مجله مهندسی مکانیک مدرس، مهر 1394، دوره 15، شماره 7، ص‌ص 297-306

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی اختلاط در ریزمخلوط‌گرهای ترکیبی الکترواسموتیک/ فشار محرک با بارسطحی ناهمگن

جعفرجماعتی[1]، علی‌رضا فراهی‌نیا[2]، حمید نیازمند[3*]

1- دانش‌آموخته دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

2- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

*مشهد، صندوق پستی 91775-1111، niazmand@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 18 فروردین 1394
پذیرش: 29 اردیبهشت 1394
ارائه در سایت: 19 خرداد 1394

کلید واژگان:
ریزمخلوگر
جریان الکترواسموتیک فشار محرک
مدل هلمهولتز– اسمولوکوفسکی
توزیع بار ناهمگن

چکیده

در این مقاله شبیه‌سازی عددی جریان الکترواسموتیک درون ریزجریان‌های ناهمگن با استفاده از مدل تقریبی هلمهولتز- اسمولوکوفسکی ارائه شده است، که در آن اثر نیروی میدان الکتریکی بر سیال با سرعت لغزشی در دیواره ریزمجرا جایگزین می‌شود. با حل معادله غلظت در این جریان‌ها، چگونگی فرآیند اختلاط در ریزمجراهای دارای زتاپتانسیل ناهمگن روی دیواره، به صورت کیفی و کمی بررسی شده است. مطالعه انجام شده نشان می‌دهد که با ترکیب دو جریان الکترواسموتیک و فشار- محرک در یک ریزمجرا و تنظیم مناسب تکه‌های ناهمگنی بار، به سادگی می‌توان یک ریزمخلوط‌گر الکترواسموتیکی با اختلاط قابل تنظیم طراحی کرد. رفتار چنین ریزمخلوط‌گرهایی تحت تأثیر نحوه آرایش زتاپتانسیل و نیز مقدار اختلاف فشار اعمالی است. در این مقاله برای تحلیل جامع اختلاط، علاوه بر معیار رایج راندمان اختلاط، دو معیار جدید راندمان نسبی اختلاط و ظرفیت اختلاطی مورد معرفی قرار گرفته‌اند. با استفاده از این شاخصه‌ها معلوم شد که در اختلاف فشارهای اندک و یا خیلی زیاد وجود تکه‌های ناهمگنی بار روی دیواره‌های ریزمجرا اثر قابل ملاحظه‌ای بر بهبود اختلاط ندارد؛ بنابراین عملکرد ریزمخلوط‌گرهای با جریان ترکیبی الکترواسموتیک و فشار- محرک دارای یک نقطه بهینه است. همچنین مشاهده شد که میزان نامتقارنی توزیع بار در مقایسه با میزان اندازه بار، اثر جدی‌تری بر عملکرد اختلاطی ریزمخلوط‌گر دارد. این امر تضمین می‌کند که اختلاط مناسب حتی با استفاده از سطوح دارای زتاپتانسیل معمولی حاصل شود.

Mixing Investigation in Combined Electroosmotic/Pressure-driven Micromixers with Heterogeneous Wall Charges

Jafar Jamaati, Ali Reza Farahinia, Hamid Niazmand*

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
*P.O.B. 91775-1111, Mashhad, Iran, niazmand@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 07 April 2015
Accepted 19 May 2015
Available Online 09 June 2015

Keywords:
Micromixer
Electroosmotic Pressure-driven Flow
Helmholtz-Smoluchowski Model
Non-homogenous charge pattern

ABSTRACT

In this article numerical simulation of electroosmotic flow in heterogeneous microchannel is performed using approximate model of Helmholtz-Smoluchowski in which the effect of electric field on the fluid flow is applied through a slip boundary condition. Solving the concentration equation, the mixing performance of microchannels with heterogeneous zeta-potential is studied both qualitatively and quantitatively. This study shows that combining the electroosmotic and pressure-driven flows in a single microchannel with proper arrangement of the heterogeneities can easily lead to design of electroosmotic micromixers with adjustable mixing performance. The mixing behavior of such micromixers is dominated by the arrangement of zeta-potential distribution as well as the applied external pressure drop. In this article relative mixing performance and mixing capacity were introduced rather than the well-discussed factor of mixing performance in order to perform a thorough analysis of mixing. Using these factors, it is found that presence of heterogeneities has a slight effect on mixing performance when the pressure drop is extremely small or large. Therefore, performance of micromixers with combined flow of electroosmotic and pressure-driven has an optimum point. Furthermore, it is seen that asymmetric level of the charge pattern is more effective on the mixing performance compared to absolute values of wall charges. This promises proper mixing even when surfaces with moderate zeta-potential are used in micromixer.

1- مقدمه

اختلاط درون ریزمجراها دارای کاربردهای فراوانی در سیستم‌های بیولوژیکی و بیوشیمیایی است. در مقیاس‌های کوچک این پدیده بیشتر توسط پخش مولکولی انجام می‌شودکه ذاتاً فرآیند کندی است [1]. هرچند که در جریان‌های با مقیاس ماکرو با افزایش عدد رینولدز جریان و ایجاد اغتشاش و

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
J. Jamaati, A. R. Farahinia, H. Niazmand, Mixing Investigation in Combined Electroosmotic/Pressure-driven Micromixers with Heterogeneous Wall Charges, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 297-306, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.45.3]

پدیده توربلانس می‌توان میزان اختلاط را به‌گونه قابل ملاحظه‌ای افزایش داد، ولی برای ایجاد جریان‌های مغشوش در ریزمجراها باید هزینه سنگین افت فشار زیاد را پرداخت و اغلب این کار به لحاظ جنبه‌های عملی چندان موجه نیست، به دلیل این مشکلات امکان استفاده از مزایای نسبی جریان مغشوش برای اختلاط درون ریزمجراها وجود ندارد. تحت این شرایط تنها راه حل ممکن برای افزایش اختلاط، متوسل شدن به مکانیزم‌هایی است که طول پخش مولکولی را کاهش می‌دهند. برای انجام این کار و بهبود اختلاط درون ریزسیستم‌ها می‌توان از مکانیزم‌های اختلاط فعال [1] و غیرفعال [2] بهره برد [2].

در روش فعال یک منبع انرژی خارجی علاوه‌بر محرک اصلی جریان برای ایجاد آشفتگی نمونه‌ها به‌کار گرفته می‌شود. انرژی اختلاط در روش فعال می‌تواند توسط روش‌های صوتی یا مافوق صوتی [3]، دی الکتروفورسیس [4]، پالس زمانی الکتروکنتیکی [6,5]، الکتروهیدرودینامیک [8,7]، میدان مغناطیسی [10,9] یا میدان حرارتی [12,11] تأمین شود.

در روش غیرفعال، انرژی اختلاط از طریق جریان سیال تأمین می‌شود و با طراحی خاص مشخصات هندسی و فیزیکی ریزمجرا ناحیه تماس و زمان تماس گونه‌ها افزایش می‌یابد [13-15]. بارزترین شیوه‌ها، ایجاد غیریکنواختی در هندسه ریزمجرا و یا ایجاد دندانه‌های سطحی روی دیواره ریزمجرا ست [16] که با کاهش طول پخش مولکولی سبب افزایش اختلاط می‌شود [18,17]. اغلب مکانیزم‌های غیرفعال مانند ورقه ورقه کردن [19,13]، ریزمجراهای متقاطع، ریزمجراهای زیگزاگ [21,20]، ساختار سه بعدی مارپیچ [22-25]، موانع تعبیه‌شده [26-28] و مجراهای پیچ خورده [29] از طریق عوامل هندسی و تغییر مسیر سیال، سبب افزایش اختلاط می‌شوند.

یکی از بارزترین روش‌ها برای ایجاد جریان و اختلاط درون ریزمجراها توسط جریان الکترواسموتیک [3] انجام می‌شود. اختلاط جریان الکترواسموتیک درون ریزمجرا با دیواره‌های همگن، تحت اثر نفوذ مولکولی صورت می‌گیرد و قدرتمند نیست، ولی به کمک فناوری شیمی سطح [30-33] و ایجاد ناهمگنی‌های سطحی در بارهای الکتریکی سطوح، می‌توان جریان‌های چرخشی قابل توجهی درون یک ریزمجرا تولید کرد که موجب افزایش راندمان اختلاط می‌شود. این فناوری سبب شده است تا ایجاد ناهمگنی‌های مختلف در خواص سطحی ریزمجرا [35,34] و یا حتی کنترل زمانی و مکانی زتاپتانسیل [36] در نواحی ناهمگن صورت پذیرد. با طراحی مناسب این ناهمگنی‌ها در جریان‌های فشار- محرک می‌توان ریزمجراهایی را معرفی کرد که برای مقاصد اختلاط، پمپاژ و یا هر دوی آن‌ها قابل استفاده باشند [27,37-39].

در یک جریان الکترواسموتیک درون کانال با ناهمگنی‌های سطحی، بر اثر اعمال میدان الکتریکی، سیال حاوی یون در مجاورت سطح به حرکت واداشته می‌شود [40,39,30,11]. تحت این شرایط، به دلیل تفاوت پتانسیل الکترواستاتیک بین سطوح همگن و ناهمگن، گردابه‌های در مجاورت دیواره می‌توانند ایجاد شوند. این گردابه‌های موضعی می‌توانند منجربه بهبود قابل توجه در عملکرد اختلاطی شوند. میدان جریان الکترواسموتیک به شدت وابسته به خواص الکتروشیمیایی سطح دیواره ریزمجرا و سیال است و در ریزمجراهایی که خواص دیـواره آن‌ها به ویژه مقدار زتاپتانسیل دیواره ناهمگن باشد، جریان‌های الکترواسموتیک بسیار پیچیده و دارای نواحی چرخشی هستند. در این جریان‌ها می‌توان به‌صورت هم‌زمان از مزایای روش‌های فعال و غیرفعال بهره‌مند شد [39,38,27]. به‌این صورت که طراحی مناسب ناهمگنی‌های سطحی [35,34,8] به‌صورت مکانیزم غیرفعال و استفاده از میدان الکتریکی به‌عنوان مکانیزم فعال سبب ایجاد اختلاط می‌شوند [41,6]. ریزمجراهایی که در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفته‌اند در این شاخه قرار می‌گیرند.

برای تعیین میدان جریان الکترواسموتیک علاوه بر حل معادلات پیوستگی و انتقال مومنتوم، معادلات پتانسیل الکتریکی و انتقال بارهای الکتریکی نیز بایستی حل شوند. حل این معادلات برای هندسه و یا خواص دیواره ناهمگن، نیازمند روش‌های عددی کارآمدی است که حجم محاسباتی آن‌ها قابل توجه است [42,8]، از این رو برخی مدل‌سازی‌های ساده‌تر مانند مدل هلمهولتز- اسمولوکوفسکی نیز برای حل این جریان‌ها ارایه شده است [43,7-45]. اعتبار مدل هلمهولتز- اسمولوکوفسکی برای پیش‌بینی میدان جریان به‌خوبی مورد بررسی قرار گرفته است و به‌علاوه استفاده از آن برای تعیین میدان غلظت و راندمان اختلاط نشان داده است که این مدل در شرایط مناسب می‌تواند دقت بالایی برای راندمان اختلاط داشته باشد، به‌طوری که بیشینه خطای حاصله کمتر از 1 درصد باشد [46,43].

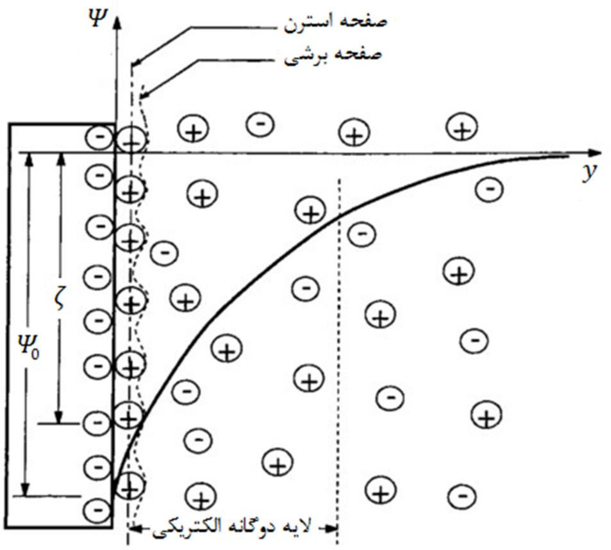
با وجود مطالعات و بررسی‌های انجام شده در زمینه ترکیب جریان‌های الکترواسموتیک و فشار- محرک [47,42,39]، تاکنون اثر اندازه و شدت ناهمگنی‌ها (یعنی اختلاف بین زتاپتانسیل بخش‌های همگن و ناهمگن) بر راندمان اختلاط درون چنین ریزمجراهایی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است؛ برای نمونه در مراجع یادشده تنها به بررسی جریان و اختلاط جریان‌های ترکیبی برای یک کانال خاص با خواص ناهمگنی ثابت بر دیواره پرداخته شده؛ بنابراین در این مقاله با معرفی چند ریزمخلوط‌گر و پارامتر اختلاطی مناسب، اثر اندازه و شدت زتاپتانسیل بخش ناهمگن و اثر گرادیان فشار روی جریان ترکیبی الکترواسموتیک و فشار- محرک و همچنین راندمان اختلاط ناشی از آن بررسی شده است. شایان یاد است که مدل‌سازی میدان جریان‌های ترکیبی الکترواسموتیک و فشار- محرک توسط مدل تقریبی هلمهولتز- اسمولوکوفسکی انجام شده است و سپس با داشتن میدان جریان، پدیده اختلاط در ریزمجرای ناهمگن بررسی شده و عوامل مؤثر بر اختلاط در این ریزمخلوط‌گرهای ترکیبی شناسایی و بررسی شده است.

2- معادلات حاکم

هرگاه یک سطح باردار در مجاورت یک محلول الکترولیت قرار می‌گیرد، توزیع یون‌های نزدیک خود را متأثر خواهد کرد، طوری که یون‌های با بارمخالف سطح، به دیواره جذب می‌شوند و یون‌های با بار موافق از دیواره دفع می‌گردند. به این گونه آرایش بارهای مثبت (یا منفی) در سطح یک دیواره و بارهای مخالف در مجاورت آن، لایه دوگانه الکتریکی [4] گفته می‌شود که در شکل 1 نشان داده شده است. تفاوت اساسی میدان‌های جریان در مقیاس ماکرو با میدان‌های جریان در مقیاس میکرو به دلیل اثر همین لایه است. در مقیاس میکرو به دلیل این‌که پدیده‌های سطحی دارای اثرات قابل توجه هستند، حضور آن‌ها سبب ظهور میدان جریانی می‌شود که کاملاً متفاوت با میدان جریان در مقیاس ماکرو است. یکی از پارامترهای اساسی مربوط به لایه دوگانه، پتانسیل الکتریکی در سطح مشترک جامد- مایع است که در شکل 1 با Ψ_0 نشان داده شده است. اندازه‌گیری Ψ_0 به سادگی ممکن نیست و معمولاً به‌جای این پارامتر مقدار پتانسیل در فصل مشترک لایه استرن و

1- Active
2- Passive
3- Electroosmotic
4- Electric Double Layer (EDL)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.45.3]



شکل 1 توزیع پتانسیل الکتریکی بر اثر آرایش بارهای الکتریکی در مجاورت فصل مشترک مایع و جامد [39]

لایه پخشی اندازه‌گیری می‌شود که زتاپتانسیل[1]، ζ، نامیده می‌شود. زتاپتانسیل خاصیتی است که به خواص سطحی جامد و سیال الکترولیت وابسته است.

هنگامی که سیال الکترولیت، مجاور با سطح جامد است و نسبت به آن دارای حرکت است، پدیده‌های الکتروکنتیکی رخ می‌دهد که از آن جمله می‌توان به پدیده‌های پتانسیل جریانی[2] و الکترواسموتیک اشاره کرد که مبتنی‌بر جریان داخلی درون یک ریزمجراست. زمانی که الکترولیت درون یک ریزمجرا تحت اثر یک گرادیان فشار اعمالی وادار به حرکت شود، بارهای متحرک موجود در کنار دیواره این ریزمجرا به همراه سیال به پایین دست جریان منتقل می‌شوند. انتقال بارهای الکتریکی سبب ایجاد یک جریان الکتریکی می‌شود که با نام جریان استریمینگ شناخته می‌شود، تراکم و تجمع این بارها در پایین دست جریان سبب ایجاد یک میدان الکتریکی می‌گردد که به آن پتانسیل استریمینگ گفته می‌شود.

در نقطه مقابل پدیده پتانسیل جریانی، پدیده الکترواسموتیک وجود دارد، این پدیده زمانی رخ می‌دهد که الکترولیت حاوی یون که در مجاورت سطح قرار دارد، براثر اعمال میدان الکتریکی خارجی به حرکت درآید.

به لحاظ معادلات حاکم و نحوه مدل‌سازی، پدیده الکترواسموتیک و پتانسیل جریانی شباهت زیادی به یکدیگر دارند. اختلاف اصلی آن‌ها در این نکته است که در جریان الکترواسموتیک، میدان الکتریکی خارجی عامل حرکت است و اثر آن توسط نیروی حجمی الکتریکی مستقیماً در معادله ناویر- استوکس وارد می‌شود، ولی در مسایل پتانسیل جریانی، اختلاف فشار عامل حرکت جریان است و به دلیل حرکت اجباری سیال حاوی یون یک میدان پتانسیل الکتریکی با نام پتانسیل استریمینگ به وجود می‌آید.

وجود این میدان الکتریکی و اثر آن بر یون‌های باردار منجر به نیروی الکتریکی می‌شود و مشابه با مدل‌سازی الکترواسموتیک، اثر این نیرو در معادله ناویر- استوکس جریان سیال را متأثر می‌کند؛ بنابراین در جریان‌های الکترواسموتیک، میدان الکتریکی معلوم است، پس توزیع سرعت صریحاً تعیین می‌شود. در مسایل فشار- محرک که منجربه پتانسیل استریمینگ می‌شود، میدان الکتریکی و میدان سرعت باید هم‌زمان محاسبه شوند. در مقاله حاضر که میدان جریان شامل ترکیبی از جریان‌های فشار- محرک و الکترواسموتیک است، از پتانسیل استریمینگ که در حد میلی‌ولت است، در مقایسه با میدان الکتریکی خارجی صرف نظر شده است [48]. به‌علاوه برای تحلیل میدان جریان الکترواسموتیک از مدل‌سازی هلمهولتز- اسمولوکوفسکی استفاده شده است.

2-1- مدل‌سازی هلمهولتز - اسمولوکوفسکی

در تحلیل حاضر فرض شده است که محلول درون ریزمجرا یک سیال نیوتنی تراکم‌ناپذیر است و از اثرات شناوری و گرانشی در جریان سیال چشم‌پوشی شده است. علاوه‌براین دوگونه مورد اختلاط دارای ضرایب پخش مولکولی یکسان هستند و هیچ واکنش شیمیایی در بین خودگونه‌ها و یا بین‌گونه‌ها و دیواره ریزمجرا رخ نمی‌دهد. تحت این شرایط معادله پواسان- بولتزمان برای توزیع پتانسیل الکتریکی، ارنست- پلانک برای محاسبه غلظت‌های یونی، معادلات ناویر- استوکس برای میدان سرعت جریان سیال و معادله غلظت برای تعیین غلظت گونه‌ها بایستی مورد حل قرار گیرند. در مدل‌سازی تقریبی هلمهولتز- اسمولوکوفسکی با چشم‌پوشی از حل معادلات پواسان- بولتزمان و ارنست- پلانک، اثر حضور یون‌ها و میدان الکتریکی توسط شرط لغزش سیال روی دیواره مدل می‌شود. این شرط مرزی برای یک سیال لزج با بار خالص صفر به‌صورت رابطه 1 بیان می‌شود [50,49]:

$$u_{\text{wall}} = -\frac{\varepsilon E_{\text{ext}}}{\mu}\zeta_{\text{wall}} \tag{1}$$

که u_{wall} مقدار سرعت لغزشی سیال در مجاورت دیواره (یا به تعبیر بهتر در لبه لایه دوگانه الکتریکی)، ε ثابت دی‌الکتریک محلول، E_{ext} شدت میدان خارجی، ζ مقدار زتاپتانسیل دیواره و μ لزجت سیال است. با این کار دیگر نیازی به اعمال اثر نیروی الکتریکی در معادله ناویر- استوکس نیست و میدان سرعت الکترواسموتیک از حل معادلات ناویر- استوکس بدون نیروی حجمی و با شرط لغزشی بالا حل می‌شوند [46,43]، یعنی رابطه (2):

$$(\vec{V}\cdot\vec{\nabla})\vec{V} = -\vec{\nabla}P + \frac{1}{\text{Re}}\nabla^2\vec{V} \tag{2}$$

2-2- معادله غلظت

برای بررسی پدیده اختلاط، میدان اسکالر برای غلظت یک گونه بایستی حل شود. معادله حاکم بر میدان غلظت به شکل رابطه (3) است [46].

$$\vec{V}\cdot\vec{\nabla}C = \frac{1}{\text{Re Sc}}\nabla^2 C \tag{3}$$

که در آن $\text{Sc} = \mu/\rho D$ عدد اشمیت مربوط به گونه مورد نظر و Re عدد رینولدز است.

بنابراین حل اختلاط توسط جریان الکترواسموتیک با مدل‌سازی هلمهولتز- اسمولوکوفسکی از حل معادلات (2-3) به دست می‌آید. در حالی مدل‌سازی کامل این مسأله بدون ساده‌سازی بسیار پیچیده و شامل حل چندین معادله دیفرانسیل به‌هم مرتبط است [46,43].

2-3- معیار ارزیابی غلظت

برای مطالعه کمی میزان اختلاط استفاده از یک معیار مناسب ضروری است. در جریان‌های ساده و یک‌راهه استفاده از انحراف معیار غلظت‌ها به نسبت رایج است و نتایج مطلوبی دارد [52,51,17]. انحراف معیار غلظت گونه‌ها در هر مقطع از ریزمجرا به‌صورت رابطه (4) تعریف می‌شود.

1- Zeta-potential
2- Streaming potential

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.45.3]

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^H (C(y) - C_m)^2 \mathrm{d}y}{\int_0^H dy} \quad (4)$$

که H ارتفاع کانال و C_m مقدار غلظت متوسط در هر مقطع توسط رابطه (5) محاسبه می‌شود.

$$C_m = \frac{\int_0^H u(y) C(y) \mathrm{d}y}{\int_0^H u(y) \mathrm{d}y} \quad (5)$$

برای جریان‌های پیچیده و دارای گردابه رابطه (4) چندان مناسب نیست، بنابراین برای پرهیز از ایجاد نوسان در میزان اختلاط پیش‌بینی‌شده در طول ریزمجرا از معیار رابطه (6) برای محاسبه کارایی اختلاط استفاده شده است [46,45] که در آن اثر سرعت ذرات نیز به‌صورت تابع وزن گنجانده شده است.

$$\sigma_w^2 = \frac{\int_0^H u(y) (C(y) - C_m)^2 \mathrm{d}y}{\int_0^H u(y) \mathrm{d}y} \quad (6)$$

براساس رابطه (6) به جای این‌که در ارزیابی میزان اختلاط از انحراف معیار استفاده شود، از انحراف معیار وزن‌دار با تابع وزنی سرعت استفاده می‌شود. σ_w، مقدار انحراف معیار غلظت‌ها در هر مقطع، معرف میزان ناهمگنی اختلاط در آن مقطع است. در مسأله مورد بررسی با توجه به توزیع غلظت در ورودی ریزمجرا مقدار $1-\sigma_w$ می‌تواند به‌عنوان معیاری از میزان اختلاط تعبیر شود؛ بنابراین بر مبنای استفاده از انحراف معیار وزن‌دار غلظت‌ها در هر مقطع از ریزمجرا، کارایی اختلاط را به‌عنوان نسبت میزان اختلاط در هر مقطع به میزان اختلاط بیشینه را به‌صورت رابطه (7) تعریف می‌کنیم [46].

$$\epsilon_m = \frac{1 - \sigma_w}{1 - \sigma_{w,\min}} \quad (7)$$

در صورتی که اختلاط کامل به‌وجود آید، مقدار انحراف معیار وزن‌دار غلظت برابر کمینه خود یعنی صفر می‌رسد ($\sigma_{w,\min} = 0$) و مخرج کسر معادله (7) برابر با 1 می‌شود؛ بنابراین کارایی اختلاط به‌صورت $\epsilon_m = 1 - \sigma_w$ محاسبه می‌شود.

3- روش عددی و اعتبارسنجی

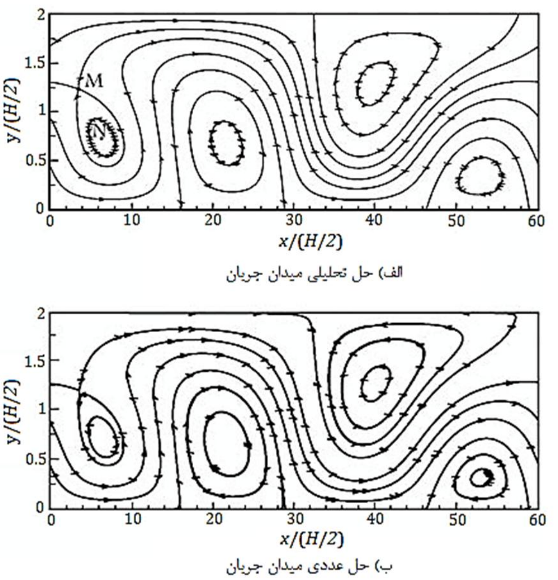
برای محاسبه میدان جریان ابتدا میدان فشار حدس زده می‌شود و سپس معادلات اندازه حرکت برای حل میدان سرعت حل می‌شود. برای این کار، از روش حجم محدود با متغیرهای هم‌مکان در شبکه غیریکنواخت استفاده شده است. ارتباط میدان سرعت و فشار توسط طرح سیمپل[1] تعیین می‌شود و برای پرهیز از جواب‌های شطرنجی در میدان جریان، در محاسبه نرخ جریان جرم جابه‌جایی از طرح میانیابی رای- چو استفاده شده است. با استفاده از میدان سرعت به‌دست آمده، معادله پیوستگی جهت اصلاح میدان‌های فشار و سرعت حل می‌شود. این مراحل به اندازه‌ای تکرار می‌شود تا همگرایی مناسب حاصل شود.

برای اعتبارسنجی، میدان جریان الکترواسموتیک درون ریزمجرای ناهمگن به طول L حل شده است که در آن مقدار زتاپتانسیل روی دیواره بالا برابر با $\zeta^t(x)/\zeta_0 = 1 + 4\sin(2\pi x/L)$ و روی دیواره پایینی برابر با $\zeta^b(x)/\zeta_0 = 1 + 4\sin(4\pi x/L)$ است. به دلیل توزیع ناهمگن بارهای سطحی روی دیواره، طبق معادله (1) سرعت‌های لغزشی به‌صورت ناهمگن ایجاد می‌شوند. برای شرایط گفته شده، براساس مدل H-S در دیواره بالا شرط مرزی لغزش به‌صورت $u^t(x)/u_0 = 1 + 4\sin(2\pi x/L)$ و روی دیواره پایین $u^b(x)/u_0 = 1 + 4\sin(4\pi x/L)$ محاسبه می‌شود. نتایج عددی میدان جریان با استفاده از یک شبکه یکنواخت با 80×330 گره محاسباتی با میدان جریان به‌دست آمده از حل تحلیلی در شکل 2 مقایسه شده است [53].

برای نمونه موقعیت مرکز گردابه در شکل 2 یعنی نقطه N، توسط حل تحلیلی N(x,y)=(6.5,0.75) محاسبه شده و موقعیت نقطه تکین M برابر با M(x,y)=(5.5,1.22) به‌دست آمده است. موقعیت این نقاط توسط حل عددی مقاله حاضر برابر N(x,y)=(6.2,0.75) و M(x,y)=(4.0,1.20) به‌دست آمده‌اند. برای این میدان جریان پیچیده، بیشینه خطای نسبی موجود در پیش‌بینی مکان نقاط تکین در جهت عرضی (جهت y) برابر با $\Delta y/H = 0.01$ و در جهت طولی برابر با $\Delta x/L = 0.025$ است [54].

4- معرفی و طراحی ریزمخلوط‌گر

ریزمخلوط‌گر مورد بحث از یک ریزمجرای ناهمگن تشکیل شده‌اند که مطابق با شکل 3 درون یک میدان الکتریکی خارجی به قدرت یکنواخت E قرار دارد. اثر میدان الکتریکی روی لایه دوگانه الکتریکی تشکیل شده در مجاورت دیواره‌ها، یک جریان الکترواسموتیک ایجاد می‌کند که می‌تواند برای ایجاد اختلاط استفاده شود. ریزمجرای تخت دوبعدی مورد مطالعه دارای ارتفاع H و طول $L = 10H$ است و به سه قسمت ابتدایی، میانی و انتهایی به‌ترتیب با طول‌های $L_{\text{in}} = 4H$، $L_{\text{mid}} = 2H$ و $L_{\text{out}} = 4H$ تقسیم شده است. دیواره‌ها در قسمت ورودی و خروجی ریزمجرا بدون بار و در قسمت میانی که نقش مخلوط‌گر الکترواسموتیکی را دارد، دیواره‌ها دارای تکه‌های ناهمگنی بار الکتریکی غیریکنواخت هستند، به‌طوری که زتاپتانسیل وابسته به آن‌ها، $\zeta(x)$، شامل مقادیر مثبت و منفی می‌شود. انتخاب ساختار نشان داده شده در شکل 3 بر مبنای دلایلی مختلفی بوده است. در غالب کاربردهای ریزمخلوط‌گر، یک فاصله ورودی و یا خروجی قبل از قسمت اختلاطی وجود دارد، به این دلیل در طراحی ریزمخلوط‌گر قراردادی یک ناحیه ورودی در ابتدا و یک ناحیه خروجی در انتها قرار داده شده است تا ریزمجرا هماهنگ با مسایل کاربردی شبیه‌سازی شود.



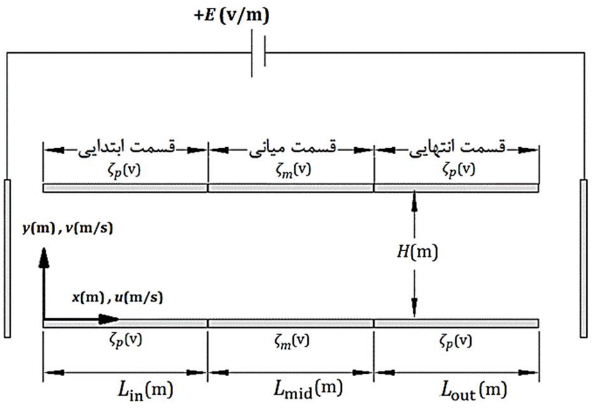
الف) حل تحلیلی میدان جریان

ب) حل عددی میدان جریان

شکل 2 الف خطوط جریان به‌دست آمده توسط حل تحلیلی ب حل عددی

1- SIMPLEC

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.45.3]



شکل 3 مشخصات ریزمجرای ناهمگن مورد بررسی و محورهای مختصات

نکته دیگر به لحاظ جنبه‌های محاسباتی مسأله است، قرار دادن تکه‌های ناهمگنی در فواصل خیلی نزدیک به ورودی و خروجی ریزمجرا سبب نشر اثرات خروجی و به‌خصوص ورودی به درون حوزه حل می‌شود و از این جنبه برخی محدودیت‌های جدی مانند ایجاد جریان‌های برگشتی در ورودی به دلیل نزدیکی بیش از حد گردابه به ورودی و یا فقدان توانایی برای اعمال شرط‌های مرزی غلظت در ورودی رخ می‌دهد.

بررسی اثرات ورودی و خروجی و نزدیکی گردابه به دهانه ورودی و تأثیر آن‌ها بر اختلاط حاوی نکات ارزنده‌ای است، اما محقق را از مقصد اصلی که تدوین یک ریزمخلوط‌گر استاندارد و قابل بررسی برای سایر محققین است، دور می‌کند. با توجه به این موارد قسمت اختلاطی در وسط ریزمجرا تعبیه شده است. در این قسمت هر یک از دیواره‌های بالایی و پایینی متشکل از دو قطعه با طول‌های مساوی است که در هر قطعه، مقدار بار الکتریکی به شکل دلخواه تنظیم می‌شود.

بسته به مقدار بار، نوع بار و نحوه آرایش مکانی قطعات ناهمگنی، مقدار و جهت سرعت لغزشی در مجاورت دیواره‌ها متفاوت خواهد بود و به تبع آن طرح‌های جریان به‌دست آمده، نقش‌های متفاوتی در فرآیند اختلاط بازی می‌کنند. برای نمونه حالتی که مقدار بار الکتریکی در مرزهای بالا و پایین به‌صورت $\zeta^t(x)=\zeta_0\sin(2\pi x/L)$ و $\zeta^b(x)=\zeta_0\sin(4\pi x/L)$ باشند براساس مدل هلمهولتز- اسمولوکوفسکی شرط‌های مرزی سرعت به‌صورت $u^t(x)=u_0\sin(2\pi x/L)$ و $u^b(x)=u_0\sin(4\pi x/L)$ در دیواره بالا و پایین مشخص می‌شوند. میدان سرعت مربوطه در شکل 4 نشان داده شده است. با توجه به شرط‌های اعمال‌شده دیده می‌شود که چنین میدانی فاقد دبی خالص در هر مقطع از ریزمجرا است؛ بنابراین اگرچه الگوی چرخشی آن مناسب پدیده اختلاط است، اما عدم وجود دبی یک نکته منفی در مسایل عملی است.

از آن‌جا که توزیع بار الکتریکی سطحی می‌تواند توسط الگوهای بی‌شماری ایجاد شود، مناسب است تا با سازوکار مناسب و معرفی یک سری الگوی استاندارد، مسأله را در یک فضای اصولی‌تر بررسی کنیم. برای این منظور مطابق با تقسیمات شکل 3 مقدار بارها در هر ناحیه ابتدایی، میانی و انتهایی برابر با عدد ثابتی در نظر گرفته شده است. ناحیه میانی که برای ایجاد اختلاط در نظر گرفته شده، دارای چهار تکه ناهمگنی است. مقدار بارها در این چهار قطعه مساوی بوده و فقط علامت بار متفاوت است.

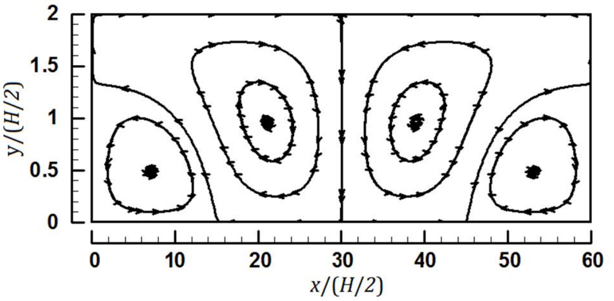
در این شرایط برای این قسمت میانی با حذف وضعیت‌های آینه‌ای و یا متقارن، سه وضعیت متمایز برای آرایش بارها قابل تصور است. برای نخستین آرایش، جزییات مربوط به توزیع بار در قسمت میانی ریزمجرا و طرح شماتیک جریان الکترواسموتیک مربوطه در حضور میدان الکتریکی مثبت در شکل 5 نشان داده شده است.

برای حالت نشان داده شده در شکل 5، قسمت میانی دارای 4 تکه ناهمگنی است، روی دیواره بالایی از راست به چپ ابتدا یک تکه ناهمگنی با بار منفی (n) و سپس یک تکه ناهمگنی با بار مثبت (p) قرار دارد و در دیواره پایینی همین وضعیت تکرار شده است.

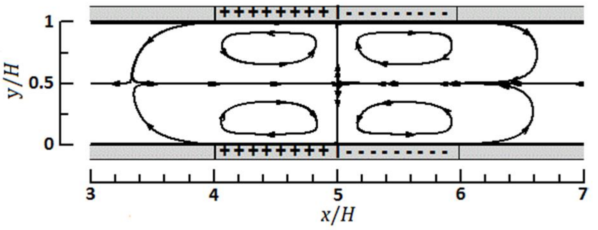
زمانی که اندازه بارها در این 4 تکه ناهمگنی برابر باشد، این وضعیت با نماد (np-np) مشخص می‌شود. دو آرایش متفاوت دیگر که با همین 4 تکه ناهمگنی شکل می‌گیرد عبارتند از (np-pn) و (pp-nn). هنگامی که اندازه بارها متفاوت باشد وضعیت‌های بیشتری قابل طراحی است. برای نمونه در حالت (np-n2p2) روی دیواره بالایی از راست به چپ ابتدا تکه‌ای با بار مثبت و سپس منفی قرار دارد و در دیواره پایینی علامت بارها به‌ترتیب مثبت و منفی است، با این تفاوت که مقدار اندازه بار آن‌ها دو برابر دیواره بالایی است؛ بنابراین با توجه به جهت مثبت E (از چپ به راست)، مقادیر سرعت‌های لغزشی مجاور دیواره در قسمت میانی ریزمجرای شکل 5 برابر است با رابطه (8).

$$u^t(x)=u^b(x)=\begin{cases}u_p=-1\text{mm/s}, & 4<x<5\\ u_n=+1\text{mm/s}, & 5<x<6\end{cases} \qquad (8)$$

که در آن زیرنویس‌های p یا n برای سرعت u نشان‌دهنده بار مثبت یا منفی قطعات است. با یک E مثبت، سرعت لغزشی در مجاورت دیواره با زتاپتانسیل منفی مقدار مثبتی است و اندازه عددی آن $u_n=+1$ mm/s است. تحت همین شرایط سرعت لغزشی در مجاورت دیواره با زتاپتانسیل مثبت مقدار منفی است و برابر $u_p=-1$ mm/s است. همان‌طور که پیشتر‌گفته شد با تغییر علامت بار در قسمت میانی می‌توان سه وضعیت غیرتکراری معرفی کرد. این سه نوع آرایش برای بارهای قسمت میانی را می‌توان برحسب علامت‌های مربوط به سرعت‌های u_p و u_n نیز بیان کرد. در شکل 6 چند خط جریان الکترواسموتیک مربوط به این سه آرایش با جزئیات مربوطه نشان داده شده است.



شکل 4 خطوط جریان برای شرایط مرزی نامتقارن و دبی جریانی صفر



شکل 5 یک نمونه از آرایش تکه‌های ناهمگنی بار و خطوط جریان الکترواسموتیک با E مثبت از چپ به راست

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.45.3]

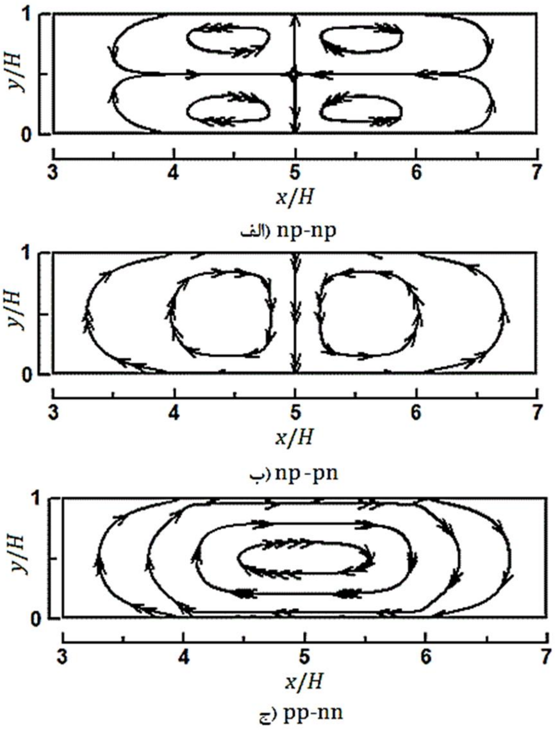
اندازه سرعت لغزشی ناشی از بار دیواره و میدان الکتریکی خارجی در هر سه آرایش الف، ب، ج، برابر با 1mm/s و فقط جهت سرعت‌ها متفاوت است. هر چند که الگوی جریان برای هر حالت کاملاً متفاوت است، اما در همه این حالات دبی خالص جریان برابر با صفر است.

4-1- عملکرد ریزمجرای ناهمگن در جریان ترکیبی

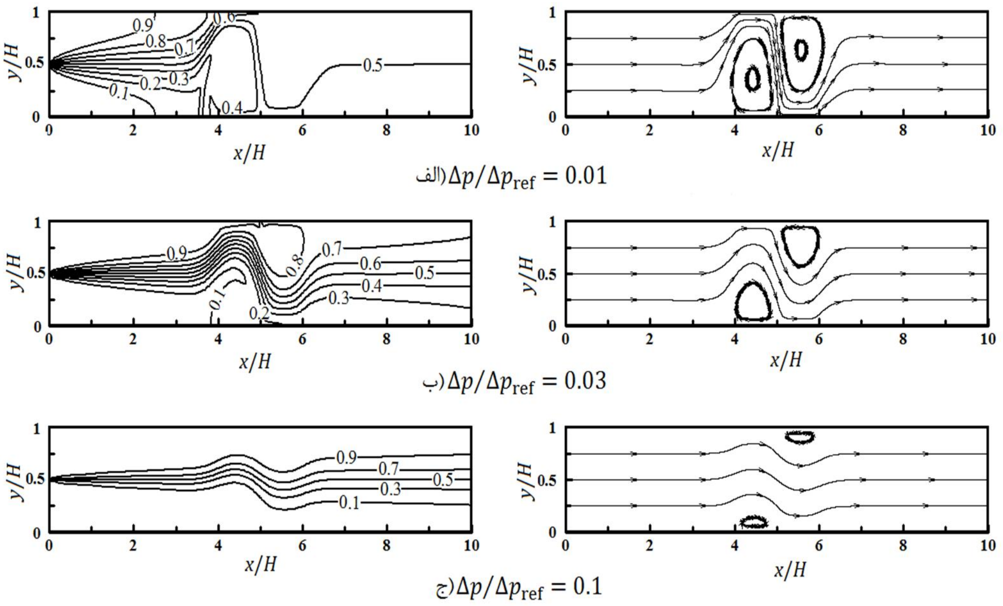
ریزمخلوط‌گرهایی که معرفی شده‌اند، با وجودی که الگوهای مناسب از خواص سطحی دیواره سبب ایجاد جریان‌های پیچیده‌ای شده است (مانند شکل‌های 4 و 6)، مقدار دبی خالص آن‌ها برابر با صفر است. در مسأله اختلاط علاوه‌بر جریان پیچیده، مقدار دبی جرمی حائز اهمیت است؛ بنابراین برای ایجاد دبی و تنظیم جریان، میدان جریان‌های الکترواسموتیک نشان داده شده در شکل 4، با یک میدان ناشی از فشار ترکیب شده است و اثر میدان فشار بر جریان ترکیبی بررسی شده است. نتایج به‌دست‌آمده برای گرادیان فشارهای مختلف در شکل 7 (سمت راست) نشان داده شده است که در آن فشار مرجع برابر با $\Delta p_{\mathrm{ref}} = 8\mu^2 L\mathrm{Re}/(3\rho H^3)$ در نظر گرفته شده است. در این شکل ظهور جریان‌های مختلف به‌ازای گرادیان فشارهای مختلف، ایده جالبی را نشان می‌دهد. در یک مسأله مشخص از اختلاط، نخست می‌توان الگوی جریان پایه را با استفاده از الگوی خواص دیواره ایجاد کرد (برای نمونه الگوهای شکل 6 که در آن تمام میدان با گردابه پوشش داده شده است و می‌تواند اختلاط مناسب را ایجاد کند)، سپس توسط اعمال میدان فشار خارجی، سیال در مسیر دستگاه مورد آزمایش به حرکت واداشته می‌شود.

بنابراین توسط ترکیبی از میدان جریان فشار، محرک و میدان جریان دیواره، محرک، اختلاط درون ریزمجراها می‌تواند به‌گونه دلخواه صورت پذیرد. پیش از این نیز جریان‌های پیچیده توسط الگوهای پیچیده بار در دیواره تولید شده‌اند، اما مزیت اصلی چنین سیستمی در این است که بدون نیاز به تغییر آرایش بارهای دیواره ریزمجرا می‌توان تنها با تنظیم اختلاف فشار، رژیم‌های مورد نیاز را برای اختلاط و یا پمپاژ سیال به وجود آورد، و امکان استفاده از چنین سیستم‌هایی به لحاظ عملی ساده‌تر است.

همچنین در شکل 7، میدان جریان ترکیبی به همراه توزیع غلظت مربوطه به‌ازای سه مقدار مختلف $\Delta p/\Delta p_{\mathrm{ref}}$ رسم شده است که در آن اختلاف فشار مرجع برابر $\Delta p_{\mathrm{ref}} = 8\mathrm{Re}\mu^2 L/(3\rho H^3)$ است. با توجه به شکل 7 (سمت راست)، می‌توان مشاهده کرد که به لحاظ کیفی اختلاف فشارهای اندک اثر اختلاطی جریان کاملاً قابل توجه است. با افزایش میزان افت فشار با این‌که دبی جریان افزایش می‌یابد، اما عملکرد اختلاطی ریزمجرا تضعیف می‌شود. این موضوع صحیح است چرا که با افزایش دبی، سرعت عبور جریان افزایش می‌یابد؛ بنابراین سیال فرصت کمتری جهت اختلاط خواهد داشت. جهت بررسی کمی و دقیق این موضوع از پارامتر راندمان اختلاط برای مقایسه اختلاط در حالت مختلف استفاده می‌کنیم که در بخش پسین مقاله به آن پرداخته شده است.



شکل 6 جریان الکترواسموتیک برای سه آرایش متفاوت با بارهای قسمت میانی
الف- np-np ب- np-pn ج- pp-nn



شکل 7 اثر ترکیب جریان فشار- محرک با جریان الکترواسموتیک مورد نظر در آرایش (np-pn) خطوط جریان (سمت راست)، توزیع غلظت (سمت چپ)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.45.3]

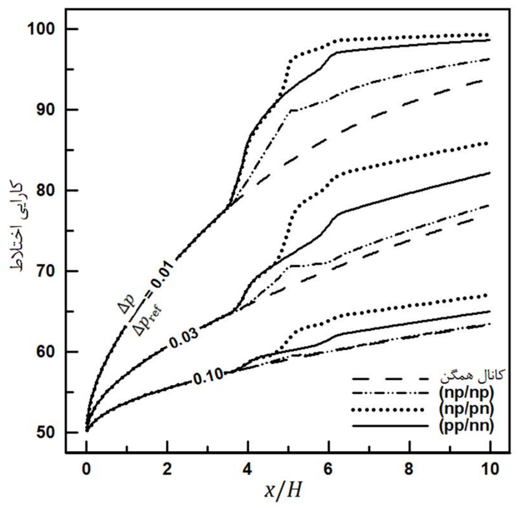
4-2- بررسی اختلاط ریزمخلوط‌گر ترکیبی از جریان فشار- محرک و الکترواسموتیک

در شکل 8 راندمان اختلاط برای سه اختلاف فشار و سه آرایش بار متفاوت نسبت به حالت دیواره‌های بدون‌بار مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تمام موارد با پیش‌روی جریان در طول ریزمجرا راندمان اختلاط بیشتر می‌شود.

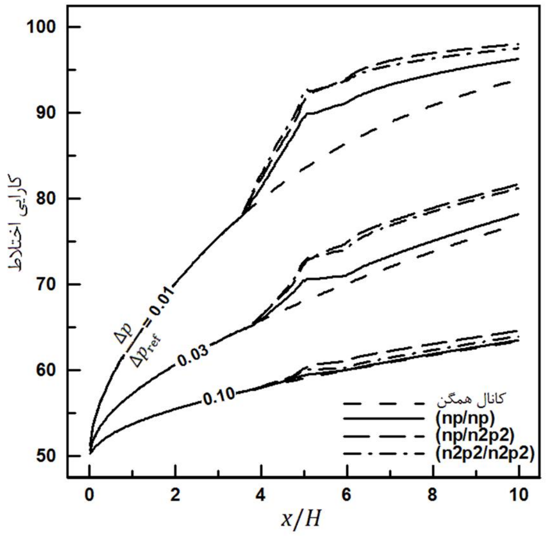
در وضعیتی که کانال همگن (بدون تکه ناهمگنی) باشد، با افزایش اختلاف فشار و به تبع آن افزایش سرعت جریان، کارایی اختلاط در هر مقطع کاهش می‌یابد. دلیل این موضوع این است که با افزایش سرعت فرصت لازم برای اختلاط کاهش می‌یابد. برای نمونه برای $\Delta p/\Delta p_{\mathrm{ref}} = 0.01$ مقدار کارایی اختلاط در انتهای کانال برابر با 94 درصد است، اما با افزایش مقدار اختلاف فشار به $\Delta p/\Delta p_{\mathrm{ref}} = 0.10$ مقدار کارایی اختلاط به 63 درصد کاهش می‌یابد. دیده می‌شود که وجود قسمت میانی با آرایش بار ناهمگن سبب افزایش قابل توجه عملکرد اختلاط شده است.

در هر یک از اختلاف فشارهای معین، تا پیش از رسیدن به قسمت میانی، عملکرد اختلاطی ریزمجرای بدون‌بار (یا حتی باردار یکنواخت) با ریزمجرای دارای بار ناهمگن کاملاً یکسان هستند. در ناحیه میانی ریزمجرا با توزیع بار ناهمگن که سرعت‌های لغزشی دیواره، جریان‌های چرخشی قدرتمندی ایجاد می‌کنند، میزان اختلاط به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. با افزایش قدرت میدان فشار خارجی و تقویت جریان ناشی از آن، اثر گردابه‌های ناحیه میانی بر راندمان اختلاط کاهش می‌یابد. در هر سه حالت از اختلاف فشارها، برای سه آرایش بار نشان داده شده، آرایش بار دوم (np-pn) بیشترین راندمان اختلاط را داراست. در این وضعیت، آرایش تکه‌های ناهمگنی بار، کاملاً نامتقارن است. هر چه این کمبود تقارن بیشتر باشد، بر میزان اختلاط می‌افزاید. بدترین عملکرد اختلاطی مربوط به آرایشی است که بیشترین تقارن را در الگوی بار دارد و بهترین عملکرد اختلاط مربوط به آرایشی است که کمترین تقارن را در الگوی بارها دارد.

برای بررسی اثر مقدار بارهای موجود روی قطعات ناهمگنی، راندمان اختلاط برای حالت‌های بدون ناهمگنی، (np-np)، (np-n2p2) و (n2p2-n2p2) در شکل 9 نشان داده شده است. در همه موارد انتخابی برای این شکل، آرایش استقرار بارها روی هر دو دیواره یکسان و به‌صورت (np-np) است و تنها تفاوت در مقدار بار آن‌هاست.



شکل 8 تغییرات راندمان اختلاط در طول ریزمجرا برای اختلاف فشارهای مختلف و آرایش‌های متفاوت تکه‌های ناهمگنی بار



شکل 9 تغییرات راندمان اختلاط در طول ریزمجرا به ازای مقادیر مختلف بار روی تکه‌های ناهمگنی و مقادیر متفاوت Δp

در اینجا نیز ریزمجرای بدون ناهمگنی کمترین میزان راندمان اختلاط را دارد. وضعیت (np-np) باعث افزایش راندمان اختلاط به میزان اندک شده است. با افزایش دو برابری مقدار بارها در دیواره پایینی و ایجاد وضعیت (np-n2p2) علاوه بر اینکه شدت گردابه‌های جریان افزایش می‌یابد، عدم تقارن الگوی بار و جریان نیز بیشتر می‌شود. لذا این وضعیت میزان اختلاط را به اندازه قابل توجهی افزایش داده است. در آخرین وضعیت یعنی (n2p2-n2p2) با وجودی که میزان بارها در دیواره بالایی نیز افزایش دو برابری یافته است، اما به دلیل افزایش تقارن بارها، میزان راندمان اختلاط کمتر از حالت (np-n2p2) است. بنابراین راندمان اختلاط بیشتر بستگی به نامتقارنی بارها در دو دیواره دارد و الزاما افزایش بارها باعث افزایش راندمان اختلاط نخواهد شد.

علاوه‌بر این شکل‌های 8 و 9 نشان می‌دهند که اگرچه برای ایجاد اختلاط نیاز به حضور اختلاف فشار است، اما در اختلاف فشارهای کمتر راندمان اختلاط بیشتر است. به دلیل این‌که در اختلاف فشارهای کم، سرعت متوسط جریان اندک است و سیال مدت زمان بیشتری را در قسمت مخلوط‌کننده سپری می‌کند، نتیجه درست است و اختلاط بیشتری حاصل می‌شود. با این وجود، لزوم افزایش اختلاف فشار راندمان اختلاط را افزایش نخواهد داد. از سوی دیگر مشاهده می‌شود که راندمان اختلاط محاسبه‌شده در هر مقطع با پیش‌روی سیال در طول ریزمجرا همواره رشد صعودی دارد و در انتهای ریزمجرا $(x = L)$ بیشینه خود را دارد.

4-3- بررسی راندمان نسبی اختلاط

جهت بررسی اثرات توام دو عامل مهم تأثیرگذار بر راندمان اختلاط، یعنی اختلاف فشار و نحوه آرایش بارها، از راندمان نسبی اختلاط استفاده می‌کنیم که براساس رابطه (9) به‌صورت زیر است.

$$\mathrm{E_{Ch,r}} = \frac{\epsilon_{\mathrm{L}}}{\epsilon_{\mathrm{L,No\ Patch}}} \tag{9}$$

در یک ریزمجرا از راندمان نسبی اختلاط، به دو طریق می‌توان بهره برد. نخست این معیار نشان می‌دهد که در یک ریزمجرا با طول و اختلاف فشار مشخص، نحوه آرایش بارها (اثر خالص ناحیه میانی) چه تأثیری بر راندمان اختلاط خروجی دارد، دوم مشخص می‌کند که در یک ریزمجرا با آرایش بار مشخص، اختلاف فشار اعمالی چه تأثیری بر راندمان اختلاط خروجی دارد.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.45.3]

همان‌طور که در شکل 8 مشاهده شد در هر سه آرایش بار مورد نظر با کاهش اختلاف فشار راندمان اختلاط بهبود می‌یابد. در پاسخ به این سؤال که روند بهبود راندمان نسبی با افزایش اختلاف فشار چگونه می‌شود، شکل 10 رسم شده است.

در این شکل تغییرات راندمان نسبی اختلاط، برحسب تغییرات اختلاف فشار Δp برای سه آرایش مختلف (np-np)، (np-pn) و (pp-nn) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در هر سه آرایش بار با افزایش اختلاف فشار، نخست مقدار راندمان نسبی اختلاط زیاد و پس از عبور از یک مقدار بیشینه، کاهش آغاز می‌شود.

در اختلاف فشارهای کم میزان سرعت متوسط سیال بسیار کم است و زمان عبور سیال از ریزمجرا طولانی است. این زمان طولانی سبب می‌شود که میزان اختلاط در خروجی ریزمجرا افزایش یابد، در نتیجه مستقل از این‌که تکه‌های ناهمگنی با آرایش نامتقارن موجود باشند یا نباشند، عملکرد اختلاطی آن تغییری نمی‌کند و راندمان نسبی اختلاط در ریزمجرا به سمت عدد 1 نزدیک می‌شود. در این حالت پدیده پخش مولکولی تنها عامل مؤثر در اختلاط است. از سوی دیگر در اختلاف فشارهای به نسبت زیاد، سیال با سرعت بیشتری از درون ریزمجرا عبور می‌کند و فرصت اختلاط کمتری دارد. همچنین این اختلاف فشار زیاد و سرعت بیشتر ناشی از آن، از قدرت گردابه‌ها در نواحی میانی ریزمجرا می‌کاهد، در نتیجه وجود ناهمگنی‌ها و جابه‌جایی آشوبناک ناشی از آن اثر قابل توجهی در عملکرد اختلاط ندارد، به نحوی که با افزایش بیشتر اختلاف فشار، راندمان نسبی اختلاط ریزمجرا دوباره به سمت مقدار یک میل می‌کند. در این حالت نیز پخش مولکولی پدیده غالب در فرآیند اختلاط است.

در اختلاف فشارهای میانی، علاوه‌بر پدیده پخش مولکولی، جابه‌جایی آشوبناک ناشی از حضور تکه‌های ناهمگنی و جابه‌جایی ناشی از اعمال Δp روی فرآیند اختلاط اثر هم‌افزایی دارند و راندمان نسبی اختلاط دارای یک مقدار بیشینه است.

4-4- بررسی ظرفیت اختلاطی ریزمخلوط‌گر

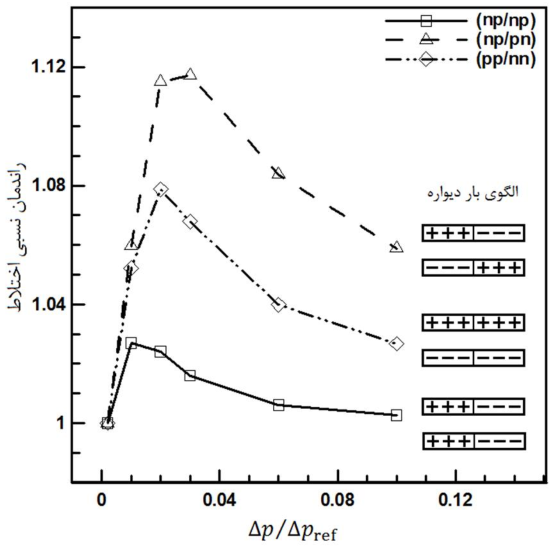
معیار مناسب برای ارزیابی اختلاط در یک ریزمخلوط‌گر را با توجه به دبی جرمی سیال عامل تحت عنوان ظرفیت اختلاطی، مشابه ظرفیت حرارتی در یک مبدل تعریف می‌کنیم. ظرفیت اختلاطی می‌تواند معرف کیفیت اختلاط و کمیت اختلاط باشد. برای یک ریزمخلوط‌گر با دبی $\dot{m}$، میزان اختلاط ورودی $\epsilon_{m,\text{in}}$و میزان اختلاط خروجی $\epsilon_{m,\text{out}}$، میزان ظرفیت اختلاطی براساس رابطه (10) برابر است با:

$$Q_{\text{mix}} = \dot{m}(\epsilon_{m,\text{out}} - \epsilon_{m,\text{in}}) \qquad (10)$$

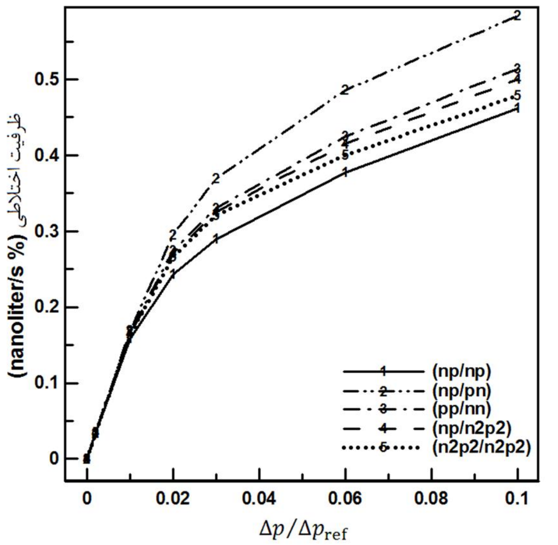
در شکل 11 ظرفیت اختلاطی برای چند ریزمخلوط‌گر نمایش داده شده است. با افزایش میزان اختلاف فشار، ظرفیت اختلاطی ریزمجرا در تمامی آرایش‌های بار انتخابی افزایش می‌یابد. با توجه به شیب نمودارها معلوم می‌شود که در اختلاف فشارهای کم با تغییر ناچیز در میزان اختلاف فشار، ظرفیت اختلاطی به شدت افزایش می‌یابد. در این حالت با افزایش اختلاف فشار میزان دبی افزایش قابل توجهی می‌یابد، بدون این‌که از میزان راندمان اختلاط مقدار قابل توجهی کاسته شود، ولی در اختلاف فشارهای زیاد هرچند دبی با افزایش اختلاف فشار زیاد می‌شود، میزان اختلاط نیز کاهش می‌یابد و درنتیجه ظرفیت اختلاطی تغییر چندانی نمی‌کند. اختلاف فشار مربوط به ناحیه‌ای از نمودار که شیب آن تغییر شدیدی پیدا کرده است، معرف اختلاف فشار بهینه است.

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله چگونگی فرآیند اختلاط تحت اثرات الکتروکنتیک درون ریزمخلوط‌گرهای دارای چند تکه ناهمگنی از بار الکتریکی در دیواره، برای هندسه دوبعدی به‌صورت کیفی و کمی بررسی شد و شاخصه‌های مؤثر بر اختلاط در جریان ترکیبی الکترواسموتیک و فشار- محرک معرفی شدند. مطالعه انجام‌شده نشان داد که با ترکیب دو جریان الکترواسموتیک و فشار- محرک در یک ریزمجرا و تنظیم مناسب تکه‌های ناهمگنی بار، به‌سادگی می‌توان یک ریزمخلوط‌گر الکترواسموتیکی با اختلاط قابل کنترل طراحی کرد. رفتار چنین ریزمخلوط‌گرهایی تحت تأثیر نحوه آرایش بار الکتریکی ناهمگن و مقدار اختلاف فشار اعمالی است. این رفتار در این مقاله به کمک سه فاکتور راندمان اختلاط، راندمان نسبی اختلاط و ظرفیت اختلاطی مورد بررسی قرار گرفت. جریان الکترواسموتیک تولیدی در مجاورت تکه‌های



شکل 10 تغییرات راندمان نسبی اختلاط، $E_{ch,r}$ به‌ازای تغییرات اختلاف فشار Δp برای سه آرایش بار مختلف



شکل 11 تغییرات ظرفیت اختلاطی به‌ازای تغییرات اختلاف فشار ΔP برای چند آرایش مختلف از تکه‌های ناهمگنی بار

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.45.3]

ناهمگنی با بار یکسان به تنهایی و بدون وجود یک جریان اصلی مانند فشار-محرک قادر به ایجاد اختلاط بالا در سیال نیست، اما با قرار دادن تکه‌های ناهمگنی می‌توان اختلاط را بهبود داد. نکته کلیدی در طراحی قطعه‌های ناهمگنی این است که هر چه آرایش تکه‌های ناهمگنی بار بر دیواره‌ها نامتقارن‌تر باشد، عملکرد اختلاطی ریزمجرا بهتر خواهد بود و لزوم افزایش بارها سبب افزایش راندمان اختلاط نخواهد شد. نتیجه مهم دیگر این‌که در اختلاف فشارهای اندک و یا خیلی زیاد وجود تکه‌های ناهمگنی بار روی دیوارهای ریزمجرا اثر قابل ملاحظه‌ای بر بهبود اختلاط ندارد، در حقیقت در این محدوده از عملکرد، مکانیزم پخش مولکولی بر پخش جابه‌جایی غلبه می‌کند و اثر میدان جریان و گردابه‌های آن اندک می‌شود، در این محدوده از اختلاف فشارهای اندک عملکرد اختلاطی ریزمجراهای همگن و ناهمگن به یکدیگر نزدیک است.

6- فهرست علائم

C	غلظت ($\mathrm{mol\ m^{-3}}$)
C_m	غلظت متوسط در هر مقطع ($\mathrm{mol\ m^{-3}}$)
D	ضریب پخش مولکولی ($\mathrm{m^2\ s^{-1}}$)
E	شدت میدان الکتریکی ($\mathrm{v\ m^{-1}}$)
E_{ext}	شدت میدان الکتریکی اعمالی ($\mathrm{v\ m^{-1}}$)
$\mathrm{E_{Ch,r}}$	راندمان نسبی اختلاط
H	عرض مجرا (m)
L	طول مجرا (m)
P	فشار ($\mathrm{kg\ m^{-1}\ s^{-2}}$)
Q_{mix}	ظرفیت اختلاطی ریزمخلوط‌گر ($\mathrm{nanoliter\ s^{-1}}$)
Re	عدد رینولدز
Sc	عدد اشمیت
u_{wall}	سرعت روی دیواره ($\mathrm{m\ s^{-1}}$)
$\vec{V}$	بردار سرعت [($\mathrm{m\ s^{-1}}$)]

علائم یونانی

ϵ_m	کارایی اختلاط
ε	ضریب گذردهی الکترولیت ($\mathrm{c\ v^{-1}\ m^{-1}}$)
μ	لزجت دینامیکی ($\mathrm{kg\ m^{-1}\ s^{-1}}$)
ζ	زتاپتانسیل (v)
ζ_p	زتاپتانسیل بخش پمپاژ (v)
ζ_m	زتاپتانسیل بخش میانی (v)
Ψ_0	پتانسیل سطح مشترک جامد-مایع [v]
σ	انحراف معیار غلظت گونه‌ها بدون تابع وزنی ($\mathrm{mol\ m^{-3}}$)
σ_w	انحراف معیار غلظت گونه‌ها با تابع وزنی سرعت ($\mathrm{mol\ m^{-3}}$)

بالانویس‌ها

b	پایین
t	بالا

زیرنویس‌ها

av	مقدار متوسط
ext	خارجی
in	ابتدا
mid	وسط
n	بار منفی روی قطعه
out	انتها
p	بار مثبت روی قطعه
ref	مرجع
wall	دیواره

7- مراجع

[1] S. Dreher, N. Kockmann, P. Woias, Characterization of Laminar Transient Flow Regimes and Mixing in T-shaped Micromixers, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 30, No. 1-2, pp. 91-100, 2009.

[2] C. C. Chang, R. J. Yang, Electrokinetic mixing in microfluidic systems, *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol. 3, No. 5, pp. 501-525, 2007.

[3] R. H. Liu, R. Lenigk, R. L. Druyor Sanchez, J. Yang, P. Grodzinski, Hybridization Enhancement Using Cavitation Microstreaming, *Analytical Chemistry*, Vol. 75, No. 8, pp. ۱۹۱۱-۱۹۱۷, 2003.

[4] M. Campisi, D. Accoto, F. Damiani, P. Dario, A soft-lithographed chaotic electrokinetic micromixer for efficient chemical reactions in lab-on-chips, *J. Micro-Nano Mech.*, Vol. 5, pp. 69–76, 2009.

[5] C. K. Chen, C. C. Cho, Electrokinetically driven flow mixing utilizing chaotic electric fields, *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol. 5, No. 6, pp. 785-793, 2008.

[6] C. Y. Lim, Y. C. Lam, C. Yang, Mixing enhancement in microfluidic channel with a constriction under periodic electro-osmotic flow, *Biomicrofluidics*, Vol. 4, No. 1, pp. 014101, 2010.

[7] Y. Y. Liang, G. A. Fimbres Weihs, D. E. Wiley, Approximation for modelling electro-osmotic mixing in the boundary layer of membrane systems, *Journal of Membrane Science*, Vol. 450, pp. 18-27, 2014.

[8] A. K. Nayak, Analysis of mixing for electroosmotic flow in micro/nano channels with heterogeneous surface potential, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 75, pp. 135-144, 2014.

[9] H. H. Bau, J. Zhong, M. Yi, A minute magneto hydro dynamic (MHD) mixer, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 79, pp. 207–215, 2001.

[10] Y. Wang, J. Zhe, B. T. F. Chung, P. Dutta, A rapid magnetic particle driven micromixer, *Microfluid. Nanofluid.*, Vol. 4, pp. 375–389, 2008.

[11] A. Alizadeh, L. Zhang, M. Wang, Mixing enhancement of low-Reynolds electro-osmotic flows in microchannels with temperature-patterned walls, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 431, pp. 50-63, 2014.

[12] B. Xu, T. Wong, N. Nguyen, Z. Che, J. Chai, Thermal mixing of two miscible fluids in a T-shaped microchannel, *Biomicrofluidics*, Vol. 4, No. 4, pp. 044102, 2010.

[13] W. Buchegger, C. Wagner, B. Lendl, M. Kraft, M. Vellekoop, A highly uniform lamination micromixer with wedge shaped inlet channels for time resolved infrared spectroscopy, *Microfluid. Nanofluid.*, Vol. 10, pp. 889–897, 2011.

[14] H. Le The, H. Le Thanh, T. Dong, B. Q. Ta, N. Tran Minh, F. Karlsen, An effective passive micromixer with shifted trapezoidal blades using wide Reynolds number range, *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 93, pp. 1-11, 2015.

[15] S. Baheri Islami, S. Ahmadi, Numerical investigation on the effect of various geometries on mixing efficiency of passive micromixers with oscillatory inlet velocities, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 7, pp. 27-34, 2014. (In Persian)

[16] C. C. Cho, C. L. Chen, C. K. Chen, Mixing enhancement of electrokinetically-driven non-Newtonian fluids in microchannel with patterned blocks, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 191, pp. 132-140, 2012.

[17] H. Bockelmann, V. Heuveline, D. P. Barz, Optimization of an electrokinetic mixer for microfluidic applications, *Biomicrofluidics*, Vol. 6, No. 2, pp. 24118-23, 2012.

[18] S. Yu, T. J. Jeon, S. M. Kim, Active micromixer using electrokinetic effects in the micro/nanochannel junction, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 197, pp. 289-94, 2012.

[19] T. Tofteberg, M. Skolimowski, E. Andreassen, O. Geschke, A novel passive micromixer: Lamination in a planar channel system, *Microfluid. Nanofluid* ,.Vol. 8, pp. 209–215, 2010.

[20] C. Y. Lee, C. F. Lin, M. F. Hung, C. H. Tsai, L. M. Fu, Experimental and numerical investigation into mixing efficiency of micromixers with different geometric barriers, *Mater. Sci. Forum*, pp. 505-517, 2006.

[21] V. E. Papadopoulos, I. N. Kefala, G. Kaprou, G. Kokkoris, D. Moschou, G. Papadakis, E. Gizeli, A. Tserepi, A passive micromixer for enzymatic digestion of DNA, *Microelectronic Engineering*, Vol. 124, pp. 42-46, 2014.

[22] Z. Chen, M. R. Bown, B. O'Sullivan, J. M. MacInnes, R. W. K. Allen, M. Mulder, M. Blom, R. van't Oever, Performance analysis of a folding flow micromixer, *Microfluid. Nanofluid.*, Vol. 7, pp. 783–794, 2009.

[23] T. G. Kang, M. K. Singh, P. D. Anderson, H. E. Meijer, A Chaotic Serpentine Mixer Efficient in th eCreeping Flow Regime From Design Concept to Optimization, *Microfluid. Nanofluid.*, Vol. 6, pp. 763–774, 2009.

[24] D. Moon, K. B. Migler, Forced assembly and mixing of melts via planar polymer micro-mixing, *Polymer*, Vol. 51, pp. 3147–3155, 2010.

[25] P. E. Neerincx, R. P. J. Denteneer, S. Peelen, H. E. H. Meijer, Compact mixing using multiple splitting, stretching, and recombining flows, *Macromol. Mater. Eng.*, Vol. 296, pp. 349–361, 2011.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.45.3]

[40] R. Peng, D. Li, Effects of ionic concentration gradient on electroosmotic flow mixing in a microchannel, *Journal of Colloid and Interface Science,* Vol. 440, pp. 126-132, 2015.
[41] C. K. Chen, C. C. Cho, A combined active/passive scheme for enhancing the mixing efficiency of microfluidic devices, *Chemical Engineering Science,* Vol. 63, No. 12, pp. 3081-3087, 2008.
[42] S. Bera, S. Bhattacharyya, On mixed electroosmotic-pressure driven flow and mass transport in microchannels, *International Journal of Engineering Science,* Vol. 62, pp. 165-176, 2013.
[43] J. Jamaati, A. R. Farahinia, H. Niazmand, Numerical Investigate of Electroosmotic Flow in Heterogeneous Microchannels, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 3, pp. 260-270, 2015. (In Persian)
[44] C. O. Ng, C. Qi, Electroosmotic flow of a power-law fluid in a non-uniform microchannel, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics,* Vol. 208–209, pp. 118-125, 2014.
[45] H. Niazmand, J. Jamaati, M. Renlsizbulut, Investigation of electrokinetic mixing in 3D non-homogenous microchannels, *Journal Of Computational And Applied Research In Mechanical Engineering,* Vol. 3, No. 1, pp. 41-52, 2013.
[46] J. Jamaati, A. R. Farahinia, H. Niazmand, Investigation of Mixing in Electroosmotic Micromixers using Nernst-Planck Equations, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 4, pp. 203-213, 2015. (In Persian)
[47] M. Mondal, R. P. Misra, S. De, Combined electroosmotic and pressure driven flow in a microchannel at high zeta potential and overlapping electrical double layer, *International Journal of Thermal Sciences,* Vol. 86, pp. 48-59, 2014 .
[48] M. Reshadi, M. H. Saidi, Analytical study of cross stream diffusion for combined electroosmotic and Poiseuille flows in rectangular microchannels: inclusion of EDL effect, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 4, pp. 167-176, 2015. (In Persian)
[49] E. B. Cummings, S. K. Griffiths, R. H. Nilson, P. H. Paul, Conditions for similitude between the fluid velocity and electric field in electroosmotic flow, *Anal Chem,* Vol. 72, No. 11, pp. 2526-2532, 2000
[50] J. G. Santiago, Electroosmotic Flows in Microchannels with Finite Inertial and Pressure Forces, *Analytical Chemistry,* Vol. 73, No. 10, pp. 2353-2365, 2001.
[51] J. M. Chen, T. L. Horng, W. Y .Tan, Analysis and measurements of mixing in pressure-driven microchannel flow, *Microfluidics and Nanofluidics,* Vol. 2, No. 6, pp. 455-469, 2006.
[52] J. Ou, G. Moss, J. Rothstein, Enhanced mixing in laminar flows using ultrahydrophobic surfaces, *Physical Review E,* Vol. 76, No. 1, pp. 016304, 2007.
[53] J. Zhang, G. He, F. Liu, Electro-osmotic flow and mixing in heterogeneous microchannels, *Physical Review E,* Vol. 73, No. 5, pp. 056305, 2006.
[54] J. Jamaati, H. Niazmand, Investigation Of Electrokinetic Mixing Performance Of Heterogeneous Microchannel, *Sharif Mechanical Engineering Journal,* Vol. 29, No. 1, pp. 77-85, 2011.
[26] A. Alam, A. Afzal, K. Y. Kim, Mixing performance of a planar micromixer with circular obstructions in a curved microchannel, *Chemical Engineering Research and Design,* Vol. 92, No. 3, pp. 423-434, 2014.
[27] S. Bhattacharyya, S. Bera, Combined electroosmosis-pressure driven flow and mixing in a microchannel with surface heterogeneity, *Applied Mathematical Modelling,* 2015.
[28] R. Kamali, A. Mansoorifar, M. K. Dehghan Manshadi, Effect of baffle geometry on mixing performance in the passive micromixer, *Transactions of Mechanical Engineering,* Vol. 38, No. M2, pp. 351-360, 2014.
[29] S. Hardt, H. Pennemann, F. Schönfeld, Theoretical and experimental characterization of a low-Reynolds number split-and-recombine mixer, *Microfluidics and Nanofluidics,* Vol. 2, No. 3, pp. 237-248, 2006.
[30] A .Ahmadian Yazdi, A. Sadeghi, M. H. Saidi, Electrokinetic mixing at high zeta potentials: Ionic size effects on cross stream diffusion, *Journal of Colloid and Interface Science,* Vol. 442, pp. 8-14, 2015.
[31] S. S. Hsieh, J. W. Lin, J. H. Chen, Mixing efficiency of Y-type micromixers with different angles, *International Journal of Heat and Fluid Flow,* Vol. 44, pp. 130-139, 2013.
[32] M. Khosravi Parsa, F. Hormozi, D. Jafari, Mixing enhancement in a passive micromixer with convergent–divergent sinusoidal microchannels and different ratio of amplitude to wave length, *Computers & Fluids,* Vol. 105, pp. 82-90, 2014.
[33] N. Solehati, J. Bae, A. P. Sasmito, Numerical investigation of mixing performance in microchannel T-junction with wavy structure, *Computers & Fluids,* Vol. 96, pp. 10-19, 2014.
[34] W. L. W. Hau, D. W. Trau, N. J. Sucher, M. Wong, Y. Zohar, Surface-chemistry technology for microfluidics, *J. of Micromechanics and Microengineering,* Vol. 13, No. 2, pp. 272-278, 2003.
[35] A. Stroock, M. Weck, D. Chiu, W. Huck, P. Kenis, R. Ismagilov, G. Whitesides, Patterning Electro-osmotic Flow with Patterned Surface Charge, *Physical Review Letters,* Vol. 84, No. 15, pp. 3314-3317, 2000.
[36] R. B. M. Schasfoort, S. Schlautmann, J. Hendrikse, A. van den Berg, Field-Effect Flow Control for Microfabricated Fluidic Networks, *Science,* Vol. 286, No. 5441, pp. 942-945, 1999.
[37] N. Loucaides, A. Ramos, G. E. Georghiou, Configurable AC electroosmotic pumping and mixing, *Microelectronic Engineering,* Vol. 90, pp. 47–50, 2012.
[38] S. Ganguly, S. Sarkar, T. Kumar Hota, M. Mishra, Thermally developing combined electroosmotic and pressure-driven flow of nanofluids in a microchannel under the effect of magnetic field, *Chemical Engineering Science,* Vol. 126, pp. 10-21, 2015.
[39] S. Ebrahimi, A. Hasanzadeh-Barforoushi, A. Nejat, F. Kowsary, Numerical study of mixing and heat transfer in mixed electroosmotic/pressure driven flow through T-shaped microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer,* Vol. 75 ,pp. 565-580, 2014.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.45.3]