

بررسی اختلاط ناشی از جریان الکتروکینتیک القایی غیرخطی در یک میکروکانال

مهسا مصطفوی

محسن نظری*

کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده

اختلاط در بسیاری از ریزساختارها نقش اصلی را ایفا می‌کند بنابراین افزایش اختلاط در مقیاس میکرو حائز اهمیت است. در این مقاله، اختلاط ناشی از ایجاد جریان الکتروکینتیک القایی غیرخطی در یک میکروکانال مستطیلی دارای موانع رسانا، به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. در حالیکه بیشتر مطالعات قبلی در مورد اجسام نارسانا با بار الکتریکی ثابت بوده است، در این تحقیق، اختلاط با در نظر گرفتن موانع رسانا و ایجاد بار القایی، بررسی شده است که نوآوری اصلی پژوهش حاضر است. نتایج حل عددی، جریان چرخشی در نزدیکی موانع رسانا را نشان می‌دهد که باعث افزایش میزان اختلاط می‌شود. علت پیدایش گردابه‌ها، توزیع غیریکنواخت زتاپتانسیل القایی بر روی این موانع است. همچنین اختلاط در میکرومیکسر پیشنهادی به ازای موقعیت موانع، نسبت ارتفاع موانع به ارتفاع کانال و زاویه مانع مثلثی با استفاده از پارامتر بازده اختلاط مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد در حالتی که موقعیت و زوایای موانع ثابت باشد، با افزایش نسبت ارتفاع موانع به ارتفاع کانال، بازده اختلاط افزایش می‌یابد. همچنین در شرایطی که موقعیت و ارتفاع موانع ثابت باشد، با افزایش زاویه مانع، کاهش بازده اختلاط مشاهده می‌شود. تأثیر قدرت میدان الکتریکی خارجی نیز بر میزان اختلاط بررسی شده و در نهایت، محدوده اعداد بی بعد جهت میکرومیکسری با بازده اختلاط قابل قبول ارائه گردیده است.

واژه‌های کلیدی: میکرو میکسر، جریان الکترواستاتیک، زتاپتانسیل القایی، حل عددی.

Investigation of Mixing by Nonlinear-Induced Electrokinetic Flow in a Micro Channel

M. Mostafavi

M. Nazari

Mechanical Engineering Department, Student, Shahrood, Shahrood, Iran University of Technology

Mechanical Engineering Department, Student, Shahrood, Shahrood, Iran University of Technology

Abstract

Mixing plays an important role in many micro devices; therefore, increasing of mixing in micro devices is important. In this paper, the physics of mixing due to non-linear induced-charge electrokinetic flow in a rectangular microchannel with embedded conducting hurdles is studied. Since most previous studies have focused on non-conductive objects with fixed charges, in the present study, mixing with conductive hurdles and induced charges is investigated. Numerical results show flow circulation near the conductive hurdles which leads to an increase in the mixing. The vortices are generated due to non-uniform distribution of zeta potential on the hurdles. The Mixing efficiency is also reported based on hurdles location, ratio of hurdles height to the channel height and angle of triangular hurdles. When location and angles of the hurdles are fixed, by increasing the ratio of hurdles height to channel height, the mixing efficiency is increased. In addition, with increasing of the angle, the mixing efficiency is decreased. Finally, effect of electric field on mixing is completely analyzed.

Keywords: micro-mixer, electroosmotic flow, induced zeta potential, numerical solution.

۱- مقدمه

کارهای بسیاری انجام شده است. میکرومیکسر، وسیله‌ای است که با هدف اختلاط دو یا چند سیال در محفظه‌ای با ابعاد میکرو طراحی شده است [۱].

اختلاط مواد در مقیاس میکرو کاربردهایی از جمله یکنواخت‌سازی محلول‌ها در واکنش‌های شیمیایی [۲]، دقیق سازی محلول‌ها [۳] را شامل می‌شود.

بزرگ‌ترین محدودیت در طراحی میکرومیکسرها عدم توانایی در ایجاد جریان با اغتشاشات بالا هست زیرا رژیم جریان در میکرو کانال‌ها به‌طور ذاتی لایه‌ای هستند. از طرفی ظرافت و پیچیدگی ابزار و دستگاه‌های ساخته شده در مقیاس میکرو، استفاده از روش‌های متداول اختلاط را در این مقیاس دشوار و یا حتی غیرممکن می‌سازد، چراکه این روش‌ها معمولاً نیاز به کارکرد قطعات متحرک (پره‌ها) دارند [۴] که تولید و مونتاژ آن‌ها در مقیاس میکرو و نانو بسیار دشوار است. علاوه بر این، راندمان قطعات متحرک در ابزارهای میکرو معمولاً کمتر از حد انتظار است؛ بنابراین باید به دنبال روش‌های جایگزینی برای تولید جریان در مقیاس میکرو و نانو باشیم. در اوایل پیدایش این تجهیزات، بیشتر

آزمایشگاه روی تراشه که به اختصار LOC گفته می‌شود، دستگاهی است که از یک یا چند عملکرد آزمایشگاهی روی یک تراشه به ابعاد چند میلی‌متر یا سانتی‌متر مربع تشکیل شده است. این آزمایشگاه‌ها با حجم‌های بسیار کم مایعات حتی کمتر از چند پیکولیترو سروکار دارند. این آزمایشگاه‌ها از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده‌اند. از جمله این قسمت‌ها می‌توان به میکروپمپ‌ها برای تأمین جریان، میکرومیکسرها برای مخلوط کردن دو یا چند جریان، میکرو راکتورها برای انجام واکنش‌ها اشاره کرد. هر کدام از این قسمت‌های تشکیل دهنده، خود نیازمند مطالعه و بررسی‌های زیادی هستند که تا به حال نیز مطالعات زیادی بر روی این تجهیزات و فناوری‌های مربوط به آن‌ها انجام شده است. در زمینه میکرومیکسرها نیز، با توجه به دسته‌بندی‌های موجود،

¹Lab on chip

ده‌ها میکرومتر از ابتدای کانال) اتفاق می‌افتد. همین‌طور، اختلاط ذرات بزرگ مانند پروتئین‌ها و یا ذرات با وزن مولکولی بالا مانند نوکلئیک اسیدها مدت‌زمانی از مقیاس دقیقه و ساعت، در همان فاصله نیاز دارد. این تأخیر برای بسیاری از آنالیزهای شیمیایی مشکل‌ساز است. رفع این مشکلات انگیزه‌ای برای انجام مطالعات بیشتر در حوزه میکرومیکسرهای پربازده شده است. تجهیزات اختلاط جریان در حوزه میکرو را بر اساس وجود و یا عدم وجود منبع انرژی خارجی، به دودسته فعال و منفعل دسته‌بندی می‌کنند. در مورد میکرو میکسرهای منفعل که منبع انرژی خارجی وجود ندارد، مطالعات زیادی صورت گرفته است. به‌عنوان مثال وو و همکارانش [۱۴] مدل تحلیلی از فرایند پخش در میکرومیکسرها ارائه دادند و اثر این فرایند را در اختلاط سیالات داخل کانال بررسی کردند. آن‌ها همچنین با ساخت میکرو میکسرهای Y شکل، به‌صورت آزمایشگاهی به‌اندازه‌گیری نتایج پرداختند که با نتایج حاصل از حل عددی مطابقت داشت. اسلام و همکارانش [۱۵] به شبیه‌سازی میکسری با جریان الکتروکینتیک متناوب پرداختند و جریان متناوب را در این مدل به‌کاربردند. آن‌ها با پوشاندن سطح کانال با نانوکامپوزیت تک لایه آب‌گریز، جریان‌های ذکرشده را بهینه کردند. این نوع از میکسرهای می‌تواند باقیمت مناسب عرضه‌شده و در آزمایشگاه‌های روی تراشه استفاده شوند. وو و لیوو [۱۶] از ویژگی‌های میدان استفاده کردند تا بتوانند زتاپتانسیل غیریکنواخت وابسته به زمان را به دیواره‌ی میکروکانال PDMS القا کنند. دقیقی و لی [۱۷] طراحی جدیدی از میکرومیکسر بر پایه‌ی الکتروکینتیک ارائه کردند. این میکسر شامل یک محفظه‌ی استوانه‌ای است که به دو میکروکانال در ورودی و خروجی کانال متصل بوده و ذره‌ای کاملاً رسانا و مدور در آن معلق است. با اعمال میدان الکتریکی خارجی، گردابه‌هایی در اطراف ذره‌ی رسانا ایجاد شده و درصد اختلاط را افزایش می‌دهند. موقعیت نهایی ذره و قدرت گردابه‌ها، به میدان الکتریکی اعمال‌شده وابسته است. آن‌ها دریافتند که اعمال میدان الکتریکی با زاویه‌ی ۴۵ درجه نسبت به افق، درصد اختلاط را افزایش می‌دهد. همچنین با اعمال میدان الکتریکی قوی‌تر، می‌توان زمان اختلاط را کاهش داد. ویسون و اجیس [۱۸] برای جریان الکترواسمتیک داخل کانال ساده حاوی سیال نیوتونی که تحت میدان الکتریکی متغیر با زمان است مدل ریاضی ارائه کردند. نتایج تحلیلی حاصل‌شده از حل معادلات خطی پواسون- بولتزمن^۷ و معادلات کوشی اصلاح‌شده به‌دست‌آمده است. آن‌ها دریافتند برای جریان متناوب الکترواسمتیک، فرکانس میدان الکتریکی نقش اصلی را در تعیین ذات جریان دارد، بدین‌صورت که در فرکانس‌های پایین، جریان فقط برگشتی خواهد بود؛ اما در فرکانس‌های بالای 20 Hz، بیشترین جریان روبه‌جلو را خواهیم داشت.

سیونگ جان و همکارانش [۱۹] جریان الکتروکینتیک غیر تعادلی با عدد رینولدز پایین را در میکرو و نانو کانال‌ها بررسی کردند. پدیده الکتروکینتیک غیر تعادلی ایجاد گردابه‌ها در میدان الکتریکی بالا را شامل می‌شود. آن‌ها دریافتند زمانی که فرکانس با ولتاژ اعمالی و غلظت محلول تغییر می‌کند، گردابه‌های متناوبی در کانال ایجاد می‌شود. آن‌ها انتظار دارند نتایج آنالیز طیفی به دست آمده در ارتقای میکرومیکسرهای مفید باشد. هیوچنگ و همکارانش [۲۰] حل تحلیلی از جریان الکتروفرسیک در دو سیلندر رسانای نامتناهی را ارائه کردند. نتایج،

مطالعات، بر روی میکرومیکسرهای غیرفعال^۱ صورت گرفت ولی با مرور زمان، گرایش محققان به میکرومیکسرهای فعال^۲ بیشتر شده است. یکی از مهم‌ترین و شناخته‌شده‌ترین روش‌ها، استفاده از پدیده الکتروکینتیک^۳ جهت ایجاد جریان است [۵]. در این روش می‌توان با اعمال یک میدان الکتریکی خارجی، محلول الکترولیت را در کانال به جریان درآورد. هنگامی که جسم جامد در محلول الکترولیت قرار می‌گیرد، لایه مضاعف الکتریکی^۴ در سطح مشترک مایع-جامد ایجاد می‌شود. با اعمال میدان الکتریکی خارجی بر روی این لایه، پدیده الکتروکینتیک شکل می‌گیرد. روش‌های الکتروکینتیک شامل الکترواسمتیک [۶]، الکتروفورسیک [۷]، و دی الکتروفورسیک [۸] است. الکترواسمتیک به بیان ساده یعنی عامل ایجاد جریان میدان الکتریکی باشد. با ظهور پدیده الکتروکینتیک تحولی در حوزه تجهیزات میکرو مانند میکرو پمپ‌ها، میکرو میکسرها و میکرو-والوها صورت گرفت، زیرا این پدیده قابلیت‌هایی از جمله تحریک خارجی توسط میدان الکتریکی، عدم استفاده از قطعه متحرک و اتلافات هیدرودینامیکی پایین را داراست. در الکتروکینتیک کلاسیک^۵ فرض می‌شود جسم جامد نارسا بوده و بارهای سطح جسم ثابت هستند. در نتیجه‌ی این فرض، رابطه‌ی بین سرعت سیال و شدت میدان الکتریکی خطی خواهد بود. اما بخش عمده‌ای از مواد موجود در طبیعت رسانا بوده و یا تا حدودی قابلیت قطبی شدن دارند، بنابراین بارهای سطحی‌شان به‌طور کلی ثابت نیستند. این موضوع سرآغازی برای پیدایش شاخه جدیدی از الکتروکینتیک به نام الکتروکینتیک القایی^۶ شد.

در الکتروکینتیک القایی بار القا شده بر روی سطح جسم رسانا، یکنواخت و ثابت نبوده، بلکه تابعی از میدان الکتریکی اعمالی است. در نتیجه سرعت الکترواسمتیک القایی (سرعت سیال) نیز تابعی از میدان الکتریکی اعمالی خواهد بود و به‌طور غیرخطی با آن رابطه دارد. این موضوع نشان می‌دهد که سرعت جریان در الکتروکینتیک القایی می‌تواند نسبت به الکتروکینتیک کلاسیک بیشتر باشد.

راموس و همکارانش [۹] کشف کردند که چگونه با اعمال جریان متناوب می‌توان جریان الکترواسمتیک بر روی میکرو الکترودها را به وجود آورد. اژدری [۱۰] با الهام از این پدیده پمپی را ارائه کرد که با به-کارگیری الکترودهای غیرمقارن، می‌توان جریان سیال را داخل کانال پیش برد. گرین و همکارانش [۱۱] با مشاهدات آزمایشگاهی خود درستی ایده اژدری را اثبات کردند. در سال ۲۰۰۴ بازان و اسکویئر [۱۲] اولین افرادی بودند که جریان الکتروکینتیک ایجادشده روی الکترودها را تشریح کردند. بعد از آن، وو و لی [۱۳] روش عددی ارائه کردند که جریان الکتروکینتیک القایی را بر روی سطوح رسانا به‌درستی شبیه‌سازی می-کند.

به‌طور کلی، به علت سرعت پایین و طول مشخصه‌ی کوتاه، جریان در میکرو کانال‌ها، لایه‌ای است ($Re \ll 1$). در غیاب آشفتگی، اختلاط سیالات، محدود به پدیده پخش در سطح مشترک دو سیال است که خود نیز به‌طور ذاتی لایه‌ای است. اختلاط مولکول‌های کوچک از طریق فرایند پخش، ثانیه‌ها طول می‌کشد و در طول اختلاط بلند (فاصله‌ی

¹ passive

² active

³ electrokinetic phenomena

⁴ electrical double layer, EDL

⁵ Classical electrokinetic

⁶ induced-charge electrokinetic

⁷ linear equations Poisson Boltzmann

از این رو در حل عددی، میدان الکتریکی دائم فرض می‌شود [۲۲]. گام بعدی محاسبه‌ی زتاپتانسیل القایی است که حل‌های تحلیلی برای محاسبه‌ی آن ارائه شده است.

به عنوان مثال، بازانت واسکیوئر [۱۲]، برای یک استوانه‌ی دوبعدی $\zeta_i = 2Ea \cos \theta$ را به صورت تحلیلی گزارش کردند. θ مختصات زاویه‌ای و a شعاع استوانه است. اما برای هندسه‌های پیچیده و نامنظم، حل‌های تحلیلی ساده‌ای وجود ندارد و استفاده از حل‌های عددی سودمند به نظر می‌رسد. در این مطالعه نیز برای محاسبه‌ی زتاپتانسیل القایی روی سطح جسم از روش عددی ارائه شده توسط وو و لی [۲۳] استفاده شده است. در این روش عددی توزیع زتاپتانسیل القایی ζ_i به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\zeta_i = -\phi_e + \phi_c \quad (۱)$$

ϕ_e ، پتانسیل میدان الکتریکی خارجی و ϕ_c ، پتانسیل اصلاحی ثابت در سطح جسم رسانا است. اگر در ابتدا سطح جسم بدون بار در نظر گرفته شود، آن‌گاه انتگرال بارهای القایی حول کل جسم، به دلیل خاصیت خنثی جسم باید صفر باشد:

$$\oint_S \zeta_i \cdot dA = 0 \quad (۲)$$

اگر از معادله‌ی ۱ روی کل سطح جسم انتگرال گرفته و مساوی صفر قرار داده شود، عبارت زیر حاصل می‌شود:

$$\phi_c = \frac{\oint_S \phi_e \cdot dA}{A} \quad (۳)$$

که A سطح جانبی جسم است. قابل ذکر است که تمامی معادلات بالا، زمانی برقرار است که ضخامت لایه الکتریکی مضاعف، در مقایسه با ابعاد کانال، کم بوده، در سطح مشترک مایع-جامد، واکنش شیمیایی صورت نگیرد و عدد دوخین ناچیز باشد که در ادامه درباره این عدد بی‌بعد توضیح داده خواهد شد.

۲-۲- لایه مضاعف الکتریکی

لایه مضاعف الکتریکی (EDL) پدیده‌ای است که در سطح مشترک مایع-جامد اتفاق می‌افتد. لایه مضاعف، ساختاری است که تغییرات پتانسیل الکتریکی را در نزدیکی سطوح توصیف می‌کند و تأثیر مهمی بر روی رفتار کلونیدها و دیگر سطوح مرتبط با محلول‌ها دارد. ضخامت لایه مضاعف، با توجه به پارامتر دیبای-هاکل تعیین می‌شود [۲۳].

$$k^2 = \frac{2Z^2 e^2 n_\infty}{\epsilon \epsilon_0 k_B T} \quad (۴)$$

در این رابطه، k پارامتر دیبای-هاکل، n_∞ غلظت یونی توده سیال، k_B ثابت بولتزمن، e بار الکترون، ϵ_0 نفوذپذیری الکتریکی خلأ، ϵ ضریب دی‌الکتریک جسم جامد، Z ظرفیت شیمیایی و T دمای مطلق است.

پارامتر دیبای، از خواص سطح جامد مستقل بوده و فقط به خواص مایع، مانند ظرفیت شیمیایی الکترولیت و غلظت یونی توده سیال وابسته است. ضخامت لایه مضاعف الکتریکی که تابعی از غلظت الکترولیت است با λ_D نشان داده می‌شود:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0 k_B T}{2Z^2 e^2 n_\infty}} \quad (۵)$$

تشکیل می‌رود. گردهایی در سطح سیلندرها به علت توزیع غیر خطی زتاپتانسیل را نشان می‌دهد که برای افزایش اختلاط مفید است. برا و هاتاچرا [۲۱] حل عددی از جریان الکترواستاتیک نزدیک یک مانع قطبی شونده که بر روی دیواره‌ی میکروکانال نارسانا نصب شده است ارائه کردند. به علت اثرات زبری سطح و لایه الکتریکی غیریکنواخت بر روی مانع، یک جریان گردابی را در میکروکانال ایجاد می‌شود. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد، ایجاد جریان گردابی که در نزدیکی مانع تشکیل می‌شود به ضخامت لایه الکتریکی در امتداد قسمت همگن کانال وابسته است.

در پژوهش حاضر، دو جریان موازی با غلظت بدون بعد ۰ و ۱ از ورودی به میکروکانال وارد شده است. موانع استفاده شده در داخل کانال، هادی الکتریکی هستند و برخلاف کارهای گذشته بار ثابت ندارند. بنابراین بار القایی بر روی این موانع در نظر گرفته شده و به صورت فیزیکی مدل شده است. گردهایی محلی در اثر بار القایی (بر روی موانع) به صورت عددی مدل شده و درصد اختلاط ایجاد شده بررسی شده است. در این تحقیق، اثرنسبت فاصله دو مانع به طول کانال (H/L)، ارتفاع موانع مثلثی نسبت به ارتفاع کانال (D/W) در سه زاویه مختلف از مانع، زاویه موانع مثلثی و همچنین اثر قدرت میدان الکتریکی خارجی بر میزان اختلاط جریان بررسی شده و به نوعی یک میکرومیکس با بازده بالاتر (در مقایسه با موانع با بار ثابت) ارائه گردیده است.

۲- تئوری الکتروکینتیک

۲-۱- مفاهیم و معادلات الکتروکینتیک

تفاوت اصلی بین الکتروکینتیک کلاسیک و الکتروکینتیک القایی در منشأ بارهای سطحی است. در الکتروکینتیک کلاسیک بارهای سطحی ساکن بوده و اغلب ثابت هستند. اما اگر جسم رسانا باشد و یا سطح جسم قابلیت قطبی شدن داشته باشد، شرایط متفاوت خواهد بود. در الکتروکینتیک القایی، بارهای سطحی از طرف میدان الکتریکی خارجی به سطح جسم القا می‌شود. وقتی جسمی رسانا در محلول الکترولیت قرار می‌گیرد، اعمال میدان الکتریکی خارجی E ، جریان الکتریکی / برقرار می‌شود که از معادله $J = \sigma E$ تبعیت می‌کند. σ رسانایی الکتریکی رساناست. ذکر این نکته مهم است که در لحظه‌های اولیه، خطوط جریان الکتریکی سطح جسم را قطع می‌کند. با گذشت زمان، جریان، یون‌های محلول الکترولیت را به سطح جسم منتقل می‌کند؛ بنابراین در لایه‌ای نازک اطراف جسم، بارهای مثبت در یک سو و بارهای منفی در سوی دیگر قرار می‌گیرند. در واقع باری مساوی و مختلف علامت، در سطح جسم القاشده که این بارهای سطحی، یون‌های با بار مخالف را در محلول الکترولیت جذب می‌کنند. در نتیجه، لایه‌ای دوقطبی از یون‌ها در نزدیکی سطح مایع-جامد شکل می‌گیرد. قابل ذکر است که بارهای القایی در سطح جسم و زتاپتانسیل القایی با زمان متغیر هستند [۲۲]. با تشکیل لایه‌ی دوقطبی در نزدیکی جسم جامد، خطوط میدان الکتریکی منفصل می‌شوند. در نتیجه نفوذ یون‌ها به داخل این لایه باردار کاهش می‌یابد. در نهایت هنگامی که جسم کاملاً قطبی شده و به وضعیت پایداری برسد، مانند یک نارسانا رفتار خواهد کرد، زیرا نفوذ یون‌ها به درون جسم متوقف و میدان الکتریکی دائم شده است. مدت زمان رسیدن به میدان الکتریکی دائم بسیار کوتاه بوده و در مقایسه با زمان مشخصه‌ی بسیاری از فرآیندهای انتقال و پخش، قابل صرف نظر است.

$$V_{inlet} = V_0 \quad (9)$$

در خروجی کانال:

$$V_{outlet} = 0 \quad (10)$$

که V_{inlet} و V_{outlet} به ترتیب ولتاژ اعمالی در ورودی و خروجی کانال است.

میدان الکتریکی اعمال شده در طول کانال بصورت رابطه‌ی $E = \frac{\nabla V}{L} = \frac{V_{outlet} - V_{inlet}}{L}$ محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه طول کانال 2cm است، در نتیجه مقدار میدان ایجاد شده در طول کانال نصف مقدار ولتاژ اعمالی در ورودی کانال است. به طور مثال با اعمال ولتاژ 50V در مرز ورودی، مقدار میدان ایجاد شده در طول کانال 25V/cm می‌باشد.

۳-۲- معادلات پیوستگی و تکانه

معادله پیوستگی و تکانه برای جریان الکترواستمیتیک در حالت تراکم ناپذیر و پایداری به صورت زیر است.

معادله پیوستگی:

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0 \quad (11)$$

معادله ناپیوستگی:

$$\rho(\vec{U} \cdot \nabla) \vec{U} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{U} + \vec{E} \rho_e \quad (12)$$

ρ چگالی سیال، ∇P گرادیان فشار، μ لزجت سیال، E قدرت میدان الکتریکی محلی و U سرعت سیال است. ρ_e چگالی بار خالص محلی بوده که فقط در داخل لایه مضاعف، مقدارش غیر صفر است. از این رو نیروی $\vec{E} \rho_e$ تنها در داخل لایه مضاعف وجود دارد. بنابراین با توجه به کوچک بودن ضخامت لایه مضاعف نسبت به ابعاد میکروکانال (در محلول‌های با غلظت یونی بالا) از نیروی $\vec{E} \rho_e$ صرف نظر می‌شود. دقت شود که برای حل معادلات دو دیدگاه وجود دارد. در دیدگاه اول شرط مرزی روی دیواره‌های جامد به صورت شرط عدم لغزش با سرعت صفر لحاظ شده و در این صورت اثر تجمع یونی در کنار دیواره با جمله $\vec{E} \rho_e$ دیده می‌شود. در این حالت عبارت $\vec{E} \rho_e$ مخالف صفر است. در دیدگاه دوم، که در الکتروکینتیک کلاسیک نیز رایج است اثر تجمع یونی در کنار دیواره و نیروی وارد بر این یون‌ها (ناشی از میدان خارجی)، به صورت یک سرعت فیزیکی لغزشی (به عنوان شرط مرزی دیواره) لحاظ می‌شود. مفهوم سرعت لغزشی و مقدار آن در سطوح رسانا و غیر رسانا در ادامه ارائه خواهد شد. در مقاله حاضر از دیدگاه دوم استفاده شده است. در این مقاله مقادیر چگالی و لزجت به ترتیب $\rho = 998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ و $\mu = 0.01 \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}$ در نظر گرفته شده است.

رابطه فوق نشان می‌دهد، با افزایش غلظت یونی توده سیال n_{∞} ضخامت لایه مضاعف الکتریکی کم می‌شود. به این دلیل که یون‌های با بار مخالف بیشتری جذب نواحی نزدیک به سطح جامد شده و بارهای سطحی‌اش را خنثی می‌کنند؛ بنابراین ضخامت لایه مضاعف کاهش می‌یابد [۱۳]. عدد دوخین، عدد بدون بعدی است که ارتباط رسانایی سطح را با خواص الکتروآکوستیک، الکتروکینتیک و همچنین تراوایی و رسانایی سیال بررسی می‌کند.

$$Du = -\frac{k^{\sigma}}{k_m \cdot a} \quad (6)$$

که k^{σ} رسانایی سطح، k_m رسانایی توده سیال و a اندازه ذرات است. تشکیل لایه مضاعف القاوی بر روی سطح جسم و همچنین اثر میدان الکتریکی خارجی، نیرویی را به یون‌های با بار مخالف که در قسمت متحرک این لایه قرار دارند وارد کرده، در نتیجه یون‌ها و مایع را به حرکت درمی‌آورد. در واقع به نظر می‌رسد، جریان الکترواستمیتیک بر روی قسمت خارجی لایه مضاعف، سر می‌خورد. این سرعت لغزشی u که با رابطه هلمهولتز اسمولوچوسکی بیان می‌شود به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۴]:

$$u = -\frac{\epsilon \epsilon_0}{\mu} E_{\parallel} \zeta_i \quad (7)$$

که μ لزجت سیال و E_{\parallel} میدان الکتریکی مماسی است. مطابق این رابطه، سرعت لغزشی با میدان الکتریکی مماسی، متناسب است. همچنین با جایگذاری معادله ۳ در معادله ۱ و وابستگی غیرخطی زتا پتانسیل القاوی ζ_i با قدرت میدان الکتریکی، واضح است که سرعت لغزشی با میدان الکتریکی، رابطه غیرخطی دارد که این یکی از تفاوت‌های الکتروکینتیک القاوی با الکتروکینتیک مرسوم است. در الکتروکینتیک مرسوم، سرعت لغزشی با میدان الکتریکی رابطه خطی دارد.

۳-۳- معادلات حاکم و شرایط مرزی

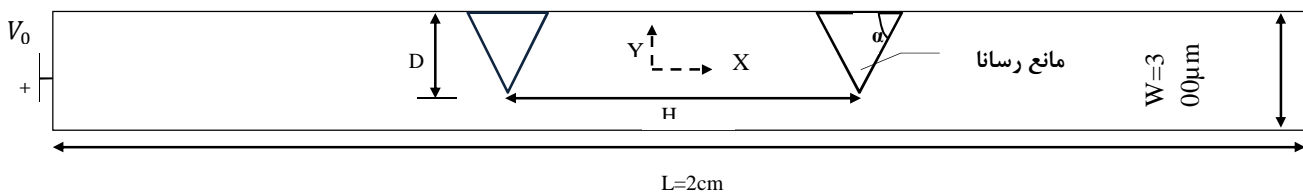
۱-۳- اثر میدان الکتریکی

با ایجاد میدان الکتریکی در دوسر کانال (مطابق شکل ۱)، موانع رسانا در مدت زمانی کوتاه، قطبی می‌شوند. به علت وجود زتا پتانسیل غیریکنواخت روی موانع، جریان الکترواستمیتیک گردابه‌هایی را در نزدیکی موانع ایجاد می‌کند. هنگامی که موانع کاملاً قطبی شده و به حالت پایدار می‌رسند، مانند جسم نارسا رفتار می‌کنند. شرایط مرزی در میدان الکتریکی به شرح زیر است.

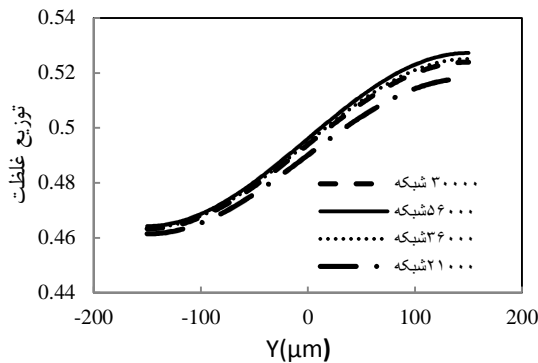
در دیواره‌های کانال:

$$n \cdot \Delta V = 0 \quad (8)$$

در ورودی کانال:



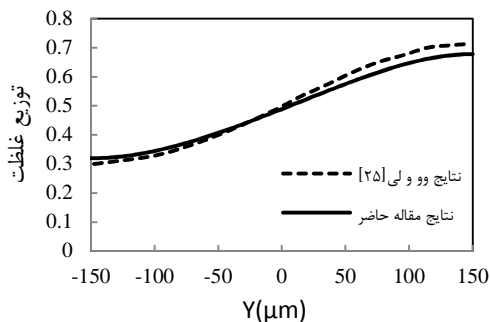
شکل ۱- طرحواره‌ای از میکروکانال با دو مانع رسانای مثلثی



شکل ۲- بررسی استقلال از شبکه در $H/L=0.25$

۴- اعتبار سنجی نتایج

برای اعتبارسنجی تحقیق، نتایج تجربی حاصل از مقاله وو و لی [۲۲] در شرایطی با یک مانع رسانای مثلی ذکر شده است. ابعاد کانال نیز مطابق شکل ۱ بوده و مانع رسانا در وسط کانال قرار گرفته است. ارتفاع و قاعده‌ی مانع به ترتیب دارای مقادیر ۱۲۵ و ۲۵۰ میکرومتر است. مقادیر چگالی و لزجت سیال نیز به ترتیب $\rho = 998 \frac{kg}{m^3}$ و $\mu = 0.001 \frac{kg}{m.s}$ است. نمودار مربوط به توزیع غلظت مقطع عرضی در فاصله‌ی ۱.۵ میلی‌متر از وسط کانال است. ولتاژ اعمالی به دوسر کانال ۱۰۰ V/cm می‌باشد. شکل ۳ مطابقت نتایج را با حداکثر مقدار ۵ درصد خطای نسبی نشان می‌دهد.



شکل ۳- اعتبار سنجی با نتایج مقاله وو و لی [۲۲]

۵- نتایج و بحث

برای تعیین میزان اختلاط ناشی از جریان الکتروکینتیک القایی، پارامتر بازده اختلاط ϵ به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\epsilon = \left(1 - \frac{\int_0^w |C - C_\infty| dx}{\int_0^w |C_0 - C_\infty| dx} \right) \times 100\% \quad (19)$$

که $C_\infty = 0.5$ در مقیاس نرمال نشان‌دهنده‌ی بهترین میزان اختلاط است. C_0 توزیع غلظت در ورودی کانال و C توزیع غلظت مقطع عرضی دلخواه در پایین دست جریان است. بدیهی است در شرایطی که اختلاط کامل داشته باشیم بازده اختلاط ۱۰۰٪ خواهد بود. شکل ۴ میدان جریان درون کانال در دو حالت دارای موانع رسانا و نارسانا را نشان می‌دهد. ویژگی قابل توجه در میدان جریان این است که جریان به طور قابل توجهی با حضور موانع رسانا تغییر می‌کند و چرخش جریان در نزدیکی موانع ایجاد می‌شود. علامت‌های متضاد زتاپتانسیل القا شده بر روی موانع، نیروهای محرک متضاد را در جریان الکترواسمیتیک نشان می‌دهد.

شرط مرزی سرعت برای دیواره‌های نارسانا کانال:
سرعت در راستای X:

$$u_x = \frac{-\epsilon \epsilon_0 \zeta}{\mu} \cdot E_x \quad (13)$$

سرعت در راستای Y:

$$u_y = \frac{-\epsilon \epsilon_0 \zeta}{\mu} \cdot E_y \quad (14)$$

شرط مرزی سرعت برای دیواره‌های رسانا کانال:

سرعت در راستای X:

$$u_x = \frac{-\epsilon \epsilon_0 \zeta_i}{\mu} \cdot E_x \quad (15)$$

سرعت در راستای Y:

$$u_y = \frac{-\epsilon \epsilon_0 \zeta_i}{\mu} \cdot E_y \quad (16)$$

E_x و E_y به ترتیب میدان الکتریکی در راستای x و y است.

دقت شود که در مورد دیواره‌های نارسانا، زتاپتانسیل ثابت است اما در مورد موانع رسانا ζ زتاپتانسیل القایی بوده و بر روی موانع نسبت به مکان تغییر می‌کند. در این تحقیق، جریان با استفاده از نیروی الکتریکی ایجاد می‌شود و گرادیان فشار وجود ندارد. همچنین شاری از دیواره‌های کانال عبور نمی‌کند.

شرط مرزی در ورودی و خروجی کانال:

$$P = 0 \quad (17)$$

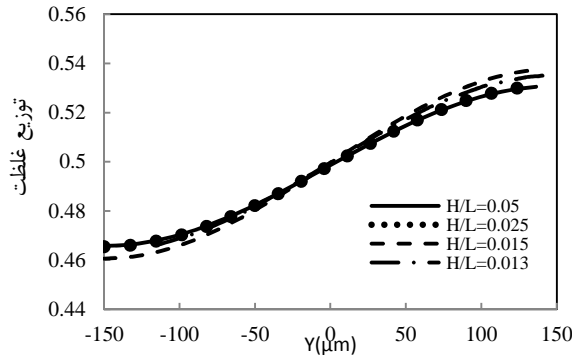
۳-۳- میدان غلظت

میدان غلظت محلول الکترولیت یا هر ماده‌ی شیمیایی دیگر در جریان الکترواسمیتیک با معادله‌ی:

$$\nabla \cdot (-DVC) = R - u \cdot \nabla C \quad (18)$$

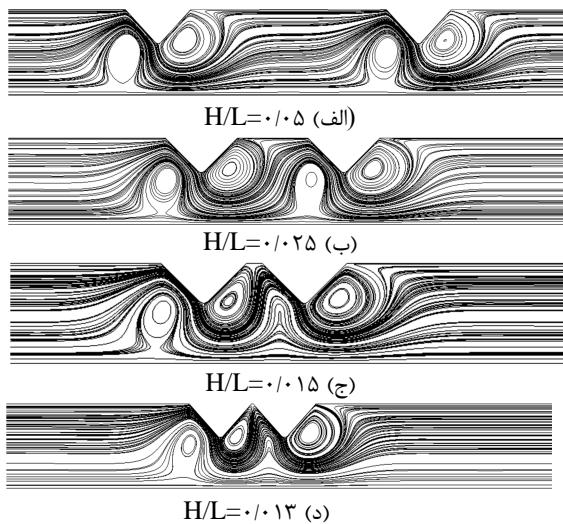
نشان داده می‌شود. C غلظت محلول، R نرخ واکنش، D ضریب پخش ذرات و u ، سرعت جریان در راستای محور x است. در این مسئله واکنشی صورت نمی‌گیرد و مقدار ضریب R صفر است. ضریب پخش D در بیشتر محلول‌های الکترولیت دارای مقدار تقریبی $1 \times 10^{-1} \frac{m^2}{s}$ می‌باشد. دیواره‌ها نیز نفوذ ناپذیر هستند.

معادلات حاکم و شرایط مرزی تعریف شده برای میدان جریان و میدان غلظت، با روش المان محدود حل شده است. در ناحیه‌ی محاسباتی از شبکه غیر یکنواخت مثلی استفاده شده است. در نزدیکی موانع هادی از تراکم بالاتری استفاده شده و با دور شدن از موانع تراکم کاهش می‌یابد. برای $H/L = 0.25$ ، استقلال نتایج از شبکه در شکل ۲ نمایش داده شده است. مطابق شکل زیر از تعداد شبکه ۳۰۰۰۰ به بالا، نتایج میدان توزیع غلظت از تعداد شبکه مستقل شده است. برای اطمینان از درستی نتایج، تعداد ۴۰۰۰۰ شبکه در ناحیه محاسباتی در نظر گرفته شده است.



شکل ۵- نمودار توزیع غلظت به ازای H/L های مختلف، $D/W=0/41$ ، $\alpha=45$ در مقطع عرضی به فاصله $4000 \mu m$ از وسط کانال

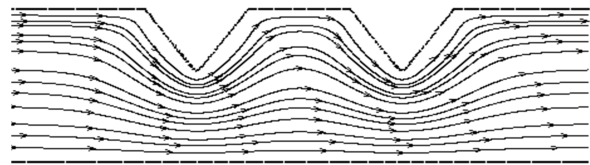
در شکل ۶، گردابه‌های تشکیل شده در اطراف موانع رسانا مشاهده می‌شود.



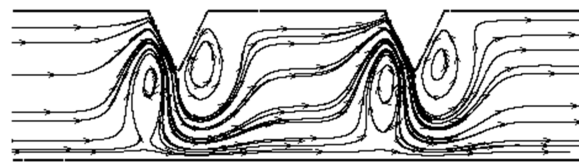
شکل ۶- تغییرات میدان جریان در H/L های مختلف، $D/W=0/41$ و $\alpha=45$ (قاعده موانع $=250 \mu m$)

توزیع غلظت در D/W های مختلف (با زاویه موانع 45 درجه) در $H/L=0/025$ که دارای بیشترین بازده اختلاط است در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است با افزایش نسبت D/W ، نمودار به شرایط بهترین میزان اختلاط یعنی $C=0/5$ نزدیک می‌شود. زیرا با افزایش ارتفاع موانع، گردابه‌هایی که در نزدیکی آن‌ها تشکیل می‌شود بزرگتر شده به طوری که در $D/W=0/08$ ، قسمت قابل توجهی از جریان سیال درون کانال به واسطه‌ی گردابه‌های تشکیل شده، تحت تاثیر قرار گرفته و مخلوط شده‌اند.

که عامل ایجاد چرخش‌های جریان است. به بیان دیگر در شکل (ب) یک میکرومیکسر با موانع هادی ایجاد شده است. در لایه مضاعف الکتریکی، در نواحی با زتا پتانسیل القایی مثبت، یک بار خالص منفی وجود دارد که یک جریان منفی به سمت ورودی کانال ایجاد می‌کند. در نواحی با زتا پتانسیل القایی منفی، یک بار خالص مثبت در لایه مضاعف الکتریکی وجود دارد که یک جریان مثبت به طرف خروجی کانال ایجاد می‌کند. بنابراین برای ارضای شرط پیوستگی جریان، چرخش جریان ایجاد می‌شود. واضح است که تشکیل گردابه‌ها می‌تواند موجب افزایش درصد اختلاط شود.



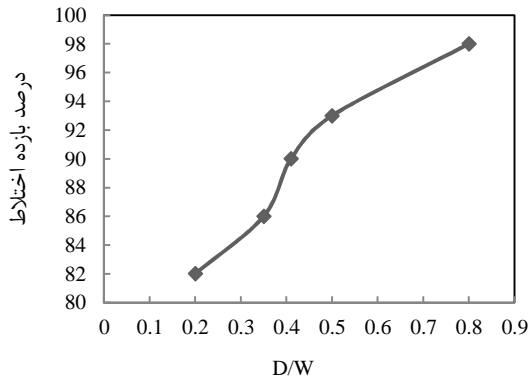
(الف) کانال دارای موانع نارسا



(ب) کانال دارای موانع رسانا

شکل ۴- خطوط جریان و تشکیل گردابه‌ها در کانال با موانع رسانا و نارسا در ولتاژ اعمالی $50 V/cm$

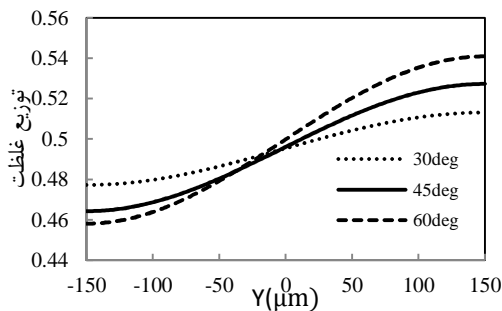
شکل ۵ توزیع غلظت در چند اندازه مختلف H/L (نسبت فاصله دو مانع به طول کانال) در مقطع عرضی در فاصله 4000 میکرومتر از وسط کانال را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، از نسبت $H/L=0/025$ به بالا تغییری در میزان اختلاط حاصل نمی‌شود و نمودارها هم‌پوشانی دارند. همچنین بررسی بازده اختلاط، در H/L های مختلف، نشان می‌دهد تا نسبت $H/L=0/025$ بازده روند افزایشی داشته و به مقدار بیشینه 92 درصد می‌رسد و با افزایش H/L به بالاتر از این مقدار بهبودی در میزان اختلاط حاصل نشده و فرآیند اختلاط مستقل از موقعیت موانع می‌شود. زیرا با افزایش فاصله بین دو مانع (همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است)، در ناحیه بین دو مانع، به تدریج جریان از حالت تک گردابه به دو گردابه تبدیل شده و سپس دو گردابه‌ی ایجاد شده از هم دور می‌شوند. تشکیل گردابه‌ی دوم کمک به چرخش بیشتر جریان عبور کننده می‌کند که بازده اختلاط را افزایش می‌دهد. به عبارت دیگر، افزایش ناحیه‌ی میانی باعث افزایش اندازه گردابه‌ها شده که اختلاط بیشتر را نتیجه می‌دهد. این روند تا جایی ادامه پیدا می‌کند که در نهایت اثر گردابه‌های میانی بر روی یکدیگر از بین می‌رود. بنابراین طول گردابه‌های میانی با افزایش فاصله‌ی دو مانع از یکدیگر تغییر چندانی نداشته که باعث ثابت ماندن مقدار در صد اختلاط می‌شود.



شکل ۹- درصد بازده اختلاط در D/W های مختلف، $H/L=0.25$ ، $\alpha=45^\circ$ در مقطع عرضی به فاصله $4000 \mu m$ از وسط کانال

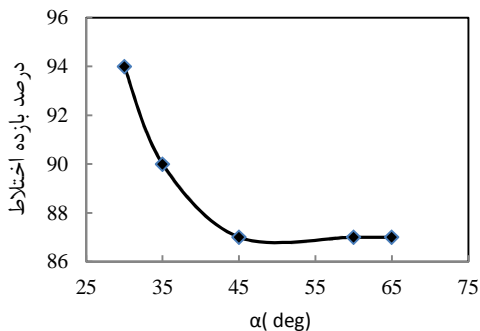
شرایط بیشینه میزان اختلاط $C_{00}=0.5$ خواهیم بود. زیرا با افزایش زاویه مانع، سطح مانع عمود بر جهت جریان کاهش یافته که سبب کاهش اندازه گردابه‌ها می‌شود. بنابراین میزان چرخش کاهش یافته و در نتیجه اختلاط کم می‌شود.

در نهایت تأثیر قدرت میدان الکتریکی بر میزان اختلاط بررسی شده است. این مقادیر همگی در شرایطی محاسبه شده است که بیشترین میزان اختلاط را داشته‌ایم یعنی $H/L=0.25$ و $D/W=0.8$ و $\alpha=45^\circ$. در همه

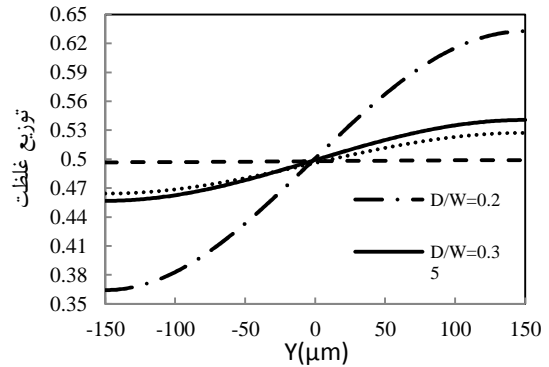


شکل ۱۰- نمودار توزیع غلظت به ازای زاویه‌های مختلف، $H/L=0.25$ ، $D/W=0.41$ در مقطع عرضی به فاصله $4000 \mu m$ از وسط کانال

بازده اختلاط در شکل ۱۱ نیز روند کاهشی دارد و گویای کاهش بازده اختلاط بر افزایش زاویه مانع است.

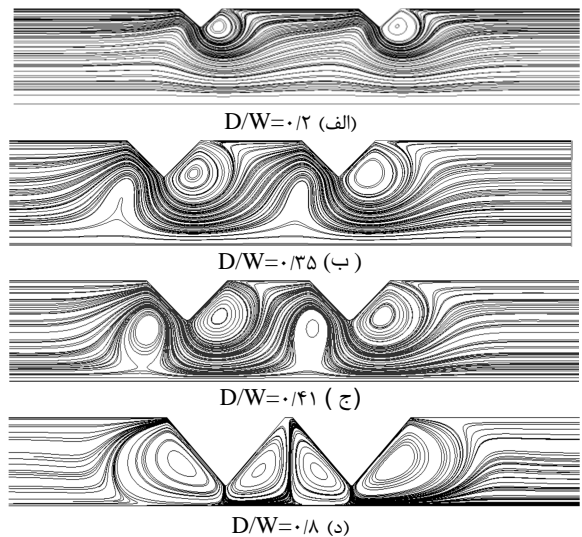


شکل ۱۱- درصد بازده اختلاط در زوایای مختلف، $H/L=0.25$ ، $D/W=0.41$ در مقطع عرضی به فاصله $4000 \mu m$ از وسط کانال



شکل ۷- نمودار توزیع غلظت به ازای D/W های مختلف، $H/L=0.25$ ، $\alpha=45^\circ$ در مقطع عرضی به فاصله $4000 \mu m$ از وسط کانال

شکل ۸ رفتار خطوط جریان را در اندازه‌های مختلف مانع نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود (شکل ۸-الف و ۸-ب) با افزایش نسبت D/W ، اندازه گردابه‌ها بزرگتر می‌شود. همچنین از $D/W=0.35$ به بالا دو گردابه میانی نیز تشکیل می‌شود و در نتیجه دو سیال اختلاط بهتری خواهند داشت (شکل ۸-ج و ۸-د).



شکل ۸- تغییرات میدان جریان با D/W در $\alpha=45^\circ$ و $H/L=0.25$

شکل ۹ بازده اختلاط در D/W های مختلف را نشان می‌دهد. بیشترین درصد اختلاط، مربوط به $D/W=0.8$ با مقدار ۹۸ درصد است. این مقادیر در مقطع عرضی از کانال در فاصله $X=4000$ میکرومتر از وسط میکروکانال اندازه‌گیری شده‌اند. از دیگر موارد مورد مطالعه، تأثیر تغییر زاویه مانع بر میزان اختلاط است. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود با کاهش زاویه از ۶۰ به ۳۰ درجه شاهد نزدیک شدن توزیع غلظت در مقطع عرضی از کانال به

perturbation, Chemical Engineering Research and Design, Vol. 90, No. 7, pp. 884-898, 2012

[5] Roy S., and Acharya S., Scalar mixing in a turbulent stirred tank with pitched blade turbine: Role of impeller speed perturbation, Chemical Engineering Research and Design, Vol. 90, No. 7, pp. 884-898, 2012.

[6] Herr A. E., Molho J. I., Santiago J. G., Mungal M. G., Kenny T. W., and Garguilo M. G., Electroosmotic capillary flow with nonuniform zeta potential, Analytical Chemistry, Vol. 72, No. 5, pp. 1053-1057, 2000.

[7] Yariv E., Induced-charge electrophoresis of nonspherical particles, Physics of Fluids (1994-present), Vol. 17, No. 5, pp. 051702, 2005.

[8] Martinez-Duarte R., Microfabrication technologies in dielectrophoresis applications—A review, Electrophoresis, Vol. 33, No. 21, pp. 3110-3132, 2012.

[9] Ramos A., Morgan H., Green N. G., and Castellanos A., AC electric-field-induced fluid flow in microelectrodes, Journal of colloid and interface science, Vol. 217, No. 2, pp. 420-422, 1999.

[10] Anderson J. L., Colloid transport by interfacial forces, Annual review of fluid mechanics, Vol. 21, No. 1, pp. 61-99, 1989.

[11] Green N. G., Ramos A., González A., Morgan H., and Castellanos A., "Fluid flow induced by nonuniform ac electric fields in electrolytes on microelectrodes. I. Experimental measurements, Physical review E, Vol. 61, No. 4, pp. 4011, 2000.

[12] Bazant M. Z., and Squires T. M., Induced-charge electrokinetic phenomena: theory and microfluidic applications, Physical Review Letters, Vol. 92, No. 6, pp. 066101, 2004.

[13] Wu Z., and Li D., Mixing and flow regulating by induced-charge electrokinetic flow in a microchannel with a pair of conducting triangle hurdles, Microfluidics and Nanofluidics, Vol. 5, No. 1, pp. 65-76, 2008.

[14] Wu Z., Nguyen N.-T., and Huang X., Nonlinear diffusive mixing in microchannels: theory and experiments, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 14, No. 4, pp. 604, 2004.

[15] Islam N., Optimization of AC Electrokinetic Mixing by Nanocomposite Monolayer, pp. V009T12A077-V009T12A077.

[16] Wu H.-Y., and Liu C.-H., A novel electrokinetic micromixer," Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 118, No. 1, pp. 107-115, 2005.

[17] Daghighi Y., and Li D., Numerical study of a novel induced-charge electrokinetic micro-mixer, Analytical chimica acta, Vol. 763, pp. 28-37, 2013.

[18] Vishnu S. B., and Menon A. C., mathematical modelling of electroosmotic flow through a slit microchannel under the influence of varying electric field, 2014.

[19] Lee S. J., Jeon T.-J., Kim S. M., and Kim D., Quantification of Vortex Generation Due to Non-Equilibrium Electrokinetics at the Micro/Nanochannel Interface: Spectral Analysis, *Micromachines*, Vol. 7, p. 109, 2016.

[20] Feng H. and Wong T. N., Pair interactions in induced charge electrophoresis of conducting cylinders, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 88, pp. 674-683, 2015.

[21] Bera S. and Bhattacharyya S., Electrokinetic Effects on Solute Mixing Near a Conducting Obstacle Within a Microchannel, in *Mathematics and Computing*, ed: Springer, 2015, pp. 427-439.

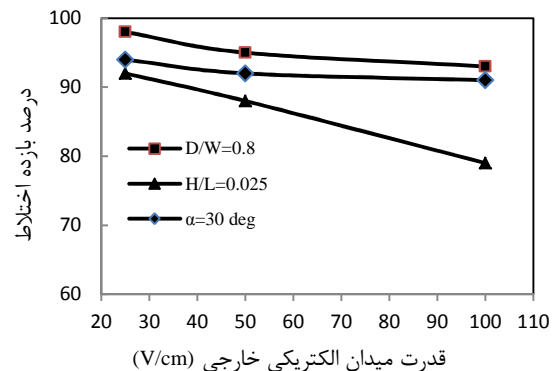
[22] Squires T. M., and Bazant M. Z., Induced-charge electroosmosis," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 509, pp. 217-252, 2004.

[23] Li D., *Electrokinetics in Microfluidics*, Department of Mechanical & Industrial Engineering, Canada, 2004.

[24] Hunter R. J., *Zeta potential in colloid science: principles and applications*: Academic press, 2013.

[25] Wu Z., and Li D., Micromixing using induced-charge electrokinetic flow, *Electrochimica Acta*, Vol. 53, No. 19, pp. 5827-5835, 2008.

موارد با کاهش ولتاژ اعمالی به دوسر کانال، بازده اختلاط افزایش می‌یابد. در ولتاژ پایین که سرعت جریان سیال کم است، عامل اصلی اختلاط، گردابه های ایجاد شده توسط موانع هادی الکتریکی هستند. در تمام موارد عدد رینولدز بر اساس سرعت مشخصه داخل کانال، کوچک بوده و اختلاط بدون حضور گردابه ها بسیار ناچیز است. در واقع با کاهش قدرت میدان، زمان عبور سیال از میکروکانال کاهش یافته و زمان اختلاط افزایش خواهد یافت.



شکل ۱۲- درصد بازده اختلاط در قدرت میدان الکتریکی خارجی مختلف

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، جریان الکتروکینتیک القایی در میکرو کانالی با دو مانع رسانای مثلثی بررسی شده است و اختلاط میکرومیکسر به ازای تغییرات موقعیت موانع، نسبت ارتفاع موانع به ارتفاع کانال، زاویه مانع مثلثی و قدرت میدان الکتریکی خارجی با استفاده از پارامتر بازده اختلاط مورد بررسی قرار گرفته است. برای مدل سازی میدان جریان و غلظت از حل عددی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با تشکیل گردابه در نزدیکی موانع رسانا و چرخش جریان اختلاط بهبود می‌یابد. همچنین مشاهده شد که با کاهش زاویه موانع و همین‌طور کاهش قدرت میدان الکتریکی خارجی بازده اختلاط افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که در $H/L=0.025$ بیشترین میزان اختلاط را داریم. همچنین با افزایش نسبت ارتفاع موانع به ارتفاع کانال، بازده اختلاط افزایش می‌یابد. با توجه به جمع بندی نتایج می‌توان گفت که میکسری با زاویه مانع ۳۰ درجه در شرایطی که نسبت $H/L=0.025$ و $D/W=0.8$ بوده و قدرت میدان الکتریکی خارجی 25 V/cm باشد، یک میکسر مطلوب با درصد اختلاط قابل قبول است.

۷- مراجع

[1] Nguyen N.T. and Wu Z., Micromixers—a review, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 15, No. 2, pp. R1, 2005.

[2] Hinsmann P., Frank J., Svasek P., Harase M., and Lendl B., Design, simulation and application of a new micromixing device for time resolved infrared spectroscopy of chemical reactions in solution, *Lab on a Chip*, Vol. 1, No. 1, pp. 16-21, 2001.

[3] Delaquis P. J., Stanich K., Girard B., and Mazza G., Antimicrobial activity of individual and mixed fractions of dill, cilantro, coriander and eucalyptus essential oils, *International journal of food microbiology*, Vol. 74, No. 1, pp. 101-109, 2002.

[4] Roy S., and Acharya S., Scalar mixing in a turbulent stirred tank with pitched blade turbine: Role of impeller speed