

ارزیابی تاثیر یک وصله رسانا بر جریان الکترواسموتیک در یک ریزمجرای تخت با بارسطحی ناهمگن: یک مطالعه عددی با تمرکز بر بهبود اختلاط

حانیه صالح آبادی

محمد مقیمان*

امیدرضا محمدی پور

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران،
salehabadi.hmech@yahoo.com

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، moghiman@um.ac.ir

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران، o.mohammadipour@pnu.ac.ir

چکیده

در این مطالعه، تأثیر سطوح رسانا بر جریان الکترواسموتیک در یک ریزمجرای تخت با بارسطحی ناهمگن (بخشی رسانا) بررسی شده است. مدل سازی عددی با روش لیتس بولتزمن انجام شده و اثرات شدت میدان الکتریکی، زتاپتانسیل دیوار نارسا و طول بخش رسانا بر دبی و خطوط جریان، با استفاده از طرح آزمایش عاملی کامل، تحلیل شده است. نتایج نشان می دهد که افزایش شدت میدان الکتریکی، کاهش زتاپتانسیل نارسا و افزایش طول رسانا متناسب با فاصله جریان از بخش رسانا موجب گسترش خطوط جریان می گردد. برخلاف دبی جریان که در حضور بخش رسانا به طور جزئی کاهش می یابد، وجود رسانا در تمامی حالات موجب بهبود اختلاط می شود. حضور رسانا در مجرا موجب معکوس شدن اثرات کاهشی شدت میدان الکتریکی بر شاخص اختلاط خواهد شد؛ به نحوی که در شدت میدان الکتریکی 18000 V/m ، شاخص اختلاط در حضور رسانا به حدود سه برابر مجرای نارسا افزایش می یابد. تأثیرپذیری اختلاط از بخش رسانا تابع زتاپتانسیل بخش نارسا است؛ به نحوی که با افزایش زتاپتانسیل از 50 mV به 300 mV ، میزان بهبود شاخص اختلاط در حضور رسانا از حدود ۲ برابر مجرای نارسا به $1/2$ برابر کاهش می یابد.

واژه های کلیدی: جریان الکترواسموتیک القایی، الگوی جریان، نفوذ، اختلاط، روش لیتس بولتزمن، ریزمجرا.

Assessing the Impact of a Conductive Patch on Electroosmotic Flow in Heterogeneously Charged Microchannel: A Numerical Study with a Focus on Enhanced Mixing

H. Salehabadi

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

M. Moghiman

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

O. R. Mohammadipour

Department of Mechanical Engineering, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran

Abstract

This study examines the effect of conductive surfaces on electroosmotic flow in a planar microchannel with a heterogeneous surface charge. The lattice Boltzmann method is employed for numerical modeling, and a full factorial design is used to analyze the effects of electric field intensity, the zeta potential of the non-conductive wall, and the length of the conductive section on flow rate and streamlines. The results indicate that increasing the electric field, decreasing the zeta potential of the non-conductive wall, and extending the conductive section expand the streamlines. While the conductive section slightly reduces the flow rate, it consistently enhances mixing. Moreover, it counteracts the electric field's diminishing effect on the mixing index. At 18000 V/m , mixing increases nearly threefold compared to a non-conductive channel. The influence of the conductive section depends on the zeta potential of the non-conductive region. Increasing it from 50 mV to 300 mV reduces the mixing enhancement from approximately twofold to 1.2 times that of a non-conductive channel.

Keywords: Induced-charge electroosmotic flow, Flow pattern, Diffusion, Mixing, the Lattice Boltzmann method, microchannel.

۱- مقدمه

در دهه های گذشته، سیستم های میکروفلوئیدی کاربردهای گسترده ای در زمینه های مختلف از جمله بیولوژی، دستگاه های آزمایشگاه روی تراشه، تحویل دارو به اندام های بدن، تشخیص باکتری و غیره پیدا کرده اند. اساسا شکل گیری جریان در ابعاد کوچک با تکنیک های مرسوم همچون استفاده از پمپ های مکانیکی با محدودیت های زیادی روبرو است. در چنین شرایطی استفاده از راهکارهای نوینی همچون پدیده الکترواسموتیک می تواند جایگزین مناسبی برای ایجاد جریان در مقیاس کوچک تلقی گردد [۴-۱]. جریان الکترواسموتیک ناشی از تعامل میدان های الکتریکی داخلی و خارجی است که نه تنها نیاز به

پمپ های مکانیکی را برطرف می سازد بلکه با توجه به ماهیت خود، این فرصت را مهیا می سازد تا با طراحی مناسب، الگوهای متفاوت جریان را ایجاد نموده و امکان اختلاط، کنترل و تغییر مسیر جریان را فراهم آورد. در سیستم های میکروفلوئیدی بدلیل طول مشخصه کوتاه و سرعت پایین جریان، فرآیند نفوذ مولکولی (پخش) مهمترین مکانیزم انتقال حرارت و جرم تلقی می گردد که ذاتا کند و زمان بر است. راهکارهای زیادی توسط محققین جهت افزایش نفوذ ملکولی در این جریان ها پیشنهاد شده است که از آن جمله می توان به توزیع غیر یکنواخت زتاپتانسیل دیواره نارسا [۵-۷] ریزمخلوط گرهای T و Y شکل [۸،۹]، میدان الکتریکی متناوب [۱۰-۱۲] اشاره نمود.

یکی از انواع جریان الکترواسموتیک که مزیت قابل توجهی در

* نویسندگان مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: moghiman@um.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵

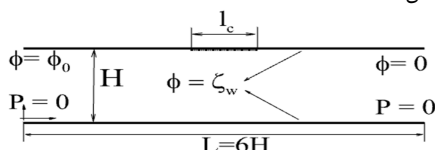
جریان‌های اختلاطی دارد، الکترواسموتیک القایی است که در حضور مواد رسانا شکل می‌گیرد. در این نوع از جریان، جسم رسانا در ابتدا از نظر الکتریکی خنثی است، اما با قرار گرفتن در تماس با محلول الکترولیت و تحت تأثیر میدان الکتریکی، قطبی شده و پتانسیل الکتریکی روی آن القا می‌شود. بازانت و اسکوییز [۱۳] با فرض لایه الکتریکی دوگانه باریک و پتانسیل الکتریکی کم به حل تحلیلی جریان الکترواسموتیک حول استوانه و کره رسانای غوطه‌ور در محلول الکترولیت پرداختند، که مبنای بسیاری از مطالعات بعدی قرار گرفته است. وو و لی [۱۴] برای مدل‌سازی هندسه‌های پیچیده‌تر یک مدل ریاضی ارائه دادند؛ آن‌ها با استفاده از مدل هلمهلتز-اسلموچفسکی و اصلاح پتانسیل الکتریکی در پیرامون جسم رسانا توانستند زتاپتانسیل القا شده روی سطح رسانا را محاسبه نمایند و به تشریح چگونگی تشکیل گردابه‌ها در اطراف سطوح رسانا و اثر آن بر روی جریان الکترواسموتیک پرداختند، سپس به کمک روش جدید خود موفق به بررسی و ارائه ریزمخلوط‌گرهای جدید با سطوح رسانا شدند و توانستند به صورت آزمایشگاهی مدل ریاضی خود را اعتبارسنجی نمایند [۱۵]. مدل‌سازی حضور ذرات با قابلیت قطبیده شدن در جریان و حل جریان الکتروفوریتیک [۱۶] و [۱۷] زمینه‌ساز تحقیقات گسترده در زمینه الکتروکنتیک القایی در کاربردهای مختلف ریزمخلوط‌گر، ریزپمپ و به دام انداختن و جداسازی ذرات شد [۱۸، ۱۹]. سلیمیان و همکاران [۲۰] با قراردادن موانع رسانا و ایجاد گردابه در مسیر جریان حاوی ذرات با ابعاد ۱ تا ۱۰ نانومتر موفق به به دام انداختن و جداساختن ذرات از جریان شدند. عظیمی و همکاران [۲۱] با استفاده از مفهوم نقطه سکون به بررسی اثر آن در حرکت یک تیغه رسانا در جریان الکترواسموتیک پرداختند و با استفاده از گردابه‌های اطراف تیغه انعطاف‌پذیر رسانا یک ریزمخلوط‌گر جدید مدل‌سازی نمودند [۲۲]. مصطفوی و همکاران [۲۳] اختلاط ناشی از قرار دادن موانع مثلی رسانا را با تغییر پارامترهای هندسی مورد بررسی قرار دادند. نظری و همکاران [۲۴] با قرار دادن یک صفحه رسانا بصورت افقی در جریان الکترواسموتیک تحت میدان الکتریکی ثابت و متغیر با زمان به بررسی پارامترهای مختلف طول، زاویه قرارگیری و مکان قرارگیری تیغه روی میزان اختلاط و راندمان آن پرداختند، در ادامه با قرار دادن تیغه‌های رسانای زاویه‌دار در مسیر جریان کانال T شکل پدیده اختلاط مورد بررسی قرار گرفت و میزان افزایش و عوامل موثر بر آن ارزیابی گردید [۲۵]. در تحقیقی مشابه [۲۶] با در نظر گرفتن دیواره محفظه اختلاط بصورت حفره‌هایی با هندسه‌های مختلف و از جنس رسانا، میزان افزایش اختلاط مورد مطالعه قرار گرفت. ژاو و همکاران [۲۷] در مطالعه آزمایشگاهی با قراردادن استوانه رسانا در محلول‌های الکترولیت با غلظت‌های متفاوت و تحت تأثیر شدت میدان الکتریکی متفاوت، به بررسی گردابه‌های اطراف استوانه پرداختند و سرعت لغزشی حاصل را با مدل استاندارد مقایسه نمودند. یوکی وی و همکاران [۲۸] حضور استوانه رسانا در مسیر جریان غیرنیوتنی را بررسی نمودند و اثر الاستیسیته را بر سرعت، شدت گردابه‌ها و بازده اختلاط مورد توجه قرار دادند.

مرور تحقیقات گذشته حاکی از این است که اغلب پژوهش‌های صورت گرفته در حوزه الکتروکنتیک القایی بر تأثیر هندسه مجرا بر میزان اختلاط متمرکز بوده است. حال آنکه ماهیت غیرخطی جریان و نحوه تعامل آن با میدان‌های الکتریکی می‌تواند اثرهای متفاوتی را در

نواحی مختلف جریان - حتی در یک هندسه ساده- به همراه داشته باشد. اثراتی که غالباً در تحقیقات گذشته مغفول مانده یا بررسی آن به تأثیرات کلی آن بر اختلاط محدود شده است. در این تحقیق سعی بر آن است تا با ارائه نگاهی دقیق‌تر به شکل‌گیری الگوهای اختلاطی جریان در مجاورت سطوح رسانا، به بررسی عوامل موثر بر این الگوها بپردازد. برای این مهم با ساده نگه داشتن هندسه و محدود ساختن آن به یک ریزمجرای تخت، اثرات عوامل غیرهندسی از جمله زتاپتانسیل الکتریکی، شدت میدان الکتریکی و طول بخش رسانا به طور مستقیم و غیر مستقیم (اثرات متقابل عوامل) مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل به صورت عددی و به کمک روش لیتیس بولتزمن صورت گرفته است. در انتها با تکیه بر بررسی سیستماتیک عوامل موثر بر الگوهای جریان، اختلاط دو جریان به عنوان یکی از کاربردهای این موضوع مورد ارزیابی قرار گرفته و چگونگی اثر عوامل ذکر شده بر میزان اختلاط دو سیال بررسی شده است.

۲- فیزیک مساله و معادلات حاکم

مساله مورد بررسی در این تحقیق جریان الکترواسموتیک یک الکترولیت در مجرای تخت به عرض $H=60\mu m$ و طول $6H$ است. طرحواره مجرا در شکل ۱ نشان داده شده است. حضور دو الکترود در ابتدا و انتهای مجرا باعث ایجاد میدان الکتریکی یکنواخت در مسیر جریان می‌گردد. جداره مجرا شامل دو بخش رسانا و نارسانا است. بخش رسانا شامل بازه‌ای به طول l_c است که در میانه مجرا و تنها بر روی یک دیواره (دیوار بالایی) استقرار یافته است. در شکل ۱ این بخش با خط چین مشخص شده است.



شکل ۱- هندسه و شرایط مرزی ریز مجرا

معادلات حاکم بر جریان الکترواسموتیک در دو بخش پتانسیل الکتریکی و جریان سیال قابل بررسی است. توزیع پتانسیل الکتریکی خارجی ناشی از حضور الکترودها، ϕ_e ، از معادله لاپلاس پیروی می‌کند [۲۳].

$$\nabla^2 \phi_e = 0 \quad (1)$$

شرایط مرزی لازم برای حل این معادله شامل مقادیر معلوم ولتاژ

در محل حضور الکترودها و $\vec{n} \cdot \vec{\nabla} \phi_e = 0$ در سطح جداره است. در این مطالعه فرض شده است که الکترولیت موجود در مجرا تراکم‌ناپذیر بوده و رفتار نیوتونی دارد. با فرض کوچک بودن ضخامت لایه دوگانه در مقابل عرض مجرا، از مدل‌سازی مستقیم لایه الکتریکی دوگانه صرف نظر می‌شود [۲۴]. توزیع سرعت در جریان سیال از معادلات پیوستگی و ناوراستوکس محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0 \quad (2)$$

$$\rho [\vec{u} \cdot \vec{\nabla} \vec{u}] = -\vec{\nabla} p + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (3)$$

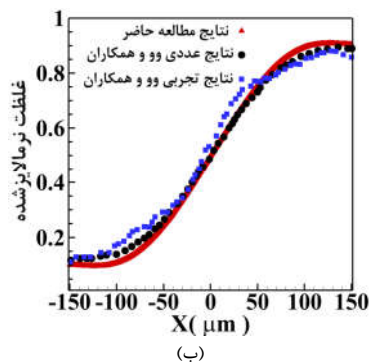
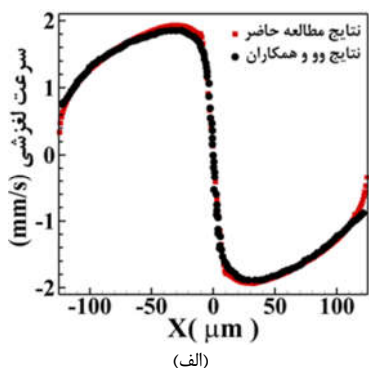
در روابط فوق μ و ρ به ترتیب لزجت و چگالی سیال، $\vec{u}$ سرعت سیال، p فشار می‌باشد. جریان سیال تنها به واسطه جریان

$$g_a(x + e_a \Delta t, t + \Delta t) = g_a(x, t) - \frac{[g_a(x, t) - g_a^{eq}(x, t)]}{\tau_g} \quad (12)$$

تابع توزیع تعادلی $g_a^{eq} = w_a \phi$ بصورت g_a^{eq} تعریف می‌گردد. در بحث شرایط مرزی برای اعمال شرط سرعت لغزش از مدل زو-هی^۱ و در اجرای شرایط مرزی میدان الکتریکی از مدل ارائه شده در [۳۲] استفاده شده است.

۳-۱- اعتبارسنجی

اعتبارسنجی روش عددی حاضر در دو بخش شبیه‌سازی جریان الکترواسموتیک و اختلاط انجام شده است. در بخش جریان، سرعت لغزشی بر روی مانعی رسانا به شکل مثلث در یک ریزمجرای تخت بررسی شده است. شکل ۲-الف نتایج حاصل را با مقادیر گزارش شده در تحقیق وو و همکاران [۱۴] مقایسه می‌کند. به منظور ارزیابی شبیه‌سازی اختلاط نیز توزیع غلظت در فاصله ۵۰۰ میکرونی از مانع مثلثی شبیه‌سازی و با نتایج آزمایشگاهی و عددی گزارش شده در مرجع [۱۵] مقایسه شده است (شکل ۲-ب). تطابق بسیار خوب نتایج در هر دو مورد، صحت شبیه‌سازی‌های انجام شده در تحقیق حاضر را تأیید می‌کند.



شکل ۲- اعتبارسنجی مقاله حاضر (الف) سرعت لغزشی بر روی مانع مثلثی [۱۴] (ب) توزیع غلظت در فاصله ۵۰۰ میکرونی از مانع مثلثی [۱۵].

الکترواسموتیک ایجاد می‌شود و فشار و گرادیان سرعت در ورودی و خروجی مجرا وجود ندارد.

$$\vec{n} \cdot \vec{\nabla} \vec{u} = 0, \quad P = 0 \quad (4)$$

با فرض کوچک بودن ضخامت لایه دوگانه الکتریکی در مقایسه با عرض مجرا، برهم کنش میدان الکتریکی خارجی و لایه دوگانه به صورت سرعت لغزشی بر روی دیواره‌های مجرا اعمال می‌گردد (تقریب هلمهولتز-اسلومچوفسکی) [۲۴]:

$$u_{slip_w} = -\frac{\varepsilon_w \zeta_w}{\mu} \vec{E}, \quad \vec{n} \cdot \vec{\nabla} P = 0 \quad (5) \text{ روی دیواره نارسنای ریزمجرا}$$

$$u_{slip_c} = -\frac{\varepsilon_w \zeta_c}{\mu} \vec{E}, \quad \vec{n} \cdot \vec{\nabla} P = 0 \quad (6) \text{ روی سطح رسانا}$$

در این روابط شدت میدان الکتریکی محلی بر حسب رابطه $\vec{E} = -\vec{\nabla} \phi_c$ محاسبه می‌شود. ε_w ضریب گذری دی‌الکتریک، ζ_w زتاپتانسیل روی دیواره نارسنای مجرا و ζ_c زتاپتانسیل القا شده روی سطح رسانا می‌باشد. از آنجا که در ابتدا سطح رسانا از نظر الکتریکی خنثی است، انتگرال زتاپتانسیل و بار الکتریکی القایی بر روی سطح آن صفر است ($\oint \zeta_i = 0$)؛ زتاپتانسیل القایی روی سطح رسانا تابع میدان الکتریکی خارجی بوده و به کمک تقریب زیر محاسبه می‌گردد [۲۴]:

$$\zeta_i = -\phi_c + \phi_e \quad (7)$$

$$\phi_e = \frac{\int \phi_c dA}{A} \quad (8)$$

در این رابطه A ، مساحت سطح رساناست که در معرض میدان الکتریکی قرار گرفته است. جهت اطلاع از جزئیات این بار القایی مطالعه منبع [۱۴] پیشنهاد می‌شود.

۳- روش عددی

در این تحقیق از روش عددی لیتیس بولتزمن برای حل معادلات حاکم استفاده شده است. معادله هم ارز با ناوراستوکس در روش لیتیس بولتزمن بصورت زیر بیان می‌شود [۲۹]:

$$f_a(x + e_a \Delta t, t + \Delta t) = f_a(x, t) - \frac{[f_a(x, t) - f_a^{eq}(x, t)]}{\tau_f} \quad (9)$$

که در آن f توزیع چگالی در مکان x در زمان t می‌باشد. گام زمانی در این معادله با Δt نشان داده می‌شود و e_a سرعت مشخصه لیتیس در جهت a می‌باشد [۲۹]. در معادله (۹)، زمان آرامش τ_f برحسب لزجت سینماتیکی سیال و بصورت $\tau_f = 0.5 + \nu / (c_s^2 \Delta t)$ تعریف می‌شود و تابع توزیع تعادلی f_a^{eq} با فرض تراکم ناپذیری جریان بصورت زیر تعریف می‌شود [۳۰]:

$$\rho_a^{eq} = w_a \rho(x) \left[1 + \frac{\vec{e}_a \cdot \vec{u}}{c_s^2} + \frac{(\vec{e}_a \cdot \vec{u})^2}{2c_s^4} - \frac{u^2}{2c_s^2} \right] \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، w_a ضرایب وزنی متناسب با جهات شبکه بوده و ρ و $\vec{u}$ مقادیر چگالی و سرعت خواهند بود که به کمک رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

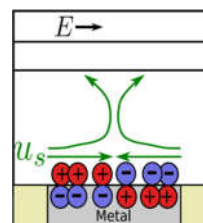
$$\vec{u} = \frac{1}{\rho} \sum_a f_a \vec{e}_a, \quad \rho = \sum_a f_a \quad (11)$$

جهت حل معادله لاپلاس (۱) در لیتیس بولتزمن از یک تابع توزیع با نام g_a استفاده شده است [۳۱]:

¹ Zuo-He

۴- نتایج عددی

در جریان‌هایی با عدد رینولدز پایین، پدیده غالب در انتقال جرم و حرارت، پخش مولکولی است. در چنین شرایطی، افزایش طول مسیر جریان، با افزایش زمان ماند سیال در مسیر اختلاط، می‌تواند نقش مؤثری در تقویت پخش و بهبود اختلاط ایفا کند. این تحقیق با تمرکز بر این عامل، به بررسی چگونگی تأثیرپذیری خطوط جریان از شرایط هندسی و محیطی می‌پردازد. در جریان‌های خزشی امکان آشفته کردن جریان از طریق افزایش سرعت وجود ندارد، اما می‌توان با ایجاد گردابه، بدون اینکه ماهیت جریان تغییر نماید، جریان را آشوبناک نمود و به ازای یک طول ثابت از مجرا، خطوط جریان را گسترش داد. البته این تغییر باید به گونه‌ای باشد که موجب کاهش قابل ملاحظه دبی جریان نگردد. در شکل ۳ چگونگی تشکیل گردابه در اطراف سطح رسانا در محلول الکترولیت تحت میدان الکتریکی نشان داده شده است. در شرایطی که بار سطحی (زتا پتانسیل) در طول مجرا یکنواخت باشد، نیروی الکترواستاتیک تقریباً یکنواخت بوده و جریان سیال به صورت موازی با دیواره‌های مجرا حرکت



شکل ۳- تشکیل گردابه در اطراف رسانا در محلول تحت میدان الکتریکی یکنواخت در حالت پایدار [۳۲].

می‌کند. اما زمانی که بخشی از دیواره رسانا باشد، میدان الکتریکی باعث قطبش سطح رسانا شده و توزیع زتا پتانسیل را به طور موضعی تغییر می‌دهد (شکل ۳). این تغییرات زتا پتانسیل منجر به ایجاد گرادیان نیروی الکترواستاتیک در اطراف رسانا می‌شود که خطوط جریان را منحرف کرده و باعث تشکیل گردابه‌ها می‌شود. در واقع، آن قسمت از رسانا که به پتانسیل بالاتر مجرا نزدیک‌تر است، دارای زتا پتانسیل القایی منفی خواهد بود که موجب تشکیل لایه الکتریکی دوگانه با بار خالص مثبت روی سطح آن می‌شود و جریان را به سمت خارج کانال تقویت می‌کند. در مقابل، قسمت دیگر سطح رسانا که به پتانسیل پایین‌تر نزدیک است، دارای زتا پتانسیل القایی مثبت است و لایه الکتریکی

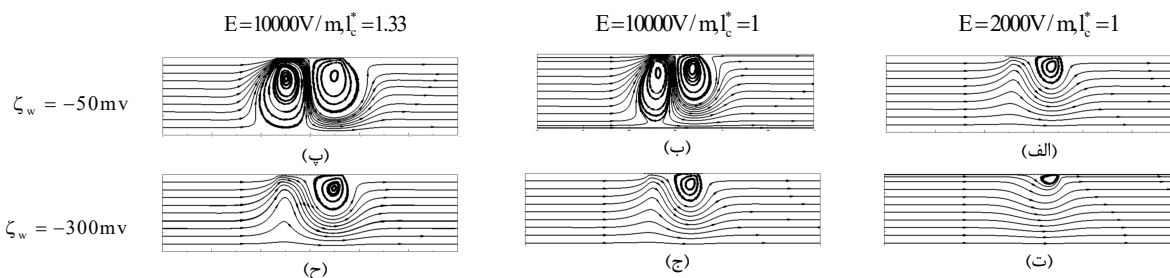
دوگانه با بار منفی در آن شکل می‌گیرد؛ به طوری که جریان به سمت ورودی کانال پمپاژ می‌شود (شکل ۳). در نتیجه، ارضای شرط پیوستگی سیال در این نواحی باعث تشکیل گردابه‌هایی در اطراف رسانا می‌شود که تأثیر مهمی بر الگوی جریان دارند. شدت این گردابه‌ها وابسته به مقدار زتا پتانسیل القایی است. ارتباط بین زتا پتانسیل القایی و شدت میدان الکتریکی (رابطه (۷)) این فرصت را مهیا می‌سازد تا با تغییر در میدان الکتریکی خارجی شدت گردابه و به تبع آن طول خطوط جریان را تغییر داد.

علاوه بر شدت میدان الکتریکی خارجی (E)، زتا پتانسیل الکتریکی دیواره نارسانا (ζ_w) و نسبت طول رسانا به عرض مجرا $I_e^* = l_e/H$ از عوامل دیگر تأثیرگذار در شرایط جریان می‌باشند که در این تحقیق به عنوان متغیر در نظر گرفته شده‌اند. شکل ۴ نحوه تأثیرپذیری خطوط جریان از این عوامل را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، وجود رسانا باعث تشکیل گردابه‌هایی در مسیر جریان و افزایش طول خطوط جریان می‌گردد. شدت این گردابه‌ها با افزایش شدت میدان الکتریکی، کاهش زتا پتانسیل بخش نارسانا و افزایش طول رسانا، افزایش می‌یابد. در بخش‌های بعدی، جزئیات بیشتری در مورد میزان و علل اثرگذاری هر یک از این عوامل بر خطوط جریان ارائه خواهد شد. برای بررسی تأثیرپذیری طول خطوط جریان از عوامل ذکر شده، خطوط جریان عبوری از ورودی کانال ($x=0$) در سه فاصله متفاوت از سطح رسانا، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

- خط جریان R_1 : در فاصله عرضی به اندازه $0.9H$ از رسانا
- خط جریان R_2 : در فاصله عرضی به اندازه $0.5H$ از رسانا
- خط جریان R_3 : در فاصله عرضی به اندازه $0.1H$ از رسانا

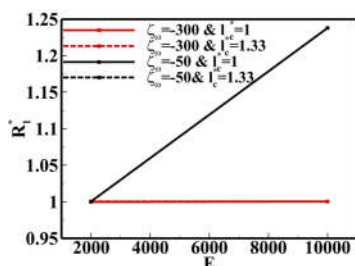
شایان ذکر است که در ارائه نتایج، از طول بی‌بعد شده خطوط جریان (R^*) استفاده می‌شود که حاصل تقسیم طول خط جریان بر طول مجرا است. به تبع آن، مختصات و سرعت نیز به صورت بی‌بعد ($x^* = \frac{x}{H}$ ، $y^* = \frac{y}{H}$ و $\bar{U}^* = \frac{\bar{U}}{U_{ref}}$) در نظر گرفته می‌شوند. در این روابط، U_{ref} سرعت مرجع محاسبه شده از تقریب هلمهولتز-اسلوموچوفسکی در بخش نارسانای مجرا خواهد بود (رابطه (۵)).

شکل‌گیری بار القایی در سطح رسانا به گونه‌ای است که بار موثر (بار میانگین) سطح برابر با صفر است. این بدان معناست که سطوح رسانا تأثیر قابل ملاحظه‌ای در میزان جریان عبوری از مجرا نخواهد داشت اما از آنجایی که طول بخش نارسانا که عامل ایجاد جریان داخل مجرا می‌باشد، با رسانا شدن بخشی از آن کاهش می‌یابد، رسانا کردن مجرا می‌تواند دبی جریان را نیز تحت الشعاع قرار دهد. در این مطالعه،



شکل ۴- خطوط جریان در اطراف رسانا در شرایط مختلف

تمایل آن‌ها در حفظ طول خط جریان در حوالی مقدار طول مجرا تفسیر نمود. شکل ۶ خط جریان R_1^* را به ازای میدان‌های الکتریکی و مقادیر زتاپتانسیل ارائه شده در جدول ۱ پیوست نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، میدان الکتریکی موجب افزایش طول بی‌بعد خط جریان می‌گردد. از سوی دیگر افزایش زتاپتانسیل الکتریکی بخش نارسانا موجب کاهش طول خط جریان و نزدیک شدن آن به طول مجرا می‌گردد. چرایی اثرپذیری طول خط جریان از عوامل ذکر شده را می‌توان با توجه به ماهیت جریان تفسیر نمود. توزیع متفاوت زتاپتانسیل در بخش‌های رسانا و نارسانا موجب می‌گردد تا جریان الکترواستاتیک در مساله پیش رو تحت تاثیر دو الگوی جریان قرار گیرد: جریان اولیه از چپ به راست که ناشی از زتاپتانسیل ثابت بخش نارسانا است و جریان ثانویه گردابه‌ای که متاثر از زتاپتانسیل متغیر در بخش رسانا می‌باشد. با افزایش زتاپتانسیل در بخش نارسانا، جریان اولیه تقویت شده و اثرپذیری جریان از حضور رسانا و گردابه ناشی از آن کاهش می‌یابد. در نتیجه طول بی‌بعد شده خط جریان به عدد یک نزدیک شده و با انحراف کمتر تقریباً به صورت موازی با جداره امتداد می‌یابد. افزایش شدت میدان الکتریکی موجب افزایش قطبش سطح رسانا و در نتیجه افزایش زتاپتانسیل القایی روی آن می‌گردد درحالی‌که زتاپتانسیل دیواره نارسانای مجرا تحت تاثیر شدت میدان الکتریکی واقع نمی‌شود. بنابراین تاثیرپذیری جریان حول قسمت رسانا از افزایش شدت میدان الکتریکی بیشتر بوده و تقویت جریان گردابه‌ای را به همراه دارد. این امر موجب انحراف بیشتر خطوط جریان از حالت یکنواخت و افزایش طول خطوط جریان می‌گردد (شکل ۶). اثرات متقابل عوامل ذکر شده در شکل ۷ خلاصه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در زتاپتانسیل بالا $\zeta_w = -300\text{mV}$ (خط قرمز) افزایش شدت میدان الکتریکی از 2000 V/m تا 10000 V/m تاثیر قابل ملاحظه‌ای روی طول خط جریان R_1^* ندارد. این درحالی است که در زتاپتانسیل پایین $\zeta_w = -50\text{mV}$ (خط مشکی)، افزایش شدت میدان الکتریکی در بازه ذکر شده موجب افزایش حدود ۲۳٪ طول خط جریان R_1^* می‌گردد. تطبیق خطوط قرمز و مشکی در سمت چپ نمودار حاکی از آن است که در مقادیر پایین شدت میدان الکتریکی ($E = 2000\text{ V/m}$) افزایش زتاپتانسیل تاثیری قابل ملاحظه‌ای روی خط جریان ندارد. در مقابل در مقادیر بالای شدت میدان الکتریکی، افزایش زتاپتانسیل از -50mV تا -300mV موجب کاهش طول خط جریان خواهد شد (این اثر کاهشی در نمودار پارتو - شکل ۵ به رنگ آبی نشان داده شده است). لازم به ذکر است که تغییرات طول رسانا در بازه ذکر شده در جدول ۱ (پیوست) تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر شرایط خط جریان R_1^* نداشته است.



شکل ۷- اثر متقابل میدان الکتریکی و زتاپتانسیل الکتریکی بر طول بی‌بعد R_1^* در طول‌های مختلف قسمت رسانا.

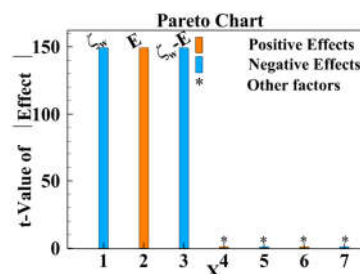
دبی جریان به کمک حاصلضرب سرعت هلمهولتز و عرض مجرا بی‌بعد شده‌است و با نماد Q^* گزارش شده‌است.

در مواجهه با مجموعه‌ای از عوامل موثر، روش بررسی یک فاکتور در هر مرحله^۱ از نظر حجم محاسبات بهینه نبوده و قادر به تشخیص اثرات متقابل عوامل موثر نیست؛ از این‌رو در این پژوهش از روش آزمایش عاملی کامل^۲ برای بررسی عوامل موثر استفاده شده است. این طرح برای سه عامل موثر، شامل ۹ شبیه‌سازی است. مقادیر پارامترها و پاسخ‌های بدست آمده از هر شبیه‌سازی در جدول ۱ پیوست فهرست شده‌است.

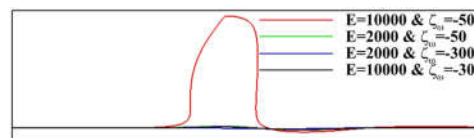
در ادامه چگونگی تاثیرپذیری خطوط جریان و دبی عبوری از متغیرهای جریان، به طور مجزا بررسی می‌شوند. این بررسی شامل رتبه‌بندی عوامل موثر در قالب نمودار پارتو و همچنین میزان اثرات متقابل این عوامل (در صورت وجود) می‌باشد.

۴-۱- عوامل موثر بر طول خط جریان R_1^*

رتبه‌بندی عوامل موثر بر طول بی‌بعد شده خط جریان عبوری از ورودی کانال ($x=0$) و در فاصله $0.9H$ از سطح رسانا در شکل ۵ نشان داده شده است. بر اساس این نمودار زتاپتانسیل دیوار مجرا در بخش نارسانا، شدت میدان الکتریکی و اثر متقابل این دو عامل، بیشترین تاثیر را در طول خط جریان دارند در حالی‌که طول رسانا تاثیری قابل ملاحظه‌ای بر آن ندارد. البته باید توجه داشت که نوع تاثیر عوامل کاملاً متفاوت



شکل ۵- رتبه‌بندی عوامل موثر بر طول بی‌بعد خط جریان R_1^*

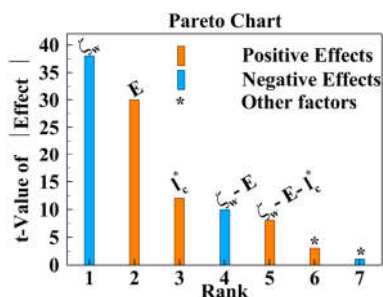


شکل ۶- نمایش خط جریان R_1^* به ازای $I_c = 1$.

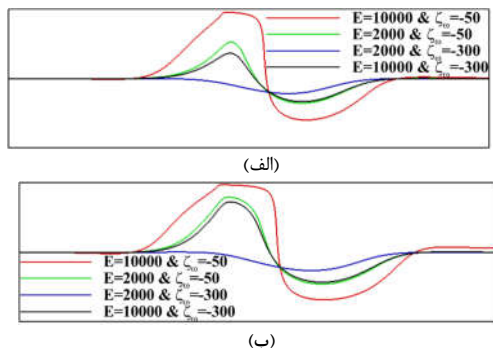
است. شدت میدان الکتریکی تمایل به افزایش طول خط جریان R_1^* دارد (اثر افزایشی نشان داده شده به رنگ نارنجی در شکل ۵)، در حالی‌که افزایش زتاپتانسیل دیواره نارسانا و اثر متقابل آن بر شدت میدان الکتریکی موجب کاهش طول خط جریان می‌گردد (نشان داده شده به رنگ آبی). از آنجایی که کمترین طول خط جریان در حوزه مورد بررسی همان طول مجرا است، اثر عوامل کاهنده را می‌توان به

^۱One factor at a time

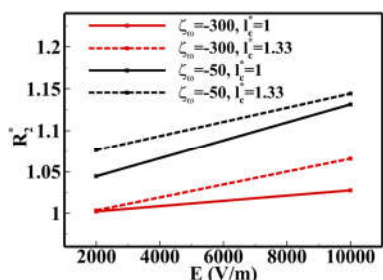
^۲Full factorial experiment



شکل ۸- رتبه‌بندی عوامل موثر بر طول بی بعد خط جریان R_2^*



شکل ۹- نمایش خط جریان R_2^* (الف) $I_c = 1$ (ب) $I_c = 1.33$



شکل ۱۰- اثرات متقابل میدان الکتریکی و زاپتانسیل الکتریکی بر R_2^* در طول‌های مختلف رسانا.

۴-۳- عوامل موثر بر طول خط جریان R_3^*

خط جریان R_3 از ورودی کانال ($x=0$) در فاصله $0.1H$ از سطح رسانا و نزدیک آن امتداد می‌یابد. شکل ۱۱ رتبه‌بندی عوامل موثر بر طول بی‌بعد شده R_3^* را نشان می‌دهد. مطابق این نمودار زاپتانسیل دیواره مجرا در بخش نارسانا و شدت میدان الکتریکی بیشترین تاثیر را در طول خط جریان دارند. طول ناحیه رسانا و اثرات متقابل زاپتانسیل نارسانا و شدت میدان الکتریکی در رتبه‌های بعد قرار دارند. شدت میدان الکتریکی و طول رسانا تمایل به افزایش طول خط جریان R_3^* دارد، درحالی‌که افزایش زاپتانسیل دیواره نارسانا و اثر متقابل آن بر شدت میدان الکتریکی موجب کاهش طول خط جریان می‌گردد. شکل ۱۲ تغییرات خط جریان R_3^* ، به ازای میدان‌های الکتریکی و مقادیر زاپتانسیل ارائه شده در جدول ۱ (پیوست) نمایش داده شده است. اثرپذیری خط جریان R_3^* از متغیرهای جریان تا حد زیادی مشابه بخش قبل (خط R_2^*) می‌باشد. افزایش طول رسانا موجب افزایش طول خط جریان R_3^* می‌گردد و افزایش شدت میدان الکتریکی نیز فارغ از مقدار زاپتانسیل الکتریکی دیواره مجرا موجب افزایش طول خط جریان

۴-۲- عوامل موثر بر طول خط جریان R_2^*

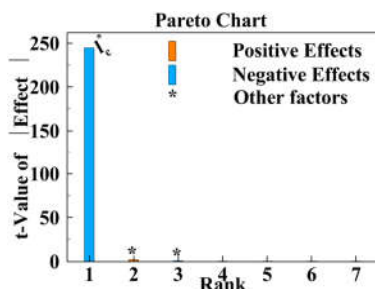
خط جریان R_2 از میانه مجرا در ورودی کانال ($x=0$) عبور می‌کند، و فاصله عرضی آن با دیوار بالایی $0.5H$ است. شکل ۸ رتبه‌بندی عوامل موثر بر طول بی‌بعد شده R_2^* را نشان می‌دهد. براساس این نمودار زاپتانسیل دیواره مجرا در بخش نارسانا و شدت میدان الکتریکی، بیشترین تاثیر را در طول خط جریان دارند. طول رسانا و اثرات متقابل این عوامل، در رتبه‌های بعدی اثرگذاری قرار دارند. شدت میدان الکتریکی و طول رسانا تمایل به افزایش طول خط جریان R_2^* دارند، درحالی‌که افزایش زاپتانسیل دیوار نارسانا و اثر متقابل آن بر شدت میدان الکتریکی موجب کاهش طول خط جریان می‌گردد. تغییرات خط جریان به ازای مقادیر متفاوت زاپتانسیل، شدت میدان الکتریکی و طول رسانا در شکل ۹ نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش طول رسانا موجب انحراف بیشتر خط جریان R_2^* از خط جریان کمینه (خط جریان معادل طول مجرا) و در نتیجه افزایش طول آن می‌گردد. شدت میدان الکتریکی نیز موجب افزایش طول خط جریان می‌گردد درحالی‌که افزایش زاپتانسیل بخش نارسانا موجب نزدیک شدن خط جریان به خط جریان کمینه می‌گردد. چرایی و چگونگی اثر شدت میدان الکتریکی، زاپتانسیل الکتریکی و اثر متقابل این دو بر این خط جریان پیش از این در بخش قبل (خط جریان R_1^*) تشریح گردید. طول رسانا که در بخش قبل تاثیر ناچیزی بر شرایط جریان داشت، این بار و با نزدیک شدن به ناحیه رسانا اثرگذاری پررنگ‌تری بر شرایط جریان دارد. جریان الکترواسموتیک در مساله پیش‌رو تحت تاثیر جریان ناشی از زاپتانسیل ثابت بخش نارسانا و جریان ثانویه گردابه‌ای متاثر از زاپتانسیل متغیر در بخش رسانا است. با افزایش طول قسمت رسانا، از یک سو جریان ثانویه گردابه‌ای ناشی از حضور رسانا تقویت شده و از سوی دیگر طول موثر قسمت نارسانای مجرا (جریان اولیه) کاهش می‌یابد که افزایش طول خط جریان را به دنبال خواهد داشت. شکل ۱۰ جزئیات تاثیرگذاری این عوامل و رابطه اثرات متقابل آن‌ها را ارائه می‌نماید. همانطور که مشاهده می‌شود افزایش زاپتانسیل نارسانا از 50mV به 300mV موجب کاهش طول خط جریان خواهد شد. میزان این کاهش، تابع اثرات متقابل شدت میدان الکتریکی و طول رسانا است؛ بطوری‌که به ازای طول رسانا $I_c = 1$ (خطوط ممتد)، افزایش شدت میدان الکتریکی از 2000V/m به 10000V/m میزان کاهش طول خط جریان را از 4% به 10% می‌رساند. با افزایش طول رسانا این اثر متقابل تضعیف خواهد شد به گونه‌ای که به ازای $I_c = 1.33$ (خط چین)، فارغ از میزان شدت میدان الکتریکی، کاهش طول خط جریان به ازای افزایش زاپتانسیل از 50mV به 300mV تقریباً ثابت و حدود 7% خواهد بود.

۴-۴- عوامل موثر بردبی جریان Q^*

در جریان‌های الکترواسموتیک، عامل محرک جریان، تقابل لایه دوگانه الکتریکی و میدان الکتریکی خارجی است بنابراین می‌توان به نوعی جریان را سطح محرک تلقی نمود. در حالتی که همه سطوح نارسا باشند، طول موثر در شکل‌گیری جریان ۲ برابر طول مجرا خواهد بود. با رسانا شدن قسمتی از مجرا، طول موثر به اندازه طول قسمت رسانا کاهش می‌یابد و برابر $2L - l_c$ می‌گردد. در شرایط کاملاً خطی انتظار می‌رود، دبی جریان متناسب با این میزان کاهش یابد.

$$\frac{Q^*}{Q_{ref}} \propto \frac{2L - l_c}{2L}$$

با توجه به بی بعدسازی متغیرهای جریان، دبی مرجع برابر با یک خواهد بود ($Q_{ref} = 1$). به این ترتیب انتظار می‌رود به ازای طول رسانای $l_c^* = 1.33$ دبی بی‌بعد شده جریان تقریباً برابر با ۰/۸۹ باشد. همخوانی این تقریب با نتایج حاصل از شبیه‌سازی (جدول ۱ پیوست) موید این است که در موضوع دبی، طول بخش رسانا مهم‌ترین عامل موثر بر میزان دبی است. تحلیل آماری نتایج (شکل ۱۴) نیز به همین نتیجه منتهی می‌گردد.



شکل ۱۴- رتبه‌بندی عوامل موثر بر طول بی‌بعد خط جریان Q^*

۴-۵- اثرات اختلاطی جریان

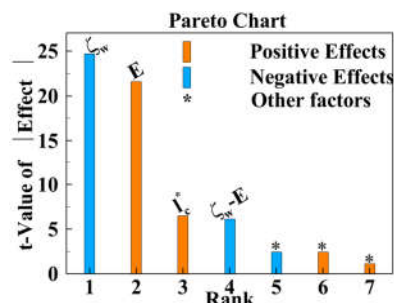
در بخش‌های قبل، چگونگی تأثیرپذیری الگوهای جریان و به‌طور خاص خطوط جریان از شدت میدان الکتریکی، زتاپتانسیل دیواره و طول رسانا بررسی شد. افزایش طول مسیر جریان، با افزایش زمان ماند سیال، منجر به تقویت پدیده پخش شده و در نتیجه منجر به افزایش اختلاط می‌گردد. در این بخش به عنوان یکی از کاربردهای حضور رسانا در جریان‌های الکترواسموتیک، شرایط اختلاطی جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد.

شرایط اختلاطی به کمک تزریق دو جریان با خواص مشابه اما غلظت متفاوت ۰ و ۱ در ابتدای مجرا شبیه‌سازی شده است. وجود گرادیان غلظت بین دو جریان بدلیل پدیده پخش، انحلال تدریجی دو جریان را در پی خواهد داشت. در این مطالعه برای بررسی اختلاط از شاخص بازده اختلاط استفاده می‌شود [۷].

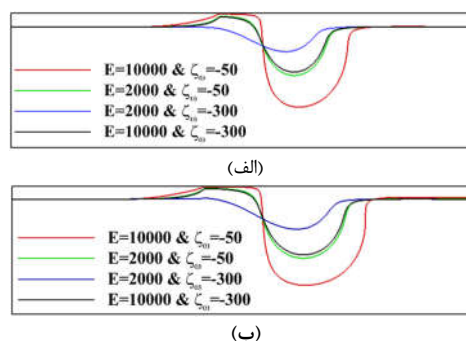
$$\varepsilon_m = 1 - \frac{1}{H} \int_0^H \left| \frac{C(y) - C_\infty}{C_0 - C_\infty} \right| dy \quad (13)$$

در این رابطه، C نمایانگر غلظت سیال، C_0 غلظت در ورودی مجرا و C_∞ غلظت در حالت اختلاط کامل دو سیال می‌باشد. شکل ۱۵ اختلاط دو جریان را در غیاب (الف) و حضور (ب) بخش رسانا نشان می‌دهد. در حالت اول زمانی که تمام دیواره نارسااست (جدار همگن) بازده اختلاط در بخش انتهایی مجرا ۰/۲۵ خواهد بود. با جایگزین شدن بخشی از

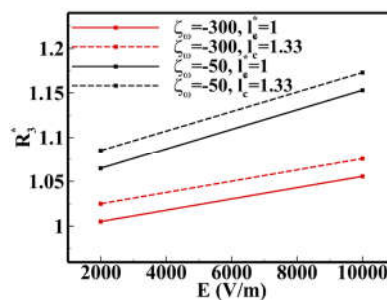
می‌گردد. درحالی‌که افزایش زتاپتانسیل الکتریکی موجب نزدیک شدن خط جریان به خط جریان کمینه خواهد شد. شکل ۱۳ جزئیات تأثیرگذاری این عوامل و رابطه اثرات متقابل آن‌ها ارائه شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود، زتاپتانسیل بخش نارسا در شدت میدان الکتریکی پایین اثرگذاری



شکل ۱۱- رتبه‌بندی عوامل موثر بر طول بی‌بعد خط جریان R_3^*

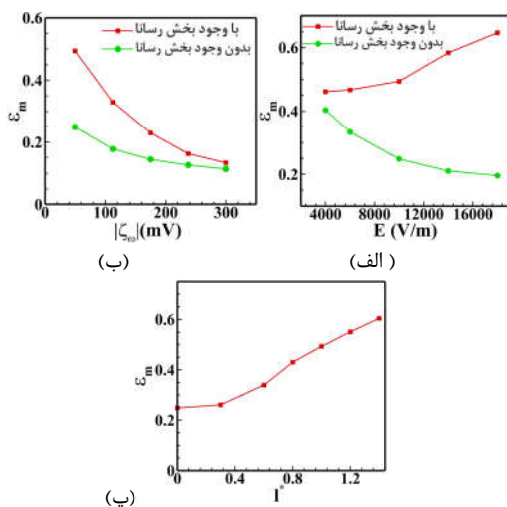


شکل ۱۲- نمایش خط جریان R_3^* (الف) $l_c^* = 1$ (ب) $l_c^* = 1.33$

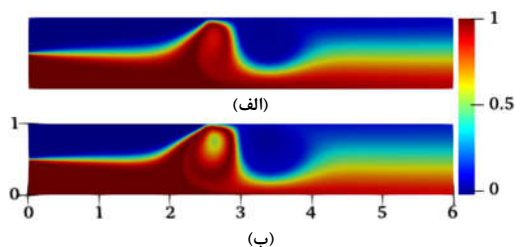


شکل ۱۳- اثر متقابل میدان الکتریکی و زتاپتانسیل الکتریکی بر R_3^* در طول‌های مختلف رسانا.

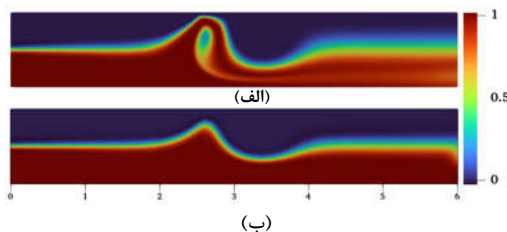
کمتری بر طول خط جریان دارد به گونه‌ای که با افزایش زتاپتانسیل الکتریکی تغییرات طول خط جریان، در شدت میدان الکتریکی ۲۰۰۰۰V/m، حدود ۶٪ و در میدان الکتریکی ۱۰۰۰۰V/m، حدود ۱۰٪ می‌باشد. مقایسه خطوط ممتد و خط چین در شکل ۱۳ نشان می‌دهد که با افزایش طول رسانا، الگوی تغییرات خط جریان به ازای افزایش میدان الکتریکی و زتاپتانسیل در هر دو حالت تقریباً یکسان باقی می‌ماند.



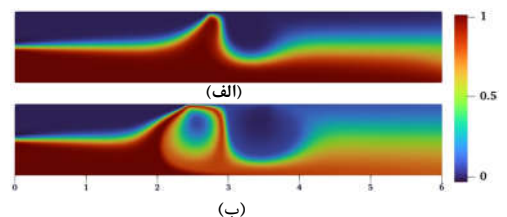
شکل ۱۶- بازده اختلاط (الف) بر حسب شدت میدان الکتریکی به ازای $E=10000 \text{ V/m}$ (ب) بر حسب زتاپتانسیل دیواره در $\zeta_w = -50 \text{ mV}$ (پ) بر حسب طول بی بعد رسنا.



شکل ۱۷- کانتور اختلاط در شدت میدان الکتریکی (الف) $E = 6000 \text{ V/m}$ و (ب) $E = 12000 \text{ V/m}$



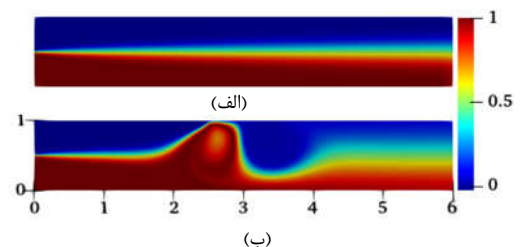
شکل ۱۸- کانتور اختلاط به ازای $E=10000 \text{ V/m}$ در زتاپتانسیل (الف) $\zeta_w = -112.5 \text{ mV}$ و (ب) $\zeta_w = -237.5 \text{ mV}$



شکل ۱۹- کانتور اختلاط با وجود رسنا به ازای $\zeta_w = -50 \text{ mV}$ و $E = 10000 \text{ V/m}$ (الف) $I_c = 0.6$ و (ب) $I_c = 1.2$

گردابه‌ای در حضور رسنا موجب بهبود اختلاط می‌گردد. به‌طوری‌که مطابق شکل ۱۶-الف، به ازای شدت میدان الکتریکی 18000 V/m در

دیواره با رسنا، الگوی جریان گردابه‌ای ایجاد شده میزان بازدهی اختلاط را تا حدود ۲ برابر افزایش داده و به عدد 0.49 می‌رسند (شکل ۱۶-الف). عملکرد اختلاطی همچون الگوی جریان، تابع شدت میدان الکتریکی، طول رسنا و زتاپتانسیل بخش نارسانا است. شکل ۱۶ اثر این عوامل بر بازده اختلاط را به تفکیک نشان می‌دهد. مطابق با آنچه در شکل ۱۶-الف نشان داده می‌شود، افزایش



شکل ۱۵- اختلاط دو سیال در یک ریز مجرا به ازای $E=10000 \text{ V/m}$ ، $\zeta_w = -50 \text{ mV}$ (الف) دیواره نارسنا (ب) محدوده $2.5 < x < 3.5$ دیواره رسنا.

شدت میدان الکتریکی در شرایط وجود یا عدم وجود رسنا می‌تواند اثرات کاملاً متفاوتی بر شاخص اختلاط داشته باشد. در مجرای همگن، تقویت شدت میدان الکتریکی، سرعت عبور جریان را افزایش داده، فرصت کمتری برای اختلاط دو سیال فراهم می‌آورد. همانطور که در شکل ۱۶-الف نشان داده شده است با افزایش شدت میدان الکتریکی از 4000 V/m به 18000 V/m ، شاخص اختلاط در مجرای همگن به نصف کاهش می‌یابد. در حضور بخش رسنا شرایط متفاوت است. اختلاط از دو الگوی جریان تاثیر می‌پذیرد: جریان حاصل از مناطق نارسنا که شدت آن تابع خطی از میدان الکتریکی است، و جریان گردابه‌ای در مجاورت رسنا که - بواسطه القایی بودن بارسطحی- از توان دوم میدان تاثیر می‌پذیرد. بدین ترتیب همانطور که در شکل ۱۷ نشان داده شده است، علی رغم افزایش سرعت متوسط جریان در شدت میدان الکتریکی بالاتر، تقویت جریان مجرا با حضور رسنا شاخص اختلاط حدود 0.64 خواهد بود که حدوداً ۳ برابر شرایط مشابه در مجرای بدون رسنا است. بخش نارسنا مولد اصلی جریان در مجرا است. با افزایش زتاپتانسیل (منفی‌تر شدن زتاپتانسیل) سرعت عمومی جریان افزایش یافته، زمان کمتری برای گسترش اختلاط فراهم می‌آورد. شکل ۱۶-ب این اثر کاهشی را برای هر دو حالت حضور و عدم حضور رسنا نشان می‌دهد. مجرا با حضور رسنا بواسطه ایجاد جریان گردابه‌ای همواره عملکرد بهتری نسبت به مجرا با دیوار تماماً نارسنا خواهد داشت. اما این مزیت در زتاپتانسیل‌های بالا، کمرنگ خواهد شد. شکل ۱۸ نشان می‌دهد که با افزایش زتاپتانسیل و به تبع آن افزایش شدت جریان مولد، جریان گردابه‌ای ضعیف‌تر شده و کاهش شاخص اختلاط را به همراه خواهد داشت.

۶- پیوست

در جدول ۱ طرح شبیه سازی و طول بی بعد خطوط جریان و دبی بی بعد بدست آمده برای هر شبیه سازی ارائه شده است.

جدول ۱- طرح شبیه سازی و طول بی بعد خطوط جریان و دبی بی بعد بدست آمده برای هر شبیه سازی

No.	E(V/m)	ζ_w (mV)	I_c^*	R_1^*	R_2^*	R_3^*	Q^*
۱	۲۰۰۰	-۵۰	۱	۱/۰۰۰۱۵	۱/۰۴۴۴۵	۱/۰۶۳۰۳	۰/۹۱۴۶۴
۲	۱۰۰۰	-۵۰	۱	۱/۲۳۹۹۴	۱/۱۳۱۲۷	۱/۱۴۸۷۳	۰/۹۱۴۸۷
۳	۳۰۰۰	-۳۰۰	۱	۱/۰۰۰۰۳	۱/۰۰۲۴۲	۱/۰۱۱۸۵	۰/۹۱۴۶۴۵
۴	۱۰۰۰	-۳۰۰	۱	۱/۰۰۰۱۶	۱/۰۲۷۳۴	۱/۰۵۴۵۷	۰/۹۱۴۸۸
۵	۳۰۰۰	-۵۰	۳۳ ۱	۱/۰۰۰۷۹	۱/۰۷۶۴۸	۱/۰۸۶۷۳	۰/۸۸۶۶۵۵
۶	۱۰۰۰	-۵۰	۳۳ ۱	۱/۲۳۵۶۵	۱/۱۴۴۰۹	۱/۱۷۷۲۱	۰/۸۸۷۱۱۱
۷	۳۰۰۰	-۳۰۰	۳۳ ۱	۱/۰۰۰۰۳	۱/۰۰۳۵۳	۱/۰۱۷۹۱	۰/۸۸۶۶۶
۸	۱۰۰۰	-۳۰۰	۳۳ ۱	۱/۰۰۰۴۲	۱/۰۶۵۷	۱/۰۷۶۵۹	۰/۸۸۷۱۲
۹	۶۰۰۰	-۱۷۵	۱۷ ۱	۱/۰۰۰۲۳	۱/۰۵۳۶۳	۱/۰۶۷۶۷	۰/۹۰۰۶۹۷

۷- منابع

- [1] M. AP. Electroosmotic phenomena in porous media. J Colloid Interface Sci 1996;181:169.
- [2] Ren L, Li D. Electroosmotic Flow in Heterogeneous Microchannels. J Colloid Interface Sci 2001;243:255-61.
- [3] Tang GH, Li Z, Wang JK, He YL, Tao WQ. Electroosmotic flow and mixing in microchannels with the lattice Boltzmann method. J Appl Phys 2006;100:94908.
- [4] Wang M, Wang J, Chen S, Pan N. Electrokinetic pumping effects of charged porous media in microchannels using the lattice Poisson-Boltzmann method. J Colloid Interface Sci 2006;304:246-53.
- [5] Fu L-MM, Lin J-YY, Yang R-JJ. Analysis of electroosmotic flow with step change in zeta potential. J Colloid Interface Sci 2003;258:266-75.
- [6] Basati Y, Mohammadipour OR, Niazmand H. Numerical investigation and simultaneous optimization of geometry and zeta-potential in electroosmotic mixing flows. Int J Heat Mass Transf 2019;133:786-99.
- [7] Mirbozorgi SA, Niazmand H, Renksizbulut M. Electro-Osmotic Flow in Reservoir-Connected Flat Microchannels With Non-Uniform Zeta Potential. J Fluids Eng 2006;128:1133-43. <https://doi.org/10.1115/1.2353261>.
- [8] Basati Y, Mohammadipour OR, Niazmand H. Numerical and analytical analysis of a robust flow regulator in electroosmotic microfluidic networks. Chem Eng Sci 2019;210:115232.
- [9] Wang C, Song Y, Pan X, Li D. A novel microfluidic valve controlled by induced charge electro-osmotic flow. J Micromechanics Microengineering 2016;26:75002.
- [10] Bayareh M, Ashani MN, Usefian A. Active and passive micromixers: A comprehensive review. Chem Eng Process - Process Intensif 2020;147:107771.
- [11] Levitan JA, Devasenathipathy S, Studer V, Ben Y, Thorsen T, Squires TM, et al. Experimental observation of induced-charge electro-osmosis around a metal wire in a microchannel. Colloids Surfaces A Physicochem

شکل ۱۶- پ به اثربخشی طول رسانا بر بازده اختلاط اختصاص یافته است. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، با افزایش طول رسانا شدت جریان گردابه‌ای و در نهایت شاخص اختلاط افزایش می‌یابد. در این تصویر، شرایط عدم حضور رسانا به صورت $I_c^* = 0$ در سمت چپ نمودار ذکر گردیده است. جزئیات بیشتر این تاثیرپذیری در شکل ۱۹ با مقایسه اختلاط در دو طول رسانای متفاوت نشان داده شده است. بر اساس این تصویر، با افزایش طول رسانا از $I_c^* = 0.6$ به $I_c^* = 1.2$ ، شدت گردابه‌ها و طول خطوط جریان افزایش یافته و شاخص اختلاط از $0.34/0.55$ افزایش یافته است.

۵- نتیجه گیری

در جریان‌های الکترواسموتیک، سطوح رسانا بواسطه ایجاد زتاپتانسیل القایی گردابه‌هایی را در مجاورت خود ایجاد می‌نمایند که بدون تغییر در ماهیت جریان، آن‌را آشوبناک نموده و پدیده پخش را تقویت می‌نمایند. در این پژوهش اثر سه عامل زتاپتانسیل الکتریکی، شدت میدان الکتریکی و طول رسانا بر الگوی اختلاطی جریان در یک ریز مجرای تخت، بررسی شده است. بدین منظور دبی و سه خط جریان عبوری از ورودی کانال در سه فاصله $0.1H$ ، $0.5H$ و $0.9H$ به ترتیب نزدیکترین تا دورترین فاصله از رسانا به عنوان شاخص‌های جریان در نظر گرفته شدند. بررسی هدفمند عوامل موثر نشان داد، افزایش طول رسانا تاثیر قابل ملاحظه‌ای روی دورترین خط جریان (R_3^*) ندارد ولی خطوط جریان R_1^* ، R_2^* را تحت تاثیر قرار می‌دهد و موجب افزایش طول خط جریان می‌گردد. افزایش شدت میدان الکتریکی فارغ از مقدار زتاپتانسیل الکتریکی دیواره مجرا موجب افزایش طول هر سه خط جریان می‌گردد، درحالی‌که افزایش زتاپتانسیل الکتریکی موجب نزدیک شدن خطوط جریان به خط جریان کمینه خواهد شد. از طرف دیگر دبی جریان فقط از طول رسانا اثر پذیرفته و با افزایش طول رسانا کاهش می‌یابد.

در این تحقیق یکی از کاربردهای حضور رسانا در جریان‌های الکترواسموتیک، اختلاط دو جریان با خواص مشابه اما غلظت متفاوت و ۱ مورد بررسی قرار گرفت. با رسانا شدن بخشی از دیوار و ایجاد گردابه، پدیده پخش به طور کلی تقویت می‌گردد. بررسی میزان اثربخشی اختلاط از عوامل ذکر شده نشان می‌دهد افزایش شدت میدان الکتریکی در حضور رسانا می‌تواند برخلاف مجرای نارسانا، اثرات افزایشی بر میزان اختلاط داشته باشد به نحوی که در شدت میدان الکتریکی $18000V/m$ حضور رسانا توانست در مقایسه با مجرای بدون رسانا تا سه برابر عملکرد اختلاطی بهتری به همراه داشته باشد. در مقابل افزایش زتاپتانسیل بخش نارسانا اثرکاهشی بر اختلاط خواهد داشت. در زتاپتانسیل $50mV$ شاخص اختلاط در حضور رسانا تقریباً دو برابر مجرای نارسانا است. با افزایش زتاپتانسیل به $300mV$ مزیت حضور رسانا بر شاخص اختلاط کمرنگ‌تر شده و یک بهبود جزئی را مقایسه با مجرای نارسانا نشان می‌دهد. در نهایت افزایش طول قسمت رسانا همواره موجب تقویت اختلاط خواهد شد به گونه‌ای که به ازای طول $I_c^* = 1.4$ شاخص اختلاط در مقایسه با شرایط عدم وجود رسانا، به میزان 143% افزایش می‌یابد.

- شبیه‌سازی جریان سیال کاریو-یاسودا با لزجت تابع دما: روش شبکه بولتزمن غیرنیوتنی. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز ۱۳-۴۸:۱۰۵;۲۰۱۸.
- [31] Mohammadipour OR, Succi S, Niazmand H. General curved boundary treatment for two- and three-dimensional stationary and moving walls in flow and nonflow lattice Boltzmann simulations. *Phys Rev E* 2018;98:23304.
- [32] Pascall AJ, Squires TM. Induced Charge Electro-osmosis over Controllably Contaminated Electrodes. *Phys Rev Lett* 2010;104:88301.
- Eng Asp 2005;267:122-32.
- [12] Yoshida K, Sato T, Eom SI, Kim J wan, Yokota S. A study on an AC electroosmotic micropump using a square pole – Slit electrode array. *Sensors Actuators, A Phys* 2017;265:152-60.
- [13] Squires TM, Bazant MZ. Induced-charge electro-osmosis. *J Fluid Mech* 2004;509:217-52. <https://doi.org/10.1017/S0022112004009309>.
- [14] Wu Z, Li D. Mixing and flow regulating by induced-charge electrokinetic flow in a microchannel with a pair of conducting triangle hurdles. *Microfluid Nanofluidics* 2008;5:65-76.
- [15] Wu Z, Li D. Micromixing using induced-charge electrokinetic flow. *Electrochim Acta* 2008;53:5827-35.
- [16] Wu Z, Li D. Induced-charge electrophoretic motion of ideally polarizable particles. *Electrochim Acta* 2009;54:3960-7.
- [17] Kang Y, Li D. Electrokinetic motion of particles and cells in microchannels. *Microfluid Nanofluidics* 2009;6:431-60.
- [18] Manshadi MKD, Mohammadi M, Zarei M, Saadat M, Sanati-Nezhad A. Induced-charge electrokinetics in microfluidics: A review on recent advancements. *J Micromechanics Microengineering* 2020;30.
- [19] Feng H, Chang H, Zhong X, Wong TN. Recent advancement in induced-charge electrokinetic phenomena and their micro- and nano-fluidic applications. *Adv Colloid Interface Sci* 2020;280:102159..
- [۲۰] سلیمیان ریزی ف، طالبی ش، محمدی م. جداسازی میکرو و نانو ذرات با استفاده از روش القای بار الکتروستاتیک در یک کانال مستطیلی. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز ۲۰۲۲;۳۰۹:۵۲-۱۱۷.
- [21] Azimi S, Nazari M, Daghighi Y. Fluid physics around conductive deformable flaps within an induced-charge electrokinetically driven microsystem. *Microfluid Nanofluidics* 2016;20:124.
- [22] Azimi S, Nazari M, Daghighi Y. Developing a fast and tunable micro-mixer using induced vortices around a conductive flexible link. *Phys Fluids* 2017;29.
- [۲۱] مصطفوی م، نظری م. بررسی اختلاط ناشی از جریان الکتروکینتیک القایی غیرخطی در یک میکروکانال. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز ۲۰۱۸;۳۲۳:۳۰-۴۸.
- [24] Nazari M, Rashidi S, Esfahani JA. Effects of flexibility of conductive plate on efficiency of an induced-charge electrokinetic micro-mixer under constant and time-varying electric fields-A comprehensive parametric study. *Chem Eng Sci* 2020;212:115335.
- [25] Nazari M, Chuang P-YYA, Abolfazli Esfahani J, Rashidi S. A comprehensive geometrical study on an induced-charge electrokinetic micromixer equipped with electrically conductive plates. *Int J Heat Mass Transf* 2020;146:118892.
- [26] Nazari M, Rashidi S, Esfahani JA. Mixing process and mass transfer in a novel design of induced-charge electrokinetic micromixer with a conductive mixing-chamber. *Int Commun Heat Mass Transf* 2019;108:104293.
- [27] Zhao L, Lai T, Gao Y, Yan S, Liu M, Hou Y. Experimental investigation of inflow-outflow asymmetry in induced-charge electro-osmosis. *Energy Storage Sav* 2024;3:16-22.
- [28] Wei Y, Xu J, Li J, Yu W, Li C. Effect of elasticity on the induced charge electro-osmotic mixing of viscoelastic fluids in a micromixer with a conductive cylinder. *Phys Fluids* 2024;36.
- [۲۹] صالح آبادی ح، نظری م، کیهانی مح. مدلسازی دوفازی نفوذ و پیمایش سیال در مسیرهای مشخص داخل محیط متخلخل لایه ای به کمک روش شبکه بولتزمن. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز ۲۰۱۷;۲۹:۳۸-۴۷.
- [۳۰] جلالی ع، امیری دلوفی ا، گل محمدی ام، خورشادیزاده م.