



بررسی راندمان اختلاط در جریان الکترواسموتیک با زتاپتانسیل غیریکنواخت دیواره

مرتضی دلاکه نژاد¹، سید علی میربزرگی^{2*}، حمید نیازمند³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

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

* بیرجند، صندوق پستی 97175/615 samirbozorgi@birjand.ac.ir

چکیده

در این مقاله، راندمان اختلاط در جریان الکترواسموتیک درون یک ریزمخلوطگر با زتاپتانسیل غیریکنواخت دیواره برای حالت‌های مختلف به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. هندسه جریان یک مجرای دوبعدی بین دو صفحه موازی است و جریان مورد نظر تراکم ناپذیر، پایدار و آرام فرض شده است. معادلات حاکم بر مسأله، شامل معادلات میدان‌های پتانسیل الکتریکی داخلی و خارجی، معادلات توزیع غلظت یون‌های مثبت و منفی (ارنست-پلانک)، معادله‌ی غلظت گونه‌ها و معادلات اندازه حرکت اصلاح شده (ناویر-استوکس) برای میدان جریان سیال به روش عددی حجم محدود حل شده است. به منظور اعتبارسنجی برنامه عددی، نتایج تحلیلی یک جریان ایده‌آل الکترواسموتیک که در آن سراسر دیواره‌ها باردار می‌باشد، با نتایج حل عددی به‌دست آمده مقایسه شده است. نتایج عددی نشان می‌دهد که با تغییرات زتاپتانسیل دیواره در ناحیه میانی به‌صورت خطی-صعودی، خطی-نزولی و سهموی برای جریان در یک ریزمجره، راندمان اختلاط نسبت به حالت زتا ثابت افزایش می‌یابد. برای دو حالت تغییر خطی زتاپتانسیل، راندمان اختلاط به 86 درصد و برای تغییر سهموی زتاپتانسیل به 75 درصد افزایش می‌یابد. این در حالی است که با ثابت بودن زتاپتانسیل دیواره در ناحیه میانی، حداکثر راندمان اختلاط 64 درصد می‌باشد. در حالتی که تنها دیواره بالایی در ناحیه میانی دارای زتاپتانسیل می‌باشد، نتایج نشان داد که یک ناحیه گردابه‌ای در جریان ایجاد می‌گردد. این ناحیه گردابه‌ای باعث می‌شود تا راندمان اختلاط به حداکثر (100 درصد) برسد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 11 دی 1396
پذیرش: 28 اسفند 1396
ارائه در سایت: 24 فروردین 1397

کلید واژگان:

ریزمخلوطگر

شبیه‌سازی عددی

ارنست-پلانک

ناویر-استوکس

Investigation of mixing efficiency in electroosmotic flow with non-uniform wall Zeta potential

Morteza Dallakehnejad¹, Seyed Ali Mibozorgi^{1*}, Hamid Niazmand²

1- Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

* P.O.B. 97175/615 Birjand, Iran, samirbozorgi@birjand.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 01 January 2018
Accepted 19 March 2018
Available Online 13 April 2018

Keywords:

Micromixer
Numerical Simulation
Nernst-Planck
Navier-Stokes

ABSTRACT

In this paper, the mixing efficiency in electroosmotic flow inside a micromixer is simulated numerically for different states of non-uniform wall Zeta potential. The geometry of flow is a two-dimensional channel between two parallel plates and the flow is assumed to be incompressible, steady and laminar. The governing equations, including a Laplace equation for the distribution of external electric potential, a Poisson equation for the distribution of electric double layer potential, the Nernst-Planck equation for the distribution of ions concentration, the species convection-diffusion equation, the modified Navier-Stokes equations for the fluid flow field, have been solved using the finite volume numerical method. In order to validate the numerical results, the analytical results of an ideal electroosmotic flow in where throughout the walls are charged is compared with the obtained numerical results. The numerical results show that, by linear-ascending, linear-descending and parabolic changes of the wall Zeta potential at the middle length of the microchannel, the mixing efficiency increases compared to a constant Zeta potential. For the cases of linear changing of Zeta potential, the mixing efficiency increases to 86% and for parabolic change of Zeta potential the mixing efficiency increases to 75%, while the Zeta potential is constant at middle length the maximum of mixing efficiency increases to 64%. In the case that only the upper wall at middle length is charged, the results show that a vortex region is created in the flow. This vortex region causes a maximum (100%) mixing efficiency.

1- مقدمه

این زمینه رشد چشم‌گیری پیدا نموده است. این سیستم‌ها در زمینه‌های مختلف مهندسی نظیر درمان‌های بیولوژیکی، تحلیل‌های شیمیایی و خنک‌کاری دستگاه‌های الکترونیکی کاربرد دارند. ایده اصلی در این سیستم‌های ریز، انجام تمام کارها روی یک تراشه است. از این‌رو، تمام اجزای لازم برای یک تحلیل علمی، داخل یک تراشه کوچک مونتاژ شده‌اند. یکی از

امروزه ساخت ابزارها در ابعاد کوچک، بهانه‌ی جدیدی برای تحقیقات گسترده‌ی علمی در زمینه‌ی سیستم‌های ریزسیالی¹ و ریزالکترومکانیکی² شده است. به طوری که در اغلب دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی، تحقیقات در

¹ Microfluidics

² Micro Electro Mechanical System (MEMS)

اختلاط در جریان الکترواسموتیک با زاپتانسیل ناهمگن می‌باشد، در ادامه تحقیقات گذشته در این زمینه مرور می‌شود.

بیدیس و همکاران [14]، اثرات ناهمگنی زاپتانسیل دیواره را به صورت تجربی به منظور افزایش راندمان اختلاط در یک ریزمخلوط‌گر الکتروجنیسی غیر فعال مورد بررسی و نتایج حاصل را به طور عددی نیز صحت‌سنجی نمودند. اثرات ناهمگنی مورد استفاده در کار آنها به صورت زاپتانسیل وصله‌ای اعمال شده است به طوری که در هر وصله زاپتانسیل مقداری ثابت و نامتغیر داشته است. لو و همکاران [15]، با استفاده از ناهمگنی زاپتانسیل دیواره و میدان الکتریکی متناوب (AC) راندمان اختلاط را در جریان الکتروجنیسی به طور عددی تحلیل نمودند. آنها از مدل تقریبی بولتزمن در توصیف توزیع یون‌ها در لایه دوگانه الکتریکی استفاده کردند. اثرات ناهمگنی مورد استفاده در کار آنها به صورت زاپتانسیل وصله‌ای با مقدار ثابت در هر وصله پیاده‌سازی شده است. جین و نانداکومار [16]، در یک کار عددی از یک الگوی بهینه شده بار سطحی ناهمگن به منظور بهبود اختلاط در جریان الکتروجنیسی استفاده نمودند. آنها ناهمگنی را با تعداد زیادی وصله در حالت‌های مختلف ایجاد کردند که در هر وصله مقدار زاپتانسیل ثابت می‌باشد. جماعتی و همکاران [17، 18]، اختلاط در ریزمخلوط‌گرهای الکترواسموتیکی را با حل معادلات ارنست-پلانک به صورت دو و سه بعدی بررسی نمودند. آنها اثرات ناهمگنی زاپتانسیل دیواره‌ها را به طور وصله‌ای به منظور افزایش راندمان اختلاط بررسی نمودند که مقدار زاپتانسیل در هر وصله ثابت در نظر گرفته شده است. نایاک [19]، اثرات ناهمگنی زاپتانسیل دیواره را در جریان الکترواسموتیک به منظور افزایش راندمان اختلاط با استفاده از مدل ارنست-پلانک به طور عددی شبیه‌سازی نمود. او این اثرات ناهمگنی را به صورت وصله‌ای با چیدمان متقارن و نامتقارن روی دیواره ریزمجرا اعمال کرد، به طوری که مقدار زاپتانسیل در هر وصله ثابت بود. افسری و همکاران [20]، راندمان اختلاط در یک ریزمخلوط‌گر غیرفعال الکترواسموتیکی با توزیع ناهمگن بارهای دیواره را به روش عددی مورد بررسی قرار دادند. اثرات ناهمگنی دیواره به صورت وصله‌ای و با مقدار زاپتانسیل ثابت در هر وصله اعمال شده است. نتایج آنها نشان داد که با توزیع مناسب بارهای ناهمگن سطحی می‌توان راندمان اختلاط را تغییر و کنترل نمود.

از جمله مهم‌ترین موضوعاتی که در بحث اختلاط الکترواسموتیک می‌توان به آن اشاره کرد، استفاده از زاپتانسیل ناهمگن در سطوح ریزمجرا می‌باشد. مرور مطالعات گذشته نشان می‌دهد که ناهمگنی مورد استفاده در کارهای گذشته اغلب به صورت وصله‌ای اعمال شده است به طوری که مقدار زاپتانسیل در طول هر وصله ثابت بوده و از یک وصله به وصله دیگر تغییر کرده است. این در حالی است که لزوماً مقدار زاپتانسیل روی هر وصله ثابت نیست. در کار حاضر، ناهمگنی‌ها حتی در طول وصله‌ها می‌تواند تغییرات خطی-صعودی، خطی-نزولی و سهموی داشته باشد که تاکنون در ریزمخلوط‌گر الکترواسموتیک به آن پرداخته نشده است.

بعلاوه در مطالعات فوق مشاهده می‌شود که روابط مختلفی برای محاسبه راندمان اختلاط توسط پژوهشگران ارائه شده است، در صورتی که این روابط با یکدیگر مقایسه نشده‌اند. در مقاله حاضر ضمن بررسی اثرات زاپتانسیل غیر یکنواخت در راندمان اختلاط، روابط راندمان نیز با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

2- تعریف مسأله

اجزای اساسی این گونه ریزابزارها در حوزه سیالات، ریزمجراها¹ هستند. عموماً مجراهایی با طول مشخصه بین 1 تا 100 میکرومتر، ریزمجرا نامیده می‌شوند که معمولاً نسبت سطح به حجم آن‌ها زیاد است [1، 2].

از جمله مباحث چالش برانگیز این حوزه از علوم مهندسی نحوه ایجاد جریان در ریزمجراها می‌باشد. ایجاد جریان در ریزمجراها اگرچه موضوع تازه‌ای نیست اما به دلیل کاربردهای مهم آن در زمینه‌های مختلف هر روز بر اهمیت آن افزوده می‌شود. برای مثال، اختلاط گونه‌ها، جداسازی اجزای زیستی، انتقال حرارت و تحویل دارو از جمله کاربردهایی هستند که پژوهشگران را به مطالعه جریان در ریزمجراها علاقه‌مند کرده است [3].

جریان الکترواسموتیک (ای‌اواف)² به عنوان یک روش پمپاژ عالی، برای انتقال مواد شیمیایی و زیستی، به دلیل مزایای قابل توجه نسبت به جریان فشار-محرك³، به طور گسترده بکار می‌رود. بنابراین در حوزه سیستم‌های ریزالکترومکانیکی نظیر ریزتراشه‌ها، ریزمخلوط‌گرها و ریزپمپ‌ها، از جریان الکترواسموتیک به عنوان عامل حرکت سیال استفاده می‌شود. منشأ تحریک سیال در جریان الکترواسموتیک، نیروی لورنتس⁴ است که از اعمال میدان الکتریکی خارجی بر لایه دوگانه الکتریکی (ای‌دی‌ال)⁵ حاصل می‌گردد. لایه دوگانه الکتریکی، ناحیه‌ای از سیال در مجاورت دیواره مجرا است که به دلیل عدم توازن یون‌های مثبت و منفی باردار است. حرکت سیال در ناحیه ای‌دی‌ال عامل اصلی ایجاد جریان ای‌اواف با پروفیل سرعت تخت است [4].

فارغ از بحث نحوه تولید جریان، اختلاط سیالی⁶ یک موضوع اساسی در ریزتراشه‌ها می‌باشد. با توجه به روش و نحوه اختلاط، ریزمخلوط‌گرها عمدتاً به دو دسته فعال⁷ و غیرفعال⁸ طبقه‌بندی می‌شوند. در ریزمخلوط‌گرهای فعال از یک عامل تحریک خارجی برای ایجاد اغتشاش، علاوه بر انرژی پمپاژ سیال استفاده می‌شود. در این نوع از ریزمخلوط‌گرها، عامل اغتشاش خارجی می‌تواند یک میدان الکتریکی [5]، میدان مغناطیسی [6]، میدان حرارتی [7]، سرعت نوسانی سیال در ورودی و غیره باشد [3]. بعلاوه، از ویژگی‌های دیگر ریزمخلوط‌گرهای فعال نسبت به نوع غیر فعال، آن است که در این ریزمخلوط‌گرها راندمان اختلاط با سهولت بیشتری افزایش می‌یابد ولی پیچیدگی ساخت آن زیاد می‌باشد.

این در حالی است که در ریزمخلوط‌گرهای غیرفعال برای ایجاد اغتشاش از یک نیروی خارجی استفاده نمی‌شود و تنها با پیچ و تاب دادن هندسه جریان باعث ایجاد اختلاط می‌شوند. بعلاوه به دلیل آرام بودن جریان، اختلاط در آنها اساساً بر پخش مولکولی و حرکت توده‌ای بی‌نظم استوار است. این امر باعث شده است که افزایش راندمان اغلب کند و پرهزینه باشد و از جمله راه‌های بهبود راندمان، افزایش سطح تماس بین دو سیال و کاهش مسیر پخش میان آنها باشد. از نمونه‌های مهم ریزمخلوط‌گرهای غیرفعال می‌توان به ریزمخلوط‌گرهای T و Y شکل اشاره نمود [8]. در ادامه مطالعات مربوط به حوزه جریان الکترواسموتیک و پدیده اختلاط به طور خلاصه مرور می‌شود.

تاکنون محققان جریان الکترواسموتیک را ماهیتاً [9، 10]، و از منظرهای مختلف نظیر ترکیب جریان الکترواسموتیک و جریان فشار-محرك [11، 12]، جریان الکترواسموتیک تحت تأثیر زاپتانسیل متغیر [13]، مورد مطالعه و بررسی قرار داده‌اند. با توجه به اینکه موضوع تحقیق حاضر، بررسی راندمان

¹ Microchannels

² Electroosmotic Flow (EOF)

³ Pressure-Driven Flow

⁴ Lorentz force

⁵ Electric Double Layer (EDL)

⁶ Fluid Mixing

⁷ Active

⁸ Passive

$$\vec{F}_L = \rho_e \vec{E} \quad (3)$$

$$\vec{E} = -\nabla(\varphi + \psi) \quad (4)$$

$$\rho_e = ze(n^+ - n^-) \quad (5)$$

که در آن $\vec{E}$ قدرت میدان الکتریکی کلی با واحد (V/m) ، ρ_e چگالی جریان الکتریکی با واحد کولن بر متر مکعب، z عدد والانس بار، e بار الکتریکی بر حسب کولن و n^+ و n^- ، غلظت یون‌های مثبت و منفی با واحد $(ions/m^3)$ می‌باشد.

برای تعیین (φ) و (ψ) در معادله (4) باید معادلات خاص آنها حل شود. معادله حاکم بر میدان پتانسیل الکتریکی خارجی (φ) ، یک معادله لاپلاس به صورت زیر است.

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (6)$$

که در آن φ میدان الکتریکی بر حسب (V) می‌باشد. از طرف دیگر پتانسیل الکتریکی (ψ) حاصل از برهم کنش یون‌های مثبت و منفی درون لایه دوگانه الکتریکی توسط معادله پواسون زیر بیان می‌شود.

$$\nabla^2 \psi = -\frac{\rho_e}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (7)$$

که در آن ψ پتانسیل الکتریکی درون لایه دوگانه الکتریکی بر حسب (V) ، ϵ_r ثابت دی‌الکتریک محلول و ϵ_0 ضریب گذردهی خلأ با واحد $(C/V \cdot m)$ می‌باشد.

در صورت معلوم بودن مقادیر (φ) و (ψ) ، غلظت یون‌های مثبت و منفی با حل معادلات انتقال ارنست-پلانک (8) و (9) به دست می‌آیند.

$$\vec{V} \cdot \nabla n^+ = D_i^+ \nabla^2 n^+ + D_i^+ \left(\frac{ze}{k_B T} \right) \nabla \cdot (n^+ \nabla(\varphi + \psi)) \quad (8)$$

$$\vec{V} \cdot \nabla n^- = D_i^- \nabla^2 n^- - D_i^- \left(\frac{ze}{k_B T} \right) \nabla \cdot (n^- \nabla(\varphi + \psi)) \quad (9)$$

که در آن D_i^+ و D_i^- ضرایب پخش یون‌های مثبت و منفی با واحد (m^2/s) ، T دمای مطلق و k_B ثابت بولتزمن² با واحد (J/K) می‌باشد. عبارت اول سمت راست معادلات (8) و (9)، پخش ناشی از گرادیان غلظت‌ها است و عبارت پس از آن، پخش ناشی از میدان الکتریکی می‌باشد که اصطلاحاً به آن جمله هجرتی³ گفته می‌شود.

در حالت توسعه‌یافته یونی و هیدرودینامیکی، معادلات (8) و (9)، پاسخی نمایی معروف به توزیع بولتزمن خواهند داشت که به صورت زیر می‌باشد.

$$n^+ = n_0 e^{-(ze/k_B T)\psi} \quad (10)$$

$$n^- = n_0 e^{+(ze/k_B T)\psi} \quad (11)$$

بنابراین طبق رابطه (5) توزیع چگالی بار خالص الکتریکی برای یک محلول متقارن در حالت توسعه‌یافته یونی به صورت زیر خواهد بود.

$$\rho_e = -2zen_0 \sinh[(ze/k_B T)\psi] \quad (12)$$

با چنین فرض ساده کننده‌ای معادله (7) به معادله‌ای معروفی به نام معادله پواسون-بولتزمن⁴ تبدیل می‌شود که اغلب حل تحلیلی آن با تقریب دیبای-هوکل⁵ امکان پذیر است.

لازم به ذکر است در مقاله حاضر، به دلیل غیریکنواخت بودن زتاپتانسیل دیواره‌ها، جریان الکترواسموتیک به لحاظ یونی و هیدرودینامیکی توسعه‌یافته است و لذا بایستی برای یافتن توزیع غلظت یون‌های مثبت و منفی معادلات ارنست-پلانک حل شوند.

طرح شماتیک جریان الکترواسموتیک بین دو صفحه موازی (به عمق واحد b) در شکل 1 نمایش داده شده است که در آن عرض ریزمجرا H بسیار کمتر از طول ریزمجرا L ، است و L_z طول لایه دوگانه الکتریکی، L_1 و L_2 طول‌های ناحیه ورودی و خروجی، E قدرت میدان الکتریکی اعمالی در ابتدا و انتهای ریزمجرا، φ_1 ولتاژ خارجی در ورودی، φ_2 ولتاژ خارجی در خروجی و ζ مقدار پتانسیل سطح دیواره (اغلب منفی) می‌باشد. مبدأ دستگاه مختصات روی ابتدای صفحه پایینی در نظر گرفته شده است. با توجه به منفی بودن پتانسیل ζ و جهت چپ به راست میدان الکتریکی E ، جهت جریان الکترواسموتیک در راستای مثبت x برقرار خواهد بود. در پژوهش حاضر همواره $L = 10 \times H$ ، $L_1 = L_2 = 2 \times H$ ، $\varphi_2 = 0$ ، $\varphi_1 = L \times E_{Ref}$ و $L_z = 6 \times H$ در نظر گرفته شده است.

3- معادلات حاکم

در این بخش ابتدا معادلات حاکم بر جریان الکترواسموتیک یک سیال نیوتنی درون یک ریزمخلوط‌گر برای وضعیت تراکم‌ناپذیر و دائم ارائه می‌گردد و سپس معادله حاکم بر غلظت گونه‌ها به منظور بررسی پدیده اختلاط و راندمان مربوطه معرفی خواهد شد.

3-1- معادلات حاکم بر جریان سیال

معادلات حاکم بر جریان سیال در یک ریزمخلوط‌گر الکترواسموتیک، شامل معادلات پیوستگی و اندازه حرکت خطی به شرح زیر می‌باشد.

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

$$\rho(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \vec{F}_L \quad (2)$$

که در آن P فشار با واحد (N/m^2) ، $\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j}$ بردار سرعت جریان در حالت دوبعدی با واحد (m/s) ، ρ چگالی سیال با واحد (kg/m^3) ، μ لزجت دینامیکی سیال با واحد $(N \cdot s/m^2)$ و $\vec{F}_L$ نیروی حجمی لورنتس است که در این تحقیق عامل حرکت سیال در جریان الکترواسموتیک مورد نظر محسوب می‌شود.

در معادلات فوق، فرض‌هایی از جمله: حالت دوبعدی و پایدار، چشم‌پوشی از اثرات گرانشی و شناوری، صرف‌نظر از واکنش‌های شیمیایی در محلول الکترولیت و متقارن بودن محلول الکترولیت (برابری عدد والانس¹ یون‌های مثبت و منفی)، در نظر گرفته می‌شوند. برای تعیین نیروی لورنتس $(\vec{F}_L)$ از معادله الکترومغناطیس زیر استفاده می‌شود [21].

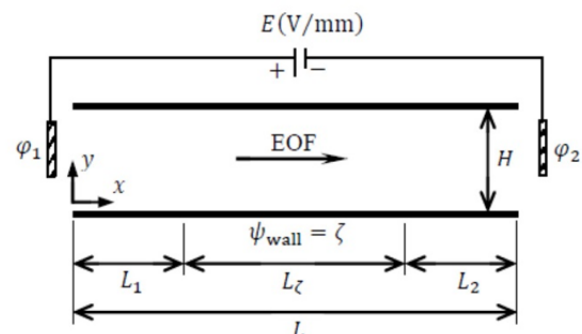


Fig. 1 Schematic of a two-dimensional Electroosmotic flow between two parallel plates

شکل 1 شماتیک یک جریان دوبعدی الکترواسموتیک بین دو صفحه موازی

² Boltzmann Constant

³ Migration

⁴ Poisson-Boltzmann Equation

⁵ Debye-Huckel

¹ Valance Number

$$\frac{\partial(\bar{u}\bar{n}^+)}{\partial\bar{x}} + \frac{\partial(\bar{v}\bar{n}^+)}{\partial\bar{y}} = \frac{1}{\text{ReSc}^+} \left(\frac{\partial}{\partial\bar{x}} \left(\frac{\partial\bar{n}^+}{\partial\bar{x}} \right) + \frac{\partial}{\partial\bar{y}} \left(\frac{\partial\bar{n}^+}{\partial\bar{y}} \right) + \frac{\partial}{\partial\bar{x}} \left[\bar{n}^+ \left(A \frac{\partial\bar{\varphi}}{\partial\bar{x}} + \frac{\partial\bar{\psi}}{\partial\bar{x}} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial\bar{y}} \left[\bar{n}^+ \left(A \frac{\partial\bar{\varphi}}{\partial\bar{y}} + \frac{\partial\bar{\psi}}{\partial\bar{y}} \right) \right] \right) \quad (21)$$

$$\frac{\partial(\bar{u}\bar{n}^-)}{\partial\bar{x}} + \frac{\partial(\bar{v}\bar{n}^-)}{\partial\bar{y}} = \frac{1}{\text{ReSc}^-} \left(\frac{\partial}{\partial\bar{x}} \left(\frac{\partial\bar{n}^-}{\partial\bar{x}} \right) + \frac{\partial}{\partial\bar{y}} \left(\frac{\partial\bar{n}^-}{\partial\bar{y}} \right) - \frac{\partial}{\partial\bar{x}} \left[\bar{n}^- \left(A \frac{\partial\bar{\varphi}}{\partial\bar{x}} + \frac{\partial\bar{\psi}}{\partial\bar{x}} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial\bar{y}} \left[\bar{n}^- \left(A \frac{\partial\bar{\varphi}}{\partial\bar{y}} + \frac{\partial\bar{\psi}}{\partial\bar{y}} \right) \right] \right) \quad (22)$$

که در آن $A = E_{\text{Ref}}H/(k_B T/ze)$ پارامتر بی‌بعد، بیان کننده‌ی نسبت ولتاژ اعمالی خارجی به ولتاژ پایه و $\text{Sc}^\pm = \mu/\rho D_i^\pm$ عدد اشمیت^۵ یون‌ها می‌باشد.

$$\bar{u} \frac{\partial\bar{C}}{\partial\bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial\bar{C}}{\partial\bar{y}} = \frac{1}{\text{ReSc}} \left(\frac{\partial^2\bar{C}}{\partial\bar{x}^2} + \frac{\partial^2\bar{C}}{\partial\bar{y}^2} \right) \quad (23)$$

که در آن $\text{Sc} = \mu/\rho D_s$ عدد اشمیت گونه می‌باشد.

4- شرایط مرزی

شرایط مرزی لازم برای حل معادلات حاکم بر مسأله، به صورت روابط (24) تا (26) در نظر گرفته شده است.

مرز ورودی ریزمجرا:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \varphi_{in}; \quad \frac{\partial\psi}{\partial x} = 0; \quad n^\pm = n_0; \quad \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \\ v &= 0; \quad P = 0; \quad C = \begin{cases} 0 & 0 \leq y \leq H/2 \\ 1 & H/2 \leq y \leq H \end{cases} \end{aligned} \quad (24)$$

مرز خروجی ریزمجرا:

$$\begin{aligned} \varphi_2 &= 0; \quad \frac{\partial\psi}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial n^\pm}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial x} &= 0; \quad P = 0; \quad \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad (25)$$

دیواره‌های بالا و پایین ریزمجرا:

$$\begin{aligned} \frac{\partial\varphi}{\partial y} &= 0; \quad \psi = \psi(x); \quad n^\pm = n_0 \exp \left[\mp \left(\frac{ze}{k_B T} \right) \psi(x) \right] \\ u &= 0; \quad v = 0; \quad \frac{\partial P}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial C}{\partial y} = 0 \end{aligned} \quad (26)$$

5- معیار محاسبه‌ی راندمان اختلاط گونه‌ها

برای بررسی کمی میزان اختلاط، از راندمان اختلاط (ε_m) برای ریزمخلوط‌گرها استفاده می‌شود که در هر مقطع از جریان به صورت دو رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$\varepsilon_m = \frac{1 - \sigma_w}{1 - \sigma_{w,\min}} \quad (27)$$

$$\varepsilon_m = 1 - \frac{\sigma_w}{\sigma_{w,\max}} \quad (28)$$

که در آن σ_w مقدار انحراف معیار غلظت‌ها در هر مقطع (معرف میزان ناهمگنی در آن مقطع)، $\sigma_{w,\max}$ و $\sigma_{w,\min}$ یک مقدار مرجع است. در صورتی که اختلاط کامل مورد نظر باشد، $\sigma_{w,\max} = 0.5$ و $\sigma_{w,\min} = 0$ می‌باشد و لذا مخرج کسر معادلات (27) و (28) به ترتیب برابر 1 و 0.5

3-2- معادله حاکم بر غلظت گونه‌ها

اگر دو مایع که هر یک دارای گونه‌های شیمیایی یکسان اما با غلظت متفاوت باشند را به منظور اختلاط از درون یک ریزمجرا عبور دهیم، توزیع غلظت گونه‌ها در مخلوط حاصله را می‌توان با حل معادله انتقال گونه‌ها^۱ به شکل زیر پیدا نمود.

$$\vec{V} \cdot \nabla C = D_s \nabla^2 C \quad (13)$$

که در آن C غلظت گونه‌ها و D_s ضریب پخش گونه با واحد (m^2/s) می‌باشد.

3-3- بی‌بعد سازی معادلات حاکم

به منظور سهولت در ارائه نتایج، عمومیت بخشیدن به صورت مسأله و تشخیص پارامترهای بی‌بعد، معادلات حاکم با تعریف پارامترهای بدون بعد مناسب به صورت زیر بی‌بعد می‌شوند.

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{x}{H}, \quad \bar{y} = \frac{y}{H}, \quad \bar{u} = \frac{u}{U_{\text{Ref}}}, \quad \bar{v} = \frac{v}{U_{\text{Ref}}}, \quad \bar{P} = \frac{P}{\rho U_{\text{Ref}}^2}, \\ \bar{\rho}_e &= \frac{\rho_e}{ze n_0}, \quad \bar{\varphi} = \frac{\varphi}{E_{\text{Ref}} H}, \quad \bar{n}^\pm = \frac{n^\pm}{n_0}, \quad U_{\text{Ref}} = \mu_{\text{EO}} E_{\text{Ref}}, \\ \mu_{\text{EO}} &= -\frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 \zeta}{\mu}, \quad \bar{\psi} = \frac{\psi}{(k_B T/ze)}, \quad \bar{C} = \frac{C}{C_{\text{Ref}}} \end{aligned} \quad (14)$$

که در آن U_{Ref} سرعت مرجع (سرعت مشخصه جریان الکترواسموتیک یا سرعت هلمهولتز-اسمولووکفسکی^۲، C_{Ref} یک غلظت مرجع، μ_{EO} قابلیت حرکت الکترواسموتیک^۳، E_{Ref} قدرت میدان الکتریکی مبنا، $n_0 = C_0 N_A$ غلظت توده‌ای یون‌ها در محلول الکترولیت به ازاء واحد حجم (ions/m^3)، N_A عدد آووگادرو با واحد ($1/\text{mol}$) و C_0 غلظت مولی یون‌ها با واحد (kmol/m^3) می‌باشد. نتیجه بی‌بعد سازی معادلات در مختصات دوبعدی به صورت زیر است.

$$\frac{\partial\bar{u}}{\partial\bar{x}} + \frac{\partial\bar{v}}{\partial\bar{y}} = 0 \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\bar{u}\bar{u})}{\partial\bar{x}} + \frac{\partial(\bar{u}\bar{v})}{\partial\bar{y}} &= -\frac{\partial\bar{P}}{\partial\bar{x}} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2\bar{u}}{\partial\bar{x}^2} + \frac{\partial^2\bar{u}}{\partial\bar{y}^2} \right) \\ &\quad - B\bar{\rho}_e \left(A \frac{\partial\bar{\varphi}}{\partial\bar{x}} + \frac{\partial\bar{\psi}}{\partial\bar{x}} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\bar{u}\bar{v})}{\partial\bar{x}} + \frac{\partial(\bar{v}\bar{v})}{\partial\bar{y}} &= -\frac{\partial\bar{P}}{\partial\bar{y}} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2\bar{v}}{\partial\bar{x}^2} + \frac{\partial^2\bar{v}}{\partial\bar{y}^2} \right) \\ &\quad - B\bar{\rho}_e \left(A \frac{\partial\bar{\varphi}}{\partial\bar{y}} + \frac{\partial\bar{\psi}}{\partial\bar{y}} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

که در آن $B = n_0 k_B T / \rho U_{\text{Ref}}^2$ پارامتر بی‌بعد، بیان کننده‌ی نسبت فشار یونی به فشار دینامیکی و $\text{Re} = \rho U_{\text{Ref}} H / \mu$ عدد رینولدز^۴ می‌باشد.

$$\frac{\partial^2\bar{\varphi}}{\partial\bar{x}^2} + \frac{\partial^2\bar{\varphi}}{\partial\bar{y}^2} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial^2\bar{\psi}}{\partial\bar{x}^2} + \frac{\partial^2\bar{\psi}}{\partial\bar{y}^2} = -\frac{\kappa^2\bar{\rho}_e}{2} \quad (19)$$

$$\bar{\rho}_e = (\bar{n}^+ - \bar{n}^-) \quad (20)$$

که در آن $K = (2z^2 e^2 n_0 / \varepsilon_r \varepsilon_0 k_B T)^{1/2}$ به نام پارامتر دیبای-هوکل و عکس ضخامت لایه دوگانه الکتریکی با واحد ($1/\text{m}$) می‌باشد و $\kappa = KH$ پارامتر لایه دوگانه الکتریکی یا عدد ای‌دی‌ال نامیده می‌شود.

^۱ Species Transport Equation

^۲ Helmholtz-Smoluchowski Velocity

^۳ Electroosmotic Mobility

^۴ Reynolds Number

^۵ Schmidt Number

بر واحد عمق را محاسبه می‌کند ($\dot{m}_{\text{Ana}} = 1.8750 \times 10^{-5}$). نزدیکتر می‌شوند. در این جدول، انحراف مقادیر نرخ جریان بر حسب درصد به صورت $D_m = (|\dot{m} - \dot{m}_{\text{Ana}}|/\dot{m}_{\text{Ana}}) \times 100$ محاسبه شده است. در نتیجه، استفاده از شبکه با تعداد نقاطی در حدود 150×90 می‌تواند یک حل قابل قبول و مستقل از نقاط شبکه را فراهم نماید لازم به ذکر است که در مسأله اصلی مورد نظر در این پژوهش هر جا که لازم باشد از تعداد گره‌های بیشتر نیز استفاده می‌شود.

$$\dot{m}_{\text{Ana}} = \rho U_{\text{Ref}} H \left(1 - \frac{\tanh(\kappa/2)}{\kappa/2} \right) \quad (32)$$

به منظور اعتبارسنجی نتایج نیز، یک جریان ایده‌آل الکترواسموتیک بین دو صفحه موازی که در آن سراسر دیواره‌ها باردار می‌باشد، شبیه‌سازی شده و نتایج حل عددی این جریان با یک حل تحلیلی مقایسه شده است. در این حالت جریان از نظر غلظت یون‌های مثبت و منفی، سرعت و پتانسیل الکتریکی کاملاً توسعه یافته است. بعلاوه نسبت طول به عرض ریزمجرا $L/H = 5$ و مقادیر $\kappa = 16$ ، $\kappa = 32$ ، $\kappa = 100$ ، عدد رینولدز $Re = 0.02$ و زتاپتانسیل دیواره $\zeta = -25 \text{ mV}$ گزارش می‌شود. معادلات (32) تا (35) به ترتیب حل تحلیلی موجود برای توزیع سرعت، فشار، پتانسیل الکتریکی و غلظت یون‌های مثبت و منفی (توزیع بولتزمن) را نشان می‌دهند [13].

$$\frac{u}{U_{\text{Ref}}} = 1 - \frac{\cosh(\kappa(y/H - 1/2))}{\cosh(\kappa/2)} \quad (33)$$

$$\frac{p}{p_{\text{max}}} = \left[\frac{\cosh(\kappa(y/H - 1/2))}{\cosh(\kappa/2)} \right]^2 \quad (34)$$

$$\frac{\psi}{\zeta} = \frac{\cosh(\kappa(y/H - 1/2))}{\cosh(\kappa/2)} \quad (35)$$

$$\frac{n^{\pm}}{n_0} = \exp\left(\mp \left(\frac{ze}{k_B T}\right) \psi\right) \quad (36)$$

که در آن $P_{\text{max}} = z^2 e^2 n_0 / k_B T$ می‌باشد.

نتایج حاصل از این پژوهش با تکیه بر مقادیر فیزیکی و الکتروشیمیایی معین یک محلول الکترولیت متقارن (KCL) گزارش شده‌اند. این مقادیر در دمای مرجع 298 K مشخص و در جدول 2 آورده شده‌اند.

شکل 2 مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی برای پروفیل سرعت را با حل تحلیلی (معادله 33) نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که نتایج عددی و حل تحلیلی، از تطبیق بسیار خوبی برخوردار است.

لازم به ذکر است که با توجه به محدودیت در تعداد صفحات مقاله، از مقایسه دیگر نتایج عددی میدان‌های فشار، توزیع پتانسیل الکتریکی درون لایه دوگانه الکتریکی و توزیع غلظت یون‌های مثبت و منفی با حل تحلیلی معادلات (34) تا (36) خودداری شده است. این نتایج نیز نشان داد که انطباق کاملی بین نتایج عددی و حل تحلیلی وجود دارد.

7- نتایج عددی و بحث

نتایج عددی در این بخش برای جریان الکترواسموتیک با شرایط مرزی بیان شده توسط معادلات (24) تا (26) و خواص محلول الکترولیت ارائه شده در جدول 2 گزارش می‌شود. عدد رینولدز جریان $Re = 0.02$ ، پارامتر لایه دوگانه الکتریکی $\kappa = 32$ ، زتاپتانسیل دیواره $\zeta = -25 \text{ (mV)}$ و غلظت مولی محلول الکترولیت $C_0 = 10^{-6} \text{ (kmol/m}^3\text{)}$ انتخاب شده است. با توجه به انتخاب دو پارامتر Re و κ به عنوان داده ورودی قابل تنظیم، مقادیر

می‌شود. لازم به ذکر است که محدوده‌ی تغییرات راندمان اختلاط (ε_m) در معادله (27) بین 0.5 تا 1 و در معادله (28) بین 0 تا 1 می‌باشد.

پژوهشگران [22-26]، برای محاسبه انحراف معیار غلظت‌ها در هر مقطع (σ_w) روابط مختلفی پیشنهاد کرده‌اند که در این پژوهش اختلاف آنها بررسی و نتایج حاصله مقایسه خواهد شد.

$$\sigma_w^2 = \frac{\int_0^H [C(y) - C_m]^2 dy}{\int_0^H dy} \quad (29)$$

$$\sigma_w^2 = \frac{\int_0^H u(y) [C(y) - C_m]^2 dy}{\int_0^H u(y) dy} \quad (30)$$

که در آن $C_m = \int_0^H C(y) dy / \int_0^H dy$ مقدار غلظت متوسط در هر مقطع از ریزمجرا می‌باشد. لازم به ذکر است از معادله (29) برای جریان‌های ساده استفاده می‌شود و برای جریان‌های پیچیده و دارای گردابه، جهت پرهیز از ایجاد نوسان در راندمان اختلاط در طول ریزمجرا از معادله (30) استفاده می‌شود.

علاوه بر معادلات فوق که برای محاسبه میزان کارایی اختلاط در جریان‌های مختلف استفاده می‌شود، پژوهشگران [14-16، 19]، از رابطه (31) نیز در بسیاری از مقالات استفاده نموده‌اند.

$$\varepsilon_m = \left(1 - \frac{\int_0^H |C - C_{\infty}| dy}{\int_0^H |C_0 - C_{\infty}| dy} \right) \times 100\% \quad (31)$$

که در آن C_0 غلظت گونه‌ها در حالت کاملاً مخلوط نشده که مقدار آن بین 0 و 1 و C_{∞} غلظت گونه‌ها در حالت کاملاً مخلوط شده که مقدار آن برابر 0.5 می‌باشد. بعلاوه لازم به ذکر است که محدوده‌ی تغییرات راندمان اختلاط (ε_m) در معادله (31) بین 0 تا 1 می‌باشد.

6- روش حل عددی و اعتبارسنجی

در این پژوهش، برای حل عددی معادلات حاکم بر مسأله با شرایط مرزی و مشخصات هندسی بیان شده در بخش‌های قبلی، از روش حجم محدود استفاده شده است. ارتباط بین میدان‌های سرعت و فشار از طریق الگوریتم سیمپل¹ برقرار شده است. برای پرهیز از اثرات احتمالی شطرنجی در میدان‌های فشار و سرعت از شبکه هم مکان با میان یابی رای-چو² [27]، برای مقادیر سرعت روی وجوه استفاده شده است. برای ارزیابی توام جملات پخش و جابجایی در محل وجوه از طرح قاعده توانی³ استفاده شده است. سیستم معادلات جبری با استفاده از الگوریتم ماتریس سه قطری⁴ به روش ضمنی جایگزینی جهات⁵ حل شده و نتایج تا دقت 10^{-16} گزارش گردیده است.

با توجه به غیرخطی بودن معادلات جریان، برای اثبات همگرایی حل، فرایند تکرار حل‌ها را تا مرتبه خطای ماشین ادامه داده و سپس استقلال نتایج حاصله (دبی جریان) از تعداد و موقعیت گره‌ها بررسی شده است. مسأله مورد نظر در این بخش، جریان الکترواسموتیک ایده‌آل درون یک ریزمجرا با بار یکنواخت سطحی در سراسر مجرا می‌باشد. نتایج محاسبه‌ی نرخ جریان جرم در جدول 1 بیانگر این حقیقت است که با افزایش تعداد گره‌ها، نرخ‌های محاسبه شده‌ی جریان جرم بر واحد عمق، $\dot{m} = \int_0^H \rho u(y) dy$ ، به نرخ جریان جرم متناظر در حل تحلیلی [13]، معادله (32) که نرخ جریان جرمی

¹ SIMPLE

² Rhie-Chow

³ Power Law

⁴ Tridiagonal Matrix Algorithm (TDMA)

⁵ Alternative Direction Implicit (ADI)

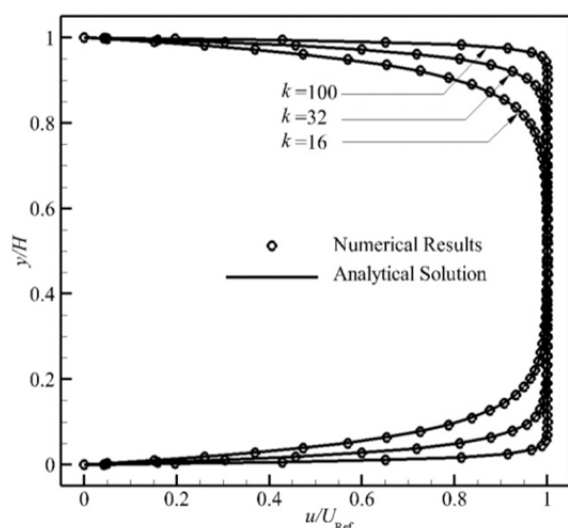


Fig. 2 Comparison of numerical results of velocity distribution with the analytical Solution (Eq. (33)) for an ideal EOF

شکل 2 مقایسه نتایج عددی توزیع سرعت با حل تحلیلی (معادله (33)) برای جریان ایده‌آل الکترواسموتیک

عبارت دیگر در ابتدای ناحیه خروجی (L_2) باید فشار جریان افزایش داشته باشد تا سیال از مجرا تخلیه گردد. این کاهش فشار ابتدای ناحیه L_2 و افزایش آن در انتهای این ناحیه، موجب القای یک گرادیان فشار مثبت در ناحیه میانی (L_1) می‌گردد. در نتیجه توزیع فشار در سراسر ریزمجرا به صورت شکل 4 خواهد بود. در این شکل توزیع فشار و سرعت در خط مرکزی ریزمجرا (a) و میدان فشار در کل حوزه (b) به نمایش در آمده است. مشاهده می‌شود گرادیان فشار در ناحیه میانی (L_1) مثبت (مخالف حرکت جریان) و در نواحی ورودی و خروجی (L_2 و L_1) منفی (موافق حرکت) می‌باشد. بنابراین پروفیل‌های سرعت در ریزمجرا تحت تاثیر نیروی حجمی و گرادیان فشار القایی قرار می‌گیرد.

شکل 5 بردارهای سرعت و خطوط جریان در ریزمجرا را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که بردارهای سرعت در طول‌های ورودی و خروجی ریزمجرا به صورت سهموی است ولی در طول میانی نسبت به طول‌های ورودی و خروجی متفاوت می‌باشند. دلیل این امر را می‌توان این طور توجیه نمود که بردارهای سرعت در طول‌های ورودی و خروجی فقط تحت تاثیر گرادیان فشار منفی قرار دارد و مانند یک جریان فشار-محرك دارای توزیع سهموی است.

شکل 6 خطوط هم‌تراز بی‌بعد پتانسیل الکتریکی خارجی ($\phi/E_{ref}H$)، حاصل از حل معادله (18) را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در آن میدان

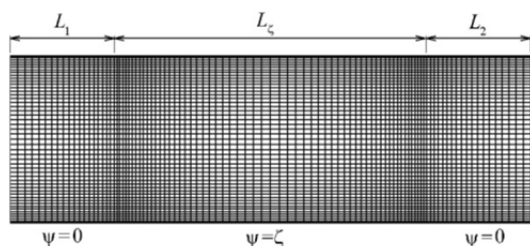


Fig. 3 A non-uniform grid generated by the algebraic method

شکل 3 یک نمونه شبکه غیریکنواخت تولید شده به روش جبری

قدرت میدان الکتریکی $E_{ref} = 112.943$ (V/mm)، ولتاژ خارجی در ورودی $\phi_1 = 11.2943$ (V)، سرعت مرجع $U_{ref} = 2.0 \times 10^{-3}$ (m/s) و عرض ریزمجرا $H \approx 10$ (μm)، محاسبه و در برنامه عددی اعمال گردیده است.

در این بخش ابتدا نتایج میدان جریان، پتانسیل‌های الکتریکی و غلظت یون‌های مثبت و منفی با استفاده از شبیه‌سازی کامل توسط حل معادلات ارنست-پلانک با تغییر زتاپتانسیل دیواره بیان می‌شود و سپس نتایج مربوط به میدان غلظت گونه‌ها و راندمان اختلاط بحث خواهد شد.

7-1- نتایج عددی در حالت زتاپتانسیل ثابت

با توجه به شکل 1 که در آن هندسه جریان مورد نظر در این پژوهش معرفی شده است، یک شبکه غیر یکنواخت مطابق شکل 3 ایجاد گردیده است. مشاهده می‌شود در کنار دیواره‌ها و همچنین در محل ابتدا و انتهای طول میانی که دارای زتاپتانسیل غیر صفر است، به دلیل تغییرات شدید در کمیات جریان، شبکه ریزتر شده است. قابل ذکر است، که در شکل نمایش داده شده به منظور وضوح بیشتر از تعداد گره‌های کمتری استفاده شده است.

با اعمال میدان الکتریکی خارجی و در نتیجه اعمال نیروی حجمی به یون‌های تجمع یافته در مجاورت دیواره بردار، حرکت سیال در بخش میانی (ناحیه L_1) و درست در مجاورت دیواره شروع می‌شود. در ناحیه ورودی (L_1) که در آن هیچ نیروی حجمی اعمال نمی‌شود، به واسطه اصل بقای جرم بایستی سیال به سمت راست حرکت نماید. این حرکت با القای یک گرادیان فشار منفی شکل می‌گیرد تا بر اصطکاک دیواره‌ی ناحیه L_1 غلبه شود.

به عبارت دیگر در انتهای ناحیه ورودی (L_1) باید فشار جریان افت داشته باشد تا سیال به درون مجرا کشیده شود. از طرف دیگر در ناحیه خروجی (L_2) هم اصل بقای جرم لازم می‌دارد که سیال در این ناحیه به حرکت درآمده و از مجرا تخلیه شود. این حرکت نیز با القای یک گرادیان فشار منفی شکل می‌گیرد تا بر اصطکاک دیواره‌ی ناحیه L_2 غلبه کند. به

جدول 1 نتایج حاصل از بررسی استقلال شبکه

Table 1 Grid dependency results

تعداد گره	$m \times 10^5$	D_m %
50 × 30	1.8933	0.9700
100 × 60	1.8826	0.4061
150 × 90	1.8807	0.3061

جدول 2 مقادیر خواص و ثابت‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر

Table 2 Parameters and constant values used in current study

پارامتر	کمیت	مقدار
H	ارتفاع ریزمجرا	بر حسب K تعیین می‌شود
D_s	ضریب پخش گونه‌ها	1.0×10^{-10} (m/s ²)
D_i	ضریب پخش یون‌ها	2.0×10^{-9} (m/s ²)
e	بار الکترون بر حسب کولن	1.602×10^{-19} (C)
k_B	ثابت بولتزمن	1.381×10^{-23} (J/K)
N_A	عدد آووگادرو	$6.022 \times 10^{+23}$ (1/mol)
ϵ_0	گذردهی الکتریکی خلأ	8.854×10^{-12} (C/V · m)
μ	لزجت دینامیکی	1.0×10^{-3} (Pa · s)
ρ	چگالی	$1.0 \times 10^{+3}$ (kg/m ³)
ϵ_r	ثابت گذردهی الکترولیت	80.0
z	عدد والانس	1.0

اثر حضور جریان در توزیع یون‌ها و در نتیجه در توزیع (ψ) منعکس شده است به طوری که یک توزیع نامتقارن نسبت به مرکز ریزمجرا ($x = L/2$) ایجاد می‌شود.

شکل 8 توزیع بی‌بعد غلظت یون‌های مثبت و منفی ($n^{\pm}/n_0$) را با حل معادلات ارنست-پلانک نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود این توزیع نسبت به $x = L/2$ دارای عدم تقارن می‌باشد. علت این امر را می‌توان در جمله جابجایی موجود در معادلات ارنست-پلانک جست و جو نمود. به عبارت دیگر، در اثر جابجایی جریان از چپ به راست خطوط هم‌تراز $n^{\pm}$ به سمت راست متمایل شده است.

شکل 9 خطوط هم‌تراز بی‌بعد غلظت گونه‌ها در طول ریزمجرا حاصل از حل معادله (23) را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با جابجایی جریان در طول ریزمجرا، غلظت گونه‌ها به غلظت نهایی 0.5 نزدیک شده است که تحت تاثیر عملکرد دو مکانیزم پخش و جابجایی می‌باشد.

شکل 10 توزیع غلظت گونه‌ها را در راستای عمود بر جریان در مقاطع مختلف از ریزمجرا را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که توزیع غلظت ورودی پله‌ای (صفر و یک) اختیار شده‌اند، اما به تدریج با نزدیک شدن به خروجی ریزمجرا توزیع غلظت‌ها از حالت پله‌ای خارج شده و در نهایت به منحنی‌های نرم‌تری به مرکزیت 0.5 تبدیل شده است.

شکل 11 راندمان اختلاط (ϵ_m) در طول ریزمجرا را با استفاده از معادلات بیان شده در بخش 5 نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در تمام منحنی‌ها راندمان اختلاط در ابتدا و انتهای طول میانی (وصله ناهمگنی) به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. در ابتدا باید توجه نمود که مکانیزم اختلاط اساساً بر مبنای پخش است که پدیده‌ای برگشت‌ناپذیر می‌باشد. بعلاوه در خصوص اختلاط دو سیال در یک ریزمجرا، هر چه زمان اقامت سیال ($\Delta t = L/u$) در طول ریزمجرا بیشتر باشد، میزان اختلاط بیشتر خواهد بود. از طرف دیگر، میزان راندمان اختلاط در مقطع عرضی یک ریزمجرا علاوه بر سرعت طولی u به سرعت عرضی v هم وابسته است. به عبارت دیگر، باید دید که خطوط جریان در مقطع مورد نظر قبلاً از چه منطقه‌ای عبور نموده است. چنانچه خطوط جریان عبوری از یک مقطع، دارای مؤلفه‌ی عرضی سرعت (v) باشند، گونه‌های مخلوط شونده در راستای عرضی هم حرکت خواهند نمود و لذا با توجه به تعریف پایه اختلاط (حرکت عرضی گونه‌ها در جهت عمود بر جریان اصلی) راندمان اختلاط افزایش می‌یابد.

بنابراین علت این تغییرات (افزایش و کاهش) در ریزمجرا مورد نظر را می‌توان این طور توجیه نمود که در ابتدا و انتهای وصله ناهمگنی (روی دیواره بالا و پایین)، با توجه به اینکه عاملیت حرکت سیال در بخش ابتدای وصله‌ها به طور ناگهانی اثر می‌نماید و به همین ترتیب در بخش انتهایی وصله‌ها از بین می‌رود. میدان جریان سیال مؤلفه‌های سرعت عرضی (v) علاوه بر مؤلفه‌های سرعت افقی (u) پیدا می‌کنند. این مؤلفه‌های سرعت اضافی که فقط در همین دو ناحیه حضور دارند، باعث می‌شوند جریان سیال

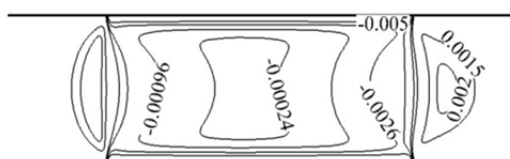


Fig. 7 Numerical results of internal electric potential field (ψ) along the microchannel

شکل 7 نتایج عددی میدان پتانسیل الکتریکی داخلی (ψ)

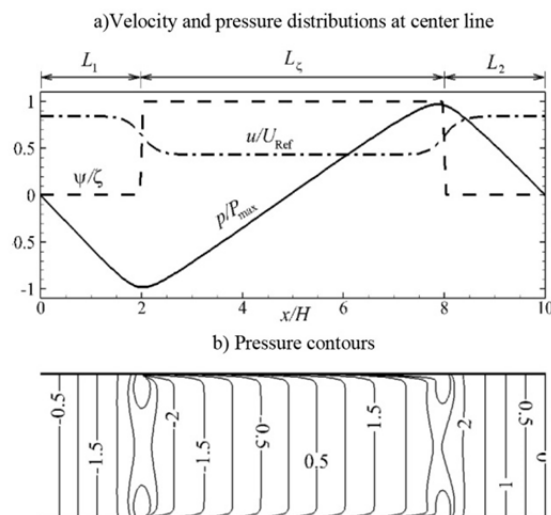


Fig. 4 Numerical results for velocity and pressure distributions along the microchannel

شکل 4 نتایج عددی توزیع‌های سرعت و فشار در طول ریزمجرا

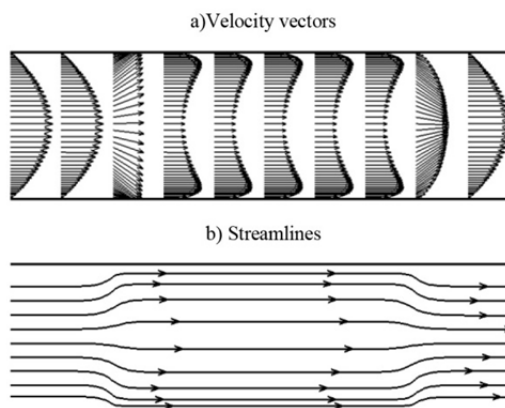


Fig. 5 Numerical results of velocity vectors and streamlines along the microchannel

شکل 5 نتایج عددی بردارهای سرعت و خطوط جریان در طول ریزمجرا

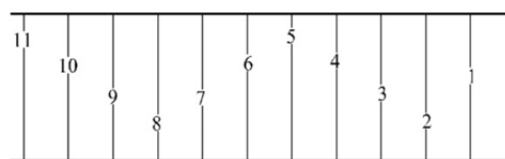


Fig. 6 Numerical results of external electric potential field (ϕ) along the microchannel

شکل 6 نتایج عددی خطوط هم‌تراز میدان پتانسیل الکتریکی خارجی (ϕ) در طول ریزمجرا

الکتریکی در سراسر مجرا کاملاً خطی و از صفر تا حدود 12 تغییر می‌کند. میدان الکتریکی خارجی با توجه به اینکه یکی از عوامل اصلی تولید نیروی حجمی الکتریکی می‌باشد، اثر بسیار زیادی بر توزیع دیگر پارامترهای جریان الکترواسموتیک دارد.

شکل 7 توزیع بی‌بعد پتانسیل الکتریکی (ψ/ζ) درون لایه‌ی دوگانه الکتریکی را با حل معادله (19) نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با حل معادلات ارنست-پلانک و جایگذاری یون‌های مثبت و منفی در معادله (20)،

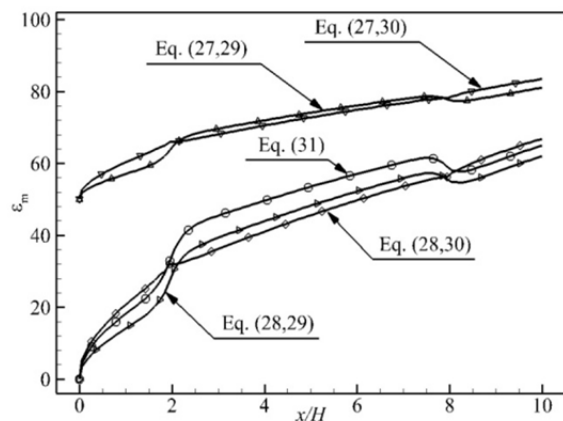


Fig. 11 Numerical results of mixing efficiency along the microchannel by solving equations (27) to (31)

شکل 11 نتایج عددی راندمان اختلاط در طول ریزمجرا با حل معادلات (27) تا (31)

راندمان اختلاط به ترتیب در ابتدا و انتهای وصله ناهمگنی کمتر رخ می‌دهد. دلیل این امر را می‌توان با توجه به استفاده از سرعت به عنوان تابع وزنی در محاسبه انحراف معیار مربوطه توجیع نمود. لازم به ذکر است که نرخ حجمی جریان در این حالت $Q = 11.25 \text{ (mm}^3/\text{s)}$ و راندمان اختلاط دارای مقدار 64 درصد با استفاده از معادله (31) می‌باشد.

قابل ذکر است که برای محاسبه راندمان اختلاط در ادامه گزارشات این مقاله از معادله (31) استفاده می‌شود.

7-2- نتایج عددی در حالت زتاپتانسیل متغیر

در این بخش، اثرات تغییر ولتاژ دیواره‌ها روی ناحیه میانی در سه حالت توزیع خطی-صعودی، خطی-نزولی و سهموی با مشخصات گفته شده در ابتدای بخش نتایج عددی، بررسی و گزارش می‌شود. قابل ذکر است که به دلیل محدودیت در تعداد صفحات مقاله، نتایج مربوط به میدان‌های جریان سیال، جریان الکتریکی و غلظت یون‌ها در این قسمت ارائه نمی‌شود. به طور کلی مشاهده شد که نتایج یاد شده دارای ساختار مشابه با تفاوت جزئی می‌باشند. در حالت اول یک توزیع بار متغیر به صورت خطی-صعودی روی دیواره‌های بالا و پایین ریزمجرا در فاصله $2 \leq x/H \leq 8$ (ناحیه میانی L_f) مطابق خط-نقطه شکل 12 در نظر گرفته شده است، به طوری که در ابتدای ناحیه میانی $\zeta = 0$ و در انتهای آن $\zeta = -25 \text{ (mV)}$ می‌باشد. در این شکل نیز بردارهای سرعت (a) و تغییرات فشار و سرعت در خط مرکزی (b) ریزمجرا نشان داده شده است. هنگامی که توزیع زتاپتانسیل دیواره در ناحیه میانی به صورت یاد شده باشد، اثر پمپاژ الکترواسموتیک در جهت جریان افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود که در ناحیه‌ای که ولتاژ دیواره به صورت خطی صعود می‌یابد، توزیع فشار خط مرکزی به صورت سهموی است. علت این امر آن است که در حالت توسعه‌یافته دائم گرادیان فشار در معادله منبث با دو جمله اصطکاک و نیروی حجمی لورنتس موازنه می‌شود. در صورتی که نیروی حجمی لورنتس خطی-صعودی باشد طبیعتاً توزیع فشار سهموی خواهد بود.

شکل 13 راندمان اختلاط در طول ریزمجرا را برای این حالت (تغییر زتاپتانسیل دیواره‌ی میانی به صورت خطی-صعودی) نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که راندمان اختلاط در این حالت به مقدار 86 درصد می‌رسد که نسبت به حالت توزیع یکنواخت ولتاژ دیواره‌ها حدود 22 درصد افزایش یافته

ابتدا به سمت دیواره‌ها جاری و سپس از دیواره‌ها دور شوند. هنگامی که سیال واقع بر خط مرکزی ریزمجرا به سمت دیواره‌ها حرکت می‌کند، سیال مخلوط شده‌ی خط مرکزی را به سمت دیواره‌ها می‌کشاند و به همین دلیل راندمان اختلاط افزایش می‌یابد. برعکس زمانی که سیال مجاور دیواره‌ها به سمت خط مرکزی حرکت نماید، سیال مخلوط نشده‌ی کنار دیواره‌ها را به سمت مرکز ریزمجرا جاری می‌سازد و به همین دلیل راندمان اختلاط کاهش می‌یابد. بعلاوه در شکل 11 مشاهده می‌شود، اگر در محاسبه راندمان اختلاط از انحراف معیار غلظت گونه‌ها (معادله (30)) استفاده شود، افزایش و کاهش

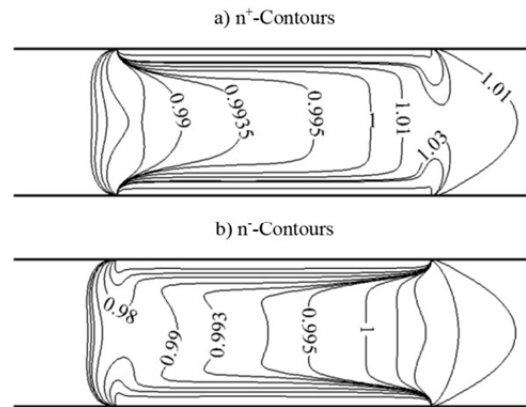


Fig. 8 Numerical results for the positive and negative ionic concentrations distributions along the microchannel

شکل 8 نتایج عددی توزیع غلظت یون‌های مثبت و منفی در طول ریزمجرا

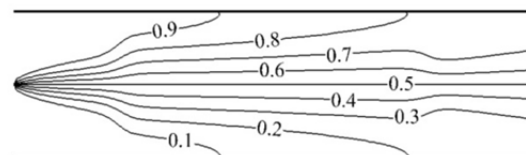


Fig. 9 Numerical results for concentration contours of species along the microchannel

شکل 9 نتایج عددی خطوط هم‌تراز غلظت گونه‌ها در طول ریزمجرا

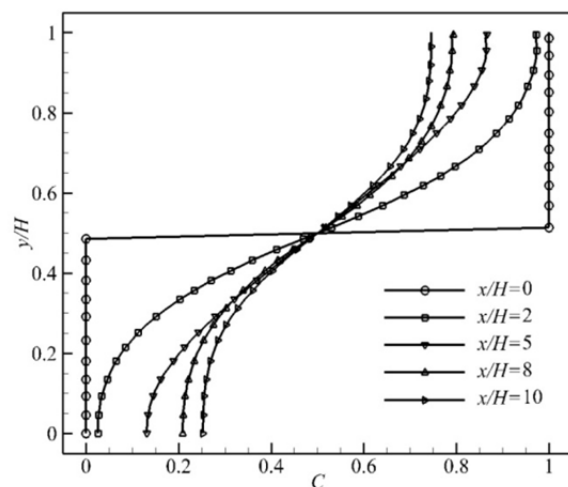


Fig. 10 Numerical results for the concentration distribution at different cross-sections of the microchannel

شکل 10 نتایج عددی توزیع غلظت گونه‌ها در مقاطع مختلف ریزمجرا

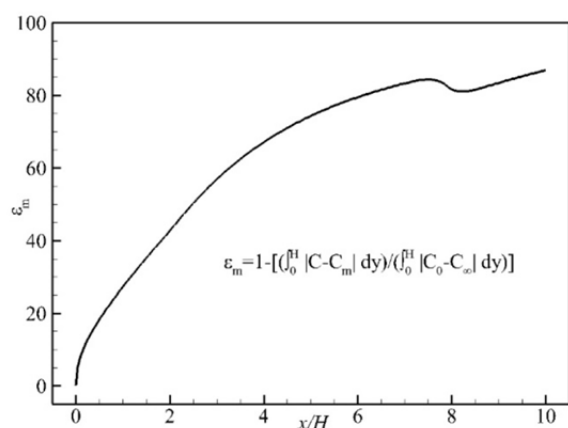


Fig. 13 Mixing efficiency for linear-ascending changing in Zeta potential at middle length

شکل 13 راندمان اختلاط برای تغییر زتاپتانسیل دیواره‌ی میانی به صورت خطی- صعودی

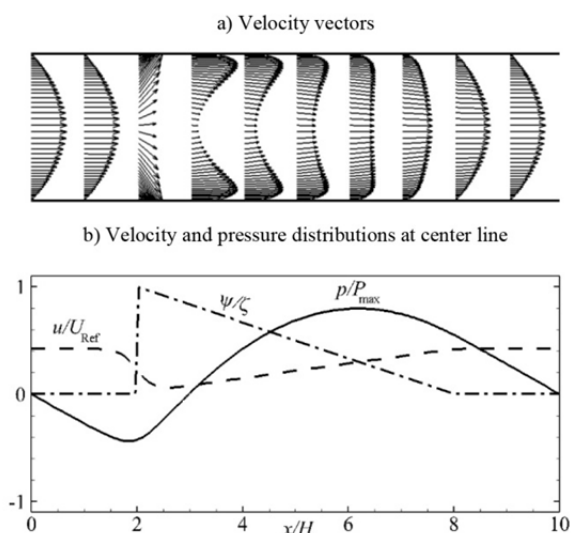


Fig. 14 Numerical results for linear- descending changing in Zeta potential at middle length

شکل 14 نتایج عددی برای تغییر زتاپتانسیل دیواره‌ی میانی به صورت خطی-نزولی

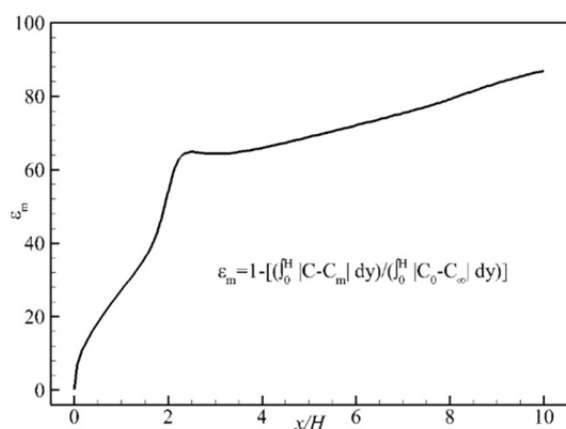


Fig. 15 Mixing efficiency for linear- descending changing in Zeta potential at middle length

شکل 15 راندمان اختلاط برای تغییر زتاپتانسیل دیواره‌ی میانی به صورت خطی- نزولی

است. همچنین محاسبه نرخ حجمی جریان (دبی) نشان می‌دهد که در این حالت دبی جریان به مقدار $Q = 5.64 \text{ (mm}^3/\text{s)}$ کاهش می‌یابد. علت این کاهش را می‌توان اینطور توجیح نمود که در این حالت میانگین زتاپتانسیل روی ناحیه میانی $\zeta = -12.5 \text{ (mV)}$ می‌باشد و همین امر باعث می‌شود دبی جریان کاهش و به تبع آن راندمان اختلاط به دلیل اقامت طولانی‌تر سیال در طول ریزمجرای افزایش یابد.

در حالت دوم یک توزیع بار متغیر به صورت خطی-نزولی روی دیواره‌های بالا و پایین ریزمجرای در فاصله $2 \leq x/H \leq 8$ (ناحیه میانی L_2) مطابق خط-نقطه شکل 14 در نظر گرفته شده است، به طوری که در ابتدای ناحیه میانی $\zeta = -25 \text{ (mV)}$ و در انتهای آن $\zeta = 0$ می‌باشد. در این شکل نیز بردارهای سرعت و تغییرات فشار و سرعت در خط مرکزی ریزمجرای نشان داده شده است. هنگامی که توزیع زتاپتانسیل دیواره در ناحیه میانی به صورت یاد شده باشد، اثر پمپاژ الکترواسموتیک در جهت جریان کاهش می‌یابد. مشاهده می‌شود که در ناحیه‌ای که ولتاژ دیواره به صورت خطی نزول می‌یابد، توزیع فشار به صورت سهموی است. توجیه این نحوه از تغییرات فشار مانند حالت قبل است.

شکل 15 راندمان اختلاط در طول ریزمجرای را برای این حالت (تغییر زتاپتانسیل دیواره‌ی میانی به صورت خطی-نزولی) نشان می‌دهد. مشابه حالت قبل، مشاهده می‌شود که راندمان اختلاط در این حالت به مقدار 86 درصد می‌رسد که نسبت به حالت توزیع یکنواخت ولتاژ دیواره‌ها حدود 22 درصد افزایش یافته است. همچنین دبی جریان در این حالت، به مقدار $Q = 5.64 \text{ (mm}^3/\text{s)}$ کاهش می‌یابد. علت این کاهش را می‌توان اینطور توجیح نمود که برای این حالت هم میانگین زتاپتانسیل ناحیه‌ی میانی $\zeta = -12.5 \text{ (mV)}$ می‌باشد و همین امر باعث می‌شود راندمان اختلاط به دلیل اقامت طولانی‌تر سیال در طول ریزمجرای افزایش یابد.

در حالت سوم یک توزیع بار متغیر به صورت سهموی روی دیواره‌های بالا و پایین ریزمجرای در فاصله $2 \leq x/H \leq 8$ (ناحیه میانی L_2) مطابق خط-نقطه شکل 16 در نظر گرفته شده است، به طوری که در ابتدا و انتهای طول میانی $\zeta = 0$ و در وسط آن $\zeta = -25 \text{ (mV)}$ می‌باشد. در این شکل نیز، بردارهای سرعت و تغییرات فشار و سرعت در خط مرکزی ریزمجرای نشان داده

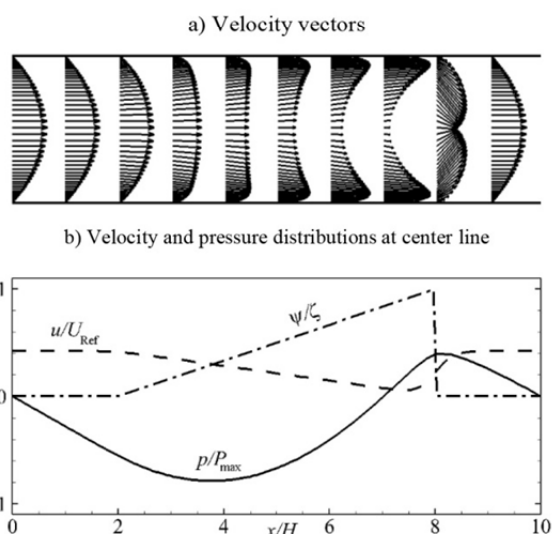


Fig. 12 Numerical results for linear-ascending changing in Zeta potential at middle length

شکل 12 نتایج عددی برای تغییر زتاپتانسیل دیواره‌ی میانی به صورت خطی-صعودی

دلیل اقامت طولانی‌تر سیال در طول ریزمجرا افزایش یابد. مقایسه سه حالت یاد شده از توزیع زتاپتانسیل ناحیه میانی نشان می‌دهد که در حالت خطی-صعودی و خطی-نزولی راندمان اختلاط یکسان و در عین حال بیشتر از راندمان حالت سهموی است.

در حالت‌های قبلی تغییرات زتاپتانسیل دیواره‌ها، روی هر دو دیواره بالایی و پایینی اعمال شده است. در ادامه‌ی نتایج این مقاله دیواره پایینی کاملاً بدون زتاپتانسیل در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر در این حالت که به عنوان حالت چهارم در این مقاله نظر گرفته می‌شود، فقط روی دیواره بالایی در فاصله $2 \leq x/H \leq 8$ یک توزیع بار تکه‌ای با ولتاژ $\zeta = -25 \text{ mV}$ مطابق حالت‌های ثابت، خطی-صعودی، خطی-نزولی و سهموی قرار داده شده است و سایر نواحی دیواره $\zeta = 0$ می‌باشد. شکل 18 خطوط جریان را برای این حالت‌ها (ثابت، خطی-صعودی، خطی-نزولی و سهموی) نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در این حالت یک ناحیه با جریان برگشتی تشکیل می‌شود که منجر به یک میدان سرعت غیر یکنواخت داخل ریزمجرا می‌گردد. بعلاوه با توجه به شکل تغییر ولتاژ دیواره با حالت‌های بیان شده، شکل و اندازه‌ی گردابه‌های تولید شده متفاوت می‌باشد.

شکل 19 راندمان اختلاط در طول ریزمجرا را برای این حالت‌ها (ثابت، خطی-صعودی، خطی-نزولی و سهموی) نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در این حالت‌ها راندمان اختلاط تا 96 الی 100 درصد افزایش می‌یابد. این افزایش راندمان را می‌توان با توجه به شکل جریان برگشتی توجیه نمود. قابل ذکر است که با توجه به اینکه در این حالت یک طرف موتور حرکت جریان

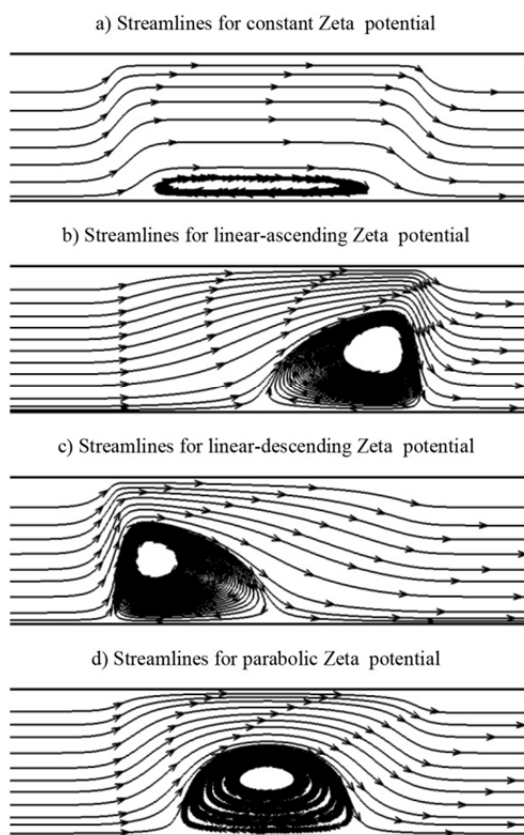


Fig. 18 Numerical results of the streamlines for changing of Zeta potential at middle length of upper wall

شکل 18 نتایج عددی خطوط جریان برای تغییر زتاپتانسیل در طول میانی دیواره بالایی

شده است. هنگامی که توزیع زتاپتانسیل دیواره در ناحیه میانی به صورت یاد شده باشد، اثر پمپاژ الکترواسموتیک به سمت منطقه‌ی میانی ناحیه L_z افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود که در ناحیه‌ای که ولتاژ دیواره به صورت سهموی می‌باشد، توزیع فشار به صورت درجه سوم است. علت این امر آن است که در حالت توسعه‌یافته دائم گرادیان فشار در معادله ممتموم با دو جمله اصطکاک و نیروی حجمی لورنتس موازنه می‌شود. در صورتی که نیروی حجمی لورنتس سهموی باشد طبیعتاً توزیع فشار درجه سوم خواهد بود. شکل 17 راندمان اختلاط در طول ریزمجرا را برای این حالت (تغییر زتاپتانسیل دیواره میانی به صورت سهموی) نشان می‌دهد.

مشاهده می‌شود که راندمان اختلاط در این حالت به مقدار 75 درصد می‌رسد که نسبت به حالت توزیع یکنواخت ولتاژ دیواره 11 درصد افزایش یافته است. همچنین دبی در این حالت، به مقدار $Q = 7.53 \text{ (mm}^3/\text{s)}$ کاهش می‌یابد. علت این کاهش را می‌توان اینطور توجیه نمود که برای این حالت میانگین زتاپتانسیل روی دیواره‌ها کمتر از $\zeta = -25 \text{ (mV)}$ می‌باشد و همین امر باعث می‌شود دبی جریان کاهش و به تبع آن راندمان اختلاط به

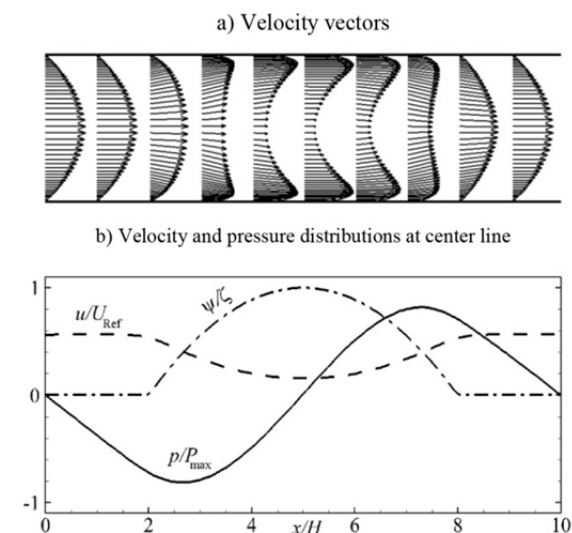


Fig. 16 Numerical results for parabolic changing in Zeta potential at middle length

شکل 16 نتایج عددی برای تغییر زتاپتانسیل دیواره میانی به صورت سهموی

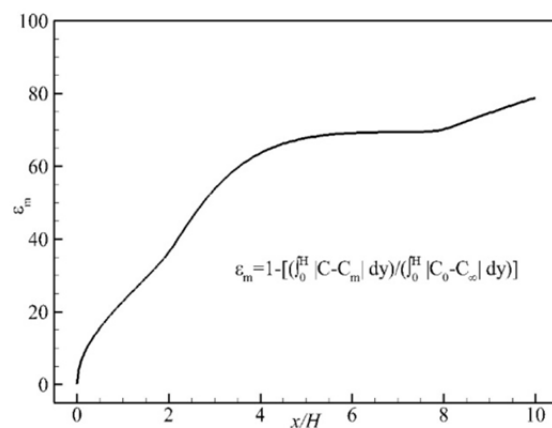


Fig. 17 Mixing efficiency for parabolic changing in Zeta potential at middle length

شکل 17 راندمان اختلاط برای تغییر زتاپتانسیل دیواره میانی به صورت سهموی

- [3] S. Gambhire, N. Patel, G. Gambhire, S. Kale, A Review on Different Micromixers and its Micromixing within Microchannel, *International Journal of Current Engineering and Technology*, Vol. 4, pp. 409-413, 2016.
- [4] 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.
- [5] M. Campisi, D. Accoto, F. Damiani, P. Dario, A soft-lithographed chaotic electrokinetic micromixer for efficient chemical reactions in lab-on-chips, *Journal of Micro-Nano Mechatronics*, Vol. 5, No. 3-4, pp. 69-76, 2009.
- [6] X. Xiao, C. N. Kim, Numerical analysis of an MHD micro-device with simultaneous mixing and pumping capability, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 38, pp. 23-36, 2016.
- [7] 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.
- [8] V. Hessel, H. Löwe, F. Schönfeld, Micromixers—a review on passive and active mixing principles, *Chemical Engineering Science*, Vol. 60, No. 8, pp. 2479-2501, 2005.
- [9] C. Rice, R. Whitehead, Electrokinetic flow in a narrow cylindrical capillary, *The Journal of Physical Chemistry*, Vol. 69, No. 11, pp. 4017-4024, 1965.
- [10] D. Burgreen, F. Nakache, Electrokinetic flow in ultrafine capillary slits, *The Journal of Physical Chemistry*, Vol. 68, No. 5, pp. 1084-1091, 1964.
- [11] C. Yang, D. Li, J. H. Masliyah, Modeling forced liquid convection in rectangular microchannels with electrokinetic effects, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, No. 24, pp. 4229-4249, 1998.
- [12] L. Hu, J. D. Harrison, J. H. Masliyah, Numerical model of electrokinetic flow for capillary electrophoresis, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 215, No. 2, pp. 300-312, 1999.
- [13] S. Mirbozorgi, H. Niazmand, M. Renksizbulut, Electro-osmotic flow in reservoir-connected flat microchannels with non-uniform zeta potential, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 128, No. 6, pp. 1133-1143, 2006.
- [14] E. Biddiss, D. Erickson, D. Li, Heterogeneous surface charge enhanced micromixing for electrokinetic flows, *Analytical Chemistry*, Vol. 76, No. 11, pp. 3208-3213, 2004.
- [15] W. J. Luo, K. F. Yarn, S. P. Hsu, Analysis of electrokinetic mixing using AC electric field and patchwise surface heterogeneities, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 46, No. 4R, pp. 1608, 2007.
- [16] M. Jain, K. Nandakumar, Optimal patterning of heterogeneous surface charge for improved electrokinetic micromixing, *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 49, pp. 18-24, 2013.
- [17] J. Jamaati, H. Niazmand, S. A. Mirbozorgi, Investigation the 3D mixing with non-homogenous surface charges using helmholtz-smoluchowski model, *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, Vol. 24, No. 1, pp. 103-122, 2013. (in Persian فارسی)
- [18] J. Jamaati, A. R. Farahinia, H. Niazmand, Investigation of mixing in electroosmotic micromixers using Nernst-Planck equations, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, 2015. (in Persian فارسی)
- [19] A. 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.
- [20] M. M. Afsari, S. A. Mirbozorgi, H. Niazmand, Analysis of mixing efficiency in an electroosmotically micromixer with heterogeneous wall charge distribution, *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, Vol. 25, No. 2, pp. 97-109, 2014. (in Persian فارسی)
- [21] J. H. Masliyah, S. Bhattacharjee, *Electrokinetic and Colloid Transport Phenomena*, First ed., pp. 1-720, Canada: Wiley, 2006.
- [22] M. Engler, N. Kockmann, T. Kiefer, P. Woias, Numerical and experimental investigations on liquid mixing in static micromixers, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 101, No. 1, pp. 315-322, 2004.
- [23] 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.
- [24] J. Ou, G. R. Moss, J. P. Rothstein, Enhanced mixing in laminar flows using ultrahydrophobic surfaces, *Physical Review E*, Vol. 76, No. 1, pp. 016304, 2007.
- [25] H. Bockelmann, V. Heuveline, D. P. Barz, Optimization of an electrokinetic mixer for microfluidic applications, *Biomicrofluidics*, Vol. 6, No. 2, pp. 024123, 2012.
- [26] J. Jamaati, H. Niazmand, M. Renksizbulut, Investigation of electrokinetic mixing in 3D non-homogenous microchannels, *Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)*, Vol. 3, No. 1, pp. 41-52, 2013.
- [27] C. Rhie, W. L. Chow, Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, Vol. 21, No. 11, pp. 1525-1532, 1983.

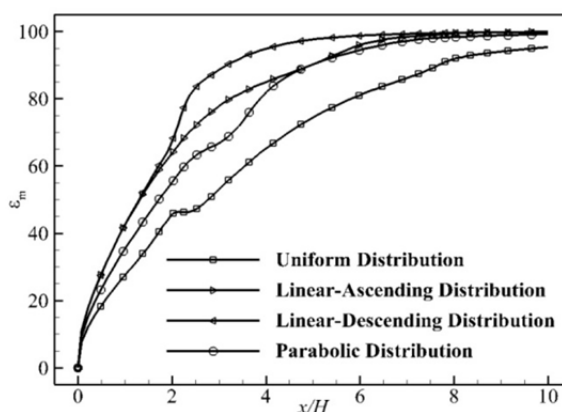


Fig. 19 Mixing efficiency for changing of Zeta potential at middle length of upper wall

شکل 19 راندمان اختلاط برای تغییر زتاپتانسیل در طول میانی دیواره‌ی بالایی

الکترواسموتیک را از دست می‌دهیم، علی‌رغم کاهش نرخ حجمی جریان به دلیل وجود جریان گردشی، راندمان اختلاط افزایش می‌یابد. درصد کاهش دبی در این قسمت با توجه به حالت مورد استفاده (ثابت، خطی-صعودی، خطی-نزولی و سهموی) بین 50 تا 75 درصد می‌باشد.

8- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثرات تغییر زتاپتانسیل دیواره‌های میانی یک ریزمخلوط‌گر الکترواسموتیکی به‌صورت کمی و کیفی شبیه‌سازی شده است. تغییرات زتاپتانسیل دیواره به‌صورت ثابت، خطی-صعودی، خطی-نزولی و سهموی در نظر گرفته شده است. برای این منظور، توزیع عددی میدان‌های سرعت، فشار، پتانسیل الکتریکی خارجی، پتانسیل الکتریکی درون لایه‌ی دوگانه الکتریکی، توزیع غلظت یون‌های مثبت و منفی و توزیع غلظت گونه‌ها با حل معادلات مربوطه به دست آمده و گزارش شده است. نتایج عددی نشان داد که با تغییر زتاپتانسیل دیواره در ناحیه میانی به‌صورت خطی-صعودی، خطی-نزولی و سهموی راندمان اختلاط نسبت به وضعیت زتا ثابت افزایش می‌یابد. به طوری که این افزایش راندمان 22 درصد برای دو حالت خطی و 11 درصد برای حالت سهموی نسبت به حالت زتا ثابت می‌باشد. بعلاوه نتایج عددی نشان داد که با تغییرات زتاپتانسیل دیواره در ناحیه میانی به‌صورت یاد شده، برای جریان در یک ریزمجرا به سطح مقطع مستطیلی 10 میلی‌متر مربع و قدرت میدان الکتریکی 112.963 ولت بر میلی‌متر، دبی عبوری به 11.25 میلی‌متر مکعب بر ثانیه برای حالت ثابت می‌رسد. این در حالی است که در حالت‌های خطی و سهموی حداکثر دبی به ترتیب 5.64 و 7.53 میلی‌متر مکعب بر ثانیه می‌باشد.

9- مراجع

- [1] D. Figeys, D. Pinto, Lab-on-a-chip: A revolution in biological and medical sciences, *Analytical Chemistry*, Vol. 72, No. 9, pp. 330A-335A, 2000.
- [2] A. J. Tüdös, G. A. Besselink, R. B. Schasfoort, Trends in miniaturized total analysis systems for point-of-care testing in clinical chemistry, *Lab on a Chip*, Vol. 1, No. 2, pp. 83-95, 2001.