

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

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

محمد رضا چیمه راد

سasan آسیابی

حسام مقدسی

*فاطمه قربانی بیدکره

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 برای همی‌داری 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 دارویی، 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 گستته) بهصورت تجربی مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. نتایج نشان دادند که با افزایش زاویه‌ی بین مجرای اصلی و فرعی و افزایش عرض مجرای‌ها 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 بهصورت نسبتاً خطی کاهش می‌یابد. بدلاً از این 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-Bidkorbeh

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.

تبلور نمونه‌های کوچک آزمایشگاهی محلول‌ها که بر پایه‌ی ریزقطرات بنا نهاده شده‌اند، تولید شوند [۵-۸]. در طول این فرآیند هر کدام از قسمت‌های ریزقطرات همانند یک راکتور بسیار کوچک منفرد به گونه‌ای عمل می‌کند که محلول‌های آبی در دمای اتاق تهیه شوند. عده‌ی 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 تبخر که در مقایسه بزرگ موجود بود، می‌باشد [۹]. جنس و هندسه‌ی مجرای‌های دستگاههای ریزسیالاتی تأثیر بهسزایی در نحوه تشکیل قطره دارند. به

۱- مقدمه

در دهه‌ی اخیر فرآیند تشکیل ریزقطره به دلیل کاربرد گسترده‌ی آن در پژوهش‌های مختلف اعم از مهندسی، به یکی از جزویت‌های بسیار مهم در تحقیقات تبدیل شده است [۱۴-۱۱]. تولید ریزقطرات با ابعاد یکنواخت کاربردهای بسیار وسیع و بی‌شماری در تولیدات مهندسی و پزشکی دارد. تولید کنترل شده 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: fghorbani@sbmu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۷/۴/۰۷

تاریخ پذیرش: ۹۸/۴/۲۴

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 نحوه 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 مقاطع [۱۱]، جریان‌های دنبال هم [۱۲]، [۱۳] و مرکز جریانی [۱۴] مشاهده شده است در حالی که تشکیل قطره به کمک ایجاد محدودیت توسط ریز مجرها در سه هندسه‌ی امولسیون‌سازی مرحله‌ای [۱۵]، امولسیون‌سازی توسط ریز مجرها و امولسیون‌سازی توسط غشاء [۱۶] تقسیم بندی شده‌اند.

با توجه به این که در هندسه‌ی مرکز جریانی قطرات تولیدی نسبت به هندسه‌های دیگر یکپارچه‌تر و قابل کنترل‌تر می‌باشند، در این تحقیق هندسه‌ی مرکز جریانی به عنوان هندسه‌ی مطلوب انتخاب شده است. در ابتدا هندسه‌ی مرکز جریانی توسط منن و همکارانش به صورت سه بعدی ارائه شد، که با توجه به دشواری‌های موجود در ساخت این هندسه، هندسه‌ی دو بعدی مرکز 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 ریز مجرها 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 [۱۹-۲۳]. 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 ریز مجرها 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 انتهای 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 مقاوتی اتفاق بیافتد، که به طور معمول به سیله‌ی 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 بی بعد قابل توصیف می‌باشد.

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

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

در این فرمول u نماد بردار سرعت سیال و نمادهای d و e به ترتیب نماد فاز گسسته و پیوسته می‌باشند، همچنین ρ_s ، η_s و f از ترتیب نمایانگر زمان، چگالی سیال، فشار، لزجت و کل نیروهای خارجی وارد به 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 موینینگی دلالت دارند.

$$u_d \cdot n = u_c \cdot n \quad (2)$$

$$\sigma_d \cdot t = \sigma_s \cdot t \quad (3)$$

$$T_d \cdot n - T_s \cdot n = -\gamma \kappa n \quad (4)$$

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

- الف - نیروی ایترسی
- ب - نیروی لزجت
- ج - نیروی گرانش
- د - نیروی موینینگی

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

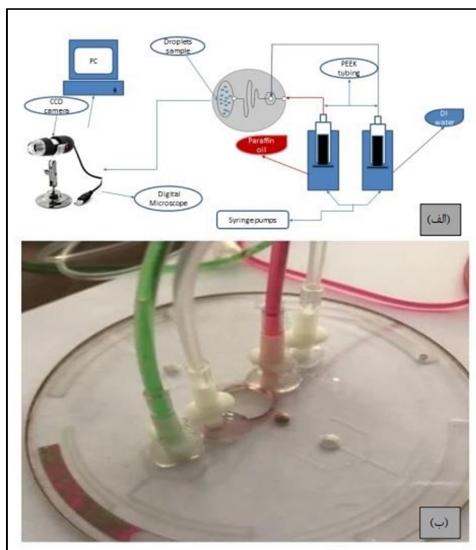
جدول ۱- اعداد بی بعد حاکم در تشکیل قطره

اعداد بی بعد	معادلات
رینولدز	$Re = \frac{\rho_s u_s L}{\eta_s}$
موینینگی	$Ca = \frac{\eta_s u_s}{\gamma}$
ویر	$We = \frac{\rho_s u_s^2 L}{\gamma}$
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 ریزمند می‌شود. با پیشروع فاز گسسته در مقاطع 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 این‌رو گرادیان فشار در فاز پیوسته در پشت قطره افزایش می‌یابد. این در حالی است که کشش بین سطحی بین سیال و مجرأ 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 دیوارهای مجرأ محدود می‌شود و شکل آن به جای کروی بودن به شکل بیضی می‌باشد [۲۹].

با افزایش عدد موینینگی، رژیم جریانی از حالت فشردگی به حالت چکه‌ای جایه‌جا می‌شود، جایی که در آن نیروی لزج بر اثرهای ناشی از

پیوسته و گستته 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. سرینگ از طریق اتصال دهندهای 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 رابطه‌ها 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	۷۱۱/۶	۳/۸۵	۶/۹۲
پارافین ۴٪ اسپن	۸۰۷/۶۳	۳۴/۷	۱۷/۸۲

۲-۳- طراحی و ساخت دیسک

در این پژوهش، یک تراشه‌ی ریزسیالاتی، حاوی مدل تمرکز جریانی، 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 ریز مجرها 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 ریز مجرها و مخازن روی آن با دستگاه کاتر پلاتر تعییه 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

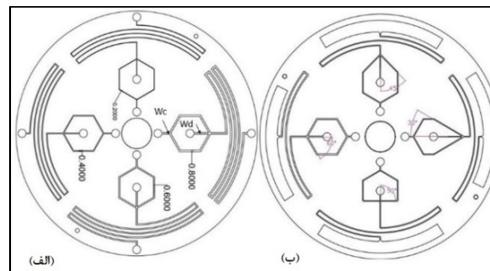
در طی پژوهش انجام شده تمامی نتایج به صورت دوره‌ای مورد بررسی قرار گرفته شده‌اند، از طرفی با توجه به اختلاف در نتایج به-

کشش بین سطحی غلبه کرده و باعث گسیختگی فاز گستته می‌شود. به دلیل بالا بودن نیروی برشی ناشی از لزجت، فاز گستته قبل از آن که به طور کامل مجرای اصلی را اشغال کند، تکه می‌شود. از این رو شکل ذره به صورت کروی با ابعادی کوچک‌تر از ابعاد مجرای باقی می‌ماند و قطرات یکپارچه در این رژیم تشكیل می‌گردد. با افزایش نرخ جریان فازهای پیوسته و گستته تغییر رژیم از چکیدگی به جهشی اتفاق می‌افتد. که در طی آن فاز گستته 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 مویینگی، 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

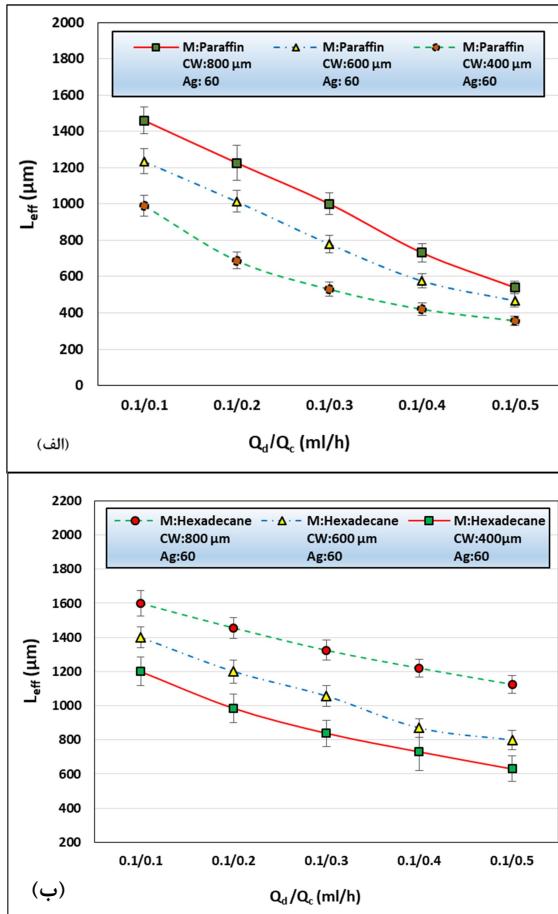
هدف از این پژوهش، تاثیر پارامترهای هندسی و سیالاتی بر اندازه ریزقطرات در دستگاههای ریزسیالاتی با هندسه‌ی تمرکز جریانی به صورت تجربی (با استفاده از دو نوع ماده‌ی پارافین روغنی و هگزادکان بهصورت مجزا به عنوان سیال فاز پیوسته) می‌باشد، که منجر به تولید ریزقطرات به عنوان پایه‌ای برای حامل‌های داروسانی، به 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 ریز مجرای اصلی با مقاطع مستطیلی شکل است، که مقطع هر کدام با هم برابر می‌باشد. زاویه‌ی بین مجرای اصلی و فرعی ۴۵، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه در نظر گرفته شده، از طرفی عرض مقاطع ۴۰۰، ۴۵۰ 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_c و W_d 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

۴- مواد و روش‌ها

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



شکل ۳- تأثیر قطر مجراهای 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

۲-۵- تأثیر زاویه‌ی بین ریز مجراهای ورودی بر قطر ریزقطرات تولیدی

جهت بررسی تأثیر زاویه‌ی بین ریز مجراهای ورودی بر قطر ریزقطرات تشکیل شده، هندسه‌ی تمرکز جریانی بر روی تراشه‌هایی از جنس پلاکسی گلس طراحی و ساخته شد. به گونه‌ای که تراشه شامل ۴ هندسه‌ی تمرکز جریانی با ریز مجراهایی به عرض ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی متر بود. از این رو دو ماده‌ی هگزادکان و پارافین روغنی به عنوان فاز پیوسته به طور جداگانه با آب دوبار یونیزه شده به عنوان فاز گسته در نظر گرفته شده است.

با افزایش قطر ریز مجراهای ورودی، قطر ریزقطرات تولیدی افزایش می‌یابد. این افزایش با توجه به عدد مویینگی قابل توجیه است، به گونه‌ای که در دبی ثابت با افزایش قطر ریز مجراهای سرعت سیال داخل ریز مجراهای 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.

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 ریزقطرات 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.

۱-۵- تأثیر پارامترهای هندسی بر قطر ریزقطرات تولیدی

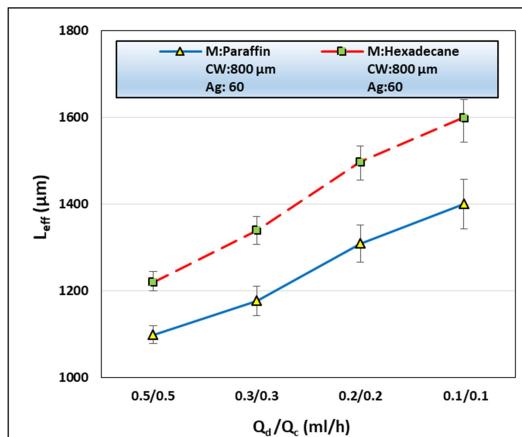
همان طور که در شکل ۱ نشان داده شد، جهت بررسی تأثیر عرض مجراهای ورودی بر قطر ریزقطرات تشکیل شده، هندسه‌ی تمرکز جریانی بر روی تراشه‌هایی از جنس پلاکسی گلس طراحی و ساخته شد. به گونه‌ای که تراشه شامل ۴ هندسه‌ی تمرکز جریانی با ریز مجراهایی به عرض ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی متر بود. از این رو دو ماده‌ی هگزادکان و پارافین روغنی به عنوان فاز پیوسته به طور جداگانه با آب دوبار یونیزه شده به عنوان فاز گسته 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 ریز مجراهای ورودی، قطر ریزقطرات تولیدی افزایش می‌یابد. این افزایش با توجه به عدد مویینگی قابل توجیه است، به گونه‌ای که در دبی ثابت با افزایش قطر ریز مجراهای سرعت سیال داخل ریز مجراهای 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 ریز مجرها بر روی قطر ریزقطرات خروجی بررسی شده است. با توجه به عدد بی بعد موینگی، با افزایش سرعت فاز گستته ریزقطرات کاهش می‌یابد. در این قسمت نرخ جریانی فاز پیوسته نسبت به نرخ جریانی فاز گستته ثابت است و هر دو با یک نسبت زیاد می‌شوند.



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

۶- نتیجه‌گیری

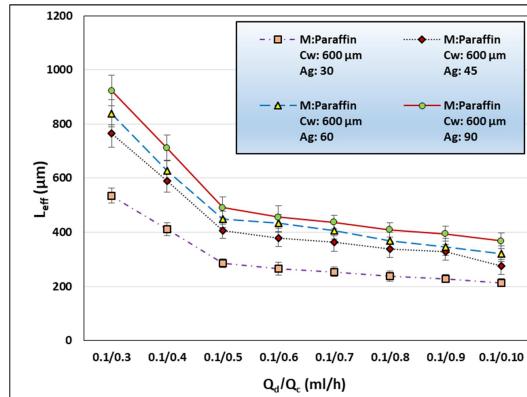
در این مقاله به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی و سیالاتی بر اندازه ریزقطرات در دستگاههای ریزسیالاتی با هندسه‌ی تمرکز جریانی پرداخته شد. همچنین، تأثیر پارامترهای هندسی، مکانیکی و مشخصه‌های سیال بر قطر ریزقطرات تولیدی، مورد ارزیابی قرار گرفتند. با توجه به نتایج بدست آمده در این پژوهش، مواردی همچون پارامترهای هندسی، مشخصه‌های فیزیکی سیال و ویژگی‌های سینماتیکی آن بر قطر ریزقطرات خروجی تأثیر گذار بوده، به گونه‌ای که با افزایش زاویه‌ی بین مجرى اصلی و فرعی و افزایش عرض مجرها قطر ریزقطرات نیز افزایش می‌یابد. این در حالی 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

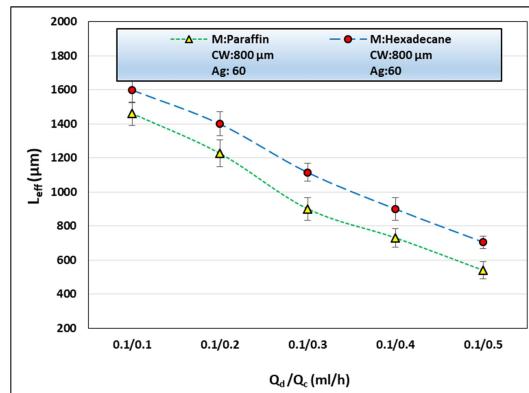
زیای بین ریز مجراهای پیوسته و گستته	Ag
عرض ریز مجرای سیال پیوسته	CW
جنس سیال پیوسته	M



شکل ۴ - تأثیر زاویه‌ی بین ریز مجرها بر قطر ریزقطرات خروجی برای ماده پارافین تحت زاویه‌ای ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه برای ریز مجراهای ۶۰۰ میلی‌متری

۳-۵- 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 مشخصه‌های سیال بر قطر ریزقطرات خروجی انتخاب شده‌اند. همچنین، لزجت و کشش سطحی این دو سیال که جهت پایداری بیشتر ریزقطرات تولیدی با ۴ درصد اسپن ۸۰ درجه شدن، به صورت تجربی محاسبه و مطابق جدول ۲ گزارش شده است. با در نظر گرفتن عدد موینگی و مقایسه نسبت لزجت به کشش سطحی پارافین و هگزادکان مطابق جدول ۲ این نکته استبانته می‌شود که، پارافین در سرعت ثابت نسبت لزجت به کشش سطحی بالاتری را اختیار می‌کند. پس در سرعت ثابت عدد موینگی 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 ریز مجراهای ۸۰۰ میلی‌متری در زاویه‌ای ۶۰ درجه‌ای

- wetting: The magic of microfluidics. *Mrs Bulletin*, 32(9), pp.702-708, 2007.
- [14] Gahán-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 موینگی	Ca
عدد ویر	We
فاز پیوسته	c
فاز گسسته	d
مؤثر	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