



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۵، صفحه ۳۲۳ تا ۳۲۹  
Vol. 48, No. 3, Autumn 2016, pp. 323-329



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی مکانیک  
AmirKabir Journal of Science & Research  
Mechanical Engineering  
ASJR-ME

## روش جابجایی حلال برای تولید قطره در سامانه ریزسیالی

رامین حاجیان<sup>۱\*</sup>، آشیش داگا<sup>۲</sup>، اشتفن هارت<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی دارمشتات، آلمان

۲- دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، موسسه فناوری هند (IIT)

۳- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی دارمشتات، آلمان

(دریافت: ۱۳۹۴/۴/۳۰ پذیرش: ۱۳۹۴/۹/۲۸)

### چکیده

در این مقاله یک روش جدید تولید قطره در سامانه ریزسیالی از طریق سازوکار جابجایی حلال، بر مبنای یک تحقیق تجربی ارائه می‌شود. برای این منظور از یک سامانه با ساختار سه‌بعدی هم‌جریان متشکل از یک جریان میانی (جت) و یک جریان بیرونی استفاده می‌شود. محلولی از اتانول و روغن به صورت جت جریان دارد که با جریان آب احاطه شده است. انتقال جرم به صورت پخش ملکولی در راستای شعاعی سبب ایجاد حالت اشباع و در ادامه، موجب جدایش فاز به صورت تشکیل نانوقطرات می‌شود. به دلیل وجود اختلاف غلظت در راستای شعاعی کانال، نانوقطرات تحت تاثیر جابجایی مارانگونی به سمت مرکز کانال حرکت می‌کنند و در آنجا تجمع می‌کنند. در صورتیکه غلظت روغن به قدر کافی زیاد باشد تعداد نانوقطرات تولیدشده و جمع‌شده در مرکز کانال به قدری افزایش می‌یابد که با هم برخورد کرده و قطراتی با قطر بالای ۱۰ میکرومتر تشکیل می‌شوند. چنانچه غلظت روغن در محلول ۱۰٪ باشد، قطرات تولیدشده قطر متوسط بین ۱۰ تا ۳۰ میکرومتر خواهند داشت. اندازه میکروقطرات با افزایش دبی جت افزایش می‌یابد.

### کلمات کلیدی:

تولید قطره، ریزسیالی، جابجایی حلال، اثر اوزو، جابجایی مارانگونی.

Please cite this article using:

Hajian, R., Daga, A., and Hardt, S., 2016. "Solvent Shifting Approach for Droplet Generation in a Microfluidic Device". *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 48(3), pp. 323-329.  
URL: [http://mej.aut.ac.ir/article\\_661.html](http://mej.aut.ac.ir/article_661.html)

نویسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات: Email: [hajian@csi.tu-darmstadt.de](mailto:hajian@csi.tu-darmstadt.de)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



## ۱- مقدمه

در طول دهه گذشته تحقیقات بسیاری بر روی تولید قطره در میکروکانال‌ها انجام شده است [۱ و ۲]. انگیزه این تحقیقات ناشی از کاربردهای بسیار متنوع میکروقطرات است. برخی از این کاربردها عبارتند از تولید ترکیبات شیمیایی و نانوذرات [۳-۶]، مطالعات زیست‌شناسی [۷-۹] و همچنین تولید امولسیون‌های حاوی قطرات به نسبت هم‌اندازه<sup>۱</sup> یا سوسپانسیون‌های حاوی ذرات به نسبت هم‌اندازه [۱۰-۱۳].

روش‌های مرسوم تولید قطره در سامانه‌های ریزسیالی مانند کانال T-شکل<sup>۲</sup> و جریان متمرکز<sup>۳</sup>، اغلب بر اساس نیروی هیدرودینامیکی پسا<sup>۴</sup> یا ناپایداری‌های هیدرودینامیکی ناشی از کشش سطحی (به ویژه ناپایداری ریلی-پلاتو<sup>۵</sup>) هستند. در این روش‌ها اندازه قطره را می‌توان با تغییر ابعاد کانال (یا نازل)، دبی و دما تغییر داد. اندازه قطره به شدت وابسته به ابعاد (عرض و ارتفاع) میکروکانال یا قطر نازل است. این ابعاد نیز به نوبه خود وابسته به فناوری ساخت هستند یعنی با توجه به فناوری ساخت سامانه ریزسیالی، ابعاد کانال‌ها نمی‌توانند از یک حدی کوچک‌تر شوند. اگرچه ساخت میکروکانال‌هایی با ابعاد زیر ۱۰ میکرومتر ممکن است ولی در مجموع نه تنها ساخت این کانال‌ها ساده نیست بلکه کار کردن با آنها با مشکلات متنوعی همراه است. به عنوان مثال ساخت آنها باید در اتاق تمیز<sup>۶</sup> انجام شود در غیر اینصورت ذرات معلق در هوا فرایند ساخت را با مشکل مواجه خواهند کرد. روش‌های جایگزین تولید قطره به ویژه روش‌هایی که مستقل از ابعاد کانال باشند ممکن است بتوانند این مشکل را حل کنند.

فرایند استخراج مایع/مایع<sup>۷</sup> به طور بالقوه می‌تواند روشی برای دستیابی به این هدف باشد. در این فرایند سه مایع حلال<sup>۸</sup> (مانند اتانول)، حل‌شونده<sup>۹</sup> (مانند یک روغن) و غیرحلال<sup>۱۰</sup> (مانند آب) وجود دارد. مایع حل‌شونده می‌تواند در مایع حلال حل شود ولی در مایع غیرحلال حل نمی‌شود. محلولی از دو مایع حلال و حل‌شونده را در نظر می‌گیریم. در صورتی که مایع حلال و مایع غیرحلال نیز با یکدیگر قابل انحلال باشند، با افزودن مقداری از مایع غیرحلال به محلول، مایع حلال از محلول اولیه استخراج شده و در مایع غیرحلال حل می‌شود. اگر فرض کنیم محلول اولیه به صورت یک قطره غوطه‌ور در مایع غیرحلال باشد، انتظار می‌رود که با خروج مایع حلال از قطره و حل شدن آن در محیط بیرونی اندازه قطره کاهش یابد. بعضی از محققین این پدیده را در قالب کاهش اندازه

- 1 Mono-disperse
- 2 T-junction
- 3 Flow focusing
- 4 Drag force
- 5 Rayleigh-Plateau instability
- 6 Clean-room
- 7 Liquid/liquid extraction
- 8 Solvent
- 9 Solute
- 10 Non-solvent

قطره در میکروکانال (به عنوان مثال در کانال‌های جریان متمرکز) بررسی کرده‌اند [۱۴-۱۶]. با توجه به اینکه انحلال‌پذیری وابسته به دما است، در این روش سرعت کاهش اندازه قطره نیز با دما تغییر می‌کند. اگر غلظت مایع حل‌شونده به صورت قابل‌توجهی کاهش یابد انتظار می‌رود که در یک سامانه جریان متمرکز به جای تشکیل قطره، جریان پیوسته‌ای از محلول تشکیل شود زیرا کشش سطحی بین محلول (حاوی درصد بالایی از حلال) و مایع غیرحلال (جریان بیرونی) به قدری کم است که عملاً سطح مشترکی<sup>۱۱</sup> بین جریان محلول و جریان مایع غیرحلال تشکیل نمی‌شود، اگرچه پس از انتقال جرم امکان تشکیل سطح مشترک و قطره وجود دارد.

اگر فرض کنیم که محلول اولیه مایع حلال و مایع حل‌شونده در یک ظرف وجود دارد، با اضافه کردن مقداری از مایع غیرحلال به آن، جدایش فاز به دو صورت تجزیه اسپینودال<sup>۱۲</sup> یا پدیده اثر اوزو<sup>۱۳</sup> رخ می‌دهد. در تجزیه اسپینودال انرژی آزاد لازم برای هسته‌زایی<sup>۱۴</sup> به قدری کم است که فرایند تشکیل، رشد و برخورد قطرات با سرعت بسیار زیاد انجام می‌شود و کل محلول به سرعت به دو قسمت مجزا تقسیم می‌شود. زمانی که غلظت مایع حل‌شونده در محلول زیاد باشد تجزیه اسپینودال رخ می‌دهد. در پدیده اثر اوزو (که با عنوان جابجایی حلال نیز شناخته می‌شود) به دلیل اینکه غلظت مایع حل‌شونده خیلی کم است، با افزودن مایع غیرحلال، طی فرایند هسته‌زایی، تعداد بسیار زیادی قطرات کوچک (در ابعاد ۱ میکرومتر و یا حتی کوچکتر) تشکیل می‌شوند که بدون استفاده از سورفکتانت<sup>۱۵</sup> تا چند روز به صورت پایدار در سیستم باقی می‌مانند [۱۷]. روشاک و میلر [۱۸] این پدیده را برای سیستم آب-اتانول-تولون بررسی کرده‌اند. ویتالو و کاتز [۱۷] دی-وینیل‌بنزن<sup>۱۶</sup> (دی‌وی‌بی)، اتانول و آب بدون یون<sup>۱۷</sup> را به ترتیب به عنوان مایع حل‌شونده، مایع حلال و مایع غیرحلال به کار گرفتند و یک نمودار فازی سه‌گانه<sup>۱۸</sup> را به صورت تجربی تدوین کردند. این نمودار نه تنها مانند نمودارهای فازی دیگر ناحیه تک فاز و دو فاز را مشخص می‌کند بلکه ناحیه تشکیل قطرات ریز و پایدار (یعنی ناحیه اوزو) و ناحیه مربوط به تجزیه اسپینودال را نیز جدا می‌کند. با استفاده از نمودار فازی مذکور اخیراً یک تحقیق تجربی/تحلیلی را بر روی تشکیل نانوقطرات دی‌وی‌بی در یک سامانه ریزسیالی انجام داده‌ایم [۱۹]. در آنجا نشان داده‌ایم که نانوقطرات پس از تشکیل، به سمت مرکز کانال حرکت کرده و تقریباً در مرکز کانال تجمع می‌کنند. در واقع در آن مقاله فیزیک حاکم بر تشکیل و حرکت شعاعی قطرات به سمت مرکز کانال بررسی شده است که مربوط به غلظت بسیار کم به سمت مرکز کانال بررسی شده است. در مقاله حاضر ابتدا فیزیک پدیده مذکور را به

- 11 Interface
- 12 Spinodal decomposition
- 13 Ouzo effect
- 14 Nucleation
- 15 Surfactant
- 16 Divinylbenzene
- 17 Deionized
- 18 Ternary phase diagram

غلظت در سیال محیطی و در راستای شعاعی هستند. به دلیل وابستگی کشش سطحی قطره به غلظت اجزاء موجود در سیال محیطی، اختلاف غلظت موجود سبب تغییر کشش سطحی روی سطح قطره می‌شود. از آنجا که دی‌وی‌بی می‌تواند در اتانول حل شود ولی در آب قابل انحلال نیست بنابراین کشش سطحی قطره دی‌وی‌بی در ناحیه‌ای که غلظت اتانول بیشتر است (یعنی سمت مرکز کانال) کمتر بوده و در ناحیه‌ای که غلظت آب بیشتر است (یعنی سمت دیواره کانال) کشش سطحی بیشتر است. جابجایی مارانگونی عبارت است از جریان سطحی ناشی از اختلاف کشش سطحی. جهت این جریان از ناحیه با کشش سطحی کمتر به ناحیه با کشش سطحی بیشتر است. در اثر جابجایی مارانگونی نانوقطرات به سمت مرکز کانال حرکت کرده و در آنجا تجمع می‌کنند. حرکت نانوقطرات به سمت مرکز کانال مشابه حرکت حرارتی - مویینی یک قطره غوطه‌ور در یک مایع دارای گرادیان دما<sup>۲۱</sup> است. علاوه بر اثر مارانگونی، موقعیت شعاعی مرز بین ناحیه تک فاز و دو فاز نیز در حرکت نانوقطرات موثر است. تحلیل کامل این پدیده‌ها در مرجع [۱۹] آمده است. چنانچه غلظت روغن افزایش یابد تعداد نانوقطراتی که تشکیل شده و در مرکز کانال تجمع می‌کنند نیز افزایش می‌یابد. وقتی که تعداد نانو قطرات جمع شده در مرکز کانال به قدر کافی زیاد باشد، با هم برخورد کرده و قطرات بزرگتر (یعنی میکروقطرات) را تشکیل می‌دهند و در نهایت زنجیره‌ای از میکروقطرات به همراه جریان در امتداد کانال حرکت می‌کنند (شکل ۲).

### ۳- تشریح آزمایش

شکل ۱ طرح‌واره<sup>۲۲</sup> جریان را در سامانه ریزسیالی نشان می‌دهد. یک لوله شیشه‌ای مویین<sup>۲۳</sup> مخروطی (با مقطع دایره‌ای) به عنوان نازل استفاده شده است. قطر داخلی و خارجی نوک نازل به ترتیب ۳۰ و ۵۰ میکرومتر است. کانال بیرونی یک لوله شیشه‌ای مویین با مقطع مربعی و ضلع ۱ میلی‌متر است.

با اینکه این طرح به صورت افقی ترسیم شده ولی در واقع راستای کانال و نازل به صورت عمودی و جهت جریان از پایین به بالا است. اگر جریان به صورت افقی باشد، به دلیل اختلاف قابل توجه چگالی در دو جریان دورنی (جت) و بیرونی و وجود اثر نیروی ارشمیدسی، جت به سمت دیواره بالایی کانال منحرف شده و فرایند تشکیل قطره مختل می‌شود زیرا نانوقطرات طی فرایند هسته‌زایی تشکیل می‌شوند و چنانچه محل تشکیل قطرات در تماس با سطوح جداره کانال باشد، این سطوح به عنوان محل هسته‌زایی<sup>۲۴</sup> عمل کرده و قطرات روی دیوار کانال تشکیل می‌شوند. همچنین در صورت انحراف جت به سمت دیواره کانال، جریان متقارن نبوده و تحلیل انتقال جرم بسیار پیچیده خواهد شد.

صورت مختصر مرور می‌کنیم (بخش ۲). سپس با ارائه نتایج تجربی مربوط به غلظت‌های نسبتاً بالای روغن (دی‌وی‌بی) نشان می‌دهیم که افزایش غلظت روغن سبب افزایش قابل توجه نانوقطرات، برخورد آنها در مرکز کانال و در نتیجه تشکیل میکروقطراتی با قطر کمتر از ۵۰ میکرومتر می‌شود. در پایان بحث مختصری بر روی نتایج تجربی انجام خواهد شد.

### ۲- تشکیل و حرکت عرضی نانوقطرات

دو جریان دورنی (جت) و بیرونی با تقریب خوبی به صورت متقارن محوری<sup>۱۹</sup> هستند (شکل ۱). جت حاوی محلولی از اتانول و روغن و جریان بیرونی حاوی آب بدون یون است. غلظت اتانول در محلول بسیار بیشتر از غلظت روغن است. به دلیل وجود اختلاف غلظت در مرز جت و سیال بیرونی، انتقال جرم در راستای شعاعی از جت به ناحیه بیرونی و برعکس انجام می‌شود. به دلیل اینکه جریان تک‌بعدی و آرام (با عدد رینولدز در حدود ۱) است انتقال جرم در راستای شعاعی از طریق پخش مولکولی انجام می‌شود. در اثر انتقال جرم در راستای شعاعی حالت اشباع و سپس فوق‌اشباع در مرز جت ایجاد می‌شود و در نتیجه جدایش فاز به صورت پدیده اثر اوزو (یعنی تشکیل نانوقطرات دی‌وی‌بی) رخ داده و حالت دوفاز در نزدیکی مرز جت ایجاد می‌شود. با گذشت زمان و ادامه انتقال جرم در راستای شعاعی ناحیه دوفاز به سمت مرکز و دیواره کانال گسترش می‌یابد. فرایند پخش مولکولی و تشکیل نانوقطرات در ناحیه نزدیک به مرکز کانال انجام می‌شود. با فرض سرعت یکنواخت در این ناحیه و با در نظر گرفتن دستگاه مختصات متحرک با جریان، می‌توان از انتقال جرم ناشی از جابجایی در راستای طولی کانال صرف‌نظر کرده و

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( rD \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (1)$$

معادله انتقال جرم را در راستای شعاعی حل کرد:

که در آن  $C$ ،  $r$  و  $D$  به ترتیب غلظت، فاصله شعاعی از مرکز کانال و ضریب پخش مولکولی هستند. با فرض سرعت یکنواخت، معادله (۱) را می‌توان به صورت تحلیلی برای اتانول حل کرد. در ناحیه دوفاز بخشی از روغن به صورت نانوقطرات درآمده و عملاً از فرایند پخش مولکولی خارج می‌شوند. به این دلیل در معادله انتقال جرم مربوط به دی‌وی‌بی عبارت خروج جرم<sup>۲۰</sup> نیز اضافه می‌شود و معادله به صورت عددی حل می‌شود [۱۹]. با توجه به اینکه در این تحقیق غلظت‌ها بر حسب نسبت جرمی مشخص می‌شوند، با حل معادلات انتقال جرم برای اتانول و روغن، غلظت آب نیز به دست می‌آید. با ترسیم منحنی تغییرات غلظت اتانول و روغن بر روی نمودار فازی مربوط به سیستم آب- اتانول - دی‌وی‌بی می‌توان وضعیت سیستم (به این معنا که در حالت تک فاز است یا دوفاز) را برای  $r$  و  $t$ های مختلف تعیین کرد [۱۹]. نانوقطرات در ناحیه دوفاز تشکیل می‌شوند. این نانوقطرات به محض تشکیل در معرض اختلاف

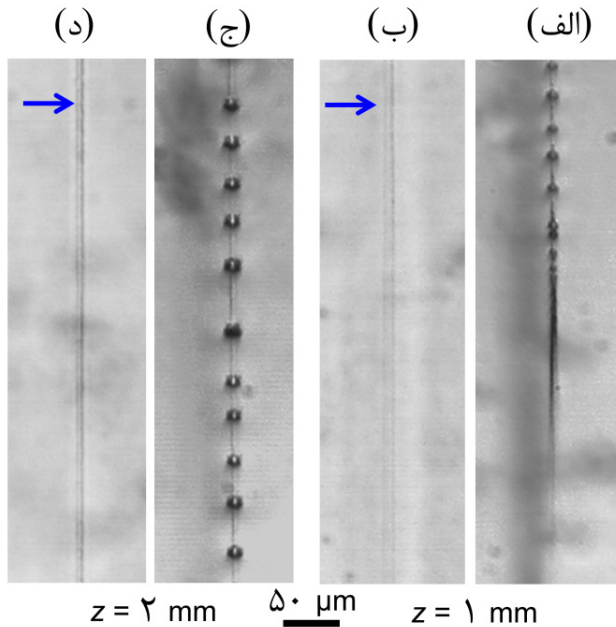
21 Thermo-capillary droplet migration  
22 Schematic  
23 Capillary  
24 Nucleation site

19 Axisymmetric  
20 Sink term

است.

#### ۴- نتایج و بحث

برای بررسی اثر غلظت دی‌وی‌بی بر روی تشکیل میکروقطرات، دو غلظت ۰/۵٪ و ۱۰٪ را در نظر می‌گیریم. همانطور که اشاره شد میکروقطرات زمانی تشکیل می‌شوند که غلظت دی‌وی‌بی به قدر کافی

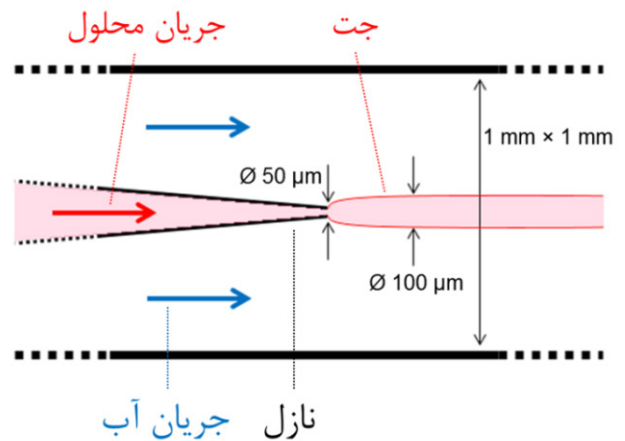


شکل ۳: تاثیر غلظت دی‌وی‌بی بر روی تشکیل قطره در کانال. شکل‌های (الف) و (ج) مربوط به محلول ۹۰٪ اتانول و ۱۰٪ روغن و شکل‌های (ب) و (د) مربوط به محلول ۹۹/۵٪ اتانول و ۰/۵٪ روغن است. جهت جریان به سمت بالا است. فلش‌ها خطوط خاکستری را نشان می‌دهند که به دلیل تجمع نانوقطرات در مرکز کانال ایجاد شده است.

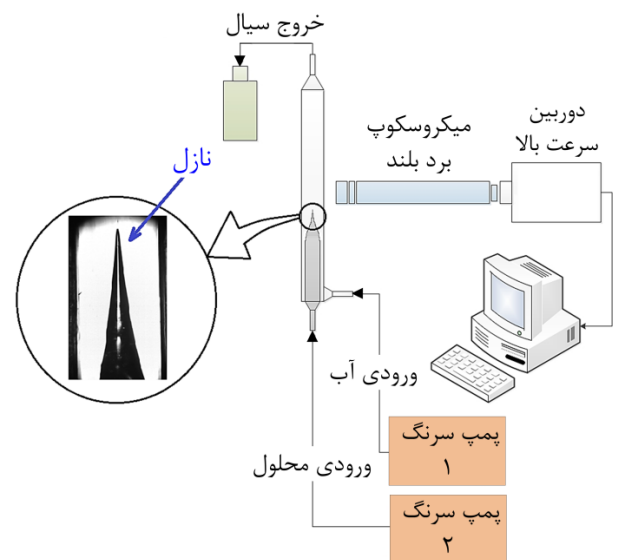
زیاد باشد.

شکل ۳ نشان می‌دهد که برای غلظت زیاد روغن (یعنی ۱۰٪) میکروقطرات تشکیل می‌شوند ولی برای ۰/۵٪ میکروقطرات مشاهده نمی‌شوند. در حالتی که غلظت کم است، نانوقطرات (به دلیل تفکیک‌پذیری<sup>۲۵</sup> محدود میکروسکوپ) به صورت تک‌تک و مجزا دیده نمی‌شوند بلکه مجموعه‌ای از تعداد بسیار زیاد نانوقطرات به صورت خطوط خاکستری در مرکز کانال ظاهر می‌شوند (شکل‌های ۳-ب و ۳-د). شکل ۳ همچنین وضعیت تشکیل قطره را در حالت غلظت کم و زیاد روغن در دو مکان متفاوت در راستای کانال ( $z$ ) مقایسه می‌کند.  $z$  فاصله از نازل است و از طریق رابطه  $z = V \cdot t$  با زمان مرتبط است.  $V$  سرعت متوسط سیال در ناحیه نزدیک مرکز کانال است. در این شکل دبی جت برابر ۲ میکرولیتر بر دقیقه است.

مکان تشکیل میکروقطرات در راستای کانال ( $z_{drop}$ ) بستگی به دبی جت دارد. مکان شعاعی تشکیل نانوقطرات ناحیه دوفاز است. این ناحیه ابتدا در مرز جت (با سیال محیطی) شکل می‌گیرد و به مرور به سمت دیواره و مرکز کانال گسترش می‌یابد. هرچه دبی جت بیشتر باشد قطر



شکل ۱: جت محلول اتانول و روغن و جریان بیرونی آب



شکل ۲: دستگاه آزمایش سامانه ریزسیالی

شکل ۲ طرح‌واره دستگاه آزمایش را نشان می‌دهد. سامانه ریزسیالی به صورت عمودی قرار گرفته و دارای دو ورودی و یک خروجی جریان است. برای تزریق سیال در کانال و نازل از دو پمپ سرنگ<sup>۲۵</sup> استفاده شده است. میکروسکوپ برد بلند<sup>۲۶</sup> و دوربین سرعت بالا<sup>۲۷</sup> برای ضبط تصاویر استفاده شده است. مکان دوربین و میکروسکوپ ثابت و ارتفاع سامانه ریزسیالی قابل تنظیم است.

اتانول مورد استفاده برای آزمایش‌ها (تهیه شده از شرکت مرک میلیپور<sup>۲۸</sup>) خلوص ۹۹/۹٪ دارد. دی‌وی‌بی مورد استفاده محصول شرکت سیگما-آلدریج<sup>۲۹</sup> است. همه آزمایش‌ها در دمای آزمایشگاه (۲۳-۲۲ °C) انجام شده است. دبی سیال محیطی ثابت و برابر ۵۰ میکرولیتر بر دقیقه است. آزمایش برای دبی‌های مختلف جت انجام شده

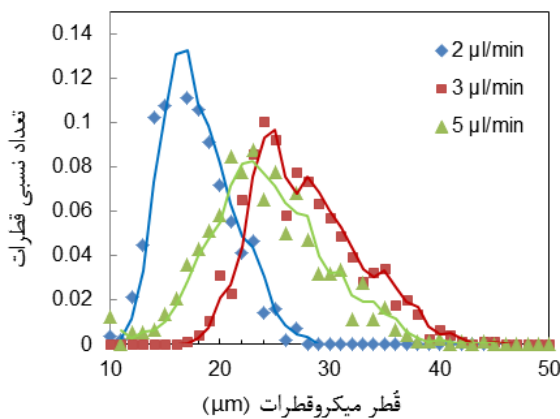
25 Syringe pump (model: KD Scientific 210)

26 Long-distance microscope (model: Infinity K2/SC)

27 Model: MotionPro Y4

28 Merck Millipore

29 Sigma-Aldrich



شکل ۵: توزیع اندازه میکروقطرات برای دبی‌های مختلف در  $z_{drop}$

پس از اینکه میکروقطرات تشکیل شدند، در حین حرکت در امتداد کانال اندازه آنها افزایش می‌یابد. این تغییر اندازه به دلایل مختلف رخ می‌دهد. به عنوان مثال، نانوقطرات به صورت پیوسته به سمت مرکز کانال حرکت می‌کنند و پس از برخورد با میکروقطرات، به آنها می‌پیوندند. البته افزایش اندازه میکروقطرات از این طریق چندان قابل توجه نیست زیرا

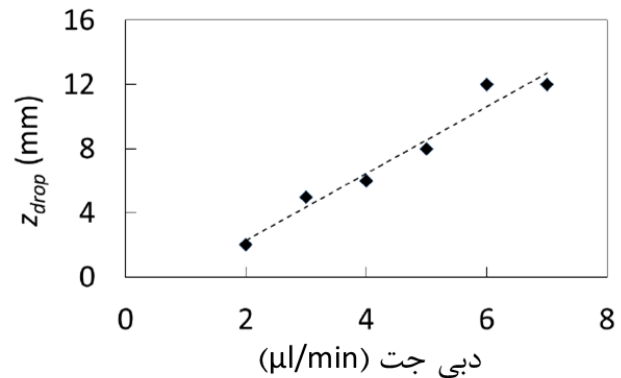
جدول ۱: اندازه متوسط قطرات برای دبی‌های مختلف جت در  $z_{drop}$

| قطر متوسط قطرات ( $\mu\text{m}$ ) | دبی جت ( $\mu\text{l}/\text{min}$ ) |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| ۱۶/۷                              | ۲                                   |
| ۲۶/۴                              | ۳                                   |
| ۳۰/۰                              | ۵                                   |

حجم نانوقطرات بسیار کمتر از حجم میکروقطرات است. همچنین میکروقطرات در حین حرکت در امتداد کانال می‌توانند با قطرات مجاور خود برخورد نمایند و به این ترتیب تعداد آنها کاهش و اندازه آنها افزایش می‌یابد. این فرایند عامل اصلی تغییر اندازه میکروقطرات است. برخورد میکروقطرات با میکروقطرات مجاور، در نزدیکی محل تشکیل بیشتر بوده و در  $z$  های بالاتر و با افزایش فاصله میکروقطرات، کاهش می‌یابد.

شکل ۶ تغییرات اندازه متوسط و تعداد میکروقطرات را بر حسب  $z$  نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۶- الف مشاهده می‌شود نرخ تغییر تعداد قطرات در ابتدا زیاد بوده و با افزایش  $z$  کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش  $z$  در اثر برخورد قطرات مجاور، فاصله بین دو قطره مجاور بیشتر شده و در نتیجه تعداد برخوردها و نرخ تغییر تعداد قطرات کاهش می‌یابد. زمانی که قطرات دی‌وی‌بی تشکیل می‌شوند، می‌توانند مقداری اتانول را از محیط جذب نمایند. ولی به دلیل اینکه اتانول به سمت پیوسته از ناحیه مرکز کانال (یعنی محل حضور میکروقطرات) به سمت دیواره در حال انتقال است بنابراین اتانول جذب‌شده در میکروقطرات نیز به مرور از آنها خارج شده و قطرات دوباره خالص می‌شوند و در صورتیکه طول و عرض کانال به قدر کافی زیاد باشد قطرات به نسبت خالص

آن نیز بیشتر شده و فاصله شعاعی که لازم نانوقطرات طی کنند تا به مرکز کانال برسند نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه با افزایش دبی جت زمان بیشتری لازم است تا تعداد کافی نانوقطرات در مرکز کانال تجمع کرده و میکروقطرات را تشکیل دهند. همانطور که اشاره شد  $z$  و  $t$  با هم متناسب هستند. در نتیجه همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود با افزایش دبی



شکل ۴: مکان تشکیل میکروقطرات (در راستای کانال) برای دبی‌های مختلف

جت  $z_{drop}$  نیز افزایش می‌یابد. تغییرات  $z_{drop}$  با دبی جت تقریباً خطی است. برای به دست آوردن توزیع اندازه قطرات، تصاویر ضبط شده، توسط نرم‌افزار دی‌ام‌وی<sup>۳۱</sup> پردازش شده است. این نرم‌افزار به همین منظور طراحی شده است و به وسیله آن می‌توان تعداد و اندازه قطرات را تعیین کرد [۲۰].

برای هر دبی مشخص، در  $z_{drop}$  یک ویدیو در یک مدت زمان معین ضبط شده است. به دلیل بالا بودن فرکانس تولید قطرات و در نتیجه زیاد بودن تعداد قطرات تولیدشده در ویدیوهای ضبط شده، نیاز است که کار شمارش و اندازه‌گیری قطرات توسط نرم‌افزار انجام شود. نرم‌افزار دی‌ام‌وی تعداد قطراتی را که از مقطع  $z_{drop}$  عبور می‌کنند شمرده و با توجه به طول مقیاسی که برای آن تعریف می‌شود اندازه قطرات را مشخص کرده و در نهایت نمودار توزیع اندازه را ترسیم می‌کند. در شکل ۵ توزیع اندازه میکروقطرات به صورت تعداد نسبی آنها بر حسب قطر میکروقطرات نشان داده شده است. این داده‌ها مربوط به  $z_{drop}$  (یعنی نزدیک به مکانی که میکروقطرات تشکیل می‌شوند) است. منظور از تعداد نسبی قطرات، نسبت تعداد قطرات با اندازه مشخص به تعداد کل قطرات است.

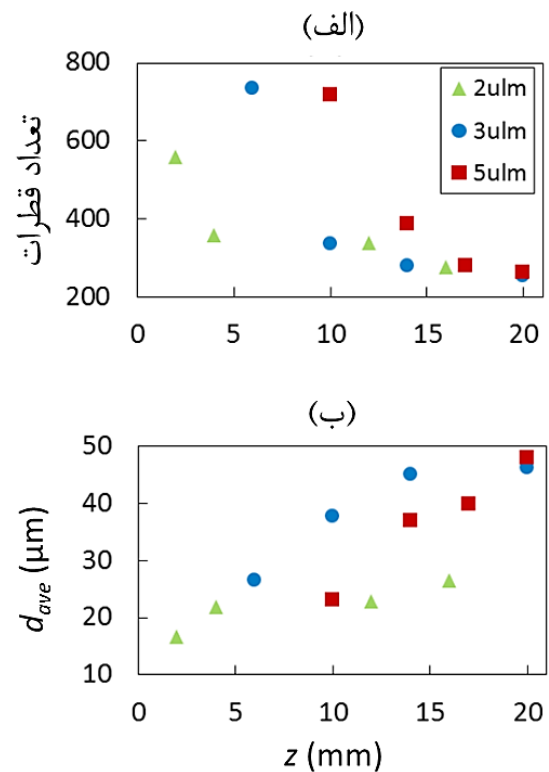
با افزایش دبی جت مقدار روغن موجود در سیستم افزایش یافته و انتظار می‌رود که میکروقطرات تولید شده نیز بزرگتر باشند زیرا نانوقطرات بیشتری تولید شده و در مرکز کانال تجمع می‌کنند که در اثر برخورد آنها میکروقطرات بزرگتری (نسبت به دبی‌های کمتر) تولید می‌شود. جدول ۱ اندازه متوسط قطرات را برای دبی‌های مختلف جت (بر حسب میکروولیتتر بر دقیقه) در  $z_{drop}$  نشان می‌دهد.



این مقاله امکان تولید میکروقطرات با روش جابجایی حلال در سامانه میکروسیالی را نشان داده شده است. در ادامه این کار توصیه می‌شود سازوکار رشد قطرات در امتداد کانال به صورت دقیق‌تر بررسی شود زیرا برای کنترل اندازه قطرات ضروری است.

#### ۶- مراجع

- [1] Teh, S.Y., Lin, R., Hung, L.H., Lee, A.P., 2008, "Droplet Microfluidics". *Lab on a Chip* 8, 198–220.
- [2] Seemann, R., Brinkmann, M., Pfohl, T., Herminghaus, S., 2012, "Droplet based microfluidics". *Reports on Progress in Physics* 75, 016601.
- [3] Duraiswamy, S., Khan, S.A., 2009, "Droplet-Based Microfluidic Synthesis of Anisotropic Metal Nanocrystals". *small* 5, No. 24, 2828–2834.
- [4] Lan, W., Li, S., Xu, J., Luo, G., 2012, "A one-step microfluidic approach for controllable preparation of nanoparticle-coated patchy microparticles". *Microfluidics and Nanofluidics* 13, 491–498.
- [5] Lignos, I., Protesescu, L., Stavrakis, S., Piveteau, L., Speirs, M.J., Loi, M.A., Kovalenko, M.V., deMello, A.J., 2014, "Facile Droplet-based Microfluidic Synthesis of Monodisperse IV–VI Semiconductor Nanocrystals with Coupled In-Line NIR Fluorescence Detection". *Chemistry of Materials* 26, 2975–2982.
- [6] Lewis, C.L., Lin, Y., Yang, C., Manocchi, A.K., Yuet, K.P., Doyle, P.S., Yi, H., 2010, "Microfluidic Fabrication of Hydrogel Microparticles Containing Functionalized Viral Nanotemplates". *Langmuir* 26 (16), 13436–13441.
- [7] Joensson, H.N., Svahn, H.A., 2012, "Droplet Microfluidics—A Tool for Single-Cell Analysis". *Angewandte Chemie International Edition* 51, 12176–12192.
- [8] Lagus, T.P., Edd, J.F., 2013, "A review of the theory, methods and recent applications of high-throughput single-cell droplet microfluidics". *Journal of Physics D: Applied Physics* 46, 114005.
- [9] Schneider, T., Kreutz, J., Chiu, D.T., 2013, "The Potential Impact of Droplet Microfluidics in Biology". *Analytical Chemistry* 85, 3476–3482.
- [10] Xu, S., Nie, Z., Seo, M., Lewis, P., Kumacheva, E., Stone, H.A., Garstecki, P., Weibel, D.B., Gitlin, I., Whitesides, G.M., 2005, "Generation of Monodisperse Particles by Using Microfluidics: Control over Size, Shape, and Composition". *Angewandte Chemie International Edition* 44, 724–728.
- [11] Lee, I., Yoo, Y., Cheng, Z., Jeong, H.K., 2008,



شکل ۶: تغییرات تعداد میکروقطرات (الف) و قطر متوسط آنها (ب) در راستای کانال

دی‌وی‌بی به دست می‌آید.

در پایان گفتنی است که در روش‌های مرسوم تولید میکروقطرات در سامانه‌های ریزسیالی - که در مقدمه اشاره شد - میکروقطرات از یک حجم بزرگتر مایع جدا می‌شوند یعنی حجم بزرگتری از یک مایع به قطرات کوچک تقسیم می‌شود. این رویکرد را می‌توان رویکرد از بالا به پایین<sup>۳۳</sup> نامید. در مقابل، روش ارائه شده در این مقاله رویکرد از پایین به بالا<sup>۳۲</sup> است یعنی نانوقطرات (به عنوان اجزاء کوچکتر)، با هم برخورد کرده و به صورت کنترل شده میکروقطرات (به عنوان اجزاء بزرگتر) را ایجاد می‌کنند.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای نخستین بار روش تولید میکروقطرات بر مبنای جابجایی حلال در یک سیستم مایع سه‌گانه (متشکل از سه جزء) در یک سامانه ریزسیالی ارائه شده است. این روش بر مبنای انتقال جرم در راستای شعاعی بین جت و سیال محیطی در یک رژیم جریان آرام است. در این روش دو فرایند تشکیل نانوقطرات و حرکت شعاعی نانوقطرات نقش اساسی دارند. در صورتیکه غلظت روغن و در نتیجه تعداد نانوقطرات تشکیل شده به اندازه کافی زیاد باشد، برخورد آنها در مرکز کانال منجر به تشکیل میکروقطرات می‌شود. با ثابت نگه داشتن دبی جریان محیطی، اندازه میکروقطرات تولید شده وابسته به دبی جت است. در مجموع در

32 Top-down approach

33 Bottom-up approach

- for Fluorescence-Indicated Mass Transfer," *μTAS* 2010, 1079-1081.
- [16] Sang, Y.Y.C., Lorenceau, E., Wahl, S., Stoffel, M., Angelescu, D.E., Hoehler, R., 2013, "A microfluidic technique for generating monodisperse submicron-sized drops". *RSC Advances* 3, 2330-2335.
- [17] Vitale, S.A., Katz, J.L., 2003, "Liquid Droplet Dispersions Formed by Homogeneous Liquid-liquid Nucleation: The Ouzo Effect". *Langmuir* 19, 4105-4110.
- [18] Ruschak, K.J., Miller, C.A., 1972, "Spontaneous Emulsification in Ternary System with Mass Transfer". *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals* 11 (4), 534-539.
- [19] Hajian, R., Hardt, S., "Droplet Formation via Solvent Shifting in a Microfluidic Device". arXiv:1409.8073.
- [20] Basu, A.S., 2013, "Droplet morphometry and velocimetry (DMV): a video processing software for time-resolved, label-free tracking of droplet parameters," *Lab on a Chip*, 13, 1892-1901.
- "Generation of Monodisperse Mesoporous Silica Microspheres with Controllable Size and Surface Morphology in a Microfluidic Device". *Advanced Functional Materials* 18, 4014-4021.
- [12] Yeh, C.H., Zhao, Q., Lee, S.J., Lin, Y.C., 2009, "Using a T-junction microfluidic chip for monodisperse calcium alginate microparticles and encapsulation of nanoparticles". *Sensors and Actuators A* 151, 231-236.
- [13] Kuehne, A.J.C., Weitz, D.A., 2011, "Highly monodisperse conjugated polymer particles synthesized with drop-based microfluidics". *Chemical Communications* 47, 12379-12381.
- [14] Mary, P., Studer, V., Tabeling, P., 2008, "Microfluidic Droplet-Based Liquid-Liquid Extraction". *Analytical Chemistry* 80 (8), 2680-2687.
- [15] Yu, J.Q., Chin, L.K., Chen, Y., Zhang, G.J., Lo, G.Q., Ayi, T.C., Yap, P.H., Kwong, D.L., Liu, A.Q., "Microfluidic Droplet-Based Liquid-Liquid Extraction