشش سطحی و نیروی گرانروی ناچیز هستند، بنابراین اعداد بی بعد باند و رینولدز تأثیر چندانی بر روی فرآیند تشکیل قطره ندارند و می‌توان از آنها صرف نظر نمود [33]. اما اعداد بی بعد موینگی (نسبت نیروی گرانروی به نیروی کشش سطحی)، وبر (نسبت نیروی اینرسی به نیروی کشش سطحی) به طور ویژه تأثیرات قابل ملاحظه‌ای در روند تشکیل ریزقطرات در میکروکانال‌ها دارند. علاوه بر این نسبت لزجت سیال پراکنده به سیال پیوسته، نسبت چگالی سیال پراکنده به سیال پیوسته نیز بر روند تولید ریزقطرات موثر هستند.

نوع و تعداد شبکه‌بندی یک هندسه از اهمیت زیادی برخوردار است، زیرا تعداد مش‌ها، ابعاد شبکه‌بندی و فاصله اولین سلول از دیواره بر روی نتیجه نهایی روش عددی موثر است و با افزایش تعداد مش‌ها، زمان حل عددی افزایش یافته و هزینه محاسباتی بالا می‌رود. از سویی دیگر بالارفتن تعداد مش‌ها نیز گاهی منجر به واگرایی در حل مساله می‌شود. بنابراین ضرورت انتخاب نوع و اندازه شبکه‌بندی مهم است. برای هندسه‌ها از شبکه‌بندی بالمان مثلثی بی‌سازمان استفاده شده است (شکل ۴). باتوجه به روند تشکیل قطره جریان سیال و پارامترهای هندسی همراه با مش تغییر شکل پذیر تعریف شده است. در این روش در هر گام زمانی که قطره تغییر شکل و موقعیت می‌دهد، حل متوقف شده، مش جدید ایجاد می‌شود، سپس در آن مرحله معادلات حاکم با توجه به مش جدید حل شده و در گام زمانی بعدی دوباره مش جدید ایجاد خواهد شد. این فرآیند تا زمان همگرایی کامل حل ادامه خواهد یافت.



شکل ۳) میکروکانال‌های ساخته شده به روش لیتوگرافی نرم

از آنجا که مایعات مورد استفاده در ابعاد مورد نظر شرط پیوستگی خود را از دست نمی‌دهند به راحتی می‌توان از معادلات قدیمی بقای جرم و ناویر-استوکس استفاده نمود [17]. در هندسه و مقیاس ارایه شده معادله ساده شده بقای جرم و مومنتوم برای هر دوفاز سیال تراکم‌ناپذیر پایا و در حالت هم‌دما شامل معادلات ۱ و ۲ می‌شود:

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

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = -\nabla P + \nabla \cdot \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \quad (2)$$

که در آن $\mathbf{u}$ سرعت، P فشار، ρ چگالی و μ ضریب گرانروی دینامیکی سیالات است. از آنجا که فرآیند تشکیل قطره در بستر یک سیال دیگر از نوع فرآیند دوفازی است، لازم است که معادله‌ای نیز برای نشان دادن اثرات متقابل دوفاز و نیز نقش فصل مشترک بین دو سیال حل شود. از معادله Level set برای تحلیل فصل مشترک دوفاز مجزا استفاده شد [30] که به قرار زیر است:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot \nabla \phi = \gamma \nabla \cdot (\epsilon_{ls} \nabla \phi - \phi(1 - \phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|}) \quad (3)$$

$$n_r = \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \quad (4)$$

$$K = \nabla \cdot n_r \quad (5)$$

در این روابط ϕ تابع توزیع مشخصه (مرز مشترک دو سیال پراکنده و پیوسته)، γ و ϵ_{ls} پارامترهای تثبیت‌کننده عددی هستند که γ نشان‌دهنده پارامتر مقداردی اولیه مجدد و پارامتر دوم تعیین‌کننده ضخامت سطح مشترک دو سیال است که ماکزیمم اندازه شبکه در زیر دامنه در مجاور سطح مشترک فرض می‌شود. k منحنی محلی و n_r بردار نرمال است [17]. معادله ۳ با معادلات حاکم که شامل معادله مومنتوم و بقای جرم است، کوپل می‌شود. بردار نرمال سطح مشترک و انحنا سطح مشترک دو کمیتی هستند که برای مدل‌سازی کشش سطحی در شبیه‌سازی جریان دوفازی مورد نیاز است. نیروی کشش سطحی اعمال شده بر روی سطح مشترک بین دوفاز توسط معادله زیر محاسبه می‌شود.

$$F_{st} = \sigma \delta_{sm} K n_r \quad (6)$$

که در این رابطه نشان‌دهنده σ کشش سطحی و δ_{sm} تابع دلتای دیراک نرم متمرکز شده در سطح مشترک بین دو سیال بوده و توسط معادله زیر برآورد می‌شود.

$$\delta = 6|\nabla \phi| \phi(1 - \phi) \quad (7)$$

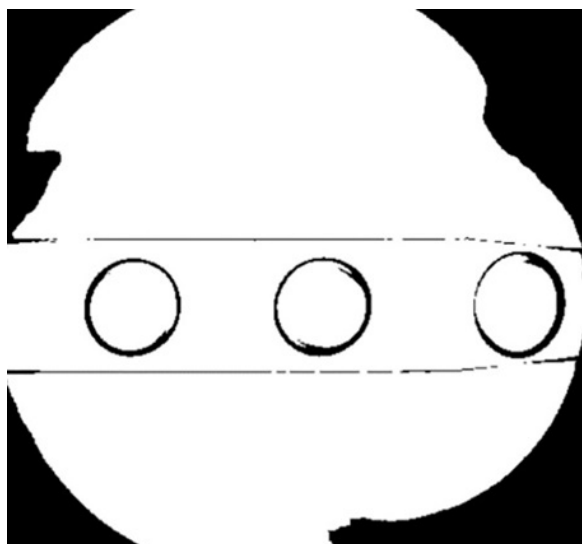
در هر دو جریان سیال از توزیع سرعت توسعه یافته در ورودی

آب به عنوان فاز پراکنده و روغن به عنوان فاز پیوسته مورد بررسی قرار گرفته است. برای اندازه‌گیری چگالی سیالات از ترازوی دیجیتال (AND-HR-200) به همراه حجم سنج‌دستی و ویسکوزیتر (Brooke Field) استفاده شده است. خواص اندازه‌گیری شده سیالات مورد استفاده در جدول ۳ آورده شده است. دمای سیال در زمان آزمایش ۱۷/۷ درجه سانتی‌گراد بوده است.

جهت تحلیل تصاویر و به‌دست‌آوردن نتایج از نرم‌افزار [ImageJ استفاده شد. ابتدا تصاویر حاصل از نتایج تجربی به فرمت باینری تبدیل شدند و سپس تصاویر لبه‌یابی شدند. یک نمونه تحلیل تصویر در شکل ۷ آمده است. مساحت قطرات تشکیل‌شده به کمک نرم‌افزار محاسبه و از رابطه مساحت دایره، قطر قطره به‌دست آمد. دقت اندازه‌گیری تجهیزات مورد استفاده در آزمایشات در جدول ۴ ارایه شده است.

جدول ۳) خواص سیالات مورد استفاده در این پژوهش

نام ماده	چگالی (Kg/m^3)	لزجت (mPa.s)
آب (پراکنده)	۱۰۰۰	۱۰۰۰
روغن (پیوسته)	۴۰۰	۵۴/۴



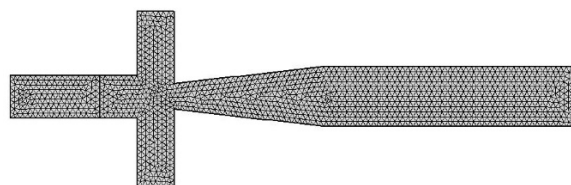
شکل ۷) لبه‌یابی تصویر میکروکانال

جدول ۴) درصد قطعیت دستگاه‌های آزمایشگاه

ردیف	نام دستگاه	دقت اندازه‌گیری
۱	پمپ سرنگی	یک میلی‌متر بر ساعت
۲	حجم‌سنج	یک میلی‌متر
۳	ویسکوزیتر	۱/۰ پاسکال در ثانیه
۴	ترازو	۰/۰۱ گرم

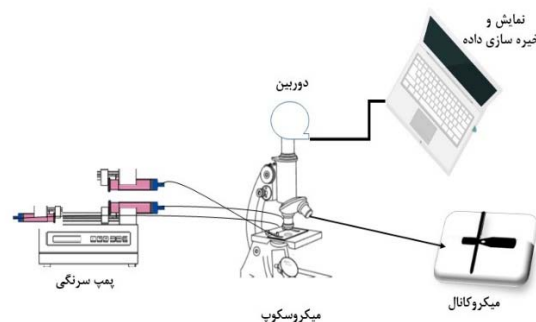
راستی‌آزمایی نتایج

در هر کار عددی باید بررسی استقلال نتایج از ابعاد شبکه انجام پذیرد. بررسی استقلال از شبکه در نمودار ۱ آمده است که بیانگر قطر قطره تولیدی نسبت به تعداد شبکه در فضای محاسباتی



شکل ۴) نمونه‌ای از شبکه‌بندی هندسه مورد مطالعه

بعد از حل معادلات اساسی حاکم بر جریان سیال و انتخاب هندسه مناسب، نمونه‌ای از میکروکانال‌ها با روش لیتوگرافی نرم ساخته و فرایند تولید قطره به‌صورت تجربی بررسی شد. برای انجام آزمایش و ثبت نتایج به‌دست‌آمده از یک عدد پمپ سرنگی چهارموتوره (ZSTRAD94-1SP4)، میکروکانال‌های ساخته‌شده از جنس PDMS، میکروسکوپ تحقیقاتی اینورت (Optika IM2-Inverted Research Microscope) و دوربین استفاده شده است. شماتیکی از تجهیزات به‌کاررفته در بخش آزمایشگاه در شکل ۵ و تصاویر تجهیزات و میکروکانال در شکل ۶ آورده شده است. روش کار بدین صورت است که سه عدد سرنگ ۱۰ سی‌سی که در یکی آب و در دو سرنگ دیگر روغن قرار دارد روی پمپ سرنگی تعبیه شده و با توجه به سرعت خطی تعریف‌شده به پمپ، سیالات مورد نظر را به ناحیه مورد بررسی تزریق می‌کنند. سیال خارج‌شده از سرنگ‌ها از طریق لوله‌های اسکالپ‌وین به کیت میکروکانال ساخته‌شده، متصل شده است. نتایج تشکیل قطره در زیر میکروسکوپ اینورت توسط دوربین دوربین تعبیه‌شده ضبط شده و در کامپیوتر متصل به آن ذخیره می‌شود.



شکل ۵) شماتیک تجهیزات آزمایشگاهی برای تولید ریزقطره

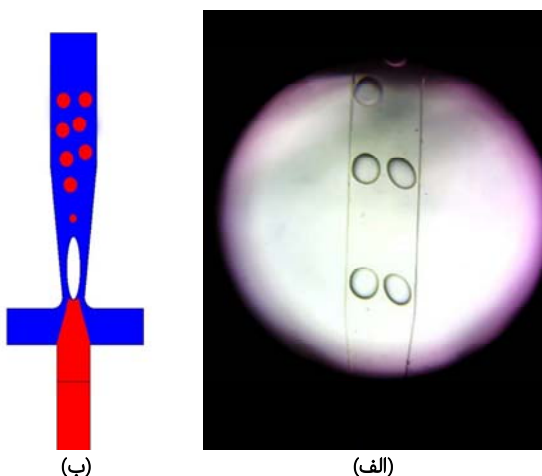


شکل ۶) الف) تجهیزات به‌کاررفته، ب) میکروکانال به‌کاررفته به همراه لوله‌های اتصالی

می‌کند تا از انتهای میکروکانال خارج شود. مکانیسم تشکیل قطره در این نوع هندسه به صورت چکه کردن است و قطراتی با ابعاد یکسان به صورت مونودیسپرس (Monodisperse) در شکل ۸ قابل مشاهده است.

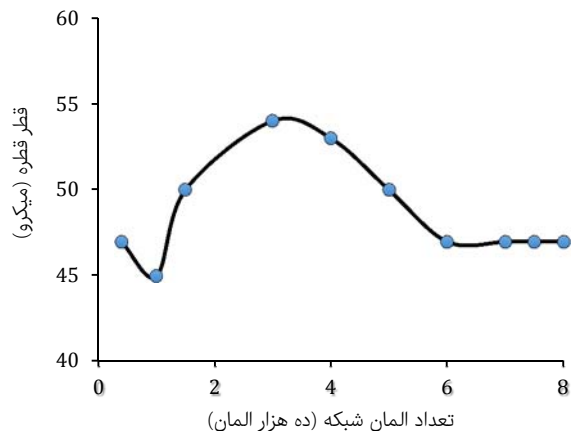
هندسه ارایه شده در این شکل به عنوان هندسه پایه در نظر گرفته شده است و تمرکز اصلی بر روی هندسه جدید با مانع بیضوی شکل است و بنا است تا نتایج به دست آمده از هندسه جدید با نتایج هندسه پایه مقایسه شود. به جهت اینکه جریان سیال از داخل کانال عبور می‌کند و کانال متقارن است، موانع در داخل کانال طراحی شدند. نتایج حاصل از شبیه سازی عددی و داده های تجربی برای هندسه پیشنهاد شده، در شکل ۹ ارایه شده است. مشاهده می‌شود که در هندسه جدید قطرات در دو ردیف کنار هم تشکیل می‌شود. با اینکه اصولاً شبیه سازی جریانات دوفازی با مشکلات بسیار زیادی همراه است، نتایج عددی در این هندسه نیز تطابق قابل قبولی با تصویربرداری تجربی دارد. با توجه به شکل ۹، ایده افزودن مانع به هندسه پایه که به عنوان یک عامل موثر در تعیین نوع مکانیسم تولید قطره است، بر پایه افزایش نیروی برشی و به حداقل رساندن زمان تشکیل قطره شکل گرفته است.

یافته ها و نتایج حاصل، تطبیق قابل قبولی با نتایج پژوهش های ویکر و همکاران [34] و هان و همکاران [35] دارد. با مقایسه نتایج می‌توان گفت که تغییرات نسبت جریان سیال پراکنده به پیوسته، تاثیر مستقیمی بر میزان اندازه قطرات تولید شده و فرکانس آنها دارد که در بسیاری از پژوهش های پیشین [36,37] نیز رفتار مشابهی مشاهده شده است. نسبت سرعت جریان دوفاز، گرانروی فاز پیوسته و کشش بین سطحی بین دوفاز از عوامل اصلی تاثیرگذار در اندازه و فرکانس قطرات است. با افزایش سرعت جریان، اندازه قطرات بزرگتر می‌شود و فرکانس کاهش می‌یابد. با افزایش گرانروی فاز پیوسته، اندازه قطرات کوچکتر می‌شود و فرکانس افزایش می‌یابد. وقتی تنش بین دوفاز بزرگتر می‌شود، اندازه قطرات نیز بزرگتر می‌شود و فرکانس کاهش می‌یابد [35].



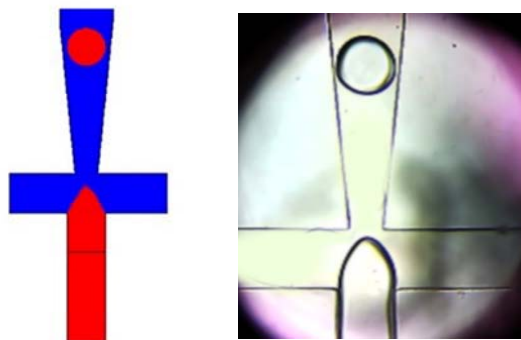
شکل ۹) نتایج حاصل از: الف) فرآیند تجربی، ب) شبیه سازی عددی تولید قطره در هندسه دوم

است. با توجه به نمودار ۱ واضح است که بعد از تعداد ۶۰۰۰۰ المان، تغییر چندانی در نتایج دیده نمی‌شود و با افزایش تعداد مش‌ها ابعاد قطره تولید شده تقریباً ثابت است.



نمودار ۱) منحنی استقلال از شبکه هندسه اول

به منظور صحت سنجی نتایج عددی به دست آمده، تصویر تولید قطره حاصل از شبیه سازی عددی و نتیجه تجربی حاصل از فرآیند تشکیل قطره در هندسه اول در شکل ۸ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود توافق قابل قبولی بین حل عددی و تصویربرداری تجربی به دست آمده است. پس از کسب اطمینان از صحت نتایج به دست آمده به بررسی مکانیزم تولید قطره در هندسه پایه و سپس هندسه ارایه شده پرداخته خواهد شد.



شکل ۸) مقایسه نتایج حاصل از: الف) فرآیند تجربی، ب) شبیه سازی عددی تولید قطره در هندسه پایه

فرآیند تولید قطره در هندسه پایه بدین صورت است که جریان سیال پراکنده (آب) توسط تنش برشی اعمالی جریان سیال پیوسته (روغن) بریده می‌شود. در اثر تزریق سیال پراکنده (آب) به بستری از روغنی که در ورودی های میکروکانال به صورت عمودی وارد می‌شود، جریان سیال پراکنده به صورت اسلاگ درآمده و کشیده می‌شود، در اثر نیروی کشش و نیروی ویسکوز و مکانیسم چکه کردن قطره اولیه تشکیل شده، رفته رفته شکل نهایی قطره گرفته و از جریان سیال پراکنده جدا شده در مرکز کانال حرکت

تفسیر نتایج

تنها جریان سیال پراکنده به صورت جتی در داخل سیال پیوسته حرکت می کند. با توجه به اینکه اثر نیروی برشی سیال پیوسته که منجر به ایجاد برش در جریان سیال پراکنده می شود، در مقایسه با نیروی گرانروی دوفاز مایع کمتر است، جریان سیال پراکنده به صورت جتی در داخل کانال حرکت می کند. همچنین در نسبت سرعت بالا جریان سیال تمایل به ایجاد اسلاگ دارد، اما نیروی ویسکوز برشی در برابر نیروی پسا (Drag) ضعیف بوده و قطره تشکیل نخواهد شد. جریان باریک تشکیل شده متأثر از پایین بودن نسبت عدد مویینگی سیال پیوسته به پراکنده است که در این حالت نیروی گرانروی از نیروی کشش سطحی قوی تر است.

با کاهش نسبت دبی سیالات به $200/400$ (جدول ۵- ب) فاصله بین قطرات کاهش یافته و قطرات تشکیل شده با ابعاد یکسان 500 میکرومتر تولید می شود. با رسیدن دبی دو جریان سیال به $160/400$ قطر قطرات کوچک تر شده و فرکانس افزایش می یابد (جدول ۵- ج). به عبارتی دیگر با کاهش نسبت سرعت دو سیال قطرات ریزتر شده و فرکانس تولید قطرات افزایش می یابد و این در حالی است که فاصله بین قطرات تولید شده پس از جدایش از جریان آب کاهش می یابد.

در کمترین نسبت دبی دو سیال $20/400$ (جدول ۵- د) ابعاد قطرات قابل اندازه گیری نیست. بنابراین برای اندازه گیری ابعاد قطرات، از فیلترهای پردازش تصویر استفاده شد. در نسبت جریان دو سیال، قطرات کمتر از 500 میکرومتر (به طور متوسط 46 میکرومتر) تشکیل می شود. با توجه به نسبت دبی، شکل یک قطره کامل را هم به خود نمی گیرند، قطرات سیال پراکنده به صورت ذرات ریز در جریان روغن پخش می شوند.

جدول ۵) نتایج تجربی تولید قطره در نسبت های مختلف سرعت سیال پراکنده به پیوسته (هندسه اول)

شماره آزمایش	نسبت سرعت سیال پراکنده به پیوسته	تصویر از مرحله تجربی تولید قطره
(الف)	$300/400$	
(ب)	$200/400$	
(ج)	$160/400$	
(د)	$20/400$	

بررسی تاثیر دبی متغیر در داده های تجربی در هندسه دوم

نتایج تجربی به دست آمده در هندسه پیشنهاد شده در جدول ۶ نشان داده شده است. می شود. این نتایج بررسی شده و با نتایج

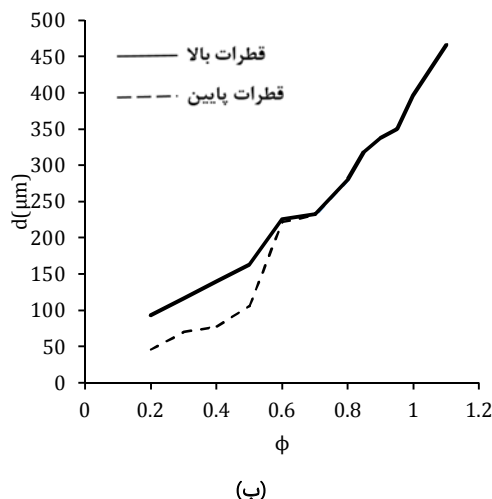
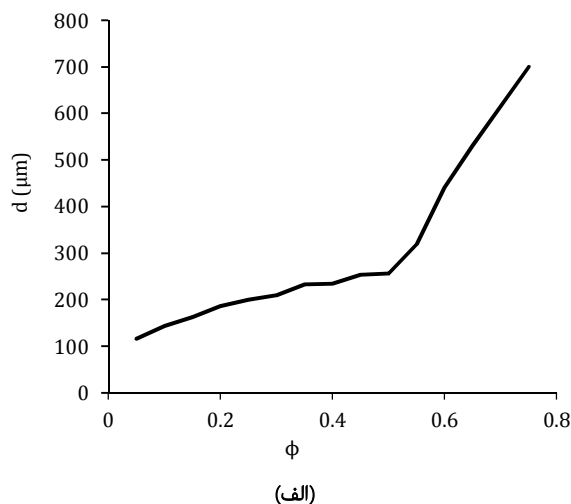
به طور کلی سه پارامتر تاثیرگذار بر تولید قطره شامل طراحی کانال (ابعاد و نوع هندسه)، خواص سیالات (گرانروی، چگالی، زاویه تماس و واسط تنش) و پارامترهای عامل (یعنی فشار، دما، نسبت سرعت جریان) هستند^[38]. با توجه به نتایج حاصل از بخش تجربی و عددی، در طی فرآیند شکل گیری قطره، نیروی برشی اعمال شده از سوی جریان پیوسته عاملی است که تاثیر بیشتری بر روند تشکیل قطره دارد^[39] و اصولاً رسیدن به قطرات ریزتر در مقیاس میکرو نیازمند اعمال نیروی برشی بیشتر است. جریان سیال پراکنده تحت اثر نیروی برشی جریان پیوسته وارد مسیر بین مانع و دیواره جریان شده و به صورت اسلاگ بیرون می آید. جریان آب به صورت قطره تشکیل شده و پس از ایجاد گلویی از اسلاگ جدا شده و در داخل کانال در مسیر بالا و پایین شروع به رشد کرده و تا رسیدن به ابعاد مشخص خود که متأثر از نسبت دبی جریان پراکنده به گسسته است، به مسیر خود ادامه می دهد. با ایجاد مانع، مکانیسم تشکیل قطره به صورت جتی است، بدین صورت که سیال گسسته از میانه کانال در ناحیه بین مانع و دیواره کانال جدا شده و تبدیل به قطره می شود. این رژیم در سرعت های بالا برای هر دو سیال رخ می دهد. در این نوع مکانیسم، نیروی برشی به صورت موثرتر در برابر نیروی فشاری قرار دارد. در هندسه ارایه شده با افزودن مانع در داخل کانال مینیاتوری، جریان سیال پراکنده با مانع برخورد می کند و تحت اثر این برخورد در مرکز کانال، روند تشکیل ریزقطرات که خود حاصل ناپایداری مایع (فاز پیوسته و فاز گسسته) است، انجام می شود. جریان سیال پراکنده وارد کانال شده و تحت اثر تنش برشی از سوی سیال پیوسته تشکیل و جدایش قطره اتفاق می افتد و قطره شروع به حرکت می نماید. در مرحله پیش از تشکیل قطره، نیروی گرانروی اثر کمتری دارد و دینامیک تشکیل قطره توسط نیروهای اینرسی و کشش سطحی کنترل می شود و این در حالی است که در مرحله نهایی قطره نقش نسبت لزجت دو سیال مهم تر است. از مکانیسم چکه کردن برای تشکیل قطره در میکروکانال تی شکل استفاده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، غالب قطرات به صورت متناوب و جدا از هم تشکیل شده و با توجه به سرعت و دبی جریانات سیال وارد شده، قطرات با فرکانس های مشخصی تولید می شوند.

بررسی تاثیر دبی متغیر در داده های تجربی در هندسه اول

در این بخش نتایج حاصل از تاثیر دبی سیالات عامل بر تولید قطره به صورت تجربی در هندسه اول مورد بررسی قرار می گیرد. نسبت سرعتی که در هر بخش از کار مورد استفاده قرار گرفته است، شامل نسبت سرعت خطی در پمپ سرنگی (میلی متر بر ساعت) برای سیال پراکنده به سیال پیوسته است. در جدول ۵ تاثیر نسبت دبی بر فرآیند تولید قطره نشان داده شده است. با توجه به جدول در بالاترین نسبت های دبی سیال پراکنده به پیوسته $300/400$ (جدول ۵- الف) هیچ قطره ای تشکیل نمی شود و

بررسی تاثیر اندازه و نسبت جریان در هندسه ها

نتایج به دست آمده نشان دادند که در هر دو هندسه با کاهش نسبت جریان آب به روغن، ابعاد قطرات کاهش یافته و فرکانس تولید قطرات افزایش می یابد. نمودار ۲ تاثیر نسبت جریان سیال ها (پراکنده به پیوسته) بر قطر متوسط قطرات تولید شده را در هندسه پایه و هندسه ارایه شده نشان می دهد.



نمودار ۲) منحنی قطر متوسط قطرات تولید شده (d) به نسبت جریان پراکنده به پیوسته ($\phi = \frac{Q_d}{Q_c}$ در: الف) هندسه پایه، ب) هندسه پیشنهادی

با توجه به نمودار ۲- الف می توان نتیجه گرفت که در هندسه پایه با افزایش نسبت جریان پراکنده به پیوسته تا میزان ۵٪ قطر قطرات تولید شده افزایش یافته، سپس به صورت خطی قطر قطرات افزایش می یابد. ابعاد قطرات در محدوده ۱۱۷ تا ۷۰۰ میکرومتر متغیر (معادل عرض کانال) است. در نمودار ۲- ب دو نوع منحنی قابل مشاهده است. علت رسم این دو منحنی (خط پر و خط ممتد) به دلیل این است که در تولید قطرات در هندسه دوم در محدوده نسبت دبی تا ۶٪ دو ردیف قطره با ابعاد متفاوت تولید می شود. پس از این مقدار در دو ردیف قطراتی با ابعاد یکسان، با فرکانس بالاتر تولید می شود. فاصله بین قطرات تشکیل شده در

هندسه پایه (جدول ۵) مقایسه می شود. نسبت سرعتی که در هر بخش از کار مورد استفاده قرار گرفته است، همانند هندسه اول، نسبت سرعت خطی در پمپ سرنگی (میلی متر بر ساعت) برای سیال پراکنده به سیال پیوسته است.

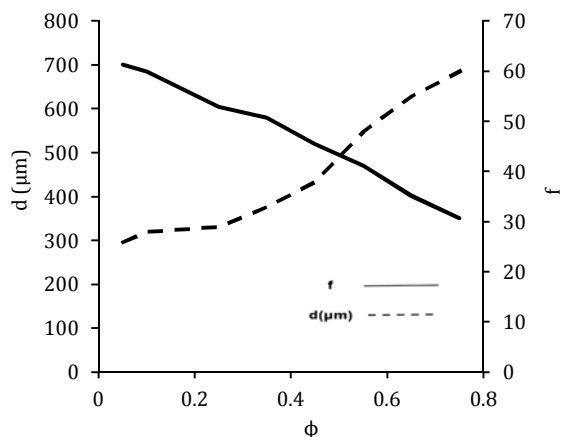
در نسبت دبی (۱۱۰/۱۰۰) (جدول ۶- الف) سیال پراکنده به پیوسته، قطرات با ابعاد مختلف تولید شده و ترکیبی از قطرات بزرگ تر و کوچک تر با فاصله نسبی با هم از کانال خارج می شوند. ابعاد قطرات تولید شده بزرگ و کوچک به صورت مستقل همسان مشاهده و پس از تحلیل تصاویر ابعاد آنها یکسان گزارش می شود. با کاهش نسبت دبی جریان سیالات ورودی، قطرات در قالب الگوریتم نامنظمی تولید می شوند. اما با تغییرات در سرعت های ورودی، یک ثبات نسبی در تولید رخ می دهد. در نسبت دبی (۹۵/۱۰۰)، قطرات در دو ردیف با فاصله نسبی یکسان اما با دو اندازه متفاوت تولید می شوند و فرکانس تولید قطرات افزایش یافته است (جدول ۶- ب).

در نسبت دبی های ۹۰/۱۰۰ و ۶۰/۱۰۰ کم کم قطراتی با ابعاد ریزتر در فرکانس بالا تولید می شود. تحلیل جدول های ۶- ج و ۶- د نشان می دهد در اثر وجود موانع بیضی، با کاهش نسبت جریان دو سیال، قطرات هم اندازه تشکیل می شوند و فاصله بین قطرات نیز در دو ردیف یکسان است. در کمترین نرخ دبی سیال پراکنده به پیوسته، تولید قطرات ریزتر و در گستره دو اندازه متفاوت ۲۸۰-۴۶۰ و ۹۳-۲۸۰ میکرومتر متفاوت مشاهده می شود. ضمن افزایش فرکانس، حجم بالایی از ریز قطرات تولید می شود. با کاهش نسبت دبی، قطرات در دو ردیف با دو اندازه متفاوت تولید شده و از کانال خارج می شوند. اندازه قطرات تولید شده متاثر از نیروی برشی سیال پیوسته و هندسه مانع است.

جدول ۶) نتایج تجربی تولید قطره در نسبت های مختلف سرعت سیال پراکنده به پیوسته (هندسه دوم)

شماره آزمایش	نسبت سرعت سیال پراکنده به پیوسته	تصویر از مرحله تجربی تولید قطره
(الف)	۱۱۰/۱۰۰	
(ب)	۹۵/۱۰۰	
(ج)	۴۰/۱۰۰	
(د)	۲۰/۱۰۰	

کانال ۷۰۰ میکرومتر می‌رسد که مساوی با عرض کانال است. از طرفی فرکانس تولید قطرات نیز کاهش می‌یابد. در نمودار ۴ منحنی مربوط به نسبت جریان دو سیال پراکنده به پیوسته و رابطه آن با اندازه قطرات تولیدشده و نرخ تولید قطره (فرکانس) برای هندسه اول قابل مشاهده است. در این نمودار با افزایش نسبت جریان دو سیال، اندازه قطرات افزایش یافته و نرخ تولید قطرات کاهش می‌یابد.



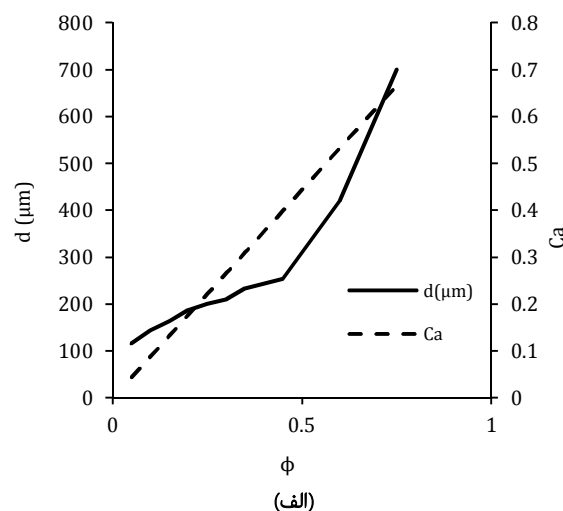
نمودار ۴) منحنی نسبت نرخ جریان به اندازه و فرکانس تولید قطره

نتیجه‌گیری

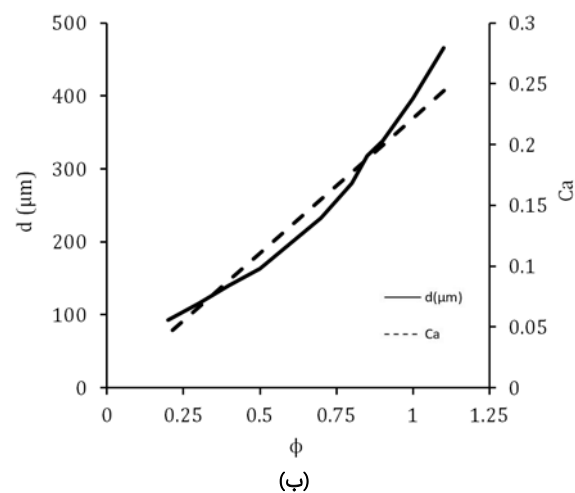
به صورت عددی و تجربی تولید قطره در دو میکروکانال بررسی شد. دو هندسه تعریف شده به صورت تی‌شکل بوده و هندسه دوم دارای مانع بیضوی است. با استفاده از نسبت دبی دو جریان پراکنده به پیوسته و نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار کامسول و داده‌های تجربی مشخص می‌شود که در هندسه دوم قطر قطرات کاهش یافته و فرکانس تولید افزایش می‌یابد. ارزیابی تصاویر و لبه‌یابی قطرات نشان می‌دهد با کاهش نسبت دبی آب به روغن، قطرات ریزتری تولید خواهد شد و فرکانس تولید قطرات افزایش می‌یابد. در آستانه تغییر ابعاد قطره، فاصله بین قطرات تولیدشده افزایش می‌یابد و کم‌کم با کاهش نسبی دبی جریانات فاصله بین قطرات کاهش یافته و قطرات بدون فاصله در کنار هم حرکت می‌کند. با توجه به نمودارهای ۲ تا ۴، با افزایش نسبت جریان پراکنده به پیوسته ابعاد قطرات در محدوده ۱۱۷ تا ۷۰۰ میکرومتر افزایش می‌یابد. با افزودن مانع قطر قطرات از ۴۶ تا ۴۴۶ میکرومتر متغیر خواهد بود. عدد موینگی به عنوان مهم‌ترین عدد در روند تولید قطرات، به صورت خطی افزایش می‌یابد. تولید ریزقطرات در ابعاد میکرو به تجهیزات و امکانات کمتری نسبت به حالت نانو نیازمند است و در موارد متعدد صنعتی، دارویی و پزشکی این ریزقطرات می‌توانند به جای نانوقطرات استفاده شوند و تغییر در هندسه با ایجاد مانع منجر به تولید قطرات ریزتر با حجم بالا می‌شود. در نسبت بالای جریان پراکنده به پیوسته و در عدد موینگی بالا، در رژیم چکه کردن نیروی برشی در برابر نیروی

مسیر جریان پس از مانع بیضوی برابر بوده و با افزودن مانع قطر قطرات از ۴۶ تا ۴۴۶ میکرومتر متغیر خواهد بود.

عدد موینگی ($Ca = \frac{\mu u}{\sigma}$) از جمله اعداد مهم بی‌بعد در بحث تولید قطره است. در رابطه عدد موینگی، μ نشان‌دهنده لزجت دینامیکی، u سرعت، σ کشش سطحی است. با افزایش نسبت سرعت جریان، عدد موینگی روند صعودی دارد و با افزایش قطر قطرات رابطه مستقیم دارد. با توجه به تغییرات دبی در سیالات ورودی به میکروکانال در هر دو هندسه که در نمودار ۳ مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت جریان میزان عدد موینگی هم افزایش می‌یابد. در هر دو هندسه اول و دوم با افزایش نسبت دبی دو سیال، عدد موینگی به صورت خطی افزایش می‌یابد.



(الف)



(ب)

نمودار ۳) منحنی قطر متوسط قطرات تولیدشده (d) به نسبت جریان پراکنده به پیوسته و عدد موینگی؛ الف) (Ca) هندسه اول، ب) هندسه دوم

با کاهش نسبت دبی، ضمن افزایش سایز قطرات، فاصله تشکیل قطرات افزایش و فرکانس تولید قطرات کاهش می‌یابد. مکان تشکیل قطره در داخل میکروکانال و مسیر حرکت، وابسته به دبی جریان پراکنده است. در هندسه اول با افزایش نسبت جریان دو سیال قطر قطرات تولیدشده افزایش یافته و در نهایت به عرض

- 11- Yule AJ, Bolado R. Fuel spray burning regime and initial conditions. *Combustion and Flame*. 1984;55(1):1-12.
- 12- Wong VL, Loizou K, Lau PL, Graham RS, Hewakandamby BN. Numerical studies of shearthinning droplet formation in a microfluidic T-junction using two-phase level-SET method. *Chemical Engineering Science*. 2017;174:157-173.
- 13- Costa ALR, Gomes A, Cunha RL. Studies of droplets formation regime and actual flow rate of liquid-liquid flows in flow-focusing microfluidic devices. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2017;85:167-175.
- 14- Guillot P, Colin A. Stability of parallel flows in a microchannel after a T-junction. *Physical Review E*. 2005;72:06630.
- 15- Yong YM, Yang C, Jiang Y, Joshi A, Shi YC, Yin XL. Numerical simulation of immiscible liquid-liquid flow in microchannels using lattice Boltzmann method. *Science China Chemistry*. 2011;54(1):224-256.
- 16- Zhou H, Pozrikidis C. The flow of suspensions in channels: Single files of drops. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*. 2000;5(2):311-324.
- 17- Alizadeh M, Taeibi Rahni M, Eftekhari Yazdi M. Numerical investigation of emulsion process in microchannels, using index-function Lattice Boltzmann method. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(4):13-22. [Persian]
- 18- Yao J, Lin F, Kim HS, Park J. The effect of oil viscosity on droplet generation rate and droplet size in a T-junction microfluidic droplet generator. *Micromachines*. 2019;10(12):808.
- 19- Rahimi M, Shams Khorrami A, Rezai P. Effect of device geometry on droplet size in co-axial flow-focusing microfluidic droplet generation devices. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2019;570:510-517.
- 20- Lan W, Li S, Luo G. Numerical and experimental investigation of dripping and jetting flow in a coaxial micro-channel. *Chemical Engineering Science*. 2015;134:76-85.
- 21- Deng C, Wang H, Huang W, Cheng S. Numerical and experimental study of oil-in-water (O/W) droplet formation in a co-flowing capillary device. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects*. 2017;533:1-8.
- 22- Chen Y, Wu L, Zhang C. Emulsion droplet formation in coflowing liquid streams. *Physical Review E*. 2013;87(1-1)013002.
- 23- Qian JY, Chen MR, Wu Z, Jin ZJ. Bengt sunden, effects of a dynamic injection flow rate on slug generation in a cross-junction square microchannel. *Processes*. 2019;7(10):765.
- 24- Agnihotri S, Raveshi MR, Bhardwaj R, Neild A. Droplet breakup at the entrance to a bypass channel in a microfluidic system. *Physical Review Applied*. 2019;11(3):034020.
- 25- Nasser GA, El-Bab AMRF, Abdel-Mawgood AL, Mohamed H, Saleh AM. CO2 laser fabrication of PMMA microfluidic double T-junction device with modified inlet-angle for cost-effective PCR application. *Micromachines*. 2019;10(10):678.
- 26- Gelin P, Bihi I, Ziemecka I, Thienpont B, Christiaens J, Hellemans K, et al. Microfluidic device for high-throughput production of monodisperse droplets. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2020. [In Press]

کاهش سطحی ضعیف بوده و به همین دلیل قطر قطرات افزایش می‌یابد.

تشکر و قدردانی: موردی بیان نشد.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده است. محتویات علمی مستخرج از مقاله، حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج برعهده آنان است.

تعارض منافع: هیچ‌گونه تعارض منافعی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر وجود ندارد.

سهم نویسندگان: فرهاد صادق مغانلو (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۲۵٪)؛ المیرا غضنفری ججین (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۲۵٪)؛ محمد وجدی حکم‌آباد (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۲۵٪)؛ شاپور جعفرقلی‌نژاد (نویسنده چهارم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی یا کمکی/تحلیلگر آماری (۲۵٪).

منابع مالی: توسط دانشگاه محقق اردبیلی تامین شده است.

منابع

- 1- Vajdi M, Sadegh Moghanlou F, Ranjbarpour Niari E, Shahedi Asl M, Shokouhimehr M. Heat transfer and pressure drop in a ZrB2 microchannel heat sink: A numerical approach. *Ceramics International*. 2020;46(2):1730-1735.
- 2- Shum HC, Bandyopadhyay A, Bose S, Weitz D. Double emulsion droplets as microreactors for synthesis of mesoporous hydroxyapatite. *Chemistry of Materials*. 2009;21(22):5548-5555.
- 3- Sanguansri P, Augustin MA. Nanoscale materials development-a food industry perspective nanoscale materials development a food industry perspective. *Trends in Food Science & Technology*. 2006;17(10):547-556.
- 4- Sadegh Moghanlou F, Shams Khorrami A, Esmaeilzadeh E, Aminfar H. Experimental study on electrohydrodynamically induced heat transfer enhancement in a minichannel. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2014;59:24-31.
- 5- Li W, Zhang L, Ge X, Xu B, Zhang W, Qu L, et al. Microfluidic fabrication of microparticles for biomedical applications. *Chemical Society Review*. 2018;47(15):5646-5683.
- 6- Anna SL, Bontoux N, Stone HA. Formation of dispersions using flow focusing in microchannels. *Applied Physics Letters*. 2003;82(3):364-366.
- 7- Liu ZM, Yang Y, Du Y, Pang Y. Advances in droplet-based microfluidic technology and its applications. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*. 2017;45(2):282-296.
- 8- Shams Khorrami A, Rezai P. Oscillating dispersed-phase co-flow microfluidic droplet generation: Multi-droplet size effect. *Biomicrofluidics*. 2018;12(3):034113.
- 9- Chigier NA. The atomization and burning of liquid fuel sprays. *Progress Energy and Combustion Science*. 1976;2(2):97-114.
- 10- Wang J, Wang X, Zhu P, Chen C, Wang J, Li Y. Microfluidic rapid fabrication of tunable polyvinyl alcohol microspheres for adsorption applications. *Materials* 2019;12(22):3712.

of regions of Darcy and Stokes flow. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2007;69(7):1374-1404.

35- Han W, Chen X, Wu Z, Zheng Y. Three-dimensional numerical simulation of droplet formation in a microfluidic flow-focusing device. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2019;41(6):265.

36- Nabavi SA, Gu S, Vladislavljevic GT, Ekanem EE. Dynamics of double emulsion break-up in three phase glass capillary microfluidic devices. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2015;450:279-287.

37- Gol B, Kurdzinski ME, Tovar-Lopez FJ, Petersen P, Mitchell A, Khoshmanesh K. Hydrodynamic directional control of liquid metal droplets within a microfluidic flow focusing system. *Applied Physics Letters*. 2016;108(16):164101.

38- Gu Z, Liow JL. Micro-droplet formation with non-Newtonian solutions in microfluidic T-junctions with different inlet angles. In *Proceedings of the 2012 7th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS)*, 5-8 March 2012, Kyoto, Japan. Piscataway: IEEE; 2012.

39- Ghazanfari Jajin E, Sadegh Moghanlou F, Vajdi M, Jafargolinejad S. Numerical investigation effect of geometry in micro droplet generation. 22nd Iranian Physical Chemistry Conference, Zanjan, Iran. Unknown Publisher; 2019.

27- Nooranidoost M, Kumar R. Geometry effects of axisymmetric flow-focusing microchannels for single cell encapsulation. *Materials*. 2019;12(17):2811.

28- Li X, He L, Lv S, Xu C, Qian P, Xie F, et al. Effects of wall velocity slip on droplet generation in microfluidic T-junctions. *RSC Advances*. 2019;9:23229-23240.

29- Li X, He L, He Y, Gu H, Liu M. Numerical study of droplet formation in the ordinary and modified T-junctions. *Physics of Fluids*. 2019;31(8):082101.

30- Chakraborty I, Biswas G, Ghoshdastidar PS. A coupled level-set and volume-of-fluid method for the buoyant rise of gas bubbles in liquids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013;58(1-2):240-259.

31- Abrishamkar A, Rane AS, Elvira KS, Wootton RCR, Sainio T, deMello AJ. A Comsol multiphysics® model of droplet formation at a flow focusing device. *Comsol Conference, Rotterdam, Netherland*. Unknown Publisher; 2013.

32- Gabbanelli S, Drazer G, Koplik J. Lattice Boltzmann method for non-Newtonian (power-law) fluids. *Physical Review E*. 2005;72:046312.

33- Tice JD, Song H, Lyon AD, Ismagilov RF. Formation of droplets and mixing in multiphase microfluidics at low values of the reynolds and the capillary numbers. *Langmuir*. 2003;19(22):9127-9133.

34- Wiker N, Anders K, Borrvall T. Topology optimization