

## شبیه‌سازی تولید قطرات در میکروکانال اصلاح شده با متغیر سرعت

فرهاد صادق مغانلو

استادیار، گروه مهندسی مکانیک دانشگاه محقق اردبیلی  
F\_moghanlou@uma.ac.ir

المیرا غضنفری ججین

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه محقق اردبیلی  
e.ghazanfari.j@student.uma.ac.ir

محمد وجدی حکم آباد

استادیار، گروه مهندسی مکانیک دانشگاه محقق اردبیلی  
vajdi@uma.ac.ir

شاپور جعفر قلی نژاد

استادیار، گروه مهندسی مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی اردبیل  
shapoor.jafargolinejad@gmail.com

### چکیده

تولید قطرات در علم میکروفلوئیدیکز دارای کاربردهای گسترده‌ای در انتقال مواد دارویی، تراشه‌های تشخیصی، ساخت دارو و موارد متعدد صنعتی است. اساس کار در تبدیل حجم مشخصی از سیال به قطرات با اندازه مشخص است تا فرآیندهایی نظیر انتقال جرم با سرعت بیش تری انجام شود. قطرات تولید شده در ابعاد میکرو از مزیت‌هایی مثل داشتن مساحت زیاد نسبت به حجم، بازده بالا در ترکیب خوب، خطر کم آلودگی و میزان مصرف کم واکنش برخوردار هستند. در این مقاله برای تولید ریز قطرات در یک میکروکانال مینیاتوری دو سیال آب و روغن به عنوان سیالات پراکنده و پیوسته مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در نرم افزار کامسول نشان می‌دهد که در هندسه ارائه شده قطر ریز قطرات تولید شده کاهش یافته و فرکانس تولید ریز قطرات افزایش یافته است. همچنین با افزایش سرعت سیال پیوسته ورودی به داخل میکروکانال با ثابت ماندن سرعت سیال پراکنده نرخ تولید ریز قطرات در گستره مشخصی افزایش و قطرات با قطر ریزتری تولید گردید. در حالی که با افزایش سرعت سیال پراکنده در ازای ثابت ماندن سرعت سیال پیوسته ابعاد ریز قطرات افزایش می‌یابد.

**کلمات کلیدی:** میکروفلوئیدیکز، تولید قطره، سیالات، روش عددی

## ۱- مقدمه

میکروفلوئیدیکز مبتنی بر قطره به عنوان یک ابزار برای کاربردهای گسترده‌ای تعریف شده است که با مزایایی نظیر کاهش مصرف واکنش‌گرهای شیمیایی، تولید قطرات با حجم بالا و کنترل مستقل هر قطره شناخته شده است. تولید ریزقطره در میکروکانال‌ها به دو روش فعال و غیرفعال صورت می‌گیرد [۱]. در این فرآیند ریزقطرات در داخل میکروکانال‌های مینیاتوری در گستره سیالات انجام می‌شود.

کار در زمینه قطره در محیط‌های کوچک، برای فعالیت‌های شیمیایی، فرآیندهای پزشکی و صنعت بیولوژیکی دارای تاثیر بسیار و بهره‌وری گسترده‌ای می‌باشد [۲]. ترکیب دو ماده (سیال) غیرحل شونده دارای کاربردهای زیادی در داروسازی، صنایع غذایی، آرایشی، آسفالت و بخش پتروشیمی و نفت است [۳].

پیشرفت‌های ویژه‌ای در دهه‌های گذشته به دلیل مزایای ساخت کم هزینه، کوچک بودن حجم نمونه، کاهش زمان تجزیه و تحلیل، انعطاف پذیری عملیاتی و خودکار سازی سریع، در این تکنولوژی صورت گرفته است [۴،۵]. تاکنون تحقیقات متعددی با استفاده از روشهای عددی، تحلیلی و آزمایشگاهی در ارتباط با بررسی رفتار سیستمهای چندفازی شامل سیالات گوناگون انجام شده است [۶،۷].

علی‌زاده و همکاران [۸] از روش شبکه بولتزمن و مدل تابع مشخصه برای شبیه‌سازی پروسه تشکیل قطره در اثر برهم کنش دو سیال مخلوط نشدنی در یک میکروکانال استفاده که مدل عددی رفتار جریان را در این کانال‌ها پیش‌بینی می‌کند. آنها همچنین به این نتیجه رسیدند که در عدد موئینگی ثابت با افزایش دبی سیال پراکنده، اندازه قطرات کاهش می‌یابد.

حاجیان و همکاران [۹] در یک روش جدید تولید قطره در سامانه میکروفلوئیدیکز از طریق سازوکار جابجایی سیال، یک روش بر مبنای یک تحقیق تجربی را ارائه کردند. برای این منظور از یک سامانه با ساختار سه بعدی هم را ستا مت شکل از یک جریان میانی و یک جریان بیرونی استفاده شد. محلولی از اتانول و روغن که به صورت جت جریان داشت با جریان آب احاطه شده بود. آنها به این نتیجه رسیدند که انتقال جرم به صورت پخش ملکولی در راستای شعاعی سبب ایجاد حالت اشباع و در ادامه، موجب جدایش فاز به صورت تشکیل نانوقطرات گردید. 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 صورتی که غلظت روغن به قدر کافی زیاد باشد تعداد نانوقطرات تولید شده و جمع شده در مرکز کانال به قدری افزایش می‌یابد که با هم برخورد کرده و قطراتی با قطر بالای ۱۰ میکرومتر تشکیل می‌شوند.

تن و همکاران [۱۰] تشکیل قطرات آب در روغن و روغن در آب را بصورت آزمایشگاهی بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که قطرات مجزا با افزایش لزجت سیال پیوسته کاهش می‌یابد، در حالی که با افزایش دبی سیال جداشونده به آرامی افزایش می‌یابد.

در میکروکانال‌ها تشکیل قطره زمانی رخ می‌دهد که تنش سطحی که در مقابل شکست قطره در حال رشد مقاومت می‌کند، نمی‌تواند در برابر مجموع نیروهای درگ ویسکوز که در اثر جریان فاز پیوسته و نیروی فشاری به خاطر ممانعت از عبور فاز پیوسته در قبال جریان هجوم فاز پراکنده مقاومت کند و فاز پراکنده مایع به وسیله فاز پیوسته مایع به قطرات ریزی تبدیل می‌شود.

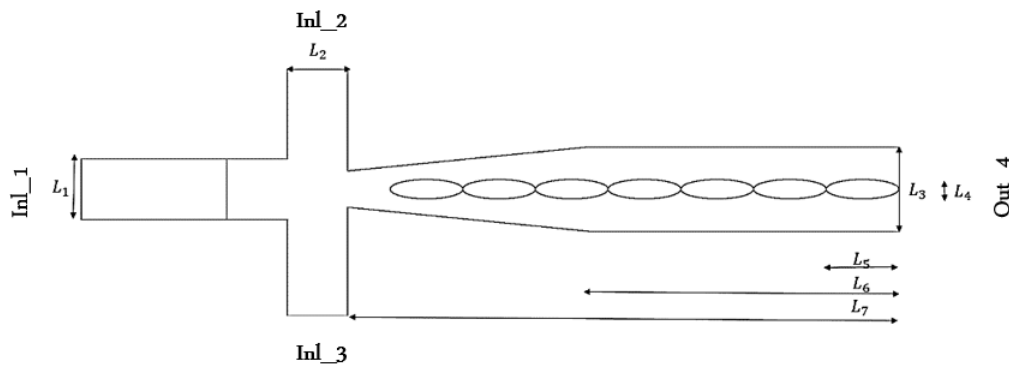
کو و همکاران [۱۱] تشکیل قطرات روغن را در سیال فاز پیوسته در میکروکانال را به صورت عددی بررسی کرده و در نتایج خود عنوان کردند که رئولوژی سیال پیوسته در شکل‌گیری و اندازه قطرات تاثیر بسزایی دارد.

در این پژوهش با طرح یک هندسه جدید، تشکیل ریزقطرات در داخل میکروکانال در سرعت‌های مختلف برای سیال ورودی پیوسته و پراکنده مورد بررسی عددی قرار گرفته است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- هندسه

تولید قطره عمدتاً در میکروکانال‌های مینیاتوری T و Y شکل صورت می‌گیرد. این نوع از هندسه‌ها به طور متداول در هر دو روش تولید قطره در روش تجربی و عددی کاربرد دارند. با ایجاد موانعی در داخل میکروکانال T شکل در این تحقیق یک میکروکانال برای بررسی عددی تولید قطرات در نرم افزار کامسول طراحی گردید. نمایی از هندسه میکروکانال در شکل ۱ و ابعاد هندسه در جدول ۱ آمده است. سیال پیوسته از ورودی میانی میکروکانال بصورت عمودی (از دو بالا و پایین) و سیال پراکنده بصورت افقی وارد میکروکانال می‌شود و جریان سیال بصورت افقی از میکروکانال خارج می‌شود.



شکل ۱: نمایی شماتیک از میکروکانال (هندسه اصلاح شده)

جدول ۱: ابعاد هندسی میکروکانال

نماد	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$	$L_6$	$L_7$
اندازه ( $\mu m$ )	۵۰	۵۰	۷۰	۸	۳۰	۳۴۰	۵۴۰

### ۲-۲- اعداد بی بعد

منظور از اعداد بدون بعد، پارامترهای متشکل از کمیت‌های فیزیکی هستند که از ترکیب این کمیت‌ها، در توصیف نیروهای موثر بر یک پدیده معین استفاده می‌شود [۱۲]. در تولید ریزقطرات اعداد بی بعد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند، در میکروکانال‌ها اثرات نیروی گرانش و اینرسی در مقایسه با نیروهای کشش سطحی و نیروی ویسکوزیته ناچیز می‌باشند، بنابراین اعداد بی بعد باند و رینولدز تاثیر چندانی بر روی فرآیند تشکیل قطره ندارند و می‌توان از آنها صرف نظر نمود. اما اعداد بی بعد موئینگی (نسبت نیروی گرانشی به نیروی کشش سطحی)، وبر (نسبت نیروی اینرسی به نیروی کشش سطحی) به طور ویژه تاثیرات قابل ملاحظه‌ای در روند تشکیل ریزقطرات در میکروکانال‌ها دارند. علاوه بر این  $(\lambda)$  نسبت لزجت سیال پراکنده به سیال پیوسته (۳)،  $(\Pi)$  نسبت چگالی سیال پراکنده به سیال پیوسته (۴) نیز بر روند تولید ریزقطرات موثرند.

$$Ca = \frac{\mu V}{\sigma}$$

(۱) عدد موئینگی

$$We = \frac{\rho L V^2}{\sigma} \quad (۲) \text{ عدد وبر}$$

$$\kappa = \frac{\mu_d}{\mu_c} \quad (۳)$$

$$\alpha = \frac{\rho_d}{\rho_c} \quad (۴)$$

### ۲-۳- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر مسأله در شبیه سازی عددی عبارتند از:

$$\rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}) \quad (۵)$$

$$\nabla \cdot u_s = 0 \quad (۶)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \nabla \cdot \nabla \varphi = \sigma \nabla \cdot (\varepsilon_{ls} \nabla \varphi - \varphi(1 - \varphi) \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|}) \quad (۷)$$

$$n_r = \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|} \quad (۸)$$

که در مجموع روابط بالا (۹-۵)  $\sigma$  کشش سطحی بین دو سیال پیوسته و پراکنده،  $\rho$  چگالی سیال ( $\frac{kg}{m^3}$ )،  $u$  سرعت سیال ( $\frac{m}{s}$ )،  $P$  فشار متوسط،  $\mu$  لزجت دینامیکی است، معادله (۷) معادله Level set برای تحلیل فصل مشترک دو فاز مجزا است که در آن  $\varphi$  تابع توزیع مشخصه (ردیاب مرز مشترک دو سیال پراکنده و پیوسته)،  $\gamma$ ،  $\varepsilon_{ls}$  پارامترهای ثابت هستند. برای دیوار و سطح مشترک دو سیال شرط عدم لغزش اعمال گردید و زاویه ترشوندگی ۲۵ درجه فرض شده که این شرط بجز سه ورودی سیال و خروجی (نقاط ۴-۱) برای بقیه دیوارها حاکم است و در تولید قطره از دو سیال آب و روغن به عنوان سیالات پراکنده و پیوسته استفاده شده است. جریان سیال پیوسته به صورت عمودی از دو مجرای میکروکانال و سیال پراکنده نیز بصورت افقی از یک مجرای وارد می‌شود. خواص فیزیکی آب و روغن مورد استفاده در جدول ۲ آمده است.

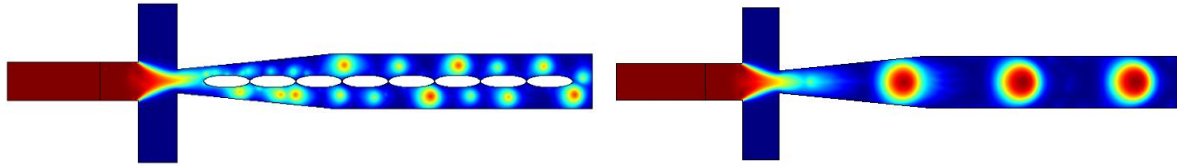
جدول ۲: خواص سیالات پراکنده و پیوسته در تحقیق حاضر [۱۲]

نام سیال	چگالی ( $\frac{kg}{m^3}$ )	لزجت دینامیکی (Pa.s)
آب	۱۰۰۰	۰,۰۰۱
روغن	۸۰۰	۰,۰۰۳

### ۲-۴- نتایج و بحث روی نتایج

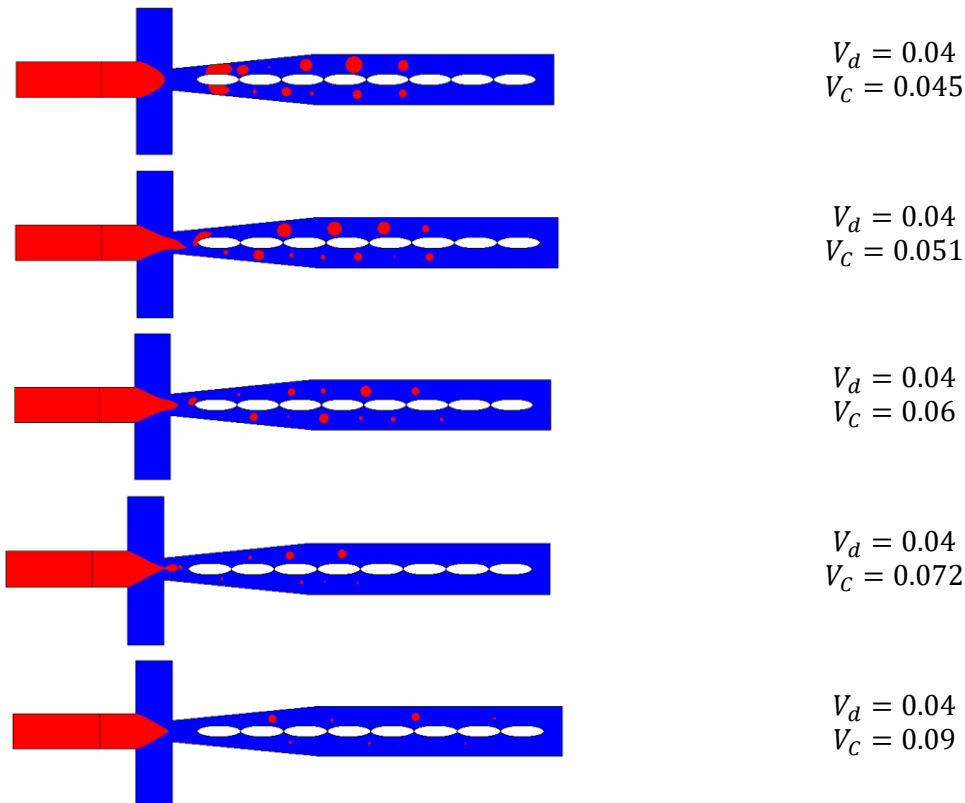
در این پژوهش در یک هندسه جدید تولید قطره در جریان سیال لامینار، تراکم ناپذیر و هم دما صورت گرفت. سرعت ورودی سیال پراکنده و پیوسته به ترتیب در ورودی مجرای میکروکانال ۰,۰۹ و ۰,۰۶ متر بر ثانیه است. نتایج حاصل از بررسی عددی در نرم افزار کامسول نشان داد در بازه زمانی مشخص در میکروکانال، قطرات با اندازه کوچکتر و با نرخ حجم بالاتری

تولید می‌شود و نتایج آن در شکل ۲ آمده است که در مقایسه با کار پژوهشی صورت گرفته توسط ابریشم‌کار و همکاران [۱۳] میزان تولید قطرات افزایش یافته و قطر قطرات کاهش می‌یابد. برای رسیدن به نتیجه دقیق‌تر در تولید قطر با بهینه‌سازی محل دقیق موانع و نوع آنها طی چندین مرحله شبیه‌سازی انتخاب شده است.



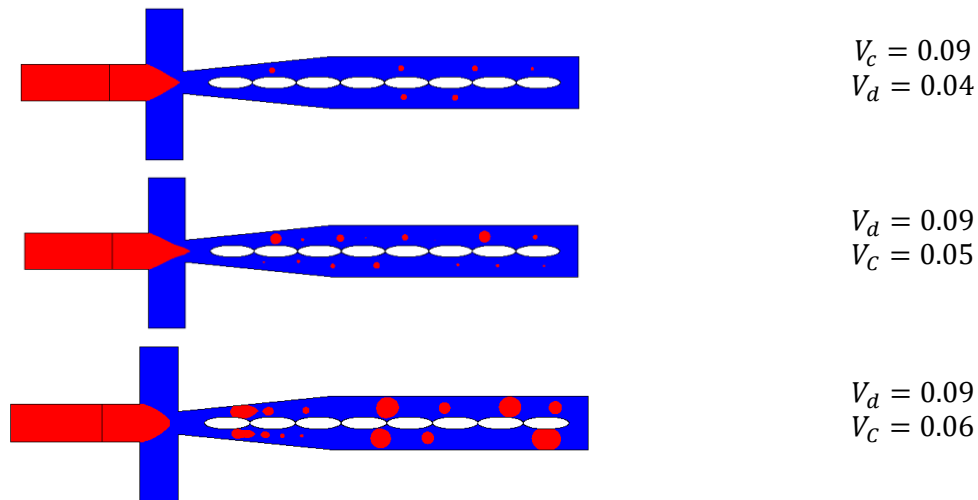
شکل ۲: مقایسه نتایج پژوهش حاضر با نتایج [۱۳]

در بخش دوم میزان سرعت دو سیال آب و روغن مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا سرعت سیال پراکنده ۰,۰۴ متر بر ثانیه به میزان ثابت و سرعت سیال پیوسته متغیر فرض شده است که نتایج حاصل از آن در شکل ۳ قابل ملاحظه است. در یک بازه زمانی مشخص از بالا به پایین با افزایش میزان سرعت ورودی روغن و ثابت ماندن سرعت سیال پراکنده قطر قطرات کاهش می‌یابد و فرکانس تولید قطره در گستره مشخصی افزایش می‌یابد.



شکل ۳: نتایج حاصل از تغییرات سرعت در سیال پیوسته

در بخش سوم از این پژوهش با فرض ثابت ماندن سرعت پیوسته در مقدار در عدد ۰,۰۹ میزان سرعت سیال پراکنده (آب) به صورت متغیر لحاظ شده است. نتایج حاصل از بررسی عددی در شکل ۴ آمده است و نشان می‌دهد با افزایش میزان سرعت سیال پراکنده و ثابت ماندن سرعت سیال پیوسته قطر ریزقطرات تولید شده افزایش می‌یابد و همزمان با آن فرکانس تولید قطرات در بازه زمانی مشخصی بیشتر می‌شود.



شکل ۴: نتایج حاصل از تغییرات سرعت در سیال پراکنده

### ۳- نتیجه‌گیری

بررسی تشکیل قطره در یک سیال توانمندی مطالعه رفتار پارامترهای مختلف را بر مشخصات قطره تشکیل شده، ایجاد می‌کند. مشخصات مختلفی برای یک قطره در حال تشکیل می‌توان در نظر گرفت که از جمله مهم ترین آن‌ها شکل قطره تشکیل شده و اندازه آن است. در این پژوهش تاثیر هندسه و سرعت در سه بخش مورد بررسی گرفت، با توجه به نتایج حاصل می‌توان گفت: نرخ تولید قطرات در هندسه ارائه شده افزایش یافته و اندازه آن کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت سیال پیوسته (روغن) و ثابت ماندن سرعت سیال پراکنده (آب) قطر قطرات کاهش می‌یابد، از سویی دیگر با ثابت ماندن سرعت سیال پراکنده و افزایش سرعت سیال پیوسته اندازه قطرات تولید شده در داخل میکروکانال افزایش یافته و همزمان حجم بیشتری از قطرات تولید می‌شود. استفاده از مانع و متغیر سرعت به عنوان دو روش فعال و منفعل در تولید قطرات در میکروکانال‌های مینیاتوری می‌تواند در روش‌های آزمایشگاهی نیز مورد استفاده قرار گیرد، زیرا با توجه به دقت بالا و کم هزینه بودن آنها نتایج قابل قبول تری خواهد داشت.

### مراجع

- [1] J. D. Tice, H. Song, A. D. Lyon, R. F. Ismagilov, 2003, Formation of droplets and mixing in multiphase microfluidics at low values of the Reynolds and the capillary numbers, *Langmuir*, Vol. 19, No. 22, pp. 9127–9133.
- [2] F. Schuler, M. Trotter, M. Geltman, F. Schwemmer, S. Wadle, E. Dominguez-Garrido, M. Lopez, C. Cervera-Acedo, P. Santibanez, F. von Stetten, R. Zengerle and N. Paust, *Lab Chip*, 2016, 16, 208–216.
- [3] Nesterenko, A., Drelich, A., Lu, H., Clause, D. & Pezron, I., 2014, Influence of a mixed particle/surfactant emulsifier system on water-in-oil emulsion stability. *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 457, 49–57.
- [4] J. Tan, S.W. Li, K. Wang, G.S. Luo, 2009, Gas-liquid flow in T-junction microfluidic devices with a new perpendicular rupturing flow route, *Chem. Eng. J.* 146 (3): 428–433.

- [5] M. De Menech, P. Garstecki, F. Jousse, 2008, H.A. Stone, Transition from squeezing to dripping in a microfluidic T-shaped junction, *J. Fluid Mech.* 595:141–161.
- [6] E.Q. Li, J.M. Zhang, S.T. Thoroddsen, 2014, Simple and inexpensive microfluidic devices for the generation of monodisperse multiple emulsions, *J. Micromech. Microeng.* 24:15019.
- [7] J. Tan, S.W. Li, K. Wang, G.S. Luo, 2009, Gas–liquid flow in T-junction microfluidic devices with a new perpendicular rupturing flow route, *Chem. Eng. J.* 146 (3) 428–433.
- [8] M. Alizadeh, M. Taeibi Rahni, M. Eftekhari Yazdi, Numerical investigation of emulsion process in microchannels, using index-function lattice Boltzmann method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 13-22, 2015 (In Persian).
- [۹] رامین حاجیان، آشیش داگا، اشتفن هارت، ۱۳۹۵، روش جابجایی حلال برای تولید قطره در سامانه ریزسیالی، نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی مکانیک، دوره ۴۸، شماره ۳، صفحه ۳۲۹-۳۲۳.
- [10] Tan J., Xu J.H., Li S.W., Luo G.S., 2008, Drop dispenser in a crossjunction microfluidic device: Scaling and mechanism of break-up. *Chemical Engineering Science*, Vol. 136, No. 2, pp. 306-311.
- [11] Qiu D.M., Silva L., Tonkovich A.L., Arora R., 2010, Micro-droplet formation in non-Newtonian fluid in a microchannel. *Microfluid. Nanofluid.*, Vol. 8, pp. 531-548.
- [12] Pingan Zhu, Liqiu Wang, 2017, Passive and active droplet generation with microfluidics: a review, *Lab on a Chip journal*, [www.rsc.org/loc](http://www.rsc.org/loc).
- [13] Abrishamkar A, A.S. Rane1, K.S. Elvira, R.C.R. Wootton, T. Sainio, A.J. deMello, 2013, A COMSOL Multiphysics® Model of Droplet Formation at a Flow Focusing Device, *Comsol conferevcne Rotterdam*.