



Numerical Study of an Electroosmotic Micromixer Based on G-Shaped Electrodes

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Bouloorchy Tabalvandani M.J.¹,
Badiroostami M.^{1*}

How to cite this article

Bouloorchy Tabalvandani MJ,
Badiroostami M, Numerical Study of
an Electroosmotic Micromixer Based
on G-shaped Electrodes. Modares
Mechanical Engineering;
2024;24(07):411-420.

¹ MEMS Lab, School of Electrical and
Computer Engineering, College of
Engineering, University of Tehran,
Tehran, Iran.

*Correspondence

Address: School of Electrical and
Computer Engineering, College of
Engineering, University of Tehran
North Kargar Street, Tehran, Iran.

mbadie@ut.ac.ir

Article History

Received: May 6, 2024

Accepted: September 25, 2024

ePublished: October 13, 2024

ABSTRACT

The emergence of microfluidic devices for various applications has created a demand for enhancing the efficiency of the mixing. In this article, an electroosmotic micromixer based on G-shaped electrodes that are excited by AC waveform was designed. The proposed micromixer was simulated using COMSOL Multiphysics and the effects of various parameters including voltage, frequency, distance between electrodes, and the number of electrodes on the mixing efficiency have been characterized. By compiling the obtained results, the performance of the optimized model with four electrodes each having a 6.5 μm distance between their opposite polarities, excited with voltage of 1 V and frequency of 16 Hz was evaluated. The results demonstrated that the proposed micromixer was able to achieve a mixing efficiency of over 99.7% with a response time of 220 ms. Furthermore, the proposed device was designed regarding practical consideration, enabling the micromixer to be fabricated without the need of sophisticated instruments.

Keywords Microfluidic Devices, Electroosmotic Micromixer, Mixing Efficiency

CITATION LINKS

1- Microfluidics: Applications for analytical purposes in 2- Live from under the lens: exploring microbial motility with 3- Microfluidics technology for manipulation and analysis of biological cells. 4- Microfluidics: reframing biological enquiry. 5- Advances in passively driven microfluidics and 6- Microfluidics for cell separation. 7- Microfluidics as an emerging paradigm for assisted reproductive technology: 8- Biomarker Detection in Early Diagnosis of Cancer: Recent Achievements in Point-of-Care Devices Based on 9- Microfluidic Immunoassays. 10- Active and passive micromixers: A comprehensive review. 11- A review on micromixers. 12- Numerical simulation for electro-osmotic mixing under three types of periodic potentials in 13- Modeling and Optimization of Y-Type Micromixers. 14- Efficient Mixing of Microfluidic Chip with a Three-Dimensional Spiral Structure. 15- Design and Evaluation of Three-Dimensional Zigzag Chaotic Micromixers for 16- Design and Mixing Analysis of a Passive Micromixer with Circulation Promoters. 17- Acoustofluidic micromixers: From rational design to 18- A review on micromixers actuated with magnetic nanomaterials. 19- A Thermally-Driven Micromixer Based on Fluid Volume Variation. 20- New insights into the mechanism of fluid mixing in the micromixer based on 21- A review on the application, simulation, and experiment of 22- Bubble-induced acoustic micromixing. 23- Sharp-edge-driven spiral acoustic micromixers for 24- AC Electric-Field-Induced Fluid Flow in Microelectrodes. 25- Fluid flow induced by nonuniform ac electric fields in electrolytes on 26- SOI processing of a ring electrokinetic chaotic micromixer. 27- Enhanced mixing quality of ring-type electroosmotic micromixer using baffles. 28- Numerical study on an electroosmotic micromixer with rhombic structure. 29- Numerical simulation of a novel microfluidic electroosmotic micromixer with 30- A novel three-dimensional electroosmotic micromixer based on 31- Mixing performance of an electroosmotic micromixer with Koch fractal structure. 32- Zeta Potential in Colloid Science. 33- Mixing and flow regulating by induced-charge electrokinetic flow in a microchannel with a pair of conducting triangle hurdles. 34- Optimal parametric mixing analysis of active and passive micromixers using Taguchi method. 35- Numerical and experimental study on mixing performance of a novel electro-osmotic micro-mixer. 36- Numerical investigation of electroosmotic mixing in a contraction-expansion microchannel.

مطالعه عددی ریزمخلوط کن الکترواسموزی مبتنی بر الکترودهای G شکل

محمدجواد بلورچی طالبوندانی^۱، مجید بدیعی رستمی^{۲*}

^۱ آزمایشگاه سامانه‌های ریز الکترومکانیکی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

با ظهور تراشه‌های ریزسیالی در کاربردهای متنوع، نیاز مبرم به بهبود درهم-آمیختگی به شکلی موثر و سریع ایجاد شده است. در این مقاله، یک ریزمخلوط-کن الکترواسموزی با استفاده از تعدادی الکترودهای G شکل که با ولتاژ متناوب تحریک می‌شود طراحی شده است. ریزمخلوط‌کن پیشنهادی با استفاده از نرم افزار کامسول شبیه سازی شده و تاثیر متغیرهای مختلف از جمله ولتاژ، فرکانس، تعداد الکترودها و فاصله‌ی بین قطب‌های مخالف بر بازدهی درهم-آمیختگی سنجیده شده است. با استفاده از نتایج به دست آمده، مدل بهبودیافته‌ی ریزمخلوط‌کن پیشنهادی با چهار عدد الکتروتود، هر کدام با فاصله ۶/۵ میکرومتر بین قطب‌های مخالف، ولتاژ ۱ ولت و فرکانس ۱۶ هرتز بررسی شده است. نتایج حاصل نشان داده است که این تراشه قادر است به بازدهی درهم-آمیختگی بیشتر از ۹۹/۷٪ و سرعت پاسخ‌دهی ۲۲۰ میلی ثانیه دست یابد. علاوه بر موارد ذکر شده، ریزمخلوط‌کن پیشنهادی با توجه به جوانب عملی طراحی شده است که سبب می‌شود تراشه مذکور بدون نیاز به ادوات ساخت پیچیده قابلیت پیاده‌سازی در بسترهای آزمایشگاهی را دارا باشد.

کلیدواژه‌ها: تراشه ریزسیالی، ریزمخلوط کن الکترواسموزی، بازدهی درهم آمیختگی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۰۴

*نویسنده مسئول: mbadie@ut.ac.ir

۱- مقدمه

پیدایش تراشه‌های ریزسیالی، نقشی اساسی در تحول روش‌های مرسوم در زمینه‌های متفاوت از جمله شیمی تجزیه، تجزیه و تحلیل فرآیندهای زیستی و بررسی رفتار میکروارگانیسم‌ها داشته است و همچنین به شکل گیری یک مفهوم نوین با عنوان «آزمایشگاه بر روی تراشه» انجامیده است [۱-۴]. آزمایشگاه بر روی تراشه، در واقع تجمیع تمام فرآیندهای آزمایشگاهی بر روی یک تراشه ریزسیالی به منظور اتوماسیون و افزایش صحت و دقت فرآیند می‌باشد [۵]. از این قبیل تراشه‌ها در فرآیندهای متنوعی همچون جداسازی سلول‌های مختلف [۶، ۷]، شناسایی نشانگرهای زیستی [۸]، ایمنی سنجی (Immunoassay) و غیره استفاده می‌شود [۹]. از مزایای کم نظیر تراشه‌های ریزسیالی می‌توان به سرعت بالای شناسایی، کاهش استفاده از مواد اولیه مورد نیاز، قیمت کم و زیست‌سازگاری بالای آن اشاره کرد [۳، ۶]. یکی از مراحل بسیار مهم در انجام بسیاری از تجزیه تحلیل‌های مورد نیاز بر روی تراشه، درهم‌آمیختگی یکنواخت مواد اولیه ورودی به داخل تراشه می‌باشد، زیرا که عدم درهم آمیختگی کامل و یا غیرهمگن مواد اولیه

می‌تواند به کاهش صحت و دقت آزمایش‌ها بیانجامد [۱۰]. تراشه‌های ریزسیالی بدلیل ابعاد بسیار کوچک کانال‌ها و در نتیجه کوچک بودن عدد رینولدز، سبب ایجاد جریان آرام می‌شوند. در این شرایط، درهم آمیختگی تنها به دلیل پدیده انتشار رخ می‌دهد و به همین دلیل، درهم آمیختگی به کندی صورت می‌گیرد و رسیدن به درهم آمیختگی کامل و یکنواخت در این قبیل تراشه‌ها به یک چالش تبدیل شده است [۱۰]. به منظور مرتفع نمودن این مهم، سازوکارهای متفاوتی برای افزایش درهم آمیختگی در سطح تراشه‌های ریزسیالی در طی دهه‌های اخیر پیشنهاد شده‌اند که تحت عنوان ریزمخلوط‌کن‌ها شناخته می‌شوند.

ریزمخلوط‌کن‌ها اغلب به دو دسته غیرفعال و فعال تقسیم بندی می‌شوند که در دسته‌ی غیرفعال، بدون دخالت هیچ گونه نیروی خارجی و تنها با استفاده از هندسه‌ی کانال‌ها، افزایش سرعت و کیفیت درهم آمیختگی صورت می‌پذیرد [۱۰، ۱۱]. در این گونه ریزمخلوط‌کن‌ها، از هندسه‌های متفاوتی همچون کانال‌های T شکل [۱۲]، Y شکل [۱۳]، مارپیچی [۱۴] و زیگزاگی [۱۵] جهت ایجاد اغتشاش در سیال استفاده می‌شود که در نهایت به بهبود درهم آمیختگی می‌انجامد. این قبیل ریزمخلوط‌کن‌ها علی‌رغم عدم اتکا به نیروی خارجی و پیاده‌سازی ساده‌تر، دارای عملکرد ضعیف‌تری از منظر بهره درهم آمیختگی نسبت به ریزمخلوط‌کن‌های فعال می‌باشند و توانایی کمتری بر روی کنترل سیال عبوری دارند [۱۶]. ریزمخلوط‌کن‌های فعال با بهره‌گیری از نیروهای خارجی سبب افزایش درهم آمیختگی و کاهش زمان انجام آن در سطح تراشه می‌شوند. استفاده از امواج صوتی [۱۷]، میدان‌های مغناطیسی [۱۸]، جریان‌های حرارتی [۱۹، ۲۰] و پدیده الکترواسموزی (Electroosmosis) [۲۱] را می‌توان به عنوان برخی از نیروهای خارجی مورد استفاده در ریزمخلوط‌کن‌های فعال برشمرد. به عنوان نمونه، لیو و همکاران از طریق اعمال یک موج صوتی به حباب هوای به دام افتاده در سطح تراشه، ریز جریان‌هایی را ایجاد کرده که منجر به بهبود درهم آمیختگی شدند [۲۲]. در پژوهشی دیگر، یک کانال ریزسیالی مارپیچی که حاوی ساختارهای لبه تیز در امتداد کانال می‌باشد ساخته شده است که با اعمال موج صوتی سبب ایجاد ریزگرداب‌ها می‌شود. جریان‌های ایجاد شده به همراه خواص هیدرودینامیکی کانال مارپیچی سبب افزایش بهره درهم آمیختگی در گستره‌ی وسیعی از دبی‌ها گردیده است [۲۳]. لازم به ذکر است که برخلاف عملکرد بهتر این گونه ریزمخلوط‌کن‌ها در مقایسه با همتای غیرفعال، ریزمخلوط‌کن‌های فعال اغلب پیاده سازی پیچیده‌تری داشته که امکان تجمیع آن را با سایر المان‌های به کار رفته در تراشه‌های ریزسیالی با چالشی بالقوه مواجه می‌سازد. از میان ریزمخلوط‌کن‌های معرفی شده در سال‌های اخیر، ریزمخلوط-کن‌های الکترواسموزی به دلیل سازوکار ساده‌تر و کنترل بهتر و دقیق‌تر بر روی جریان حرکتی سیال مورد توجه قرار گرفته است. در این قبیل ریزمخلوط‌کن‌ها، اعمال میدان الکتریکی سبب ایجاد

بکارگیری فرآیندهای خودکار و بدون دخالت انسان است، لذا استفاده از این قبیل ریزمخلوطکن‌ها را در زیرساخت‌های تحقیقاتی با مشکل روبرو می‌نماید. یکی دیگر از مشکلات احتمالی ساختارهای پیشنهادی، استفاده از ساختارهای متنوع در هندسه کانال می‌باشد که استفاده از این ریزمخلوطکن‌ها را در پژوهش‌های دیگر ملزم به تغییر در ساختار تراشه از پیش استفاده شده می‌نماید و امکان تجمیع با تراشه‌های مورد استفاده را بدون باز طراحی از میان می‌برد. به منظور مرتفع نمودن این مشکل و امکان تجمیع بدون باز طراحی، یک ریزمخلوطکن الکترواسموزی مبتنی بر الکترودهای G شکل طراحی شده است. به منظور پیاده‌سازی طرح پیشنهادی، تنها نیاز به ساخت الکترودها توسط فرآیند نقش‌نگاری خواهد بود و نیاز به تغییر در طراحی تراشه ریزسیالی و یا دقت بالای هم تراز (Alignment) تراشه و بستر الکترودها نیست. همچنین شایان ذکر است که تراشه ریزمخلوطکن پیشنهاد شده در این پژوهش قابلیت دستیابی بازدهی درهم‌آمیختگی به مقادیری بالغ بر ۹۹/۷٪ را با سرعت پاسخ ۲۲۰ میلی ثانیه در شرایط مناسب خواهد داشت.

۲- طرح تراشه و اصول عملکرد آن

طرح تراشه ریزمخلوطکن معرفی شده در شکل ۱ (الف) و (ب) ترسیم شده است. در طرح مورد نظر، الکترودهای G شکل طراحی شده‌اند. لازم به ذکر است که پتانسیل‌های اعمالی به الکترودها بصورت موج‌های سینوسی با دامنه و فرکانس یکسان بوده و تنها اختلاف فاز ۱۸۰ درجه‌ای با یکدیگر دارند. الکترودها با پارامترهای L_P, W_P, W_I, L_N, W_N و S به ترتیب برابر با ۲، ۴، ۴، ۸، ۷/۵ و ۲/۵ میکرومتر طراحی شده‌اند. همچنین عرض (W_G) و ارتفاع کانال ریزسیالی نیز برابر با ۱۰ و ۵ میکرومتر در نظر گرفته شده است. به دلیل وجود پژوهش‌های متعدد که از عرض ۱۰ میکرومتر برای ریزمخلوطکن استفاده نموده‌اند، ما نیز از همین ابعاد برای طراحی استفاده نموده‌ایم تا نتایج حاصل قابلیت مقایسه داشته باشند. همچنین طراحی مذکور به راحتی قابلیت پیاده‌سازی توسط روش لایه‌نشانی کندوپاش و نقش‌نگاری نرم را خواهد داشت. الکترودها به این شکل طراحی شده‌اند تا در حد امکان میدان الکتریکی با حداکثر غیریکنواختی ایجاد نمایند. میدان الکتریکی ایجاد شده ناشی از الکترودها دارای بیشینه و کمینه‌های محلی می‌باشد که سبب شکل‌گیری جریان‌های الکترواسموزی مورد نظر خواهد شد. شکل ۱- (ج) توزیع پتانسیل در اطراف الکترودها در داخل کانال را نشان می‌دهد. خطوط نشان داده شده در واقع خطوط هم پتانسیل می‌باشند که فشردگی این خطوط در فاصله‌ی بین دو الکترودها نشان دهنده‌ی قدرت میدان الکتریکی می‌باشد. شکل ۱- (د) نشان دهنده‌ی خطوط جریان سیال در دو فاز $\pi/2$ و $3\pi/2$ می‌باشد که در حوالی الکترودها بصورت جریان‌های گردابی تشکیل شده است.

بارهای سطحی بر روی دیواره‌های کانال می‌شود [24,25]. انباشته شدن این بارها سبب ایجاد یک دولایه الکتریکی می‌شود که خود متشکل از یک لایه‌ی ایستا ناشی از چسبندگی کامل بارها به دیواره، و یک لایه‌ی متحرک می‌باشد. مولفه‌ای از میدان الکتریکی اعمال شده که به موازات این دولایه الکتریکی می‌باشد سبب می‌شود که بارهای موجود در لایه‌ی متحرک در جهت مذکور شروع به حرکت نمایند. حرکت این بارها سبب انتقال تکانه به سیال شده و در نهایت به جابجایی سیال منجر می‌شود که سبب پدید آمدن جریان الکترواسموزی می‌گردد [24,25].

عمده ریزمخلوطکن‌های طراحی شده مبتنی بر پدیده الکترواسموزی برای بهبود درهم‌آمیختگی شیمیایی به ایجاد جریان‌های آشوبی در درون تراشه اتکا می‌نمایند. به عنوان نمونه، در پژوهش [26]، چهار الکترودها در چهار نقطه‌ی روبروی هم در یک دایره در میانه‌ی کانال قرار گرفته و سبب ایجاد یک جریان دایروی در درون تراشه می‌گردد. جریان ایجاد شده سبب برهم ریختن جریان آرام موجود شده و درهم‌آمیختگی را به شدت افزایش می‌دهد. در پژوهشی دیگر، طرح مذکور با قرار دادن موانعی تیغه‌ای شکل در مسیر اولیه کانال بهبود یافته است، تا با برهم ریختن بیشتر جریان آرام، اغتشاشات سیال را افزایش دهد و نرخ درهم‌آمیختگی را تا میزان ۹۹/۶۷٪ در سرعت‌های ورودی پایین بهبود بخشد [27]. از معایب دو طرح یاد شده، لزوم استفاده از فناوری‌هایی همچون زدایش یون و واکنشی عمیق در ساخت این طرح‌ها می‌باشد که کاربرد آن‌ها را در عمل محدود می‌نماید [26]. در طرحی دیگر که توسط ژیانگ و همکاران پیشنهاد شده است، طرح دایروی جای خود را به یک کانال مرکزی لوزی شکل داده است و تحلیل‌های ارائه شده بیانگر بهبود نرخ درهم‌آمیختگی می‌باشد [28]. در گروهی دیگر از پژوهش‌ها، با استفاده از طرح‌های متداول فراکتال در طراحی کانال‌های تراشه‌های ریزسیالی به همراه پدیده الکترواسموزی، کیفیت و سرعت درهم‌آمیختگی بهبود داده شده است [29-31]. در یک نمونه از این پژوهش‌ها، با الهام از طرح فراکتال کخ، ریزمخلوطکنی طراحی شد که قابلیت فراهم آوردن نرخ ۹۸ درصدی در بازدهی درهم‌آمیختگی را داراست [31]. با وجود دستیابی به درهم‌آمیختگی بسیار خوب در این پژوهش، تعداد زیاد الکترودهای مورد نیاز و همچنین ولتاژ اعمالی بالا می‌تواند سبب مشکلات احتمالی ناشی از گرمایش اهمی در پیاده‌سازی عملی گردد. علی‌رغم بهبودهای حاصل شده در میزان سرعت و بازدهی درهم‌آمیختگی در منابع یاد شده، اغلب پژوهش‌های انجام شده در حوزه‌ی ریزمخلوطکن‌های الکترواسموزی بدون در نظر گرفتن ملاحظات عملی طراحی و شبیه‌سازی گشته‌اند. به عنوان نمونه، در پژوهش‌های [27,31]، الکترودها بصورت مماس در دیواره‌های کانال قرار داده شده‌اند که پیاده‌سازی آن‌ها در عمل به شکل متداول نیازمند زدایش یونی عمیق، یا توسط نقش‌نگاری نرم مستلزم دقت بسیار بالا در هنگام ساخت تراشه می‌باشد که نیازمند

جدول ۱) پارامترهای مورد استفاده در شبیه سازی

متغیر	مقدار	واحد
چگالی ρ	۱۰۰۰	Kg/m ³
گرانروی پویا μ	۰/۰۰۱	Pa.s
ضریب گذردهی نسبی ϵ_r	۸۰/۲	
پتانسیل زتا ζ_0	-۱۰۰	mV
ضریب انتشار D	۱۰-۱۱	m ² /s

که در آن، ϵ_0 ثابت گذردهی خلا، ϵ_r گذردهی نسبی سیال، ζ_0 پتانسیل زتای دیواره‌های کانال تراشه ریزسیالی، V پتانسیل الکتریکی اعمال شده به الکترودها می‌باشد. پتانسیل اعمال شده به الکترودها به ایجاد یک میدان الکتریکی منجر می‌شود که توزیع پتانسیل آن از رابطه زیر پیروی می‌نماید:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (۴)$$

پتانسیل الکتریکی اعمال شده به الکترودها به صورت متناوب سینوسی می‌باشد و سایر مرزها به صورت عایق الکتریکی در نظر گرفته شده‌اند، که بر اساس معادلات زیر توصیف می‌شوند:

$$V = V_0 \sin(2\pi f t) \quad (۵)$$

$$n \cdot \nabla V = 0 \quad (۶)$$

که V_0 دامنه‌ی ولتاژ سینوسی اعمالی و f فرکانس تناوب موج را نشان می‌دهد.

به منظور بررسی درهم‌آمیختگی در تراشه ریزسیالی، تراکم گونه‌های موجود توسط معادله‌ی انتقال-انتشار به صورت ذیل توصیف می‌گردد:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \nabla^2 c - u \cdot \nabla c \quad (۷)$$

که c تراکم و D ضریب انتشار می‌باشد. مقادیر متناسب به مقادیر ثابت استفاده شده در درون کانال ریزسیالی که در معادلات بالا اشاره شده است به صورت کامل در جدول ۱ ذکر شده است.

برای سنجش میزان درهم‌آمیختگی و کیفیت آن در تراشه ریزسیالی از بازدهی درهم‌آمیختگی محلول استفاده می‌شود که توسط معادلات زیر توصیف می‌گردند [34]:

$$\eta = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_{max}} \quad (۸)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} (C_i - C_{opt})^2} \quad (۹)$$

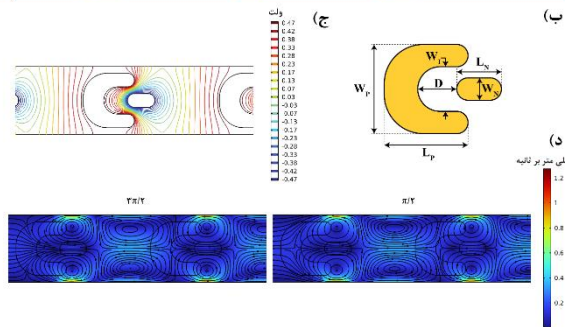
$$\sigma_{max} = \sqrt{C_{opt}(1 - C_{opt})} \quad (۱۰)$$

که η بازدهی درهم‌آمیختگی، σ و σ_{max} به ترتیب انحراف معیار استاندارد و بیشینه انحراف معیار استاندارد تراکم می‌باشد. شایان ذکر است که C_{opt} غلظت نهایی محلول است که به صورت کامل مخلوط شده باشد و برابر با ۰/۵ در یک مقیاس نرمال سازی شده بین ۰ و ۱ می‌باشد. در واقع، بازدهی درهم‌آمیختگی در یک بازه‌ی ۰ و ۱ قرار می‌گیرد که ۰ به منزله‌ی عدم درهم‌آمیختگی و ۱ به منزله‌ی درهم‌آمیختگی کامل می‌باشد.

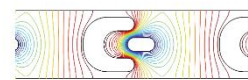
(الف)



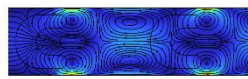
(ب)



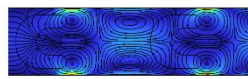
(ج)



(د)



(ه)



شکل ۱) (الف) طرح تراشه ریزمخلوط کن پیشنهادی **(ب)** ابعاد الکترود طراحی شده **(ج)** توزیع پتانسیل الکتریکی در داخل تراشه **(د)** جریان‌های گردابی ایجاد شده در داخل تراشه ناشی از پدیده الکترواسموزی در دو فاز $\pi/2$ و $3\pi/2$. با معکوس شدن پتانسیل بین دو الکترود مخالف در این دو فاز، جهت چرخش جریان‌های گردابی نیز معکوس می‌گردد.

لازم به ذکر است که در دو فاز مذکور، به دلیل جابجایی جهت پتانسیل بین دو الکترود، جهت جریان‌های ایجاد شده نیز تغییر جهت می‌دهد. جهت میدان الکتریکی ناشی از الکترودهای تعبیه شده در کانال ریزسیالی سبب ایجاد جریان الکترواسموزی می‌شود که به دلیل تغییرات غیریکنواخت میدان در راستای کانال سبب ایجاد این جریان‌های گردابی و آشوبی می‌گردد. ایجاد این جریان به افزایش اغتشاشات جریانی و در نتیجه به درهم‌آمیختگی گونه‌های شیمیایی موجود در جریان سیال کمک می‌نماید و توانایی بهبود درهم‌آمیختگی را به دنبال خواهد داشت.

۳- روش‌های محاسباتی

۳-۱- معادلات حاکم

معادلات ناویر-استوکس (Navier-Stokes) و پیوستگی (معادلات ۱ و ۲) برای کانال ریزسیالی طراحی شده، حل شدند و مقادیر سرعت و فشار در سراسر کانال بدست آمدند. معادلات مذکور به شرح زیر می‌باشند:

$$\rho(u \cdot \nabla u) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu(\nabla u + (\nabla u)^T)) \quad (۱)$$

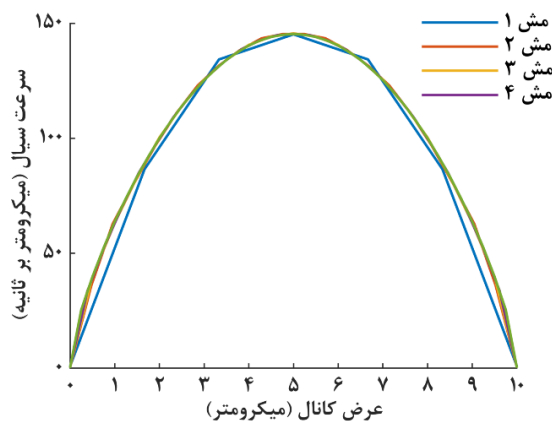
$$\nabla \cdot u = 0 \quad (۲)$$

که u بیانگر بردار سرعت، p فشار، μ گرانروی پویا و ρ چگالی سیال می‌باشند.

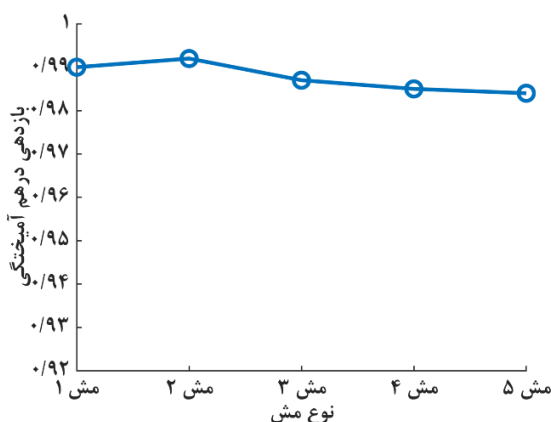
برای تحلیل اثرات الکترواسموزی، شرط مرزی سرعت لغزش (Slip velocity) بر روی دیواره‌های کانال اعمال شده است. شرط مرزی سرعت لغزش تحت عنوان معادله هلمهولتز-اسمولوخوفسکی (Helmholtz-Smoluchowski) (معادله ۳) بصورت زیر فرمول بندی می‌شود [32,33]:

$$u = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r \zeta_0}{\mu} \nabla V \quad (۳)$$

(الف)



(ب)



شکل ۲ (الف) توزیع سرعت در عرض کانال در سمت خروجی برای مش-های متفاوت (ب) میزان بازدهی درهم آمیختگی در تراشه برای مش-های متفاوت.

۳-۳ اعتبار سنجی

در این بخش، به منظور ارزیابی صحت روند مطالعه عددی، از روش عددی استفاده شده در این پژوهش برای تحلیل رفتار ریزمخلوط-کن الکترواسموزی مشابه در پژوهشی دیگر که توسط یوسفیان و بیاره ارائه شده است (شکل ۳)، بهره گرفته شد [35]. نتایج حاصل از این تحلیل با نتایج عددی و تجربی ارائه شده در پژوهش نام برده مقایسه شد و دقت و قابلیت اعتماد روش حاضر از این طریق صحت سنجی گردید. در پژوهش مورد اشاره، از دو الکتروود نیم دایره‌ای با فاصله‌ی ۳۰۰ میکرومتر که با ولتاژ ۱۵ ولت و فرکانس ۰/۵ هرتز تحریک شده‌اند، استفاده شده است. همچنین، سرعت سیال ورودی ۰/۲۳ میلی متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. شکل ۳- (الف) و (ب) به ترتیب خطوط جریان سیال و غلظت نرمال سازی شده در تراشه را نشان می‌دهند که به لحاظ بصری با نتایج ارائه شده در آن پژوهش مطابقت دارد. شکل ۳- (ج) نیز بهره درهم آمیختگی در فواصل مختلف در انتهای تراشه را پس از گذشت ۲ ثانیه نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، نتایج حاصل

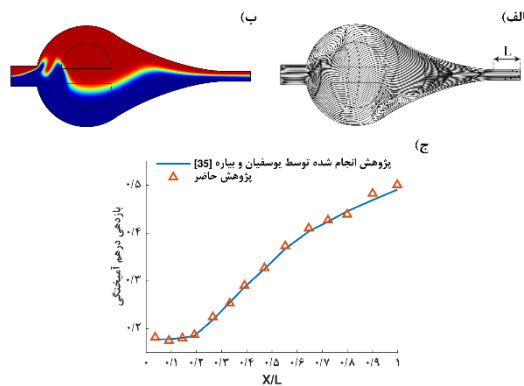
۳-۲ مدل سازی المان محدود

نرم افزار کامسول (نسخه ۶/۱) به منظور شبیه سازی ریزمخلوط کن طراحی شده استفاده شده است. به منظور کاهش بار محاسباتی از منظر زمان و حافظه مصرفی، تحلیل مدل به دو قسمت ایستا و وابسته به زمان تقسیم شده است. ابتدا، شرایط اولیه سیال و پتانسیل الکتریکی معادلات وابسته به زمان توسط تحلیل ایستا حل شده اند و سپس، حرکت سیال در زمان با ضرب کردن ضریب ثابت $2\pi ft$ در شرایط اولیه بدست می‌آید. برای شرایط مرزی، جریان کاملاً توسعه یافته با میانگین سرعت u_0 به ورودی اعمال شده است. همچنین فشار در سمت خروجی مقدار صفر در نظر گرفته شده است. توزیع غلظت در ورودی با یک تابع پله مدل شده است که منجر به ایجاد دو ناحیه موازی با غلظت ۰ و ۱ می‌شود. همچنین شرایط مرزی بدون جریان (No flux) برای گونه‌های شیمیایی به تمامی مرزها منتسب شده است.

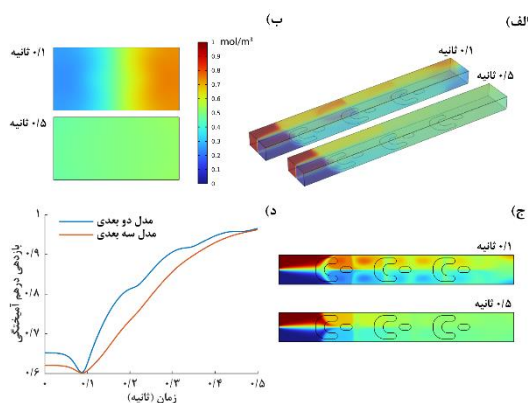
به منظور بررسی صحت شبیه سازی انجام شده، آزمون استقلال از مش انجام شده است. ریزمخلوط کن پیشنهادی به منظور بررسی الگوی سرعت سیال و همچنین بازدهی درهم آمیختگی با ۵ مش-بندی متفاوت با تعداد المان‌های ۴۶۷۸، ۶۵۶۰، ۹۳۰۴، ۱۲۸۶۶ و ۱۵۵۰۸ شبیه سازی شده‌اند. شکل ۲- (الف) اندازه‌ی سرعت در عرض کانال را در سمت خروجی تراشه نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با استفاده از مش شماره‌ی ۱، اندازه‌ی سرعت بدست آمده متفاوت با نتایج حاصل از مش‌های با المان‌های بیشتر می‌باشد، ولیکن سایر نتایج تفاوت معنی داری با هم ندارند. به منظور تحلیل بهتر و انتخاب مش مناسب‌تر، مقادیر بازدهی درهم آمیختگی نیز برای مش‌های مذکور ترسیم شده است که مقدار آن برای مش‌های شماره‌ی ۱ و ۲ اندکی تغییر می‌کند ولی در نهایت به یک مقدار تقریباً ثابت برای مش‌های ۳ به بعد میل می‌نماید. بدلیل عدم تفاوت چشمگیر برای مقادیر سرعت و بازدهی درهم آمیختگی برای مش‌های ۳، ۴ و ۵، مش ۳ به عنوان مش مناسب برای شبیه سازی تراشه پیشنهادی در این پژوهش استفاده شده است. مقادیر مرتبط به مش انتخابی اعم از اندازه‌ی المان‌ها، کمینه‌ی اندازه‌ی المان‌ها، حداکثر رشد المان‌ها، نسبت خمیدگی، کمینه و میانگین کیفیت المان‌ها در جدول شماره ۲ ذکر شده است.

جدول ۲) پارامترهای مورد نظر در مش بندی استفاده شده

پارامترهای مش مورد استفاده	ناحیه کلی	مرزهای الکترودها
بیشینه اندازه المان‌ها	۱ میکرومتر	۰/۴ میکرومتر
کمینه اندازه المان‌ها	۰/۰۰۶ میکرومتر	۰/۰۰۶ میکرومتر
بیشینه رشد المان‌ها	۱/۲	۱/۱
نسبت خمیدگی	۰/۲۵	۰/۲۵
معیار کیفیت مش		
کمینه کیفیت المان‌ها	۰/۵۳۷	
میانگین کیفیت المان‌ها	۰/۸۶۳	



شکل ۲) مقایسه نتایج مقاله یوسفیان و بیاره [35] با نتایج روش عددی استفاده شده در این پژوهش. **(الف)** خطوط جریان سیال در سرعت ورودی ۰/۲۳ میلی متر بر ثانیه، ولتاژ ۱۵ ولت و فرکانس ۰/۵ هرتز، **(ب)** نشانگر غلظت در ریزمخلوطکن بررسی شده، **(ج)** مقایسه بین شاخص بازدهی درهم آمیختگی بین دو پژوهش پس از گذشت ۲ ثانیه بر حسب مکان در انتهای تراشه.



شکل ۳) مقایسه رفتار ریزمخلوطکن پیشنهادی بین مدل سازی دوبعدی و سه بعدی توسط روش امان محدود. نشانگر غلظت **(الف)** در سراسر تراشه مدل سه بعدی، **(ب)** در سطح مقطع خروجی مدل سه بعدی، **(ج)** در مدل دوبعدی در دو زمان ۰/۱ و ۰/۵ ثانیه نشان داده شده است. **(د)** شاخص درهم آمیختگی برای دو مدل سازی دوبعدی و سه بعدی بر حسب زمان.

موج اعمالی به الکترودها ثابت و به ترتیب برابر با ۰/۵ ولت و ۸ هرتز می باشد. بر اساس نتایج نشان داده شده، ریزمخلوطکن پیشنهادی توانایی درهم آمیختگی کامل را در سرعت های ۰/۰۵ و ۰/۱ میلی متر بر ثانیه دارا می باشد و بازدهی درهم آمیختگی برای این دو سرعت به ترتیب به مقادیر ۹۹/۵٪ و ۹۸/۶٪ می رسد. همچنین شایان ذکر است که تراشه طراحی شده پاسخ تقریباً سریعی داشته و پاسخ زمانی سیستم به ورودی پله که در این شرایط اعمال شده برابر با ۲۴۰ و ۳۵۰ میلی ثانیه برای سرعت های ورودی ۰/۰۵ و ۰/۱ میلی متر بر ثانیه می باشد. با افزایش سرعت، نیروهای لختی سیال بر نیروهای الکترواستاتیکی غلبه نموده و سبب کوچک شدن گرداب های ایجاد شده مطابق شکل ۵-ب) می گردد. در این شرایط بازدهی درهم آمیختگی به شکل محسوسی کاهش یافته و به صورت تناوبی دچار تغییر می شود فرکانس تغییرات آن با فرکانس منبع ولتاژ به کار گرفته شده برابری می کند.

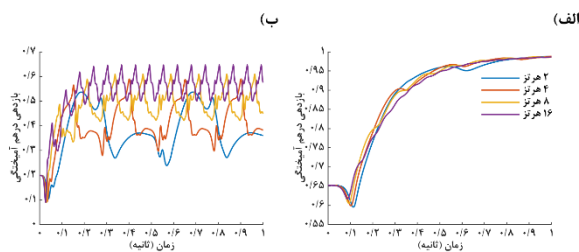
با نتایج ارائه شده در مقاله همخوانی خوبی دارند و صحت و قابل اعتماد بودن نتایج ارائه شده در بخش بعدی را تایید می کنند. در این پژوهش، به منظور صرفه جویی در منابع محاسباتی از مدل دوبعدی تراشه برای بررسی عملکرد ریزمخلوطکن استفاده شده است. برای تایید دقت مدل سازی عددی دو بعدی، مطالعه ای بر روی مدل سه بعدی تراشه پیشنهادی انجام و نتایج آن در شکل ۴ ارائه شده است. در شبیه سازی هردو طرح دوبعدی و سه بعدی، از سرعت سیال ورودی ۰/۱ میلی متر بر ثانیه، ولتاژ ۰/۵ ولت و فرکانس ۸ هرتز استفاده شده است. شکل ۴-الف) و ب) به ترتیب غلظت در مدل سه بعدی و سطح مقطع خروجی مدل سه بعدی در دو زمان ۰/۱ و ۰/۵ ثانیه را نشان می دهد. شکل ۴-ج) نیز غلظت در مدل دوبعدی در دو زمان مذکور را نشان می دهد. همانطور که مشخص است، در هر دو مدل دوبعدی و سه بعدی، پس از سپری شدن ۰/۵ ثانیه، درهم آمیختگی به صورت کامل صورت می پذیرد. همچنین مشخصه غلظت در راستای z از روند مشابهی پیروی می کند و درهم آمیختگی کامل پس از گذشت ۰/۵ ثانیه حاصل می شود. برای بررسی کمی و دقیق تر دو مدل، بازدهی درهم آمیختگی در شکل ۴-د) ترسیم شده است. علیرغم تفاوت رفتار زمانی این مشخصه، بازدهی درهم آمیختگی در هر دو مدل در نهایت به یک مقدار مشخص همگرا شده و درهم آمیختگی کامل را نشان می دهد. همچنین لازم به ذکر است که بیشینه تفاوت بین دو مدل، کمتر از ۰/۰۹ می باشد که با توجه به زمان محاسبه دو مدل (۲ ساعت و ۱۶ دقیقه برای طرح سه بعدی در مقابل ۸ دقیقه برای طرح دو بعدی با استفاده از پردازنده Intel® Core™ i5-12500H)، خطای قابل قبولی محسوب می شود.

۴- نتایج

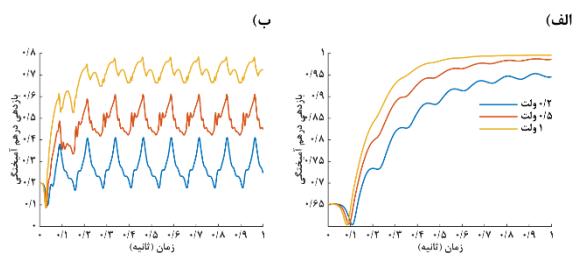
در این بخش به بررسی رفتار ریزمخلوطکن با استفاده از شبیه سازی عددی می پردازیم و تاثیر متغیرهای مختلف همچون سرعت سیال ورودی، فرکانس موج اعمالی، دامنه ولتاژ اعمالی، تعداد الکترودها و فاصله ی بین دو الکترود متناظر مخالف بررسی می گردد. در این بررسی، رفتار یک به یک متغیرهای مذکور بر روی عملکرد ریزمخلوطکن مورد بحث در این مطالعه تحلیل می شود و عملکرد ریزمخلوطکن از منظر بازدهی درهم آمیختگی و سرعت پاسخ برآورد می گردد. در نهایت، با انتخاب مقادیر مناسب متغیرهای مورد نظر، رفتار ریزمخلوطکن مناسب بررسی و تحلیل می شود و نتایج حاصل با سایر مطالعات مقایسه می گردد.

۴-۱- تاثیر سرعت سیال ورودی بر بازدهی درهم آمیختگی

به منظور بررسی تاثیر سرعت سیال ورودی بر عملکرد ریزمخلوطکن پیشنهادی، بازدهی درهم آمیختگی برای سرعت های متفاوت شبیه سازی شده و نتیجه در شکل ۵-الف) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در این بررسی، مقدار دامنه ولتاژ و فرکانس



شکل ۶) میزان بازدهی درهم آمیختگی برای فرکانسهای متفاوت موج اعمالی در دو سرعت ورودی (الف) ۰/۱ و (ب) ۰/۵ میلی متر بر ثانیه.

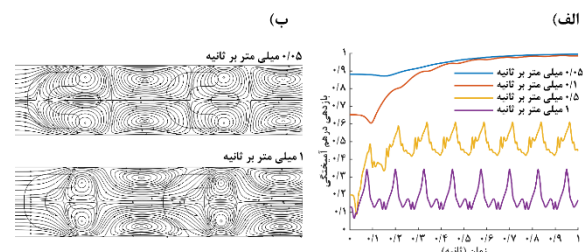


شکل ۷) میزان بازدهی درهم آمیختگی برای ولتاژهای متفاوت اعمالی در دو سرعت (الف) ۰/۱ و (ب) ۰/۵ میلی متر بر ثانیه.

دامنه‌ی ولتاژ بر بازدهی درهم آمیختگی روند مشابهی را دنبال می‌نماید، با این تفاوت که در این شرایط تاثیر دامنه‌ی ولتاژ بر بازدهی درهم آمیختگی مشهودتر می‌باشد. همچنین دامنه‌ی نوسانات با افزایش ولتاژ بصورت چشم‌گیری کاهش می‌یابد که این مهم را می‌توان به افزایش سرعت جریان‌های گردابی ایجاد شده در نواحی نزدیک الکترودها نسبت داد. مقادیر میانگین بازدهی درهم آمیختگی برای ولتاژهای ۰/۲، ۰/۵ و ۱ ولت به ترتیب برابر با ۰/۲۹، ۰/۵ و ۰/۷۲ می‌باشد. محدود نمودن بررسی ریزمخلوط‌کن به ۱ ولت به منظور جلوگیری از اثرات نامطلوب ناشی از گرمایش اهمی در ولتاژهای بالاتر انجام شده است. افزایش دما می‌تواند ویژگی‌های سیال از جمله چگالی و گرانش را تغییر دهد و نتایج حاصل را دچار خطا نماید.

۴-۴-۴ تاثیر تعداد الکترودها بر بازدهی درهم آمیختگی

بدون شک قابل پیش‌بینی است که تعداد الکترودها رابطه‌ی مستقیمی با میزان درهم آمیختگی در تراشه طراحی شده و بازدهی آن خواهد داشت. به منظور بررسی دقیق‌تر این موضوع، بازدهی درهم آمیختگی برای دو، سه و چهار الکترودها در شکل ۸-الف و (ب) برای دو سرعت ۰/۱ و ۰/۵ میلی متر بر ثانیه نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، در سرعت ۰/۱ میلی متر بر ثانیه، دو الکترودها توانایی درهم آمیختگی بصورت کامل را نداشته و میانگین بازدهی به مقدار ۰/۹۶ میل می‌نماید. با افزایش تعداد الکترودها، بازدهی درهم آمیختگی بیشتر شده، اما تفاوت چشم‌گیری از منظر پاسخ حالت دائمی بازدهی بین دو مدل دارای سه و چهار الکترودها دیده نمی‌شود و بازدهی درهم آمیختگی آن‌ها



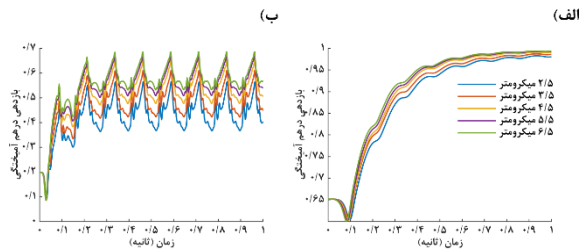
شکل ۸) میزان بازدهی درهم آمیختگی در تراشه برای سرعت‌های متفاوت سیال ورودی. (ب) فشردگی و کوچک شدن خطوط جریان گرداب‌های ایجاد شده در سرعت ۱ میلی متر بر ثانیه در مقایسه با سرعت ۰/۵ میلی متر بر ثانیه گواه غلبه‌ی نیروی لختی سیال بر نیروی الکترواسموزی می‌باشد.

۴-۴-۲ تاثیر فرکانس موج اعمالی بر بازدهی درهم آمیختگی

برای بررسی تاثیر فرکانس موج اعمالی به الکترودها بر درهم آمیختگی گونه‌های ورودی، بازدهی درهم آمیختگی برای فرکانس‌های ۰/۲، ۰/۴، ۰/۸ و ۱۶ هرتز برای دو سرعت ورودی سیال ۰/۱ و ۰/۵ میلی متر بر ثانیه در شکل ۶-الف و (ب) ترسیم شده است. این توالی فرکانسی برای پوشش دادن طیف گسترده‌ای از فرکانس‌ها در مقیاس لگاریتمی انتخاب شده است تا تحلیل به نسبت کاملی از رفتار ریزمخلوط‌کن در فرکانس‌های پایین و بالا ارائه دهد. در شکل ۶-الف، فارغ از فرکانس موج اعمالی، درهم آمیختگی به صورت کامل صورت می‌پذیرد و بازدهی آن به سمت ۱ میل می‌نماید. لازم به ذکر است که به دلیل تناوب طولانی‌تر جریان‌های گردابی ایجاد شده ناشی از فرکانس‌های پایین‌تر همانند ۲ هرتز، پاسخ حالت گذرای آن‌ها دارای فراز و فرودهایی با دامنه‌ی بزرگ‌تر بوده که منتج به سیستمی با پاسخی لخت‌تر و پاسخ حالت دائمی کندتری می‌شود. با افزایش سرعت سیال ورودی، بازدهی درهم آمیختگی به صورت محسوسی با افزایش فرکانس، افزایش می‌یابد، ولیکن درهم آمیختگی کامل صورت نمی‌گیرد. افزایش فرکانس منجر به کاهش تناوب تغییر جریان‌های گردابی ایجاد شده می‌شود و سبب ایجاد درهم آمیختگی سریع‌تری می‌گردد. همان‌طور که از شکل ۶-ب دیده می‌شود، دامنه‌ی نوسان بازدهی درهم آمیختگی، با افزایش فرکانس رابطه‌ی معکوس دارد و به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

۴-۴-۳ تاثیر دامنه ولتاژ موج اعمالی بر بازدهی درهم آمیختگی

رابطه‌ی دامنه‌ی ولتاژ با بازدهی درهم آمیختگی در شکل ۷-الف و (ب) برای دو سرعت سیال ۰/۱ و ۰/۵ میلی متر بر ثانیه نشان داده شده است. در جریان ۰/۱ میلی متر بر ثانیه، افزایش ولتاژ منجر به بهبود بازدهی درهم آمیختگی می‌گردد. در ولتاژهای اعمالی پایین‌تر، دامنه‌ی نوسانات محسوس‌تر بوده و بازدهی درهم آمیختگی رفتاری نوسانی از خود نشان می‌دهد. بازدهی درهم آمیختگی برای ولتاژهای ۰/۲، ۰/۵ و ۱ ولت به ترتیب برابر ۰/۲۹، ۰/۹۸۶ و ۰/۹۹۶ می‌باشد. با افزایش سرعت ورودی سیال، تاثیر

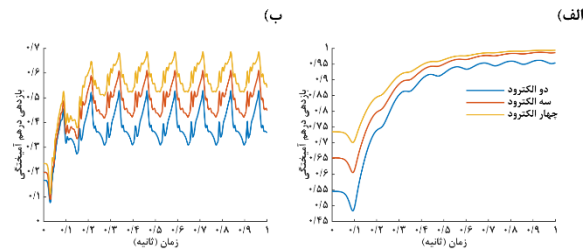


شکل ۹) بازدهی درهم آمیختگی برای فواصل متفاوت بین دو قطب مخالف در دو سرعت (الف) ۱/ و (ب) ۵/ میلی متر بر ثانیه.

۴-۶- بررسی رفتار ریزمخلوط کن بهبود یافته

براساس نتایج بخش‌های پیشین، ریزمخلوط کن طراحی شده با استفاده از مقادیر ذکر شده در جدول ۳ بهبود یافته است. شکل ۱۰- (الف) و (ب) غلظت نرمال سازی شده را در تراشه موردنظر در سه زمان متفاوت، به ترتیب برای دو سرعت سیال ورودی ۱/ و ۵/ میلی متر بر ثانیه نشان می‌دهد. الگوی غلظت ترسیم شده نشانگر سرعت خوب و بازدهی بالای ریزمخلوط کن در دو سرعت ذکر شده می‌باشند. شکل ۱۰- (ج) بازدهی درهم آمیختگی تراشه را در دو سرعت ۱/ و ۵/ میلی متر بر ثانیه نشان می‌دهد. بازدهی درهم آمیختگی در سرعت ۱/ میلی متر بر ثانیه در مقایسه با نتایج قبلی، با سرعت پاسخ به مراتب بالاتری اتفاق می‌افتد و در کمتر از ۲۲۰ میلی ثانیه به ۹۰٪ پاسخ نهایی خود می‌رسد. برای شرایط دوم با سرعت ۵/ میلی متر بر ثانیه، کماکان مخلوط بصورت کامل نمی‌تواند شکل بگیرد؛ با این حال، مقدار میانگین بازدهی درهم آمیختگی به میزان تقریباً ۸۶۸/۰ میل می‌کند. گفتنی است که دامنه‌ی نوسانات نیز در مقایسه با حالات قبل بسیار کاهش پیدا می‌کند و بیشینه مقدار نوسانات بازدهی درهم آمیختگی به حدود ۴۳/۰ میل می‌نماید. نتایج مذکور پیشرفت قابل توجهی در رفتار ریزمخلوط کن بهبود یافته در مقایسه با حالات پیشین نشان می‌دهد.

جدول ۴، ریزمخلوط کن بررسی شده در این پژوهش را با ریزمخلوط کن‌های الکترواسموزی پیشنهادی در سایر مقالات مقایسه می‌کند. لازم به ذکر است که مبنای مقایسه، بالاترین میزان بازدهی درهم آمیختگی‌ای می‌باشد که در شرایط مطلوب هر ریزمخلوط کن به دست آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود، ریزمخلوط کن پیشنهادی در این پژوهش از منظر بازدهی درهم آمیختگی، با مقدار ۹۹۷/۰ داری بهترین عملکرد در کنار برخی دیگر از پژوهش‌ها قرار می‌گیرد. نکته‌ی متمایز کننده پژوهش حاضر، سرعت درهم آمیختگی می‌باشد که با مقدار ۲۲۰ میلی ثانیه، دارای بهترین پاسخ در میان ریزمخلوط کن‌های بررسی شده است. همچنین طراحی ساده و قابلیت ساخت آن با نقش نگاری نرم، در مقایسه با سایر فناوری‌های مورد نیاز، از جمله زدایش عمیق، برتری ویژه‌ای به ریزمخلوط کن حاضر می‌بخشد.



شکل ۸) بازدهی درهم آمیختگی برای تعداد متفاوت الکترودها در دو سرعت (الف) ۱/ و (ب) ۵/ میلی متر بر ثانیه.

به ترتیب برابر با ۹۸۶/۰ و ۹۹۳/۰ می‌گردد. با این حال، افزایش تعداد الکترودها سبب افزایش سرعت پاسخ سیستم شده و سریع تر به پایداری می‌رسد که قابل انتظار می‌باشد. با افزایش سرعت سیال ورودی، تاثیر تعداد الکترودها از شرایط قبلی بیشتر شده و میانگین بازدهی درهم آمیختگی با افزایش تعداد الکترودها افزایش می‌یابد. مقادیر میانگین بازدهی درهم آمیختگی برای ریزمخلوط کن‌های دارای دو، سه و چهار الکترودها به ترتیب برابر با ۳۹۸/۰، ۵۹۴/۰ و ۵۹۴/۰ می‌شود. همچنین، دامنه‌ی نوسانات بازدهی نیز همچون موارد پیشین، با افزایش تعداد الکترودها، کاهش می‌یابد. با مقایسه این نتیجه با نتیجه‌ی حاصل از سرعت ۱/ میلی متر بر ثانیه با ۲ عدد الکترودها می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد الکترودها به یک تعداد مطلوب، فارغ از سرعت سیال ورودی، می‌توان به مخلوط کامل دست یافت.

۴-۵- تاثیر فاصله‌ی بین قطب‌های مخالف الکترودها بر بازدهی درهم آمیختگی

به منظور بهبود الکترودها و بیشینه کردن تاثیر آن‌ها در فرایند درهم آمیختگی، رابطه‌ی بین فاصله‌ی قطب‌های مخالف (S) در شکل ۱۰- (ب) و بازدهی درهم آمیختگی در شکل ۹- (الف) و (ب) برای دو سرعت سیال ورودی ۱/ و ۵/ میلی متر بر ثانیه ترسیم شده است. در شکل ۹- (الف) به وضوح دیده می‌شود که افزایش فاصله‌ی بین الکترودهای مذکور سبب افزایش بازدهی درهم آمیختگی شده و همچنین سبب بهبود سرعت پاسخ سیستم می‌شود و مخلوط در مدت زمان کوتاه‌تری به حالت ایستای خود می‌رسد. هرچند لازم به ذکر است که بازدهی درهم آمیختگی با افزایش فاصله الکترودها به میزان کمتری افزایش می‌یابد و اثر این فاصله کم رنگ تر می‌گردد. بر اساس شکل، فاصله‌ی ۶/۵ میکرومتر، بالاترین سرعت پاسخ را داشته و در مدت زمان ۲۸۰ میلی ثانیه به ۹۰٪ پاسخ ایستای خود می‌رسد. همچنین پاسخ ایستای آن برابر با ۹۹۳/۰ می‌باشد. با افزایش سرعت سیال ورودی به ۵/ میلی متر بر ثانیه، روند مشابهی دیده می‌شود و فاصله‌ی ۶/۵ میکرومتری علی‌رغم بهبود ناچیز نسبت به فاصله‌ی ۵/۵ میکرومتری، بهترین پاسخ را دارا می‌باشد. میانگین بازدهی درهم آمیختگی برای این حالت برابر با ۵۹۱/۰ می‌باشد.

شده و تاثیر متغیرهای مختلف همانند تعداد الکترودها و فاصله بین قطب‌های مخالف و همچنین فرکانس و دامنه ولتاژ موج اعمالی بر بازدهی درهم‌آمیختگی بررسی شده است. در ادامه به نتایج مهم حاصل از این پژوهش اشاره شده است:

- بهترین میزان درهم‌آمیختگی در سرعت‌های ورودی پایین‌تر حاصل می‌شود. با افزایش سرعت سیال ورودی، نیروهای لختی بر نیروهای الکترواسموزی غلبه می‌کنند و گرداب‌های ایجاد شده را کوچک می‌نمایند که منجر به کاهش درهم‌آمیختگی می‌شود.

- با افزایش فرکانس کاری موج اعمال شده به الکترودها، بهره درهم‌آمیختگی افزایش می‌یابد. تغییرات سریع‌تر جریان‌های گردابی درون تراشه موجب تسریع و بهبود درهم‌آمیختگی می‌شوند.

- افزایش ولتاژ و تعداد الکترودها اثر مشابهی بر روند درهم‌آمیختگی داشته و سبب بهبود درهم‌آمیختگی در ریزمخلوط کن می‌شود.

- با انتخاب متغیرهای مناسب حاصل از بررسی عددی، ریزمخلوط کن پیشنهادی بهبود یافته و به بازدهی درهم‌آمیختگی ۹۹٪/۷ و ۸۶٪/۸ به ترتیب برای سرعت سیال ۰/۱ و ۰/۵ میلی بر ثانیه دست یافته است.

- سرعت پاسخ ریزمخلوط کن پیشنهادی در شرایط مناسب، برابر با ۲۲۰ میلی ثانیه ارزیابی شده که در قیاس با سایر مقالات، بهبود قابل توجهی را نشان می‌دهد.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان در تهیه و تنظیم این مقاله رعایت کامل اصول اخلاقی را مد نظر قرار داده‌اند.

تعارض منافع: مطالب این پژوهش هیچ تضاد یا تعارض منافی با فرد یا نهادی ندارد.

منابع مالی: این پژوهش تحت هیچ گونه حمایت مالی نمی‌باشد.

منابع

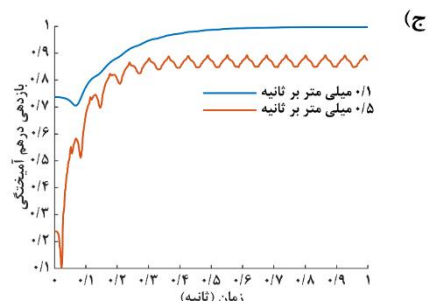
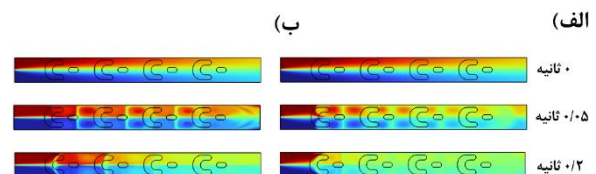
- 1- Ohno K, Tachikawa K, Manz A. Microfluidics: Applications for analytical purposes in chemistry and biochemistry. Electrophoresis. 2008 Nov 26;29(22):4443-53.
- 2- Son K, Brumley DR, Stocker R. Live from under the lens: exploring microbial motility with dynamic imaging and microfluidics. Nat Rev Microbiol. 2015 Dec 16;13(12):761-75.
- 3- Yi C, Li CW, Ji S, Yang M. Microfluidics technology for manipulation and analysis of biological cells. Anal Chim Acta. 2006 Feb;560(1-2):1-23.
- 4- Duncombe TA, Tentori AM, Herr AE. Microfluidics: reframing biological enquiry. Nat Rev Mol Cell Biol. 2015 Sep 21;16(9):554-67.
- 5- Narayanamurthy V, Jeroish ZE, Bhuvaneshwari KS, Bayat P, Premkumar R, Samsuri F, et al. Advances in passively driven microfluidics and lab-on-chip devices: a comprehensive literature review and patent analysis. RSC Adv. 2020;10(20):11652-80.

جدول ۳) مقادیر استفاده شده برای طراحی بهینه شده ریزمخلوط کن پیشنهادی

متغیر	مقدار
فرکانس	۱۶ هرتز
ولتاژ	۱ ولت
تعداد الکترودها	۴ عدد
فاصله بین قطب‌های مخالف	۶/۵ میکرومتر

جدول ۴) مقایسه تراشه پیشنهادی در این پژوهش با تعدادی از ریزمخلوط کن‌های الکترواسموزی

روش	بهره درهم آمیختگی	زمان پاسخ
ریزمخلوط کن الکترواسموزی با بهره‌گیری از موانع تیغی شکل ^[27]	۰/۹۹۷	۴۵۰ میلی ثانیه
ریزمخلوط کن الکترواسموزی مبتنی بر فراکتال کانکتور ^[29]	۰/۹۵۲	۶۵۰ میلی ثانیه
ریزمخلوط کن الکترواسموزی مبتنی بر فراکتال کج ^[31]	۰/۹۸	داده نشده
ریزمخلوط کن الکترواسموزی در کانال انقباضی-انبساطی ^[36]	۰/۹۹۷	داده نشده
پژوهش حاضر	۰/۹۹۷	۲۲۰ میلی ثانیه



شکل ۱۰) غلظت نرمال‌سازی شده در تراشه بهبودیافته برای سرعت‌های متفاوت سیال ورودی (الف) ۰/۱ و (ب) ۰/۵ میلی متر بر ثانیه. (ج) میزان بازدهی درهم‌آمیختگی در تراشه بهبودیافته.

۵- نتیجه‌گیری

ریزمخلوط کن مبتنی بر پدیده‌ی الکترواسموزی با استفاده از الکترودهایی با طراحی G شکل پیشنهاد شده است که توانایی فراهم آوردن درهم‌آمیختگی کامل را در مدت زمان کوتاه دارا می‌باشد. ریزمخلوط کن پیشنهادی با تکیه بر ایجاد یک میدان الکتریکی متغیر با زمان، توانایی ایجاد جریان‌های گردابی در کانال ریزسیالی را داشته که منجر به ایجاد اغتشاش و برهم زدن جریان آرام جاری در کانال می‌گردد. این امر سبب افزایش بازدهی درهم‌آمیختگی و همچنین سرعت دستیابی به درهم‌آمیختگی کامل می‌گردد. ریزمخلوط کن پیشنهادی با شبیه‌سازی عددی تحلیل

- 2002;2(3):151-7.
- 23- Zhao X, Chen H, Xiao Y, Zhang J, Watanabe S, Hao N. Sharp-edge-driven spiral acoustic micromixers for functional nanoarray engineering. *Mater Today Nano*. 2023 Jun;22:100338.
- 24- Ramos A, Morgan H, Green NG, Castellanos A. AC Electric-Field-Induced Fluid Flow in Microelectrodes. *J Colloid Interface Sci*. 1999 Sep;217(2):420-2.
- 25- Green NG, Ramos A, González A, Morgan H, Castellanos A. Fluid flow induced by nonuniform ac electric fields in electrolytes on microelectrodes. I. Experimental measurements. *Phys Rev E*. 2000 Apr 1;61(4):4011-8.
- 26- Zhang YT, Chen H, Mezic I, Meinhart CD, Petzold L, MacDonald NC. SOI processing of a ring electrokinetic chaotic micromixer. In: *Proceedings of the NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show*; 2004. p. 292-5.
- 27- Gayen B, Manna NK, Biswas N. Enhanced mixing quality of ring-type electroosmotic micromixer using baffles. *Chem Eng Process Process Intensif*. 2023;189:107882.
- 28- Xiong S, Chen X, Chen H, Chen Y, Zhang W. Numerical study on an electroosmotic micromixer with rhombic structure. *J Dispers Sci Technol*. 2021;42(9):1331-7.
- 29- Wu Z, Chen X. Numerical simulation of a novel microfluidic electroosmotic micromixer with Cantor fractal structure. *Microsyst Technol*. 2019;25(8):3157-64.
- 30- Xiong S, Chen X, Wang J. A novel three-dimensional electroosmotic micromixer based on the Koch fractal principle. *RSC Adv*. 2021;11(21):12860-5.
- 31- Xiong S, Chen X. Mixing performance of an electroosmotic micromixer with Koch fractal structure. *Int J Chem React Eng*. 2021;19(2):97-103.
- 32- Hunter ST. *Zeta Potential in Colloid Science*. New York: Academic Press; 1981.
- 33- Wu Z, Li D. Mixing and flow regulating by induced-charge electrokinetic flow in a microchannel with a pair of conducting triangle hurdles. *Microfluid Nanofluidics*. 2008;5(1):65-76.
- 34- Shah I, Su Jeon H, Ali M, Yang DH, Choi KH. Optimal parametric mixing analysis of active and passive micromixers using Taguchi method. *Proc Inst Mech Eng E J Process Mech Eng*. 2019;233(6):1292-303.
- 35- Usefian A, Bayareh M. Numerical and experimental study on mixing performance of a novel electroosmotic micro-mixer. *Meccanica*. 2019;54(8):1149-62.
- 36- Gong Y, Cheng X. Numerical investigation of electroosmotic mixing in a contraction-expansion microchannel. *Chem Eng Process Process Intensif*. 2023;192:109492.
- 6- Bhagat AAS, Bow H, Hou HW, Tan SJ, Han J, Lim CT. Microfluidics for cell separation. *Med Biol Eng Comput*. 2010;48(10):999-1014.
- 7- Bouloorchchi Tabalvandani M, Saeidpour Z, Habibi Z, Javadizadeh S, Firoozabadi SA, Badiestostami M. Microfluidics as an emerging paradigm for assisted reproductive technology: A sperm separation perspective. *Biomed Microdevices*. 2024 Jun 23;26(2):23.
- 8- Asci Erkocyigit B, Ozufuklar O, Yardim A, Guler Celik E, Timur S. Biomarker Detection in Early Diagnosis of Cancer: Recent Achievements in Point-of-Care Devices Based on Paper Microfluidics. *Biosensors*. 2023 Mar 15;13(3):387.
- 9- Lin CC, Wang JH, Wu HW, Lee GB. Microfluidic Immunoassays. *J Lab Autom*. 2010 Jun;15(3):253-74.
- 10- Bayareh M, Ashani MN, Usefian A. Active and passive micromixers: A comprehensive review. *Chem Eng Process Process Intensif*. 2020 Jan;147:107771.
- 11- Cai G, Xue L, Zhang H, Lin J. A review on micromixers. *Micromachines*. 2017;8(9):1-25.
- 12- Cheng Y, Jiang Y, Wang W. Numerical simulation for electro-osmotic mixing under three types of periodic potentials in a T-shaped micro-mixer. *Chem Eng Process Process Intensif*. 2018;127:93-102.
- 13- Rudyak V, Minakov A. Modeling and Optimization of Y-Type Micromixers. *Micromachines*. 2014 Oct 20;5(4):886-912.
- 14- Wang J, Chen X, Liu H, Li Y, Lang T, Wang R, et al. Efficient Mixing of Microfluidic Chip with a Three-Dimensional Spiral Structure. *ACS Omega*. 2022;7(1):1527-36.
- 15- Hu X, Yang F, Zhao H, Guo M, Wang Y. Design and Evaluation of Three-Dimensional Zigzag Chaotic Micromixers for Biochemical Applications. *Ind Eng Chem Res*. 2021 Nov 10;60(44):16116-25.
- 16- Juraeva M, Kang DJ. Design and Mixing Analysis of a Passive Micromixer with Circulation Promoters. *Micromachines*. 2024 Jun 27;15(7):831.
- 17- Chen Z, Shen L, Zhao X, Chen H, Xiao Y, Zhang Y, et al. Acoustofluidic micromixers: From rational design to lab-on-a-chip applications. *Appl Mater Today*. 2022 Mar;26:101356.
- 18- Chen X, Zhang L. A review on micromixers actuated with magnetic nanomaterials. *Microchim Acta*. 2017 Oct 24;184(10):3639-49.
- 19- Français O, Jullien MC, Rousseau L, Poulichet P, Desportes S, Lefevre JP, et al. A Thermally-Driven Micromixer Based on Fluid Volume Variation. In: *Proceedings of the 8th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*. ASME; 2006. p. 685-92.
- 20- Lv H, Chen X. New insights into the mechanism of fluid mixing in the micromixer based on alternating current electric heating with film heaters. *Int J Heat Mass Transf*. 2021 Dec;181:121902.
- 21- Rashidi S, Bafekr H, Valipour MS, Esfahani JA. A review on the application, simulation, and experiment of the electrokinetic mixers. *Chem Eng Process Process Intensif*. 2018;126:108-22.
- 22- Liu RH, Yang J, Pindera MZ, Athavale M, Grodzinski P. Bubble-induced acoustic micromixing. *Lab Chip*.