

طراحی، ساخت و ارزیابی تجربی مینی میکسرها با کانال باز و بسته با تحریک الکتریکی قطرات فلز مایع

علی محمدجعفرپور*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد آذرشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، آذرشهر، ایران

علیرضا رستمزاده خسروشاهی

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

مسعود حنیفی

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

چکیده

اختلاط مؤثر در سیستم‌های میکروسیال به خاطر جریان لایه‌ای و پخش مولکولی محدود یک چالش اساسی می‌باشد. این مطالعه، طراحی و ساخت مینی میکسرهای Y شکل فعال با پمپ‌های محرک-فلز مایع را ارائه می‌کند. تحقیق بر رفتار اختلاط گذرا و پایدار، پیکربندی‌های کانال باز و بسته و اثرات پارامترهای الکتریکی و هندسی بر بازدهی اختلاط تمرکز دارد. محلول هیدروکسید سدیم با ترکیب اثر الکترووتینگ و میدان الکتریکی متناوب (۱۴ هرتز، ۶-۱۴ ولت قله‌تاقله) پمپ شده و اختلاط بین دو محلول رنگی با پردازش تصویر ارزیابی شد. مطابق نتایج، اختلاط زیر ۹ ثانیه پایدار می‌شود. همچنین، پیکربندی کانال باز به خاطر افت فشار پایین‌تر و دبی بالاتر، ۲۵ تا ۴۰ درصد بازدهی بالاتری نشان می‌دهد. افزایش ولتاژ تا ۱۴ ولت اختلاط را بهبود می‌دهد ولی بیشتر از آن، الکترولیز محلول عملکرد را کاهش می‌دهد. این میکسرها با طراحی ساده، مصرف انرژی پایین و نداشتن قطعات متحرک، یک استراتژی مؤثر برای کاربردهای میکروسیالی فراهم می‌آورند. کارهای آتی می‌بایست جایگزینی جیوه با آلیاژهای غیرسمی را بررسی کرده و هندسه‌های پیشرفته برای کانال را برای افزایش ایمنی و عملکرد مورد مطالعه قرار دهند.

واژه‌های کلیدی: مینی میکسر، فلز مایع، الکترووتینگ، اختلاط، مینی کانال، شاخص اختلاط

Design, Fabrication, and Experimental Evaluation of Open- and Closed-Channel Mini-scale Mixers with Electrically Driven Liquid-Metal Droplets

Ali Mohammad Jafarpour

Department of Mechanical Engineering, Aza.C., Islamic Azad University, Azarshahr, Iran

Alireza Rostamzadeh

Department of Mechanical Engineering, Ta.C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Khosroshahi

Masoud Hanifi

Department of Mechanical Engineering, Ta.C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Abstract

Efficient mixing in microfluidic systems remains a significant challenge due to laminar flow and limited molecular diffusion. This study presents the design and fabrication of Y-shaped active mini-scale mixers with liquid-metal-enabled pumps; The study focuses on transient and stable mixing behavior, the comparative performance of open- and closed-channel configurations, and the effects of electrical and geometrical parameters on mixing efficiency. Sodium hydroxide solution is pumped through electrowetting combined with an alternating electric field (14 Hz, 6–14 Vpp), and mixing between two colored solutions is quantified using image processing. Based on the Results, stable mixing occurs in under 9 seconds. Also, the open-channel configuration shows 25–40% higher efficiency due to reduced pressure drops and higher flow rate. Increasing the voltage to 14 V improves mixing, beyond which the solution electrolysis reduces performance. With their simple design, low energy consumption, and no moving parts, these mixers provide an effective strategy for microfluidic applications. Future work should explore replacing mercury with non-toxic alloys and investigating advanced channel geometries to enhance both safety and performance.

Keywords: Mini-scale mixers, Liquid metal, Electrowetting, Mix, Mini-channel, Mix index

گسترده‌ای در جهت بهبود بازده اختلاط در میکروکانال‌ها انجام شده است [۱، ۲].

۱- مقدمه

در ادبیات تحقیقاتی اختلاط میکروسیالی، روش‌های طراحی میکسرها عموماً به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: (۱) میکسرهای غیرفعال که از طراحی هندسی خاص کانال‌ها برای ایجاد جریان‌های عرضی و افزایش اختلاط استفاده می‌کنند [۲، ۳]، و (۲) میکسرهای فعال که با اعمال محرک‌های خارجی، گردابه‌ها یا آشوبناکی‌های موضعی ایجاد کرده و انتقال جرم را تسریع می‌کنند [۴]. در میان روش‌های کنترل فعال جریان، اعمال میدان الکتریکی به‌ویژه در رژیم‌های جریان

در مقیاس میکرو، اختلاط کارآمد و کنترل‌شده سیالات از اهمیت بالایی در توسعه سیستم‌های میکروسیالی و فناوری آزمایشگاه روی تراشه برخوردار است. با این حال، در این مقیاس، جریان‌ها عموماً لایه‌ای بوده و انتقال جرم عمدتاً از طریق نفوذ مولکولی انجام می‌شود که فرایندی بسیار آهسته محسوب می‌شود. این ویژگی، عملکرد واکنش‌های شیمیایی، آنالیزهای بیولوژیکی و سایر فرایندهای در مقیاس کوچک را محدود می‌کند. به همین دلیل، پژوهش‌های

* نویسنده مکاتبه‌کننده، آدرس پست الکترونیکی: ali.mjafarpour@iaua.ac.ir

با عدد رینولدز (Re) پایین، به عنوان یک راهکار مؤثر برای القا و بهبود ساختارهای جریان شناخته شده و به طور گسترده مورد توجه محققان قرار گرفته است [۵].

در سال‌های اخیر، یکی از گرایش‌های رو به رشد در حوزه میکروسیال، استفاده از فلزات مایع (مانند جیوه یا آلیاژهای گالیم) به عنوان اجزای محرک الکتریکی بر پایه پدیده الکترووتینگ بوده است. این فناوری، امکان تبدیل مستقیم انرژی الکتریکی به حرکت سیال را بدون نیاز به قطعات متحرک فراهم می‌کند. این روش ساختاری ساده، هزینه پایین و مصرف انرژی کم دارد و از این رو برای یکپارچه‌سازی در سیستم‌های میکروالکترومکانیکی بسیار مناسب است [۶]. مطالعات متعددی به بررسی کاربرد فلزات مایع در پمپاژ و اختلاط در مقیاس میکرو پرداخته‌اند. Tang و همکاران نخستین پمپ فعال شده با فلز مایع را معرفی کردند که از گالینستان به عنوان محرک استفاده می‌کرد. در این سیستم، اعمال میدان الکتریکی منجر به تغییر توزیع بار سطحی و در نتیجه تغییر کشش سطحی قطره می‌شود که باعث ایجاد جریان در سیال اطراف بدون جابجایی خود قطره می‌گردد [۷]. مطالعات بعدی نشان دادند که با اعمال میدان الکتریکی متناوب، جریان‌های مارانگونی^۱ هارمونیک ایجاد شده و منجر به جریان‌های آشوبناک و بهبود اختلاط می‌شوند. نتایج نشان دادند که افزایش ولتاژ منجر به تغییر شکل بیشتر قطره و در نتیجه افزایش بازده اختلاط می‌شود [۸]. همچنین، Hu و همکاران، یک میکسر با توان بالا طراحی کردند که از اثر الکترووتینگ مداوم AC بر روی قطرات گالینستان برای اختلاط استفاده می‌کند. در این مطالعه مشخص شد که افزایش فرکانس میدان الکتریکی بازده اختلاط را کاهش می‌دهد، در حالی که افزایش ولتاژ و غلظت الکترولیت، عملکرد اختلاط را بهبود می‌بخشد [۹].

در پژوهش‌های قبلی نویسندگان مقاله حاضر، فرایند اختلاط دو سیال در یک مینی کانال باز با بهره‌گیری از نوسان قطرات فلز مایع تحت اثر الکترووتینگ بررسی شد. این روش جایگزین پمپ‌های متداول سرنگی شده و با ایجاد جریان‌های آشوبناک، راندمان اختلاط را به طور چشمگیری افزایش داد. نتایج نشان داد که افزایش ولتاژ، شدت اختلاط را افزایش می‌دهد؛ به طوری که در شرایط بهینه (زاویه ۳۰ درجه و ولتاژ ۱۴ ولت)، شاخص اختلاط به ۹۴٪ رسید، در حالی که در غیاب میدان الکتریکی، این مقدار تنها به ۵۵٪ محدود می‌شد. همچنین، زاویه ورودی تأثیر معناداری بر کیفیت اختلاط داشت، به طوری که بهترین عملکرد در زاویه ۳۰ درجه و ضعیف‌ترین در زاویه ۹۰ درجه مشاهده شد [۱۰].

در مطالعه‌ای دیگر، مولفان عملکرد یک میکسر فعال Y شکل مبتنی بر فلز مایع را بررسی کردند. در این سیستم با اعمال ولتاژ متناوب، گرادین کشش سطحی ایجاد و سیال به کانال اصلی هدایت شد. برای ارزیابی کمی اختلاط، از شاخص اختلاط (MI)^۲ و طراحی آزمایش استفاده گردید. نتایج نشان داد که قطر فلز مایع بیشترین تأثیر را بر اختلاط دارد و پس از آن به ترتیب ولتاژ، زاویه ورودی و عرض کانال قرار دارند. مدل رگرسیونی به دست آمده دقت بالایی داشت (R^2

0.9945) و حداکثر شاخص اختلاط ۸۶۷٪ در شرایط بهینه به دست آمد. این مطالعه چارچوبی جامع برای بهینه‌سازی میکسرهای فعال مبتنی بر فلز مایع ارائه کرد [۱۱].

کانال‌های بسته ممکن است به دلیل افزایش افت فشار و تماس بیشتر با دیواره‌ها، اختلاط را محدود کنند، در حالی که کانال‌های باز امکان آزادسازی جریان و ایجاد آشوبناکی بیشتر را فراهم می‌آورند. همچنین، تحلیل گذرا برای درک زمان لازم جهت دستیابی به حالت پایدار و طراحی مناسب سیستم‌های عملیاتی از اهمیت بالایی برخوردار است، که تاکنون در ادبیات فن به طور کامل پوشش داده نشده است. در این مطالعه، هدف اصلی بر طراحی، ساخت و ارزیابی تجربی یک سری مینی میکسر Y شکل فعال شده با مکانیزم پمپاژ مبتنی بر فلز مایع است. تمرکز این پژوهش بر سه محور کلیدی است: (۱) تحلیل رفتار گذرا از آغاز پمپاژ تا رسیدن به حالت پایدار، (۲) مقایسه کمی و کیفی عملکرد اختلاط در کانال‌های باز و بسته تحت شرایط یکسان میدان الکتریکی، و (۳) ارزیابی تأثیر پارامترهای الکتریکی و هندسی بر شاخص اختلاط و عدد رینولدز جریان.

نوآوری‌های این پژوهش شامل: ارائه تحلیل تجربی از رفتار گذرا تا پایدار تحت محرک فلز مایع و تعیین زمان لازم برای پایداری فرایند اختلاط، مقایسه مستقیم عملکرد کانال‌های باز و بسته در شرایط یکسان و ارائه دیدگاه‌های طراحی محفظه فلز مایع و پارامترهای الکتریکی به منظور دستیابی به اختلاط سریع‌تر و کارتر در سیستم‌های میکروسیالی فعال است. همچنین جزئیات طراحی، ساخت و چیدمان آزمایش، نوع و غلظت محلول الکترولیت، شکل و فرکانس ولتاژ اعمالی و نحوه نورپردازی توضیح داده شده است.

این مطالعه با پرداختن به خلأهای موجود در ادبیات پیرامون رفتار ناپایدار و تأثیر هندسه کانال، گامی مهم در جهت درک عمیق‌تر و طراحی بهینه سیستم‌های میکروسیالی فعال محسوب می‌شود. یافته‌های این تحقیق می‌توانند به عنوان راهنمای طراحی برای کاربردهای عملی در آنالیزهای بیوشیمیایی، مخلوط‌سازی واکنشی و نمونه‌سازی سریع با مصرف انرژی پایین مورد استفاده قرار گیرند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مکانیزم عملکرد سیستم پمپاژ بر مبنای فلز مایع

برای کاربردهای نوین در سیستم‌های میکروسیال، بهره‌گیری از مکانیزم‌های پمپاژی بدون قطعات مکانیکی متحرک و با مصرف انرژی پایین اهمیت زیادی دارد. این سیستم‌ها علاوه بر افزایش قابلیت اطمینان و طول عمر، امکان کار در ابعاد کوچک و شرایط عملیاتی حساس را نیز فراهم می‌آورند. در این مقاله از فلز مایع جیوه به عنوان هسته یک میکروپمپ مبتنی بر فلز مایع استفاده شده است که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند. این میکروپمپ بر پایه پدیده الکترووتینگ طراحی و با اعمال یک میدان الکتریکی فعال می‌گردد.

عملکرد پمپ به این صورت است که با اعمال میدان الکتریکی به الکترودهای تعبیه شده در سیستم، یون‌ها در سطح مشترک بین فلز مایع و محلول الکترولیت انباشته می‌شوند. این فرایند منجر به افزایش یون‌های مثبت در لایه خارجی فلز مایع و تجمع یون‌های منفی در لایه

¹ Marangoni

² Mix index

تعریف می‌شود:

$$D_H = \frac{4A}{P} \quad (7)$$

که در آن A مساحت سطح مقطع و P محیط خیس شده می‌باشند. عدد بی بعد الکترووتینگ، که بیانگر نسبت نیروی الکترواستاتیکی به کشش سطحی است، مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود [۱۲]:

$$\eta = \frac{CV^2}{2\gamma_0} \quad (8)$$

در این رابطه، C ظرفیت دولایه الکتریکی، V ولتاژ اعمال شده و γ_0 کشش سطحی بین جیوه و الکتروولیت در حالت بدون اعمال میدان الکتریکی است. مقدار ظرفیت دولایه الکتریکی برابر با $C = 24.51 \mu F/cm^2$ بوده که از طریق درون‌یابی داده‌های مندرج در مرجع [۱۳] به دست آمده است. به منظور تحلیل عملکرد سیستم در شرایط مختلف الکتریکی، عدد بی بعد الکترووتینگ برای ولتاژهای متناوب مختلف محاسبه شد. با اعمال ولتاژهای قله‌تافله به مقدار ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ ولت، مقادیر عدد بی بعد الکترووتینگ به ترتیب برابر با ۱۰/۱، ۱۷/۹، ۲۸، ۴۰/۳ و ۵۴/۹ به دست آمد. این نتایج نشان‌دهنده رابطه مستقیم و غیرخطی بین ولتاژ اعمالی و تغییر در رفتار ترشوندگی قطره فلز مایع هستند، که نقش کلیدی در بهینه‌سازی عملکرد پمپ الکترومیکروسیال ایفا می‌کنند.

۲-۳- نحوه ساخت میکسرها

در این مطالعه، مجموعه‌ای از میکسرها Y شکل به منظور بررسی عملکرد اختلاط سیالات در مقیاس میکروسایالی طراحی و ارزیابی شدند. طراحی هندسی میکسرها با نرم‌افزار AutoCAD و بر اساس الزامات سیستم‌های جریان لایه‌ای انجام شد. برای دستیابی به اختلاط مؤثر (بالتر از ۸۰٪) [۱۴]، طول مینی‌کانال‌ها ۹۰ میلی‌متر و عمق آنها ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شد. در کلیه طرح‌ها، فاصله بین دو الکتروود ۱۰ میلی‌متر و حجم مخازن ورودی برابر لحاظ گردید. ابعاد انتخاب شده بر پایه تجربیات عملی پیشین و بررسی‌های انجام شده در زمینه توسعه میکسرها فعال در بازه عدد رینولدز پایین تعیین گردید. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، فلز مایع در محفظه‌ای با قطر ۳ میلی‌متر محصور شده و طرفین آن عرضی برابر با ۰/۶ میلی‌متر دارند. این پیکربندی باعث می‌شود فلز مایع در محفظه باقی بماند و با جریان الکتروولیت جابجا نشود. برای اثبات این موضوع، آزمایشی انجام شد که نشان داد فلز مایع در شرایط بدون این هندسه با الکتروولیت حرکت می‌کند. مطابق شکل ۲، فلز مایع در شاخه قرمز رنگ محبوس شده، در حالی که در شاخه سفید رنگ امکان حرکت آزادانه دارد. با اعمال ولتاژ در هر دو شاخه، مشاهده شد که فلز مایع در شاخه سفید همراه با جریان حرکت می‌کند، اما در شاخه قرمز در موقعیت اولیه خود باقی می‌ماند. شایان ذکر است کلیه آزمایش‌ها در کانال باز و تحت فشار اتمسفر انجام شده‌اند. همچنین، نیروی محرکه اعمال شده در این آزمایش‌ها به‌تنهایی قادر به جابه‌جایی قطرات فلز مایع نبوده است.

با توجه به اولویت کاهش هزینه‌های ساخت و تسهیل فرایند تولید، پلکسی‌گلاس به‌عنوان ماده اولیه ساخت میکسرها انتخاب شد. این ماده علاوه بر مقرون به‌صرفه بودن، دارای شفافیت نوری بالایی است که امکان مشاهده مستقیم فرایند اختلاط را فراهم می‌آورد. میکسرها

داخلی آن می‌گردد؛ که به عنوان دولایه الکتریکی^۱ شناخته می‌شود. به دلیل رسانایی بالای فلز مایع، پتانسیل الکتریکی در سراسر قطره تقریباً یکنواخت باقی می‌ماند؛ اما از آن‌جا که الکتروولیت دارای رسانایی محدودی است، اعمال ولتاژ منجر به شکل‌گیری یک گرادیان پتانسیل در امتداد کانال می‌گردد. در نتیجه، اختلاف پتانسیل در طول دولایه الکتریکی و سطح قطره تغییر می‌کند که این امر باعث بازتوزیع بارهای سطحی در قطره می‌شود. کشش سطحی بین فلز مایع و الکتروولیت تابعی از این اختلاف پتانسیل است و طبق معادله لیپمن توصیف می‌شود.

$$\gamma = \gamma_0 - \frac{1}{2} CV^2 \quad (1)$$

این گرادیان کشش سطحی، نیروی محرکه‌ای ایجاد می‌کند که موجب حرکت سیال و در نتیجه فرایند پمپاژ می‌شود [۷، ۹].

۲-۲- معادلات حاکم و پارامترها

در این مقاله، محلول الکتروولیت به عنوان سیال کاری در نظر گرفته شده است. معادلات حاکم شامل بقای جرم، معادلات ناویر-استوکس و دیفیوژن (به عنوان قانون دوم فیک)، تحت فرض ثابت بودن چگالی و لزجت سیال به صورت زیر بیان می‌شوند [۱۰]:

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0 \quad (2)$$

$$\rho(\vec{U} \cdot \nabla) \vec{U} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{U} \quad (3)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + (\vec{U} \cdot \nabla) c = D \nabla^2 c \quad (4)$$

که در این روابط $\vec{U}$ و p به ترتیب سرعت و فشار سیال، $\mu = 0.001 Pa.s$ لزجت دینامیکی سیال [۷، ۸] و ρ چگالی سیال هستند. در معادله دیفیوژن نیز D ضریب دیفیوژن و c غلظت الکتروولیت می‌باشند.

در محاسبات مربوط به جریان در مینی‌کانال‌ها، عدد رینولدز به‌عنوان یک شاخص بی‌بعد برای تعیین رژیم جریان (لایه‌ای یا آشفته) از اهمیت بالایی برخوردار است. برای محاسبه عدد رینولدز در این مطالعه، از رابطه زیر استفاده شده است:

$$Re = \frac{\rho Q D_H}{\mu A} \quad (5)$$

در این رابطه ρ چگالی سیال، Q دبی حجمی جریان، D_H قطر هیدرولیکی مینی‌کانال، μ لزجت دینامیکی سیال و A سطح مقطع جریان می‌باشند.

دبی حجمی جریان (Q) از طریق رابطه زیر به‌دست آمد:

$$Q = \frac{Vol.}{\Delta t} \quad (6)$$

در این رابطه، $Vol.$ نمایانگر حجم محلول الکتروولیتی است که از سطح مقطع مینی‌کانال عبور کرده و با استفاده از نمونه‌گیر در یک بازه زمانی مشخص Δt جمع‌آوری شده است. برای جمع‌آوری نمونه‌ها از یک بازه زمانی ۱۰ ثانیه‌ای در تمامی آزمایش‌ها استفاده شد. در تمامی آزمایش‌ها، برای یکسان‌سازی شرایط و به منظور افزایش دقت اندازه‌گیری، بازه زمانی نمونه‌برداری برابر با ۱۰ ثانیه در نظر گرفته شد. برای کانال‌هایی با مقطع مستطیلی، قطر هیدرولیکی به صورت زیر

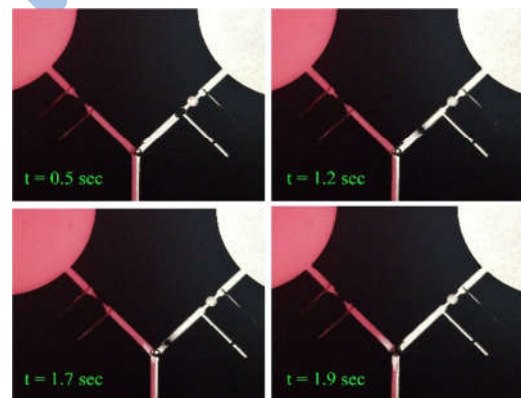
¹ Electric double layer

مورد استفاده دارای طراحی Y شکل بود که از دو لایه مجزا تشکیل می‌شد: لایه بالایی از جنس پلکسی‌گلاس مات جهت جلوگیری از بازتاب نور محیط، و لایه پایینی از جنس پلکسی‌گلاس شفاف به منظور تسهیل در تصویربرداری از فرایند جریان و اختلاط درون کانال. به منظور دستیابی به تصاویر باکیفیت، نورپردازی از سمت پایین و تصویربرداری از سمت بالا انجام شد.

برای اتصال دو صفحه پلکسی‌گلاس، ابتدا از چسب کلروفرم استفاده شد که به دلیل ایجاد اتصال محکم و شفافیت بالا پس از خشک شدن، گزینه‌ای مناسب تلقی می‌گردد. جهت اعمال دقیق چسب و جلوگیری از ایجاد لکه یا سفیدک، از سرنگ بدون واشر بهره گرفته شد. در پی بروز نشتی در برخی نمونه‌ها به دلیل تکرار آزمایش‌ها، در مرحله بعد از چسب دوطرفه سلولزی برای اتصال دو صفحه استفاده شد که به طور کامل مشکل نشتی را برطرف کرد. فرایند ساخت با استفاده از فناوری برش لیزری دقیق انجام گرفت که منجر به دستیابی به دقت بالا در ابعاد کانال‌ها، لبه‌های صاف و تکرارپذیری مطلوب در تولید نمونه‌ها گردید.



شکل ۱- جزئیات هندسه محفظه فلز مایع و الکترودها



شکل ۲- تصاویر لحظه‌ای حرکت فلز مایع در شاخه سفید رنگ و محبوس شدن فلز مایع داخل محفظه شاخه قرمز رنگ

۴-۲- چیدمان و نحوه انجام آزمایش‌ها

اجزای مربوط به پلتفرم آزمایش در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. در این مقاله، به جای استفاده از سیستم‌های مرسوم مانند پمپ سرنگی، از یک مکانیزم پمپاژ مبتنی بر فلز مایع برای کنترل دبی ورودی به مینی‌کانال و بهبود فرایند اختلاط سیال استفاده شده است. این پمپ با بهره‌گیری از جیوه و پدیده الکترووتینگ، میدان الکتریکی را به حرکت مکانیکی تبدیل می‌کند [۱۰]. با وجود سمی بودن جیوه، این فلز به دلیل عدم تشکیل لایه اکسید غیرفعال، نسبت به فلزات مایع دیگر

مانند گالیوم، انتخاب مناسب‌تری برای این کاربرد است [۱۵]. بر خلاف پمپ سرنگی که جریان یکنواختی ایجاد می‌کند، جریان سیال در این پمپ آشوبناک است. از مزایای آن می‌توان به ساختار ساده، هزینه پایین، نیاز به ولتاژ عملیاتی کم، مصرف انرژی پایین، افزایش نرخ جریان، کنترل دقیق‌تر جریان و بهبود شاخص اختلاط اشاره نمود [۷-۹].

در انجام آزمایش‌ها، قطرات جیوه در دو قسمت ورودی به مینی‌کانال و در محفظه استوانه‌ای قرار داده شد. سپس، یک میدان الکتریکی متناوب با فرکانس ۱۴ هرتز از طریق دو نوار مسی و با کمک یک مولد سیگنال به هر ورودی اعمال گردید و عملکرد آن با اسیلوسکوپ کنترل گردید. در هر آزمایش، محلول هیدروکسید سدیم (NaOH) بی‌رنگ با غلظت ۰/۳ مول بر لیتر به ورودی ۱ و محلول NaOH قرمز رنگ با همان غلظت به ورودی ۲ تزریق شدند. این محلول‌ها با آب دی‌یونیزه تهیه شده بودند. برای ثبت و تحلیل فرایند اختلاط، از یک دوربین دیجیتال با وضوح و نرخ فریم بالا استفاده شد. نتایج نهایی نیز از میانگین‌گیری سه بار تکرار آزمایش به‌دست آمدند تا دقت تحلیل افزایش یابد.

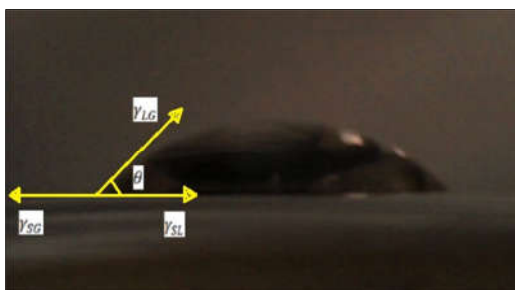


شکل ۳- شماتیک چیدمان آزمایش: الف) لپ‌تاپ، ب) ظرف برای جمع‌آوری مایع مصرفی، پ) میکسر Y شکل، ت) قطرات فلز مایع جیوه، ث) دوربین دیجیتال، ج) مخازن ورودی پر شده با محلول هیدروکسید سدیم با غلظت ۰/۳ مول بر لیتر، چ) سیم مسی، ح) اسیلوسکوپ، خ) مولد سیگنال، د) منبع نوری

۵-۲- چالش‌ها و محدودیت‌های انتخاب نوع و غلظت محلول الکترولیت

یکی از محدودیت‌های سیستم پمپاژ پیشنهادی این است که با تمام انواع سیالات سازگار نیست و عملکرد آن به ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی سیال وابسته است. در میان سیالات مورد بررسی، محلول NaOH با غلظت ۰/۳ مول بر لیتر، مناسب‌ترین گزینه می‌باشد زیرا علاوه بر سازگاری شیمیایی با فلز مایع (جیوه)، قادر است یک دولایه الکتریکی پایدار در سطح تماس ایجاد کند، که برای تحریک حرکت فلز مایع از طریق پدیده الکترووتینگ ضروری است. در نتیجه، این ترکیب بهترین شاخص اختلاط و بالاترین نرخ جریان را نسبت به سایر گزینه‌ها ارائه می‌دهد. در مقابل، محلول‌هایی نظیر کلرید سدیم (NaCl)، بافر فسفات (PBS) و الکترولیت‌های اسیدی با pH کمتر از ۶/۵، به دلیل ناتوانی در ایجاد دولایه الکتریکی پایدار، عملکرد مناسبی در این مکانیزم نشان ندادند [۸]. علاوه بر این، بررسی عملکرد حلال‌های

استفاده شد. بدین منظور، یک قطره کوچک از جیوه به آرامی بر سطح الکترولیت قرار داده شد و تصویر آن با دوربینی با دقت بالا ثبت گردید. سپس زاویه تماس بین قطره و سطح مایع با استفاده از نرم افزار تحلیل تصویری ImageJ اندازه گیری شد. زاویه تماس به دست آمده برابر با ۴۲ درجه بود. همچنین مطابق گزارش مرجع [۱۸]، کشش سطحی محلول الکترولیت برابر با ۶۴/۴ میلی نیوتن بر متر می باشد. برای افزایش دقت نتایج، آزمایش ها سه بار با استفاده از قطرات مختلف و در شرایط محیطی کنترل شده (از نظر دما و فشار) تکرار شدند و میانگین نتایج گزارش شد. نتایج مربوط به تکرارها همراه با مقادیر میانگین و انحراف معیار در جدول ۱ ارائه شده است. با جایگذاری مقادیر به دست آمده در معادله (۱۰)، کشش سطحی بین جیوه و الکترولیت برابر ۴۳۷ میلی نیوتن بر متر حاصل گردید.



شکل ۴- زاویه تماس بین الکترولیت و جیوه در روش قطره چسبیده

جدول ۱- نتایج مربوط به تکرارهای آزمایش زاویه تماس

انحراف معیار	مقادیر میانگین	آزمایش سوم	آزمایش دوم	آزمایش اول
۲/۶۴	۴۲	۴۴	۳۹	۴۳
				زاویه تماس (درجه)

۷-۲- انتخاب شکل و فرکانس ولتاژ اعمالی

برای ایجاد فرایند پمپاژ در مینی کانال طراحی شده، از یک میدان الکتریکی متناوب استفاده شد که از طریق دو نوار مسی متصل به یک مولد سیگنال به هر دو ورودی کانال اعمال گردید.

معیار انتخاب فرکانس: یکی از عوامل کلیدی در بهینه سازی عملکرد این سیستم، انتخاب دقیق فرکانس میدان الکتریکی است، چرا که فرکانس اعمالی نقش تعیین کننده ای در کیفیت و شدت اختلاط دو سیال دارد. در این پژوهش، مجموعه ای از آزمایش های تجربی انجام شد و نتایج نشان دادند فرکانس ۱۴ هرتز بهترین عملکرد را در ایجاد جریان های آشوبناک و افزایش نرخ اختلاط ارائه می دهد. فرکانس های بالاتر از این مقدار موجب کاهش کارایی اختلاط می شوند، چرا که یون ها نمی توانند به طور کامل در دولا به الکتریکی توزیع شوند و در نتیجه جریان های آشوبناک و اختلاط کاهش می یابد.

معیار انتخاب ولتاژ اعمالی: بر اساس نتایج گزارش شده در مرجع [۷]، بیشترین نرخ جریان در شرایط اعمال سیگنال ولتاژ مربعی با

غیرقطبی مانند هگزان و نفت نشان داد که این ترکیبات به طور کامل در فرایند پمپاژ بی اثر هستند. این مواد به دلیل قطبیت پایین و عدم رسانایی الکتریکی، نمی توانند در فرایند الکترووتینگ که اساس عملکرد این پمپ است، نقشی ایفا کنند.

بر اساس مطالعات پیشین [۷-۹]، محلول NaOH با غلظت ۰/۳ مول بر لیتر نه تنها تعامل الکتریکی مؤثری با فلز مایع برقرار می کند، بلکه در مقایسه با غلظت های پایین تر، موجب افزایش نرخ جریان نیز می شود. در غلظت های کمتر، قدرت یونی ناکافی است و منجر به کاهش کارایی اختلاط می شود. در حالی که در غلظت های بالاتر، پدیده اشباع یونی باعث افت عملکرد به دلیل محدود شدن حرکت آزاد یون ها و ایجاد پدیده های ناخواسته مانند ته نشینی می گردد.

در مجموع، می توان نتیجه گرفت که انتخاب دقیق نوع و غلظت سیال نقش بسیار مهمی در عملکرد بهینه این پمپ دارد و از این رو، طراحی آن باید به گونه ای انجام شود که متناسب با ویژگی های فیزیکوشیمیایی محلول مورد استفاده باشد.

۲-۶- اندازه گیری خواص ترموفیزیکی

۲-۶-۱- چگالی الکترولیت

پیکنومتر ابزاری دقیق و کالیبره شده در آزمایشگاه است که برای اندازه گیری چگالی یا وزن مخصوص مایعات به کار می رود. این وسیله معمولاً از شیشه ی شفاف و مقاوم ساخته شده و دارای درپوش سمباده ای با یک لوله موئین باریک در مرکز آن است. این لوله موئین به خروج حباب های هوا در زمان پر شدن کمک کرده و دقت اندازه گیری را افزایش می دهد. برای تعیین چگالی محلول الکترولیت، از رابطه زیر استفاده شد:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (9)$$

که در آن ρ چگالی، m جرم محلول و V حجم محلول است. در این مقاله از یک پیکنومتر با حجم اسمی ۵۰ میلی لیتر استفاده شد. برای تعیین جرم محلول، ابتدا جرم پیکنومتر خالی و سپس جرم آن پس از پر شدن با محلول در دمای محیط اندازه گیری شد. اختلاف این دو مقدار، جرم خالص محلول را به دست می دهد. در این آزمایش، جرم محلول برابر با ۵۰/۹۵۷۳ گرم به دست آمد. با جای گذاری این مقادیر در رابطه (۹)، مقدار چگالی محلول الکترولیت برابر با ۱۰۱۹ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد.

۲-۶-۲- کشش سطحی الکترولیت- فلز مایع

به منظور تعیین کشش سطحی بین جیوه و محلول الکترولیت، از معادله کلاسیک یانگ [۱۶] استفاده شد. این معادله که یکی از پایه های تئوری های مربوط به ترشوندگی و تعادل بین فازهاست، به صورت زیر بیان می شود:

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos \theta \quad (10)$$

که در آن، γ_{SG} کشش سطحی بین جیوه و هوا، γ_{SL} کشش سطحی بین جیوه و الکترولیت، γ_{LG} کشش سطحی الکترولیت با هوا و θ زاویه تماس بین الکترولیت و جیوه مطابق شکل ۴ می باشد. مطابق گزارش مرجع [۱۶]، کشش سطحی بین جیوه و هوا برابر با ۴۸۵ میلی نیوتن بر متر است. برای تعیین زاویه تماس، از روش قطره چسبیده [۱۷]

چرخه کاری^۱ ۵۰٪ حاصل گردید. آزمایش‌های ولتاژ نیز نشان داد که پمپاژ مؤثر سیال تنها در بازه ولتاژ ۵ تا ۱۴ ولت قله‌ناقله امکان‌پذیر است. ولتاژهای پایین‌تر از ۵ ولت، نیروی کافی برای غلبه بر اصطکاک و شروع حرکت سیال ایجاد نمی‌کنند در حالی که ولتاژهای بالاتر از ۱۴ ولت باعث الکترولیز و تشکیل حباب‌های گازی در بستر میکروسیال می‌شوند. این حباب‌ها، موجب ایجاد انسدادهای موضعی در مسیر جریان شده و به طور جدی در کارایی و یکنواختی فرایند پمپاژ اختلال ایجاد می‌کنند. بنابراین، تنظیم دقیق هر دو پارامتر فرکانس و ولتاژ میدان الکتریکی، نقشی حیاتی در بهینه‌سازی عملکرد این سیستم پمپاژ و اختلاط میکروسیالی ایفا می‌کند.

۸-۲- نحوه نورپردازی برای تصویربرداری از فرایند اختلاط

به منظور ارزیابی عملکرد اختلاط در مینی‌کانال طراحی‌شده، از یک دوربین دیجیتال Nikon D3300 با وضوح ۲۴ مگاپیکسل و توانایی ثبت تصاویر با نرخ ۶۰ فریم بر ثانیه در حالت HD استفاده شد. این دوربین، به‌گونه‌ای در بالای کانال اختلاط ثابت گردید که بتواند تصاویر دقیقی از فرایند اختلاط درون میکسر ثبت نماید. برای کاهش نویز نوری و افزایش وضوح تصاویر، کلیه آزمایش‌ها در محیطی تاریک انجام شد. پیکربندی آزمایشگاهی شامل یک میز مخصوص با دو صفحه شیشه‌ای شفاف و افقی بود که در فاصله‌ی ۲۰ سانتی‌متر از یکدیگر قرار گرفته بودند.

جهت تأمین روشنایی مناسب و یکنواخت در حین تصویربرداری، منبع نور بر روی صفحه‌ی پایینی تعبیه شد. علاوه بر این، از یک پخش‌کننده نوری بین منبع نور و صفحه شیشه‌ای بالایی استفاده گردید تا از ایجاد سایه‌ها و نقاط نوری ناهمگن جلوگیری شده و نور، به‌صورت یکنواخت در سراسر محیط آزمایش توزیع شود. پس از ثبت تصاویر، یک ناحیه مشخص و یکسان از هر تصویر برای انجام پردازش‌های تصویری انتخاب گردید تا اثر اعوجاج نوری به حداقل ممکن برسد و تحلیل‌های بعدی با دقت بالا انجام شوند.

۹-۲- پردازش تصویر و اندازه‌گیری شاخص اختلاط

برای به دست آوردن مقادیر شاخص اختلاط، تصاویر مربوط به آزمایش‌ها در سه حالت شاخه حاوی مایع بی رنگ، شاخه حاوی مایع قرمز رنگ و کل مینی‌کانال شامل ناحیه اختلاط برش داده شدند. به منظور انجام تحلیل دقیق‌تر و امکان مقایسه بهینه ناحیه اختلاط، این تصاویر به ابعاد ۵۲×۲۳۴ پیکسل برش یافته‌اند؛ به گونه‌ای که جهت جریان با قاب مستطیلی مینی‌کانال موازی باشد. در هر آزمایش، شدت خاکستری هر پیکسل با استفاده از یک کد M-File در نرم‌افزار متلب و بهره‌گیری از توابع پردازش تصویر آن اندازه‌گیری شده است. برای محاسبه شاخص اختلاط در هر مقطع عمود بر جهت جریان، از رابطه (۱۱) استفاده شده است. در این رابطه، I_{max} به عنوان میانگین شدت خاکستری پیکسل‌های شاخه حاوی مایع بی‌رنگ و مقدار I_{min} به عنوان

میانگین شدت خاکستری در آخرین مقطع مینی‌کانال (جایی که بیشترین میزان اختلاط حاصل شده است) در نظر گرفته شده‌اند. سپس، برای هر مقطع عمودی، شاخص اختلاط با استفاده از مقدار شدت خاکستری پیکسل‌ها (I_i) محاسبه شده است [۱۹]:

$$MI = 1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(I_i - I_{min})^2}{(I_{max} - I_{min})^2} \quad (11)$$

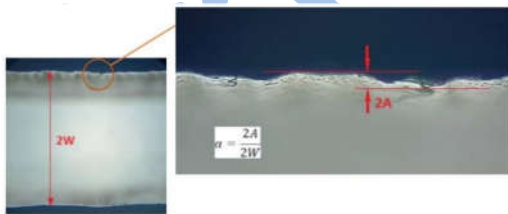
که در آن N تعداد کل پیکسل‌ها در یک مقطع، I_i شدت خاکستری در پیکسل i است، و I_{max} و I_{min} به ترتیب نشان دهنده شدت در شرایط بدون اختلاط و اختلاط کامل هستند.

۱۰-۲- اثر ناهم‌واری سطوح دیواره‌های میکسر ساخته شده بر عملکرد آن

به منظور ارزیابی اثر زبری سطوح داخلی دیواره‌های مینی‌کانال بر کیفیت اختلاط سیالات، از داده‌های مرجع [۲۰] استفاده شد. در این مطالعه، پارامتر α به عنوان شاخصی برای تعیین میزان انحراف هندسی میکسر از وضعیت کاملاً صاف و مستقیم در نظر گرفته شده است. این پارامتر از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\alpha = \frac{2A}{2W} \quad (12)$$

که در آن $2A$ دامنه دیواره موج‌دار (اختلاف بین بیشترین کمترین ارتفاع موج) و $2W$ فاصله بین دو دیواره موج‌دار (عرض کانال) می‌باشد. با توجه به شکل ۵، مقدار دامنه دیواره موج‌دار برابر با ۰/۷۸ میلی‌متر و فاصله بین دیواره‌ها برابر با ۲/۵ میلی‌متر حاصل گردید. با جایگذاری در رابطه (۱۲)، مقدار α برابر با ۰/۳۱ به دست آمد. مطابق با نتایج ارائه‌شده در مرجع [۲۰]، این مقدار از زبری در بازه اعداد رینولدز بررسی‌شده، تأثیر قابل توجهی بر عملکرد اختلاط نداشته است. در واقع، شاخص اختلاط در این شرایط تفاوت معناداری نسبت به حالتی که دیواره‌های میکسر کاملاً صاف هستند، نشان نمی‌دهد.



شکل ۵- دیواره مینی‌کانال و نمای بزرگ‌شده از زبری دیواره

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ارزیابی رفتار گذرا و پایدار فرایند اختلاط در مینی‌کانال

به منظور ارزیابی دقیق عملکرد میکسر و تحلیل رفتار گذرا و پایدار فرایند اختلاط دو سیال، تصویربرداری متوالی از لحظه آغاز پمپاژ تا زمان رسیدن به حالت پایدار انجام گرفت. این تصویربرداری به‌گونه‌ای صورت گرفت که بتواند تحولات زمانی اختلاط را از شروع جریان تا تثبیت کامل آن ثبت نماید. تحلیل تصاویر به‌دست‌آمده (مطابق شکل ۶) نشان داد که در فاز ابتدایی، به‌ویژه طی ۵ ثانیه اول پس از شروع

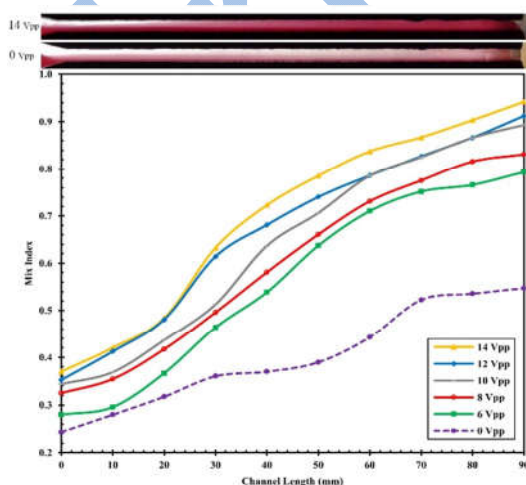
¹ Duty cycle

مشخصی، فرایند اختلاط به پایداری رسیده و شرایط جریان تثبیت شده است. بر این اساس، تمام داده‌های مورد استفاده برای ارزیابی عملکرد نهایی میکسر از فاز پایدار سیستم استخراج شده‌اند، که این امر اعتبار، دقت و قابلیت استناد نتایج به‌دست‌آمده را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد.

۳-۲- تأثیر مکانیزم پمپاژ مبتنی بر فلز مایع بر عملکرد میکسر

به‌منظور بررسی عملکرد میکسر تحت تأثیر مکانیزم پمپاژ بر مبنای فلز مایع، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها با استفاده از سیگنال مربعی متناوب در بازه دامنه ۶ تا ۱۴ ولت قله‌تا‌قله و فرکانس ثابت ۱۴ هرتز طراحی و اجرا شد. برای ایجاد شرایط مرجع و امکان مقایسه دقیق، آزمایش متناظر در حالت بدون ولتاژ نیز انجام شد؛ در این حالت، جریان تنها تحت تأثیر نیروی گرانشی برقرار شده و نرخ جریان خروجی با تنظیم شیب سکوی آزمایش به‌گونه‌ای تنظیم گردید که با نرخ جریان ناشی از ولتاژ ۱۴ ولت مطابقت داشته باشد، به‌طوری که عدد رینولدز در هر دو حالت برابر باشد.

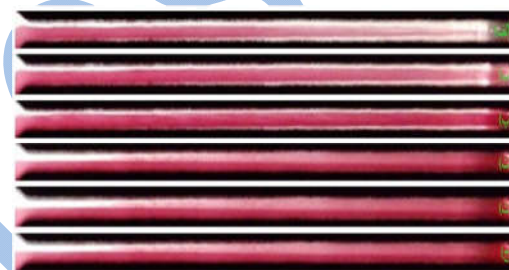
شکل ۸ نمودارهای شاخص اختلاط دو سیال در طول مینی‌کانال را نشان می‌دهد که تحت اعمال ولتاژهای مختلف و نیز در غیاب میدان الکتریکی به‌دست آمده‌اند. کلیه آزمایش‌ها در سه نوبت تکرار شدند و نتایج گزارش شده مبتنی بر میانگین مقادیر حاصل از این تکرارها می‌باشد. نمونه‌ای از نتایج مربوط به تکرارهای آزمایش (ولتاژ ۱۴) به همراه مقادیر میانگین و انحراف معیار آنها در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌گونه که در تصاویر مشاهده می‌شود، در ورودی مینی‌کانال ($x = 0$)، مرزی واضح و مشخص بین دو جریان سیال وجود دارد. با حرکت سیالات در امتداد مینی‌کانال، این مرز تدریجاً تضعیف شده و فرایند اختلاط آغاز می‌شود. این پدیده عمدتاً تحت تأثیر دو مکانیسم فیزیکی قرار دارد: نفوذ مولکولی و جابجایی آشوبناک.



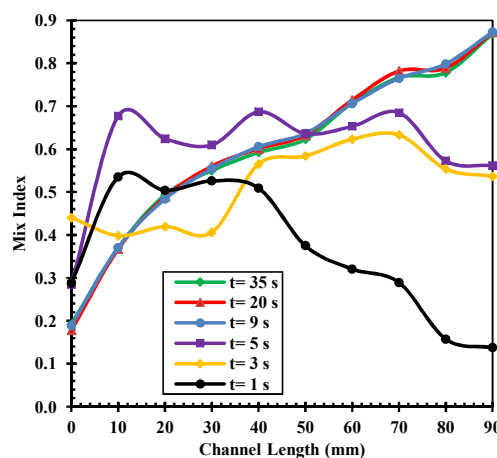
شکل ۸- نمودارهای شاخص اختلاط در طول مینی‌کانال تحت اعمال ولتاژهای مختلف و تصاویر اختلاط در ولتاژهای ۰ و ۱۴ ولت

پمپاژ، فرایند اختلاط ماهیتی ناپایدار و وابسته به زمان دارد. در این مرحله، پروفیل اختلاط در طول مینی‌کانال دستخوش تغییرات پیاپی بوده و نشان‌دهنده شرایط گذرای جریان است. با این حال، پس از حدود ۹ ثانیه، رفتار جریان تثبیت شده و پروفیل اختلاط به الگوی نسبتاً یکنواختی در امتداد کانال دست می‌یابد. بنابراین این زمان به عنوان معیاری برای بررسی حالت پایدار آزمایش‌ها انتخاب گردید.

برای تأیید این نتایج به‌صورت کمی، پردازش عددی بر روی تصاویر ثبت‌شده در نرم‌افزار متلب انجام گرفت. مطابق نمودار شاخص اختلاط (شکل ۷)، در بازه زمانی ۱ تا ۵ ثانیه، رفتار اختلاط ناپایدار و همراه با نوسانات قابل‌توجه است. در بازه زمانی ۵ تا ۹ ثانیه، جریان وارد مرحله انتقالی از حالت گذرا به پایدار می‌شود. پس از گذشت ۹ ثانیه، شاخص اختلاط در طول کانال به مقدار نسبتاً ثابتی رسیده و تغییرات آن در زمان‌های ۲۰ و ۳۵ ثانیه بسیار اندک و ناچیز است. این روند بیانگر آن است که سیستم به حالت پایدار کامل رسیده است. همچنین، مقدار نهایی شاخص اختلاط در انتهای مینی‌کانال (در حدود ۰/۹) نشان‌دهنده اثربخشی بالای میکسر در شرایط پایدار است.



شکل ۶- تصاویر اختلاط در طول کانال برای فواصل زمانی: الف) $t = 1$ s، ب) $t = 3$ s، پ) $t = 5$ s، ت) $t = 9$ s، ث) $t = 20$ s و ج) $t = 35$ s



شکل ۷- نمودار شاخص اختلاط در طول کانال برای ولتاژ ۱۰ و زمان‌های مختلف

برای اطمینان از صحت و تعمیم‌پذیری این نتایج، ارزیابی فوق برای کلیه نمونه‌های مورد مطالعه در این پژوهش سه مرتبه تکرار شد. یافته‌ها نشان دادند که در تمامی میکسرها، پس از مدت زمان

نتایج به وضوح نشان می‌دهند که با افزایش شدت میدان الکتریکی، یعنی افزایش ولتاژ از ۶ به ۱۴، میزان اختلاط بین دو سیال به طور پیوسته افزایش می‌یابد. این روند افزایشی از طریق افزایش شاخص اختلاط در طول کانال قابل مشاهده و اندازه‌گیری است. در حالت بدون اعمال ولتاژ، که به عنوان حالت پایه و صرفاً نفوذی تلقی می‌شود، اختلاط بسیار محدود بوده و مرز بین دو جریان تا فواصل زیادی حفظ می‌شود.

مقایسه نتایج حالت‌های مختلف نشان می‌دهد که استفاده از پمپاژ بر مبنای فلز مایع، موجب ایجاد اختلال در سطح مشترک بین جریان‌ها شده و از طریق تحریک جریان‌ات گردابی و ایجاد جابجایی‌های آشوبناک، سطح تماس بین دو فاز سیال را افزایش می‌دهد. در نتیجه، فرایند اختلاط با کارایی بیشتری پیش می‌رود. به عبارت دیگر، میدان الکتریکی اعمال شده نه تنها محرک جریان سیال است، بلکه عاملی مؤثر در تقویت مکانیزم اختلاط در میکروکانال‌ها نیز محسوب می‌شود. این یافته‌ها، اهمیت به کارگیری فناوری فلز مایع در سیستم‌های میکروسیالی را برجسته می‌سازند؛ به ویژه در مواردی که دستیابی به اختلاط مؤثر با مصرف توان پایین، در ابعاد میکرو، مدنظر است.

جدول ۲- نتایج شاخص اختلاط برای آزمایش‌های تکرار شده در ولتاژ ۱۴

انحراف معیار	مقادیر میانگین	آزمایش سوم	آزمایش دوم	آزمایش اول	طول کانال (mm)
۰/۰۲۵۱	۰/۳۴۳۵	۰/۳۶۵۶	۰/۳۴۸۷	۰/۳۱۶۲	۰
۰/۰۱۵۵	۰/۳۶۸۷	۰/۳۸۴۶	۰/۳۶۷۸	۰/۳۵۳۷	۱۰
۰/۰۰۵۵	۰/۴۳۶۱	۰/۴۴۲۳	۰/۴۳۱۷	۰/۴۳۴۳	۲۰
۰/۰۲۶۹	۰/۵۱۲۴	۰/۴۸۲۱	۰/۵۳۳۶	۰/۵۲۱۵	۳۰
۰/۰۰۵۴	۰/۶۳۶۵	۰/۶۳۵۱	۰/۶۳۲۰	۰/۶۴۲۴	۴۰
۰/۰۰۳۳	۰/۷۰۶۱	۰/۷۰۴۲	۰/۷۰۹۹	۰/۷۰۴۲	۵۰
۰/۰۰۱	۰/۷۸۴۹	۰/۷۷۴۲	۰/۷۸۶۴	۰/۷۹۴۱	۶۰
۰/۰۰۸۶	۰/۸۲۴۷	۰/۸۲۳۴	۰/۸۱۶۸	۰/۸۳۳۹	۷۰
۰/۰۰۴۶	۰/۸۶۵۸	۰/۸۶۴۳	۰/۸۶۲۱	۰/۸۷۱۰	۸۰
۰/۰۱۴۴	۰/۸۹۲۹	۰/۹۰۹۱	۰/۸۸۱۴	۰/۸۸۸۲	۹۰

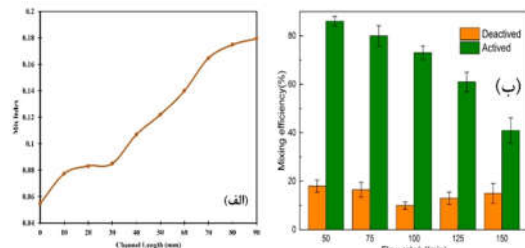
۳-۳- اعتبارسنجی داده‌های آزمایش

در مطالعات پیشین پیرامون اختلاط سیالات، از هندسه‌ها و شرایط مرزی متنوعی استفاده شده که هر یک تأثیر متفاوتی بر نتایج داشته‌اند. از این رو، برای اطمینان از صحت روش‌های آزمایشگاهی و اعتبار نتایج حاصل، انجام فرایند اعتبارسنجی داده‌ها ضروری است. در میان پژوهش‌های موجود، مطالعه Hu و همکاران [۹] بیشترین شباهت را با تحقیق حاضر دارد. در این تحقیق، از ترکیب پمپ سرنگی و فلز مایع برای بررسی فرایند اختلاط استفاده شده است. مطابق شکل ۴d از مقاله مذکور، در یکی از حالت‌ها، فلز مایع غیرفعال بوده و تنها پمپ سرنگی جریان را ایجاد کرده است. در این مطالعه، این وضعیت بازآفرینی شده است، با این تفاوت که جریان به جای پمپ سرنگی، از طریق ایجاد شیب در سکوی آزمایش و در نتیجه اعمال نیروی گرانش تأمین گردیده است. برای حصول نتایج قابل مقایسه، عدد رینولدز در جریان با استفاده از تنظیم شیب سکوی آزمایش با عدد رینولدز مطالعه مذکور

یکسان در نظر گرفته شده است.

بر اساس نتایج به دست آمده و مطابق با شکل ۹ الف، مقدار شاخص اختلاط در انتهای مینی کانال برابر با ۰/۱۸ اندازه‌گیری شده است. این در حالی است که در مرجع [۹]، مقدار MI در شرایط مشابه برابر با ۰/۱۷ (شکل ۹ ب) گزارش شده است. این اختلاف حدوداً ۶ درصدی می‌تواند ناشی از تفاوت در شرایط آزمایشگاهی، از جمله نحوه نوردی، شرایط محیطی یا روش‌های پردازش تصویر باشد.

شایان ذکر است که در این تحقیق، تمامی آزمایش‌ها سه مرتبه تکرار شده و مقدار MI گزارش شده، میانگین مقادیر حاصل از این تکرارهاست.



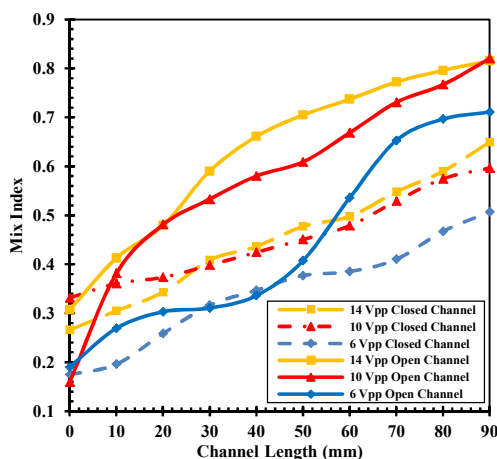
شکل ۹- (الف) نمودار شاخص اختلاط در طول مینی کانال با استفاده از نیروی گرانش با نرخ جریان ۱۲۵ میکرولیتر بر دقیقه، (ب) شاخص اختلاط در برابر نرخ جریان [۹]

۳-۴- پارامترها و مکانیزم‌های فیزیکی مؤثر بر عملکرد میکسر

شکل ۱۰ تحلیل پارتو مربوط به اثر عوامل مختلف بر فرایند اختلاط را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان اهمیت عوامل به صورت نزولی مرتب شده و پارامترهای کلیدی قابل شناسایی هستند. مطابق نتایج، در میان متغیرهای اصلی، قطر فلز مایع بیشترین تأثیر را بر شاخص اختلاط دارد و پس از آن به ترتیب میدان الکتریکی، زاویه ورودی به مینی کانال و عرض کانال قرار می‌گیرند. این یافته‌ها بیانگر آن است که ویژگی‌های هیدرودینامیکی و شرایط مرزی جریان نقش تعیین‌کننده‌ای در ارتقای کیفیت اختلاط ایفا می‌کنند. علاوه بر اثرات اصلی، در بررسی برهم‌کنش‌های دوتایی، ترکیب‌های میدان الکتریکی- قطر فلز مایع، میدان الکتریکی- زاویه ورودی و قطر فلز مایع- زاویه ورودی بیشترین سهم را در تغییر شاخص اختلاط دارند. این موضوع نشان می‌دهد که هم‌افزایی برخی از پارامترها می‌تواند منجر به افزایش قابل توجه کارایی فرایند شود. در مقابل، سایر برهم‌کنش‌های دوتایی از اهمیت آماری چندانی برخوردار نبوده و در مقایسه با عوامل اصلی تأثیرگذاری محدودی دارند.

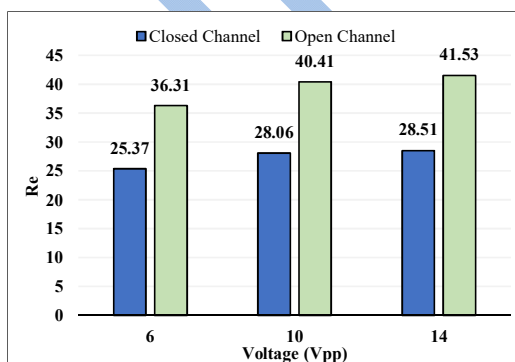
به طور کلی، تحلیل پارتو با فراهم ساختن چارچوبی کمی، امکان تمایز میان عوامل بحرانی و عوامل کم‌اهمیت را فراهم می‌آورد. بر اساس نتایج این تحقیق، می‌توان نتیجه گرفت که قطر فلز مایع و میدان الکتریکی به عنوان پارامترهای غالب، نقشی اساسی در کنترل و بهینه‌سازی فرایند اختلاط در مقیاس میکرو دارند. این نتایج می‌تواند در طراحی آتی مینی کانال‌ها و توسعه فناوری‌های مبتنی بر اختلاط پیشرفته، به ویژه در کاربردهای مهندسی شیمی و میکروسیالات، مورد توجه قرار گیرد.

حدود $x = 50 \text{ mm}$ مشاهده می‌شود که احتمالاً ناشی از تغییر رژیم جریان یا تکمیل نسبی اختلاط اولیه است. در ولتاژهای بالاتر، روند افزایش شاخص اختلاط یکنواخت‌تر و بدون افت محسوس است که نشان‌دهنده پایداری بیشتر فرایند اختلاط در حضور میدان الکتریکی قوی‌تر است.



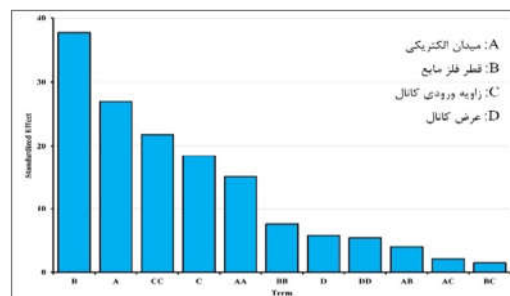
شکل ۱۲- نمودار شاخص اختلاط در طول مینی کانال برای آزمایش‌های کانال‌های بسته و باز

بررسی تغییرات عدد رینولدز (شکل ۱۳) نشان می‌دهد که در هر دو نوع کانال، با افزایش ولتاژ، این عدد افزایش می‌یابد. میدان الکتریکی با ایجاد نیروی محرکه موجب حرکت سیال شده و با افزایش ولتاژ، شدت این نیرو و در نتیجه سرعت جریان بیشتر می‌شود که با تعریف عدد رینولدز همخوانی دارد. با این حال، مقدار عدد رینولدز در کانال بسته به‌طور سیستماتیک کمتر از کانال باز است. دلیل این امر تماس بیشتر سیال با دیواره‌ها در کانال بسته است که تنش برشی را افزایش داده و به دنبال آن افت فشار بیشتر، کاهش دبی جرمی و در نهایت کاهش عدد رینولدز را به همراه دارد. در مقابل، تماس محدودتر سیال با دیواره‌ها در کانال باز، امکان جریان آزادتر و سریع‌تر را فراهم می‌کند.



شکل ۱۳- اعداد رینولدز مینی کانال بسته و باز برای آزمایش‌ها در ولتاژهای ۶، ۱۰ و ۱۴ ولت

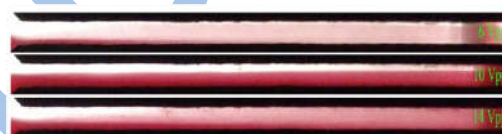
ترکیب نتایج شاخص اختلاط و عدد رینولدز نشان می‌دهد که



شکل ۱۰- نمودار گرافیکی پارتو

۳-۵- مقایسه عملکرد میکسر در کانال بسته و باز

به منظور ارزیابی و مقایسه کارایی اختلاط در مینی کانال‌های بسته و باز، آزمایش‌هایی تحت اعمال میدان الکتریکی با دامنه‌های ۶، ۱۰ و ۱۴ ولت قله‌تقله انجام شد. تصاویر ثبت‌شده از فرایند اختلاط (شکل ۱۱) نشان می‌دهند که با افزایش شدت میدان الکتریکی، بازده اختلاط دو سیال به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد. این روند را می‌توان به تقویت پدیده‌های الکتروهیدرودینامیکی نسبت داد که با ایجاد جریان‌های عرضی و آشوبناک، سطح تماس میان دو سیال را افزایش داده و نرخ انتقال جرم را تسریع می‌کنند.



شکل ۱۱- تصاویر اختلاط در مینی کانال بسته برای آزمایشات

بر اساس نمودار تغییرات شاخص اختلاط بر حسب طول مینی کانال (شکل ۱۲)، در هر دو نوع کانال و برای تمام ولتاژهای مورد بررسی، شاخص اختلاط از ورودی ($x = 0 \text{ mm}$) تا خروجی ($x = 90 \text{ mm}$) روندی صعودی دارد که بیانگر پیشرفت تدریجی فرایند اختلاط است. افزایش اختلاط ناشی از دو عامل اساسی است: (۱) پخش مولکولی و (۲) جابجایی آشوبناک که موجب افزایش سطح تماس دو سیال می‌شود. همچنین در کانال بسته، افزایش ولتاژ اعمالی از ۶ به ۱۴ ولت، شاخص اختلاط نهایی را از ۰/۵۰۶۷ به ۰/۶۴۹۴ ارتقا داده که معادل حدود ۲۸ درصد بهبود نسبی است.

مقایسه داده‌ها نشان می‌دهد که در شرایط یکسان (ولتاژ اعمالی، قطر فلز مایع، عرض کانال و زاویه ورودی)، شاخص اختلاط در کانال بسته همواره کمتر از کانال باز است. کاهش نسبی شاخص اختلاط در انتهای کانال بسته برای ولتاژهای ۶، ۱۰ و ۱۴ ولت به ترتیب ۳۷، ۴۰ و ۲۵ درصد گزارش شده است. این اختلاف در ولتاژ پایین (۶ ولت) بیشتر از ولتاژ بالا (۱۴ ولت) است؛ بدین معنا که افزایش ولتاژ، فاصله عملکردی بین دو نوع کانال را کاهش می‌دهد. این رفتار حاکی از آن است که محدودیت‌های هندسی و افت فشار در کانال بسته باعث تداخل لایه‌های مرزی و در نتیجه کاهش سرعت جریان و به تبع آن کاهش اختلاط می‌گردد.

در ولتاژ ۶ ولت، به ویژه در کانال باز، تغییر شیب قابل توجهی در

محدودیت‌های جریان در کانال بسته منجر به کاهش ۲۵ تا ۴۰ درصدی کارایی اختلاط و افت ۴۳/۱ تا ۴۵/۷ درصدی عدد رینولدز می‌شود. با این حال، افزایش دامنه میدان الکتریکی می‌تواند بخشی از این افت عملکرد را جبران کرده و فرایند اختلاط را بهبود دهد، هرچند این جبران‌سازی کامل نیست. این نتایج اهمیت طراحی بهینه هندسه کانال و انتخاب مناسب شرایط میدان الکتریکی را در بهبود عملکرد میکسرهای برجسته می‌سازد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک میکسر فعال در مقیاس مینی بر پایه پدیده الکترووتینگ و با استفاده از فلز مایع جیوه طراحی، ساخته و به‌طور تجربی ارزیابی شد. هدف اصلی مطالعه، بررسی رفتار گذرا و پایدار، مقایسه عملکرد کانال‌های باز و بسته، و تحلیل اثر پارامترهای الکتریکی و هندسی بر بازده اختلاط بود.

نتایج نشان داد اعمال میدان الکتریکی متناوب (با فرکانس ۱۴ هرتز و ولتاژ قله‌تافله ۶ تا ۱۴ ولت) بر فلز مایع در محلول NaOH با غلظت ۰/۳ مولار، با ایجاد گرادیان کشش سطحی و تحریک جریان‌های عرضی و آشوبناکی‌های موضعی، موجب افزایش قابل توجه شاخص اختلاط در مقایسه با حالت نفوذی می‌شود. افزایش ولتاژ تا محدوده بهینه، شاخص اختلاط در کانال را ارتقا داد، که بیانگر کارایی بالای این مکانیزم است. در مقابل، ولتاژهای بالاتر از ۱۴ ولت سبب بروز الکترولیز و تشکیل حباب شده و کارکرد سیستم را مختل کردند.

تحلیل رفتار گذرا نشان داد فرایند اختلاط طی ۵ ثانیه نخست پس از آغاز پمپاژ با نوسانات قابل توجه همراه است و پس از حدود ۹ ثانیه به حالت پایدار می‌رسد. این موضوع در طراحی کاربردی اهمیت دارد، چرا که زمان رسیدن به شرایط پایدار، معیاری کلیدی در ارزیابی عملکرد و زمان‌بندی فرایندهای واقعی محسوب می‌شود. داده‌های کمی مرتبط با شاخص اختلاط و عدد رینولدز نیز بر اساس این شرایط پایدار استخراج شدند که بر اعتبار و تکرارپذیری نتایج می‌افزاید.

مقایسه عملکرد کانال‌های باز و بسته نشان داد که کانال باز به دلیل تماس کمتر سیال با دیواره‌ها، افت فشار کمتر و دبی بالاتر، کارایی بالاتری در اختلاط دارد. در ولتاژهای ۶، ۱۰ و ۱۴ ولت، شاخص اختلاط در کانال بسته به‌ترتیب ۴۰، ۳۷ و ۲۵ درصد کمتر از کانال باز بود. همچنین عدد رینولدز در کانال بسته به‌طور سیستماتیک حدود ۴۳ تا ۴۵/۷ درصد کمتر بود که با افزایش مقاومت هیدرولیکی و تنش برشی در این هندسه مطابقت دارد. با وجود این، افزایش ولتاژ اثر محدودیت هندسه بسته را تا حدی جبران می‌کند که بیانگر توانمندی میدان الکتریکی در غلبه بر موانع هیدرودینامیکی است.

فرکانس ۱۴ هرتز به‌عنوان نقطه تعادلی میان تحریک مؤثر یون‌ها و جلوگیری از ناپایداری در لایه الکتریکی مضاعف شناسایی شد، در حالی که فرکانس‌های بالاتر کارایی اختلاط را کاهش دادند. افزون بر این، طراحی محفظه فلز مایع با قطر ۳ میلی‌متر و گلوگاه‌های باریک (۰/۶ میلی‌متر)، از جابجایی ناخواسته قطره جیوه همراه جریان اصلی جلوگیری کرد. بررسی زبری سطح دیواره نیز نشان داد ضریب $\alpha = 0.031$ در بازه رینولدز مورد مطالعه تأثیر معناداری بر شاخص اختلاط ندارد.

در مجموع، این مطالعه نشان می‌دهد که میکسرهای فعال مبتنی بر فلز مایع و الکترووتینگ، با ساختاری ساده، بدون قطعات متحرک که با انرژی پایین کار می‌کنند، می‌توانند گزینه‌ای کارآمد برای کاربرد در سیستم‌های میکروسایالی و فناوری‌های آزمایشگاه روی تراشه باشند. چنین سیستم‌هایی به‌ویژه در حوزه‌هایی نظیر میکرو راکتورهای شیمیایی، تشخیص‌های نقطه مراقبت و فرایندهای بیوشیمیایی که نیازمند اختلاط سریع و کارآمد هستند، پتانسیل بالایی دارند.

با وجود این، برخی محدودیت‌ها از جمله سمیت جیوه، دامنه محدود هندسه‌ها و طیف فرکانسی بررسی‌شده وجود دارد. در راستای پژوهش‌های آینده، جایگزینی جیوه با آلیاژهای غیرسمی مبتنی بر گالیوم (مانند گالینستان)، بررسی هندسه‌های چندمرحله‌ای و سه‌بعدی، و انجام مطالعات بلندمدت در زمینه پایداری و زیست‌سازگاری پیشنهاد می‌شود. چنین رویکردهایی می‌تواند به بهینه‌سازی هم‌زمان پارامترهای الکتریکی و هندسی و توسعه سامانه‌های کوچک‌مقیاس با کارایی بالا منجر شود.

۵- مراجع

- [1] Gande VV, Podupu PK, Berry B, Nere NK, Pushpavanam S, Singh MR. Engineering advancements in microfluidic systems for enhanced mixing at low Reynolds numbers. *Biomicrofluidics*. 2024;18(1).
- [2] صادقی م، خلیلیان م، میرزایی ا، رضازاده س، شبیه‌سازی عددی میکرومیکسر غیرفعال با واحدهای اختلاط منحنی شکل: بررسی بهبود کیفیت اختلاط گازهای ورودی در رینولدزهای مختلف. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۱۴۰۱. د. ۵۲. ش. ۲. ص ۲۲۳-۲۳۲.
- [3] Kheirkhah Barzoki A. Optimization of passive micromixers: effects of pillar configuration and gaps on mixing efficiency. *Scientific Reports*. 2024;14(1):16245.
- [4] مصطفوی م، نظری م، بررسی اختلاط ناشی از جریان الکتروکینتیک القایی غیرخطی در یک میکروکانال. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۱۳۹۷. د. ۴۸. ش. ۱. ص ۳۲۳-۳۳۰.
- [5] Trabzon L, Karimian G, R Khosroshahi A, Gül B, Gh Bakhshayesh A, Kocak AF, et al. High-throughput nanoscale liposome formation via electrohydrodynamic-based micromixer. *Physics of Fluids*. 2022;34(10).
- [6] Eaker CB, Dickey MD. Liquid metal actuation by electrical control of interfacial tension. *Applied Physics Reviews*. 2016;3(3).
- [7] Tang S-Y, Khoshmanesh K, Sivan V, Petersen P, O'Mullane AP, Abbott D, et al. Liquid metal enabled pump. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2014;111(9):3304-9.
- [8] Tang SY, Sivan V, Petersen P, Zhang W, Morrison PD, Kalantar - zadeh K, et al. Liquid metal actuator for inducing chaotic advection. *Advanced Functional Materials*. 2014;24(37):5851-8.
- [9] Hu Q, Ren Y, Liu W, Chen X, Tao Y, Jiang H. Fluid flow and mixing induced by AC continuous electrowetting of liquid metal droplet. *Micromachines*. 2017;8(4):119.
- [10] Mohammad Jafarpour A, Rostamzadeh Khosroshahi A, Hanifi M, Sadegh Moghanlou F. Experimental study on the performance of a mini-scale Y-type mixer with two liquid metal-enabled pumps. *Physics of Fluids*. 2022;34(11).
- [11] Mohammad Jafarpour A, Rostamzadeh Khosroshahi A, Hanifi M, Sadegh Moghanlou F. A comprehensive study on active mixer performance using liquid metal droplets: An

experimental approach. Chemical Engineering Communications. 2025;212(2):184–99.

- [12] Mugele F, Baret J-C. Electrowetting: from basics to applications. *Journal of physics: condensed matter*. 2005;17(28): R705.
- [13] Lyklema J. Electrical properties of interfaces-- compilation of data on the electrical double layer on mercury electrodes. 1983.
- [14] Nguyen N-T. *Micromixers: Fundamentals, design, and fabrication*: William Andrew; 2008.
- [15] Bo G, Ren L, Xu X, Du Y, Dou S. Recent progress on liquid metals and their applications. *Advances in Physics: X*. 2018;3(1):1446359.
- [16] Kontogeorgis GM, Kiil S. *Introduction to applied colloid and surface chemistry*: John Wiley & Sons; 2016.
- [17] Henry D, Jackson J. Interfacial tension between mercury and water. *Nature*. 1938;142(3596):616-7.
- [18] Wang S, Han J, Song D, Wang X. Effect of NaOH solution concentration on the quality of controllable silicon nanowires array fabrication. *Materials Research Express*. 2020;6(12):1250e9.
- [19] Feng X, Ren Y, Jiang H. Effect of the crossing-structure sequence on mixing performance within three-dimensional micromixers. *Biomicrofluidics*. 2014;8(3).
- [20] Mondal B, Mehta SK, Patowari PK, Pati S. Numerical study of mixing in wavy micromixers: comparison between raccoon and serpentine mixer. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*. 2019; 136:44–61.