

# بررسی تجربی و شبیه‌سازی تشکیل قطرات با اندازه‌ی کنترل شده در ریز تراشه‌ی مبتنی بر لوله موئین

مه‌رناز اویسی (دانشجوی دکتری)

امیرحسین کرمی (دانشجوی کارشناسی)

وحید بازارگان\* (استادیار)

دانشکده مکانیک، دانشگاه تهران

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۴۰۳)  
دوره ۴۰، شماره ۲، صص. ۷۶-۸۴، (پژوهشی)

این مطالعه بر تولید دقیق قطرات در یک دستگاه ریزسیالی مبتنی بر قطره متمرکز است، به طوری که امولسیون تک‌پراکنده‌ی روغن در آب با اندازه قطرات کنترل شده در آن تولید می‌شود. ضرورت این تحقیق در توانایی تولید قطرات یکنواخت و کنترل شده در دستگاه‌های ریزسیالی با کاربردهای گسترده در داروسازی، تولید مواد پیشرفته و کشت سلولی است. این روش می‌تواند مشکلات موجود در روش‌های مرسوم مانند عدم تکرارپذیری و نیاز به تجهیزات پیچیده را با استفاده از فناوری چاپ سه‌بعدی برای ساخت ریزتراشه‌ها و کنترل دقیق پارامترهای تولید حل کند. ابتدا با بهره‌گیری از شبیه‌سازی‌های عددی دو سیاله انتخاب پارامترهای هندسی ریزتراشه برای ایجاد امولسیون سنجیده شده و سپس نتایج حاصله از طریق آزمایش‌های تجربی ساخت امولسیون توسط ریزتراشه تأیید شدند. استفاده از چاپگر سه‌بعدی امکان ساخت تکرارپذیر قالب این ریزتراشه را ممکن ساخته است. در بخش تجربی، با بررسی اثرات افزودنی‌های مختلف به فاز آبی پیوسته و نرخ‌های جریان فاز پراکنده متفاوت، و نیز پارامترهای هندسی دستگاه ریزسیالی، شرایط بهینه برای تولید قطرات یکنواخت شناسایی شده است. نتایج نشان می‌دهد که توسط فاصله‌ی بین دو لوله‌ی موئین به کار رفته، دبی فاز پراکنده و نوع افزودنی فاز پیوسته، اندازه قطرات و فرکانس تولید آنها را می‌توان کنترل کرد و امولسیون مطلوب با ابعاد قطره ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ میکرومتر تولید نمود.

واژگان کلیدی: تشکیل قطرات، شبیه‌سازی عددی، ساخت ریز تراشه لوله موئین.

## ۱. مقدمه

سامانه‌ها به دلیل پیکربندی متقارن محوری، فاز پراکنده با دیواره‌های لوله موئین بیرونی تماس ندارد و اثرات سطحی در آنها کاهش یافته است<sup>[۱]</sup>. با این وجود مسائلی نیز کماکان در این حوزه مطرح است. تکرارپذیری در ساخت آنها به دلیل نیاز به هم‌محور کردن لوله‌های موئین چالش‌برانگیز بوده و گستردگی استفاده از این نوع ریزتراشه را محدود کرده است. همچنین امکان تولید قطرات کوچکتر از ۱۰۰ میکرون با نرخ بالاتر از ۱ کیلوهرتز همانند آنچه در سامانه‌های مسطح مطرح است در آنها وجود ندارد.

روش مرسوم ساخت تراشه‌های ریزسیالاتی در دهه گذشته لیتوگرافی نرم بوده که این روش علاوه بر هزینه زیاد مواد اولیه و تجهیزات آن، زمانبر است. استفاده از چاپگر سه‌بعدی به عنوان روشی جهت تسهیل ساخت ریزتراشه‌ها مطرح است. امروزه دو دیدگاه نسبت به استفاده از چاپگر سه‌بعدی در روش‌های ساخت ریزتراشه ریزسیالاتی وجود دارد. دیدگاه اول استفاده از چاپگر سه بعدی به منظور ساخت خود کانال‌ها که لزوم آن استفاده از مواد

در ریزسیالات مبتنی بر قطره<sup>۱</sup>، امکان تولید کنترل شده قطرات دلخواه وجود دارد. از آنجایی که جریان داخل کانال‌های ریزتراشه‌ها آرام است، این ویژگی منجر به ساخت امولسیون<sup>۲</sup> بسیار تک پراکنده با کنترل دقیق بر ابعاد قطرات می‌شود<sup>[۱]</sup>. دو پارامتر حائز اهمیت در تولید امولسیون‌ها، ابعاد و همگنی ابعادی قطرات می‌باشند. در صورتی که ضریب تغییرات توزیع ابعادی قطرات (که به عنوان انحراف استاندارد توزیع اندازه آنها تقسیم بر میانگین اندازه قطرات تعریف می‌شود) و معیاری از چندپراکنده‌ی به جهت ارزیابی تفرق قطرات است، کمتر از ۲۵ درصد باشد، امولسیون را یکنواخت در نظر می‌گیرند<sup>[۲]</sup>. یکی از روش‌های مرسوم در تولید قطرات، استفاده از لوله‌های موئین به منظور ساخت تراشه‌های قطره‌ساز است. این ریزتراشه‌ها نخستین بار توسط اومبانهوار و همکاران در سال ۲۰۰۰ معرفی شده<sup>[۳]</sup> و تا به امروز موضوع مطالعات گوناگونی بوده است. در این نوع

\*نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۷، تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۰۷/۱۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۳.

استناد به این مقاله:

اویسی، مه‌رناز، کرمی، امیرحسین، و بازارگان، وحید، ۱۴۰۳. بررسی تجربی و شبیه‌سازی تشکیل قطرات با اندازه‌ی کنترل شده در ریز تراشه‌ی مبتنی بر لوله موئین، مهندسی مکانیک شریف، ۴۰(۲)، صص. ۷۶-۸۴. DOI: 10.24200/j40.2024.64794.1714.

<sup>۱</sup> Droplet Microfluidics

<sup>۲</sup> Emulsion

در چنین شرایطی می‌توان تغییرات ضریب کشش سطحی مماس بر جهت فصل مشترک را نادیده گرفت. با فرض خصوصیات همدمای جریان مارانگونی ترموکاپیلاری<sup>۱</sup> نیز حذف شده است. بنابراین، ضریب کشش سطحی ثابت فرض می‌شود. با در نظر گرفتن مفروضات فیزیکی در نظر گرفته شده، می‌توان گفت جریان سیالات توسط معادلات ناویر-استوکس کنترل می‌شود.

مینای شبیه‌سازی عددی استفاده از روش تنظیم سطح در نرم‌افزار تجاری کامسول<sup>۲</sup> به منظور مطالعه نحوه رفتار دو فاز در ریزتراشه سیالاتی می‌باشد. در این بخش توضیح مختصری در رابطه با معادلات حاکم بر روش تنظیم سطح و نحوه حل این معادلات در این نرم‌افزار ارائه می‌شود. معادله پیوستگی به فرم معادله (۱) در نظر گرفته شده و در معادله ناویر استوکس (معادله (۲))، نیروی کشش سطحی در معادله سیالات چندفازه نقشی کلیدی دارد. این معادله با فرض غلظت و ویسکوزیته ثابت برای سیالات به شکل معادله (۳) نوشته شده است. در این روش  $\psi$  تابع تنظیم سطح بوده که توسط معادله انتقال (۳) اداره می‌شود. روش تنظیم سطح از مدل نیروی کشش سطحی برکبیل<sup>۱۵</sup> برای تعیین نیروی مرز مشترک استفاده می‌کند. تنها میدان سرعت سیال باعث حرکت تابع تنظیم سطح  $\psi$  می‌شود.  $\rho$  چگالی و  $V$  بردار سرعت است.  $\mathcal{E}$  در این فرمول عامل کنترل‌کننده ضخامت مرز مشترک می‌باشد و  $\gamma$  پارامتری ثابت کنترل‌کننده‌ی شروع مجدد تابع تنظیم سطح است.

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

در معادله (۲)  $F_{sf}$  نمایانگر نیروهای حجمی است. که با استفاده از مدل برکبیل نیروی کشش سطحی در این ترم گنجانده شده است. پارامتر مهم ضریب کشش بین سطحی توسط  $\sigma$  در نیروی حجمی لحاظ می‌شود (معادله (۴)). در این فرمول،  $\delta$  تابع دلتای دیراک و  $\kappa$  انحناى مرز است که هر یک بر طبق معادلات معرفی شده (۵ و ۶) برحسب تابع تنظیم سطح محاسبه می‌گردد.  $\rho$  چگالی و  $\mu$  ویسکوزیته به ترتیب از معادلات (۷) و (۸) محاسبه می‌شود تا در معادله (۲) استفاده شوند.

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 v + F_{sf} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + \nabla \cdot (v\psi) = \gamma \nabla \cdot \left[ \varepsilon \nabla \psi - \psi(1-\psi) \frac{\nabla \psi}{|\nabla \psi|} \right] \quad (3)$$

$$F_{sf} = \sigma \kappa(\psi) \delta(\psi) \nabla \psi \quad (4)$$

$$\kappa(\psi) = \nabla \cdot \frac{\nabla \psi}{|\nabla \psi|} \quad (5)$$

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

$$\rho = \rho_c + (\rho_d - \rho_c)\psi \quad (7)$$

$$\mu = \mu_c + (\mu_d - \mu_c)\psi \quad (8)$$

در رویکرد تقسیم اپراتور در هر گام زمانی، ابتدا معادلات تراکم ناپذیر ناویراستوکس با سطح تماس ثابت مشخص حل شده، سپس با استفاده از میدان سرعت محاسبه شده، تقریب جدید سطح تماس مشخص شود. با یافتن

شفاف و دقت بالای چاپگر سه‌بعدی است<sup>[۵] و [۶]</sup>. دیدگاه دوم استفاده از چاپگر سه‌بعدی به منظور ساخت قالب کانال‌های ریزتراشه می‌باشد؛ پس از ساخت قالب همانند روش لیتوگرافی نرم، طرح کانال بر روی قالب به صورت برجسته به وجود می‌آید. این روش علاوه بر لزوم دقت بالای چاپگر سه‌بعدی، نیازمند پس‌پردازش نیز می‌باشد و اگر این پس‌پردازش به صورت صحیح انجام نگردد روند ساخت زیزتراشه به مشکل خواهد خورد<sup>[۷] و [۸]</sup>. یکی از اهداف پژوهش فعلی، ساخت قالب برای ریزتراشه‌های مبتنی بر لوله موئین است به گونه‌ای که در قالب هم‌محوری لوله‌های موئین پیش‌بینی شده باشد.

از سویی دیگر، شبیه‌سازی عددی نقش مهمی در بررسی و تحلیل رفتار قطرات در ریزتراشه‌ها ایفا می‌کند. با استفاده از مدل‌های ریاضی و الگوریتم‌های محاسباتی، می‌توان شرایط مختلف تشکیل و حرکت آنها را شبیه‌سازی کرد. روش‌های معمول شبیه‌سازی تشکیل قطرات در سامانه‌های ریزسیالاتی، به عنوان یک سیستم دو و یا چند فاز، روش تنظیم سطح، کسر حجمی سیال، میدان فازی و یا روش شبکه بولتزمن می‌باشد<sup>[۹]</sup>. روش تنظیم سطح توسط هرناندز و همکاران برای شبیه‌سازی تشکیل امولسیون ساده در هندسه مسطح<sup>[۱۰]</sup> و نیز توسط اویسی و همکاران برای شبیه‌سازی تشکیل امولسیون دو و چندگانه در هندسه مسطح مورد استفاده قرار گرفت<sup>[۱۱]</sup>. روش کسر حجمی سیال نیز در این نوع پژوهش استفاده شده است، به عنوان مثال، وی و همکاران نیروهای هیدرودینامیکی با استفاده از آن تشکیل قطرات را در هندسه مسطح شبیه‌سازی کردند<sup>[۱۲]</sup>. در حوزه تشکیل قطرات در ریزتراشه‌های لوله موئین شیشه‌ای، نبوی و همکاران در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷ مطالعات گسترده‌ای مبتنی بر روش کسر حجمی سیال انجام داده و دینامیک تشکیل قطرات چندلایه و نیز چندهسته‌ای در این ریزتراشه‌ها را مورد بررسی قرار دادند<sup>[۱۳] و [۱۴]</sup>.

در این پژوهش علاوه بر معرفی یک روش ساخت ریزتراشه‌های موئین به شکل تکرارپذیر، هندسه‌ی تولیدی در نرم‌افزار کامسول مدل شده و با استفاده از روش تنظیم سطح دینامیک تشکیل قطرات روغن در آب در ریزتراشه طراحی شده بررسی شده است، به گونه‌ای که فاصله‌ی هندسی (بین لوله موئین ورودی و خروجی) مناسب جهت تولید قطرات از نتایج شبیه‌سازی به دست آید. پس از آن و در بخش تست آزمایشگاهی، تاثیر افزودنی‌ها به فاز پراکنده بر فرکانس و ابعاد قطرات تولیدی مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان روشی آسان و تکرار پذیر جهت تولید امولسیون روغن در آب در محدوده ابعاد قطرات ۵۳۰ الی ۷۵۰ میکرومتر به روش ریزسیالاتی مورد استفاده قرار گیرد.

## ۲. شبیه‌سازی عددی

نخست لازم است مفروضات فیزیکی مورد نیاز برای استخراج یک مدل ریاضی مناسب برای مسئله مشخص شود. یک جریان آرام از دو سیال غیرقابل امتزاج در نظر گرفته می‌شود. سیالات نیوتنی و تراکم ناپذیر فرض می‌شوند. چگالی و ویسکوزیته دارای یک ناپیوستگی پرش در سطح مشترک هستند. فرض می‌شود که رابط دارای کشش سطحی است و هیچ انتقال جرمی از طریق رابط وجود ندارد (یعنی سطح مشترک غیرقابل نفوذ است)، و هیچ گونه انتقال جرمی ناشی از وجود مواد فعال سطحی در طول فصل مشترک وجود ندارد.

<sup>۱</sup>Thermocapillary Marangoni

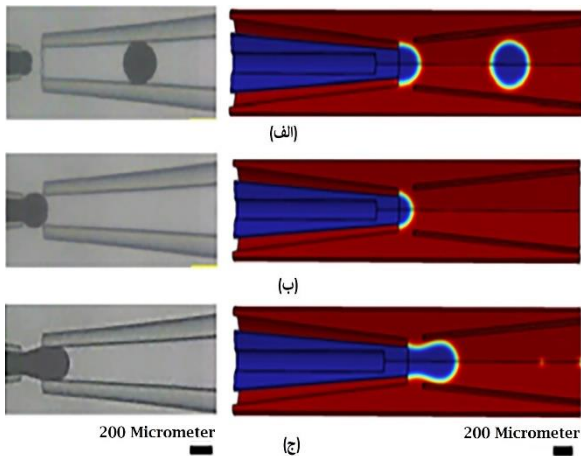
<sup>۲</sup> COMSOL Multiphysics

توسط دستگاه ژیکان CAG-۲۰ اندازه گرفته شده، ۵ میلی نیوتون بر متر نظر گرفته شده است. جدول ۳ بیانگر آزمون استقلال حل از مش بندی است که بر مبنای قطر معادل قطرات محاسبه شده است. قطر معادل بر مبنای مساحت هر قطره مطابق معادله (۹) به دست آمده است. بر مبنای اطلاعات این جدول به منظور اطمینان از حل کارآمد و دقیق از بزرگترین سایز مش ۶۰ میکرومتر استفاده شده است.

$$D_{eff} = \sqrt{\frac{4S_d}{\pi}} \quad (9)$$

## ۲.۲. اعتبار سنجی مدل سازی عددی

به منظور اعتبار سنجی حل، شبیه سازی یک بار براساس هندسه و خواص سیال پژوهش هو و همکاران<sup>[۱۸]</sup> انجام شده است. فاز پراکنده گالینستن (نوعی فلز مایع) بوده و فاز خارجی محلول آبی از گلسیرویل و (PVA پنج درصد وزنی) با نسبت وزنی ۱۰ به ۳ است. خواص این فازها مستخرج از مطالعه ی هو و همکاران، در شبیه سازی اعمال شده است. دبی فازهای پراکنده و پیوسته نیز منطبق بر این مطالعه (به ترتیب ۱۰ و ۹۵ میکرو لیتر بر دقیقه) انتخاب شده است. در شکل (۲)، نتایج حاصله در شرایط یکسان مقایسه شده اند. قطر قطره



شکل ۲. مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی هو و همکاران<sup>[۱۸]</sup> (سمت چپ) و شبیه سازی پژوهش فعلی (سمت راست) در تشکیل قطرات در ریز تراشه لوله مویین. مقیاس معادل ۲۰۰ میکرومتر است

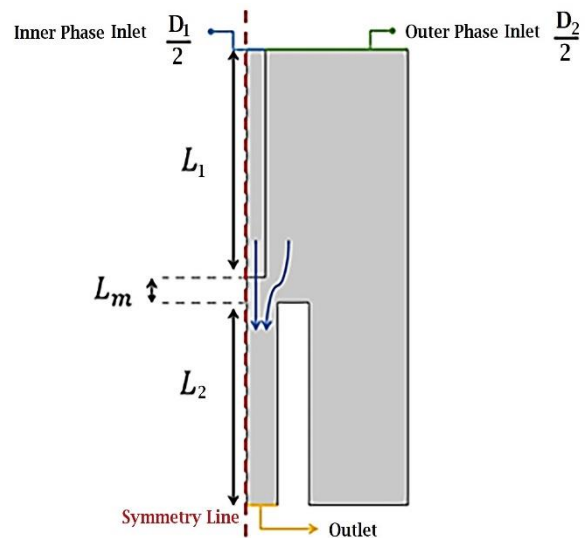
جدول ۳: آمار مربوط به آزمون استقلال حل از شبکه بندی.

بزرگترین سایز مش (میکرومتر)	تعداد المانها	کل قطر معادل (میکرومتر)	میانگین
۶۰	۱۴۳۹۰۰	۵۱۰	
۸۰	۸۰۷۲۰	۵۱۰.۴	
۱۰۰	۵۱۳۳۰	۵۱۰.۹	
۱۲۰	۳۵۵۵۰	۵۱۴.۱	
۱۴۰	۲۴۰۷۰	۵۲۷.۶	

موقعیت سطح تماس جدید، می توانیم نرمال و انحنای آن را محاسبه کرده، و بنابراین، نیروی کشش سطحی و ضرایب چگالی/ویسکوزیته را برای استفاده در مرحله زمانی بعدی در معادلات ناویر-استوکس محاسبه می شود. با توجه به اهمیت آبدوستی کانال در محل برش سیال فاز پراکنده، برای تابع تنظیم سطح شرایط دیواره ی خیس شده اعمال و در این قسمت با استفاده از زاویه تماس مرز مشترک دو سیال با دیواره معادل صفر درجه، آبدوستی کانال تعریف می شود.

## ۱.۲. ناحیه محاسباتی

هندسه ساده شده و متقارن محوری از ریز تراشه ی طراحی شده در شکل (۱) نمایش داده شده است. قطر لوله مویین فاز پراکنده  $D_1$  و قطر لوله مویین فاز پیوسته  $D_2$  می باشد. طول لوله مویین داخلی و خارجی به ترتیب  $L_1$  و  $L_2$  بوده و فاصله ی بین دو لوله مویین  $L_m$  نام گذاری شده است. ورودی به صورت سرعت نرمال برای فاز پراکنده و فاز خارجی در نظر گرفته شده و به ازای دبی های متفاوت تغییر یافته است. در انتهای لوله ی مویین خارجی، فشار صفر فرض می شود. برای فاز پیوسته محلول آب و ۱ درصد وزنی سدیم دودسیل سولفات و برای فاز پراکنده روغن معدنی<sup>۱</sup> در نظر گرفته شده است (مطابق جداول ۱ و ۲). کشش بین سطحی بین دو فاز آب و روغن، که

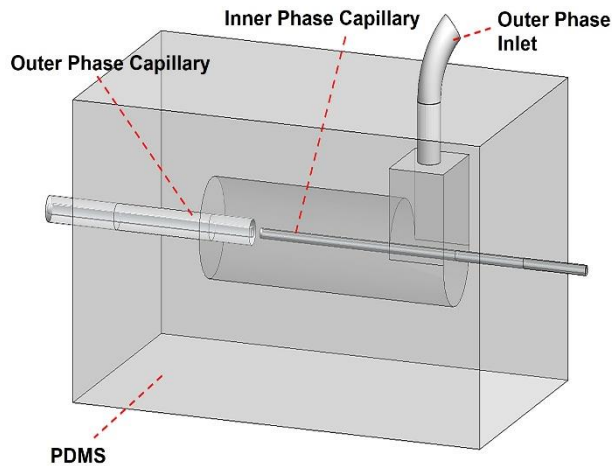


شکل ۱. هندسه ی ساده شده از ریز تراشه لوله مویین مورد استفاده در

جدول ۱: مشخصات محلول آب و یک درصد وزنی سدیم دودسیل سولفات (فاز پیوسته).

چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)	۰/۹۹
ویسکوزیته (میلی پاسکال ثانیه)	۱/۰۸
جدول ۲: مشخصات روغن معدنی (فاز پراکنده).	
چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)	۰/۸۷
ویسکوزیته (میلی پاسکال ثانیه)	۲۲/۲

<sup>۱</sup> Mineral Oil

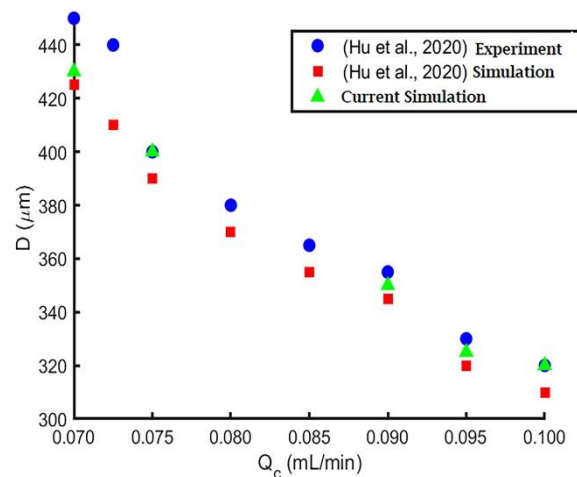


شکل ۴. شماتیک کلی ریز تراشه‌ی لوله موئین.

پس از تکمیل چاپ قالب، پس‌پردازش با شستن قالب با ایزوپروپانول (*IPA*) و قرار دادن آن در معرض نور فرابنفش انجام شد. همزمان با پس‌پردازش قالب، پلی دی متیل سیلوکسان<sup>۵</sup> (*PDMS*) با مخلوط کردن آن با عامل پخت *PDMS* به نسبت ۱۰ به ۱ تهیه شد. برای اطمینان از حذف حباب‌های هوا، مخلوط را در یک محیط خلاء قرار داده و تا زمانی که تمام حباب‌ها از بین بروند، خلاء اعمال می‌شود. در ادامه فرآیند، مخلوط *PDMS* را در قالب ریخته و با قرار دادن آن در کوره در دمای ۸۵ درجه سانتیگراد به مدت ۱۲۰ دقیقه، پخته می‌شود. پس از پخت کامل، *PDMS* از سطح قالب جدا می‌شود. توجه به این نکته مهم است که عدم پس‌پردازش مناسب باعث چسبیدن *PDMS* به قالب می‌شود. برای اتصال *PDMS* به لام آزمایشگاهی شیشه‌ای، از تکنیک پیوند پلازما با استفاده از دستگاه تولید کننده پلازما ترگو پلاس<sup>۶</sup>، تولید شده در ایالات متحده استفاده شده است.

### ۳.۲. نحوه انجام تست و سیالات مورد استفاده

فاز پراکنده روغن معدنی و رنگ محلول در چربی قرمز رنگ و فاز آبی، محلولی از آب، و افزودنی تحت عنوان ماده فعال ساز سطحی در سطح<sup>۷</sup> به همراه رنگ محلول در آب سبز رنگ می‌باشد. افزودنی‌های سدیم دودسیل سولفات (*SDS*)، پلی‌وینیل‌الکل (*PVA*) و تریتان (*Triton X-100*) در این پژوهش به عنوان ماده فعال در سطح در تست‌های مجزا با غلظت ۱ درصد وزنی استفاده شده‌اند که در فاز آبی حل شده‌اند. و محلول‌های آماده شده تحت عنوان فاز پراکنده و پیوسته برای ساخت امولسیون یگانه داخل سرنگ معمولی پزشکی با حجم ۵ میلی‌لیتر کشیده می‌شود. با استفاده از پمپ سرنگی *ULTRA PHD* انتقال محلول‌ها به ریز تراشه انجام می‌شود. پمپ‌ها قابلیت تنظیم براساس دبی را داشته و فرآیند مراحل تزریق فازها به ریز تراشه و نحوه حرکت سیالات در ریز تراشه در فرآیند تولید امولسیون با استفاده از میکروسکوپ معکوس *OLYMPUS 70 IX* به دقت دنبال می‌شود. علاوه بر آن دوربین *Pixelink 6212d-pl* نیز بر میکروسکوپ نصب شده و امکان فیلم‌برداری با سرعت ۳۰۰ فریم بر ثانیه را فراهم می‌کند.



شکل ۳. مقایسه قطر قطرات حاصله با تغییر دبی فاز پیوسته در مطالعه‌ی هو و همکاران [۱۸] و شبیه‌سازی فعلی.

در مطالعه هو و همکاران، ۳۱۲/۳ میکرومتر گزارش شده و در مطالعه فعلی ۲۹۸/۴ میکرومتر، برآورد شده است. منبع خطای ۴/۶۵ درصدی در مقایسه‌ی کمی نتایج، احتمالاً عدم گزارش دقیق عدد کشش بین سطحی و زاویه تماس توسط هو و همکاران می‌باشد [۱۸]. مقایسه‌ی ابعاد قطرات حاصله در زمان تغییر دبی فاز پیوسته در شکل ۳ آورده شده است که در آن ابعاد حاصله در نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی هو و همکاران با نتایج مستخرج از شبیه‌سازی فعلی در ۵ نقطه‌ی کاری مقایسه شده است و نشان می‌دهد مدل فعلی با نتایج آزمایشگاهی تطابق بسیار خوبی نشان داده است.

### ۳.۳. تست آزمایشگاهی

بر مبنای نتایج شبیه‌سازی عددی که به منظور تعیین مقدار مناسب  $L_m$  جهت تشکیل قطرات مورد استفاده قرار گرفته است، قالب مورد نظر توسط چاپگر سه‌بعدی ساخته شده است و با استفاده از لوله‌های موئین تجاری موجود (قطر داخلی ۳۰۰ میکرومتر و قطر خارجی ۵۰۰ میکرومتر) به عنوان لوله موئین فاز پراکنده و ۱۳۰۰ میکرومتر قطر خارجی (به عنوان لوله موئین خروجی)، ساخت ریز تراشه انجام می‌شود. فاصله‌ی  $L_m$  براساس نتایج شبیه‌سازی حداقل ۱۰۰ میکرومتر انتخاب می‌شود (جزئیات آن در بخش نتایج آورده شده است) تا برش سیال پراکنده اتفاق بیفتد و قطرات تشکیل شوند.

### ۳.۳.۱. ساخت ریز تراشه

رویکرد جدیدی توسعه یافته شامل استفاده از چاپگر سه‌بعدی برای ساخت قالب تراشه است. در ابتدا، قالب تراشه با استفاده از نرم‌افزارهای طراحی سه‌بعدی، طراحی شد (مطابق شکل ۴) و مدل با استفاده از نرم افزار چیتو باکس<sup>۱</sup> به فرمت سازگار با چاپگر تبدیل شد. قالب با استفاده از چاپگر سه‌بعدی رزینی فروزن سونیک مینی ۸ هزار پیکسل<sup>۲</sup> شرکت فروزن<sup>۳</sup> ساخته کشور تایوان چاپ شد و رزین سیاه سریع<sup>۴</sup> از شرکت فروزن برای فرآیند چاپ استفاده شد.

<sup>۵</sup> Polydimethylsiloxane

<sup>۶</sup> Tergo Plus

<sup>۷</sup> Surfactant

<sup>۱</sup> Chitubox

<sup>۲</sup> Phrozen sonic mini 8k

<sup>۳</sup> Phrozen

<sup>۴</sup> Black Rapid

## ۴. نتایج و بحث

### ۱.۴. نتایج شبیه‌سازی

به منظور درک فرآیند تشکیل قطره در این ریزتراشه، در ابتدا در نمای سه‌بعدی نحوه تغییرات فشار در سه فریم متوالی در مراحل تجمع سیال پراکنده، نازک‌شدگی رشته سیال پراکنده و در نهایت برش آن مطابق شکل (۵) ثبت شده است.

تشکیل ناحیه پرفشار در محل برش و به بیشینه رسیدن این فشار در محل برش در این تصاویر مشهود است. اعداد نشان‌دهنده معادل فشار در ریزتراشه برحسب پاسکال می‌باشند.

در شبیه‌سازی، مقادیر متفاوت به  $L_m$  نسبت داده شده است تا محدوده‌ی کارکردی این پارامتر به منظور تولید قطرات کاملا تک‌سایز به دست آید. به این ترتیب و بر مبنای فاصله‌ی مناسب حاصله، طراحی قالب و سپس ساخت

ریزتراشه انجام می‌شود. در بازه‌ی  $\frac{D}{3}$  تا  $2D$  (میکرومتر)، امکان تولید این قطرات وجود دارد به گونه‌ای که در تصویر ۵ به عنوان نمونه به نمایش درآمده است. در این شکل که توسط چرخش نتایج دوبعدی حول محور تقارن بدست آمده است، پارامتر هندسی  $L_m$  (فاصله بین دو لوله موئین) معادل ۱۰۰ میکرومتر در نظر گرفته شده است. با اعمال دبی ۸ میکرولیتر بر دقیقه برای فاز پراکنده و ۲۰ میکرولیتر بر دقیقه برای فاز پیوسته، ابعاد قطرات در این شبیه‌سازی با استفاده از محاسبه‌ی حجم قطرات و محاسبه‌ی قطر معادل  $535/8$  به دست آمده است که این مقدار در نتایج تجربی در شرایط برابر، به طور میانگین ۵۷۰ میکرومتر بوده است (معادل ۵/۵ درصد خطا در تخمین قطر). ضمناً زمان تشکیل هر قطره در شبیه‌سازی، معادل مدت زمان جدا شدن هر قطره تا جدا شدن قطره بعدی، در این حالت، ۴/۱ ثانیه تخمین زده شده است که فرکانس را در حدود ۱۷/۶ درصد کمتر نشان داده است. این خطا احتمالاً ناشی از اندازه گام زمانی تنظیم‌شده به صورت خودکار توسط کامپوسول می‌باشد. در ضمن به علت هزینه زمانی بالای محاسبات این نتایج از میانگین‌گیری نتایج ۵ قطره ثبت شده است که خود می‌تواند منبع خطا باشد. در این شکل نیروهای وارد بر فاز پراکنده در حین برش (نیروی برشی، نیروی

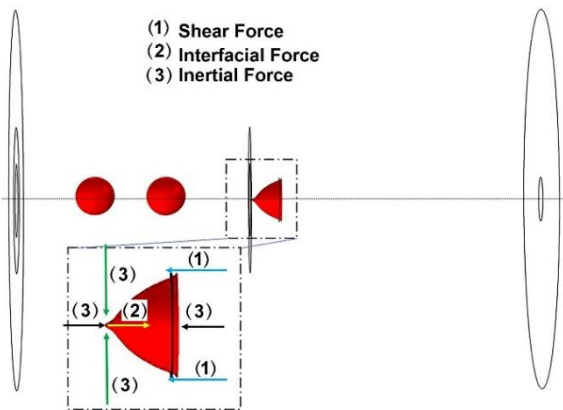
اینرسی ناشی از فاز پراکنده و پیوسته و نیز نیروی کشش بین‌سطحی) نمایش داده شده است. رقابت نیرویی نشان داده شده در شکل (۶) بین نیروهای اینرسی، ویسکوز و کشش سطحی منجر به برش رشته سیال و تشکیل قطرات می‌گردد.

امکان تنظیم فاصله  $L_m$  با توجه به طراحی انجام شده به سهولت و با جابجایی لوله موئین فاز پراکنده وجود داشته و در شکل (۷-الف)، فاصله‌ی ۱۰۰ میکرومتری و در شکل (۷-ب) فاصله‌ی ۶۰۰ میکرومتری نمایش داده شده است.

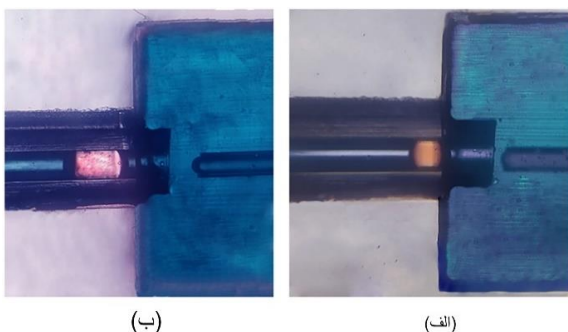
### ۲.۴. نتایج آزمایشگاهی

در تست آزمایشگاهی، با اعمال دبی فاز پراکنده (روغن معدنی) ۲ میکرولیتر بر دقیقه و فاز پیوسته (محلول آب و ۱ درصد وزنی سدیم‌دودسیل‌سولفات) ۲۰ میکرولیتر بر دقیقه، قطرات تولیدی در شکل (۸-الف) نشان داده شده است. با تغییر دبی فاز پراکنده به ترتیب به ۴ و ۱۰ میکرولیتر بر دقیقه، نتایج ب و ج حاصل می‌شوند. این تصاویر با استفاده از فاصله‌ی بین دو لوله موئین  $L_m$  برابر با ۵۰۰ میکرومتر حاصل شده‌اند.

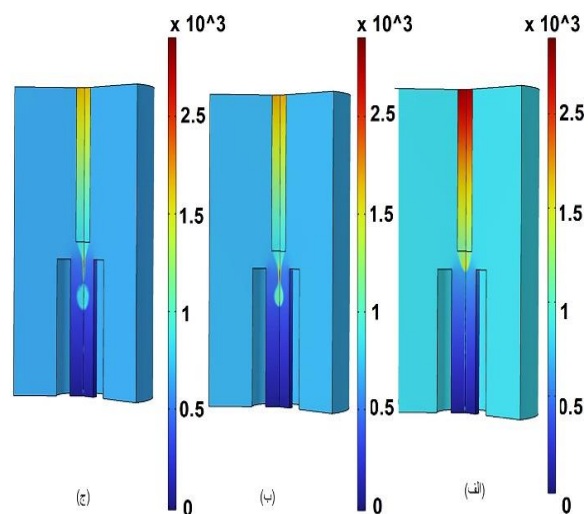
از آنجا که نتایج شبیه‌سازی امکان تشکیل قطرات را در بازه‌ی مشخص پیش‌بینی کرده است، کمینه مقدار فاصله‌ی بین دو لوله موئین  $L_m$  برابر ۱۰۰ میکرومتر و بیشینه مقدار آن، ۶۰۰ میکرومتر در تست آزمایشگاهی بررسی شده، تا تاثیر این پارامتر بر ابعاد قطرات سنجیده شود و در شکل (۹) نتایج مربوط به تاثیر  $L_m$  بر ابعاد قطرات به نمایش درآمده است. تمامی تست‌ها ۳ بار تکرار شده و نتیجه گزارش شده میانگین این مقادیر است. در شکل (۹)



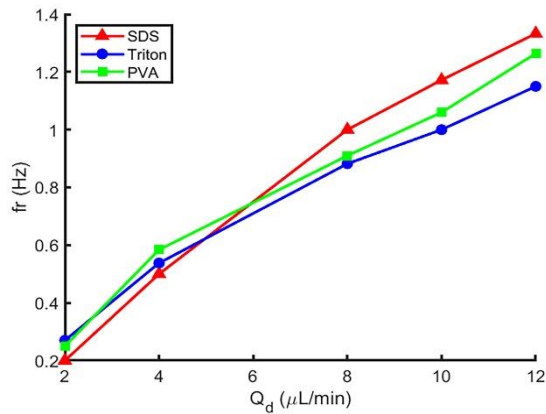
شکل ۶. نمونه‌ای از نحوه تشکیل قطرات در شبیه‌سازی متقارن محوری دوفاز و نمایش نیروهای وارد بر فاز پراکنده در حین برش.



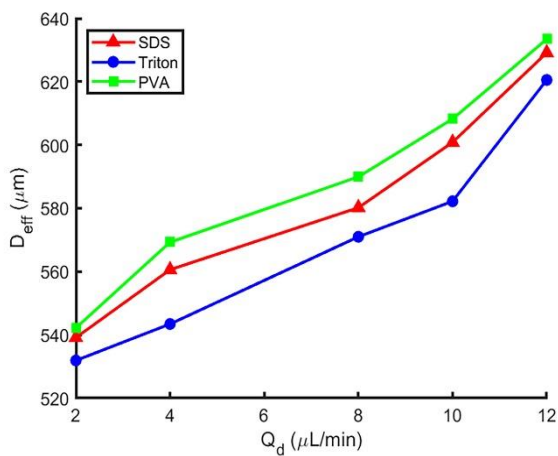
شکل ۷. تشکیل قطرات در تست آزمایشگاهی در فاصله‌ی بین دو لوله موئین  $L_m$  برابر (الف) ۱۰۰ میکرومتر و (ب) ۶۰۰ میکرومتر.



شکل ۵. توزیع فشار در مراحل برش فاز پراکنده و تشکیل قطرات.



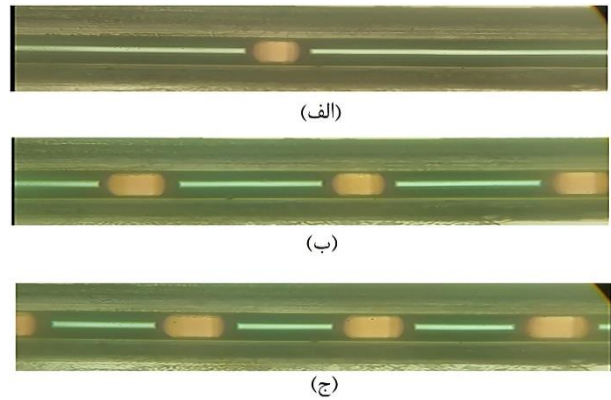
شکل ۱۰. نحوه تغییرات فرکانس تولید قطرات با دبی فاز پراکنده در زمان استفاده از افزودنی‌های سدیم‌دودسیل سولفات، پلی‌وینیل‌الکل و تریتان ۱۰۰ با غلظت ۱ درصد وزنی در فاز آبی پیوسته.



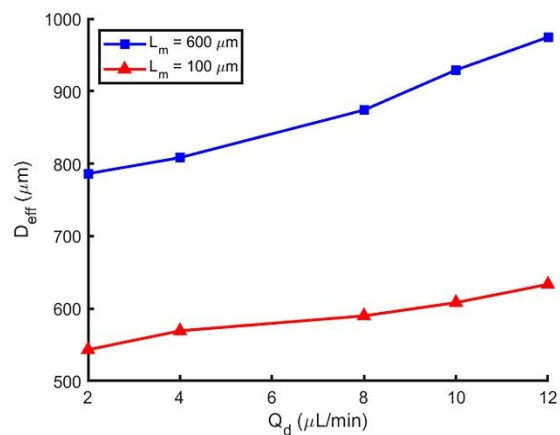
شکل ۱۱. نحوه تغییرات قطر معادل قطرات با دبی فاز پراکنده در زمان استفاده از افزودنی‌های سدیم‌دودسیل سولفات، پلی‌وینیل‌الکل و تریتان ۱۰۰ با غلظت ۱ درصد وزنی در فاز آبی پیوسته.

می‌توان با انتخاب دقیق این موارد، قطره دلخواه با ابعاد و فرکانس کنترل‌شده به شکل کاملا تک‌پراکن ده در ریز تراشه معرفی شده تولید نمود.

بر مبنای نتایج آزمایشگاهی زمانی که از افزودنی‌ها ( ماده فعال در سطح) متفاوت در فاز خارجی استفاده شود، فرکانس و نیز ابعاد قطرات تولیدی در دبی یکسان، متفاوت خواهد بود. در تمامی تست‌های آزمایشگاهی، دبی فاز پیوسته به صورت ثابت ۲۰ میکرولیتر بر دقیقه در نظر گرفته شده و دبی فاز پراکنده به ترتیب از ۲ میکرولیتر بر دقیقه به ۴، ۸، ۱۰ و ۱۲ میکرولیتر بر دقیقه تغییر پیدا کرده است. دستگاه مورد استفاده در این بخش  $L_m$  برابر با ۵۰۰ میکرومتر دارد و در شکل (۱۰) نحوه تغییر قطر معادل قطرات تولیدی با دبی فاز پراکنده در سه فاز مورد استفاده به نمایش درآمده است. می‌توان نتیجه گرفت، در شرایط یکسان دبی بزرگترین قطره با استفاده از ماده فعال در سطح پلی‌وینیل‌الکل نتیجه خواهد شد در حالیکه کوچکترین قطره مربوط به تریتان است. همچنین، بر مبنای شکل (۱۰) و نیز شکل (۱۱) که تغییر فرکانس قطرات تولیدی را با دبی فاز پراکنده به نمایش گذاشته، می‌توان گفت در هر سه مورد، افزایش دبی فاز پراکنده، فرکانس تولید قطرات و نیز ابعاد آن‌ها را افزایش می‌دهد.



شکل ۸. نمونه‌ای از قطرات تشکیل شده روغن در تست آزمایشگاهی. (الف) دبی فاز پراکنده ۲ میکرولیتر بر دقیقه، (ب) ۴ میکرولیتر بر دقیقه و (ج) ۸ میکرولیتر بر دقیقه. در این تصویر  $L_m$  برابر با ۵۰۰ میکرومتر می‌باشد و فاز پیوسته محلول آب و ۱ درصد وزنی سدیم‌دودسیل سولفات با دبی ۲۰ میکرولیتر بر دقیقه است.



شکل ۹. نحوه تغییرات قطر معادل قطرات با دبی فاز پراکنده در زمان استفاده از کمیته و بیشینه پارامتر هندسی  $L_m$  (فاصله بین دو لوله موئین).

می‌توان دید افزایش فاصله‌ی بین دو لوله موئین  $L_m$ ، به شکل قابل ملاحظه‌ای ابعاد قطرات را در شرایط یکسان دبی، افزایش داده است به گونه‌ای که در نسبت دبی یکسان، با ۶ برابر کردن  $L_m$ ، قطر قطرات به صورت میانگین ۳۰ درصد افزایش یافته است. در عین حال تاثیر افزایش دبی فاز پراکنده بر اندازه قطرات مشهود است و با ۶ برابر کردن دبی، قطر به صورت میانگین ۱۶/۵ درصد افزایش نشان داده است. بنابراین دو پارامتر کنترل‌کننده‌ی ابعاد قطرات در شکل (۹) نشان داده شده‌اند، با در نظر گرفتن این واق عیت که تاثیر پارامتر هندسی  $L_m$  پررنگ‌تر از تغییر دبی می‌باشد. افزایش  $L_m$  با افزایش مدت زمان تجمع فاز پراکنده پیش از برش، همزمان با افزایش قطر قطرات تولیدی، فرکانس تولید آنها را کاهش می‌دهد. به گونه‌ای که فرکانس‌های ثبت‌شده در  $L_m$  برابر ۱۰۰ میکرومتر در دبی‌های متفاوت فاز پراکنده، به طور میانگین ۳/۱ برابر حالتی است که  $L_m$  برابر ۶۰۰ میکرومتر بوده است.

در گام بعدی نوع افزودنی موجود در فاز پیوسته نیز به عنوان پارامتر سوم موثر بر ابعاد قطرات در این مطالعه معرفی می‌شود. با توجه به نتایج اعلام‌شده

متفاوت است. به گونه‌ای که در یک نسبت دبی یکسان بین دو فاز، قطرات روغن در زمان استفاده از ۱ درصد وزنی سدیم‌دودسیل‌سولفات در فاز پیوسته ۱۶/۵ درصد، در زمان استفاده از تریتان ۹ درصد و هنگام استفاده از پلی‌وینیل‌الکل، ۱۲ درصد افزایش ابعاد داشته‌اند.

۴. با افزایش ابعاد قطرات در نتیجه افزایش دبی فاز پراکنده، فرکانس تولید قطرات نیز افزایش می‌یابد. میزان افزایش فرکانس تولید نیز به نوع افزودنی موجود در فاز پیوسته وابسته بوده و در زمان استفاده از سدیم‌دودسیل‌سولفات در فاز پیوسته این تاثیر بیشتر است (۶/۶۵ برابر شدن فرکانس تولید قطرات با ۶ برابر کردن دبی فاز پراکنده در این مورد مشاهده شده است).

۵. نوع افزودنی موجود در فاز پیوسته خود به تنهایی می‌تواند عامل کنترلی ابعاد قطرات باشد بدون آنکه باقی مولفه‌ها تغییری پیدا کند. به عنوان مثال، در زمانی که نسبت دبی فاز پیوسته به پراکنده ۵ باشد، قطرات روغن در فاز پیوسته حاوی سدیم‌دودسیل‌سولفات ۶۰۰/۸ میکرومتر و در فاز پیوسته حاوی پلی‌وینیل‌الکل ۵۸۲/۲ و تریتان به ترتیب ۶۱۵/۴ میکرومتر می‌باشند.

با استفاده از معرفی و مشخصه‌یابی دستگاه‌های ریزسیالاتی مبتنی بر لوله موین، می‌توان قطرات با اندازه‌های دقیق و یکنواخت را به صورت تکرارپذیر تولید کرد که این موضوع برای تولید داروهای با رهایش کنترل‌شده و کیسوله‌کردن مواد فعال دارویی اهمیت ویژه‌ای دارد. قطرات تولیدشده می‌توانند به عنوان پیش‌ماده برای تولید ذرات پلیمری با خواص مکانیکی و شیمیایی دقیق تنظیم شوند. علاوه بر آن، قطرات تولیدشده در این سیستم‌ها می‌توانند در مباحث زیست‌شناسی سلولی به عنوان میکروبیوراکتورها عمل کنند که در آن‌ها سلول‌ها به‌طور یکنواخت تقسیم و رشد می‌کنند [۲۳ و ۲۲].

### فهرست علائم

$\psi$	: تابع تنظیم سطح؛
$\sigma$	: ضریب کشش سطحی (نیوتون بر متر)؛
$\rho$	: چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)؛
$v$	: سرعت (میکرومتر بر ثانیه)؛
$F_{sf}$	: کشش سطحی؛
$\mu$	: ویسکوزیته (میلی‌پاسکال ثانیه)؛
$P$	: فشار (میلی‌پاسکال)؛
$t$	: زمان (ثانیه)
$D_1$	: قطر لوله موین فاز پراکنده (میکرومتر)؛
$D_p$	: قطر لوله موین فاز پیوسته (میکرومتر)؛
$L_1$	: طول لوله موین پراکنده (میکرومتر)؛
$L_p$	: طول لوله موین خروجی (میکرومتر)؛
$L_m$	: فاصله‌ی بین دو لوله موین (میکرومتر)؛
$S_d$	: مساحت قطره (میکرومتر مربع)؛
$D_{eff}$	: قطر موثر (میکرومتر)؛
$Q_d$	: دبی فاز پراکنده (میکرولیتر بر دقیقه)؛
$\varepsilon$	: ضخامت مجازی مرز مشترک (میکرومتر)؛
$K$	: انحنا‌ی مرز مشترک؛

می‌توان ملاحظه نمود با ۶ برابر کردن دبی فاز پراکنده قطر قطرات در زمان استفاده از سدیم‌دودسیل‌سولفات به عنوان افزودنی فاز پیوسته ۱۶/۵ درصد، در زمان استفاده از تریتان ۹ درصد و هنگام استفاده از پلی‌وینیل‌الکل، ۱۲- درصد افزایش می‌یابد. در عین حال، با ۶ برابر کردن دبی فاز پراکنده مقدار فرکانس تولید قطرات در زمان استفاده از فاز پیوسته حاوی سدیم‌دودسیل‌سولفات ۶/۶۵ برابر، تریتان ۴/۲۵ برابر و پلی‌وینیل‌الکل ۵/۰۵ برابر می‌شود.

خواص فیزیکی و شیمیایی افزودنی‌ها رفتار آنها در فرآیندهای تشکیل قطرات کنترل می‌کند. این ویژگی‌ها بر نحوه جذب مواد فعال در سطح مشترک، کاهش کشش سطحی و تثبیت قطرات تأثیر می‌گذارد که در نهایت بر فرکانس و اندازه قطرات تولید شده موثر است. به عنوان مثال سدیم‌دودسیل‌سولفات وزن مولکولی کم و آب دوستی بالا دارد که آن را قادر می‌سازد تا به سرعت در سطح مشترک جذب شود و کشش سطحی را به طور موثر کاهش دهد و در نتیجه فرکانس تشکیل قطرات بیشتر شود [۲۰]. تریتان اندازه مولکولی بزرگتر و قابلیت کاهش تنش سطحی متوسط داشته و و این موضوع منجر به سرعت کمتر تشکیل قطرات می‌شود. ساختار حجیم تریتان ممکن است مانع از انتشار سریع آن به سطح مشترک شود. در نهایت اگرچه پلیمر پلی‌وینیل‌الکل در کاهش کشش سطحی مؤثر نیست، وزن مولکولی بالا و تشکیل لایه سطحی قوی آن، باعث تشکیل مکرر قطرات به دلیل تثبیت قوی قطرات تازه تشکیل شده می‌شود [۲۱].

### ۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه ساخت و شبیه‌سازی یک دستگاه ریزسیالاتی قطره‌ساز مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی به روش تنظیم سطح استفاده شده و بر مبنای آن، طراحی مناسب جهت ساخت ریزتراشه انجام شد. یکی از پارامترهای موثر بر تشکیل قطرات توسط شبیه‌سازی، فاصله بین دو لوله موین معرفی شده و محدوده‌ی کاری این پارامتر جهت تولید قطرات در شبیه‌سازی به دست آمد. پس از آن ساخت ریزتراشه به کمک چاپگر سه‌بعدی جهت تولید قالب مناسب ریزتراشه انجام شد و تست‌های آزمایشی جهت بررسی تاثیر سه پارامتر شناخته شده بر قطر قطرات شامل پارامتر هندسی فاصله‌ی بین دو لوله موین، دبی فاز پراکنده و نیز نوع افزودنی موجود در فاز پیوسته انجام شد. علی‌رغم آنکه ابعاد کانال‌ها در حوزه‌ی ریزسیالات مبتنی بر قطره نسبتاً بزرگ محسوب می‌شود، با بررسی عدد بدون بعد با کاپیلاری (موینگی) و عدد رینولدز فاز پراکنده که در محدوده‌ی دبی اعمالی به ترتیب کوچکتر از ۱ و کوچکتر از ۱۰ می‌باشند، می‌توان جریان را در این طبقه‌بندی جای داد. بر مبنای نتایج حاصله در میان پارامترهای بررسی شده موارد زیر قابل بیان است:

۱. تاثیرگذارترین مولفه در تغییر ابعاد قطرات پارامتر هندسی فاصله‌ی بین دو لوله‌ی موین است به شکلی که ۳۰ درصد افزایش ابعاد قطرات با ۶ برابر کردن این فاصله حاصل شده است.
۲. اگرچه امکان کنترل قطرات تولیدی توسط نوع افزودنی و نیز دبی فاز پراکنده وجود دارد، در دستگاه معرفی شده می‌توان صرفاً با تغییر این پارامتر هندسی و بدون ایجاد هر گونه تفاوت در مابقی مولفه‌های موجود در آزمایش، ابعاد قطرات را تغییر داد.
۳. میزان افزایش قطر قطرات توسط افزایش دبی فاز پراکنده در زمان استفاده از انواع افزودنی‌ها تحت عنوان ماده فعال در سطح در فاز پیوسته

## References- منابع

- Shum, H. C., Rowat, A. C., Lee, D., Agresti, J. J., Utada, A. S., and Weitz, D. A. (2008). Designer emulsions using microfluidics. *Materials Today*, *11*(4), 18–27. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(08\)70053-1](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(08)70053-1)
- Maan, A. A., Schroën, K., and Boom, R. (2011). Spontaneous droplet formation techniques for monodisperse emulsions preparation – Perspectives for food applications. *Journal of Food Engineering*, *107*(3–4), 334–346. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2011.07.008>
- Umbanhowar, P. B., Prasad, V., and Weitz, D. A. (1999). Monodisperse Emulsion Generation via Drop Break Off in a Coflowing Stream. *Langmuir*, *16*(2), 347–351. <https://doi.org/10.1021/LA990101E>
- Zhu, P., Tang, X., & Wang, L. (2016). Droplet generation in co-flow microfluidic channels with vibration. *Microfluidics and Nanofluidics*, *20*(3), 1–10. <https://doi.org/10.1007/S10404-016-1717-2/FIGURES/5>
- Dewandre, A., Rivero-Rodriguez, J., Vitry, Y., Sobac, B., and Scheid, B. (2020). Microfluidic droplet generation based on non-embedded co-flow-focusing using 3D printed nozzle. *Scientific Reports 2020 10:1*, *10*(1), 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77836-y>
- Erkal, J. L., Selimovic, A., Gross, B. C., Lockwood, S. Y., Walton, E. L., McNamara, S., Spence, D. M. (2014). 3D printed microfluidic devices with integrated versatile and reusable electrodes. *Lab on a Chip*, *14*(12), 2023–2032. <https://doi.org/10.1039/C4LC00171K>
- Venzac, B., Deng, S., Mahmoud, Z., Lenferink, A., Costa, A., Bray, F., and Le Gac, S. (2021). PDMS Curing Inhibition on 3D-Printed Molds: Why? Also, How to Avoid It? *Analytical Chemistry*, *93*(19), 7180–7187. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.0c04944>
- Vedhanayagam, A., Golfetto, M., Ram, J. L., and Basu, A. S. (2023). Rapid Micromolding of Sub-100  $\mu\text{m}$  Microfluidic Channels Using an 8K Stereolithographic Resin 3D Printer. *Micromachines*, *14*(8), 1519. <https://doi.org/10.3390/MI14081519/S1>
- Wu, L., Qian, J., Liu, X., Wu, S., Yu, C., and Liu, X. (2023). Numerical Modelling for the Droplets Formation in Microfluidics - A Review. *Microgravity Science and Technology 2023 35:3*, *35*(3), 1–21. <https://doi.org/10.1007/S12217-023-10053-0>
- Hernández-Cid, D., Pérez-González, V. H., Gallo-Villanueva, R. C., González-Valdez, J., and Mata-Gómez, M. A. (2022). Modeling droplet formation in microfluidic flow-focusing devices using the two-phases level set method. *Materials Today: Proceedings*, *48*, 30–40. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.09.417>
- Oveysi, M., Karim Khani, M. M., Bazargan, V., Nejat, A., and Marengo, M. (2024). Multiple emulsions: A new level-set based two-and-three dimensional simulation of multiphase immiscible flows for droplet formation. *International Journal of Multiphase Flow*, *170*, 104645. <https://doi.org/10.1016/J.IJMULTIPHASEFLOW.2023.104645>
- Yu, W., Liu, X., Zhao, Y., and Chen, Y. (2019). Droplet generation hydrodynamics in the microfluidic cross-junction with different junction angles. *Chemical Engineering Science*, *203*, 259–284. <https://doi.org/10.1016/J.CES.2019.03.082>
- Nabavi, S. A., Vladislavljević, G. T., Gu, S., and Ekanem, E. E. (2015). Double emulsion production in glass capillary microfluidic device: Parametric investigation of droplet generation behaviour. *Chemical Engineering Science*, *130*, 183–196. <https://doi.org/10.1016/J.CES.2015.03.004>
- Nabavi, S. A., Vladislavljević, G. T., Bandulasena, M. V., Arjmandi-Tash, O., and Manović, V. (2017). Prediction and control of drop formation modes in microfluidic generation of double emulsions by single-step emulsification. *Journal of Colloid and Interface Science*, *505*, 315–324. <https://doi.org/10.1016/J.JCIS.2017.05.115>
- Brackbill, J. U., Kothe, D. B., & Zemach, C. (1992). A continuum method for modeling surface tension. *Journal of Computational Physics*, *100*(2), 335–354. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(92\)90240-Y](https://doi.org/10.1016/0021-9991(92)90240-Y)
- Raad, M., Rezazadeh, S., Jalili, H., and Abbasinezhad Fallah, D. (2021). A numerical study of droplet splitting in branched T-shaped microchannel using the two-phase level-set method. *Advances in Mechanical Engineering*, *13*(11). [https://doi.org/10.1177/16878140211045487/ASS ET/IMAGES/LARGE/10.1177\\_16878140211045487-FIG17.JPEG](https://doi.org/10.1177/16878140211045487/ASS ET/IMAGES/LARGE/10.1177_16878140211045487-FIG17.JPEG)
- Pan, X., Wang, Y., and Shen, M. (2022). A conservative level set approach to non-spherical drop impact in three dimensions. *Micromachines*



- 2022, Vol. 13, Page 1850, 13(11), 1850. <https://doi.org/10.3390/MI13111850>
18. Hu, Q., Jiang, T., and Jiang, H. (2020). numerical simulation and experimental validation of liquid metal droplet formation in a co-flowing capillary microfluidic device. *Micromachines* 2020, Vol. 11, Page 169, 11(2), 169. <https://doi.org/10.3390/MI11020169>
19. M. J. Rosen, and J. T. Kunjappu. (2012). *Surfactants and Interfacial Phenomena* (4th ed.). Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons., 4, 33-34. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/9781118228920>.
20. Hunger, Klaus. (2003). *Industrial dyes : chemistry, properties, applications*. Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/3527602011>.
21. Trinh, T. N. D., Do, H. D. K., Nam, N. N., Dan, T. T., Trinh, K. T. L., and Lee, N. Y. (2023). Droplet-Based Microfluidics: Applications in Pharmaceuticals. *Pharmaceuticals* 2023, Vol. 16, Page 937, 16(7), 937. <https://doi.org/10.3390/PH16070937>
22. Amirifar, L., Besanjideh, M., Nasiri, R., Shamloo, A., Nasrollahi, F., De Barros, N. R., and Khademhosseini, A. (2022). Droplet-based microfluidics in biomedical applications. *Biofabrication*, 14(2), 022001. <https://doi.org/10.1088/1758-5090/AC39A9>