



## Interfacial Tension Measurement Using Microfluidics

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Arvahi M.<sup>1</sup> MSc,  
Masoudi S.Gh.<sup>1</sup> MSc,  
Mohammadi A.\*<sup>1</sup> PhD

#### How to cite this article

Arvahi M, Masoudi S.Gh, Mohammadi A. Interfacial Tension Measurement Using Microfluidics. Modares Mechanical Engineering, 2019; 19(4):911-918.

### ABSTRACT

Microfluidic chips in the last two decades have had significant advances in the analysis of interfacial tension phenomenon due to their many advantages. To analyze interfacial tension phenomena, droplet flow in microchannels can be used. In this study, water-n-hexane interfacial tension in the presence of surface-active agents was measured, using microfluidic tensiometry. For this purpose, a glass microfluidic flow-focusing junction was fabricated for generating n-hexane droplets within an aqueous phase. The dependence of droplet size on the concentration of surfactants has been investigated. A theoretical equation was developed, considering force balance on the droplet generation in the microfluidic device, giving a relation between the interfacial tension and the generated droplet sizes. By standardizing the microfluidic chips with the aid of a system, whose interfacial tension is known (hexane normal and tween 20 in distilled water), interfacial tension can be measured with measuring the size of produced droplets for other systems that can form droplets in the microchannel. In this study, the microfluidic device and the relation were employed to measure the interfacial tension in the presence of either of sodium dodecyl sulphate (SDS) or Cetyl trimethylammonium bromide (CTAB) surfactants. It was found that the measured interfacial tensions deviate less than 10% compared to those measured with a commercially available ring method.

**Keywords** Interfacial Tension; Microfluidics; Surfactant

<sup>1</sup>Chemical & Petroleum Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

#### \*Correspondence

Address: Chemical & Petroleum Engineering Department, Sharif University of Technology, Azadi Street, Tehran, Iran  
Phone: +98 (21) 66165410  
Fax: -  
amohammadi@sharif.edu

#### Article History

Received: March 14, 2018  
Accepted: November 07, 2018  
ePublished: April 06, 2019

### CITATION LINKS

[1] Fundamentals and applications of microfluidics [2] Microfluidic platforms for lab-on-a-chip applications [3] Microfluidic methods for generating continuous droplet streams [4] Formation and stability of nanoparticle-stabilised oil-in-water emulsions in a microfluidic chip [5] Continuous-flow microreactor chemistry under high-temperature/pressure conditions [6] Droplet-based microreactors for continuous production of palladium nanocrystals with controlled sizes and shapes [7] Fabrication, properties and applications of Janus particles [8] Determination of dynamic interfacial tension and its effect on droplet formation in the T-shaped microdispersion process [9] Development of a heating system using CPV technology and heat pipes [10] Dynamic interfacial tension measurements with microfluidic Y-junctions [11] Polymer/silica nanocomposites: Preparation, characterization, properties, and applications [12] Measurement of surface and interfacial tension using pendant drop tensiometry [13] Microfluidic interfacial tensiometry [14] Microfluidic approach for rapid interfacial tension measurement [15] Drop formation in viscous flows at a vertical capillary tube [16] A fast prototyping process for fabrication of microfluidic systems on soda-lime glass [17] An experimental study of the change in the contact angle of an oil on a solid surface

## اندازه‌گیری کَشش بین سطحی در تراشه‌های میکروسیالی

میلاد ارواحی MSc

دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

سیدقاسم مسعودی MSc

دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

علی‌اصغر محمدی\* PhD

دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

### چکیده

تراشه‌های میکروسیالی در دو دهه اخیر به دلیل مزایای فراوانی که دارند پیشرفت چشمگیری در زمینه آنالیز پدیده‌های بین سطحی داشته‌اند. برای آنالیز پدیده‌های بین سطحی از جریان قطره در میکروکانال‌ها می‌توان استفاده کرد. در این پژوهش با استفاده از فناوری میکروسیالی، کَشش بین سطحی آب-نرمال هگزان در حضور مواد فعال سطحی اندازه‌گیری شده است. برای این منظور، یک تراشه میکروسیالی شیشه‌ای برای تشکیل قطرات هگزان در آب ساخته شد. وابستگی اندازه قطرات به غلظت مواد فعال سطحی مورد بررسی قرار گرفته است. با موازنه نیروهای ویسکوز و بین سطحی در دبی‌های پایین فاز پراکنده در تراشه میکروسیالی یک معادله به دست می‌آید که از آن برای اندازه‌گیری کَشش بین سطحی می‌توان استفاده کرد. با استانداردسازی تراشه میکروسیالی به کمک سیستمی که کَشش بین سطحی آن معلوم است (که در اینجا نرمال هگزان و محلول توئین ۲۰ در آب مقطر است)، می‌توان برای سایر سیستم‌ها که توانایی تشکیل قطره در میکروکانال را دارند، کَشش بین سطحی را با اندازه‌گیری اندازه قطرات تولیدشده اندازه گرفت. در این پژوهش برای غلظت‌های مختلف دو ماده فعال سطحی SDS و CTAB آزمایش تشکیل قطره در تراشه میکروسیالی انجام شده است و نتایج اندازه‌گیری کَشش بین سطحی آنها گزارش شده است. نتایج به دست آمده از روش میکروسیالی با روش حلقه مقایسه شده و مقدار خطای آن کمتر از ۱۰٪ بوده است.

**کلیدواژه‌ها:** کَشش بین سطحی، میکروسیالی، ماده فعال سطحی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۱۶

\* نویسنده مسئول: amohammadi@sharif.edu

### ۱- مقدمه

فناوری میکرو پیشرفت مشهودی در طراحی سیستم‌های میکروسیالی، در شکل و اندازه‌های متفاوت و استفاده از آنها در انواع آنالیزهای فیزیکی و شیمیایی داشته است. امروزه از فرآیندهای میکرو در صنایع گوناگونی مانند الکترونیک و صنایع تولید نیمه‌هادی، میکروماشین در صنایع مکانیک، پزشکی، سیستم‌های میکروالکترومکانیک و میکروسیالی استفاده می‌شود که این کاربردها منجر به تلفیق و ارتباط بین رشته‌های متفاوت مطالعاتی شده است [1].

دستکاری سیالات در کانال‌هایی با ابعاد چندین میکرومتر را میکروسیالی می‌گویند که به‌عنوان یک زمینه نو ظهور کرده است. به عبارت دیگر، میکروسیالی، دانش و فناوری سیستم‌هایی است که با استفاده از آن، مقادیر بسیار کم سیال (به‌عنوان مثال ۱۰ میکرولیتر) با استفاده از کانال‌هایی با ابعاد ده‌ها و صدها میکرومتر، مورد پردازش و دستکاری قرار می‌گیرند. سیستم‌های میکرو بستر مناسبی برای آنالیز و بررسی پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی مهیا می‌کنند. یکی از مهم‌ترین مزیت‌های آنالیز در سیستم‌های میکرو استفاده از مقدار بسیار کم ماده است که می‌تواند فاکتور تعیین‌کننده‌ای برای مواد گران‌قیمت باشد [2].

یکی از ویژگی‌های مهم میکروسیالی این است که ابعاد کوچک کانال باعث کوچک‌بودن عدد رینولدز و در نتیجه ایجاد جریان آرام

می‌شود و به همین دلیل، کنترل جریان ساده می‌شود. ضمن این که نسبت سطح به حجم، عدد قابل توجهی بوده و به همین علت اثرات سطحی مانند موینگی پُراهمیت است [3]. سومین مزیت میکروسیالی، امکان مشاهده پدیده‌ها و فیلم‌برداری از محیط میکروسیالی است [4].

سیستم‌های میکروسیالی را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم نمود. دسته اول، سیستم‌های میکروسیالی جریان پیوسته و دسته دوم، سیستم‌های میکروسیالی جریان قطره هستند [5، 6]. در سیستم‌های میکروسیالی جریان قطره، دو یا چند سیال امتزاج‌ناپذیر جریان دارند که با توجه به خواص سطحی کانال‌ها، یکی از فازها درون دیگری به‌صورت قطره در می‌آید و رو به جلو حرکت می‌کند. معمولاً برای آنالیز پدیده‌های بین سطحی از جریان قطره در میکروکانال‌ها به دلیل مزیت‌های زیادی که دارد استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال با تحت نظر داشتن یک قطره و بررسی تغییرات و حرکات آن یا از روی نرخ تولید قطرات یا اندازه قطرات تولیدشده اطلاعات مفیدی می‌توان به دست آورد. اما اصلی‌ترین مساله در این رژیم جریانی، تولید قطرات با توزیع اندازه یکنواخت است [7].

تشکیل قطره در سیستم‌های میکروسیالی، کاربردهای وسیعی دارد. می‌توان این کاربردها را به دو نوع تقسیم کرد [3]. نوع اول کاربردها شامل کریستالیزاسیون پروتئین، مطالعه روی سینتیک آنزیم‌ها، آنالیز خون و DNA و در کل جریان‌هایی است که در پزشکی برای جداسازی سلول‌ها و غیره استفاده می‌شود. این کاربردها فقط به‌وسیله تشکیل قطره قابل درک بوده و پیشرفت داشته است و از سایر روش‌های قدیمی امکان‌پذیر نیست. نوع دوم کاربردهای تشکیل قطره در سیستم میکروسیالی هم به این صورت است که هر قطره مانند یک راکتور برای سنتز مواد با عملکردهای خاص مانند ذرات میکروپلیمری، نانوذرات فلزی، کلویدها، لیپیدهای پوشیده‌شده با میکروکپسول‌ها و ذرات دوجوهی می‌تواند عمل کند. تولید قطره به دو روش فعال و غیرفعال در سیستم‌های میکروسیالی انجام می‌شود. روش‌های فعال تولید قطره نیاز به اعمال نیروهای خارجی دارند. در این پژوهش با روش‌های غیرفعال تولید قطره سروکار داریم که بدون اعمال نیروی خارجی، قطرات تولید می‌شوند. روش غیرفعال تولید قطره براساس هندسه سیستم میکروسیالی به سه دسته تشکیل قطره در هندسه جریان متقاطع، تشکیل قطره در هندسه هم‌جهت و تشکیل قطره در هندسه تمرکز جریانی تقسیم می‌شوند [3]. جداسدن قطره حاصل رقابت بین نیروی ویسکوز (که باعث تغییر شکل مرز مایع می‌شود) و فشار موینگی یا همان فشار لاپلاس (که در برابر تغییر شکل مقاومت می‌کند) است [3].

خیلی از خواص امولسیون‌ها مثل رسانایی الکتریکی و گرمایی، ویسکوزیته و پایداری امولسیون به اندازه قطرات و یکنواختی اندازه قطرات وابسته است. ضریب تغییرات اندازه قطرات که به‌نوعی معیار انحراف از حالت ایده‌آل بوده، در روش‌های مرسوم امولسیون‌سازی ۱۶٪ است که عدد کوچکی نیست. از مزایای امولسیون‌سازی به روش میکروسیالی، این است که توزیع اندازه قطرات یکنواخت است. قطرات تولیدشده در میکروکانال‌ها هم‌اندازه، با فاصله برابر از هم و به‌صورت پیوسته هستند. ضریب تغییرات اندازه قطرات در سیستم‌های میکروسیالی بین یک تا ۳٪ بوده که مقدار قابل قبولی است [3].

یکی از عواملی که در تشکیل قطره و اندازه قطرات تولیدشده در میکروسیالی بسیار تاثیرگذار بوده، حضور مواد فعال سطحی است. مواد فعال سطحی، مولکول‌هایی با دو سر آب‌دوست و آب‌گریز

خطی بین عدد موپینگ و کشش بین سطحی به دست آوردند. سپس از رابطه خطی به دست آمده برای یافتن کشش بین سطحی سایر مواد استفاده شد [10]. در هندسه هم‌جهت نیز یک رابطه کاربردی توسط ژرو و همکاران برای تعیین کشش بین سطحی گزارش شده [14] که از موازنه نیروهای بین سطحی و ویسکوز در رژیم دریپینگ به دست آمده است.

در ادامه، ابتدا (در بخش ۲) تئوری اندازه‌گیری کشش بین سطحی در هندسه تمرکز جریانی ارائه خواهد شد. سپس مواد و تجهیزات مورد استفاده، روش ساخت تراشه میکروسیالی و همچنین روش انجام آزمایش‌های اندازه‌گیری کشش بین سطحی در بخش ۳ شرح داده خواهند شد. نتایج آزمایش‌های اندازه‌گیری کشش بین سطحی در بخش ۴، ارائه و بحث خواهند شد و در انتها نتیجه‌گیری انجام می‌شود.

## ۲- تئوری اندازه‌گیری کشش بین سطحی در هندسه تمرکز جریانی

به طور کلی، سه هندسه متفاوت برای تولید قطره در ابزارهای میکروسیالی مورد استفاده قرار می‌گیرند. اولی هندسه تولید قطره توسط هندسه جریان‌های هم‌جهت، دومی هندسه متقاطع و سومی هندسه تمرکز جریانی است. با توجه به این که در این پژوهش، هندسه تمرکز جریانی برای تولید قطره مورد استفاده قرار گرفته است، در این بخش مکانیزم تولید قطره و همچنین تئوری اندازه‌گیری کشش بین سطحی در این هندسه ارائه خواهد شد.

در هندسه تمرکز جریانی، چهار مکانیزم تولید قطره شامل فشرده‌سازی، دریپینگ، جتینگ و تشکیل ترد مطرح هستند. این که کدام مکانیزم حاکم است، به پارامترهای هندسی و عملیاتی بستگی دارد. در محدوده شرایط هندسی و عملیاتی ابزار میکروسیالاتی مورد استفاده در این پژوهش، مکانیزم دریپینگ بر تولید قطره حاکم است.

به هر حال از نظر مکانیزم تشکیل قطره می‌توان ادعا کرد زمانی قطرات از فاز پراکنده جدا می‌شوند که نیروی ویسکوز بر نیروی بین سطحی غلبه کند. در محدوده شرایط هندسی و عملیاتی ابزار میکروسیالاتی مورد استفاده در این پژوهش، نیروهای شناوری و مومنتوم منتقل شده در مقایسه با نیروهای ویسکوز و بین سطحی که ناشی از فشار موپینگ است، خیلی کوچک هستند و از آنها صرف نظر می‌شود. در نتیجه تنها دو نیروی تاثیرگذار در تشکیل قطره، نیروهای ویسکوز و بین سطحی هستند. موازنه نیروی بین سطحی با نیروی ویسکوز، منجر به یک رابطه کاربردی در جریان قطره‌ای میکروسیالی خواهد شد. برای به دست آوردن این رابطه از چند پارامتر بدون بعد استفاده شده است که در ادامه ارائه می‌شوند [9، 15].

با توجه به این که عدد رینولدز در میکروسیالی بین ۰/۱ تا ۱۰ است، معادله ۱، نیروی ویسکوز را بیان می‌کند:

$$(1) \quad 3\pi\eta_c(d - d_i)(u - u_d) = \text{نیروی ویسکوز}$$

که  $\eta_c$  ویسکوزیته فاز پیوسته،  $\rho_c$  چگالی فاز پیوسته،  $d$  اندازه قطره،  $d_i$  اندازه مشخصه کانال،  $u$  سرعت فاز پیوسته و  $u_d$  سرعت فاز پراکنده هستند. اگر هندسه ابزار میکروسیالی هم‌جهت باشد، اندازه مشخصه آن قطر موپینگ و اگر هندسه تمرکز جریانی باشد، اندازه مشخصه عرض نازل خواهد بود. باید توجه شود که معادله ۱، تعمیم رابطه استوکس برای جریان‌های آرام است. همین طور نیروی بین سطحی توسط معادله ۲ بیان می‌شود:

$$(2) \quad \pi\gamma d_i^2 / d = \text{نیروی بین سطحی}$$

هستند که این ویژگی باعث جذب آنها در مرز آب-روغن می‌شود. مکانیزم جذب ماده فعال سطحی در سه مرحله انجام می‌شود. مرحله اول، انتقال ماده فعال سطحی از توده به لایه‌ای فرضی به نام زیرلایه است که ضخامتی حدود ضخامت یک مولکول از ماده فعال سطحی را دارد. مرحله دوم، جذب ماده فعال سطحی در مرز است که با نفوذ مولکولی ماده فعال سطحی از زیرلایه به مرز می‌رسد. مرحله سوم، فرآیند جذب شدن در سطح قطره و ایجاد پیوند ماده فعال سطحی با مرز قطره است [8].

چون فرآیند تولید قطره و پراکندگی یک فاز در دیگری به طور مداوم صورت می‌گیرد، ماده فعال سطحی حتماً باید در یک فاز حل شده باشد [8]. افزودن مواد فعال سطحی باعث کاهش واریانس اندازه قطرات می‌شود و قطرات یکنواخت‌تر می‌شوند و به پایداری مرز و عدم اتلاف قطرات کمک می‌کند. در غلظت‌های کمتر از ۱۰٪ CMC، دیگر توزیع یکنواخت اندازه قطره نخواهیم داشت. چون سطح قطرات از ماده فعال سطحی پر نشده است و قطرات با یکدیگر اتلاف می‌کنند [9]. نشان داده شده است که برای جلوگیری از اتلاف قطرات باید ۹۰٪ سطح قطرات پوشیده از ماده فعال سطحی باشند. یکی دیگر از مزایای امولسیون‌سازی در سیستم‌های میکروسیالی این است که انتقال ماده فعال سطحی از توده به مرز به دلیل حضور جریان توسط انتقال جرم جابه‌جایی انجام می‌شود [10].

به طور کلی، مواد فعال سطحی بر خواص متعددی تاثیرگذار هستند که یکی از مهم‌ترین آنها کشش بین سطحی است. کشش بین سطحی، کار مورد نیاز برای افزایش واحد سطح بوده که به شدت حساس به ناخالصی‌ها و افزودنی‌ها است. می‌توان کشش بین سطحی را در میکروسیالی اندازه‌گیری کرد. مزایای اندازه‌گیری کشش بین سطحی در سیستم‌های میکروسیالی عبارت از دقیق بودن، مصرف مقدار کم ماده و تکرارپذیری خوب است [11].

کشش بین سطحی، یک خاصیت فیزیکی مهم از دو مایع امتزاج‌ناپذیر است. چون عملکرد آنها را در خیلی از کاربردهای علمی و صنعتی از قبیل ازدیاد برداشت نفت، واکنش‌های چندفازی، استخراج، صنایع غذایی و داروسازی کنترل می‌کند. متداول‌ترین و قدیمی‌ترین روش‌های اندازه‌گیری کشش بین سطحی، روش‌هایی هستند که براساس شکل و وزن قطرات، کشش بین سطحی را اندازه‌گیری می‌کنند. یکی از آنها روش قطره آویزان است. روش‌های متداول دیگر عبارت از روش صفحه ویلم‌هلملی، روش حلقه و روش قطره چرخان هستند. در اینجا روش میکروسیالی ارائه شده است که به کمک تشکیل قطره و اندازه‌گیری اندازه قطرات می‌توان کشش بین سطحی را اندازه‌گیری کرد [12].

استفاده از سیستم میکروسیالی برای اندازه‌گیری کشش بین سطحی، اولین بار توسط هادسون و همکاران ارائه شد که با استفاده از آنالیز تغییر شکل قطرات در محیط جریان کششی که با استفاده از هندسه‌های انقباضی و انبساطی ایجاد شده بود و با محاسبه نرخ تغییر شکل قطرات توانستند کشش بین سطحی مواد مختلف را اندازه‌گیری کنند، اما عیب روش آنها آسان نبودن و احتمال خطای بالای آن بود [13]. مورد دیگر از استفاده سیستم میکروسیالی برای اندازه‌گیری کشش بین سطحی مبتنی بر هندسه Y شکل برای ایجاد قطره و محاسبه کشش بین سطحی استاتیک و دینامیک است. در این راستا، استیگمانز و همکاران برای اندازه‌گیری کشش بین سطحی، با رسم عدد موپینگ بر حسب معکوس سطح قطره برای یک سیستم استاندارد (قطره هگزادکان در محلولی از آب و اتانول با درصد ترکیب‌های مختلف)، یک رابطه

به جنس تراشه میکروسیالی مورد استفاده در این پژوهش، فاز پیوسته باید محلول آبی و فاز پراکنده باید فاز آلی باشد. برای فاز آبی از آب مقطر و برای فاز آلی نیز از نرمال هگزان با خلوص ۹۹٪ (شرکت مرک) استفاده شده است. همچنین مواد فعال سطحی مورد استفاده عبارت از توتین ۲۰ (غیریونی)، SDS (آنیونی) و CTAB (کاتیونی) هستند. تمامی مواد فعال سطحی از شرکت مرک با خلوص ۹۹/۹٪ تهیه شدند.

### ۳-۲- ساخت تراشه میکروسیالی

انواع مختلف تراشه‌های میکروسیالی را می‌توان به‌منظور کاربردهای خاص به کار برد. همچنین انواع تراشه‌های میکروسیالی بسته به نوع کاربرد و نوع شرایط می‌توانند از جنس‌های مختلفی ساخته شوند. از طرفی نحوه ساخت این تراشه‌ها با توجه به نوع جنس انتخاب شده متفاوت است. این تراشه‌ها معمولاً از جنس شیشه، پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (PDMS)، پلی‌متیل‌متاکریلات (PMMA)، سیلیکون، کوارتز، فلز و سرامیک ساخته می‌شوند.

در ساخت یک تراشه میکروسیالی، معمولاً سه موضوع از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. اولین موضوع، انتخاب جنس سیستم میکروسیالی مورد نظر بوده، دومین موضوع، روش ایجاد کانال‌های مورد نظر و سومین موضوع نحوه اتصال دو قسمت میکروسیالی است که در ادامه به هر سه موضوع پرداخته می‌شود. در این پژوهش به دلیل سادگی و کم‌هزینه بودن ساخت، شفاف بودن شیشه (به دلیل امکان فیلم‌برداری از درون تراشه) و مقاومت بالای شیشه در محیط اسیدی در مقایسه با پلیمرها و مقاومت مکانیکی بالای شیشه و همچنین به علت امکان استفاده از اتصال حرارتی به عنوان یک روش کم‌هزینه، تراشه میکروسیالی با استفاده از شیشه ساخته شده است.

برای ساخت تراشه میکروسیالی مورد استفاده در این پژوهش از دو عدد قطعه شیشه معمولی سودا-لایم از قبیل قطعه شیشه شماره ۱ به‌عنوان بستر (۴×۴×۶۰ میلی‌متر)، و قطعه شیشه شماره ۲ به‌عنوان شیشه پوشاننده (۴×۴×۶۰ میلی‌متر) استفاده شده است. ابتدا به‌منظور زدودن هر گونه آلودگی از روی سطح شیشه‌ها، شیشه‌های شماره ۱ و ۲ با استفاده از آب صابون و فرچه تا زمانی شسته می‌شوند که هیچ گونه اثر مواد اضافی روی شیشه دیده نشود. در ادامه، طرح مورد نظر تراشه میکروسیالی با استفاده از نرم‌افزار AutoCAD 2016 رسم و به نرم‌افزار CorelDRAW X7 منتقل می‌شود. طرح تراشه میکروسیالی که در این پژوهش استفاده شده، تمرکز جریانی بوده و به این صورت است که دو ورودی داریم که فازهای پیوسته و پراکنده وارد سیستم می‌شود و قطرات بعد از گذر از نازل در کانال خروجی که پهن‌تر هم است، ایجاد می‌شود و از تنها خروجی که در قسمت مقابل قرار گرفته است، خارج می‌شوند. شمای طرح در شکل ۱ (الف) نشان داده شده است.

سپس طرح مورد نظر به دستگاه لیزر انتقال داده می‌شود و با استفاده از لیزر کربن‌دی‌اکسید روی شیشه شماره ۱ حکاکی صورت می‌گیرد. روی شیشه شماره ۲ با استفاده از دریل با مته‌هایی به قطر ۳ میلی‌متر، محل ورودی و خروجی میکروکانال‌ها سوراخ می‌شود. شیشه‌های شماره ۱ و ۲ با آب مقطر شسته و به مدت ۲۰ دقیقه درون آن با دمای ۱۴۰°C قرار داده می‌شوند. شیشه‌های شماره ۱ و ۲ روی یکدیگر قرار داده می‌شوند و با استفاده از کوره در دمای بالا به‌صورت حرارتی به یکدیگر اتصال می‌یابند. سپس اتصالات برنجی تراش‌کاری شده و لوله‌های پنوماتیک با قطر داخلی ۲ میلی‌متر به‌عنوان اتصالات ورودی و خروجی نصب می‌شوند و سیستم مورد

که کشش بین سطحی دو فاز پیوسته و پراکنده است. اگر نیروهای ویسکوز و بین سطحی برابر قرار داده شوند، معادله ۳ حاصل خواهد شد:

$$\bar{V}\bar{d}^3 - (\bar{V} + 1)\bar{d}^2 - \bar{q}\bar{d} + \bar{q} = 0 \quad (3)$$

که معادله ۳، یک معادله بدون بعد است و پارامترهای بدون بعد آن به‌صورت زیر هستند:

$$\bar{V} = u/[\gamma/(3\eta_c)] \quad (4)$$

$$\bar{d} = d/d_i \quad (5)$$

$$\bar{q} = Q_d/[\pi d_i^2 \gamma/(3\eta_c)] \quad (6)$$

اگر دبی فاز پراکنده ( $Q_d$ ) کوچک باشد، در نتیجه  $\bar{q}$  کوچک خواهد بود و معادله ۳ به معادله ۷ ساده خواهد شد:

$$\bar{d} = 1 + \bar{V}^{-1} \quad (7)$$

که بازنویسی معادله ۷، معادله بعددار ۸ را خواهد داد [16]:

$$\frac{d}{d_i} = 1 + \frac{\gamma}{3\eta_c u} \quad (8)$$

با در نظر گرفتن عمق کانال ( $a$ ) به جای عرض نازل ( $d_i$ )، به‌عنوان اندازه مشخصه، معادله ۹ به دست خواهد آمد:

$$\frac{d}{a} = 1 + \frac{\gamma}{3\eta_c u} \quad (9)$$

برای این که بتوان از معادله ۹ برای تعیین کشش بین سطحی استفاده نمود، باید عمق کانال، ویسکوزیته فاز پیوسته، سرعت فاز پیوسته و اندازه قطرات مشخص شده باشند. در آزمایش‌ها تمامی این پارامترها قابل اندازه‌گیری است، به‌جز سرعت فاز پیوسته که به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست. البته با توجه به روش ساخت ابزار میکروسیالی، مقطع میکروکانال نیز مربعی نخواهد بود و ذوزنقه‌ای شکل خواهد بود. بنابراین  $a$  نیز بعد مشخصه مناسب نیست. در نتیجه به جای  $a$  نیز یک پارامتر اصلاح شده در نظر گرفته شد و معادله ۹ به‌صورت معادله ۱۰ بازنویسی شد.

$$\frac{d}{aa} = 1 + \frac{\gamma}{3\eta_c u} \quad (10)$$

از معادله ۱۰ برای تعیین کشش بین سطحی در تراشه‌های میکروسیالی با هندسه تمرکز جریانی در تمامی آزمایش‌ها و داده‌های به‌دست‌آمده در این پژوهش استفاده کردیم. در این راستا برای این که سرعت فاز پیوسته ( $u$ ) و ضریب اصلاح ( $\alpha$ )، مشخص و اثر تمامی فرض‌هایی که در نظر گرفته شده است، کم شود، از پارامتر سرعت فاز پیوسته و ضریب اصلاح به‌عنوان پارامتر استانداردسازی سیستم استفاده می‌کنیم. برای این منظور، سیستم‌های معلومی که کشش بین سطحی آنها مشخص است را وارد تراشه میکروسیالی می‌کنیم و با توجه به اندازه قطرات تولید شده در دبی‌های مشخص، سرعت فاز پیوسته و ضریب اصلاح را محاسبه می‌کنیم. با داشتن  $u$  و  $\alpha$ ، می‌توان کشش بین سطحی تمامی سیستم‌های مجهولی را که قابلیت ایجاد قطره در تراشه میکروسیالی دارند، به دست آورد [4].

### ۳- روش کار

#### ۳-۱- مواد و تجهیزات مورد استفاده

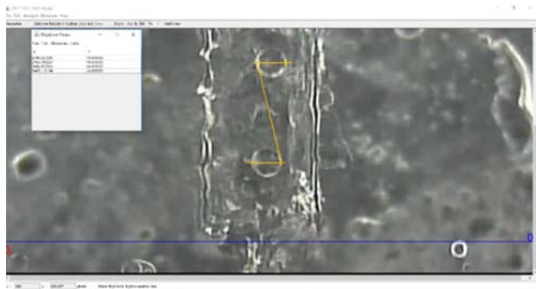
برای تشکیل قطره نیاز به دو فاز پیوسته و پراکنده داریم. با توجه



در اندازه‌گیری کشش بین سطحی با روش حلقه از یک حلقه پلاتینی استفاده می‌شود که داخل سیستم مایع-مایع قرار می‌گیرد. زمانی که حلقه از داخل سیستم مایع-مایع بیرون می‌آید، نیرویی که لازم است تا حلقه از مرز مایع-مایع جدا شود، دقیقاً اندازه گرفته می‌شود. این نیرو با کشش بین سطحی مرتبط بوده و برابر با وزن حلقه به علاوه ۲ برابر نیروی کشش بین سطحی است که بر حلقه وارد می‌شود.

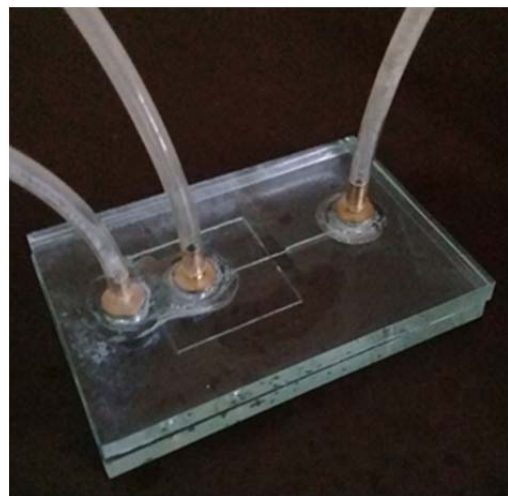
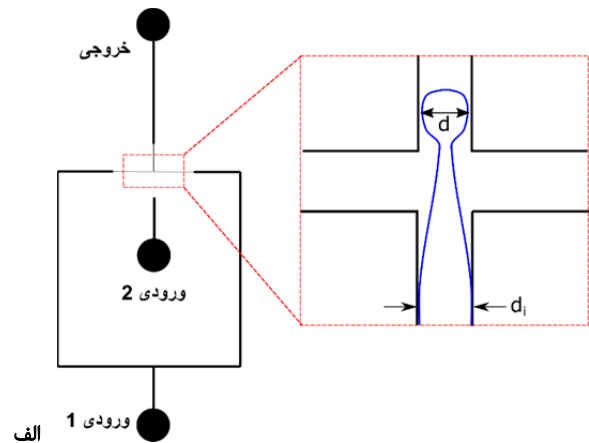
امروزه دستگاه‌هایی ساخته شده است که با دقت بسیار خوبی با استفاده از روش حلقه، کشش بین سطحی را اندازه‌گیری می‌کنند. در این پژوهش برای اندازه‌گیری کشش بین سطحی به روش حلقه از دستگاه سیگما ۷۰۰ استفاده شد. برای اندازه‌گیری کشش بین سطحی بسیار مهم است محفظه‌ای که نمونه در آن قرار می‌گیرد و همچنین حلقه پلاتینی بدون آلودگی باشند. حلقه پلاتینی باید کاملاً تمیز باشد و هیچ گونه خراش یا کج‌شدگی در آن وجود نداشته باشد. بنابراین محفظه قبل از هر تست ۴ الی ۵ بار کاملاً شسته می‌شد و همچنین حلقه یک بار با آب مقطر، یک بار با اتانول خالص و بار دیگر با آب مقطر شسته می‌شد. سپس برای پاک کردن آن از هر گونه آلودگی برای چند ثانیه روی حرارت بالای ۱۰۰ درجه با استفاده از چراغ بنزن قرار می‌گرفت.

در اندازه‌گیری کشش بین سطحی با روش میکروسیالی، مهم‌ترین چالش پس از ایجاد قطرات هم‌اندازه با توزیع اندازه یکنواخت و باریک در میکروکانال، اندازه‌گیری اندازه قطرات به دست آمده بوده که در ادامه نحوه انجام آن توضیح داده شده است. بعد از گذشت حدود ۱۰ دقیقه از تشکیل قطرات و پایدار شدن نرخ تولید قطرات، ضبط فیلم از داخل میکروکانال آغاز می‌شود. فیلم به دست آمده را با استفاده از نرم‌افزار Free Video to JPG Converter به تصاویر متعدد تبدیل می‌کنیم و با بررسی آنها تصاویر مطلوبی را انتخاب می‌کنیم که قابل آنالیز باشند. تصاویری که کیفیت آنها خوب باشند و مرز قطره به خوبی قابل تشخیص باشد، مناسب آنالیز هستند. با استفاده از نرم‌افزار Plot Digitizer می‌توانیم اندازه قطرات را با مشخص کردن مرز دو طرف قطره به صورت دستی به دست آوریم. باید در ابتدا تصاویر را با یک شیء که اندازه دقیق آن مشخص است، کالیبره کنیم و اندازه هر پیکسل را به دست آوریم. ضخامت شیشه‌های مورد استفاده ۴ میلی‌متر است و با عکس‌گرفتن از آن می‌توان با شمردن تعداد پیکسل‌ها به اندازه یک پیکسل رسید. تصاویری که در این پژوهش آنالیز شده‌اند، ۴۸۰×۶۴۰ پیکسل هستند که با استانداردسازی که در جهت عرض تصاویر انجام شده، این نتیجه حاصل شد که هر پیکسل معادل با ۸/۵۵ میکرومتر است. بدین ترتیب عرض و ارتفاع تصاویر به ترتیب ۵۴۷۱ و ۳۹۵۳ میکرومتر است که به عنوان ورودی برای کالیبره کردن نرم‌افزار Plot Digitizer وارد می‌شود. شکل ۲، محیط نرم‌افزار Plot Digitizer و نحوه اندازه‌گیری اندازه قطرات را نشان می‌دهد.



شکل ۲) نحوه اندازه‌گیری اندازه قطرات در نرم‌افزار Plot Digitizer

نظر با آب مقطر شسته می‌شود. تراشه میکروسیالی ساخته شده در شکل ۱ (ب) نشان داده شده است.



شکل ۱) هندسه تمرکز جریانی مورد استفاده در این پژوهش و نمایی از تراشه میکروسیالی استفاده شده؛ (الف) هندسه تمرکز جریانی مورد استفاده در این پژوهش، (ب) نمایی از تراشه میکروسیالی استفاده شده

### ۳-۳- روش انجام آزمایش‌ها

در تراشه‌های میکروسیالی جریان قطره، دو یا چند سیال امتزاج‌ناپذیر جریان دارند که با توجه به خواص سطحی کانال‌ها، یکی از فازها درون دیگری به صورت قطره در می‌آید و رو به جلو حرکت می‌کند. ترشوندگی سطح میکروکانال، عامل بسیار مهمی در تشکیل قطره است و تعیین می‌کند کدام فاز به صورت پراکنده باشد و می‌تواند به شکل قطره جریان یابد. وقتی قطره تشکیل می‌شود، یک فیلم نازک از فاز پیوسته بین قطره و جداره کانال به وجود می‌آید. به همین دلیل است که فاز پیوسته باید توانایی ترکردن سطح کانال را داشته باشد [17].

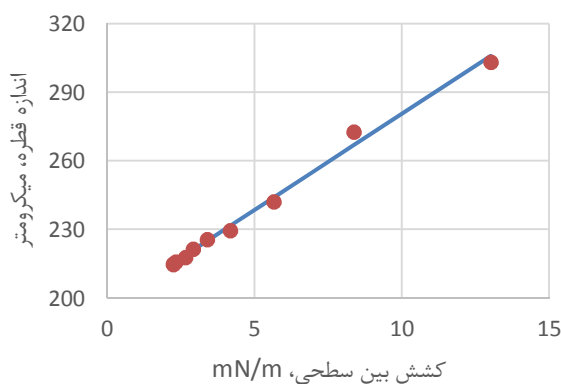
در ادامه، آب مقطر به همراه ماده فعال سطحی به عنوان فاز آبی از ورودی ۱، نرمال هگزان به عنوان فاز روغنی از ورودی ۲ و قطرات از خروجی خارج می‌شوند. برای پمپ کردن پیوسته فازهای آبی و آبی به داخل تراشه میکروسیالی، از سرنگ‌های پلاستیکی، سرسنگ‌های فلزی، لوله‌های پنوماتیک (PTFE) و دو پمپ سرنگی (Fanavaran Nano-Meghyas; HSP2000) و (New Era Pumps; 1600) استفاده شده است. برای مقایسه نتایج اندازه‌گیری کشش بین سطحی روش میکروسیالی و استانداردسازی آن، از روش حلقه استفاده می‌کنیم.

۵۰ میکرولیتر بر دقیقه فاز پیوسته و یک میکرولیتر بر دقیقه فاز پراکنده استفاده شده است. در این راستا محلول‌هایی از توئین ۲۰ با غلظت‌های متفاوت، آماده و کشش بین سطحی این محلول‌ها با نرمال هگزان به روش حلقه اندازه‌گیری شد. سپس آزمایش‌های میکروسیالی تشکیل قطره محلول‌های توئین ۲۰ در نرمال هگزان، انجام و اندازه قطره‌های تولید شده اندازه‌گیری شد. غلظت محلول‌های توئین ۲۰ مورد استفاده و کشش بین سطحی آنها با نرمال هگزان تعیین شده به روش حلقه، در جدول ۱ ارایه شده است. با برازش معادله ۱۰ به داده‌های اندازه قطره- کشش بین سطحی، سرعت فاز پیوسته و ضریب اصلاح، به ترتیب برابر با ۲۳.۲۹ متر بر ثانیه و ۱.۰۰۶۹ به دست آمد. نمودار ۲، معادله ۱۰ برازش شده به داده‌های اندازه قطره- کشش بین سطحی را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، معادله به خوبی به داده‌های تجربی برازش شده و  $R^2$  برازش برابر با ۰.۹۹۴ است.

مقایسه نتایج حاصل از دو روش میکروسیالی و روش حلقه در جدول ۱ و نمودار ۳ بر حسب غلظت محلول توئین ۲۰ نشان داده شده است. توجه شود که غلظت‌های مورد بررسی از غلظت‌های خیلی کم تا غلظت‌های بالاتر از CMC هستند. همان طور که مشاهده می‌شود، نتایج روش میکروسیالی و حلقه قابل مقایسه هستند.

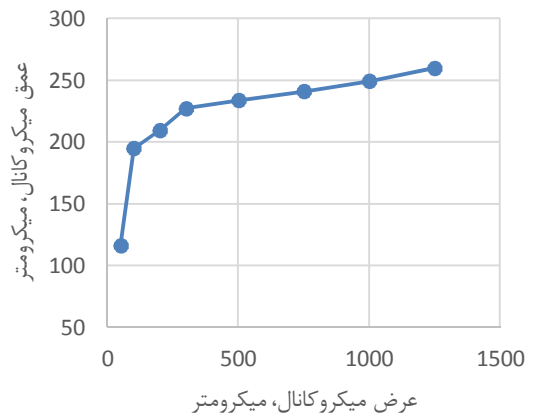
جدول ۱) نتایج کشش بین سطحی نرمال هگزان و غلظت‌های مختلف محلول توئین ۲۰ به روش میکروسیالی و مقایسه آن با روش حلقه

درصد خطای اندازه‌گیری کشش بین سطحی روش میکروسیالی نسبت به روش حلقه	کشش بین سطحی روش میکروسیالی (میلی نیوتن بر متر)	کشش بین سطحی روش حلقه (میلی نیوتن بر متر)	غلظت توئین ۲۰ (درصد وزنی)
-۲/۴	۵/۴۷±۰/۵۵	۵/۳۴±۱/۱۹	۰/۱
-۰/۹	۵/۴۹±۰/۴۸	۵/۴۴±۱/۱۶	۰/۰۵
۰/۰	۵/۶۸±۰/۴۶	۵/۶۸±۱/۱۳	۰/۰۲۵
-۳/۰	۶/۴۷±۰/۲۹	۶/۲۸±۱/۵۵	۰/۰۱
۲/۴	۷/۱۱±۰/۳۷	۷/۲۸±۲/۲۶	۰/۰۰۷۵
۲/۷	۸/۲۷±۰/۳	۸/۴۹±۲/۳۶	۰/۰۰۵
-۴/۹	۱۰/۱۷±۰/۲۴	۹/۶۷±۲/۳۷	۰/۰۰۲۵
-۳/۴	۱۳/۰۷۸±/۲۱	۱۳/۳۰±۲/۲۱	۰/۰۰۱۲۵
۸/۵	۲۰/۴۱±۰/۱۵	۲۲/۲۰±۲/۸۷	۰/۰۰۰۶۲۵
-۲/۴	۳۱/۷۹±۰/۰۹	۳۱/۰۰±۴/۲۹	۰/۰۰۰۳۱۳



نمودار ۲) برازش معادله ۱۰ به داده‌های اندازه قطره- کشش بین سطحی محلول توئین ۲۰- نرمال هگزان (اندازه قطره‌ها به روش میکروسیالی و کشش بین سطحی به روش حلقه اندازه‌گیری شدند؛ خط معادله برازش شده و علائم داده‌های اندازه قطره- کشش بین سطحی را نشان می‌دهند)

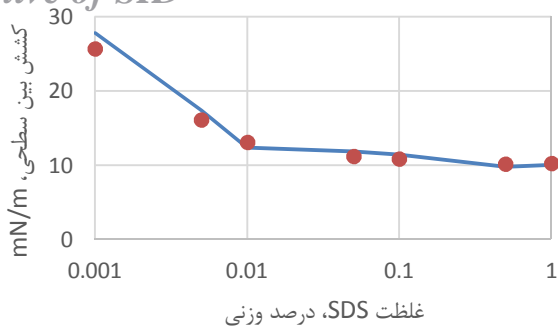
وقتی میکروکانال با استفاده از لیزر کربن دی‌اکسید ساخته شود، عمق میکروکانال‌ها وابسته به قدرت و توان دستگاه لیزر است. در این پژوهش سرعت لیزر در ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه و توان در ۸۰ وات تنظیم شده است. مساله مهم دیگر، تغییرات عمق میکروکانال با عرض میکروکانال است، چرا که هر چه عرض میکروکانال بیشتر باشد، زمان مواجهه شیشه با لیزر نیز بیشتر خواهد بود و میکروکانال عمیق‌تر می‌شود. برای مشخص کردن عمق میکروکانال، چند میکروکانال با عرض‌های مختلف که توسط لیزر حکاکی شده‌اند را برش می‌دهیم و سطح مقطع شیشه را در زیر میکروسکوپ قرار می‌دهیم و تصاویر به دست آمده از آن را در نرم‌افزار پردازش تصویر Plot Digitizer، تحلیل و عمق میکروکانال را در عرض‌های مختلف محاسبه می‌کنیم. همان طور که در نمودار ۱ مشاهده می‌شود، در عرض ۱۰۰ میکرومتر که برابر با عرض نازل تراشه میکروسیالی ساخته شده در این پژوهش بوده، عمق میکروکانال ۱۹۵ میکرومتر است. بنابراین برای پارامتر  $a$  در معادله ۱۰ مقدار ۱۹۵ میکرومتر قرار داده شد.



نمودار ۱) تغییرات عمق میکروکانال با عرض میکروکانال

#### ۴- نتایج و بحث

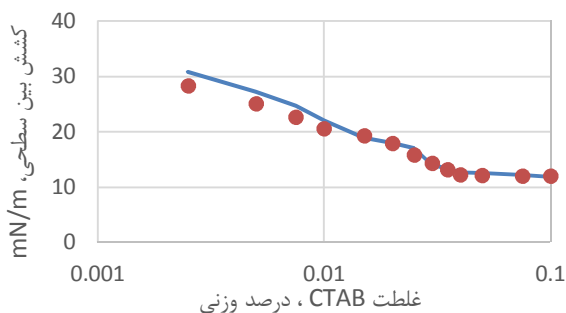
در این پژوهش به دنبال اندازه‌گیری کشش بین سطحی سیستم‌های مختلف به کمک تشکیل قطره در میکروکانال بوده‌ایم. با استفاده از معادله ساده شده‌ای که در بخش دوم در دبی‌های کم برای هندسه تمرکز جریانی ارایه شد (معادله ۱۰)، می‌توانیم اندازه قطره‌ها را به کشش بین سطحی مربوط سازیم. برای استفاده از این معادله نیاز به دانستن عمق میکروکانال، ویسکوزیته فاز پیوسته، سرعت فاز پیوسته و ضریب اصلاح داریم. عمق میکروکانال در بخش ۳ به دست آورده شده و ویسکوزیته فاز پیوسته را نیز می‌توان ویسکوزیته آب خالص در نظر گرفت، چون در غلظت‌های خیلی کم مواد فعال سطحی آزمایش انجام شده است. تنها ابهام این معادله، سرعت فاز پیوسته و ضریب اصلاح است که برای تعیین آنها، در یک دبی مشخص از فاز پیوسته و فاز پراکنده، آزمایش تشکیل قطره را برای سیستم‌هایی که کشش بین سطحی آنها معلوم است، انجام می‌دهیم. با برازش معادله ۱۰ به داده‌های اندازه‌گیری شده، یعنی اندازه قطرات و کشش بین سطحی، سرعت فاز پیوسته و ضریب اصلاح تعیین می‌شوند. باید توجه شود که سرعت و ضریب به دست آمده مختص به این دبی‌ها است. از محلول‌های توئین ۲۰ و نرمال هگزان به عنوان سیستم استاندارد برای به دست آوردن سرعت فاز پیوسته و ضریب اصلاح در دبی



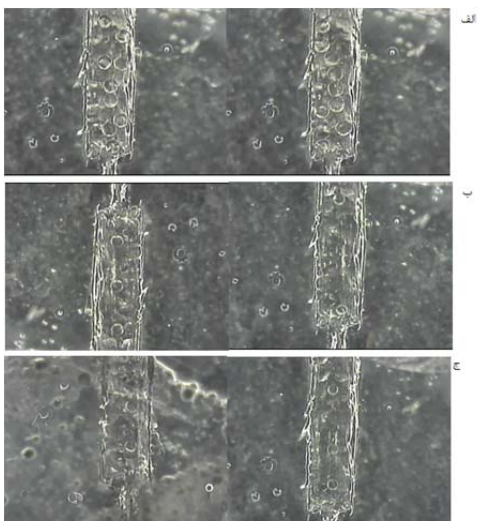
نمودار ۴) مقایسه نتایج کشش بین سطحی نرمال هگزان و محلول SDS به دو روش میکروسیالی (خط) و حلقه (علایم) در غلظت‌های مختلف

جدول ۳) نتایج کشش بین سطحی نرمال هگزان و غلظت‌های مختلف محلول CTAB به روش میکروسیالی و مقایسه آن با روش حلقه

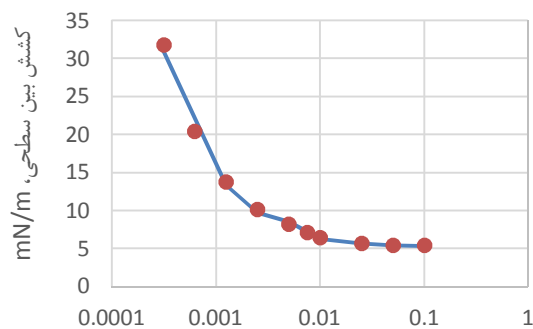
درصد خطا اندازه‌گیری	کشش بین سطحی روش میکروسیالی	کشش بین سطحی روش میکروسیالی (میلی نیوتن بر متر)	کشش بین سطحی روش میکروسیالی (میلی نیوتن بر متر)	غلظت SDS (درصد وزنی)
-۲/۵	۱۰/۲۷±۰/۷۹	۱۰/۰۲±۱/۲۰	۱۰/۰۲±۱/۲۰	۱
-۴/۱	۱۰/۲۲±۰/۶۷	۹/۸۱±۰/۹۷	۹/۸۱±۰/۹۷	۰/۵
۵/۱	۱۰/۸۷±۰/۱۶	۱۱/۴۳±۱/۵۸	۱۱/۴۳±۱/۵۸	۰/۱
۵/۵	۱۱/۲۲±۰/۵۷	۱۱/۸۳±۲/۴۵	۱۱/۸۳±۲/۴۵	۰/۰۵
-۵/۳	۱۳/۱۱±۰/۵۷	۱۲/۴۱±۲/۱۹	۱۲/۴۱±۲/۱۹	۰/۰۱
۷/۶	۱۶/۱۴±۰/۴۵	۱۷/۳۶±۲/۷۹	۱۷/۳۶±۲/۷۹	۰/۰۰۵
۸/۰	۲۵/۷۵±۰/۴	۲۷/۸۱±۳/۵۱	۲۷/۸۱±۳/۵۱	۰/۰۰۱



نمودار ۵) مقایسه نتایج کشش بین سطحی نرمال هگزان و محلول CTAB به دو روش میکروسیالی و حلقه در غلظت‌های مختلف



شکل ۳) تصویر قطرات تشکیل شده به کمک مواد فعال سطحی در میکروکانال شیشه‌ای؛ الف) توئین ۲۰، ب) SDS، ج) CTAB



غلظت توئین ۲۰، درصد وزنی

نمودار ۳) مقایسه نتایج کشش بین سطحی نرمال هگزان و محلول توئین ۲۰ به دو روش میکروسیالی (خط) و حلقه (علایم) در غلظت‌های مختلف

حال با داشتن  $u$  و  $\alpha$  می‌توانیم هر سیستمی که کشش بین سطحی آن مشخص نیست را با آزمایش تشکیل قطره و اندازه‌گیری اندازه قطره‌های تولید شده به دست آوریم. از این استانداردسازی برای دو ماده فعال سطحی دیگر استفاده شده و کشش بین سطحی محلول آنها با نرمال هگزان از طریق تشکیل قطره در میکروکانال، محاسبه و با مقدار به دست آمده از روش حلقه مقایسه شده است. ابتدا ماده فعال سطحی SDS را بررسی می‌کنیم. در جدول ۲، نتایج حاصل از تعیین کشش بین سطحی محلول SDS با غلظت‌های مختلف و نرمال هگزان از دو روش میکروسیالی و حلقه مقایسه شده‌اند. کشش بین سطحی به دست آمده از هر دو روش در نمودار ۴ بر حسب غلظت محلول SDS رسم شده است.

در نهایت، ماده فعال سطحی CTAB را بررسی می‌کنیم. در جدول ۳ نتایج حاصل از تعیین کشش بین سطحی محلول CTAB با غلظت‌های مختلف و نرمال هگزان از دو روش میکروسیالی و حلقه مقایسه شده‌اند. کشش بین سطحی به دست آمده از هر دو روش میکروسیالی و حلقه در نمودار ۵ بر حسب غلظت محلول CTAB نشان داده شده است. ضمن این که عکس‌هایی از قطره‌های نرمال هگزان ایجاد شده در میکروکانال در شکل ۳ آورده شده است.

جدول ۲) نتایج کشش بین سطحی نرمال هگزان و غلظت‌های مختلف محلول SDS به روش میکروسیالی و مقایسه آن با روش حلقه

درصد خطا اندازه‌گیری	کشش بین سطحی روش میکروسیالی	کشش بین سطحی روش میکروسیالی (میلی نیوتن بر متر)	کشش بین سطحی روش میکروسیالی (میلی نیوتن بر متر)	غلظت CTAB (درصد وزنی)
-۱/۰	۱۱/۹۹±۰/۲۶	۱۱/۸۷±۱/۴۴	۱۱/۸۷±۱/۴۴	۰/۱
۱/۷	۱۲/۰۲±۰/۲۹	۱۲/۲۲±۱/۳۴	۱۲/۲۲±۱/۳۴	۰/۰۷۵
۳/۷	۱۲/۱۳±۰/۱۸	۱۲/۵۸±۱/۶۸	۱۲/۵۸±۱/۶۸	۰/۰۵
۳/۵	۱۲/۲۴±۰/۱۵	۱۲/۶۷±۱/۷۸	۱۲/۶۷±۱/۷۸	۰/۰۴
۱/۶	۱۳/۱۸±۰/۱۵	۱۳/۳۹±۱/۸۴	۱۳/۳۹±۱/۸۴	۰/۰۳۵
-۳/۲	۱۴/۳۷±۰/۱۷	۱۴/۰۷±۲/۴۹	۱۴/۰۷±۲/۴۹	۰/۰۳
۷/۳	۱۵/۸۸±۰/۲۱	۱۷/۰۳±۲/۶۴	۱۷/۰۳±۲/۶۴	۰/۰۲۵
۰/۲	۱۷/۹۵±۰/۱۲	۱۷/۹۹±۲/۷۵	۱۷/۹۹±۲/۷۵	۰/۰۲
-۲/۴	۱۹/۳۴±۰/۱	۱۸/۸۷±۳/۳۹	۱۸/۸۷±۳/۳۹	۰/۰۱۵
۷/۱	۲۰/۵۸±۰/۰۹	۲۲/۰۴±۲/۷۵	۲۲/۰۴±۲/۷۵	۰/۰۱
۸/۵	۲۲/۷۳±۰/۰۷	۲۴/۶۶±۲/۸۱	۲۴/۶۶±۲/۸۱	۰/۰۰۷۵
۸/۴	۲۵/۱۲±۰/۰۷	۲۷/۲۲±۱/۶۶	۲۷/۲۲±۱/۶۶	۰/۰۰۵
۸/۶	۲۸/۴۱±۰/۰۵	۳۰/۸۴±۳/۳۰	۳۰/۸۴±۳/۳۰	۰/۰۰۲۵

## منابع

- 1- Nguyen NT, Wereley ST. Fundamentals and applications of microfluidics. 2<sup>nd</sup> Edition. Norwood: Artech House; 2002.
- 2- Haeberle S, Zengerle R. Microfluidic platforms for lab-on-a-chip applications. Lab on a Chip. 2007;7(9):1094-1110.
- 3- Christopher GF, Anna SL. Microfluidic methods for generating continuous droplet streams. Journal of Physics D Applied Physics. 2007;40(19):R319-R336.
- 4- Priest C, Reid MD, Whitby CP. Formation and stability of nanoparticle-stabilised oil-in-water emulsions in a microfluidic chip. Journal of Colloid and Interface Science. 2011;363(1):301-306.
- 5- Razzaq T, Glasnov TN, Oliver Kappe C. Continuous-flow microreactor chemistry under high-temperature/pressure conditions. European Journal of Organic Chemistry. 2009;2009(9):1321-1325.
- 6- Kim YH, Zhang L, Yu T, Jin M, Qin D, Xia Y. Droplet-based microreactors for continuous production of palladium nanocrystals with controlled sizes and shapes. Small. 2013;9(20):3462-3467.
- 7- Hu J, Zhou Sh, Sun Y, Fang X, Wu L. Fabrication, properties and applications of Janus particles. Chemical Society Reviews. 2012;41(11):4356-4378.
- 8- Wang K, Lu YC, Xu JH, Luo GS. Determination of dynamic interfacial tension and its effect on droplet formation in the T-shaped microdispersion process. Langmuir. 2009;25(4):2153-2158.
- 9- Umbanhowar PB, Prasad V, Weitz DA. Monodisperse emulsion generation via drop break off in a coflowing stream. Langmuir. 2000;16(2):347-351.
- 10- Steegmans MLJ, Warmerdam A, Schroën KGPB, Boom RM. Dynamic interfacial tension measurements with microfluidic Y-junctions. Langmuir. 2009;25(17):9751-9758.
- 11- Zou H, Wu Sh, Shen J. Polymer/silica nanocomposites: Preparation, characterization, properties, and applications. Chemical Reviews. 2008;108(9):3893-3957.
- 12- Berry JD, Neeson MJ, Dagastine RR, Chan DYC, Tabor RF. Measurement of surface and interfacial tension using pendant drop tensiometry. Journal of Colloid and Interface Science. 2015;454:226-237.
- 13- Hudson SD, Cabral JT, Goodrum Jr WJ, Beers KL, Amis EJ. Microfluidic interfacial tensiometry. Applied Physics Letters. 2005;87(8):081905.
- 14- Xu JH, Li SW, Lan WJ, Luo GS. Microfluidic approach for rapid interfacial tension measurement. Langmuir. 2008;24(19):11287-11292.
- 15- Zhang DF, Stone HA. Drop formation in viscous flows at a vertical capillary tube. Physics of Fluids. 1997;9(8):2234-2242.
- 16- Lin CH, Lee GB, Lin YH, Chang GL. A fast prototyping process for fabrication of microfluidic systems on soda-lime glass. Journal of Micromechanics and Microengineering. 2001;11(6):726-732.
- 17- Starkweather BA, Zhang X, Counce RM. An experimental study of the change in the contact angle of an oil on a solid surface. Industrial and Engineering Chemistry Research. 2000;39(2):362-366.

## ۵- نتیجه‌گیری

یکی از روش‌های جدید اندازه‌گیری کشش بین سطحی به وسیله تشکیل قطره در سیستم‌های میکروسیالی در این پژوهش ارایه شد که مهم‌ترین مزیت این روش، مصرف بسیار کم ماده در مقایسه با روش‌های مرسوم اندازه‌گیری کشش بین سطحی است. یکی از هندسه‌های سیستم میکروسیالی، هندسه تمرکز جریانی بوده که برای تشکیل قطره مورد استفاده قرار گرفته است. با در نظر گرفتن نیروهای ویسکوز و بین سطحی و صرف نظر کردن از سایر نیروها مثل گرانش و بویانسی که در مقایسه با آن دو ناچیز هم هستند، می‌توانیم با نوشتن موازنه بین این دو نیرو در سیستم میکروسیالی به رابطه‌ای برای تعیین کشش بین سطحی برسیم. این رابطه در دبی‌های پایین به صورت خطی در می‌آید و با استانداردسازی سیستم میکروسیالی توسط محلول توئین ۲۰ و نرمال هگزان قادر به تعیین کشش بین سطحی سایر سیستم‌ها خواهیم بود که کشش بین سطحی مجهول دارند. در این پژوهش، سه ماده فعال سطحی غیر یونی، آنیونی و کاتیونی در غلظت‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفته و کشش بین سطحی آنها در میکروسیالی اندازه‌گیری شده است. نتایج به دست آمده از روش میکروسیالی با روش حلقه مقایسه شده و مقدار خطای آن کمتر از ۱۰٪ بوده است.

**تشکر و قدردانی:** نویسنده رابط از حمایت‌های مادی و معنوی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه صنعتی شریف قدردانی می‌نماید.

**تأییدیه اخلاقی:** نویسندگان گواهی می‌کنند که این مقاله در زمان ارسال برای این نشریه در هیچ نشریه دیگری (به طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. ضمناً محتوای علمی و ادبی مقاله مستخرج از فعالیت علمی خود نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج و متن مقاله بر عهده نویسندگان است.

**تعارض منافع:** این مقاله استخراج شده از پایان‌نامه کارشناسی ارشد آقای میلاد ارواحی می‌باشد.

سهم نویسندگان: میلاد ارواحی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۴۰٪)؛ سیدقاسم مسعودی (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی (۲۰٪)؛ علی‌اصغر محمدی (نویسنده سوم)، پژوهشگر اصلی (۴۰٪)

**منابع مالی:** بخشی از هزینه‌ها از اعتبارات پژوهشی نویسنده مسئول تأمین شده است.

## ۶- پی‌نوشت

$u_c$  سرعت فاز پیوسته ( $m s^{-1}$ )

$u_d$  سرعت فاز پراکنده ( $m s^{-1}$ )

$Q_d$  دبی فاز پراکنده ( $m^3 s^{-1}$ )

$a$  عمق کانال (m)

$d$  اندازه قطره (m)

## علامه یونانی

$\eta_c$  ویسکوزیته فاز پیوسته ( $kg m^{-1} s^{-1}$ )

$\eta_d$  ویسکوزیته فاز پراکنده ( $kg m^{-1} s^{-1}$ )

$\rho_c$  چگالی فاز پیوسته ( $kg m^{-3}$ )