

شبیه‌سازی عددی تشکیل قطره تحت تاثیر میدان الکتریکی در یک دستگاه میکروفلوئیدی متمرکز کننده جریان

صدیقه فضلی، سلمان موحدی‌راد*

دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

ساسان آسیایی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده: فرآیندهای تشکیل قطرات، یکی از مهمترین مراحل در بسیاری از دستگاههای میکروفلوئیدی با کاربردهای زیستی و شیمیایی هستند. از عوامل موثر بر فرآیند تشکیل قطره می‌توان به هندسه دستگاه، خواص سیال مورد استفاده، پارامترهای عملیاتی و نیروهای خارجی اشاره کرد. از آنجایی که ساخت نمونه‌های فراوان جهت بهینه‌سازی هندسه میکروکانال ملزم به صرف هزینه‌های سنگین می‌باشد، در این مطالعه به کمک شبیه‌سازی با تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی به بررسی فرآیند تشکیل قطره پرداخته شده است. هدف از پژوهش حاضر شبیه‌سازی عددی میکروکانال متمرکز کننده جریان جهت مطالعه ابعاد میکروکانال و تولید قطرات کوچک تحت تاثیر میدان الکتریکی است. نوآوری پژوهش حاضر بررسی پارامترهای هندسی و عملیاتی می‌باشد که در مطالعات قبلی توجه‌ای به آن‌ها نشده است. شبیه‌سازی عددی این تراشه در فضای دو بعدی انجام پذیرفت. با توجه به فیزیک حاکم بر جریان، فازهای جریان تراکم‌ناپذیر فرض شده‌اند. دو پارامتر هندسی طول ناحیه متمرکز کننده جریان و طول اوریفیس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده از این پژوهش نشان داد برای طول ۱۰۰ میکرومتر ناحیه متمرکز کننده جریان در ولتاژهای بالا قطر قطره تا ۵۵ میکرومتر کاهش می‌یابد. اختلاف زمان تشکیل دو قطره متوالی نیز برای طول ۲۰۰ میکرومتر این ناحیه در ولتاژ ۳۰۰ ولت تا ۰/۱۷۸ ثانیه افزایش می‌یابد. بررسی طول اوریفیس نشان داد که طول اوریفیس تاثیر چندانی بر قطر قطره نمی‌گذارد اما طول ۹۰ میکرومتر اوریفیس باعث تشکیل قطره بعد از اوریفیس می‌گردد. همچنین نشان داده شد که وقتی فاصله الکترودها از یکدیگر کم باشد به علت افزایش نیروی الکتریکی وارد شده به مرز مشترک دو سیال قطره کوچکتري تشکیل می‌شود. در واقع می‌توان با انتخاب پیکربندی مناسب برای الکترودها در ولتاژهای پایین تر قطره کوچکتري تشکیل داد.

واژه‌های کلیدی: میکروفلوئیدیک، ریزقطره، میدان الکتریکی، متمرکز کننده جریان

KEYWORDS: Microfluidic, microdroplet, Electric field, flow focusing

مقدمه

میکروفلوئیدیک علمی است که در آن به بررسی رفتار سیال در سیستم‌های با اندازه میکرو پرداخته شده است. در این سیستم‌ها، سیالات درون کانال‌هایی با ابعاد میکرو جریان پیدا می‌کنند و عملیات مورد نظر روی آن‌ها انجام می‌شود. نسبت سطح به حجم بالا در دستگاه‌های میکروفلوئیدی منجر به افزایش میزان انتقال حرارت، جرم و پدیده‌های بین سطحی می‌شود که در ابعاد ماکرو قابل مشاهده نیستند. [۱]. یک دستگاه میکروفلوئیدی، تراشه‌ای از جنس سیلیکون، شیشه یا پلیمر است که لوله‌هایی با ابعاد میکرونی در آن تعبیه شده و سیالات درون این لوله‌ها جریان پیدا می‌کنند. بر اساس نیاز می‌توان تراشه‌هایی طراحی کرد که عملیات مورد نظر در آزمایش‌های متداول زیستی و پزشکی را در ابعاد کوچک انجام دهد. با توسعه سیستم میکرو الکترومکانیکی، میکرو فلوئیدیک مبتنی بر قطره به طور گسترده‌ای در تحویل دارو، بیوتکنولوژی، حفاظت بیماری، تجزیه و تحلیل شیمیایی، تحقیقات سلولی و سنتز مواد کاربردی و سایر زمینه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲]. از مزایای این سیستم‌ها می‌توان به بالا بودن نسبت سطح به حجم که باعث افزایش سرعت واکنش می‌شود، امکان کنترل هر قطره به صورت مستقل، امکان تولید تعداد زیادی قطره با اندازه یکسان، کاهش میزان نمونه‌ی مورد نیاز اشاره کرد. به طور معمول دو دسته از قطره بیشتر مورد بررسی قرار گرفته شده است. دسته اول قطره‌هایی هستند که شکل و ساختار مشخصی دارند و از مواد کاملاً مشخصی تشکیل شده اند که به عنوان نمونه‌ای از این قطره می‌توان به میکروکپسول‌ها [۳] اشاره کرد. دسته دوم قطره‌هایی هستند که معمولاً در سیستم‌های آزمایشگاه روی تراشه به عنوان یک میکروراکتور [۴] مورد استفاده قرار می‌گیرند. در هر دو این کاربردها، امکان تولید قطره با یکنواختی بالا، برای اطمینان از یک خروجی ثابت، قابل کنترل و قابل پیش‌بینی بسیار مهم است؛ بنابراین تولید قطره با امکان کنترل دقیق بر اندازه آن‌ها، یک مسئله‌ی مهم در دستگاه‌های میکروفلوئیدی است. تاکنون مطالعات بسیاری در زمینه فرآیندهای تشکیل و شکست قطره در دستگاه‌های میکروفلوئیدیک انجام شده است. برای رسیدن به تنظیم دقیق اندازه، شکل، یکنواختی و دیگر فاکتورهای ریزقطرات، تحقیقات موجود عمدتاً بر روی چگونگی تنظیم پارامترهایی مانند هندسه کانال، ویسکوزیته دو فاز، نرخ جریان، ترشوندگی (تمایل به کسب حداکثر سطح تماس یک

مایع با سطح جامد) و تنش بین فازی و غیره تمرکز دارد [۵]. برای تولید قطره در دستگاه‌های میکروفلوئیدی از دو روش ایستا و فعال استفاده می‌شود. در دستگاه‌های میکروفلوئیدی ایستا، دو سیال غیرقابل امتزاج در یک هندسه‌ی مشخص حرکت کرده و در هنگام برخورد با یکدیگر، به علت وجود نیروهای ویسکوز و اینرسی یک تنش برشی در مرز برخورد این دو سیال ایجاد شده؛ در اثر این نیروها قطره‌هایی از سیال پراکنده جدا شده و درون سیال پیوسته به حرکت در می‌آیند. هندسه‌ی کانال‌های میکروفلوئیدی که سیالات درون آن‌ها حرکت می‌کنند، نحوه‌ی برخورد اولیه دو سیال را کنترل می‌کند و از این رو تاثیر مهمی در فرآیندهای تشکیل قطره، مخصوصاً به روش ایستا دارد. از هندسه‌های مهم در تشکیل قطرات به روش ایستا میتوان به هندسه‌های متقاطع^۱، هندسه‌ی جریان کانونی^۲ و هندسه‌های هم محور^۳ اشاره کرد [۶]. در مقابل در روش‌های فعال با اعمال یک شرایط خارجی به سیستم، انرژی اضافی در سیستم ایجاد می‌شود و از این طریق امکان کنترل بیشتر بر فرآیند تشکیل قطره فراهم می‌گردد. با توجه به این انرژی اضافی روش‌های فعال قطره به روش‌های الکتریکی، مغناطیسی، اپتیکی، حرارتی و مکانیکی تقسیم بندی می‌شوند [۷]. با افزایش پیچیدگی در کاربردهای آزمایشگاهی روی تراشه، روش‌های فعال، به عنوان راه‌حلی قوی برای پاسخگویی به تقاضای بالا ارائه شده است. به طور کلی حالت‌های شکست قطره به ۳ حالت کلی: خزشی^۴، چکه کردن^۵، جتی^۶ تقسیم بندی شده است. در حالت خزشی قطره جدا شده از فاز پراکنده کاملاً توسط دیواره‌های کانال اصلی در بر گرفته می‌شود. این حالت معمولاً در اعداد موئینگی پایین اتفاق می‌افتد. در حالت چکه کردن قطرات به صورت تناوبی و با فرکانس ثابت از نوک جریان فاز پراکنده جدا می‌شوند. در این حالت قطرات با دیواره کانال در تماس نیستند و توسط فاز پیوسته احاطه می‌شوند و معمولاً زمانی اتفاق می‌افتد که نسبت سرعت بین دو فاز کم باشد. در حالت جت قطره در ناحیه‌ای دور از محل تقاطع دو سیال جدا می‌شود. این حالت معمولاً در سرعت‌های بالای دو سیال رخ می‌دهد. بر خلاف حالت چکه کردن، حالت جت ناپایدار است و اندازه قطرات تشکیل شده یکنواخت نیست [۸].

گو و همکاران [۹] به بررسی زوایای ورودی فاز پراکنده ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ درجه در یک میکروکانال T شکل با سیال

(۱) Cross flowing
(۳) Co flowing
(۵) Dripping

(۲) Flpw focusing
(۴) squeezing
(۶) Jetting

با چپ، هدایت فاز پراکنده و فرکانس میدان به کار برده شده کنترل می‌شود. لی و همکاران [۱۷] در اثر یک میدان الکتریکی ساکن خارجی در فرآیند تشکیل قطره را بررسی کردند. آنها نشان دادند که اگر به سیستم میکروسایالی میدان الکتریکی با ولتاژهای مختلف اعمال شود، فرآیند شکست قطرات سه رژیم مجزا را تجربه می‌کند. شوای‌بن و همکاران [۱۸] شکل‌گیری قطره آب در روغن در میکرو کانال با جریان متمرکز تحت میدان الکتریکی متناوب به صورت آزمایشی و عددی بررسی کردند.

با توجه به مطالعات انجام گرفته تاکنون تغییر طول ناحیه متمرکزکننده جریان و طول اوریفیس و تاثیر آنها بر فرآیند تشکیل قطره مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین تولید قطره به واسطه میدان الکتریکی یکی از قوی‌ترین، قابل اعتمادترین و پویاترین روش‌ها برای کنترل اندازه یا فرکانس قطره تشکیل شده است که تاکنون در هیچ کدام از مطالعات تاثیر مکان الکترودها و پیکربندی‌های مختلف آنها و همچنین نحوه اعمال میدان به صورت پالسی لحاظ نشده است. بدین ترتیب در این مطالعه به بررسی یک دستگاه میکرو فلوئیدیک با هندسه جریان کانونی تحت کنترل یک میدان الکتریکی پرداخته شده است. طول ناحیه متمرکزکننده جریان و طول اوریفیس و پیکربندی الکترودهای موجود به عنوان پارامترهای موثر بر اندازه قطره و زمان و مکان تشکیل قطره مورد بررسی قرار گرفته اند.

مدل‌سازی و شبیه‌سازی

فرآیند تشکیل قطره در هندسه جریان کانونی به مجموعه شرایط عملیاتی نظیر دبی جریان‌ها، خواص سیالات، خواص الکتریکی و پارامترهای هندسی نظیر عرض اوریفیس، طول ناحیه متمرکزکننده جریان، طول اوریفیس بستگی دارد و روند اهداف صنعتی به دنبال بهینه کردن این پارامترها می‌باشد. در این پژوهش از هندسه جریان کانونی نشان داده شده در شکل ۱ استفاده شده است. این میکروکانال شامل سه ورودی و یک خروجی و هفت الکترودهای همان‌طور که در شکل مشخص است از ورودی میانی فاز پراکنده و از دو ورودی چپ و راست فاز پیوسته وارد شده است. در ناحیه متمرکزکننده جریان، فاز پراکنده توسط دو جریان پیوسته متمرکز شده است. گرادیان فشار بوجود آمده موجب رانده شدن سیالات به درون اوریفیس شده که این امر باعث شد سیال فاز پراکنده مانند یک رشته‌ی دراز درآید و به صورت دوره‌ای شکسته شده و قطره در داخل کانال خروجی آزاد شود.

غیر نیوتونی پرداختند آنها دریافتند بزرگترین قطره در زاویه ۹۰ درجه تشکیل شد. سیواسامی و همکاران [۱۰] به بررسی عددی یک میکروکانال T شکل پرداختند. در این پژوهش نشان داده شد فشار فاز پراکنده نیز همانند فشار فاز پیوسته در رژیم‌های مختلف در حال تغییر است و اختلاف فشار بین این دو فاز در ابتدای فرآیند تشکیل قطره زیاد و هرچه فرآیند پیش می‌رود این اختلاف کمتر می‌شود. تعصب و همکاران [۱۱] تولید قطرات غیرنیوتنی زانتان گام در روغن و مقایسه با حالتی که سیال پیوسته آب است را در یک هندسه هم محور مورد مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند هرچه غلظت محلول زانتان گام افزایش یابد نسبت سرعتی که در آن رژیم چکه کردن به رژیم جتی تبدیل می‌شود افزایش می‌یابد. لی و همکاران [۱۲] به بررسی تولید قطرات تحت کنترل الکتریکی در میکروکانال هم محور پرداختند آنها نشان دادند افزایش نیروی الکتریکی موجب افزایش فرکانس تولید قطره و میزان تغییر شکل قطره و کاهش اندازه آنها می‌شود. ژبونگ‌نی و همکاران [۸]، نتایج حاصل از تاثیر ویسکوزیته بر فرآیند تشکیل قطره در یک هندسه متمرکزکننده جریان را گزارش کردند. آنها نشان دادند ویسکوزیته نقش مهمی را در امولسیون بازی می‌کند به طوری که مایعات با ویسکوزیته بالا قطرات بزرگتر با خاصیت پراکندگی پایین‌تر تولید می‌کنند. حاتمی و همکاران [۱۳] اثرات همزمان قطر اوریفیس، ویسکوزیته و سرعت جریان ورودی تحت پتانسیل الکتریکی بر شکل‌گیری قطره را مورد بررسی قرار دادند. فرآیند تشکیل قطره در رژیم قطره‌ای مورد بررسی قرار گرفت و خروجی قابل توجه این مقاله معرفی یک فرمول ریاضی برای محاسبه قطر قطره به عنوان تابعی از پارامترهای مختلف بود. رحیمی و همکاران [۱۴]، به بررسی عددی اثرات هندسه‌های متفاوت بر شکل‌گیری قطره در یک دستگاه متمرکزکننده جریان با سطح مقطع دایره‌ای پرداختند. مدل آنها قادر به پیش‌بینی اثرات این پارامترهای هندسی بر اندازه قطره برای طیف گسترده‌ای از نرخ جریان فاز پیوسته که هر دو رژیم چکه کردن و جت را پوشش می‌دهد، بود. در بررسی تولید الکتریکی قطره، چیا-هسین و همکاران [۱۵]، یک تراشه شامل یک کانال متمرکزکننده جریان به همراه یک جفت الکترودهای موازی ایجاد کردند. آنها موفق شدند با این تراشه میکرو فلوئیدی یک امولسیون یکنواخت W/O با قطر کمتر از ۵ میکرومتر با ولتاژ محرک بالا تولید کنند. سی هوان و همکاران [۱۶]، کنترل اندازه قطره توسط یک ولتاژ متناوب که از میان میکروالکترودهای موجود در اطراف یک میکروکانال متمرکزکننده جریان اعمال شده را نشان دادند. آنها دریافتند رژیم‌های تولید قطره با میدان الکتریکی، توسط تماس

جدول ۱- معادلات استفاده شده در شبیه سازی

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \cdot (\nabla \phi) = \gamma_{ls} \nabla \cdot \left[\epsilon_{ls} \nabla \phi - \phi(1 - \phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right] \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = -\nabla p + \nabla \cdot \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) + F_{st} + F_{ef} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (3)$$

$$E = -\nabla V \quad (4)$$

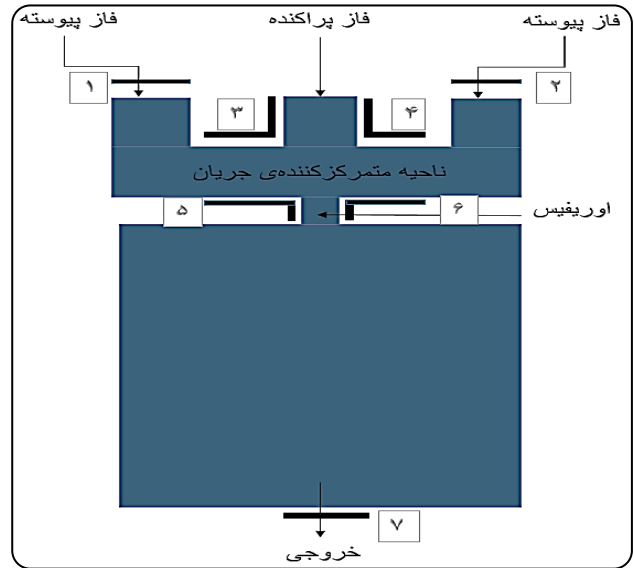
$$F_{st} = \sigma k \hat{n} \delta_{sm} \quad (5)$$

$$F_{ef} = \nabla \cdot T_{MW} = -\frac{1}{2}(E \cdot E) \nabla \epsilon + \rho_f E \quad (6)$$

$$d = 2 \sqrt{\frac{1}{\pi} \int (\phi > 0.05) d\Omega} \quad (7)$$

که در این معادله تابع تنظیم سطح یا ϕ بین مقادیر صفر و یک تغییر کرده است. مقدار صفر نشان دهنده‌ی فاز پیوسته و مقدار یک نشان دهنده‌ی فاز پراکنده است. همچنین γ و ϵ پارامترهای پایدارساز حل عددی می‌باشد. γ پارامتر پایدارسازی است و مقدار آن با توجه به بیشترین سرعت سیال موجود تعیین شده است و ϵ پارامتر ضخامت مرز است و مقدار آن با توجه به اندازه‌ی مش سیستم تعیین شده است. معادلات استفاده شده در این پژوهش در جدول ۱ گزارش شده است.

از فرمول ۷ جدول ۱ برای محاسبه قطر قطره استفاده شده است. در مرزهای ورودی از شرط مرزی سرعت متوسط محاسبه شده از Q_c و Q_d و در مرز خروجی از شرط مرزی فشار معین استفاده شد. همچنین از شرط مرزی دیواره خیس با زاویه تماس ۱۴۵ درجه برای همه‌ی دیواره‌ها استفاده شد. جریان سیال به صورت ناپایا و تراکم ناپذیر در نظر گرفته شد. از روغن زیتون با ویسکوزیته ۶۸ cP و چگالی 960 kg m^{-3} به عنوان فاز پراکنده و از آب به عنوان فاز پیوسته استفاده شد. خواص دو فاز استفاده شده در شبیه سازی نیز در جدول ۲ گزارش شده است.



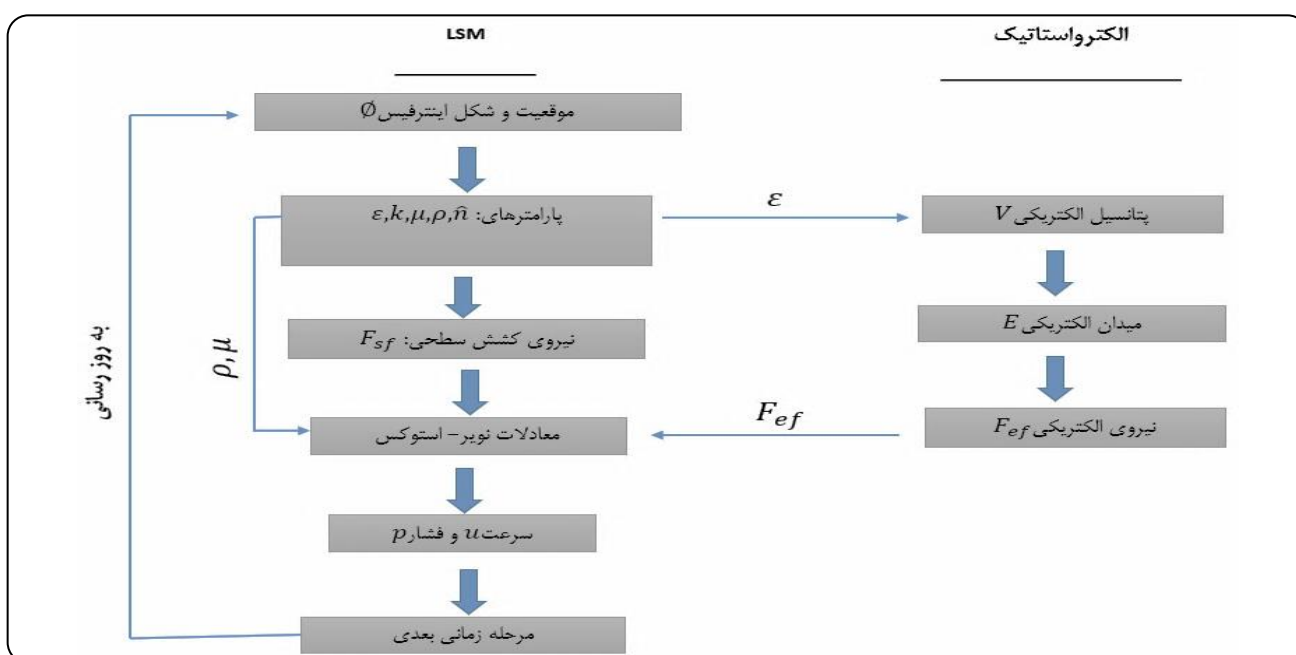
شماتیک میکروکانال مورد استفاده در شبیه سازی، γ الکتروود موجود در اطراف کانال برای ایجاد پیکربندی‌های مختلف، ورودی‌های فاز پیوسته و پراکنده

در این پژوهش از روش تنظیم سطح^۱ برای دنبال کردن مرز بین دوفاز استفاده شده است. این روش به طور خاص برای مسئله‌هایی که در آن مرز بین دو سیال در طول فرآیند جابه‌جا می‌شود و همچنین مسئله‌هایی که در آن‌ها گوشه‌ای تیز وجود دارد، طراحی شده است. به طور کلاسیک، در روش تنظیم سطح یک تابع فاصله علامتدار تعریف می‌شود و ایده پایه در این روش در نظر گرفتن یک تابع اسکالر پیوسته به نام ϕ است. مرز بین دو سیال با تابع $\phi > 0$ و $\phi < 0$ یک طرف مرز $\phi = 0$ و طرف دیگر مرز می‌باشد. در روش ذکر شده مقداری از دست دادن جرم وجود دارد و هرچه زمان پیش می‌رود، در طی فرآیند حل، این خطاهای کوچک به مقادیر بزرگ تبدیل می‌شوند. برای غلبه بر این مشکل اولسن و کریس [۱۹] یک روش بقایی را ارائه کردند که دقت بالا و بقای جرم مناسبی داشت. در این پژوهش از روش تنظیم سطح برای دنبال کردن مرز بین دوفاز استفاده شده است. این روش به طور خاص برای مسئله‌هایی که در آن مرز بین دو سیال در طول فرآیند جابه‌جا می‌شود و همچنین مسئله‌هایی که در آن‌ها گوشه‌ای تیز وجود دارد، طراحی شده است. این معادلات به همراه معادله مدل الکترواستاتیک برای مدل کردن اثرات میدان الکتریکی بر فرآیند تشکیل قطرات، حل شده است. برای دنبال کردن مرز و چگونگی فرآیند جدایش قطره از معادله تنظیم سطح که در جدول ۱ به شرح زیر گزارش شده است.

(۱) level set

جدول ۲- شرایط مرزی و خواص دو فاز استفاده شده در شبیه‌سازی

سیالات	فاز پیوسته	فاز پراکنده
دانسیتته (kg m^{-3})	۱۰۰۰	۹۶۰
ویسکوزیته (mPa s)	۱	۶۸
گذردهی ($\text{C(V}^{-1} \text{ m}^{-1})$)	$78/5 \times 8/854 \times 10^{-12}$	$2/8 \times 8/854 \times 10^{-12}$
دبی جریان (mL h^{-1})	۰/۰۴	۲
کشش سطحی (N m^{-1})	۰/۰۰۴۸	
ورودی میانی		Q_d
ورودی سمت چپ	$1/2 Q_c$	
ورودی سمت راست	$1/2 Q_c$	
دیواره های کانال	زاویه تماس = ۱۴۵ درجه	
خروجی کانال	فشار خروجی	



شکل ۲- الگوریتم حل معادلات

استقلال نتایج از مش و اعتبارسنجی

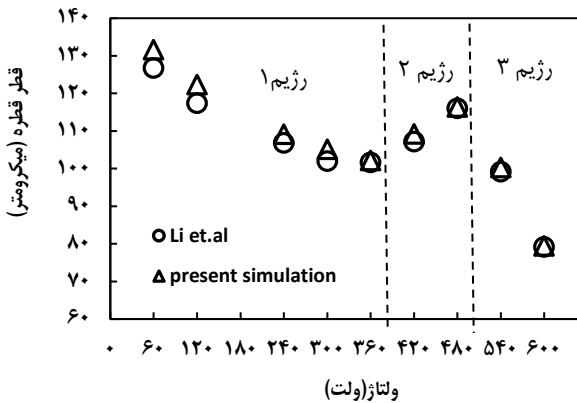
هندسه‌ی میکروکانال در فضای دوبعدی نرم افزار کامسول ایجاد و مش‌بندی گردید. شرایط به صورت ناپایا در نظر گرفته شده است. مش‌ها از نوع مربعی و با سازمان است. شبکه محاسباتی در اوریفیس به اندازه‌ی کافی ریز می‌گردد تا تغییرات در این ناحیه به درستی در شبیه‌سازی وارد شود. عرض اوریفیس ۸۰ میکرومتر و عمق کانال‌ها ۸۶ میکرومتر در نظر گرفته شد. هندسه‌ی شبیه‌سازی شده در شکل ۳ نشان داده شده است. برای اطمینان از صحت نتایج، مش‌هایی با دانسیته‌های متفاوت به کار گرفته شد. مطابق جدول ۳ دو مش متوالی، از مش ۲۵۴۸۰ به بعد تفاوت قابل ملاحظه‌ای در قطر قطره مشاهده نمی‌شود.

در نتیجه از مش با دانسیته‌ی کمتر که به زمان پردازش کمتری نیاز دارد، استفاده شده است. برای اعتبارسنجی، سیستم ارائه شده به وسیله‌ی لی و همکاران [۱۷]، مورد شبیه‌سازی قرار گرفت و نتایج با نتایج ارائه شده به وسیله‌ی لی و همکاران مورد مقایسه قرار گرفت.

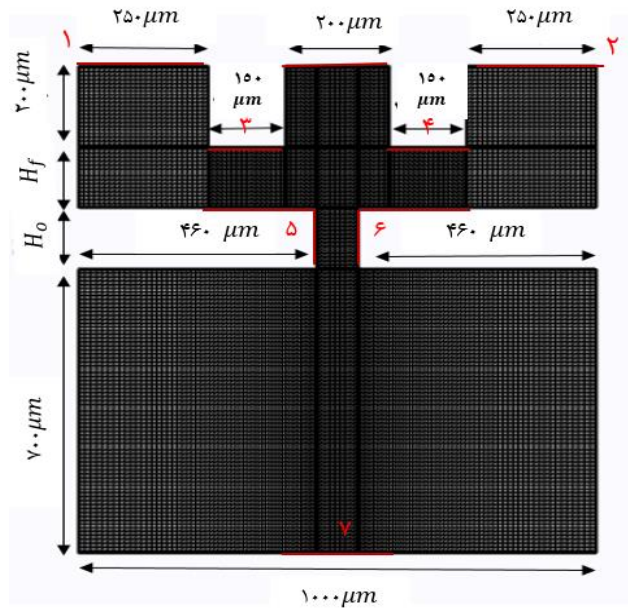
در پژوهش‌های عددی علاوه بر بررسی استقلال حل از شبکه، نتایج حل عددی با نتایج پژوهش‌های قبل که صحت آن به اثبات رسیده است مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده شده است نتایج شبیه‌سازی حاضر با نتایج ارائه شده بوسیله لی و همکاران مطابقت مناسبی داشته است و میزان اختلاف کمتر از ۵٪ است، که نشان‌دهنده‌ی دقت مناسب شبیه‌سازی است.

جدول ۳- نتایج مطالعه استقلال از مش

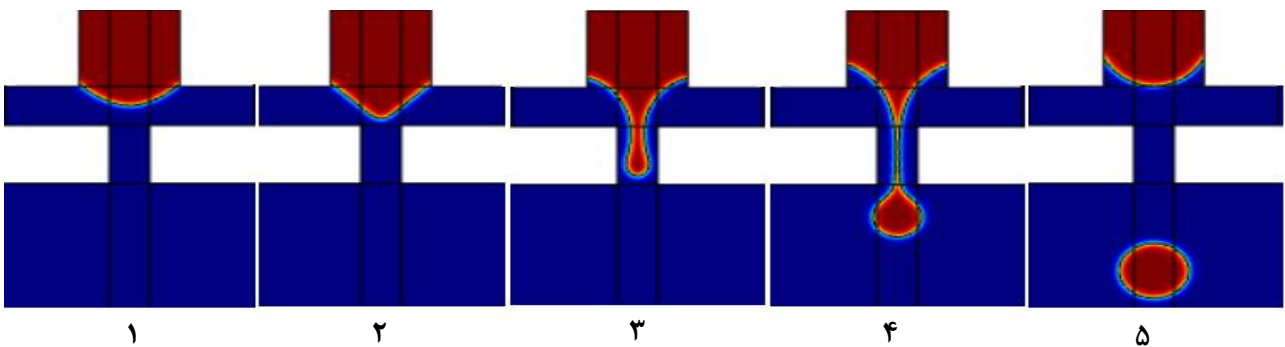
تعداد المان‌های شبکه	۸۸۹۵	۱۴۱۷۳	۳۵۴۸۰	۵۲۳۴۲
قطر قطره	۱۳۸/۸۸	۱۳۹/۸۴	۱۴۰/۶	۱۴۰/۷۶



شکل ۴- مقایسه نتایج شبیه‌سازی حاضر با نتایج ارائه شده به وسیله لی و همکاران [۲۰] با میزان اختلاف کمتر از ۵٪



شکل ۳- هندسه شبیه‌سازی شده و ابعاد میکروکانال و الکترودهای قرمز رنگ

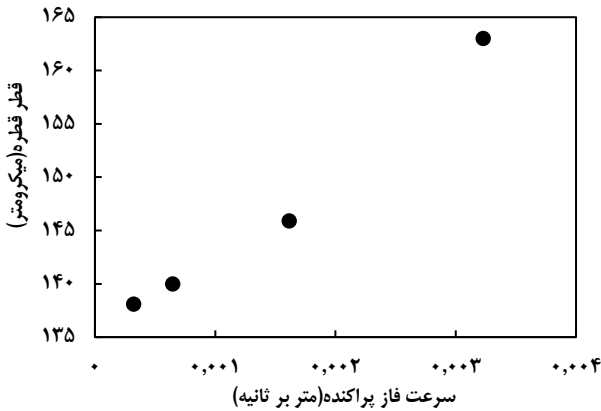
شکل ۵- فرایند تشکیل قطره بدون اعمال میدان الکتریکی، $H_0 = 150\mu\text{m}$ و $H_f = 150\mu\text{m}$

در مرحله ۳ با ورود فاز پراکنده درون اوریفیس به علت اختلاف فشار بین دو فاز مرحله فشرده سازی آغاز می‌شود. در مرحله ۴ هنگامی که نوک فاز پراکنده از اوریفیس خارج می‌شود فشار در هر دو جریان کاهش می‌یابد و فاز پیوسته به فشردن سطح مشترک ادامه می‌دهد و موجب تشکیل یک رشته بسیار نازک در فاز پراکنده می‌گردد. در مرحله ۵ هنگامی که رشته بسیار نازک می‌گردد نیروی کشش سطحی موجب جدا شدن قطره از فاز پراکنده و بازگشت سطح مشترک به درون ناحیه متمرکزکننده جریان می‌شود.

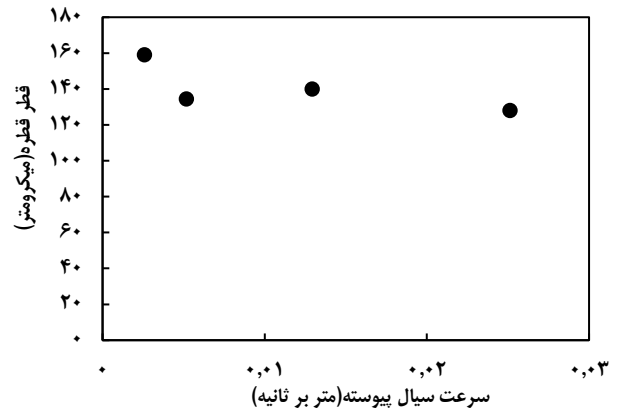
یکی از پارامترهای عملیاتی مهم در فرایند تشکیل قطره دبی فازها است. در این بخش به بررسی تاثیر سرعت فاز پیوسته بر فرایند تشکیل قطره پرداخته شده است. تنش‌های برشی که از سیال پیوسته به مرز مشترک دو سیال وارد می‌شود مهم‌ترین نقش را در غلبه بر نیروهای بین سطحی و ایجاد فرآیند جدایش قطره دارد.

بحث و بررسی نتایج

فرایند تشکیل قطره بدون اعمال تاثیر میدان الکتریکی در شکل ۵ نشان داده شده است. مراحل تشکیل قطره را می‌توان به ۵ مرحله خلاصه کرد که در شکل ۵ نشان داده شده است. در مرحله ۱ هنگامی که فاز پراکنده از ورودی میانی به سمت اوریفیس حرکت کرده است به علت ویسکوزیته بالاتر فاز پراکنده نسبت به فاز پیوسته فشار بالا دست فاز پراکنده بیشتر از فاز پیوسته شده است. در مرحله ۲ با ورود فاز پراکنده در ناحیه متمرکزکننده جریان و مسدود شدن کانال جریان فاز پیوسته، فاز پیوسته برای حفظ دبی ثابت خود باید سرعت خود را افزایش دهد که این امر موجب افزایش فشار در بالا دست جریان فاز پیوسته می‌گردد. فاز پراکنده نیز برای افزایش نفوذ به درون فاز پیوسته به همان میزان افزایش می‌یابد این امر موجب تشکیل یک مخروط در نوک فاز پراکنده می‌گردد.



شکل ۷- تغییرات قطر قطره با سرعت ورودی فاز پراکنده، با سرعت ثابت فاز پیوسته $u_c = 1/293 \times 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$



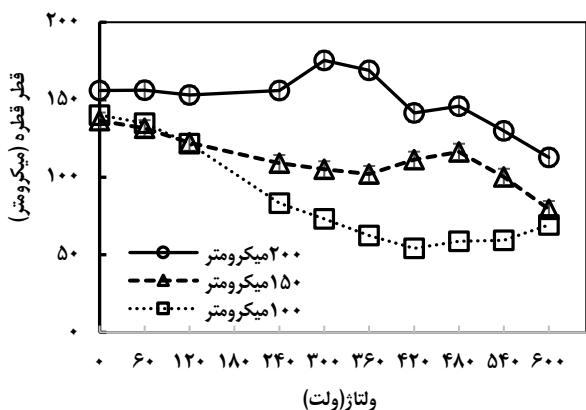
شکل ۶- تغییرات قطر قطره با سرعت سیال پیوسته، با سرعت ثابت فاز پراکنده $u_d = 6/460 \times 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$

در سیستم مشاهده شد. در رژیم اول که ولتاژ اعمالی نسبتاً کم است با افزایش ولتاژ، مولفه‌ی نیروی الکتریکی در جهت x وارد شده به مرز بین دو سیال افزایش می‌یابد و کمک می‌کند تا فرآیند جدایش قطره سریع‌تر اتفاق بیافتد، در نتیجه قطر قطره‌ی تشکیل شده کاهش می‌یابد. در رژیم دوم مولفه‌ی در جهت y نیروی الکتریکی افزایش می‌یابد که این نیرو در جهت خلاف حرکت سیال فاز پراکنده وارد می‌گردد که این امر باعث افزایش فشار در این سیال می‌شود. این افزایش فشار، فرآیند جدایش را سخت‌تر و طولانی‌تر می‌کند، در نتیجه قطر قطره‌ی تشکیل شده افزایش می‌یابد. در رژیم سه وقتی ولتاژ اعمال شده خیلی زیاد شود، افزایش فشار در سیال فاز پراکنده، باعث تغییر شکل در این سیال می‌شود و این سیال در کانال‌هایی که فاز پیوسته در آن‌ها در جریان است پخش می‌شود و قسمت زیادی از این کانال‌ها را پر می‌کند. در این حالت یک جت بسیار نازک در نوک سیال فاز پراکنده ایجاد می‌شود که به علت نازک بودن، قطره سریع از آن جدا می‌شود؛ در نتیجه قطر قطره تولیدی در این رژیم رو به کاهش می‌گذارد.

برای اعمال میدان الکتریکی به سیستم، بین دو ورودی فاز پیوسته یک اختلاف پتانسیل اعمال شد (پیکربندی ۱). به ورودی سمت راست فاز پیوسته یک پتانسیل V_0 اعمال شد و ورودی دیگر فاز پیوسته وصل شده به زمین در نظر گرفته شد. مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار بر اندازه‌ی قطره و محل تشکیل قطره در هندسه جریان کانونی طول ناحیه‌ی متمرکزکننده جریان (H_f) و طول اوریفیس (H_0) است. در بخش اول سه طول ۱۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ میکرومتر برای ناحیه‌ی متمرکزکننده جریان در طول ثابت ۱۵۰ میکرومتر اوریفیس مورد بررسی قرار گرفته شده است. در این قسمت سرعت ورودی فاز پیوسته $1/293 \times 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$ و سرعت

با افزایش سرعت فاز پیوسته در دبی ثابت فاز پراکنده، این نیروها تغییر می‌کند و بر فرآیند تشکیل قطره تاثیر می‌گذارد. سرعت ورودی فاز پراکنده $6/460 \times 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ در نظر گرفته شده است و سرعت فاز پیوسته بین $0/025 - 0/025 \text{ m.s}^{-1}$ تغییر کرده است. قطر قطره برای سرعت‌های مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده شده است با افزایش سرعت فاز پیوسته، در حالی که سرعت فاز پراکنده ثابت در نظر گرفته شود، نیروهای برشی وارد بر مرز بین دو سیال افزایش یافته و در نتیجه قطره سریع‌تر از رشته نازک فاز پیوسته جدا می‌شود و قطر کمتری دارد. در بخش بعدی اثر تغییرات سرعت فاز پراکنده بر فرآیند تشکیل قطره بررسی شده است. سرعت ورودی فاز پیوسته در این بخش ثابت و برابر $1/293 \times 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$ در نظر گرفته شده است و سرعت ورودی فاز پراکنده بین $0/003 - 0/003 \text{ m.s}^{-1}$ تغییر کرده است. نتایج مربوط به این بخش در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده با افزایش سرعت ورودی فاز پراکنده در حالی که سرعت ورودی فاز پیوسته ثابت باشد قطر قطره افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت فاز پراکنده، مقدار بیشتری از این فاز وارد ناحیه متمرکزکننده جریان می‌شود و فرآیند باریک‌شدگی و جدایش قطره دیرتر اتفاق می‌افتد که در نتیجه آن قطره بزرگتری تشکیل می‌شود.

برای اعمال میدان الکتریکی به سیستم و بررسی تاثیرات آن بر فرآیند تشکیل قطره در این قسمت، بین دو ورودی فاز پیوسته یک اختلاف پتانسیل اعمال شد (پیکربندی ۱). به ورودی سمت راست فاز پیوسته یک پتانسیل V_0 اعمال شد و ورودی دیگر فاز پیوسته وصل شده به زمین در نظر گرفته شد. مطابق شکل ۴ سه رژیم مختلف برای قطر قطره‌ی تشکیل شده تحت اثر ولتاژهای بین صفر تا ۶۶۰ ولت



شکل ۸- تغییرات قطر قطره با ولتاژ در طول‌های ۲۰۰، ۱۵۰، ۱۰۰ میکرومتر ناحیه متمرکزکننده جریان، شرایط عملیاتی $Q_c/Q_d = 50$ و اختلاف پتانسیل بین الکترود ۱ و ۲، $H_0 = 150 \mu\text{m}$

و سریع‌تر رخ دادن فرآیند جدایش می‌باشد که منجر به تولید سریع‌تر قطره می‌شود.

در این بخش به بررسی طول اوریفیس و تاثیر آن بر فرآیند تشکیل قطره پرداخته شده است. به این منظور سه طول ۹۰، ۱۵۰، ۲۱۰ میکرومتر برای طول اوریفیس و طول ناحیه متمرکزکننده جریان ۱۰۰ میکرومتر در نظر گرفته شد. در این قسمت نیز مانند بخش اول سرعت ورودی فاز پیوسته $1/293 \times 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$ و سرعت ورودی فاز پراکنده $6/460 \times 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ در نظر گرفته شد. همچنین اختلاف ولتاژی از ۶۰ تا ۶۰۰ ولت بین دو ورودی فاز پیوسته (الکتروود ۱ و ۲) اعمال شد. با توجه به نتایج بدست آمده در شکل ۹ افزایش طول اوریفیس در ولتاژهای مختلف تاثیر چندانی بر قطر قطره تولیدی ندارد.

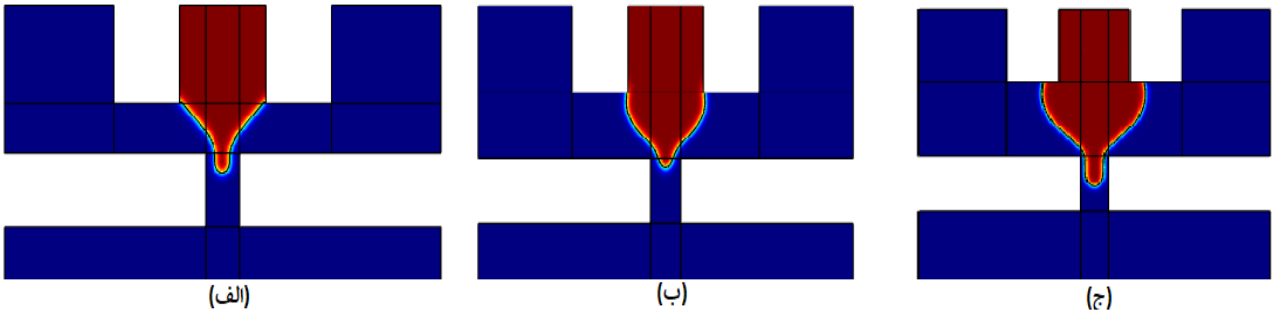
با توجه به ثابت ماندن عرض اوریفیس و سرعت فاز پیوسته نیروهای سطحی ثابت می‌ماند اما با افزایش طول اوریفیس افت فشار درون اوریفیس افزایش می‌یابد و این امر موجب جدا شدن زودتر قطره می‌شود. مطابق نتایج بدست آمده در شکل ۱۰ کاهش طول اوریفیس برای ولتاژهای پایین منجر به تولید قطره بعد از اوریفیس و همچنین برای ولتاژهای بالاتر منجر به تولید قطره درون اوریفیس می‌شود.

در بخش بعدی به بررسی تاثیر مکان الکترودها بر فرآیند تشکیل قطره پرداخته شده است. برای بررسی تاثیر مکان الکترودها بر فرآیند تشکیل قطره مطابق شکل ۱ هفت الکترود در مکان‌های مختلف در نظر گرفته شد و برای ۵ پیکربندی مختلف گزارش شده در جدول ۴، قطر قطره تشکیل شده در ولتاژهای مختلف بررسی شد.

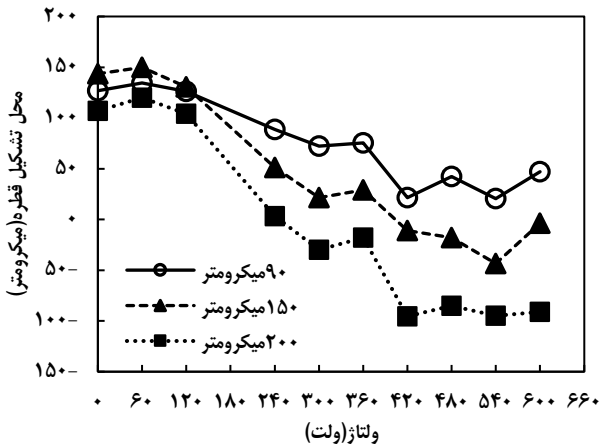
ورودی فاز پراکنده $6/460 \times 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ در نظر گرفته شد. همچنین اختلاف ولتاژی از ۶۰ تا ۶۰۰ ولت بین دو ورودی فاز پیوسته (الکتروود ۱ و ۲) اعمال شد. هنگامی که دو جریان در نقطه تقاطع یکدیگر را ملاقات می‌کنند، فاز پراکنده به تدریج و به علت نیروهای برشی و فشاری فاز پیوسته، به قطره تفکیک می‌شود. وقتی که فاز پراکنده وارد ناحیه‌ی متمرکزکننده جریان می‌شود به تدریج مسیر عبوری فاز پیوسته را مسدود می‌کند. فاز پیوسته به منظور حفظ نرخ ثابت خود باید سرعت خود را افزایش دهد که در نتیجه موجب افزایش فشار در بالادست جریان می‌گردد. هرچه سرعت فاز پیوسته افزایش یابد نیروهای برشی وارد به مرز بین دو سیال در فرآیند تشکیل قطره نیز افزایش می‌یابد و قطره سریع‌تر جدا می‌گردد و به تبع آن قطر کمتری دارد. در شکل ۶ تاثیر افزایش طول ناحیه‌ی متمرکزکننده جریان (H_f) بر قطر قطره نشان داده شده است.

مطابق شکل ۶ برای طول ۱۰۰ میکرومتر قطرات ریزتری تشکیل می‌شود. همچنین برای طول ۱۵۰ میکرومتر و ۲۰۰ میکرومتر یک تغییر رژیم در ولتاژهای بالا مشاهده شده است. در طول ۱۰۰ میکرومتر این تغییر رژیم در محدوده‌ی ولتاژ ۶۰ تا ۶۰۰ ولت مشاهده نشده است. ولی با این وجود قطر قطره تولیدی کوچکتر از دو مورد دیگر است. با توجه به شکل ۷ که در ولتاژ ۳۰۰ ولت برای ۳ طول ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ میکرومتر ناحیه متمرکزکننده جریان ثبت شده است، مشاهده می‌شود هنگامی که طول ناحیه متمرکزکننده کم باشد با توجه به دبی ثابت فاز پیوسته، سرعت این فاز افزایش می‌یابد و مانع کشیده شدن فاز پراکنده به سمت کانال‌های فاز پیوسته و مخروطی شدن آن می‌شود در نتیجه به علت افزایش نیروهای برشی و کشش بین سطحی فاز پیوسته گردنه‌ی نازک‌تری از فاز پراکنده تشکیل می‌شود که منجر به ریزتر شدن قطره می‌شود. اما برای طول‌های بزرگتر ناحیه متمرکزکننده جریان کاهش سرعت فاز پیوسته باعث عبور بیشتر فاز پراکنده و پهن‌تر شدن گردن فاز پراکنده می‌شود در نتیجه فرآیند جدایش قطره دیرتر رخ می‌دهد و قطر قطره تولید شده افزایش می‌یابد. افزایش طول ناحیه‌ی متمرکزکننده جریان همچنین بر زمان تشکیل دو قطره متوالی تاثیرگذار است.

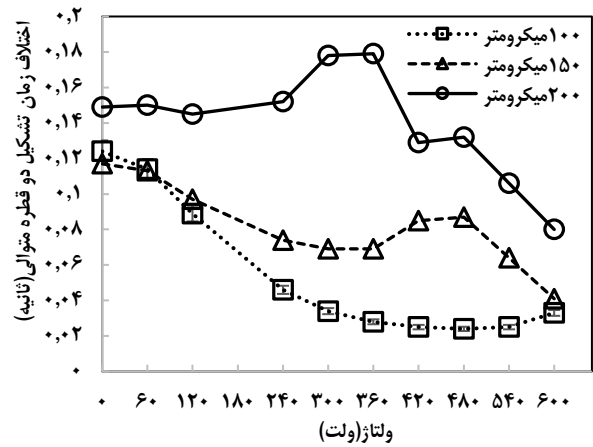
در شکل ۸ تاثیر افزایش طول ناحیه‌ی متمرکزکننده بر زمان تشکیل دو قطره متوالی را نشان داده شده است. با توجه به این نمودار فاصله‌ی زمانی بین دو قطره نیز روند مشابهی با اندازه‌ی قطر تولید شده دارد. در واقع برای طول ۱۰۰ میکرومتر ناحیه متمرکزکننده جریان، فاصله‌ی زمانی بین قطره تولید شده نسبت به طول‌های بیشتر، کاهش می‌یابد دلیل این امر افزایش سرعت فاز پیوسته



شکل ۹- تاثیر طول ناحیه‌ی متمرکزکننده جریان بر نحوه‌ی پخش فاز پراکنده در ولتاژ ۳۰۰ ولت، (الف) ۱۰۰ میکرومتر، (ب) ۱۵۰ میکرومتر، (ج) ۲۰۰ میکرومتر، شرایط عملیاتی $Q_c/Q_d = 50$ و اختلاف پتانسیل بین الکترود ۱ و ۲، $H_o = 150\mu m$



شکل ۱۰- تغییرات زمان تشکیل دو قطره متوالی با ولتاژ در طول‌های ۱۵۰، ۹۰، ۲۱۰ میکرومتر اوریفیس، شرایط عملیاتی $Q_c/Q_d = 50$ و اختلاف پتانسیل بین الکترود ۱ و ۲، $H_f = 150\mu m$

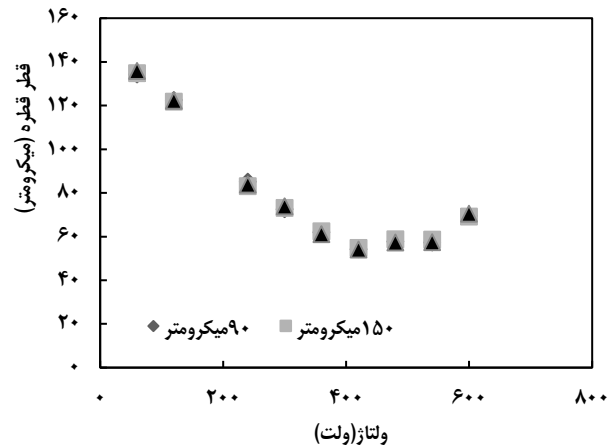


شکل ۱۱- تغییرات زمان تشکیل دو قطره متوالی با ولتاژ در طول‌های ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ میکرومتر ناحیه متمرکز کننده جریان، شرایط عملیاتی $Q_c/Q_d = 50$ و اختلاف پتانسیل بین الکترود ۱ و ۲، $H_o = 150\mu m$

جدول ۴- پیکربندی الکترودها

پیکربندی الکترود	حالت اول	حالت دوم	حالت سوم	حالت چهارم	حالت پنجم
الکترود مثبت	+۱	+۳	+۳،۴	+۳،۴	+۱،۲
الکترود منفی	-۲	-۴	-۵،۶	-۷	-۷

برای پیکربندی‌های متفاوت الکترود گزارش شده است. همچنین برای سهولت نمودار مربوط به این تغییرات در شکل ۱۱ رسم شده است. مطابق نتایج بدست آمده مشاهده شده است که وقتی فاصله‌ی الکترودها از یکدیگر کم باشد به علت افزایش نیروی الکتریکی وارد شده به مرز مشترک دو سیال قطره کوچکتری تشکیل می‌شود اما در ولتاژهای بالا با توجه به اینکه مولفه‌ی در جهت عمود نیروی الکتریکی افزایش می‌یابد، مانع از تشکیل قطره در حالت‌های ۲، ۳، ۴ می‌گردد. در واقع با انتخاب پیکربندی مناسب می‌توان در ولتاژهای پایین‌تر قطره کوچکتری تشکیل داد.

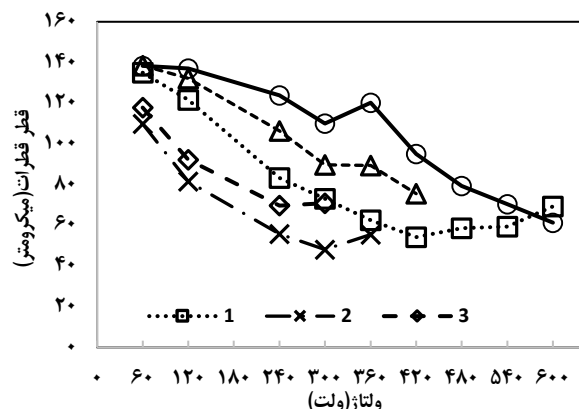
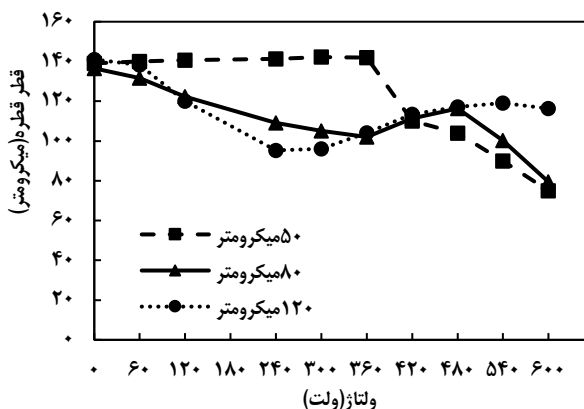


شکل ۱۲- تغییرات قطر قطره با ولتاژ در طول‌های ۹۰، ۱۵۰، ۲۱۰ میکرومتر اوریفیس، شرایط عملیاتی $Q_c/Q_d = 50$ و اختلاف پتانسیل بین الکترود ۱ و ۲، $H_f = 150\mu m$

در جدول ۵ نتایج مربوط به تغییرات قطر در ولتاژهای ۰ تا ۶۰۰ ولت

جدول ۵- نتایج مربوط به تغییرات قطر قطره در پیکربندی‌های مختلف

ولتاژ(ولت)									حالت
۶۰۰	۵۴۰	۴۸۰	۴۲۰	۳۶۰	۳۰۰	۲۴۰	۱۲۰	۶۰	
۶۹/۲	۵۹/۴	۵۸/۶	۵۴/۲	۶۲/۵	۷۳/۱	۸۳/۲	۱۲۱/۶	۱۳۴/۹	۱
عدم تشکیل قطره				۵۵/۴	۴۸/۱	۵۵/۷	۸۱/۵	۱۰۹/۸	۲
عدم تشکیل قطره				۷۰/۸	۹۶/۶	۹۲/۳	۱۱۷/۹	۱۳۸/۵	۳
عدم تشکیل قطره			۷۵/۵	۸۹/۴	۸۹/۷	۱۰۶/۴	۱۳۲/۱	۱۳۸/۵	۴
۶۱/۳	۷۰/۴	۷۹/۴	۹۵	۱۲۰/۲	۱۱۰	۱۲۴	۱۳۷	۱۳۸/۳	۵



شکل ۱۴- تغییرات قطر قطره با ولتاژ در عرض‌های ۵۰، ۸۰، ۱۲۰ میکرومتر اوریفیس، شرایط عملیاتی $Q_c/Q_d = 50$ و اختلاف پتانسیل بین الکترود ۱ و ۲، $H_f = 150\mu m$

شکل ۱۳- نتایج مربوط به تغییرات قطر قطره با ولتاژ در پیکربندی‌های مختلف، شرایط عملیاتی $Q_c/Q_d = 50$ ، $H_o = 150\mu m$ و $H_f = 150\mu m$

به علت اینکه فضا برای خطوط جریان فاز پیوسته افزایش می‌یابد و با کاهش سرعت فاز پیوسته فشار در این ناحیه افزایش می‌یابد در نتیجه قطر قطره کاهش می‌یابد. با افزایش ولتاژ برای عرض ۵۰ میکرومتر اوریفیس قطر کوچکتری تشکیل می‌شود. با افزایش نیروی الکتریکی فشار فاز پراکنده افزایش می‌یابد و شکل گردن فاز پراکنده تغییر کرده و مانع مسدود شدن دهانه می‌شود و قطر قطره کاهش پیدا می‌کند. برای ولتاژهای بالا و عرض اوریفیس ۱۲۰ میکرومتر به علت اختلاف فشار دم وسیع تری شکل می‌گیرد و این امر موجب افزایش قطر قطره می‌شود.

نتیجه‌گیری

فرآیند تشکیل ریزقطره هنگامی می‌تواند به صورت موفقیت آمیز در آزمایش‌های زیستی و شیمیایی کاربرد داشته باشد که تاثیر پارامترهای هندسی، عملیاتی و خواص فیزیکی و شیمیایی سیالات پراکنده عبوری افزایش می‌یابند و قطر قطره افزایش می‌یابد در حالی که لحاظ گردد. در نتیجه بررسی هر یک از این پارامترها و تاثیرات آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش به بررسی اثر

در بخش بعدی به بررسی تاثیر عرض اوریفیس بر فرآیند تشکیل قطره پرداخته شده است. به این منظور سه طول ۵۰، ۸۰، ۱۲۰ میکرومتر برای عرض اوریفیس در نظر گرفته شد. در این قسمت نیز مانند بخش‌های قبل سرعت ورودی فاز پیوسته $1/293 \times 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$ و سرعت ورودی فاز پراکنده $6/460 \times 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ در نظر گرفته شد. همچنین اختلاف ولتاژی از ۶۰ تا ۶۰۰ ولت بین دو ورودی فاز پیوسته (الکترود ۱ و ۲) اعمال شد. در این قسمت طول ناحیه متمرکزکننده جریان و طول اوریفیس ثابت و به ترتیب برابر ۱۵۰ و ۱۵۰ میکرومتر در نظر گرفته شد. در شکل ۱۴ نتایج بدست آمده از تغییرات قطر قطره با عرض اوریفیس در ولتاژهای مختلف نشان داده شده است.

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد برای ولتاژهای پایین هنگامی که عرض اوریفیس افزایش پیدا می‌کند قطر قطره تولید شده بزرگتر می‌شود. این در حالی است که برای ولتاژهای میانی با توجه به شکل مخروطی روغن در ناحیه متمرکزکننده جریان هنگامی که عرض دهانه اوریفیس کوچک باشد باعث انسداد کانال می‌شود و باعث عبور کمتر فاز پیوسته می‌شود و این عمل مانع فشرده سازی گردن می‌شود و حجم سیال در ولتاژهای میانی برای عرض ۱۲۰ میکرومتر اوریفیس با افزایش ولتاژ

فهرست علائم اختصاری

حروف انگلیسی

D	قطر قطره (μm)
E	میدان الکتریکی (V m^{-1})
F_{ef}	نیروی الکتریکی (N)
F_{st}	نیروی کشش بین سطحی (N)
H_f	طول ناحیه متمرکز کننده جریان (μm)
H_o	طول اوریفیس (μm)
P	فشار سیال (Pa)
Q_d	دبی فاز پراکنده (mL hr^{-1})
Q_c	دبی فاز پیوسته (mL hr^{-1})
t	زمان (s)
T_{mw}	تنش ماکسول
u	سرعت سیال (m.s^{-1})
V	اختلاف پتانسیل (v)

حروف یونانی

ε	گذردهی الکتریکی
μ	ویسکوزیته دینامیکی (mPa s)
ρ	چگالی سیال (kg m^{-3})
ε_{ls}	ضخامت مرز (μm)
γ_{ls}	پارامتر پایدارسازی (m s^{-1})
ν	ویسکوزیته سینماتیکی (m^2s^{-1})
σ	ضریب کشش سطحی (N m^{-1})
δ	تابع دلتای دیراک

پارامتر هندسی طول ناحیه متمرکز کننده جریان و طول اوریفیس و عرض اوریفیس بر فرآیند تشکیل قطره و پارامترهای عملیاتی تاثیر دبی فاز پیوسته و پراکنده و مکان الکتروود بر قطر قطره تشکیل شده پرداخته شده است. بررسی دبی فاز پیوسته نشان داد که با افزایش دبی فاز پیوسته هنگامی که دبی فاز پراکنده ثابت است قطر قطره کاهش یافت. بررسی دبی فاز پراکنده نیز نشان داد هنگامی که دبی فاز پراکنده افزایش یافت با توجه به دبی ثابت فاز پیوسته حجم بیشتری از فاز پراکنده وارد دهانه اوریفیس می‌شود و در نتیجه قطره بزرگتری تشکیل می‌شود. نتایج بدست آمده در بررسی طول ناحیه متمرکز کننده جریان نشان داد با کاهش طول ناحیه متمرکز کننده جریان قطر قطره تشکیل شده کاهش می‌یابد و برای طول ۱۰۰ میکرومتر ناحیه متمرکز کننده با افزایش ولتاژ تغییر رژیم در قطر قطره بوجود نمی‌آید. همچنین بررسی زمان تشکیل دو قطره متوالی نیز نشان داد با کاهش طول ناحیه متمرکز کننده جریان اختلاف زمان تشکیل دو قطره کاهش می‌یابد و با افزایش ولتاژ قطره با سرعت بیشتری تشکیل می‌شوند. بررسی طول اوریفیس نشان داد که افزایش طول اوریفیس تاثیر چندانی بر قطر قطره تشکیل شده ندارد. بررسی طول اوریفیس همچنان نشان داد که با افزایش طول اوریفیس افت فشار درون اوریفیس افزایش می‌یابد و این امر موجب جدا شدن زودتر قطره می‌شود به طوری که برای طول ۲۱۰ میکرومتر اوریفیس جدایش قطرات درون اوریفیس اتفاق می‌افتد در حالی که برای طول ۹۰ میکرومتر قطره بعد اوریفیس تشکیل می‌شوند که این امر کنترل قطره را برای مراحل بعدی راحت تر می‌کند. بررسی عرض اوریفیس برای سه عرض ۵۰، ۸۰، ۱۲۰ میکرومتر نشان داد برای ولتاژهای پایین افزایش دهانه اوریفیس باعث تشکیل قطره بزرگتر می‌گردد. برای ولتاژهای میانی با افزایش دهانه قطر قطره کاهش می‌یابد. همچنین در ولتاژهای بالا برای عرض ۱۲۰ میکرومتر اوریفیس به علت افزایش اختلاف فشار و وسیع تر شدن دم فاز پراکنده قطر قطره افزایش یافت. نتایج بدست آمده در قسمت پیکربندی الکتروودها نشان داد وقتی فاصله الکترودها از یکدیگر کم باشد به علت افزایش نیروی الکتریکی وارد شده به مرز مشترک دوسیال قطره کوچکتری تشکیل می‌شود. در واقع با انتخاب پیکربندی مناسب می‌توان در ولتاژهای پایین قطر کوچک را تولید کرد که این قطر از قطر در برخی از پیکربندی‌ها نیاز به اعمال ولتاژهای بسیار بالا دارد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۴

مراجع

- [1] Haghghinia A., Movahedirad S., Rezaei A.K., Mostoufi N., "On-Chip Mixing of Liquids with High-Performance Embedded Barrier Structure," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **158**: 119967 (2020).
- [2] Abalde-Cela S., Taladriz-Blanco P., de Oliveira M. G., Abell C., "Droplet Microfluidics for the Highly Controlled Synthesis of Branched Gold Nanoparticles," *Scientific reports*, **8(1)**: 1-6 (2018).
- [3] Fery A., Dubreuil F., Möhwald H., "Mechanics of Artificial Microcapsules," *New journal of Physics*, **6(1)**: 18 (2004).
- [4] Zhang X., Stefanick S., Villani F.J., "Application of Microreactor Technology in Process Development," *Organic process research & development*, **8(3)**: 455-460 (2004).
- [5] Zhu P., Wang L., "Passive and Active Droplet Generation with Microfluidics: A Review," *Lab on a Chip*, **17(1)**: 34-75 (2017).
- [6] Pekin D., Skhiri Y., Baret J-Ch., Le Corre D., Mazutis L., Ben Salem Ch., Millot F., El Harrak A., Brian Hutchison J., Larson J.W., Link D.R., Laurent-Puig P., Griffiths A. D., Taly V., "Quantitative and Sensitive Detection of Rare Mutations Using Droplet-Based Microfluidics," *Lab on a Chip*, **11(13)**: 2156-2166 (2011).
- [7] Xi H.-D., Zheng H., Guo W., Gañán-Calvo A.M., Ai Y., Tsao Ch-W., Zhou J., Li W., Huang Y., Nguyen N-T., Tan S.H., "Active Droplet Sorting in Microfluidics: A Review," *Lab on a Chip*, **17(5)**: 751-771 (2017).
- [8] Nie Zh., Seo M.S., Xu Sh., Lewis P.C., Mok M., Kumacheva E., Whitesides G.M., Garstecki P., Stone H.A., "Emulsification in a Microfluidic Flow-Focusing Device: Effect of the Viscosities of the Liquids," *Microfluidics and Nanofluidics*, **5(5)**: 585-594 (2008).
- [9] Gu Z., Liow J.-L., "Micro-Droplet Formation with Non-Newtonian Solutions in Microfluidic T-Junctions with Different Inlet Angles," in *2012 7th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS)*, IEEE, 423-428 (2012).
- [10] Sivasamy J., Wong T.-N., Nguyen N.-T., Kao L.T.-H., "An Investigation on the Mechanism of Droplet Formation in a Microfluidic T-Junction," *Microfluidics and nanofluidics*, **11(1)**: 1-10 (2011).
- [11] Taassob A., Manshadi M.K.D., Bordbar A., Kamali R., "Monodisperse Non-Newtonian Micro-Droplet Generation in a Co-Flow Device," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, **39(6)**: 2013-2021 (2017).
- [12] Li L. Zhang C., "Electro-Hydrodynamics of Droplet Generation in a Co-Flowing Microfluidic Device Under Electric Control," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **586**: 124258 (2020).
- [13] Hatami M., Ramiar A., Ranjbar A.-A. J. C. E., Intensification P.-P., "Numerical Assessment of Different Parameters Affecting Droplet Production in an Electro-Hydrodynamic Flow Focusing Device," **131**: 190-202 (2018).

- [14] Rahimi M., Khorrami A.S., Rezai P.J.C., Physicochemical S.A., Aspects E., "Effect of Device Geometry on Droplet Size in Co-Axial Flow-Focusing Microfluidic Droplet Generation Devices," **570**: 510-517 (2019).
- [15] Yeh C.-H., Lee M.-H., Lin Y.-C. J. M., nanofluidics, "Using an Electro-Spraying Microfluidic Chip to Produce Uniform Emulsions Under a Direct-Current Electric Field," **12(1-4)**: 475-484 (2012).
- [16] Tan S.H., Semin B., Baret J.-C. J. L. o. a. C., "Microfluidic Flow-Focusing in Ac Electric Fields," **14(6)**: 1099-1106 (2014).
- [17] Li Y., Jain M., Ma Y., Nandakumar K. J. S. M., "Control of the Breakup Process of Viscous Droplets by an External Electric Field Inside a Microfluidic Device," **11(19)**: 3884-3899 (2015).
- [18] Yin S., Huang Y., Wong T. N., Ooi K. T. J. I. J. o. M. F., "Dynamics of Droplet Formation in Flow-Focusing Microchannel under AC Electric Fields," 103212 (2020).
- [19] Olsson E., Kreiss G., "A Conservative Level Set Method for Two Phase Flow," *Journal of computational physics*, **210(1)**: 225-246 (2005).
- [20] Li Y., Jain M., Ma Y., Nandakumar K., "Control of the Breakup Process of Viscous Droplets by an External Electric Field Inside a Microfluidic Device," *Soft Matter*, **11(19)**: 3884-3899 (2015).