



Numerical Analysis of Some Active and Passive Electro-Kinetic Micro-Mixers by Applying Poisson-Nernst-Planck and Navier–Stokes (PNP-NSE) Equations

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Maleki Bagherabadi K.¹ MSc,
Sani M.^{*1} PhD,
Saidi M.S.² PhD

How to cite this article

Maleki Bagherabadi K, Sani M, Saidi M.S. Numerical Analysis of Some Active and Passive Electro-Kinetic Micro-Mixers by Applying Poisson-Nernst-Planck and Navier–Stokes (PNP-NSE) Equations. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(8):2057-2066.

¹School of Science & Engineering, Sharif University of Technology - International Campus Kish Island, Kish Island, Iran

²Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: School of Science & Engineering, Sharif University of Technology - International Campus Kish Island, Kish Island, Hormozgan, Iran. Postal Code: 7941776655
Phone: +98 (76) 44422299
Fax: +98 (76) 44421635
msani@sharif.edu

Article History

Received: September 23, 2018

Accepted: January 29, 2019

ePublished: August 12, 2019

ABSTRACT

Micro-mixers are vital components of “Lab-on-a-Chip” devices. Their main functionality is the mixing of two streams with desired quality and at minimum mixing time. In this work, numerical modelings of some active and passive micro-mixers with innovative designs are reported. Increasing mixing quality and decreasing mixing time are the design objectives. Our numerical model features solving the set of non-linear and inter-coupled Poisson-Nernst-Planck-Naiver-Stokes equations (PNP-NSE) instead of using simplified models like Poisson-Boltzmann (PB). These equations describe a more realistic model of the physics involved at continuum level by incorporating diffusion, electro-migration, and convection, which are the dominant phenomena in electro-kinetic micro-mixers especially those using AC voltage electrodes. The computations are carried out using Rayan (in-house code). The traditional Poisson-Boltzmann (PB) model relies on simplifying assumptions and is proven to lose its accuracy in complex geometries and near active electrodes. On the other hand, the PB model is much less sophisticated and therefore much less computationally expensive. One of the contributions of this research is to show that in passive micro-mixers making the obstacles smaller but more numerous increases the mixing quality (for the case studied by 13%). The other major contribution of this work is the introduction of the combination of the vertical and horizontal AC electrodes. This new design creates jets normal to the direction of the mainstream which is responsible for enhancing chaotic mixing. This results in a stable mixing quality of 99% at 2.7s.

Keywords Lab-on-a-chip; Active-Micro-Mixer; Passive-Micro-Mixer; Vertical Active Electrode

CITATION LINKS

[1] Electrokinetically driven flow mixing utilizing chaotic electric ... [2] Microfluidic technologies for miniaturized analysis ... [3] Modeling and simulation of microfluidic chips for analytical ... [4] Analysis on micro-mixing enhancement through a constriction under time periodic ... [5] Microfluidic mixing via transverse electrokinetic effects in ... [6] A fast passive and planar liquid sample ... [7] Numerical analysis of field-modulated electroosmotic flows in microchannels with arbitrary numbers and ... [8] Advances in electrokinetics and their applications in micro/nano ... [9] Electroosmotic mixing in ... [10] Microchannel flow with patchwise and periodic surface ... [11] Numerical simulation for electro-osmotic mixing under three types of periodic potentials in a T-shaped ... [12] Numerical simulation for efficient mixing of newtonian and non ... [13] Theoretical and numerical investigations of an electroosmotic flow micropump with interdigitated ... [14] Active micro-mixers utilizing a gradient zeta potential induced by ... [15] Numerical simulation of an electroosmotic micromixer. A SME 2003 International Mechanical Engineering Congress ... [16] Effects of geometric modulation and surface potential heterogeneity on electrokinetic flow and solute transport ... [17] Numerical analysis on electroosmotic flows in a microchannel with rectangle-waved surface roughness using the Poisson ... [18] Rayan: A polyhedral grid co-located incompressible finite ... [19] A set of particle locating algorithms not requiring face belonging ... [20] A lagged implicit segregated data reconstruction procedure ... [21] Analysis of mixing for electroosmotic flow in micro/nano channels with ... [22] Electrokinetic and colloid transport ... [23] Comparison of the Nernst–Planck model and the Poisson–Boltzmann ... [24] Electroosmotic flow driven by oscillating zeta potentials ... [25] Effects of microchannel geometry on pulsed flow ... [26] Lattice Poisson–Boltzmann simulations of electro-osmotic flows ... [27] Transient electroosmotic flow induced by AC electric field in micro-channel ...

مدل سازی عددی چند نوع میکرومیکسرهای الکتروسینتیکی فعال و غیرفعال با استفاده از معادلات پواسون-رنست-پلنک-ناویر-استوکس

کامیار ملکی باقرآبادی MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف- پردیس بین الملل جزیره کیش، جزیره کیش، ایران

مهدی ثانی PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف- پردیس بین الملل جزیره کیش، جزیره کیش، ایران

محمدسعید سعیدی PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

چکیده

میکرومیکسرهای اجزای حیاتی در دستگاه‌های آزمایشگاه-روی-تراشه به شمار می‌روند. کاربرد اصلی آنها اختلاط دوگونه سیال با کیفیت مطلوب در حداقل زمان اختلاط است. در این مقاله چند نوع میکسر فعال و غیرفعال با طراحی‌های نوآورانه به منظور افزایش کیفیت اختلاط و کاهش زمان آن مورد مطالعه عددی قرار گرفته‌اند. مدل سازی عددی توسط حل معادلات غیرخطی و به هم وابسته پواسون-رنست-پلنک-ناویر-استوکس و با استفاده از کد خانگی رایان انجام گرفته است. این معادلات که در مقیاس محیط پیوسته پدیده‌های همرفت، مهاجرت الکتریکی و نفوذ مولکولی را در نظر می‌گیرند مدل دقیق‌تری از فیزیک واقعی غالب بر میکرومیکسرهای الکتروسینتیکی فعال با الکترودهای ولتاژ متغیر را ارائه می‌نمایند. روش‌های رایج و ساده سازی شده همچون مدل پواسون-بولتزمن بر پایه فرضیات ساده شده بنا شده‌اند و در نتیجه در مواردی مانند وجود پیچیدگی در هندسه و استفاده از الکترودهای ولتاژ متغیر دقت خود را به شدت از دست می‌دهند. از طرف دیگر مدل پواسون-بولتزمن از نظر حل عددی به مراتب از مدل پواسون-رنست-پلنک-ناویر-استوکس ساده‌تر بوده و مدل سازی بر اساس آن از نظر عددی بسیار ارزان‌تر است. یکی از دستاوردهای این پژوهش نشان می‌دهد در میکرومیکسرهای غیرفعال با استفاده از چند مانع کوچک به عنوان جایگزین یک مانع بزرگ کیفیت اختلاط در نمونه مدل سازی شده به مقدار ۱۳٪ افزایش یافته است. یکی دیگر از دستاوردهای اصلی این پژوهش معرفی چیدمان همزمان الکترودهای عمودی و افقی ولتاژ متغیر با زمان برای اولین بار است. این طرح جدید موجب ایجاد فوران‌های عمود بر جریان اصلی می‌شود و اختلاط را بهبود می‌دهد. در نتیجه تغییرات پیشنهادی در کار حاضر، بهبود افزایش کیفیت اختلاط به ۹۹٪ و کاهش زمان رسیدن به اختلاط پایدار به ۲/۷ ثانیه حاصل شده است.

کلیدواژه‌ها: آزمایشگاه روی تراشه، میکرومیکسر فعال، میکرومیکسر غیرفعال، الکترودهای عمودی فعال

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۹

*نویسنده مسئول: msani@sharif.edu

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر پیشرفت‌های چشمگیری در علم میکروسیالات حاصل شده که موجب توسعه تراشه‌های زیستی در زمینه‌های گسترده و متنوعی مانند تحلیل‌های شیمی، انتقال دارو و هیبریداسیون DNA شده است^[1]. آزمایشگاه روی تراشه و میکروسیستم‌های تحلیلی جامع دستگاه‌هایی با قابلیت‌های گوناگون تجمع‌شده در ابعاد بسیار کوچک هستند که با میکروسیالات سر و کار دارند^[2]. یکی از اجزای مهم و حیاتی در این دستگاه‌ها، میکرومیکسرهای هستند که اختلاط سریع و دقیق نمونه‌ها و واکنش‌گرها از آنها انتظار می‌رود^[3]. عدد رینولدز در جریان‌های با ابعاد میکرو به دلیل نرخ پایین جریان و ابعاد کوچک کانال بسیار ناچیز است. به این ترتیب اختلاط موثر در ابعاد میکرو

با تکیه بر نیروی اینرسی همچون میکسرهای مقیاس بزرگ امکان‌پذیر نیست. با این وجود تلاش‌های بسیار زیادی در راستای افزایش بهره‌وری و درصد اختلاط در میکرومیکسرهای به‌وسیله ایجاد اختلال و بی‌نظمی در جریان سیال صورت گرفته است^[4]. میکرومیکسرهای به‌طور کلی به دو دسته فعال و غیرفعال از بعد نحوه اختلاط تقسیم می‌شوند. عملکرد میکرومیکسرهای غیرفعال بر پایه هندسه میکروکانال به‌منظور ایجاد اغتشاش در جریان آرام است^[5]. به عبارت دیگر در میکسرهای غیرفعال منبع انرژی بیرونی (به‌جز پمپ سیال) در عمل اختلاط وجود ندارد. این نوع میکسرهای دارای بازده به مراتب کمتر و مدت زمان اختلاط به مراتب بیشتر از میکسرهای فعال هستند. نفوذ مولکولی پدیده غالب در میکسرهای غیرفعال به شمار می‌رود^[6]، که ذاتاً یک فرآیند آرام تلقی می‌شود و اتکا به آن موجب افزایش طول کانال و زمان اختلاط به‌منظور رسیدن به مقدار بهره‌وری مد نظر می‌شود. در میکرومیکسرهای فعال اختلاط به‌وسیله یک تلاطم و آشوب منظم یا غیرمنظم در جریان سیال توسط یک نیروی محرکه خارجی تقویت می‌شود^[7]. در سال‌های اخیر روش‌های الکتروسینتیکی به‌عنوان یک روش با هدف اختلاط و پمپاژ در سیستم‌های میکروسیالاتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در مقایسه با روش‌های سنتی اعمال اختلاف فشار، روش الکتروسینتیکی دارای مزیت‌های کلیدی همچون قابلیت انتقال حجم کم نمونه‌ها با دقت بالا بدون استفاده از قطعات متحرک مکانیکی است. همچنین قابلیت اتصال و تجمع‌شدن مستقیم با دیگر قسمت‌های یک سیستم از دیگر مزایای این روش است^[8, 9].

الکتروسینتیک پدیده‌ای است که به‌صورت گسترده در میکرومیکسرهای مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر با توجه به ترکیب، خواص و ولتاژ نسبی دیواره و سیال، اندرکنش نزدیک دیوار موجب جدایش یون‌ها و پیدایش لایه الکتریکی مضاعف می‌شود^[10]. الکترودهای تعبیه‌شده در این نوع دستگاه‌ها برای ایجاد میدان الکتریکی به‌منظور اعمال نیرو در یون‌ها و حرکت آنها و همچنین القای حرکت به سیال تعبیه شده‌اند. نیروی به‌وجودآمده می‌تواند به‌عنوان عامل پمپاژ و همچنین نیرویی در راستای به‌حرکت‌درآوردن سیال برای اختلاط فعال باشد. قراردادن الکترودهای ولتاژ متغیر با زمان می‌تواند در مقدار ولتاژهای مختلف، فرکانس‌های متغیر و با خواص گوناگون الکتریکی سیال مورد بررسی و استفاده قرار گیرد^[11, 12]. در این میان عواملی مانند هندسه کانال و همچنین قرارگیری الکترودها موضوع اصلی مدل سازی‌های عددی و همچنین بررسی نمونه‌های ساختی توسط برخی مطالعات است^[7, 13-15]. یکی از هندسه‌های رایج و متداول میکرومیکسرهای فعال با ولتاژ متغیر توسط چو و همکاران^[1] معرفی شده است. ظاهر این طرح از یک محفظه مربعی شکل برای اختلاط به همراه دو جفت الکترودهای اختلاط‌گر که ولتاژ آنها متغیر با زمان است، تشکیل شده است. در مطالعه چو میزان کیفیت اختلاط تا ۹۵٪ افزایش داده شده است. مدل عددی استفاده‌شده در پژوهش چو و همکاران^[1] پواسون-بولتزمن است. بر و همکاران^[16] در پژوهش خود تاثیر هندسه‌های مختلف با دیواره‌هایی با پتانسیل زیتای مخالف ولی با مقدار ولتاژ کم و ثابت توسط مدل پواسون-رنست-پلنک مورد بررسی قرار داده‌اند. کانگ و همکاران^[17] نیز تاثیر وجود موانع به‌صورت متعدد روی دیواره کانال توسط مدل رنست-پلنک و در حالت پایا تحقیق نموده‌اند، که افزودن موانع موجب بهبود عملکرد میکرومیکسر شده است. در این میان بررسی و مطالعه میکسرهای فعال با الکترودهای ولتاژ متغیر توسط مدل

معادلات مذکور از نوع معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی غیرخطی و کوپلینگ قوی داخلی هستند. مقدار پتانسیل الکتریکی از معادله پواسون (۱) که توزیع غلظت یون‌ها را در قالب چگالی بار آزاد در سمت راست خود نیاز دارد، به دست می‌آید. در معادله نرنست-پلنک (۳) هدف به دست آوردن مقدار غلظت یون است و میدان سرعت (عبارت همرفت) از معادله ناویر-استوکس و پتانسیل الکتریکی (عبارت مهاجرت الکتریکی) از معادله پواسون برای به دست آوردن غلظت یون به کار می‌رود. از طرفی دیگر در معادله ناویر استوکس غلظت یون در قالب چگالی بار و پتانسیل الکتریکی در سمت راست معادله به منظور به دست آوردن میدان سرعت، مورد نیاز است. علاوه بر این ارتباط بین متغیرها در زمان اعمال شرایط مرزی کوپلینگ موجود را قوی‌تر می‌کند.

۲-۲- معادلات مدل پواسون-بولتزمن

در مدل پواسون بولتزمن فرض می‌شود برهم‌کنش پدیده‌های پخش مولکولی و مهاجرت الکتریکی (بدون در نظر گرفتن جریان سیال) توزیع یون‌ها را در کنار دیواره کنترل می‌نماید و علاوه بر این توزیع یون‌ها در لایه الکتریکی مضاعف در جهت عمود بر دیواره مانند توزیع یون‌ها در مدل نیمه بی‌نهایت است (بدن توجه به انحنا و تغییر شکل دیواره). بدین ترتیب برای توزیع یون‌ها معادله‌ای حل نمی‌شود. معادلات مدل مذکور با تفکیک میدان پتانسیل به دو میدان پتانسیل درونی (زیتا) و بیرونی به شرح زیر هستند [15]:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (4)$$

$$\nabla^2 \psi = \frac{2n_0 z e}{\epsilon \epsilon_0} \sinh\left(\frac{ze}{k_B T} \psi\right) \quad (5)$$

$$\vec{F}_{EOF} = 2n_0 z e \sinh\left(\frac{ze}{k_B T} \psi\right) \nabla(\psi + \phi) \quad (6)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + \rho g_i + \vec{F}_{EOF} \quad (7)$$

$$n^+ = \exp\left(-\frac{ez_0}{k_B T} \psi\right) \quad (8)$$

$$n^- = \exp\left(\frac{ez_0}{k_B T} \psi\right) \quad (9)$$

در معادله (۴) پتانسیل الکتریکی بیرونی ناشی از الکترودها است. در معادله (۵) توزیع پتانسیل الکتریکی درونی بوده و عملاً توزیع پتانسیل در راستای عمود بر کانال (پتانسیل زیتا یا پتانسیل الکتریکی روی سطح میکروکانال) را نشان می‌دهد (لازم به ذکر است در برخی مقالات پتانسیل زیتا فقط به مقدار پتانسیل روی دیواره اطلاق می‌شود). $\vec{F}_{EOF}$ نیروی الکترواسمزی است که تأثیرات ناشی از توزیع یون را بر میدان سرعت نشان می‌دهد. در معادلات (۸) و (۹) n^+ و n^- توزیع غلظت گونه‌های یون‌های مثبت و منفی با توجه به مقدار پتانسیل الکتریکی داخلی و ζ_0 به عنوان پتانسیل اولیه روی سطح محاسبه می‌شود.

۲-۳- مقایسه مدل پواسون-نرنست-پلنک و پواسون-بولتزمن

همان‌طور که در معادلات پواسون-بولتزمن مشاهده می‌شود از بعد حل عددی کوپلینگ یک‌طرفه بین معادلات برقرار است که فرآیند حل عددی را به مقدار قابل توجهی ساده‌سازی می‌نماید. ساده‌سازی‌های استفاده‌شده در معادلات پواسون-بولتزمن

پواسون-نرنست-پلنک با توجه به خلا موجود جایگاه ویژه‌ای را به خود اختصاص داده است. در این کار، نحوه مدل‌سازی عددی و نتایج آن در مورد چند نمونه میکرومیکسهای غیرفعال و فعالی که پمپاژ سیال در آنها توسط پدیده الکترواسمز و اختلاط در نوع فعال توسط الکترودهایی با ولتاژ متغیر، انجام شده است گزارش می‌شود. فیزیک واقعی جریان الکترواسمز به وسیله معادلات پواسون-نرنست-پلنک و ناویر-استوکس بیان می‌شود. در معادلات ذکرشده مهاجرت الکتریکی، همرفت سیال و نفوذ مولکولی به صورت همزمان و تأثیرگذار بر یکدیگر در شکل‌گیری لایه الکتریکی مضاعف و رفتار یون‌ها در نظر می‌گیرند. در مطالعه حاضر تمام موارد مورد مطالعه با استفاده از معادلات مذکور و توسط کد خانگی رایان [18-20] مدل شده‌اند. از قابلیت‌های دیگر کد رایان علاوه بر حل معادلات ناویر-استوکس می‌توان به استفاده شبکه پویا، شبکه بدون ساختار چندوجهی آزاد و حل کوپل‌شده کامل معادلات پواسون-نرنست-پلنک و ناویر استوکس و همچنین امکان استفاده از مدل پواسون-بولتزمن اشاره کرد. این نکته قابل ذکر است که معادلات پواسون-نرنست-پلنک غیرخطی بوده و کوپلینگ بین آنها قوی است و این امر فرآیند حل را به مقدار قابل توجهی پیچیده می‌کند. به طور رایج ساده‌سازی‌ها و فرضیاتی مانند صرف نظر از اندرکنش همرفت و مهاجرت الکتریکی که منجر به فرض توزیع بار در جهت عمود بر دیواره ناشی از توزیع تعادلی مدل نیمه بی‌نهایت (مانند مدل پواسون-بولتزمن) به کار می‌روند، تا حل معادلات ساده‌تر و با هزینه محاسباتی کمتر صورت گیرد [21]. این مدل‌ها و ساده‌سازی‌ها در محدوده صحت فرضیات اولیه خود قابل قبول هستند. بدیهی است پیچیدگی‌های هندسی و فیزیکی موجب کاهش قابل توجه دقت مدل‌های مذکور از جمله مدل پواسون-بولتزمن می‌شوند. در این پژوهش استفاده از معادلات پواسون-نرنست-پلنک و ناویر استوکس برای اولین بار در میکرومیکسهای فعال با الکترودهای ولتاژ متغیر، صورت گرفته است. همچنین استفاده از موانع کوچک‌تر به جای یک مانع بزرگ در طراحی میکسهای غیرفعال و به کارگیری الکترودهای عمودی و افقی در یک محفظه در طراحی میکسهای فعال را می‌توان از دیگر نوآوری‌های این کار برشمرد.

۲-۲- معادلات حاکم و فرضیات

۲-۱- معادلات پواسون-نرنست-پلنک و ناویر-استوکس

در این مقاله مدل‌سازی عددی بر پایه حل همزمان معادلات کوپل شده زیر ارائه شده است [22]:

$$\nabla^2 \psi = -\frac{\rho_f}{\epsilon} = -\frac{\sum_i n_i z_i e}{\epsilon} \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + \rho g_i - \rho_f \frac{\partial \psi}{\partial x_i} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \left(n_i \vec{u} - D_i \vec{\nabla} n_i - \frac{z_i e n_i D_i}{k_B T} \vec{\nabla} \psi \right) = 0 \quad (3)$$

معادلات (۱)، (۲) و (۳) به ترتیب معادله پواسون، ناویر-استوکس و نرنست-پلنک هستند. در این معادلات ψ توزیع پتانسیل الکتریکی، ρ_f چگالی بار آزاد (تعریف‌شده در معادله ۱)، ϵ ضریب گذردی سیال، z_i والانس یونی یون i ، e بار الکترونی، n_i غلظت مولی یون i ، t زمان، u_i مولفه‌های بردار سرعت، P فشار، ρ چگالی سیال، D_i ضریب نفوذ یون i ، k_B ثابت بولتزمن و T دمای سیال

محدودیت‌ها و خطاهایی را نسبت به فیزیک واقعی ایجاد می‌کنند که به شرح ذیل هستند [17, 23, 24]:

۱- توزیع یونی همان‌طور که در معادلات (۸) و (۹) نشان داده شده است به‌صورت پایا در نظر گرفته شده است و با گذر زمان تغییر نمی‌کنند.

۲- انتقال یون‌ها ناشی از میدان سرعت سیال در معادلات توزیع یون نادیده گرفته شده است. این فرضیه در کانال‌های مستقیم و شرایط پایا به شرطی که ضخامت لایه الکتریکی مضاعف کم باشد، قابل قبول است. در مواردی که پیچیدگی هندسی وجود دارد مانند به‌کارگیری محفظه‌های اختلاط در کانال به‌منظور اختلاط بهتر و همین‌طور در صورت وجود شرایط گذرای زمانی (مانند به‌کارگیری الکترودها در میکسرهای فعال) یا ضخامت‌های قابل توجه لایه الکتریکی مضاعف در مقایسه با عرض کانال، از صحت نتایج حاصله از مدل‌سازی با فرضیات پواسون-بولتزمن کاسته می‌شود.

۳- در مدل پواسون-بولتزمن فرض می‌شود که لایه الکتریکی مضاعف دو دیواره بالا و پایین کانال روی هم موثر نبوده و با یکدیگر همپوشانی ندارند. به عبارت دیگر در مواردی که ضخامت لایه مذکور نسبت به عرض کانال کوچک باشد، مدل مذکور صحیح است.

۴- گرادیان پتانسیل الکتریکی داخلی ($\nabla\psi$) در لایه دوپل الکتریکی باید از گرادیان پتانسیل خارجی ($\nabla\phi$) به مراتب بزرگ‌تر باشد، زیرا از تاثیر پتانسیل الکتریکی خارجی بر غلظت یون‌ها صرف نظر شده است.

۵- تغییرات اصلی غلظت یون و پتانسیل الکتریکی داخلی فقط در راستای عمود بر کانال در نظر گرفته شده و از تغییرات آن در راستای طول کانال صرف نظر شده است.

فرضیات موجود در معادلات پواسون بولتزمن فرآیند حل عددی را به مقدار قابل توجهی ساده می‌کنند، ولی در مواردی که تاثیر میدان سرعت به علت وجود گردابه‌ها یا تغییرات در هندسه قابل توجه باشد، از صحت نتایج به‌دست‌آمده توسط این مدل کاسته می‌شود. در مدل کامل پواسون-رنست-پلنک ناویر-استوکس تمام پدیده‌های ناشی از فیزیک واقعی از جمله تاثیر میدان سرعت بر غلظت یون‌ها، تاثیر پتانسیل الکتریکی خارجی بر آرایش غلظت یون‌ها و تغییرات غلظت یون‌ها نسبت به زمان و در طول کانال در نظر گرفته می‌شود.

۴-۲- غلظت گونه‌های سیال و بازده اختلاط

غلظت گونه‌های سیال در طول فرآیند اختلاط و در هر محل از کانال از رابطه گذرای نفوذ-همرفت محاسبه می‌شود [25]:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (c_i \vec{u} - D_i \vec{\nabla} c_i) = 0 \quad (10)$$

در رابطه (۱۰) c_i غلظت محلی گونه سیال، $\vec{u}$ میدان سرعت و D ثابت پخش مولکولی است.

یکی از پارامترهای مهم که عملکرد و بهره‌وری اختلاط را نشان می‌دهد، بازده اختلاط است، که از رابطه زیر محاسبه می‌شود [10]:

(۱۱)

$$\text{بازده اختلاط} = \left[1 - \frac{\int_{\text{lower surface}}^{\text{upper surface}} |c - c_{\infty}| dy}{\int_{\text{lower surface}}^{\text{upper surface}} |c_0 - c_{\infty}| dy} \right] \times 100$$

در رابطه (۱۱) c غلظت محلی در راستای عمود بر سطح کانال، c_0 به‌عنوان غلظت عدم اختلاط که دارای یکی از مقادیر صفر و یا یک

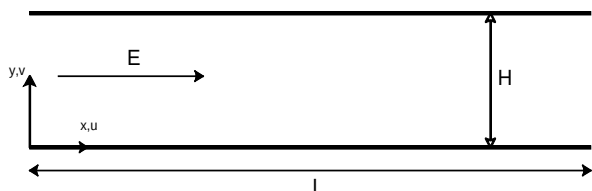
است و c_{∞} به‌عنوان غلظت اختلاط کامل ($c_{\infty}=1/2$) می‌باشد. عبارت زیر انتگرال در مخرج همواره برابر ۰/۵ است. رابطه (۱۱) با انتگرال‌گیری در راستای عمود بر دیواره کانال درصد اختلاط گونه‌ها با یکدیگر را گزارش می‌کند. زمان اختلاط به‌عنوان مدت‌زمان شروع عملکرد میکسر تا خروج سیال مخلوط‌شده با بیشترین بازده اختلاط در نظر گرفته شده است.

۳- روش حل عددی

در این پژوهش به‌منظور حل معادلات کوپل پواسون-رنست-پلنک و ناویر استوکس، همان‌طور که در قبل بیان شد، از کد رایان استفاده شده است. گسسته‌سازی معادلات بر مبنای حجم محدود است. کوپلینگ سرعت-فشار با روش سیمپل و گسسته‌سازی عبارات همرفت توسط روش کوئیک اعمال گشته است.

۳-۱- اعتبارسنجی روش حل عددی

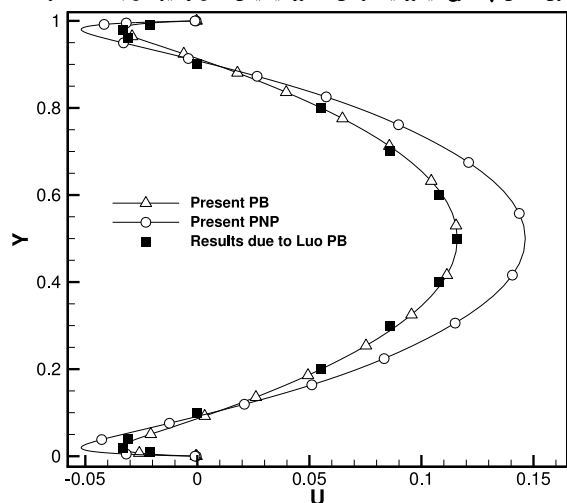
در این قسمت اعتبارسنجی روش حل معادلات الکتروستاتیک به‌وسیله مقایسه با حل‌های عددی و انگ و همکاران [26] در مورد یک میکسر غیرفعال و [27] در مورد یک میکسر فعال مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۱ نمای طرح‌واره میکسر مدل شده و انگ با مشخصات ابعادی $H=50 \mu\text{m}$ ، $L=500 \mu\text{m}$ و در حالت غیرفعال نشان داده شده است. شرایط فیزیکی مدل‌شده طبق و انگ [26]، با فرض چگالی $\rho=1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ، لزجت دینامیکی $\mu=0.9 \times 10^{-3} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}$ ، پتانسیل الکتریکی روی دیواره (زیتا) $\zeta_0=-50 \text{ mV}$ ، دما برابر با 2773 K و مقدار گرادیان پتانسیل خارجی در راستای طول کانال در دو حالت با مقادیر $\frac{V}{m}$ و $\frac{V}{m}$ مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۱) نمای طرح‌واره میکرومیکسر غیرفعال برای صحت‌سنجی

در مطالعه و انگ و همکاران [26] مساله با استفاده از معادلات پواسون بولتزمن مدل شده است. با توجه به اینکه کد رایان توانایی حل معادلات پواسون-رنست-پلنک و همین‌طور پواسون-بولتزمن را دارد، از هر دوی آنها استفاده شده است. نتایج پس از عبور از شرایط گذرای اولیه ارایه می‌شود. نمودار سرعت نشان‌داده‌شده در نمودار ۱ سرعت در راستای محور x از یک برش عرضی در وسط کانال است. مقادیر محاسبه‌شده به‌ازای دو شدت جریان اصلی حل شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش شدت جریان اصلی موجب ایجاد فاصله بین نتایج حاصل از دو سری معادلات می‌شود. بدیهی است به‌دلیل مدل‌سازی کامل‌تر فیزیک، نتایج مدل رنست-پلنک صحیح‌تر هستند.

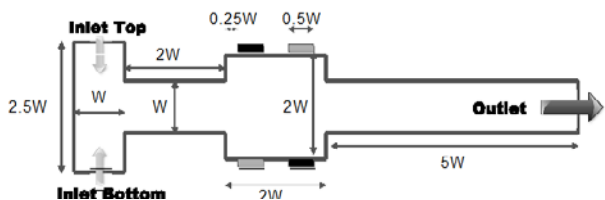
در شکل ۲ نمای میکرومیکسر فعالی که توسط چهار الکترودها پتانسیل سطح‌های مخالف دیواره [27] عمل اختلاط را انجام می‌دهند نشان داده شده است. طبق مطالعه و انگ [27] مشخصات ابعادی این میکسر فعال $H=30 \mu\text{m}$ ، $L=300 \mu\text{m}$ ، $L_t=45 \mu\text{m}$ ، فاصله بین دو الکترودها و محل قرارگیری آنها از دو سر کانال



نمودار ۲) نمودار سرعت مدل‌سازی حاضر از مقطع A: A و نتایج مربوط به [27]

۴- موارد مورد مطالعه

در این مطالعه میکرومیکسرهایی از هر دو خانواده فعال و غیرفعال با هدف بررسی تاثیر موانع در میکرومیکسره‌های غیرفعال و چیدمان الکترودها در نوع فعال، طراحی و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در شکل ۳ نمای کلی یک میکسر نشان داده شده است، که به ترتیب شامل دو ورودی، محفظه اختلاط، چهار عدد الکترودها با ولتاژ متغیر و خروجی سیال مخلوط شده است. ایده اولیه هندسه و چیدمان الکترودهای این طرح از چو و همکاران [1] اقتباس شده است. قرارگیری محفظه اختلاط در عملکرد میکسر تاثیر مثبتی در ایجاد گردابه‌ها می‌گذارد. تمام تغییرات مد نظر در نمونه‌های فعال و غیرفعال روی این محفظه اعمال گشته و موارد دیگر همچون ابعاد کانال و خواص فیزیکی یکسان فرض شده‌اند. عرض کانال (W) نیز ۵۰ میکرومتر در نظر گرفته شده است.

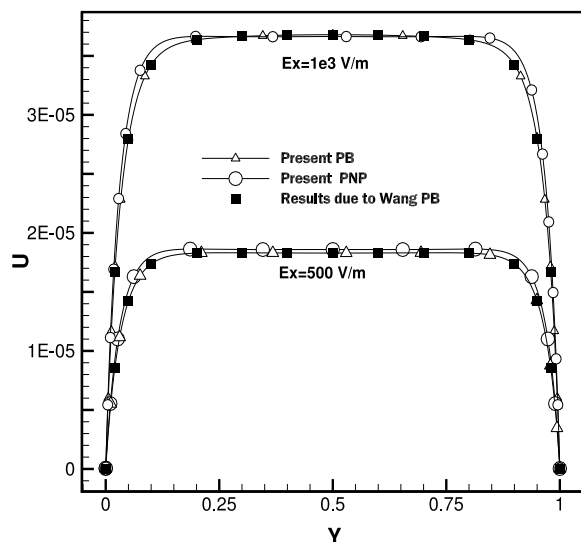


شکل ۳) طرحواره اصلی میکرومیکسره‌های مدل شده به همراه ابعاد

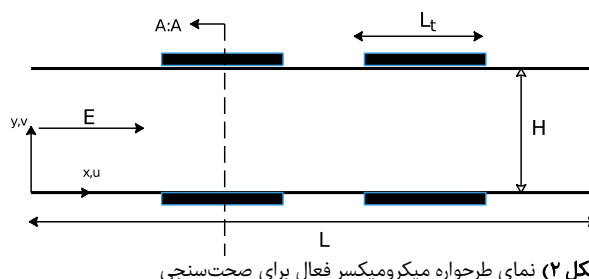
۳-۱- مدل‌های غیرفعال

در میکسره‌های غیرفعال یکی از تکنیک‌هایی که موجب درهم‌آمیختن لایه‌های جریان آرام می‌شود، قراردادن مانع در مسیر جریان است. اندازه موانع و نحوه چیدمان آنها در بازده نهایی اختلاط تاثیرگذار خواهد بود. در شکل ۴ میکسر پایه و چیدمان موانع در میکسره‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. میکسر شماره ۱-۴ الف بدون وجود مانع و در حالت پایه به منظور مرجعی برای مقایسه با دیگر موارد در نظر گرفته شده است. در میکسر شماره ۲-۱ ب یک مانع مستطیل‌شکل به عرض ۲۵ میکرومتر و طول ۵۰ میکرومتر در وسط محفظه اختلاط به منظور ایجاد بی‌نظمی قرار داده شده است. یکی از نوآوری‌ها در این مطالعه استفاده از چندین مانع کوچک‌تر مربع‌شکل به اندازه ۱۲ میکرومتر، ۸ میکرومتر و ۴ میکرومتر در مسیر جریان به منظور افزایش بی‌نظمی و کاهش افت فشار ناشی از قراردادن یک مانع

به ترتیب ۵۰ میکرومتر و ۸۲ میکرومتر در نظر گرفته شده است. شرایط فیزیکی مدل شده طبق مطالعه [27]، با فرض چگالی $\rho = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ، لزجت دینامیکی $\mu = 0.9 \times 10^{-3} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}$ ، پتانسیل الکتریکی روی دیواره (زیتا) $\zeta_0 = -75 \text{ mV}$ ، پتانسیل الکتریکی روی الکترودهای دیواره $\psi = 75 \text{ mV}$ ، دما $T = 298/16 \text{ K}$ و مقدار گرادیان پتانسیل خارجی در راستای طول کانال با $1000 \frac{\text{V}}{\text{m}}$ مورد استفاده قرار گرفته است.



نمودار ۴) نمودار سرعت مدل‌سازی حاضر و نتایج مربوط به وانگ [26]



شکل ۵) نمای طرحواره میکرومیکسره فعال برای صحت‌سنجی

این مساله مانند مورد قبل توسط کد رایان و با استفاده از دو سری معادلات اصلی ذکر شده مدل و حل شده است. نمودار سرعت در راستای محور x از مقطع A: A استخراج و با مطالعه [27] در نمودار ۲ مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود و انتظار می‌رود اختلاف به وجود آمده در پروفایل سرعت برای دو مدل پواسون-بولتزمن و پواسون-نرنست-پلنک قابل توجه است. وجود الکترودها موجب ایجاد گردابه‌هایی می‌شود که در نتیجه آنها محدوده‌هایی با سرعت منفی و در خلاف جهت حرکت کلی جریان به وجود می‌آید و در نتیجه سطح مقطع موثر برای جریان اصلی کاهش می‌یابد. به همین دلیل با توجه به پیوستگی کلی، سرعت جریان در مرکز کانال افزایش پیدا کند. نتایج به دست آمده در بالا کاملاً با برخی مطالعات [26, 27] انطباق داشته و از صحت پیاده‌سازی مسائلی با فیزیک الکتروسینتیک با روش‌های پیش‌گفته خبر می‌دهند. بر این اساس در بخش بعد، از همین روش‌ها برای طراحی‌های میکرومیکسرها و اصلاح طرح‌های موجود بهره گرفته خواهد شد.

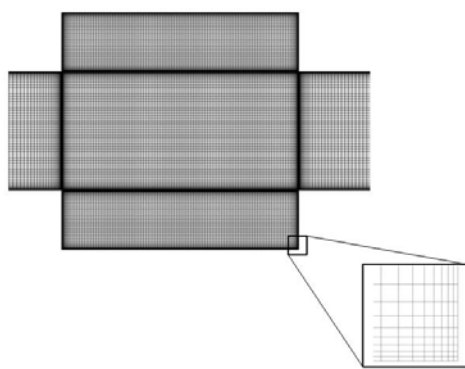
است. دیگر پارامترها و شرایط فیزیکی و الکتریکی مشابه مدل غیرفعال در نظر گرفته شده است.

میکسر شماره ۵ در شکل ۵- الف به عنوان مدل پایه که شامل دو جفت الکتروود با ولتاژ متغیر بیان شده در متن بالا که با یک اختلاف فاز تحریک می شوند، در نظر گرفته شده است. میکسر شماره ۶ در شکل ۵- ب از موارد نوآورانه در این پژوهش است. در این میکسر فعال، قرارگیری الکتروود و موانع ترکیب و مورد بررسی قرار گرفته است. از مواردی که برای اولین بار در این مطالعه بررسی شد، قراردادن الکتروودها به صورت عمودی روی دیوار و عمود بر جهت اصلی جریان است. در میکسر شماره ۷ شکل ۵- ج این خاصیت به صورت جداگانه و در میکسر شماره ۸ شکل ۵- د به صورت ترکیبی با الکتروودهای افقی قرار داده شده است. در میکسر شماره ۸، شش عدد الکتروود (الکتروود افقی به طول ۷۵ میکرومتر) در دو گروه معین شده دارای ولتاژ متغیر هستند.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- استقلال از شبکه بندی و گام زمانی

به علت تشکیل لایه نازک الکتریکی مضاعف در مجاورت دیواره و حرکت جریان سیال و همچنین تأثیرش روی دیواره و الکتروودهای اختلاطگر، ایجاب می نماید که شبکه بندی این پدیده را با دقت کامل پوشش دهد. بدین منظور شبکه بندی غیریکنواخت ساختاریافته از نوع چهارضلعی تولید شد. همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده است شبکه بندی در راستای عمود بر دیوار منسجم تر می شود. در این پژوهش استقلال از شبکه برای ناحیه لایه الکتریکی مضاعف مطالعه و به کارگیری ۱۵ سلول در راستای عمود بر دیواره در داخل لایه مضاعف الکتریکی مناسب تشخیص داده شد.



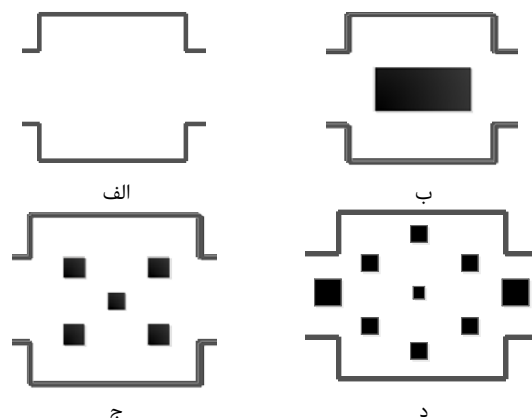
شکل ۶) شبکه بندی ساختاریافته استفاده شده

همین طور مطالعه استقلال از گام زمانی و شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. از میان شبکه های تولید شده با تعداد سلول های ۳۸۲۶۱، ۴۱۶۸۸، ۴۷۵۱۴ و ۵۱۹۶۲ به منظور مطالعه استقلال از شبکه، تعداد سلول های ۴۷۵۱۴ عدم وابستگی نتایج به شبکه را نشان داد. برای گام زمانی نیز از میان اندازه های گام زمانی ۰/۱، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ میلی ثانیه پس از بررسی و مطالعه، گام زمانی ۰/۰۱ میلی ثانیه که حلی تقریباً غیرقابل تمایز با گام های زمانی کوچک تر ایجاد نمود، برای ادامه مدل سازی انتخاب شد.

۴-۲- مدل های غیرفعال

در شکل ۷ کانتور غلظت دو گونه سیال در میکسرهای غیرفعال نشان داده شده است. با قراردادن نه عدد مانع در میکسر شماره ۴ شکل ۷- د، بازه رنگی اختلاط کامل در خروجی آن نسبت به دیگر

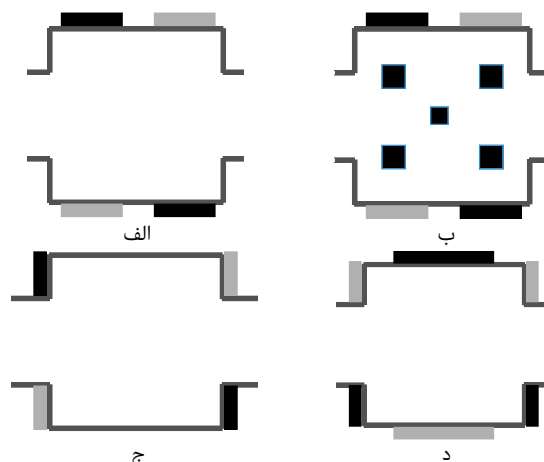
بزرگ است. میکسرهای نوع سه و چهار که در شکل ۴- ج و د نشان داده شده اند، به همین منظور با پنج و نه مانع طراحی شده اند. شرایط فیزیکی و الکتریکی مدل شده، با فرض چگالی $\rho = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ لزجت دینامیکی $\mu = 0.9 \times 10^{-3} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}$ پتانسیل الکتریکی روی دیواره (زیتا) $\zeta_0 = -75 \text{ mV}$ دما $T = 298.15 \text{ K}$ و مقدار گرادیان پتانسیل خارجی در راستای طول کانال با $400 \frac{\text{V}}{\text{m}}$ مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۴) طرحواره میکسرهای غیرفعال (الف) میکسر شماره ۱ (ب) میکسر شماره ۲ (ج) میکسر شماره ۳ (د) میکسر شماره ۴

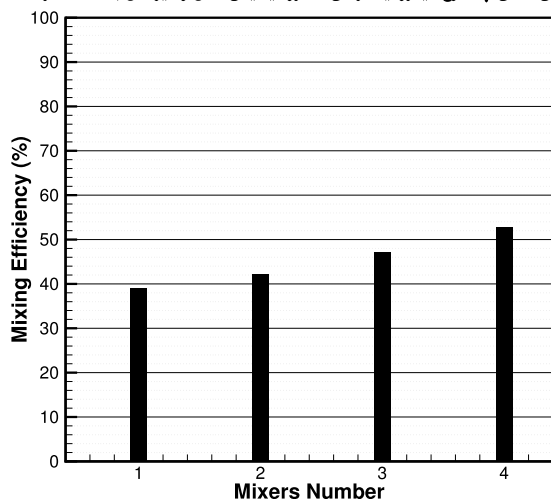
۳-۲- مدل های فعال

روشی که در این مطالعه برای میکسرهای فعال در نظر گرفته شده است، استفاده از الکتروودهایی با ولتاژ متغیر در سطح خارجی محفظه اختلاط است. این الکتروودها با تغییر شدید چگالی یونها در نزدیکی خود تأثیر بسزایی در ایجاد آشوب و بی نظمی روی جریان آرام دارند. در این مدل از میکسرهای چیدمان الکتروودها از پارامترهای موثری است، که مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۵ شماتیک میکسرهای فعال نشان داده شده است.



شکل ۵) نمای طرحواره میکسرهای فعال (الف) میکسر شماره ۵ (ب) میکسر شماره ۶ (ج) میکسر شماره ۷ (د) میکسر شماره ۸

الگوی ولتاژ متغیری که برای دو گروه الکتروود (الکتروودهای مشخص شده با رنگ مشکی گروه E1 و خاکستری گروه E2) گروه $E1 \psi = 7.5 \sin(100t)$ و گروه $E2 \psi = 7.5 \sin(100t + \frac{\pi}{2})$ در نظر گرفته شده است، که به صورت سینوسی با اختلاف فاز

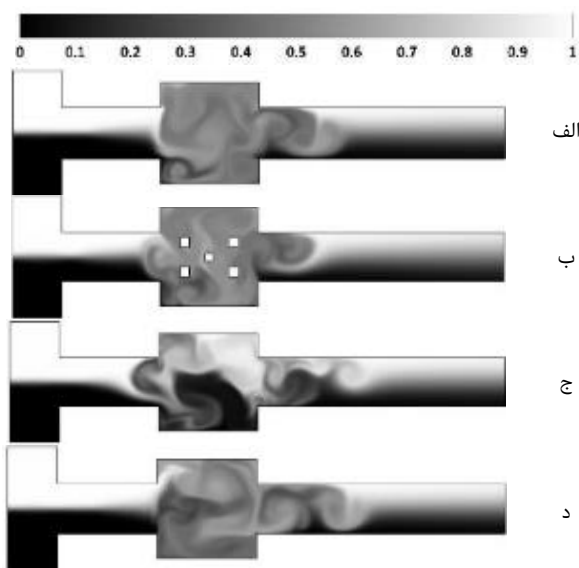


نمودار (۳) بازده اختلاط میکسرهای غیرفعال برحسب درصد

۲-۴- مدل‌های فعال

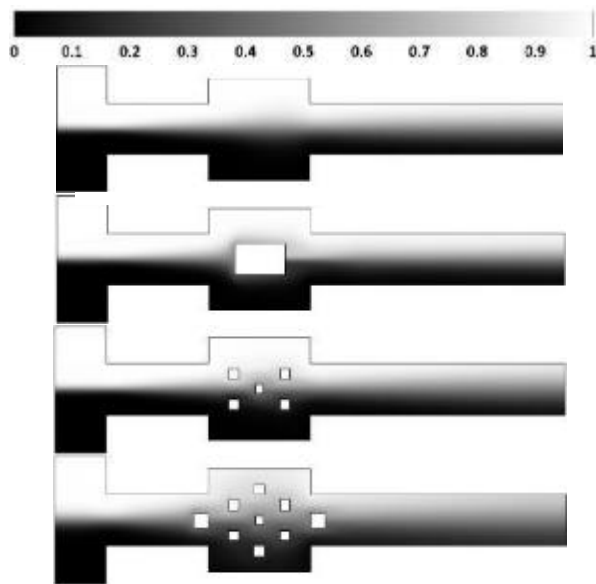
همان‌طور که در بخش‌های قبل بیان شد، هدف از مطالعه میکسرهای فعال بررسی تاثیر چیدمان الکترودها بر بازده اختلاط و مدت‌زمان اختلاط است. در این بین تاثیر قراردادن موانع در میکسرهای فعال نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در محدوده اطلاعات پژوهشگر، مدل‌سازی عددی میکسرهای فعال جریان الکترو-اسمزی توسط معادلات پواسون-نرنست-پلنک و ناویر-استوکس برای اولین بار در کار حاضر گزارش می‌شود. کانتور غلظت میکسرهای فعال شماره ۵ تا ۸ به ترتیب در شکل ۹ پس از گذشت ۷۵٪ ثانیه از فعال‌نمودن الکترودهای اختلاط‌گر آورده شده است.

میکسر شماره ۵ در شکل ۹-الف با افزودن چهار عدد الکترودها و لتاژ متغیر روی سطح بیرونی محفظه، در مقایسه با میکسر شماره ۱ شکل ۷-الف، بهبود چشمگیر عملکرد در محفظه اختلاط کاملاً مشهود است. در میکسر شماره ۶ شکل ۹-ب که ترکیبی از مکانیزم فعال و به‌کارگیری موانع است، اختلاط در محفظه به‌خوبی انجام شده ولی سیال مخلوط‌شده در زمان یکسان نسبت به میکسر شماره ۵ شکل ۹-الف با سرعت کمتری در حال نزدیک شدن به خروجی است. علت این امر با توجه به خطوط جریان بررسی خواهد شد.

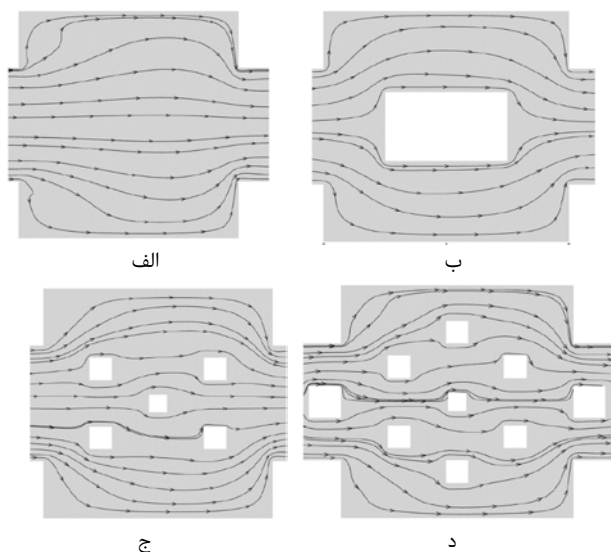


شکل (۹) کانتور غلظت دو گونه سیال (الف) میکسر شماره ۵ (ب) میکسر شماره ۶ (ج) میکسر شماره ۷ (د) میکسر شماره ۸

میکسرهای افزایش یافته است. علت این امر همان‌طور که شکل ۸ برای خطوط جریان میکسرهای شماره ۳ و ۴ نشان داده شده است، نمایان است. قرارگیری تعداد بیشتر موانع، بی‌نظمی به نسبت بیشتری در خطوط جریان ایجاد می‌کند. این بی‌نظمی‌ها با نزدیک‌نمودن بخش‌هایی از جریان که بایستی با هم آمیخته شوند، موجب افزایش اختلاط می‌شود.



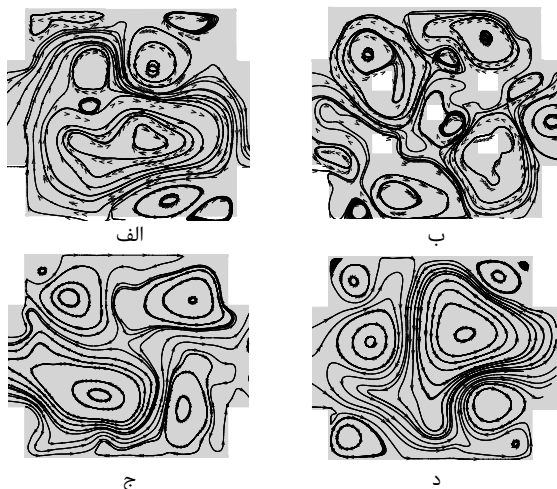
شکل (۷) کانتور غلظت دو گونه سیال (الف) میکسر شماره ۱ (ب) میکسر شماره ۲ (ج) میکسر شماره ۳ (د) میکسر شماره ۴



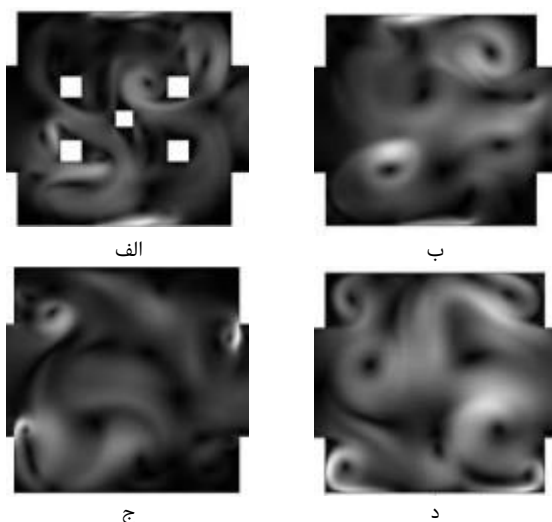
شکل (۸) خطوط جریان در (الف) میکسر شماره ۱ و (ب) میکسر شماره ۲ (ج) میکسر شماره ۳ (د) میکسر شماره ۴

به‌منظور بررسی کمی بازده اختلاط با استفاده از رابطه (۱۱)، مقدار اختلاط روی مقطع خروجی محاسبه و به‌ترتیب شماره میکسر در نمودار ۳ آورده شده است. بیشترین مقدار اختلاط همان‌طور که انتظار می‌رود، مربوط به میکسر شماره ۴ با مقدار ۵۲٪ و کمترین مقدار آن مربوط به میکسر شماره ۱ با مقدار ۳۹٪ است. افزودن نه عدد مانع کوچک موجب افزایش ۱۳٪ اختلاط شده است و تاثیر آن از میکسر شماره ۲ با یک مانع بزرگ‌تر بیشتر است. بدیهی است انتظار می‌رود بازده اختلاط میکسرهای نوع غیرفعال تفاوت قابل توجهی با میکسرهای نوع فعال داشته باشد.

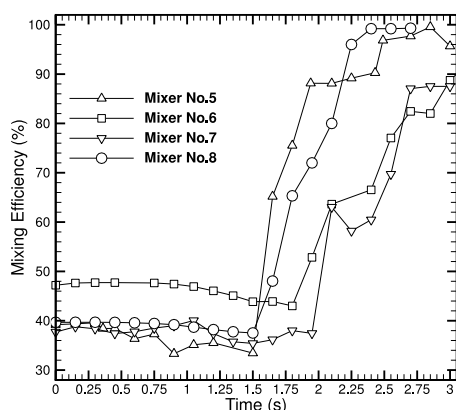
است. میکسر شماره ۸ به گونه‌ای که انتظار می‌رود در مدت زمان ۲/۷ ثانیه به اختلاط ۹۹٪ و ثابت رسیده است. این طراحی یعنی قرارگیری عمودی و افقی الکترودها، منجر به ایجاد گردابه‌های عمودی به منظور اختلاط بهتر و گردابه‌های افقی با هدف تسریع خروج سیال شده است.



شکل ۱۰) خطوط جریان پس از گذشت یک ثانیه از فعال نمودن الکترودهای اختلاطگر (الف) میکسر شماره ۵ (ب) میکسر شماره ۶ (ج) میکسر شماره ۷ (د) میکسر شماره ۸



شکل ۱۱) کانتور اندازه سرعت در مدت زمان یک ثانیه (الف) میکسر شماره ۵ (ب) میکسر شماره ۶ (ج) میکسر شماره ۷ (د) میکسر شماره ۸



نمودار ۴) بازده اختلاط میکسرهای فعال شماره ۵ تا ۸

میکسر شماره ۷ شکل ۹- ج (قرارگیری الکترودها فقط به صورت عمودی) از اختلاط قابل قبولی نسبت به دیگر میکسرهای فعال برخوردار نیست، ولی گردابه‌هایی در راستای عمود بر جریان اصلی ایجاد نموده است. این برتری موجب طراحی میکسر شماره ۸ (الکترودهای افقی و عمودی) شده است. به گونه‌ای که در شکل ۹- د نشان داده شده است، استفاده از ترکیب الکترودهای افقی و عمودی موجب افزایش کیفیت اختلاط و کاهش زمان اختلاط شده است.

خطوط جریان میکسرهای فعال شماره ۵ تا ۸ در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند. مطالعه خطوط جریان کمک می‌کند تا الگوی بی‌نظمی ایجاد شده بهتر نمایان و مورد بررسی قرار گیرد. در شکل ۱۰- الف خطوط جریان میکسر شماره ۵ (فقط الکترودهای افقی) نشان داده شده است.

قرارگیری الکترودها در یک ناحیه غلظت یون‌های مخالف خود را در ناحیه نزدیک الکترودها به شدت افزایش می‌دهد. میدان ایجاد شده توسط الکترودهای پمپ‌کننده جریان اصلی در دوسر میکروکانال، موجب به حرکت درآمدن توده یون‌ها و خود سیال می‌شود. در میکسر شماره ۵ گردابه‌هایی مماس بر دیوار بالایی و پایینی و در راستای موازی با جریان ایجاد شده‌اند. در شکل ۱۱- الف جت‌های سیال تشکیل شده مماس بر دیوارهای مذکور نیز نمایان است. این جت‌های سیال ایجاد شده پس از بزرگ‌تر شدن در راستای عمود بر جریان قرار می‌گیرند و به عمل اختلاط کمک می‌کنند. در شکل ۱۱- ب میکسر شماره ۶ که از موانع بهره می‌گیرد نشان داده شده است. موانع موجب شکسته شدن گردابه‌های بزرگ ناشی از جت‌های سیال شکل ۱۱- ب به گردابه‌های کوچک‌تر شده‌اند. این عمل فرآیند اختلاط و بی‌نظمی را افزایش می‌دهد. این پدیده پیامد منفی هم با خود به همراه دارد که کاهش سرعت جریان و افزایش زمان اختلاط با توجه به وجود موانع در سر راه جریان است. تاثیر قرارگیری الکترودهای فعال به صورت عمود بر جهت جریان در شکل ۱۱- ج نمایان است. گردابه‌ها تمایل به تشکیل در راستای عمودی (دیواره‌ای که الکترودها در پشت آن قرار گرفته است) از خود نشان می‌دهند. شکل‌گیری گردابه‌ها در راستای عمودی و افقی در میکسر شماره ۸ شکل ۱۱- د به علت چیدمان الکترودها به وضوح نمایان است. گردابه‌های عمود بر جریان در نزدیکی دیواره امر اختلاط را تسهیل می‌نمایند، چون در راستای عمود بر جریان اصلی دو گونه سیال را به یکدیگر می‌آمیزند. گردابه‌های افقی تشکیل شده به خروج سریع‌تر سیال مخلوط شده کمک می‌نمایند. میکسر شماره ۸ با افزودن الکترودهای عمودی برای اولین بار در مطالعه حاضر مورد بررسی قرار گرفت، که دارای دو مزیت مهم افزایش کیفیت اختلاط و کاهش زمان اختلاط است. مقایسه کانتور اندازه سرعت میکسر شماره ۷ و ۸ در شکل ۱۱ جت‌های سیال قوی‌تری را در میکسر شماره ۷ نشان می‌دهد. علت این امر قرارگیری مضاعف الکترودهای افقی است که با ایجاد چگالی یون مخالف الکترودهای عمودی، اختلاف چگالی یون‌ها را در آن ناحیه افزایش داده‌اند.

در نمودار ۴ بازده اختلاط میکسرهای فعال شماره ۵ تا ۸ طبق رابطه (۱۱) محاسبه و نشان داده شده است. میکسر شماره ۵ در مدت زمان ۳ ثانیه به اختلاط ۹۸٪ رسیده است. مکانیزم این میکسر به گونه‌ای است که امکان گذر بعضی از توده‌های سیال مخلوط نشده را دارد و همان‌طور که مشاهده می‌شود بازده اختلاط آن مقدار ثابتی نخواهد بود. میکسر شماره ۶ همان‌طور که قبلاً بیان شد، مدت زمان زیادی را صرف می‌کند تا سیال مخلوط شده به خروجی برسد. از این رو پس از ۴/۲ ثانیه به اختلاط ۹۹٪ رسیده

F_{EOF}	بردار نیروی الکترواسموتیک (نیوتن)
x, y, z	جهات طولی و عرضی والانس یون های مثبت و منفی
μ	لزوجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
φ	میدان الکتریکی خارجی (ولت)
ψ	میدان الکتریکی داخلی (ولت)
ζ_0	پتانسیل الکتریکی دیواره (زیتا) (ولت)
ϵ	ثابت دی الکتریک محلول
ρ_f	چگالی بار آزاد (Cm^{-3})

منابع

- 1- Chen C, Cho CC. Electrokinetically driven flow mixing utilizing chaotic electric fields. *Microfluidics and Nanofluidics*. 2008;5(6):785-793.
- 2- Hardt S, Schönfeld F. *Microfluidic technologies for miniaturized analysis systems*. Switzerland: Springer; 2007.
- 3- Kler PA. Modeling and simulation of microfluidic chips for analytical applications [Dissertation]. Santa Fe, Argentina: National University of the Littoral; 2010.
- 4- Lim CY, Lam YC. Analysis on micro-mixing enhancement through a constriction under time periodic electroosmotic flow. *Microfluidics and Nanofluidics*. 2012;12(1-4):127-141.
- 5- Lynn NS, Henry CS, Dandy DS. Microfluidic mixing via transverse electrokinetic effects in a planar microchannel. *Microfluidics and Nanofluidics*. 2008;5(4):493-505.
- 6- Melin J, Giménez G, Roxhed N, van der Wijngaart W, Stemme G. A fast passive and planar liquid sample micromixer. *Lab on a Chip*. 2004;4(3):214-219.
- 7- Chao K, Chen B, Wu J. Numerical analysis of field-modulated electroosmotic flows in microchannels with arbitrary numbers and configurations of discrete electrodes. *Biomedical Microdevices*. 2010;12(6):959-66.
- 8- Zhao C, Yang C. Advances in electrokinetics and their applications in micro/nano fluidics. *Microfluidics and Nanofluidics*. 2012;13(2):179-203.
- 9- Glasgow I, Batton J, Aubry N. Electroosmotic mixing in microchannels. *Lab on a Chip*. 2004;4(6):558-562.
- 10- Erickson D, Li D. Microchannel flow with patchwise and periodic surface heterogeneity. *Langmuir*. 2002;18(23):8949-8959.
- 11- Cheng Y, Jiang Y, Wang W. Numerical simulation for electro-osmotic mixing under three types of periodic potentials in a T-shaped micro-mixer. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*. 2018;127:93-102.
- 12- Shamloo A, Mirzakhani M, Dabirzadeh MR. Numerical simulation for efficient mixing of newtonian and non-newtonian fluids in an electro-osmotic micro-mixer. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2016;107:11-20.
- 13- Barman U, Sen AK, Mishra SC. Theoretical and numerical investigations of an electroosmotic flow micropump with interdigitated electrodes. *Microsystem Technologies*. 2014;20(1):157-168.
- 14- Lin JL, Lee KH, Lee GB. Active micro-mixers utilizing a gradient zeta potential induced by inclined buried shielding electrodes. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2006;16(4):757.
- 15- Chen H, Zhang Y, Mezic I, Meinhart C, Petzold L. Numerical simulation of an electroosmotic micromixer. A

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه میکسرهای فعال و غیرفعال توسط حل کامل معادلات پواسون-رنست-پلنک و ناویر-استوکس مورد بررسی قرار گرفته اند. استفاده از ساده سازی رایج پواسون-بولتزمن با توجه به فرضیات مدل در این نوع مسائل با ماهیت فیزیکی و حقیقی جریان در تناقض است. معادلات پواسون-رنست-پلنک و ناویر-استوکس آرایش یون ها در لایه الکتریکی مضاعف با توجه به تأثیر همزمان مکانیزم های همرفت، پخش و مهاجرت الکتریکی را محاسبه می کنند. در میکسر غیرفعال استفاده از چند مانع کوچک به جای یک مانع بزرگ اختلاط را به اندازه ۱۳٪ نسبت به مدل پایه افزایش داده است. در مدل های فعال ترکیب استفاده از موانع کوچک و الکترودهای فعال کیفیت اختلاط را تا ۹۹٪ بهبود داده ولی در مقابل، زمان اختلاط نیز به ۴/۲ ثانیه افزایش یافته است. در مدل پایه فعال کیفیت ۹۸٪ و زمان اختلاط ۳ ثانیه بوده اند. در این پژوهش چیدمان مختلف الکترودها نیز مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از طراحی های جدیدی که برای اولین بار مطالعه شده، قرارگیری الکترودها در دیواره های عمودی محفظه اختلاط است. این تغییر موجب به وجود آمدن گردابه های کشیده شده در راستای عمودی محفظه اختلاط توسط جت های سیال نزدیک دیواره می شود. همچنین گردابه های افقی تأثیر بسزایی در تسریع خروج جریان دارند. نتیجه حاصل این طراحی جدید دستیابی به کیفیت اختلاط ۹۹٪ در ۲/۷ ثانیه هستند.

تشکر و قدردانی: این پژوهش در دانشگاه صنعتی شریف- پردیس بین المللی جزیره کیش انجام پذیرفته است. قسمتی از نتایج گزارش شده با استفاده از امکانات محاسباتی آزمایشگاه "محاسبات سریع" تولید شده اند که بدین وسیله از همکاری مسئولین آزمایشگاه قدردانی می شود.

تأییدیه اخلاقی: بدین وسیله اعلام می شود اطلاعات ارائه شده در این پژوهش حاصل فعالیت نویسندگان بوده، با رعایت استانداردهای علمی و اخلاق حرفه ای، تولید شده است و تا کنون در مجله دیگری چاپ نشده است.

تعارض منافع: هیچ نوع تعارض منافعی در اطلاعات ذکر شده در این مقاله وجود ندارد.

سهم نویسندگان: (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روش شناس/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۱۰٪)

منابع مالی: در این پژوهش از امکانات موجود نویسندگان و دانشگاه صنعتی شریف- پردیس بین المللی جزیره کیش استفاده شده است. منابع مالی دیگری برای انجام این پژوهش اختصاص نیافته است.

۶- پی نوشت

فهرست علائم

P	فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
T	دما (کلوین)
u_i	سرعت (متر بر ثانیه)
D_i	ضریب نفوذ مولکولی (m^2s^{-1})
n_i	چگالی غلظت گونه یون (m^{-3})
t	زمان (ثانیه)
e	بار پایه ($1.6 \times 10^{-19}\text{C}$)
k_B	ثابت بولتزمن ($1.38 \times 10^{-23}\text{J/K}$)
c_i	غلظت گونه سیال

potential. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014;75:135-144.

22- Masliyah JH, Bhattacharjee S. Electrokinetic and colloid transport phenomena. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons; 2006.

23- Park HM, Lee JS, Kim TW. Comparison of the Nernst-Planck model and the Poisson-Boltzmann model for electroosmotic flows in microchannels. Journal of Colloid and Interface Science. 2007;315(2):731-739.

24- Park HM, Choi YJ. Electroosmotic flow driven by oscillating zeta potentials: Comparison of the Poisson-Boltzmann model, the Debye-Hückel model and the Nernst-Planck model. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2009;52(19-20):4279-4295.

25- Goulet A, Glasgow I, Aubry N. Effects of microchannel geometry on pulsed flow mixing. Mechanics Research Communications. 2006;33(5):739-746.

26- Wang J, Wang M, Li Z. Lattice Poisson-Boltzmann simulations of electro-osmotic flows in microchannels. Journal of Colloid and Interface Science. 2006;296(2):729-736.

27- Luo WJ. Transient electroosmotic flow induced by AC electric field in micro-channel with patchwise surface heterogeneities. Journal of Colloid and Interface Science. 2006;295(2):551-561.

SME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Washington, DC: American Society of Mechanical Engineers; 2003.

16- Bera S, Bhattacharyya S. Effects of geometric modulation and surface potential heterogeneity on electrokinetic flow and solute transport in a microchannel. Theoretical and Computational Fluid Dynamics. 2018;32(2):201-214.

17- Kang S, Suh YK. Numerical analysis on electroosmotic flows in a microchannel with rectangle-waved surface roughness using the Poisson-Nernst-Planck model. Microfluidics and Nanofluidics. 2009;6(4):461-477.

18- Sani M, Saidi MS. Rayan: A polyhedral grid co-located incompressible finite volume solver (part I: basic design features). Scientia Iranica. 2010;17(6):443-455.

19- Sani M, Saidi MS. A set of particle locating algorithms not requiring face belonging to cell connectivity data. Journal of Computational Physics. 2009;228(19):7357-7367.

20- Sani M, Saidi MS. A lagged implicit segregated data reconstruction procedure to treat open boundaries. Journal of Computational Physics. 2010;229(14):5418-5431.

21- Nayak A. Analysis of mixing for electroosmotic flow in micro/nano channels with heterogeneous surface