

مطالعه تجربی تاثیر پارامترهای هندسی و سیالاتی بر اندازه ریزقطرات در دستگاه‌های ریزسیالاتی با هندسه‌ی تمرکز جریانی

محمد رضا چیمه راد

ساسان آسیایی

حسام مقدسی

فاطمه قربانی بیدکرپه*

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

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

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

استادیار، دانشکده داروسازی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

یکی از مهم‌ترین چالش‌های داروسازان، عدم توانایی در تولید حامل‌های دارویی با دقت و کنترل بالا در تعداد مشخص می‌باشد، از این رو تولید ذرات دارویی برپایه‌ی دستگاه‌های ریزسیالاتی به عنوان وسیله‌ای تطبیق‌پذیر با طیف گسترده‌ای از کاربردها مورد استفاده می‌باشد. در این پژوهش هدف، تولید ریزقطرات به عنوان پایه‌ای برای حامل‌های دارورسانی، به کمک دستگاه‌های ریزسیالاتی با هندسه‌ی تمرکز جریانی می‌باشد، همچنین، تأثیر پارامترهای هندسی، مکانیکی و مشخصه‌های سیال بر قطر ریزقطرات تولیدی، (با استفاده از دو نوع ماده‌ی پارافین روغنی و هگزادکان به صورت جداگانه به عنوان سیال فاز پیوسته و آب به عنوان سیال گسسته) به صورت تجربی مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. نتایج نشان دادند که با افزایش زاویه‌ی بین مجرای اصلی و فرعی و افزایش عرض مجراها قطر ریزقطرات به ترتیب به صورت نمایی و نسبتاً خطی افزایش یافته و در مقابل با کاهش نسبت لزجت به کشش سطحی سیال، قطر ریزقطرات تولیدی به صورت نسبتاً خطی کاهش می‌یابد. به علاوه در تمامی بررسی‌ها هنگام تغییر رژیم تشکیل ریزقطره جهش در تغییرات اتفاق می‌افتد و شاهد افزایش نرخ جریان فاز پیوسته و کاهش قطر ریزقطرات تولیدی هستیم.

واژه‌های کلیدی: ریزسیالات، مطالعه تجربی، ریزقطره، پارامترهای هندسی، مشخصه‌های سیال.

Empirical study of Geometrical and Fluidic Parameters on Size of Droplets in Microfluidic Devices with Flow-Focusing Confinement

M. R. Chimerad

S. Asiaei

H. Moghadasi

F. Ghorbani-Bidkorpheh

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

School of Pharmacy, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Abstract

One of the most important challenges faced by pharmacists is the inability to produce drug carriers with precision and control in a specific number. Therefore, droplet production with the aid of microfluidic devices as adaptive devices with the wide range of application is used. The purpose of this research is producing droplets as a structure for drug carrier with the aid of microfluidic devices with flow-focusing geometry. Also, the effect of geometrical, mechanical and fluid characteristics on the diameter of the produced droplets (Using two types of oily paraffin and hexadecane separately as continuous fluid and water as a discrete fluid) has been evaluated, empirically. As a results, by increasing the angle between the main and secondary channels and increasing the width of the channels, the diameter of the droplets expanded exponentially and relatively linearly, respectively. However, by decreasing the viscosity ratio to the surface tension of the fluid, the diameter of the produced droplets decreases relatively linearly. Moreover, in all studies, when the regimen changes, the mutation of the microchip occurs, In addition, the flow rate of continuous phase increases and the diameter of the produced droplets decreases.

Keywords: Microfluidic, Empirical Study, Droplets, Geometric Parameters, Fluid Characteristics.

۱- مقدمه

تبلور نمونه‌های کوچک آزمایشگاهی محلول‌ها که بر پایه‌ی ریزقطرات بنا نهاده شده‌اند، تولید شوند [۸-۱۵]. در طول این فرآیند هرکدام از قسمت‌های ریزقطرات همانند یک راکتور بسیار کوچک منفرد به‌گونه‌ای عمل می‌کنند که محلول‌های آبی در دمای اتاق تهیه شوند. عمده مزیت سیستم‌های سیالاتی مبتنی بر ریزقطرات، وجود نسبت سطح به حجم بالا، اختلاط سریع ریزقطرات در رینولدزهای پایین و تولید امولسیون از یک نمونه، بدون حل شدن در مایع دربرگیرنده است. این تکنیک همچنین سبب حذف بسیاری از مشکلات مربوط به تبخیر که در مقیاس بزرگ موجود بود، می‌باشد [۹]. جنس و هندسه مجراهای دستگاه‌های ریزسیالاتی تأثیر به‌سزایی در نحوه تشکیل قطره دارند. به

در دهه‌ی اخیر فرآیند تشکیل ریزقطره به دلیل کاربرد گسترده‌ی آن در پژوهش‌های مختلف اعم از مهندسی، به یکی از حوزه‌های بسیار مهم در تحقیقات تبدیل شده است [۴-۱]. تولید ریزقطرات با ابعاد یکنواخت کاربردهای بسیار وسیع و بی‌شماری در تولیدات مهندسی و پزشکی دارد. تولید کنترل شده‌ی ریزقطرات محلول در فاز سیال پیوسته، فواید خاصی از جمله مصرف بسیار کم مواد واکنش‌دهنده و توانایی کنترل و تغییر اندازه در حین فرآیند را دارا می‌باشد. در حقیقت، تعدادی از مولکول‌های مهم بیولوژیکی می‌توانند از فرآیند

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: f.ghorbani@smbu.ac.ir

می‌شود.

$$\rho_s \frac{\partial u_s}{\partial t} + \rho_s u_s \cdot \nabla u_s = -\nabla p_s + \eta_s \nabla^2 u_s + f_s \quad (1)$$

در این فرمول u نماد بردار سرعت سیال و نمادهای d و c_0 به ترتیب نماد فاز گسسته و پیوسته می‌باشند، همچنین t ، ρ ، η ، f به ترتیب نمایانگر زمان، چگالی سیال، فشار، لزجت و کل نیروهای خارجی وارده بر سیستم می‌باشد.

از طرفی شرایط مرزی در حدفاصل فاز مایع-مایع به صورت معادلات (۲) تا (۴) تعریف می‌گردد.

به ترتیب معادلات (۲) تا (۴) به پیوستگی بردار سرعت، پیوستگی تنش مماسی لزجتی، تعادل تنش نرمال دو فاز پیوسته و گسسته با فشار مویینگی دلالت دارند.

$$u_{d,n} = u_{c,n} \quad (2)$$

$$\sigma_{d,t} = \sigma_{c,t} \quad (3)$$

$$T_{d,n} - T_{c,n} = -\gamma \kappa n \quad (4)$$

با توجه به معادلات ذکر شده، چهار نوع نیروی تأثیرگذار در تشکیل قطره عبارتند از:

- الف - نیروی اینرسی
- ب - نیروی لزجت
- ج - نیروی گرانش
- د - نیروی مویینگی

بر اساس نیروهای ذکر شده اعداد بی بعد در دستگاه‌های ریزسیالاتی به صورت جدول ۱ قابل بیان می‌باشند.

جدول ۱ - اعداد بی بعد حاکم در تشکیل قطره

اعداد بی بعد	معادلات
رینولدز	$Re = \frac{\rho_s u_s L}{\eta_s}$
مویینگی	$Ca = \frac{\eta_s u_s}{\gamma}$
وِبر	$We = \frac{\rho_s u_s^2 L}{\gamma}$
باند	$Bo = \frac{\Delta \rho g L^2}{\gamma}$

تشکیل قطره در دستگاه‌های ریزسیالاتی تحت سه رژیم اتفاق می‌افتد [۲۶-۲۴]: رژیم فشاری [۲۷]، چکه‌ای و رژیم جت [۲۸]. در رژیم فشاری تنش لزج باعث ایجاد محدودیت در حرکت فاز سیال در دیواره‌ی ریزمجرا می‌شود. با پیشروی فاز گسسته در تقاطع ساختارهایی که ذکر شد، مانعی در جلوی فاز پیوسته ایجاد می‌شود، در نتیجه فاز گسسته در اطراف مانع در حال بزرگ شدن است، و از طرفی توسط فاز پیوسته محدود می‌گردد. از این رو گرادیان فشار در فاز پیوسته در پشت قطره افزایش می‌یابد. این درحالی است که کشش بین سطحی بین سیال و مجرا در حال کاهش است. زمانی که گرادیان فشار به اندازه‌ی کافی بزرگ شود که بتواند به فشار داخل ذره غلبه کند حد فاصل دو سیال فشرده شده و قطره به طور کامل تشکیل می‌شود. قطره‌ی تشکیل شده توسط دیواره‌های مجرا محدود می‌شود و شکل آن به جای کروی بودن به شکل بیضی می‌باشد [۲۹].

با افزایش عدد مویینگی، رژیم جریان از حالت فشرده‌گی به حالت چکه‌ای جابه‌جا می‌شود، جایی که در آن نیروی لزج بر اثرهای ناشی از

طور کلی در این مکانیزم‌ها از دو سیال غیر قابل حل در یکدیگر به عنوان فاز پیوسته و گسسته استفاده می‌شود. دستگاه‌های تولید ریزقطرات براساس نحوه‌ی تشکیل قطره به دو دسته تقسیم می‌شوند [۱۰].

الف - تشکیل قطره در دسته‌ی اول به دلیل نیروی برشی لزجتی

ب - تشکیل قطره در دسته‌ی دوم به دلیل محدودیت‌های داخل مجرا

تشکیل قطره ناشی از نیروی برشی لزجتی به طور کلی در سه هندسه‌ی جریان متقاطع [۱۱]، جریان‌های دنباله هم [۱۲]، [۱۳] و تمرکز جریانی [۱۴] مشاهده شده است در حالی که تشکیل قطره به کمک ایجاد محدودیت توسط ریزمجراها در سه هندسه‌ی امولسیون‌سازی مرحله‌ای [۱۵]، امولسیون‌سازی توسط ریزمجراها و امولسیون‌سازی توسط غشاء [۱۶] تقسیم بندی شده‌اند.

با توجه به این که در هندسه‌ی تمرکز جریانی قطرات تولیدی نسبت به هندسه‌های دیگر یکپارچه‌تر و قابل کنترل‌تر می‌باشند، در این تحقیق هندسه‌ی تمرکز جریانی به عنوان هندسه‌ی مطلوب انتخاب شده است. در ابتدا هندسه‌ی تمرکز جریانی توسط منن و همکارانش به صورت سه بعدی ارائه شد، که با توجه به دشواری‌های موجود در ساخت این هندسه، هندسه‌ی دو بعدی تمرکز جریانی توسط آنا و همکارانش معرفی گردید [۱۷]. در این پژوهش از هندسه‌های دو بعدی معرفی شده توسط منن و همکارانش استفاده شده است. همچنین در این نوع هندسه تأثیر عواملی همچون تغییر نرخ جریان فاز پیوسته و گسسته توسط کریستینی و همکارانش به صورت تئوری و عملی مورد مطالعه قرار گرفته شده است [۱۸]. از این رو در جهت تکمیل تحقیقات پیشین، در پژوهش حاضر تأثیر عوامل دیگری همچون عرض و زاویه‌ی بین ریزمجراها و نوع سیال پیوسته مورد بررسی قرار می‌گیرد.

از طرفی در زمینه‌ی تشکیل ریزقطره کارهای گوناگونی بر روی چیپ‌هایی از جنس PDMS مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۳-۱۹]. با توجه به پرهزینه بودن این روش، در این پژوهش سعی شده است تشکیل ذرات بر چیپ‌هایی از جنس پلکسی گلس که از قابلیت ماشین‌کاری خوبی برخوردارند مورد بررسی قرار گیرد.

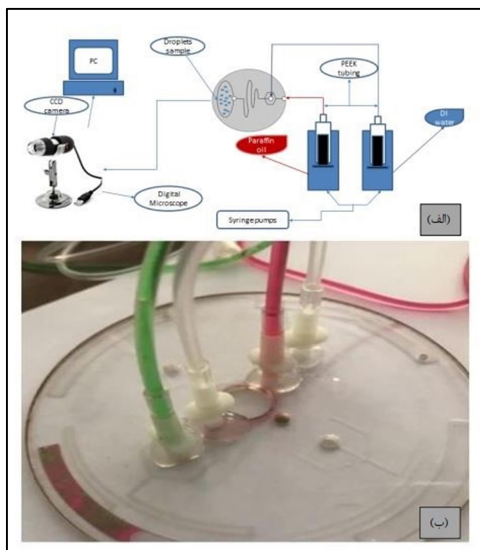
از این رو در ابتدا توضیحاتی در ارتباط با ساز و کار تشکیل ریزقطره در ریزمجراها داده شده است. به منظور توصیف مکانیزم و روند تشکیل قطره به بیان معادله‌ی حاکم بر مسئله و پارامترهای مؤثر در تشکیل ریزقطره پرداخته شده است. به دنبال آن مشخصات فیزیکی مدل و روش ساخت آن به تفصیل بیان شده است و در انتها نتایج به دست آمده از مطالعات تجربی مورد بحث قرار گرفته شده است.

۲- ساز و کار تشکیل ریزقطره

در ریزسیالات حرکت سیال می‌تواند به دلیل وجود مشخصه‌های متفاوتی اتفاق بیافتد، که به‌طور معمول به‌وسیله‌ی رقابت میان اثرات فیزیکی، همچون توازن نیروها قابل توجیه است، که ارتباط بین نیروهای مختلف و غلبه‌ی هر کدام از نیروها بر دیگری توسط اعداد بی‌بعد قابل توصیف می‌باشد.

با فرض پیوستگی سیال و جریان تراکم‌ناپذیر برای دو فاز پیوسته و گسسته معادله‌ی اندازه‌ی حرکت به صورت معادله‌ی (۱) بازنویسی

پیوسته و گسسته از یکدیگر از حلال روغنی قرمز و حلال آبی، سبز رنگ استفاده شده است. از طرف دیگر جهت افزایش پایداری ریزقطرات تشکیل شده، اسپن ۸۰ با نسبت حجمی ۴ درصد به مواد روغنی اضافه شده است. خواص فیزیکی مواد مطابق جدول ۲ گزارش شده است. جهت تزریق مواد از دو پمپ سرنگ استفاده شده است. سرنگ از طریق اتصال دهنده‌هایی به تراشه‌ی طراحی شده، متصل شده‌اند (شکل ۲). پس از جریان دو سیال داخل تراشه ریزقطرات تشکیل و توسط میکروسکوپ دیجیتال تصویر برداری شدند.



شکل ۲- الف) مکانیزم تشکیل قطره و مشاهده‌ی ریزقطرات، ب) اتصال رباطها به تراشه‌ی ساخته شده

جدول ۲ - مشخصه‌های فیزیکی فاز پیوسته

نام مواد	ρ (Kg. m ⁻³)	μ (cP)	σ (mN. m ⁻¹)
هگزادکان+۴٪ اسپن ۸۰	۷۱۱/۶	۳/۸۵	۶/۹۲
پارافین+۴٪ اسپن ۸۰	۸۰۷/۶۳	۳۴/۷	۱۷/۸۲

۳-۲- طراحی و ساخت دیسک

در این پژوهش، یک تراشه‌ی ریزسیالاتی، حاوی مدل تمرکزجریانی، طراحی و ساخته شده که برای ساخت این تراشه از روش لایه به لایه کمک گرفته شده است. به این صورت که، لایه‌هایی از جنس پلکسی گلس انتخاب شده و ریزمجراها و مخازن طراحی شده، با استفاده از دستگاه سی ان سی دقیق، روی آن‌ها تراشیده شده است. سپس تراشه‌ها به وسیله‌ی چسب‌های دوطرفه حساس به فشار که محل ریزمجراها و مخازن روی آن با دستگاه کاتر پلاتر تعبیه شده، به هم چسبانده شده است. برای اطمینان از عدم حرکت سیال در هنگام انجام تست، مجموعه قبل از آزمایش تحت پرس با فشار مناسب قرار گرفته است.

۴- آنالیز عدم قطعیت

در طی پژوهش انجام شده تمامی نتایج به صورت دوره‌ای مورد بررسی قرار گرفته شده‌اند، از طرفی با توجه به اختلاف در نتایج به-

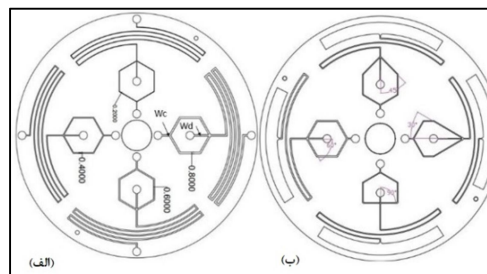
کشش بین سطحی غلبه کرده و باعث گسیختگی فاز گسسته می‌شود. به دلیل بالا بودن نیروی برشی ناشی از لزجت، فاز گسسته قبل از آن که به طور کامل مجرا اصلی را اشغال کند، تکه تکه می‌شود. از این رو شکل ذره به صورت کروی با ابعادی کوچک‌تر از ابعاد مجرا باقی می‌ماند و قطرات یکپارچه در این رژیم تشکیل می‌گردد.

با افزایش نرخ جریان فازهای پیوسته و گسسته تغییر رژیم از چکیدگی به جهشی اتفاق می‌افتد. که در طی آن فاز گسسته کشیده شده و پس از رسیدن به اندازه‌ی بحرانی به صورت قطره جدا می‌شود. این مکانیزم توسط اصل عدم پایداری ریلی- پلاتو قابل توجیه است [۲۹].

به دلیل آشفتگی‌های ناشی از موینگی، ذرات تولید شده در این رژیم در قیاس با رژیم‌های قبلی یکپارچه‌تر می‌باشند. در ساختارهای تمرکز جریانی این اتفاق زمانی رخ می‌دهد که نیروهای ویسکوز اعمال شده توسط فاز پیوسته و نیروی اینرسی فاز پیوسته بر کشش بین سطحی غلبه کند [۲۹].

۳- توصیف مدل

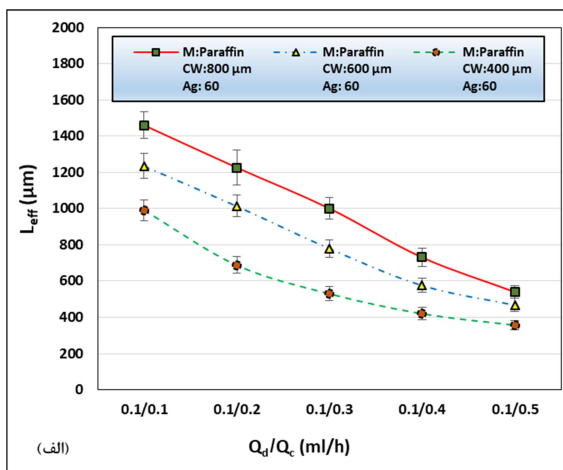
هدف از این پژوهش، تاثیر پارامترهای هندسی و سیالاتی بر اندازه ریزقطرات در دستگاه‌های ریزسیالاتی با هندسه‌ی تمرکز جریانی به صورت تجربی (با استفاده از دو نوع ماده‌ی پارافین روغنی و هگزادکان به صورت مجزا به عنوان سیال فاز پیوسته) می باشد، که منجر به تولید ریزقطرات به عنوان پایه‌ای برای حامل‌های دارورسانی، به کمک دستگاه‌های ریزسیالاتی با هندسه‌ی تمرکز جریانی می‌گردد. همچنین هندسه‌های تمرکز جریانی دو بعدی، به دلیل توانایی بالای در تولید ریزقطرات یکپارچه، به عنوان هندسه‌ی مورد نظر انتخاب شده است. هندسه‌ی تمرکز جریانی شامل سه ریزمجرای اصلی با مقاطع مستطیلی شکل است، که مقطع هر کدام با هم برابر می‌باشد. زاویه‌ی بین مجراهای اصلی و فرعی ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه در نظر گرفته شده، از طرفی عرض مقاطع ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میکرومتر و ارتفاع ۶۰ میکرومتر مطابق شکل ۱ در نظر گرفته شده است. مقادیر عرض کانال اصلی و عرض کانال‌های فرعی به ترتیب با W_d و W_c نمایش داده می‌شوند.



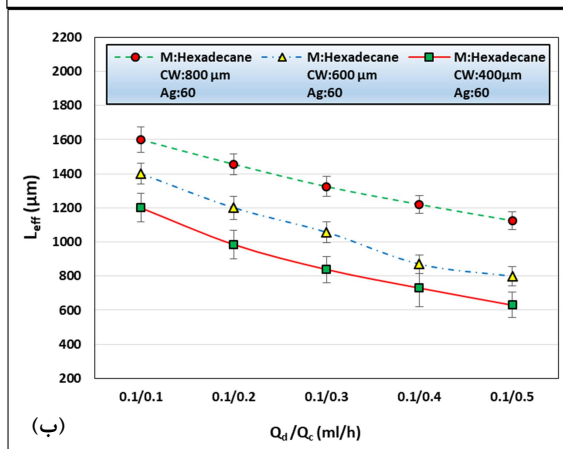
شکل ۱- تراشه‌های طراحی شده جهت تولید ریزقطرات، الف) عرض‌های کانال‌های مورد بررسی در این مطالعه، ب) زوایای بررسی شده بین کانال‌های فرعی و اصلی

۱-۱- مواد و روش‌ها

همانطور که گفته شد، در این مطالعه دو نوع ماده‌ی پارافین روغنی و هگزادکان به صورت جداگانه به عنوان سیال فاز پیوسته و آب به عنوان سیال گسسته در نظر گرفته شده است. جهت تفکیک دو فاز



(الف)



(ب)

شکل ۳- تأثیر قطر مجراها بر قطر ریزقطرات. الف) روند تغییرات قطر ریزقطرات تولیدی در تماس با سیال پارافین روغنی، ب) روند تغییرات قطر ریزقطرات تولیدی در تماس با هگزادکان در مجراهایی به عرض ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی متر

۵-۲- تأثیر زاویه‌ی بین ریزمجراهای ورودی بر قطر ریزقطرات تولیدی

جهت بررسی تأثیر زاویه‌ی بین ریزمجراهای ورودی بر قطر ریزقطرات تشکیل شده، هندسه‌ی تمرکزجریانی بر روی تراشه‌هایی از جنس پلکسی گلس طراحی و ساخته شد. به گونه‌ای که تراشه، شامل ۴ هندسه‌ی تمرکزجریانی با زوایای ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه بود. از این‌رو ماده‌ی پارافین روغنی به عنوان فاز پیوسته با آب دوبار یونیزه شده به عنوان فاز گسسته در نظر گرفته شده است. با افزایش زاویه‌ی بین ریزمجراهای ورودی قطر ذرات تولیدی افزایش می‌یابد. این نتیجه برای هر دو سیال هگزادکان و پارافین صادق است. با افزایش زاویه‌ی بین دو مجرا زاویه‌ی برآیند نیروی برشی که از طرف فاز پیوسته به فاز گسسته اعمال می‌شود، کاهش می‌یابد. در نتیجه در سرعت ثابت فاز گسسته زمان بیشتری را طی کرده و مدت زمان بیشتری طول می‌کشد تا توسط فاز پیوسته بریده شود. بنابراین می‌توان این نکته را استنباط کرد که افزایش زاویه، موجب افزایش قطر ریزقطرات خروجی در سطح مقطع ثابت می‌شود.

دست آمده به ازای دبی‌های یکسان برای هر نمونه ضریب تغییر محاسبه و در کلیه نمودارها نمایش داده شده است. همچنین لازم به ذکر است که، در طول این پژوهش ضریب تغییر قطرات تولید شده در بازه‌ی ۲ تا ۹ درصد متغیر بوده است.

۵- نتایج

در پژوهش حاضر، تأثیر پارامترهای هندسی، مشخصه‌های سیال و متغیرهای فیزیکی بر قطر ریز قطرات تشکیل شده توسط دستگاه ریزسیالاتی با هندسه‌ی تمرکز جریانی به صورت تجربی گزارش شده است، به گونه‌ای که با عکس‌برداری از نمونه‌های به دست آمده به کمک میکروسکوپ دیجیتال و پردازش و بررسی آن‌ها به کمک نرم افزار ایمیج-جی نتایج طبقه‌بندی شده و در ادامه به تفکیک مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۵-۱- تأثیر پارامترهای هندسی بر قطر ریزقطرات تولیدی

همان طور که در شکل ۱ نشان داده شد، جهت بررسی تأثیر عرض مجراهای ورودی بر قطر ریزقطرات تشکیل شده، هندسه‌ی تمرکزجریانی بر روی تراشه‌هایی از جنس پلکسی گلس طراحی و ساخته شد. به گونه‌ای که تراشه شامل ۴ هندسه‌ی تمرکزجریانی با ریزمجراهایی به عرض ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متر بود. از این‌رو دو ماده‌ی هگزادکان و پارافین روغنی به عنوان فاز پیوسته به طور جداگانه با آب دوبار یونیزه شده به عنوان فاز گسسته در نظر گرفته شده است.

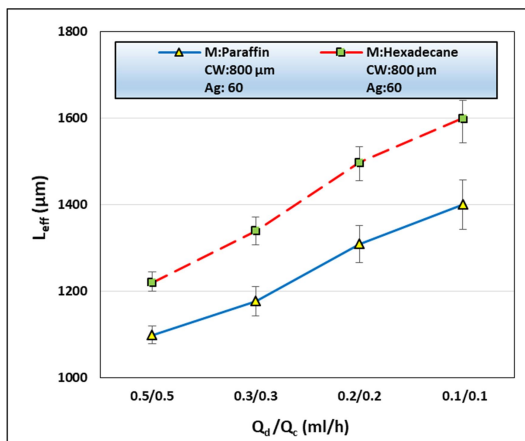
با توجه به ریزقطرات آبی تشکیل شده توسط دو ماده‌ی هگزادکان و پارافین روغنی تأثیر عرض مجراهای ورودی بر قطر ریزقطرات مطابق شکل ۳ به تفکیک گزارش شده است.

باتوجه به شکل ۳ با افزایش قطر ریزمجراهای ورودی، قطر ریزقطرات تولیدی افزایش می‌یابد. این افزایش با توجه به عدد مویینگی قابل توجه است، به گونه‌ای که در دبی ثابت با افزایش قطر ریزمجراها سرعت سیال داخل ریزمجرا کاهش می‌یابد که به دنبال آن عدد مویینگی نیز کاهش می‌یابد، با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش-های قبلی، کاهش عدد بی بعد مویینگی افزایش قطر ریزقطرات را در پی دارد. با توجه به اینکه نسبت لزجت به کشش سطحی پارافین در مقایسه با هگزادکان بیشتر است. عدد مویینگی پارافین در دبی ثابت از هگزادکان بیشتر است، در نتیجه می‌توان روند کاهش سریعتر قطر را به این ترتیب توجیه کرد.

۴-۵- تأثیر پارامترهای سینماتیکی بر قطر ریزقطرات

تولیدی

در این قسمت تأثیر پارامترهای سینماتیکی همچون نرخ جریان ریزمجرها بر روی قطر ریزقطرات خروجی بررسی شده است. با توجه به عدد بی بعد مویینگی، با افزایش سرعت فاز گسسته ریزقطرات کاهش می‌یابد. در این قسمت نرخ جریانی فاز پیوسته نسبت به نرخ جریانی فاز گسسته ثابت است و هر دو با یک نسبت زیاد می‌شوند.



شکل ۶- تأثیر پارامتر سینماتیکی نرخ جریان سیال پیوسته بر قطر ریزقطرات

۶- نتیجه‌گیری

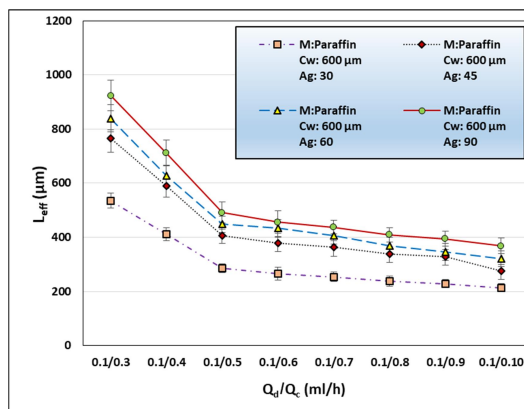
در این مقاله به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی و سیالاتی بر اندازه ریزقطرات در دستگاه‌های ریزسیالاتی با هندسه‌ی تمرکز جریانی پرداخته شد. همچنین، تأثیر پارامترهای هندسی، مکانیکی و مشخصه‌های سیال بر قطر ریزقطرات تولیدی، مورد ارزیابی قرار گرفتند. با توجه به نتایج بدست آمده در این پژوهش، مواردی همچون پارامترهای هندسی، مشخصه‌های فیزیکی سیال و ویژگی‌های سینماتیکی آن بر قطر ریزقطرات خروجی تأثیر گذار بوده، به گونه‌ای که با افزایش زاویه بین مجرای اصلی و فرعی و افزایش عرض مجراها قطر ریزقطرات نیز افزایش می‌یابد. این درحالی است که با کاهش نسبت لزجت به کشش سطحی سیال، قطر ریزقطرات تولیدی کاهش می‌یابد. در پایان، طبق مشاهدات، افزایش نرخ جریان فاز پیوسته کاهش قطر ریزقطرات تولیدی را در پی دارد.

۷- سپاسگزاری

با تقدیر و تشکر از دانشکده مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده داروسازی دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی و سایر دوستان و عزیزانی که در این پژوهش مساعدت نموده‌اند.

۸- نمادها

Ag	زویای بین ریزمجرهای پیوسته و گسسته
CW	عرض ریزمجرای سیال پیوسته
M	جنس سیال پیوسته

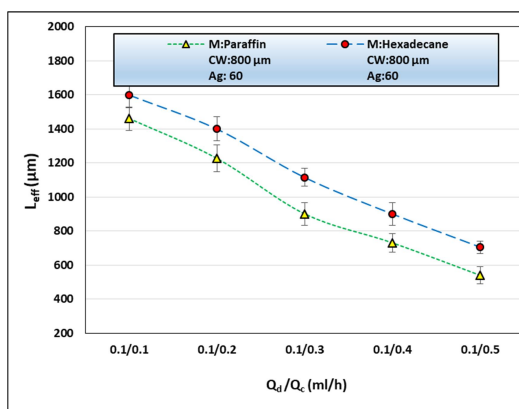


شکل ۴- تأثیر زاویه بین ریزمجرها بر قطر ریزقطرات خروجی برای ماده پارافین تحت زاویه‌های ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه برای ریزمجرهای ۶۰۰ میلی متری

۵-۳- تأثیر مشخصه‌های فیزیکی سیال بر قطر ریزقطرات

خروجی

در این قسمت تأثیر مشخصه‌های سیال در طول نرخ جریان‌های متفاوت، بر روی قطر ریزقطرات تولیدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. با تغییر جنس مواد، لزجت و کشش سطحی آن‌ها تغییر می‌کند. در این پژوهش دو سیال هگزادکان و پارافین جهت بررسی تأثیر مشخصات سیال بر قطر ریزقطرات خروجی انتخاب شده‌اند. همچنین، لزجت و کشش سطحی این دو سیال که جهت پایداری بیشتر ریزقطرات تولیدی با ۴ درصد اسین ۸۰ ترکیب شدند، به صورت تجربی محاسبه و مطابق جدول ۲ گزارش شده است. با در نظر گرفتن عدد مویینگی و مقایسه نسبت لزجت به کشش سطحی پارافین و هگزادکان مطابق جدول ۲ این نکته استنباط می‌شود که، پارافین در سرعت ثابت نسبت لزجت به کشش سطحی بالاتری را اختیار می‌کند. پس در سرعت ثابت عدد مویینگی پارافین از هگزادکان بزرگ‌تر و در نتیجه پارافین در قیاس با هگزادکان ریزقطرات کوچک‌تری تولید می‌کند. این نتایج مطابق نمودار شکل ۵ گزارش شده است.



شکل ۵- تأثیر تغییر سیال پیوسته بر قطر ریزقطرات برای دو سیال پارافین و هگزادکان روغنی در ریزمجرهای ۸۰۰ میلی متری در زاویه‌ی ۶۰ درجه‌ای

wetting: The magic of microfluidics. *Mrs Bulletin*, 32(9), pp.702-708, 2007.

[14] Gañán-Calvo A.M., Generation of steady liquid microthreads and micron-sized monodisperse sprays in gas streams. *Physical Review Letters*, 80(2), p.285, 1998.

[15] Hein M., Fleury J.B. and Seemann R., Coexistence of different droplet generating instabilities: new breakup regimes of a liquid filament. *Soft Matter*, 11(26), pp.5246-5252, 2015.

[16] Yasuda M., Goda T., Ogino H., Glomm W.R. and Takayanagi H., Preparation of uniform monomer droplets using packed column and continuous polymerization in tube reactor. *Journal of colloid and interface science*, 349(1), pp.392-401, 2010.

[17] Anna S.L., Droplets and bubbles in microfluidic devices. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 48, pp.285-309, 2016.

[18] Cristini V. and Tan Y.C., Theory and numerical simulation of droplet dynamics in complex flows—a review. *Lab on a Chip*, 4(4), pp.257-264, 2004.

[19] Abate A.R. and Weitz D.A., High-order multiple emulsions formed in poly (dimethylsiloxane) microfluidics. *Small*, 5(18), pp.2030-2032, 2009.

[20] Utada A.S., Lorenceau E.L., Link D.R., Kaplan P.D., Stone H.A. and Weitz D.A., Monodisperse double emulsions generated from a microcapillary device. *Science*, 308(5721), pp.537-541, 2005.

[21] Seo M., Paquet C., Nie Z., Xu S. and Kumacheva E., Microfluidic consecutive flow-focusing droplet generators. *Soft Matter*, 3(8), pp.986-992, 2007.

[22] Chu L.Y., Utada A.S., Shah R.K., Kim J.W. and Weitz D.A., Controllable monodisperse multiple emulsions. *Angewandte Chemie International Edition*, 46(47), pp.8970-8974, 2007.

[23] Panizza P., Engl W., Hany C. and Backov R., Controlled production of hierarchically organized large emulsions and particles using assemblies on line of co-axial flow devices. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 312(1), pp.24-31, 2008.

[24] Utada A.S., Fernandez-Nieves A., Stone H.A. and Weitz D.A., Dripping to jetting transitions in coflowing liquid streams. *Physical review letters*, 99(9), p.094502, 2007.

[25] Collins R.T., Jones J.J., Harris M.T. and Basaran O.A., Electrohydrodynamic tip streaming and emission of charged drops from liquid cones. *Nature Physics*, 4(2), p.149, 2008.

[26] Xu J.H., Li S.W., Tan J. and Luo G.S., Correlations of droplet formation in T-junction microfluidic devices: from squeezing to dripping. *Microfluidics and Nanofluidics*, 5(6), pp.711-717, 2008.

[27] Romero P.A. and Abate A.R., Flow focusing geometry generates droplets through a plug and squeeze mechanism. *Lab on a Chip*, 12(24), pp.5130-5132, 2012.

[28] De Menech M., Garstecki P., Jousse F. and Stone H.A., Transition from squeezing to dripping in a microfluidic T-shaped junction. *journal of fluid mechanics*, 595, pp.141-161, 2008.

[29] Abate A.R., Mary P., van Steijn V. and Weitz D.A., Experimental validation of plugging during drop formation in a T-junction. *Lab on a Chip*, 12(8), pp.1516-1521, 2012.

طول مجرا (μm)	L
دبی (ml.h^{-1})	Q
عرض مجرا (μm)	W

نمادهای یونانی

لزجت دینامیکی ($\text{kg.m}^{-1}\text{s}^{-1}$)	μ
چگالی (kg.m^{-3})	ρ
کشش بین سطحی (mN.m^{-1})	σ

اعداد بی بعد

عدد رینولدز	Re
عدد باند	Bo
عدد مویبگی	Ca
عدد وبر	We

زیر نویس ها

فاز پیوسته	c
فاز گسسته	d
موثر	eff

۹- مراجع

[1] Zhang Y., Liu D., Zhang H. and Santos H.A., Microfluidic mixing and devices for preparing nanoparticulate drug delivery systems. *Microfluidics for Pharmaceutical Applications*, pp. 155-177, 2019.

[2] Lee T.Y., Choi T.M., Shim T.S., Frijns R.A. and Kim S.H., Microfluidic production of multiple emulsions and functional microcapsules. *Lab on a Chip*, 16(18), pp.3415-3440, 2016.

[3] Alam M.K., Emmanuel K., Heng Z., Changqing Y., Cheuk-Wing L., Tao X. and Mengsu Y., Recent advances in microfluidic technology for manipulation and analysis of biological cells (2007–2017). *Analytica chimica acta*, 2018.

[4] Cui P. and Wang S., Applications of microfluidic chip technology in pharmaceutical analysis: A review. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, 2018.

[5] Yang R.J., Fu L.M. and Hou H.H., Review and perspectives on microfluidic flow cytometers. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 266, pp.26-45, 2018.

[6] Anna S.L., Droplets and bubbles in microfluidic devices. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 48, pp.285-309, 2016.

[7] Gupta A., Matharoo H.S., Makkar D. and Kumar R., Droplet formation via squeezing mechanism in a microfluidic flow-focusing device. *Computers & Fluids*, 100, pp.218-226, 2014.

[8] Thorsen T., Roberts R.W., Arnold F.H. and Quake S.R., Dynamic pattern formation in a vesicle-generating microfluidic device. *Physical review letters*, 86(18), p.4163, 2001.

[9] Teh S.Y., Lin R., Hung L.H. and Lee A.P., Droplet microfluidics. *Lab on a Chip*, 8(2), pp.198-220, 2008.

[10] Zhu P. and Wang L., Passive and active droplet generation with microfluidics: a review. *Lab on a Chip*, 17(1), pp.34-75, 2017.

[11] Tice J.D., Ismagilov R.F. and Zheng B., August. Forming droplets in microfluidic channels with alternating composition and application to indexing concentrations in droplet-based assays. *Anal. Chem*, vol. 76, no. 17, pp. 4977–4982, 2004.

[12] Umbanhowar P.B., Prasad V. and Weitz D.A., Monodisperse emulsion generation via drop break off in a coflowing stream. *Langmuir*, 16(2), pp.347-351, 2000.

[13] Utada A.S., Chu L.Y., Fernandez-Nieves A., Link D.R., Holtze C. and Weitz D.A., Dripping, jetting, drops, and