



دانشکده مهندسی مکانیک
رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد

حل عددی جریان الکتروسینتیک القایی در میکرو کانال حاوی سیال غیرنیوتنی

نگارنده: مهسا مصطفوی

استاد راهنما
دکتر محسن نظری

بهمن ۱۳۹۴



فرم شماره ۶: صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم مهسا مصطفوی به شماره دانشجویی ۹۲۱۳۱۸۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان حل عددی جریان الکتروسینتیک القایی در میکروکانال حاوی سیال غیرنیوتنی که در تاریخ ۹۴/۱۱/۲۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: عالی) امتیاز ۱۹,۷۵ دفاع مجدد مردود

- ۱- عالی (۲۰ - ۱۹) ۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)
 ۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶) ۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)
 ۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد اهنمای اول	محسن نظری	دانشیار	
۲- استاد اهنمای دوم			
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	پوریا اکبرزاده	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	محمد محسن شاه‌مردان	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	علی جباری مقدم	دانشیار	

رئیس دانشکده:

تعهد نامه

اینجانب مهسا مصطفوی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **حل عددی جریان الکتروسینتیک القایی در میکرو کانال حاوی سیال غیرنیوتنی**

تحت راهنمایی دکتر محسن نظری متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد

شکر و قدردانی

پس کزار کسانی، بنتم که سرآغاز تولد من هستند. از یکی زاده می شوم و از دیگری جاودانه. استادی که سپیدی را برتخته سیاه زندگی ام گذاشت و

مادری که تار مویی از او به پای من سیاه نامد. تقدیریم به مقدس ترین واژه مادر لغت نامه دلم، مادر مهربانم که زندگی ام را در یون مهر و عطف او

می دانم. پدر مهربانی مشفق، بر دبار و حامی. بمسرم که نشانه لطف الهی در زندگی من است.

چکیده

در این مطالعه، اختلاط سیال غیرنیوتنی در میکرو کانالی با موانع رسانا و همچنین کنترل جریان سیال غیرنیوتنی، با روش عددی و با استفاده از مفهوم الکتروکینتیک القایی مورد بررسی قرار گرفته است. برخلاف الکتروکینتیک کلاسیک، 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 نیز تابعی از میدان الکتریکی اعمالی خواهد بود و به طور غیرخطی با آن رابطه دارد. الکتروکینتیک با بار القایی دارای برخی خصوصیات منحصر به فرد می باشد که می تواند در توسعه - ی سیال میکرو و تجهیزات آزمایشگاه بر روی تراشه مورد استفاده قرار گیرد. به این منظور از روش المان محدود جهت شبیه سازی میدان جریان و غلظت استفاده شده است. در این مسئله از شبکه بندی مثلثی جهت گسسته سازی میدان حل استفاده شده است. جهت صحت سنجی مدل سازی اختلاط، از مقایسه نتایج اختلاط دو سیال نیوتنی با حضور موانع رسانا (نتایج منتشر شده) با مدل سازی حاضر استفاده شده است. در قسمت اول نتایج، در مسئله اختلاط دو سیال نیوتنی، در مورد تأثیر موقعیت قرارگیری دو مانع، ارتفاع و زوایای موانع و قدرت میدان الکتریکی خارجی بر میزان اختلاط بحث شده است. زمانی که میدان الکتریکی اعمال می شود، گردابه هایی در اطراف موانع رسانا شکل می گیرد. نتایج نشان می دهد در حالتی که موقعیت و زوایای موانع ثابت باشد، با افزایش نسبت ارتفاع موانع به ارتفاع کانال به علت تشکیل گردابه های بزرگتر در اطراف موانع، بازده اختلاط افزایش می یابد. در این پژوهش، برای اولین بار، اختلاط دو سیال غیرنیوتنی (با مدل کاریو) در حضور دو مانع مثلثی رسانا با استفاده از مفهوم الکتروکینتیک القایی مورد بررسی قرار گرفته است. با بررسی تأثیر توان نمایی (n) بر میزان اختلاط مشاهده می شود که با کاهش n میزان اختلاط افزایش می یابد. وقتی سیال رقیق تر می شود و طول گردابه ها افزایش پیدا می کند، مقدار اختلاط در میکروکانال افزایش می یابد در نهایت تأثیر قدرت میدان الکتریکی خارجی، توان نمایی سیال غیرنیوتنی و زاویه موانع بر کنترل جریان سیال در

میکرو کانال با موانع رسانای نامتقارن مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد، در مواردی که زاویه‌ی مانع در پایین دست جریان نزدیک به زاویه‌ی مانع در طرف بالادست جریان باشد، قدرت میدان الکتریکی بحرانی بیشتری برای دست‌یابی به دبی جریان صفر مورد نیاز است.

کلمات کلیدی: اختلاط، کنترل جریان، سیال غیرنیوتنی، الکتروکینتیک با بار القایی

لیست مقالات استخراج شده:

مهسا مصطفوی، محسن نظری، (۱۳۹۴) " بررسی اختلاط توسط جریان الکتروکینتیک با بار القایی در میکرو کانالی با یک جفت مانع مثلثی رسانا"، سومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی برق، مهندسی مکانیک و مکاترونیک، تهران.

مهسا مصطفوی، محسن نظری، (۱۳۹۴) " بررسی اختلاط سیالات نیوتنی در میکرو میکسری با موانع رسانا تحت جریان الکتروکینتیک القایی"، نخستین کنفرانس سراسری دستاوردهای نوین در مهندسی شیمی، شیراز

فهرست عناوین

- ۱- فصل ۱ مقدمه..... ۱
- ۱-۱- مروری بر الکتروکینتیک و کاربردهای آن..... ۲
- ۲-۱- مطالعات انجام شده در زمینه ی میکرو میکسرها..... ۶
- ۳-۱- مطالعات انجام شده در زمینه کنترل جریان در میکرو کانالها..... ۱۰
- ۴-۱- جنبه های نوآوری تحقیق..... ۱۳
- ۲- فصل ۲ الکتروکینتیک کلاسیک و القایی..... ۱۵
- ۱-۲- مقدمه..... ۱۶
- ۲-۲- زتاپتانسیل و لایه مضاعف الکتریکی..... ۱۶
- ۳-۲- جریان الکترواسمتیک..... ۱۹
- ۴-۲- الکتروکینتیک کلاسیک..... ۲۱
- ۵-۲- الکتروکینتیک القایی..... ۲۲
- ۳- فصل ۳ مدل سازی مسئله، جریان سیال و معادلات حاکم..... ۳۱
- ۱-۳- مقدمه..... ۳۲
- ۲-۳- سیالات غیرنیوتنی..... ۳۳
- ۳-۳-۱- رفتارهای مستقل از زمان..... ۳۳
- ۳-۳-۲- مدل سیال غیرنیوتنی کاریبو..... ۳۴
- ۳-۳- ویژگی های فیزیکی و ابعاد میکروکانال..... ۳۴
- ۴-۳- روابط و معادلات حاکم..... ۳۷
- ۳-۴-۱- میدان الکتریکی جریان مستقیم..... ۳۸
- ۳-۴-۲- معادلات حاکم بر میدان جریان سیال..... ۳۸
- ۳-۴-۳- میدان غلظت..... ۴۱
- ۵-۳- مدل سازی میدان الکتریکی و میدان جریان..... ۴۱
- ۶-۳- مدل سازی میدان غلظت..... ۴۵
- ۷-۳- نمایی از شبکه تولیدشده..... ۴۶

۴۹.....	۴- فصل ۴ نتایج اختلاط سیالات نیوتنی.....
۵۰.....	۴-۱- معتبر سازی.....
۵۳.....	۴-۲- ارائه میکرومیکسری با دو مانع رسانا.....
۵۴.....	۴-۳- نمودارها و نتایج به دست آمده از مدل سازی.....
۶۱.....	۴-۴- نتیجه گیری.....
۶۳.....	۵- فصل ۵ نتایج اختلاط و کنترل جریان سیالات غیر نیوتنی.....
۶۴.....	۵-۱- مسئله مورد بررسی در این فصل.....
۶۴.....	۵-۲- استقلال شبکه.....
	۵-۳- تأثیر پارامتر غیر نیوتنی n و قدرت میدان الکتریکی خارجی بر میزان اختلاط دو سیال غیر نیوتنی.....
۶۵.....	۵-۴- بررسی رفتار سیال غیر نیوتنی بر کنترل جریان.....
۷۱.....	۵-۵- نتیجه گیری.....
	۶- پیوست: مدل سازی مسئله مورد بررسی در این پژوهش با نرم افزار کامسول.....
۸۱.....	۸۱- مدل سازی میدان الکتریکی.....
۸۲.....	۸۲- مدل سازی میدان جریان سیال (معادلات پیوستگی و مومنتوم).....
۸۷.....	۸۷- مدل سازی میدان غلظت.....
۸۸.....	۸۸- روش حل عددی.....
۹۱.....	۹۱- مراجع.....

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲ شماتیک دیاگرام لایه مضاعف الکتریکی، صفحه برشی و زتاپتانسیل [۳۵]..... ۱۹
- شکل ۲-۲ جریان الکترواستمیک روی یک سطح نارسانا [۳۶]..... ۲۰
- شکل ۳-۲ شماتیکی از فرآیند باردارشدن یک جسم رسانا در میدان الکتریکی اعمالی یکنواخت [۳۴]:
- الف) میدان الکتریکی اولیه، ب) میدان الکتریکی حالت پایدار..... ۲۳
- شکل ۴-۲ میدان جریان الکتروکینتیک با بار القایی در اطراف یک جسم رسانا [۳۴]..... ۲۸
- شکل ۵-۲ توزیع زتاپتانسیل القایی اطراف سطح استوانه‌های دایروی رسانا [۳۴]..... ۲۸
- شکل ۶-۲ ذرات فلئورسنت برای آشکارسازی الگوی جریان الکتروکینتیک القایی اطراف کره کربن-فولاد، خط‌چین مرز ذره را نشان میدهد [۳۶]..... ۲۹
- شکل ۷-۲ توزیع گردابه‌ها اطراف ذره تحت میدانهای الکتریکی مختلف. نقاط خط‌چین مرز ذره هستند. تصاویر توسط میکروسکوپ نیکون در ۱۰ ثانیه گرفته شده است [۳۶]..... ۲۹
- شکل ۱-۳ شماتیک هندسه مسئله در اختلاط سیالات نیوتنی ۳۵
- شکل ۲-۳ شماتیک هندسه مسئله در بررسی اختلاط و کنترل جریان سیالات غیرنیوتنی... ۳۶
- شکل ۳-۳ شبکه ریز شده نزدیک موانع در هندسه مربوط به اختلاط نیوتنی ۴۶
- شکل ۴-۳ شبکه ریز شده نزدیک موانع در هندسه مربوط به مسئله غیرنیوتنی..... ۴۷
- شکل ۱-۴ هندسه مرجع [۳۴] ۵۰
- شکل ۲-۴ مقایسه قدرت میدان الکتریکی بر روی سطوح مانع با مرجع [۳۴]..... ۵۱
- شکل ۳-۴ مقایسه سرعت لغزشی القایی بر روی سطوح مانع با مرجع [۳۴]..... ۵۱
- شکل ۴-۴ مقایسه زتاپتانسیل القایی بر روی سطوح مانع با نتایج مرجع [۳۴]..... ۵۲
- شکل ۵-۴ مقایسه توزیع غلظت در فاصله ی ۵۰۰ میکرومتر از وسط میکرو کانال با نتایج

- مرجع [۱۵] ۵۳
- شکل ۴-۶ مقایسه خطوط جریان کانال با موانع رسانا و نارسانا در ولتاژ اعمالی 50 V/cm .
- الف) کانال دارای موانع نارسانا، ب) کانال دارای موانع رسانا ۵۴
- شکل ۴-۷ نمودار توزیع غلظت به ازای H/L های مختلف، $D/W=0.41$ ، $\alpha=45$ در مقطع عرضی به فاصله $4000\ \mu\text{m}$ از وسط کانال ۵۵
- شکل ۴-۸ درصد بازده اختلاط در H/L های مختلف، $\alpha=45$ در مقطع عرضی به فاصله $4000\ \mu\text{m}$ از وسط کانال ۵۶
- شکل ۴-۹ تغییرات خطوط جریان با در H/L های مختلف، $D/W=0.41$ و $\alpha=45$ ، الف) $H/L=0.05$ ، ب) $H/L=0.25$ ، ج) $H/L=0.15$ ، د) $H/L=0.13$ ۵۶
- شکل ۴-۱۰ نمودار توزیع غلظت به ازای D/W های مختلف، $H/L=0.25$ ، $\alpha=45$ در مقطع عرضی به فاصله $4000\ \mu\text{m}$ از وسط کانال ۵۷
- شکل ۴-۱۱ تغییرات خطوط جریان با D/W در $\alpha=45\text{deg}$ ، الف) $D/W=0.2$ ، ب) $D/W=0.35$ ، ج) $D/W=0.41$ ، د) $D/W=0.8$ ۵۸
- شکل ۴-۱۲ درصد بازده اختلاط در D/W های مختلف، $H/L=0.25$ ، $\alpha=45$ در مقطع عرضی به فاصله $4000\ \mu\text{m}$ از وسط کانال ۵۹
- شکل ۴-۱۳ نمودار توزیع غلظت به ازای زاویه های مختلف، $D/W=0.41$ ، $H/L=0.25$ در مقطع عرضی به فاصله $4000\ \mu\text{m}$ از وسط کانال ۵۹
- شکل ۴-۱۴ درصد بازده اختلاط در زوایای مختلف، $D/W=0.41$ ، $H/L=0.25$ در مقطع عرضی به فاصله $4000\ \mu\text{m}$ از وسط کانال ۶۰
- شکل ۴-۱۵ درصد بازده اختلاط در قدرت میدان الکتریکی خارجی مختلف ۶۱
- شکل ۵-۱ بررسی استقلال از شبکه: توزیع غلظت در مقطع عرضی به فاصله $500\ \mu\text{m}$ از وسط کانال ۶۵

- شکل ۲-۵ میدان جریان در قدرت میدان الکتریکی خارجی $12/5 \text{ V/cm}$ برای n های مختلف،
الف) $n=0/344$ (ب) $n=0/7$ (ج) $n=1$ ۶۷
- شکل ۳-۵-۵ نمودار اندازه طولی گردابه های بالادست جریان به ازای n های مختلف ۶۷
- شکل ۴-۵ میدان غلظت در قدرت میدان الکتریکی خارجی $12/5 \text{ V/cm}$ برای n های مختلف،
الف) $n=1$ (ب) $n=0/7$ (ج) $n=0/344$ ۶۹
- شکل ۵-۵ نمودار توزیع غلظت به ازای n های مختلف، قدرت میدان الکتریکی خارجی
 $12/5 \text{ V/cm}$ در مقطع عرضی به فاصله $5000 \mu\text{m}$ از وسط کانال ۶۹
- شکل ۶-۵ درصد بازده اختلاط، قدرت میدان الکتریکی خارجی $12/5 \text{ V/cm}$ در مقطع عرضی
به فاصله $5000 \mu\text{m}$ از وسط کانال ۷۰
- شکل ۷-۵ بازده اختلاط برحسب تغییر قدرت میدان الکتریکی خارجی در n های مختلف ... ۷۱
- شکل ۸-۵ اثر پمپ کردن به عقب در قدرت میدان الکتریکی محلی $n=1.9 \text{ V/cm}$ در یک جفت
مانع نامتقارن ($\alpha_1=45$ و $\alpha_2=60$)، الف) قدرت میدان الکتریکی در سطح مانع، ب) توزیع
زتاپتانسیل القایی، ج) سرعت لغزشی القایی ۷۳
- شکل ۹-۵ دبی های جریان به عنوان تابعی از قدرت میدان الکتریکی اعمالی به ازای توان نمایی
مختلف n سیال غیرنیوتنی ۷۵
- شکل ۱۰-۵ دبی های جریان به عنوان تابعی از n در قدرت میدان الکتریکی خارجی 9 V/cm با
شرط $\zeta_{induced} = 0$ ۷۶
- شکل ۱۱-۵ دبی های جریان به عنوان تابعی از n در قدرت میدان الکتریکی خارجی 9 V/cm
با شرط $\zeta = 0$ ۷۶
- شکل ۱۲-۵ دبی های جریان به عنوان تابعی از n در قدرت میدان الکتریکی خارجی مختلف ۷۷
- شکل ۱۳-۵ مقدار ولتاژ بحرانی به عنوان تابعی از n ۷۸

شکل ۱۴-۵ مقایسه ولتاژ بحرانی در زوایای مختلف مانع پایین دست با نتایج مرجع [۳۴]...۷۹

شکل ۱۵-۵ ولتاژ بحرانی به عنوان تابعی از زاویه مانع پایین دست در توان نمایی n مختلف .. ۸۰

فهرست جداول

جدول ۱-۳ مشخصه‌های سیال الکترولیت غیرنیوتنی..... ۴۳

جدول ۲-۰ پارامترهای مدل کاریو [۳۹]..... ۴۳

جدول ۳-۳ ثابت‌های مورداستفاده در شبیه‌سازی عددی..... ۴۴

فهرست علائم

A	سطح جسم رسانا
C_i	غلظت خط جریان i ام
D	ارتفاع مانع
e	بار الکترون
\vec{E}	میدان الکتریکی محلی اعمالی
\vec{E}_i	میدان الکتریکی القایی محلی
H	فاصله دو مانع مثلثی از یکدیگر
k	پارامتر دیبای هاگل
k_b	ثابت بولتزمن $1.38 \times 10^{-23} J/k$
L	طول کانال
n	توان نمایی سیال غیرنیوتنی
n_∞	غلظت یونی توده سیال
P	فشار سیال
q	بار خالص سطح
\vec{U}	سرعت سیال
$\vec{U}_{slip(C)}$	سرعت لغزشی الکترواستاتیک بر روی موانع رسانا
$\vec{U}_{slip(N.C)}$	سرعت لغزشی الکترواستاتیک بر روی دیواره‌های نارسانا کانال
W	عرض کانال
z	ظرفیت شیمیایی
α	زاویه مانع

$\dot{\Upsilon}$	نرخ برش تعمیم یافته
$\vec{\nabla}$	گرادیان
ε	ثابت دی الکتریک در محیط
ε_0	ثابت دی الکتریک در خلأ
ε_w	ثابت دی الکتریک محلول
ζ	زتا پتانسیل بر روی سطوح نارسانای کانال
$\zeta_{induced}$	زتا پتانسیل القایی بر روی سطوح رسانا
ζ_0	زتا پتانسیل در لحظه اولیه
λ	ثابت زمانی
μ	لزجت سیال
μ_0	لزجت در نرخ برش صفر
μ_{inf}	لزجت در نرخ برش بی نهایت
ρ	چگالی سیال
ρ_e	چگالی بار آزاد
Φ_e	پتانسیل الکتریکی اعمالی
Φ_c	پتانسیل الکتریکی اصلاحی ثابت

۱ فصل اول: مقدمه

مقدمه‌ی حاضر در سه بخش به معرفی مفهوم الکتروکینتیک، مطالعات انجام‌شده در زمینه میکرو میکسرها و در نهایت تحقیقات صورت گرفته در زمینه‌ی کنترل جریان سیال در میکرو کانال‌ها می‌پردازد.

۱-۱ مروری بر الکتروکینتیک و کاربردهای آن

پیشرفت‌های اخیر در ساخت وسایل میکرو، موجب توسعه فناوری میکروالکترونیک‌ها و ایجاد کامپیوترهایی با سرعت بالا شده و روش زندگی و کار را تغییر داده است. دانشمندان و مهندسان نیز به فواید و کاربردهای چشمگیر فناوری ساخت وسایل در ابعاد میکرو در حوزه‌ی مهندسی مکانیک و مهندسی پزشکی پی برده‌اند که باعث توسعه سریع این فناوری در زمینه‌های مختلف به خصوص آزمایشگاه‌های روی تراشه^۱ شده است. آزمایشگاه روی تراشه، دستگاهی است که از یک یا چند عملگر آزمایشگاهی روی یک تراشه سیلیکونی و یا شیشه‌ای به ابعاد چند میلی‌متر یا سانتی‌متر مربع تشکیل شده است. این آزمایشگاه‌ها با حجم‌های بسیار کم مایعات حتی کمتر از چند پیکولیتتر سروکار دارند و از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده‌اند. از جمله‌ی این قسمت‌ها می‌توان به میکرو پمپ‌ها برای تأمین جریان، میکرو میکسرها برای مخلوط کردن دو یا چند جریان، میکرو رآکتورها برای انجام واکنش‌ها اشاره کرد. هر کدام از این قسمت‌های تشکیل‌دهنده 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. کنترل جریان و انتقال مایعات و نمونه‌های زیستی و شیمیایی نیز مسئله‌ای حیاتی در ابزارهای آزمایشگاه‌های روی تراشه است. از میکروسیالات و آزمایشگاه‌های روی تراشه در حوزه‌ی پزشکی برای پمپ کردن [۱] مخلوط کردن [۲] و حتی جداسازی مولکول‌ها یا پروتئین‌ها [۳] و جمع‌آوری دی‌ان‌ای و سلول [۴] استفاده می‌شود. آزمایشگاه‌های روی تراشه مزایای فوق‌العاده‌ای مانند کاهش چشمگیر در میزان مصرف مواد گران‌قیمت، زمان کوتاه انجام واکنش،

¹ Lab on a chip (LOC)

توان عملیاتی بالا، کنترل و هدایت دستگاه به صورت خودکار و قابلیت حمل راحت و بدون نیاز به تجهیزات دارند. سیستم‌های ریز سیال امروزه ابزار قدرتمندی در جداسازی مولکول‌های زیستی مانند دی ان ای، آر ان ای، پروتئین و سلول‌های عصبی، انتقال دارو و سیستم‌های پیل سوختی هستند [۵-۶]

سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی^۲، فناوری سیستم‌های بسیار کوچک در ابعاد میکرومتر است. این سیستم‌ها با توجه به توان عملیاتی بالا، قابلیت کوچک‌سازی، یکپارچه‌سازی، کنترل و هدایت دستگاه به صورت خودکار به سرعت در حال توسعه هستند و به عنوان یک ابزار قدرتمند در زمینه‌های کاربردی مانند شیمی، پزشکی، زیست‌شناسی، محیط‌زیست و اقلام دارویی به کار می‌روند [۷-۸]

یکی از مهم‌ترین مسائل که در مهندسی با آن مواجه هستیم مسئله انتقال سیالات است. به‌طور کلی سه روش برای انتقال سیال وجود دارد که شامل انتقال بر پایه اختلاف فشار، اختلاف دما و میدان الکتریکی خارجی است. متداول‌ترین روش موجود، ایجاد اختلاف فشار بین ورودی و خروجی هندسه مسئله است که استفاده از آن در مسائل با ابعاد مایکروسکوپی بسیار متداول است ولی در ابعاد میکرو و نانو استفاده از این روش با مشکلاتی همراه است. در سیستم‌هایی که بر پایه اختلاف فشار استوار هستند وجود اجزای متحرک ضروری است و این الزام در ابعاد میکرو و به خصوص نانو محدودیت‌های زیادی ایجاد می‌کند، زیرا ساخت و مونتاژ این اجزا در مقیاس ریز دشوار و هزینه‌بر بوده و کارایی آن نیز در این ابعاد کاهش می‌یابد.

روش دوم بر پایه ایجاد اختلاف دما و خزش گرمایی^۳ است. اگرچه روش خزش گرمایی اجزای متحرک ندارد و این یک مزیت در مقیاس نانو و میکرو است ولی ایجاد حرارت و استفاده

^۲ Micro electromechanical systems (MEMS)

^۳ Thermal creep

از آن فقط در مجراهایی با سطح مقطع بسیار کوچک، یکی از مشکلات این روش است. در روش سوم از یک نیروی خارجی برای به حرکت درآوردن سیال استفاده می‌کنیم. یکی از این روش‌ها روش الکتروکینتیک^۴ است که برای انتقال و کنترل جریان در میکرو و نانو مجراها با هندسه‌های پیچیده استفاده می‌شود.

اثر متقابل بین میدان الکتریکی اعمال‌شده و لایه مضاعف الکتریکی^۵ که بر روی سطح هر جسم جامد تشکیل می‌شود را پدیده‌ی الکتروکینتیک می‌گویند.

در گذشته برای مطالعه‌ی کلوئیدها از پدیده الکتروکینتیک استفاده می‌شده است؛ اما پیشرفت‌ها در فناوری، منظرهای جدیدی را برای وارد کردن الکتروکینتیک به سیال در مقیاس میکرو و کاربردهای آزمایشگاه‌های روی تراشه گشوده است. روش‌های الکتروکینتیک که الکترواسمتیک و الکتروفورسیک را شامل می‌شود، نقش‌های مهم در ابزارهایی که با سیال در ابعاد میکرو کار می‌کنند، ایفا می‌کنند. الکترواسمتیک و الکتروفورسیک به ترتیب به حرکت سیال و ذره در یک میدان الکتریکی اعمالی گفته می‌شود که بر اساس عکس‌العمل متقابل بار الکترواستاتیک در فصل مشترک جامد و سیال با میدان الکتریکی اعمالی می‌باشد.

الکترواسمتیک به‌طور گسترده در پمپ کردن سیالات مورد استفاده قرار می‌گیرد و مزیت اصلی این روش آن است که نیاز به قسمت‌های متحرک مکانیکی ندارد و کنترل و تعویض جهت جریان در آن آسان است.

تا سال ۱۸۸۰ مفاهیم زیادی از الکتروکینتیک و مشخصات پایه‌ای آن کشف و همچنین بسیاری از محدودیت‌های آن نیز معلوم شد. در مطالعات کلاسیک فرض می‌شود که پدیده الکتروکینتیک (الکترواسمتیک و الکتروفورسیک) رابطه‌ی خطی با میدان الکتریکی اعمال شده دارند. در الکتروکینتیک کلاسیک بار ثابت و ساکن برای اجسام در نظر گرفته می‌شود که این

^۴ Electrokinetic

^۵ electrical double layer, EDL

فرض باعث ایجاد محدودیت‌هایی می‌شود. به‌عنوان مثال اجسام با بار ثابت و ساکن را نمی‌توان از طریق اندازه و شکل آن‌ها از یکدیگر جدا کرد. در عمل ممکن است سطوح بار ثابت و ساکن نداشته باشند و یا به میدان الکتریکی اعمال‌شده به‌طور خطی پاسخ ندهند. حل این اشکالات، سرآغازی برای پیدایش شاخه‌ی جدیدی از الکتروکینتیک به نام الکتروکینتیک القایی^۶ شده است.

لوویچ [۹] به‌عنوان پیشگام در زمینه الکتروکینتیک القایی شناخته می‌شود که برای اولین بار از یک کره کاملاً رسانا در سیستم الکتروکینتیک استفاده کرد. او به‌طور تئوری گردابه‌های ایجادشده در نزدیکی اجسام رسانا، هنگامی اجسام درون محلول الکترولیت قرار می‌گیرند و میدان الکتریکی اعمال می‌شود را پیش‌بینی کرد. این گردابه‌ها جزء کلیدی در مطالعات الکتروکینتیک القایی هستند. بعد از یک دهه، سیمون و دوخین [۱۰] ساختار لایه القاشده را به‌صورت تئوری آنالیز و بررسی کردند. گامایانو و همکارانش [۱۱] اولین کسانی بودند که مشاهدات آزمایشگاهی از جریان بارهای القایی را گزارش کردند. راموس و همکارانش [۱۲] نیز جریان نوسانی الکترواستمیک را کشف کردند.

بسیاری از تحقیقاتی که تاکنون به آن پرداخته شده است، جریان الکتروکینتیک القایی را در مورد سیالات نیوتنی موردبررسی قرار داده است. از طرفی سیالات زیستی اغلب رفتار غیرنیوتنی از خود نشان می‌دهند و به علت اهمیت سیستم‌های میکرو الکترومکانیک زیستی^۷ و همچنین تجهیزات آزمایشگاه‌های روی تراشه، بررسی رفتار سیالات غیرنیوتنی در حضور میدان جریان ناشی از الکتروکینتیک القایی از اهمیت بالایی برخوردار است و تاکنون مطالعات محدودی در این زمینه صورت گرفته است.

^۶ Induced-charge electrokinetic (ICEK)

^۷ Bio-MEMS

تانگ و همکاران [۱۳] جریان الکترواستمیتیک را در یک میکرو کانال حاوی سیال غیر-نیوتنی بررسی کردند. نتایج نشان داد که رفتار رئولوژیکی سیال غیرنیوتنی قادر است الگوی جریان الکترواستمیتیک را تغییر دهد و توان نمایی مدل (n) نقش اساسی را در این تغییر الگو ایفا می‌کند.

در مقایسه با تحقیقات انجام شده بر روی سیالات نیوتنی، مطالعه در مورد رفتار سیالات غیرنیوتنی زیستی که با پدیده‌ی الکتروکنتیک القایی جریان می‌یابند، در مراحل ابتدایی قرار دارد و نیاز به طراحی‌های جدید در حوزه سیستم‌های میکرو سیال و تجهیزات آزمایشگاه‌های روی تراشه مانند میکرو شیرها و میکرو میکسرها که با سیالات غیرنیوتنی در ارتباط هستند، می‌باشد.

۱-۲ مطالعات انجام شده در زمینه‌ی میکرو میکسرها

به‌طور کلی، به علت سرعت پایین جریان‌هایی که توسط الکتروکینتیک ایجاد می‌شود و طول مشخصه‌ی کوچک^۸، جریان در میکرو کانال‌ها، آرام است و عدد رینولدز کمتر از ۱ می‌باشد ($Re \ll 1$). بزرگ‌ترین محدودیت در طراحی میکرو میکسرها، عدم توانایی در ایجاد جریان با اغتشاشات بالا است. از طرفی ظرافت و پیچیدگی ابزار و دستگاه‌های تولید شده در مقیاس میکرو، استفاده از روش‌های متداول اختلاط را در این مقیاس دشوار و یا حتی غیرممکن می‌سازد. چرا که این روش‌ها معمولاً نیاز به کارکرد قطعات متحرک (پره‌ها) دارند 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 غیاب آشفتگی، اختلاط سیالات، محدود به پدیده‌ی پخش^۹ در سطح مشترک دو سیال است. اختلاط مولکول‌های کوچک از طریق فرایند

⁸ Length scale

⁹ Diffusion

پخش، ثانیه‌ها طول می‌کشد و در طول اختلاط بلند (فاصله‌ی ده‌ها میکرومتر از ورودی 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 زمانی برای بسیاری از آنالیزهای شیمیایی مشکل‌ساز است. رفع این مشکلات انگیزه‌ای برای انجام مطالعات بیشتر در حوزه‌ی میکرومیکسرهای پربازده شده است.

تجهیزات مخلوط‌کننده‌ی چند جریان در حوزه‌ی میکرو سیال‌ها را ر اساس اینکه آیا یک منبع انرژی خارجی وجود دارد یا خیر، به دودسته‌ی فعال و منفعل تقسیم‌بندی 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 پدیده‌ی پخش در میکرو-میکسرها ارائه دادند و اثر پدیده‌ی پخش غیرخطی را بر میزان اختلاط در میکرو کانال‌ها بررسی کردند. در مدل غیرخطی وابستگی ضریب پخش به غلظت در نظر گرفته می‌شود. آن‌ها همچنین با ساخت میکرومیکسرهای Y شکل به‌صورت آزمایشگاهی نیز به اندازه‌گیری نتایج پرداختند که با نتایج حاصل از مدل تحلیلی مطابقت داشت.

در مورد میکرومیکسرهای فعال برای ایجاد جریان نیاز به منبع انرژی خارجی وجود دارد. هرچند میکرومیکسرهای فعال به فرایندهای پیچیده ساخت نیاز دارند و ساختار پیچیده‌تری نیز دارند، اما عضو متحرکی ندارند و از لحاظ پیوستگی جریان سیال نسبت به میکرومیکسرهای منفعل بهتر هستند. میکرومیکسرهای الکترواسمتیک یکی از انواع میکرومیکسرهای فعال بوده که در آن نیروهای الکتریکی به‌عنوان منبع انرژی خارجی است.

وو و لی [۱۵] یک میکرومیکسر الکترواسمتیک با طراحی جدیدی از میکرو کانال که دارای موانع رسانا بوده را پیشنهاد دادند و به بررسی تأثیر آن برافزایش اختلاط محلول‌ها و

همچنین تنظیم جریان پرداختند. به علت توزیع غیریکنواخت بارهای سطحی در مجاورت سطوح رسانا، میدان جریان نامنظم بوده و گردابه‌های ایجادشده باعث بهبود اختلاط می‌شود.

دقیقی و لی [۱۶] طراحی جدیدی از میکرومیکسر بر پایه‌ی الکتروکینتیک ارائه کردند. این میکسر شامل یک محفظه‌ی استوانه‌ای است که به دو میکرو کانال 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 اعمال شده 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. اما درحوزه‌ی اختلاط سیالات بیشتر تحقیقات بر سیالات نیوتنی تمرکز دارد و مطالعات کمی درباره میکرو میکسرهای حاوی سیالات غیرنیوتنی انجام شده است.

بریل و الیورز [۱۷] توصیفی نظری از جریان الکترواسمتیک یک سیال غیرنیوتنی در یک کانال ساده و استوانه‌ای ارائه کردند.

لاما و همکارانش [۱۸] مخلوط شدن دو سیال مختلف ویسکوالاستیک عبوری از یک کانال واگرا- همگرا را بررسی و میدان سرعت و غلظت را به صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری کردند. درواقع آن‌ها با ایجاد ناپایداری جریان ویسکوالاستیک، اختلاط دو سیال را افزایش دادند.

هادی‌گل و همکارانش [۱۹] میکرو کانال ناهمگنی را که دارای زتاپتانسیل غیریکنواخت در دیواره‌ها می‌باشد، برای افزایش اختلاط بین دو سیال غیرنیوتنی به صورت عددی مدل کردند. در این شبیه‌سازی برای سیال غیرنیوتنی از مدل توانی استفاده شده و جریان اصلی سیال نیز با اعمال گرادیان فشار در طول کانال ایجاد شده است. در واقع تشکیل گردابه‌هایی در

مجاورت سطوح با زتاپتانسیل غیریکنواخت باعث بهبود اختلاط دو جریان شده است.

افضل و کانگ [۲۰] به صورت عددی میدان جریان و اختلاط سیالات غیرنیوتنی در میکروکانال ساده و با پیچ‌وخم را مطالعه کردند. آن‌ها با در نظر گرفتن خون به عنوان سیال غیرنیوتنی، دینامیک جریان و میزان اختلاط را بررسی کرده و به مقایسه این موارد در شرایط یکسان با آب به عنوان یک سیال نیوتنی پرداختند.

یزدی و همکارانش [۲۱] به بررسی عددی فرآیند پخش سیالات غیرنیوتنی در میکرو میکسری Y شکل با مقطع مستطیلی پرداختند. آن‌ها میدان جریان را با ترکیبی از نیروهای فشار و الکترواستاتیک ایجاد کردند و نشان دادند که سیالات غیرنیوتنی مانند خون به طول بیشتری برای اختلاط نسبت به سیالات نیوتنی نیاز دارند، همچنین با کاهش نسبت طول به عرض کانال و کاهش عدد پکلت، فرآیند اختلاط بسیار سریع‌تر صورت می‌گیرد.

در بیشتر تحقیقات صورت گرفته، از میدان الکتریکی نوسانی (AC) برای ایجاد جریان سیال استفاده شده است و توجه کمتری به اختلاط ناشی از جریان الکتروکینتیک توسط میدان الکتریکی مستقیم (DC) شده است. همچنین بیشتر مطالعات انجام‌شده در زمینه اختلاط سیالات غیرنیوتنی در حوزه جریان الکتروکینتیک کلاسیک با بار سطحی ثابت و بررسی هندسه‌های مختلف بر میزان اختلاط بوده است و در حوزه الکتروکینتیک با بار القایی که بار الکتریکی بر روی سطوح رسانا متغیر است، مطالعات کمی صورت گرفته است. در این تحقیق، در ابتدا اختلاط دو جریان سیال نیوتنی در میکرومیکسری با یک جفت مانع رسانای مثلثی متوالی به ازای موقعیت موانع، نسبت ارتفاع موانع به ارتفاع کانال و زاویه مانع مثلثی با استفاده از پارامتر بازده اختلاط مورد مطالعه قرار گرفته است. در نهایت تأثیر قدرت میدان الکتریکی خارجی بر میزان اختلاط نیز بررسی شده است.

در ادامه، اختلاط سیالات غیرنیوتنی با مدل کاریو^{۱۰} در میکروکانال مستطیلی با یک جفت مانع مثلثی رسانا که در میانه‌ی کانال قرار گرفته‌اند و یک مقطع همگرا-واگرا را تشکیل می‌دهند، بررسی شده است. به علت وجود موانع رسانا در کانال، جریان ایجادشده الکتروکینتیک القایی است و گردابه‌هایی در نزدیکی موانع رسانا ایجاد می‌شود. تحقیقات نشان داده است این گردابه‌ها در بهبود میزان اختلاط بسیار مؤثر است. فرآیند ساخت این گونه میکرومیکسرها آسان بوده و مشاهده شده است که مخلوط همگنی با درصد اختلاط بالای ۹۰ درصد در پایین دست جریان تأمین می‌کنند. همچنین با وجود سیستم ساده و عملکرد بالا و دقیقی که دارند، می‌توانند برای اختلاط جریان سیالات غیرنیوتنی به کار گرفته شوند.

۳-۱ مطالعات انجام شده در زمینه‌ی کنترل جریان سیال در میکرو

کانال‌ها

برای تنظیم جریان در میکرو کانال‌ها، معمولاً پمپ‌های غشایی و شیرها استفاده می‌شود. روش تحریک آن‌ها متفاوت است و شامل تحریک پیزوالکتریک، الکترواستاتیک و ترموپنوماتیک است [۲۲]. همچنین تحریک پنوماتیک در وسایل PDMS کاربرد دارد [۲۳]. در تمامی این مکانیزم‌ها نیاز به فناوری‌های پیچیده ساخت، برای ایجاد قسمت‌های متحرک، در سیستم‌های میکرو سیال است. میکرو شیرها، اغلب یکی از مهم‌ترین اجزاء در سیستم‌های میکرو سیال یکپارچه مانند آزمایشگاه روی تراشه هستند. نقش اصلی میکرو شیرها تعویض جهت جریان در زمان دلخواه برای کنترل و تنظیم جریان سیال است. تولید میکرو شیری که قادر به تعویض سریع جهت جریان بدون ایجاد نشتی و حجم ازدست‌رفته سیال باشد بسیار بااهمیت است. امروزه میکرو شیرها را می‌توان به دو گروه از نظر چگونگی فعال‌سازی طبقه‌بندی کرد. میکرو شیرهای فعال که به صورت مکانیکی، غیرمکانیکی و همچنین با استفاده از سیستم‌های خارجی

¹⁰ Carreau Model

فعال‌سازی می‌شوند و میکرو شیرهای منفعل که به‌صورت مکانیکی و غیرمکانیکی راه‌اندازی می‌شوند. در میکرو شیرهای فعال برای انتقال سیال نیاز به نیروی خارجی وجود دارد در صورتی که در میکرو شیرهای منفعل نیاز به فعال‌سازی خارجی نداریم و به‌عنوان مثال سیال با استفاده از ایجاد اختلاف فشار جریان می‌یابد.

در سال ۱۹۷۹ تری و همکارانش [۲۴] اولین میکرو شیر را معرفی کردند که اولین میکرو شیر ماشین‌کاری شده مغناطیسی فعال است. بعد از آن تلاش‌های بسیاری توسط افراد دیگر برای توسعه‌ی این نوع از شیرها انجام گرفت.

بلیک و انجل [۲۵] اولین میکرو شیرهای حرارتی را در سال ۱۹۸۷ معرفی کردند. در این نوع شیرها تغییر شکل غشا از طریق انبساط حجمی با انتقال حرارت ایجاد می‌شود. یک گرم‌کننده در محفظه آب‌بندی شده و یک غشا متحرک که به محفظه متصل است که با گرم شدن گرم‌کننده، سیال موجود در محفظه منبسط شده و باعث تغییر شکل غشا می‌شود.

میکرو شیرهای الکترواستاتیکی با غشا قابل‌انعطاف در سال ۱۹۹۴ توسط ساتو و شیکیدا [۲۶] گزارش شده‌اند. میکرو شیرهای الکتروکینتیکی مشابه میکرو شیرهای الکترواستاتیکی عمل می‌کنند که به‌طور گسترده برای مایعات و ذرات در ریز مجراها قابل استفاده‌اند. اولین کاربرد این‌گونه از شیرها در یک مجرای ریز سیالی به گروهی به رهبری آندریانس مانز [۲۷] نسبت داده شده است. در سال ۱۹۹۳ آن‌ها گزارش دادند که چگونه جریان الکترواستاتیک می‌تواند برای تغییر سریع جریان سیال از یک مجرا به مجرای دیگر در یک سیستم الکتروفورز موئین مورد استفاده قرار گیرد.

هنگامی که مواد درون محلول الکتروولیت آبدار قرار می‌گیرند بار سطحی پیدا می‌کنند و در نزدیک دیواره‌های میکرو مجراها بارهای ناهمنام با بار سطحی تجمع یافته و لایه مضاعف

الکتریکی که شامل بار سطحی دیواره و یون‌های مخالف در مجاورت سطح است، تشکیل می‌شود. این پدیده باعث ایجاد میدان الکتریکی در راستای دیواره می‌شود که حاصل آن حرکت سیال در لایه مضاعف الکتریکی و خارج آن است. همچنین می‌توان با اعمال میدان الکتریکی خارجی جریان را کنترل کرد. البته افزایش میدان الکتریکی خارجی اعمالی محدودیت‌های دمایی و تغییر خواص فیزیکی را به دنبال خواهد داشت.

میکرو شیرالکتروکینتیکی یک طرح ریز سیالی است که عملکرد آن از طریق تنظیم میدان‌های الکتریکی برای بستن و کنترل جریان در میکرو مجرای مورد نظر است. به دلیل سادگی و کنترل آسان، میکرو شیرهای الکتروکینتیکی به صورت گسترده بر روی تراشه‌ها استفاده می‌شوند.

دقیقی و همکارانش [۲۸] یک میکرو شیر با حرکت الکتروکینتیکی یک‌ذره رسانا- نارسانا در محفظه متصل به چند میکرومجر را ساختند.

در جریان الکترواسمتیک، کانال‌ها به لحاظ طراحی و ساخت ساده هستند و نیاز به قطعات مکانیکی از جمله شیرهای مکانیکی نیست اما جریان الکترواسمتیک برای کنترل جریان، می‌تواند پیچیدگی‌های زیادی از جمله نیاز به منابع تغذیه متعدد و تنظیم ولتاژ بر حسب زمان در میان این منابع داشته باشد [۲۹]. به منظور رفع چالش‌های موجود، نوع جدیدی از جریان الکتروکینتیک معرفی می‌شود که آن را الکتروکینتیک با بار القا شده می‌نامند. ویژگی قابل توجه آن، ایجاد جریان‌های چرخشی درون میکرو کانال‌ها است که در اطراف اجسام رسانا با قابلیت قطبی شوندگی بالا تشکیل می‌شوند. جریان سیال توسط میدان الکتریکی خارجی ایجاد می‌شود و پیش‌بینی می‌شود که با ایجاد سطوح رسانا در میکرو کانال‌ها، میدان جریان نامنظم با میکروگردابه ایجاد شود که این چرخش جریان در میکرو کانال می‌تواند روشی برای انسداد جریان سیال باشد.

عملکرد جریان الکتروکینتیک با بار القایی در بهبود اختلاط و همچنین پمپ‌های جریان لایه‌ای توسط اجسام رسانای نامتقارن به صورت تحلیلی توسط اسکيوئر و بازانت [۳۰] بررسی شده است.

در حوزه کنترل جریان سیالات غیرنیوتنی و معرفی میکرو شیرهایی که توسط ایجاد جریان الکتروکینتیک القایی، سیالات غیرنیوتنی را در میکرو کانال‌ها کنترل می‌کنند، تاکنون تحقیقات اندکی صورت گرفته است. در این تحقیق، با ایجاد موانع رسانای مثلثی نامتقارن در میکرو کانال، به وسیله‌ی تنظیم و کنترل میدان الکتریکی اعمال شده و همچنین ابعاد و زوایای موانع، تأثیر جریان الکتروکینتیک القایی بر کنترل جریان سیالات غیرنیوتنی با مدل کاریو مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۱ جنبه‌های نوآوری تحقیق

نوآوری موجود در این تحقیق افزایش بازده اختلاط و کنترل جریان سیالات غیرنیوتنی با مدل کاریو است. در بیشتر کارهای گذشته الکتروکینتیک القایی مربوط به سیالات غیر-نیوتنی، از مدل توانی برای مدل‌سازی سیال غیرنیوتنی استفاده شده است. اما در این پژوهش، مدل کاریو که وابستگی تنش به نرخ برش را به خوبی بیان می‌کند، به کار گرفته شده است. در حوزه کنترل جریان سیالات غیرنیوتنی و معرفی میکرو شیرهایی که توسط ایجاد جریان الکتروکینتیک القایی، سیالات غیرنیوتنی را در میکرو کانال‌ها کنترل می‌کنند، تاکنون تحقیقات اندکی صورت گرفته است. همچنین بیشتر مطالعات انجام شده در زمینه اختلاط سیالات غیر-نیوتنی در حوزه جریان الکتروکینتیک کلاسیک با بار سطحی ثابت و بررسی هندسه‌های مختلف بر میزان اختلاط بوده است و جریان اصلی سیال نیز با اعمال گرادیان فشار در طول کانال ایجاد شده است. از این رو بر روی اختلاط سیالات غیرنیوتنی توسط جریان الکتروکینتیک

القایی که زاپتانسیل بر روی سطوح رسانا متغیر است مطالعات کمی صورت گرفته است. در این تحقیق، با ایجاد موانع رسانای مثلثی نامتقارن در میکرو کانال، با تنظیم و کنترل میدان الکتریکی اعمال شده و همچنین ابعاد و زوایای موانع، تأثیر کنترل جریان الکتروکینتیک القایی بر کنترل جریان سیالات غیرنیوتنی با مدل کاریو مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین اختلاط سیالات نیوتنی در میکرو کانالی با دو مانع رسانای مثلثی متوالی بررسی شده است و اختلاط میکرومیکسر به ازای 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. اختلاط سیالات غیرنیوتنی در میکرو کانال مستطیلی با یک جفت مانع مثلثی رسانا که در میانه‌ی کانال قرار گرفته‌اند، مطالعه شده است. به علت وجود موانع رسانا در کانال، جریان ایجاد شده الکتروکینتیک القایی است و گردابه‌هایی در نزدیکی موانع رسانا ایجاد می‌شود. تحقیقات نشان داده است این گردابه‌ها در بهبود میزان اختلاط بسیار مؤثر است. فرآیند ساخت این گونه میکرومیکسرها آسان بوده و مشاهده شده است که مخلوط همگنی با درصد اختلاط بالای ۹۰ درصد در پایین دست جریان، تأمین می‌کنند.

٢ فصل دوم: الکتروکینتیک کلاسیک و القایی

۱-۲ مقدمه

در این فصل، ابتدا مفهوم لایه‌ی مضاعف الکتریکی و زتاپتانسیل الکتریکی بیان می‌شود. در ادامه پدیده الکتروکینتیک کلاسیک به همراه فرض‌ها و ساده سازی‌های صورت گرفته ارائه می‌شود. سپس به تئوری‌های اساسی در مورد پدیده الکتروکینتیک القایی و ارائه روابط مربوط به آن می‌پردازیم. پدیده الکتروکینتیک با بار القاشده، در مورد جسم رسانای کاملاً قطبی که در معرض میدان الکتریکی خارجی قرار گرفته است، مورد بررسی قرار می‌گیرد و مکانیزم ایجاد گردابه‌های میکرو در اطراف جسم، به علت توزیع غیریکنواخت بارهای سطحی در سطح جسم رسانا، تشریح می‌شود.

۲-۲ زتاپتانسیل و لایه مضاعف الکتریکی

وقتی سطح جسم جامد با محلول الکترولیت در تماس باشد، آن سطح بار الکتریکی را حمل می‌کند. به عنوان مثال، پلاستیک دارای بار الکتریکی منفی و یا شیشه دارای بار الکتریکی مثبت در سطح می‌شود. این بارهای استاتیکی روی سطح جامد یون‌های با بار مخالف را جذب و یون‌های همنام در مایع را دفع می‌کنند. در نتیجه چیدمان یون‌های آزاد محلول الکترولیت تغییر پیدا می‌کند.

بارهای روی سطح و یون‌های مخالف جذب شده در سطح جامد، لایه مضاعف الکتریکی را ایجاد می‌کند. لایه مضاعف الکتریکی پدیده‌ای است که در سطح مشترک مایع- جامد تشکیل می‌شود. لایه مضاعف ساختاری است که تغییرات پتانسیل الکتریکی را در نزدیکی سطوح توصیف می‌کند و تأثیر مهمی بر روی رفتار کلوئیدها و دیگر سطوح مرتبط با محلول‌ها دارد. لایه مضاعف، از دو زیر لایه فشرده^{۱۱} و دیفیوز^{۱۲} تشکیل شده است.

¹¹ Compact layer

¹² Diffuse layer

با قرار گرفتن جسم جامد در محلول الکترولیت، لایه‌ای از یون‌های مخالف فوراً در نزدیکی سطح جامد باردار تشکیل می‌شود و به شدت جسم جامد را احاطه می‌کند. به این لایه که چسبیده به سطح جسم باردار است لایه فشرده گفته می‌شود. در لایه فشرده غلظت یون‌های دارای بار همنام با بار سطح صفر است و این لایه فقط دارای بار الکتریکی ناهمنام با سطح می‌باشد. ذرات موجود در این لایه کاملاً تحت تأثیر نیروی جاذبه سطح قرار دارند و نمی‌توانند حرکت کنند. تا زمانی که بار توده سیال الکترولیت صفر است، اگر از لایه فشرده دور شویم چگالی بار خالص به تدریج از لایه فشرده به سمت توده سیال که از نظر الکتریکی خنثی است، کاهش می‌یابد.

لایه دیفیوز به لایه‌ای که در فاصله‌ی بین لایه فشرده و توده سیال خنثی قرار دارد، گفته می‌شود. در این لایه، اگرچه غلظت یون‌های دارای بار الکتریکی ناهمنام با بار سطح بیشتر است، اما تعدادی از یون‌های همنام با بار سطح نیز وجود دارد. برخلاف یون‌های موجود در لایه فشرده که به سطح جامد محصور شده‌اند یون‌های موجود در لایه دیفیوز متحرک هستند. مرز بین لایه فشرده و لایه دیفیوز به‌عنوان صفحه برشی شناخته می‌شود و پتانسیل الکتریکی بر روی این مرز را زتاپتانسیل می‌نامند. در الکتروکینتیک کلاسیک مقدار زتاپتانسیل به‌عنوان یک مقدار ثابت در نظر گرفته می‌شود. در واقع زتاپتانسیل یک مقدار تقریبی از پتانسیل سطح در اکثر مدل‌های الکتروکینتیک است [۳۱]. زتاپتانسیل را می‌توان از رابطه‌ی زیر محاسبه کرد [۳۲]:

$$\zeta = \frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0 k} \quad 1-2$$

که q بار خالص سطح، ε ثابت دی‌الکتریک محیط، ε_0 ضریب گذردهی خلأ و k^{-1} پارامتر

دیبای هاکل^{۱۳} می باشد.

پارامتر دیبای هاکل از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۳۳]:

$$k^2 = \frac{2z^2 e^2 n_\infty}{\epsilon \epsilon_0 k_b T} \quad ۲-۲$$

در این رابطه، n_∞ غلظت یونی توده سیال، k_b ثابت بولتزمن، e بار الکترون، z ظرفیت شیمیایی و T دمای مطلق است. پارامتر دیبای هاکل، از خواص سطح جامد مستقل بوده و فقط به خواص مایع، مانند ظرفیت شیمیایی الکترولیت و غلظت حجمی یونی وابسته است.

ضخامت لایه مضاعف الکتریکی، که با λ_D نشان می‌دهند، $1/k$ تعریف می‌شود و تابعی از

غلظت الکترولیت است:

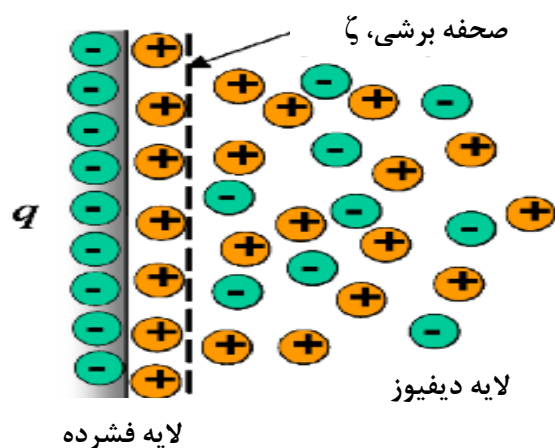
$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0 k_b T}{2z^2 e^2 n_\infty}} \quad ۳-۲$$

فرمول 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 [۳۴].

در شکل ۱-۲ شماتیکی از لایه مضاعف الکتریکی، زتاپتانسیل و صفحه برشی نشان داده

شده است.

¹³ Debye-huckel

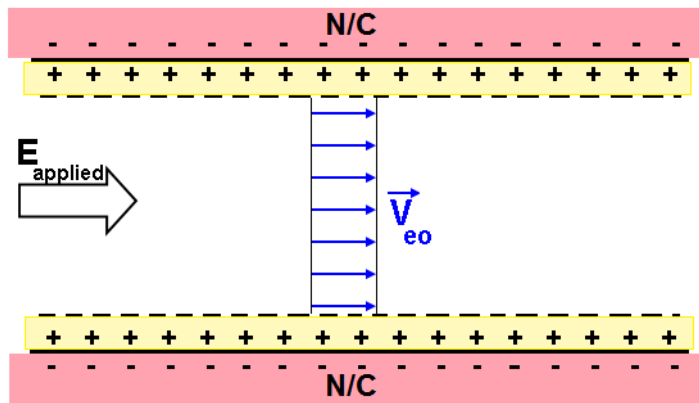


شکل ۱-۲ شماتیک دیاگرام لایه مضاعف الکتریکی، صفحه برشی و زتا پتانسیل [۳۵]

۳-۲ جریان الکترواستاتیک

ذرات موجود در لایه مضاعف الکتریکی، تحت تأثیر دونیروی عمده‌ی پیشران الکتریکی و نیروی مقاوم الکتریکی قرار دارند. وقتی یک میدان الکتریکی خارجی به لایه مضاعف الکتریکی اطراف جسم وارد می‌شود، یون‌های منفی در لایه‌ی مضاعف به سمت طرف مثبت میدان الکتریکی جذب می‌شوند و بالعکس یون‌های مثبت به سمت منفی میدان جذب می‌شوند. یون‌ها با حرکت به سمت یون‌های مختلف علامتشان، مولکول‌های سیال اطرافشان را حرکت داده و در نتیجه توده سیال حرکت می‌کند. این حرکت که نیروی پیشران الکتریکی است را جریان الکترواستاتیک می‌گویند. نیروی مقاوم الکتریکی، همان نیروی جاذبه بین سطح و یون‌های ناهمنام است.

شکل ۲-۲ طرح شماتیکی از جریان الکترواستاتیک در یک کانال با دیواره‌های نارسانا را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲ جریان الکترواستمیک روی یک سطح نارسانا [۳۶]

سرعت لغزشی طبق فرمول هلم هولتز-اسمولوچسکی^{۱۴} [۳۷] محاسبه می‌شود:

$$\vec{u} = -\frac{\zeta \epsilon \epsilon_0}{\mu} \vec{E} = \mu_{eo} \vec{E} \quad ۴-۲$$

که ζ زتاپتانسیل در دیواره‌های کانال، μ لزجت سیال و $\mu_{eo} = -\frac{\zeta \epsilon \epsilon_0}{\mu}$ قابلیت حرکت الکترواستمیک در سیال نامیده می‌شود.

فرمول هلم هولتز-اسمولوچسکی بر اساس فرضیات زیر بنا شده است:

(۱) سطح میکرو کانال یا ذره نارسانا است و لایه مضاعف الکتریکی قابلیت قطبی شدن را ندارد.

(۲) سطح میکرو کانال یا ذره دارای خواص همگن است.

(۳) ضخامت لایه مضاعف الکتریکی در مقایسه با قطر میکرو کانال و یا اندازه‌ی یک ذره زیاد بزرگ نیست ($k \gg 1$).

¹⁴ Holmholtz-Smoluchowski

۲-۴ الکتروکینتیک کلاسیک

همان‌طور که گفته شد، اگر لایه‌ی مضاعف الکتریکی بر روی یک سطح جامد نارسانا و یا یک‌ذره با بار الکتریکی ثابت ایجاد شود، مقدار زتاپتانسیل ثابت خواهد بود که به آن الکتروکینتیک کلاسیک می‌گویند. در الکتروکینتیک کلاسیک، سرعت الکتروکینتیک تا زمانی که زتاپتانسیل سطح تغییر نکند ثابت می‌ماند. سرعت الکترواسمتیک توده‌ی سیال با میدان الکتریکی اعمال‌شده به‌طور خطی متناسب است [۱۵].

در پدیده‌ی الکتروکینتیک کلاسیک، با توجه به اینکه سرعت رابطه‌ی مستقیم با میدان الکتریکی اعمالی دارد، به آن الکتروکینتیک خطی نیز گفته می‌شود.

پدیده الکتروکینتیک به زمان اسمولوچوسکی برمی‌گردد و برای مدل کردن پدیده‌ی الکتروکینتیک، در تئوری الکتروکینتیک کلاسیک، تعدادی از فرضیات در نظر گرفته شده است. در این تئوری محلول مایع به‌عنوان یک الکترولیت رقیق همگن در نظر گرفته شده است که به‌طور یکنواخت باردار شده و دارای سطح نارسانا است. همچنین فرض شده است که میدان الکتریکی یکنواخت بوده، محلول الکترولیت نامحدود، لایه مضاعف الکتریکی نازک و بار موجود بر روی سطح ثابت است. با این فرضیات، سرعت در میدان الکتریکی با جریان مستقیم، خطی است. با این‌وجود، در واقعیت اغلب فرضیات الکتروکینتیک کلاسیک همیشه معتبر نیست و باعث ایجاد خطا در فیزیک اصلی مسئله می‌شود. به‌عنوان مثال، اغلب مواد تا حدودی رسانا بوده و در نتیجه، بار سطحی‌شان ثابت نمی‌باشد. از این‌رو الکتروکینتیک کلاسیک قابلیت مدل‌سازی تمامی پدیده‌های الکتروکینتیک را ندارد. رفع نواقص بیان‌شده در حوزه‌ی الکتروکینتیک کلاسیک باعث پیدایش پدیده‌ی الکتروکینتیک غیرخطی یا الکتروکینتیک القایی شده است. بنا بر تئوری الکتروکینتیک غیرخطی، زمانی که یک سطح رسانا در تماس با یک محلول

الکترولیت قرار می‌گیرد، میدان الکتریکی یک‌بار سطحی را بر روی سطوح رسانا القا می‌کند. از آنجایی که زتاپتانسیل القایی و میدان الکتریکی محلی در طول سطح رسانا تغییر می‌کند سرعت لغزشی حاصل شده نیز غیرخطی خواهد بود [۳۶].

۲-۵ الکتروکینتیک القایی

تفاوت آشکار بین پدیده الکتروکینتیک کلاسیک و القایی در سرمنشأ بارهای سطحی است. در پدیده الکتروکینتیک کلاسیک بار سطحی استاتیک و ثابت است ولی در پدیده الکتروکینتیک القایی بارهای سطح رسانا توسط میدان الکتریکی جابه‌جا می‌شوند، جسم رسانا قطبی شده و بار ثابت نیست.

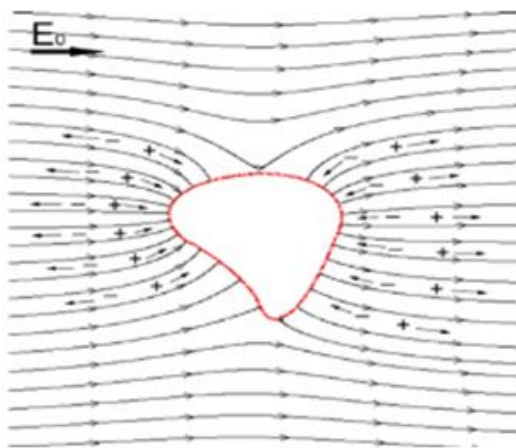
یکی از معادلات بنیادی برای ارزیابی توزیع پتانسیل الکتریکی در یک وسیله‌ی دی‌الکتریک، معادله پواسون است [۳۶].

$$\nabla^2 \phi_e = \frac{\rho_e}{\epsilon_0 \epsilon} \quad 5-2$$

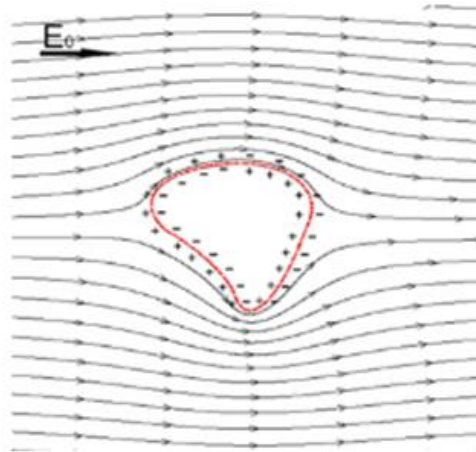
که ρ_e چگالی بار آزاد، ϵ_0 و ϵ به ترتیب ثابت دی‌الکتریک در خلأ و وسیله‌ی انجام کار و ϕ_e توزیع پتانسیل الکتریکی اعمالی است. اگر فرض کنیم که هیچ بار آزادی وجود ندارد (مانند سیال خالص و یا محلول‌های آبدار که از نظر الکتریکی خنثی هستند)، در معادله بالا مقدار ρ_e صفر است و معادله پواسون به معادله لاپلاس تبدیل می‌شود. بنابراین با حل معادله لاپلاس، توزیع پتانسیل الکتریکی اعمال شده ϕ_e در سیال حاصل می‌شود.

$$\nabla^2 \phi_e = 0 \quad 6-2$$

برای روشن شدن اصول و مبانی جریان الکتروکینتیک با بار القاشده، یک مورد ساده در شکل ۲-۳ آورده شده است. در این شکل، یک جسم رسانا با هندسه‌ی دلخواه با سطحی رسانا که به‌طور ایده آل قابلیت قطبی شدن را دارد، در نظر گرفته شده است. این جسم درون یک محلول الکترولیت و تحت یک میدان الکتریکی یکنواخت E_0 معلق می‌باشد.



الف



ب

شکل ۳-۲ شماتیکی از فرآیند باردار شدن یک جسم رسانا در میدان الکتریکی اعمالی یکنواخت [۳۴]:
 الف) میدان الکتریکی اولیه، ب) میدان الکتریکی حالت پایدار

با اعمال میدان الکتریکی به یک دفعه بر روی جسم، یک جریان غیر صفر $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ -یون- های محلول الکترولیت را به سمت سطح جسم رسانا با ضریب رسانایی σ حرکت می‌دهد و خطوط میدان الکتریکی در ابتدا سطح رسانا را در زوایای قائمه قطع می‌کنند (شکل ۳-۲ الف)

جریان، یون‌های مثبت را به درون لایه‌ای نازک در یک سمت سطح رسانا و یون‌های منفی را به سمت دیگر سطح حرکت داده و یک بار سطحی مختلف علامت و مساوی q روی سطوح رسانا القا می‌شود. همچنین بارهای فرضی مساوی و مختلف علامت در اطراف جسم رسانا جذب شده و در نتیجه یک ابر صفحه‌ای دوقطبی در نزدیکی سطح سیال و جامد شکل می‌گیرد (شکل ۳-۲ ب) بار صفحه‌ای القاشده q و زتاپتانسیل القاشده‌ی نظیر آن φ_i با زمان تغییر می‌کند [۳۶] و از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\frac{dq}{dt} = \vec{J} \cdot \vec{r} = \sigma \vec{E} \cdot \vec{r}$$

۷-۲

$$\frac{d\zeta_i}{dt} = \frac{\sigma\lambda_D}{\epsilon_w K} \vec{E} \cdot \vec{r}$$

۸-۲

که λ_D ضخامت لایه مضاعف الکتریکی، ζ_i زتاپتانسیل القاشده و ϵ_w ضریب گذردهی الکتریکی محلول می باشد. به علت وجود ابر بار صفحه‌ای، خطوط میدان الکتریکی به طرف بیرون رانده می شوند و شار یونی به داخل ابر باردار کاهش می یابد. زمانی که جسم رسانا به طور کامل قطبی شود و به حالت پایدار برسد، رسانا مانند یک عایق رفتار می کند. زیرا یک لایه مضاعف الکتریکی القاشده تشکیل می شود و سپس یک میدان الکتریکی پایدار برقرار می شود. همان طور که گفته شد اگر چگالی بار آزاد صفر باشد، در این صورت، پتانسیل الکتریکی اعمالی خارجی در حالت پایدار توسط معادله لاپلاس $\nabla^2 \phi_e = 0$ به دست می آید. زمان باردارشدن تا رسیدن به میدان پایدار برای یک جسم رسانا با قابلیت قطبی شونده‌ی بالا بسیار کم است (از مرتبه‌ی 10^{-4} ثانیه که قابل چشم پوشی است).

با توجه به معادلات بالا، زتاپتانسیل القایی در حالت پایدار با میدان الکتریکی \vec{E} تناسب است و روی سطح رسانا از یک مکان به مکان دیگر تغییر می کند. برای یک هندسه ساده و منتظم، حل دقیق در حالت پایدار برای زتاپتانسیل القایی وجود دارد. فرمول تحلیلی دقیقی برای زتاپتانسیل القاشده بر روی سطح یک استوانه‌ی دایروی دوعدی ارائه شده است [۳۲] که توسط رابطه‌ی زیر به دست می آید:

$$\zeta_i(\theta) = 2E_0 a \cos \theta$$

۹-۲

که θ مختصات زاویه‌ای، a شعاع سیلندر و E_0 میدان الکتریکی اعمالی است.

با این وجود برای یک سطح با شکل نامنتظم و یا پیچیده، حل تحلیلی ساده‌ای برای توزیع زتاپتانسیل القاشده وجود ندارد؛ بنابراین نیاز به یک حل عددی برای یافتن ارتباط بین

زتا پتانسیل القایی و میدان الکتریکی خارجی است.

برای تعیین عددی زتا پتانسیل القایی ζ_i در حالت پایدار، فرض‌های زیر را در نظر می‌گیریم:

گیریم:

✓ ابر القایی که یک میدان الکتریکی محلی القا می‌کند، به‌عنوان یک پوسته‌ی عایق در اطراف سطح عمل می‌کند و خطوط میدان الکتریکی اعمالی محلی نمی‌توانند سطح را قطع کنند؛ بنابراین مقدار میدان الکتریکی القاشده E_i روی سطح رسانا باید دارای مقداری برابر با مقدار میدان الکتریکی خارجی اعمالی E_e باشد.

$$|E_i| = |E_e| \quad 10-2$$

✓ به این دلیل که بارهای فرضی در رسانا دارای علامت مخالف با یون‌های جذب شده از سیال در سطح رسانا می‌باشند، میدان الکتریکی القاشده بر روی سطح مشترک بین سیال و رسانا باید در جهت مخالف با میدان الکتریکی خارجی اعمالی باشد

$$E_i = -E_e \quad 11-2$$

در نتیجه:

$$\nabla \zeta_i = -\nabla \phi_e \quad 12-2$$

ϕ_e پتانسیل الکتریکی خارجی محلی اعمال شده بوده که توسط معادله ۶-۲ به

دست می‌آید.

✓ فرض می‌کنیم که موانع رسانا در ابتدا بدون بار هستند. انتگرال بار القاشده بر روی تمامی سطح رسانا باید صفر باشد که علت آن خنثی بودن الکتریکی سطح در ابتدا می‌باشد. بنابراین از رابطه‌ی خطی بین بار سطح و زتا پتانسیل $\zeta = \frac{q}{\epsilon_w k}$ انتگرال

زتا پتانسیل القا شده در اطراف سطح رسانا برابر صفر می‌شود [۳۴].

$$\oint_S \zeta_i \cdot dA = 0 \quad ۱۳-۲$$

که A سطح رسانا در میدان الکتریکی اعمال شده می‌باشد.

اگر سطح رسانا در ابتدا دارای بار الکتریکی باشد توزیع زتا پتانسیل حالت پایدار نهایی به سادگی به صورت مجموع زتا پتانسیل در حالت سکون اولیه $\zeta(t=0) = \zeta_0$ و زتا پتانسیل القا شده ζ_i می‌باشد. در اینجا بار اولیه سطح جسم رسانا صفر در نظر گرفته می‌شود.

اگر ما بر روی نمونه‌هایی با لایه مضاعف الکتریکی نازک و عدد دوخین^{۱۵} خیلی کوچک‌تر از یک ($Du \ll 1$) تمرکز کنیم، رسانایی سطح در مقابل رسانایی الکتریکی توده‌ی سیال کوچک و قابل صرف نظر کردن می‌باشد و همچنین اگر هیچ واکنش الکتروشیمیایی در سطح مشترک مایع و جسم رسانا وجود نداشته باشد، آنگاه شرایط فوق برقرار است.

بر مبنای تحقیقات گذشته [۳۸]، یک روش اصلاحی ساده برای تخمین عددی توزیع زتا پتانسیل القایی بر روی سطوح رسانا یعنی ζ_i ، می‌توان پیشنهاد کرد:

$$\zeta_i = -\phi_e + \phi_c \quad ۱۴-۲$$

که در آن ϕ_c پتانسیل اصلاحی ثابت می‌باشد. با جایگذاری معادله ۱۴-۲ در معادله‌ی ۲-۲ می‌توانیم مقدار پتانسیل اصلاحی را محاسبه کنیم.

$$\phi_c = \frac{\oint_S \phi_e \cdot dA}{A} \quad ۱۵-۲$$

که در آن A مساحت کلی جسم رسانا می‌باشد. در فرمول عددی معادله‌ی ۱۴-۲ تمامی

¹⁵ Dukhin Number

سه شرط گفته شده، در نظر گرفته شده است.

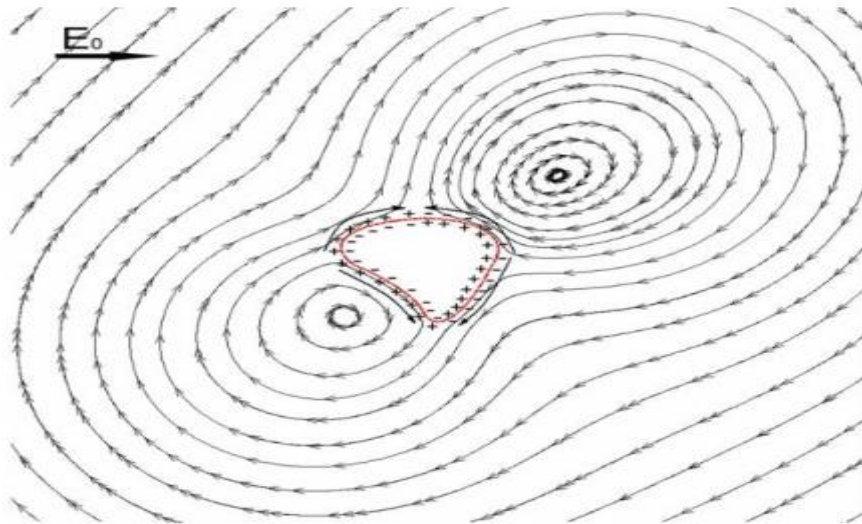
معادلات ۱۴-۲ و ۱۵-۲ یک روش عددی ساده و سریع برای محاسبه‌ی توزیع زتاپتانسیل القایی در حالت پایدار نهایی بر روی سطوح رسانا با هندسه‌های مختلف را نشان می‌دهد.

زمانی که یک لایه الکتریکی مضاعف القایی تشکیل می‌شود، میدان الکتریکی خارجی اعمالی یک نیروی حجمی بر روی یون‌ها در ابر باردار در سیال وارد می‌کنند که یون‌ها و سیال را به حرکت درمی‌آورند. جریان الکتروکینتیک حاصل شده در خارج از لایه‌ی مضاعف با ضخامت D ، جریان لغزشی بر روی دیواره ایجاد می‌کند که این سرعت به تناسب با مؤلفه‌ی مماسی میدان الکتریکی $E_{||}$ تغییر می‌کند و توسط فرمول هلم هولتز-اسملوچوفسکی [۳۷] محاسبه می‌شود.

$$U = -\frac{\varepsilon \varepsilon_0}{\mu} E_{||} \zeta_i \quad ۱۶-۲$$

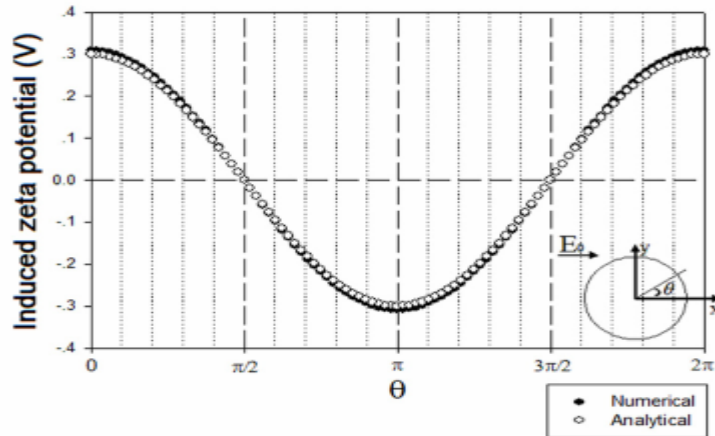
یادآوری می‌شود که با در نظر گرفتن وابستگی زتاپتانسیل محلی ζ_i به میدان الکتریکی محلی E ، سرعت جریان الکتروکینتیک القایی به‌طور غیرخطی به میدان الکتریکی اعمالی وابسته است.

توزیع غیرخطی زتاپتانسیل که در نتیجه‌ی تماس سطوح با محلول الکترولیت است، سرعت‌های لغزشی متفاوتی را روی سطوح رسانا ایجاد می‌کند که به دنبال آن ریزگردابه‌هایی در سیال ایجاد می‌شود. تولید گردابه‌ها اطراف سطح رسانا در شکل ۲-۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، جریان حاصل شده در گردابه نزدیک سطح مشترک سیال و جامد غیریکنواخت است.



شکل ۲-۴ میدان جریان الکتروکینتیک با بار القایی در اطراف یک جسم رسانا [۳۴]

شکل ۲-۵، زتاپتانسیل القایی بر روی یک سطح استوانه‌ای رسانا را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای یک استوانه دوبعدی، طرح عددی توسط مقایسه با فرمول تحلیلی معادله ۲-۹ تأیید شده است.

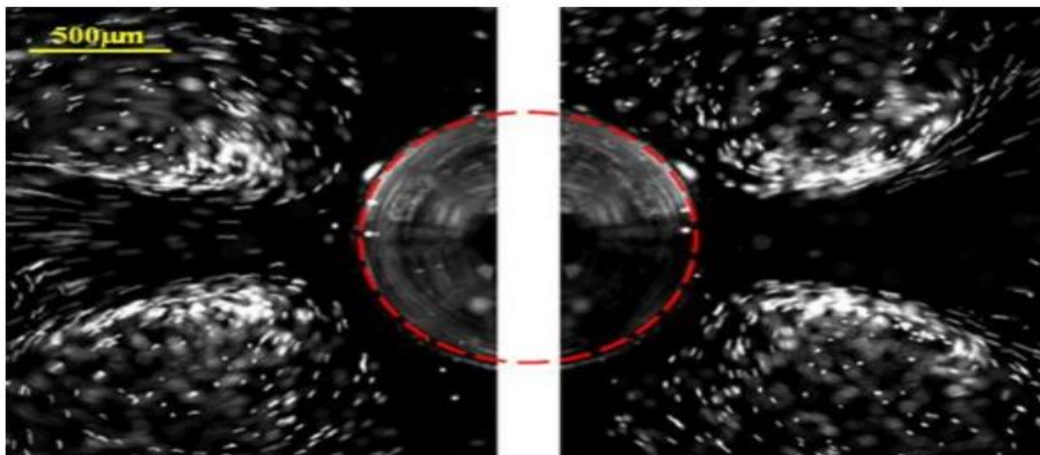


شکل ۲-۵ توزیع زتاپتانسیل القایی اطراف سطح استوانه‌ای دایروی رسانا [۳۴]

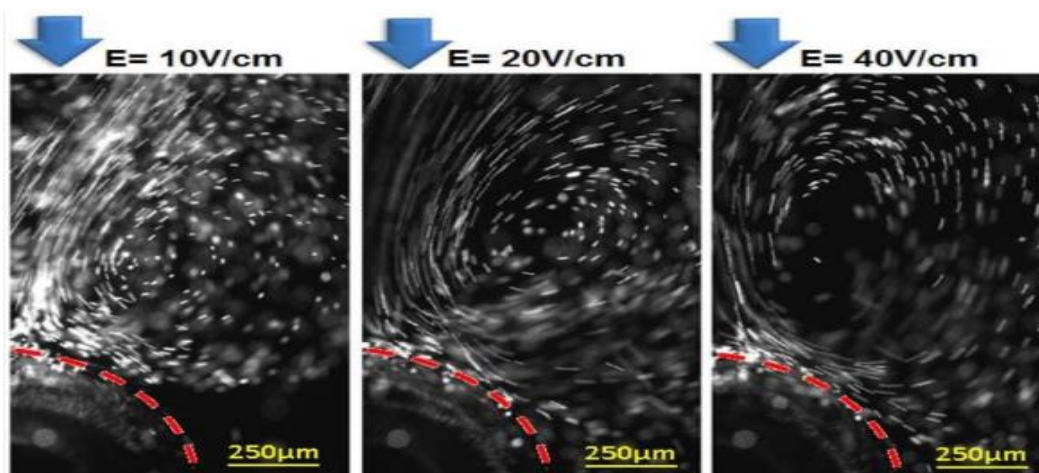
دقیقی [۳۶] در آزمایشگاه، چهار گردابه اطراف ذره‌ی کرومی رسانا و غوطه‌ور در محلول الکترولیت که میدان الکتریکی مستقیم یک‌دفعه به آن اعمال می‌شود را مشاهده و ثبت کرد. (شکل ۲-۶ و ۲-۷) این گردابه‌ها از سرعت‌های لغزشی متفاوت که ناشی از توزیع زتاپتانسیل

متغییر روی سطوح رسانا است ایجاد می‌شود. این مشاهدات آزمایشگاهی، یافته‌های تئوری را در مورد پدیده‌ی الکتروکینتیک القایی تأیید می‌کند.

شکل ۲-۷، گردابه‌های ایجادشده در اطراف ذره تحت میدان‌های الکتریکی مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش قدرت میدان الکتریکی اعمالی میزان چرخش جریان بیشتر شده است.



شکل ۲-۶ ذرات فلئورسنت برای آشکارسازی الگوی جریان الکتروکینتیک القایی اطراف کره کربن-فولاد، خط‌چین مرز ذره را نشان می‌دهد [۳۶].



شکل ۲-۷ توزیع گردابه‌ها اطراف ذره تحت میدان‌های الکتریکی مختلف. نقاط خط‌چین مرز ذره هستند. تصاویر توسط میکروسکوپ نیکون در ۱۰ ثانیه گرفته شده است [۳۶].

۳ فصل سوم: مدل سازی عددی جریان سیال و

معادلات حاکم

۳-۱ مقدمه

در فصل ۲ پدیده‌های الکتروکینتیک با بار القایی و خصوصیات آن را معرفی کردیم. در این فصل معادلات حاکم که برای شبیه‌سازی عددی جریان الکتروکینتیک القایی و میدان غلظت موردنیاز است شرح داده می‌شود. از آنجا که بیشتر پژوهش‌های انجام‌گرفته بر اساس سیال نیوتنی بوده است، در کار حاضر با در نظر گرفتن سیال غیرنیوتنی با ویژگی نازک شوندگی^{۱۶} و مدل کاریو اختلاط جریان سیال بررسی شده است. هدف از مطالعه تأثیر تغییرات ولتاژ و پارامترهای سیال غیرنیوتنی بر میزان اختلاط می‌باشد. همچنین با استفاده از یک جفت مانع نامتقارن در میکرو کانال و تنظیم قدرت میدان الکتریکی اعمالی در درون کانال جریان سیال کنترل شده است. کنترل جریان در زوایای مختلف از موانع و پارامتر غیرنیوتنی مختلف n نیز موردبررسی قرارگرفته است. مدل‌سازی خواص رئولوژیکی سیال با توجه به درصد اهمیت بالای تنش برشی، نقش تعیین‌کننده‌ای را ایفا می‌کند که ما با در نظر گرفتن مدل کاریو برای بیان رفتار غیرنیوتنی سیال، به تأثیر این مدل از سیال غیرنیوتنی بر فاکتور میزان اختلاط و کنترل جریان می‌پردازیم. مدل کاریو برخلاف مدل توانی که در آهنگ‌های برش کم و زیاد کارایی خود را از دست می‌دهد به‌خوبی رفتار سیال غیرنیوتنی را پیش‌بینی می‌کند. همچنین مدل کاریو محدوده بزرگی از نرخ برش را پشتیبانی می‌کند.

تفاوت اصلی این کار با پژوهش‌های گذشته، ایجاد جریان الکتروکینتیک القایی در میکرو کانال با موانع رسانا و بررسی رفتار سیالات غیرنیوتنی بر میزان اختلاط و کنترل جریان سیال در میکرو کانال است. جریان الکتروکینتیک القایی با ایجاد گردابه‌هایی در اطراف موانع رسانا می‌تواند در بهبود اختلاط جریان مؤثر باشد.

همچنین اثر کنترل جریان می‌تواند در رسیدن به دبی‌های مختلف جریان در جهات

¹⁶ Shear thinning

گوناگون و همچنین حالت شیر بسته (دبی جریان صفر) مورد استفاده قرار گیرد.

۲-۳ سیالات غیرنیوتنی

با گسترش روزافزون مواد مورد استفاده در صنایع گوناگون سیالاتی ظهور کردند که خواص آن‌ها با توجه به خواص سیالات نیوتنی قابل تفسیر نبود و به همین خاطر به مواد غیر-نیوتنی معروف شدند. مثال‌های متعددی از موادی که خواص غیرنیوتنی از خود بروز می‌دهند، وجود دارد که از آن جمله می‌توان به مذاب‌های پلیمری، جریان‌های بیولوژیکی (مثل خون) و غیره اشاره کرد. معمولاً سیالات غیرنیوتنی را در سه دسته‌ی کلی زیر تقسیم‌بندی می‌کنند:

(۱) موادی که در آن‌ها نرخ برش تنها تابعی از مقادیر فعلی تنش برشی است (و برعکس). این مواد اکثراً به‌عنوان سیالات نیوتنی تعمیم‌یافته و یا مستقل از زمان شناخته می‌شوند.

(۲) مواد پیچیده‌تری که در آن‌ها رابطه بین تنش برشی و نرخ برش تابعی از مدت‌زمان برش نیز است. این مواد به‌عنوان سیستم‌های وابسته به زمان شناخته می‌شوند.

(۳) موادی که ترکیبی از خواص جامد الاستیک و سیال ویسکوز را از خود نشان می‌دهند که به سیالات ویسکو الاستیک معروف هستند.

این تقسیم‌بندی کاملاً اختیاری بوده و اکثر مواد واقعی ترکیبی از دو و یا حتی همه خواص غیرنیوتنی بالا از خود بروز می‌دهند.

۱-۲-۳ رفتارهای مستقل از زمان

خواص سیالات غیرنیوتنی مستقل از زمان، تحت برش ساده می‌تواند به صورت:

$$T_{\lambda y} = f(\dot{\gamma}_{\lambda y}) \quad 1-3$$

بیان شود که T تنش برشی و $\dot{\gamma}$ نرخ برش می‌باشد. این معادله بیان می‌کند که نرخ برش در هر نقطه داخل سیال تحت برش، تنها توسط مقادیر فعلی تنش برشی در آن نقطه معین می‌شود. بسته به نوع معادله ۱-۳ این سیالات می‌توانند به سه زیرگروه رقیق برشی یا شبه پلاستیک، ویسکو پلاستیک و ضخیم برشی تقسیم شوند. در ادامه به توضیح کامل‌تر در خصوص یکی از سیالات غیرنیوتنی رقیق برشی خواهیم پرداخت. شکی نیست که سیال رقیق برشی معمول‌ترین نوع خواص در سیالات مستقل از زمان است. مواد رقیق برشی به‌وسیله‌ی یک لزجت ظاهری (حاصل تقسیم تنش برشی بر نرخ برش) که با افزایش نرخ برش، کاهش می‌یابد، مشخص می‌شوند. واضح است که نرخ کاهش لزجت ظاهری برای هر سیال متفاوت است.

۲-۲-۳ مدل سیال غیرنیوتنی کاریو

در این پژوهش، برای مدل کردن لزجت از مدل غیرنیوتنی کاریو استفاده شده است. تابع ویسکومتریک لزجت برای این مدل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu = \mu_{inf} + (\mu_0 - \mu_{inf}) \left[1 + (\lambda \dot{\gamma})^2 \right]^{\frac{n-1}{2}} \quad 2-3$$

در این معادله، μ_0 و μ_{inf} به ترتیب لزجت در نرخ برش بی‌نهایت و لزجت در نرخ برش صفر، λ و n به ترتیب ثابت زمانی و توان نمایی مدل هستند. $\dot{\gamma}$ نرخ برش تعمیم‌یافته نام دارد که به‌صورت مانای دوم^{۱۷} تانسور نرخ برش تعریف می‌شود.

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2} \text{II}} = \sqrt{1/2 \text{tr}(\dot{\gamma} \cdot \dot{\gamma})} \quad 3-3$$

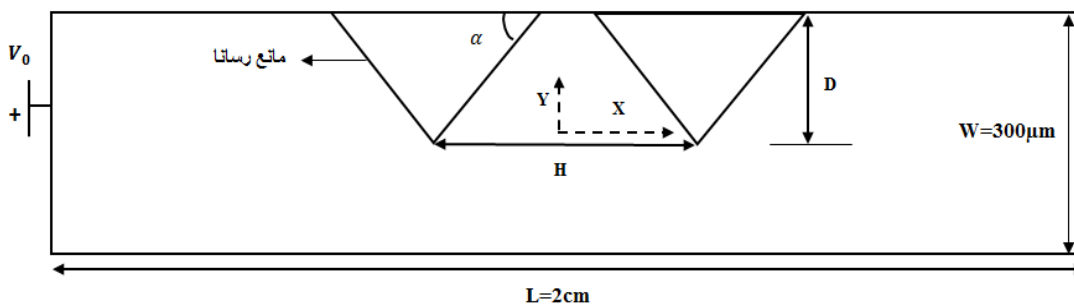
۳-۳ ویژگی‌های فیزیکی و ابعاد میکرو کانال

همان‌طور که در فصل ۲ بیان شده است، هدف ما در پژوهش حاضر را می‌توان به دو

¹⁷ Second invariant

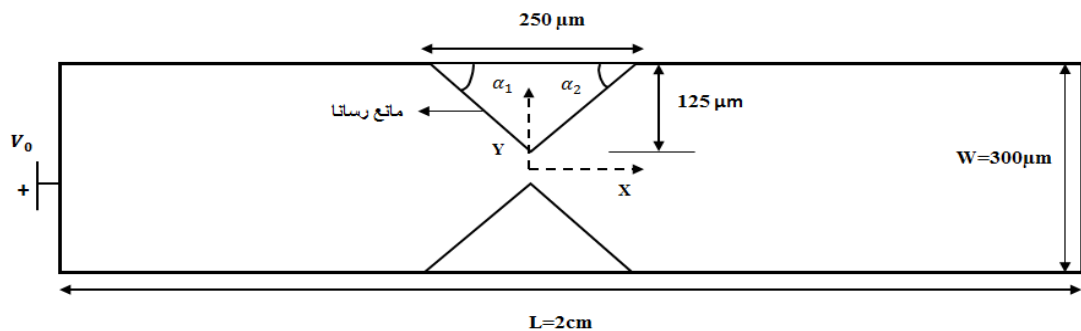
قسمت تقسیم‌بندی کرد. قسمت اول، بررسی اختلاط سیالات با روش الکتروکینتیک القایی در مقیاس میکرو را شامل می‌شود. در این قسمت، دو گروه از سیالات یعنی سیالات نیوتنی و غیر-نیوتنی با مدل کاریو مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در قسمت دوم از پژوهش به بررسی کنترل جریان سیالات غیرنیوتنی با مدل کاریو در میکرو کانالی با موانع نامتقارن پرداخته می‌شود.

هندسه‌ی مورد مطالعه در این پژوهش، میکرو کانالی مستطیلی با یک جفت مانع مثلثی رسانا می‌باشد. مسئله‌ی حاضر به صورت دوبعدی در دستگاه مختصات دکارتی مدل شده است. اختلاط سیالات نیوتنی در یک میکرو کانال با دو مانع مثلثی رسانا که موانع به صورت متوالی در کانال قرار گرفته‌اند، بررسی شده است. هندسه کانال به صورت شماتیک در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. اثر نسبت 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 میکرومیکسر با بازده بالاتر برای اختلاط سیالات نیوتنی (در مقایسه با موانع با بار ثابت) ارائه گردیده است.



شکل ۱-۳ شماتیک هندسه مسئله در اختلاط سیالات نیوتنی

در مورد بررسی اختلاط سیالات غیرنیوتنی و همچنین قسمت دوم پژوهش یعنی مطالعه‌ی کنترل جریان سیالات غیرنیوتنی از هندسه‌ی میکرو کانال طراحی شده توسط وو و لی [۱۵] استفاده شده که به صورت شماتیک در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.



شکل ۲-۳ شماتیک هندسه مسئله در بررسی اختلاط و کنترل جریان سیالات غیرنیوتنی

مطابق شکل‌های بالا کانال دارای عرض $300 \mu\text{m}$ و طول 2 cm می‌باشد. به علت تأثیر دیواره‌های بالا و پایین کانال مسئله سه‌بعدی است اما چون دیواره‌های نارسانای کانال دارای زتاپتانسیل ثابت و مشابه هستند و همگن می‌باشند، این دیواره‌ها تأثیری بر روی جریان الکترواسمیتیک در نواحی کانال اصلی نخواهند داشت. در قسمتی از تحقیق که مربوط به سیال غیرنیوتنی است، اندازه و موقعیت قرارگیری موانع در کانال طبق مقاله‌ی وو و لی در نظر گرفته شده است. موانع دارای دو زاویه α_1 و α_2 مطابق شکل هستند و در وسط کانال قرار گرفته‌اند (شکل ۲-۳). اختلاط جریان سیال در شرایطی که دو زاویه یکسان و مساوی 45° درجه باشند، به ازای قدرت میدان الکتریکی خارجی و پارامتر غیرنیوتنی n مختلف بررسی شده است. دو مانع موجود در کانال دارای ابعاد یکسان هستند بطوریکه دو مثلث متساوی‌الساقین با ارتفاع $125 \mu\text{m}$ و قاعده‌ی $250 \mu\text{m}$ را تشکیل می‌دهند و فاصله‌ی بین مانع بالا و پایین $50 \mu\text{m}$ است. همچنین برای بررسی اثر قدرت میدان الکتریکی خارجی و پارامتر غیرنیوتنی n بر روی کنترل جریان در میکرو کانال، زاویه α_1 ثابت و 45° درجه در نظر گرفته شده و α_2 متغیر است. قابل ذکر است که در این وضعیت نیز ارتفاع موانع $125 \mu\text{m}$ خواهد بود، به طوری که فاصله‌ی بین دو مانع بالایی و پایینی $50 \mu\text{m}$ باقی خواهد ماند.

در نواحی با موانع رسنا، جریان ایجاد شده در اثر بار القایی است. علت آن است که زتاپتانسیل بر روی سطوح رسنا بزرگ‌تر از زتاپتانسیل بر روی دیواره‌های غیررسانای بالا و پایین کانال می‌باشد.

بنابراین برای بررسی تأثیرات بار القایی در صفحه‌ی $x-y$ ، مسئله مطابق شکل ۳-۱ و شکل ۳-۲ به‌عنوان مدل دوبعدی ساده می‌شود که هیچ تأثیری بر روی نتایج در حوزه کنترل و اختلاط جریان نخواهد داشت. دو سر میکرو کانال به دو منبع که حاوی سیال الکترولیت می‌باشد متصل شده و الکترودها در منبع‌های موجود قرار داده شده‌اند. میدان الکتریکی به یک‌دفعه اعمال می‌شود، موانع رسانا فوراً قطبی می‌شوند و میدان الکتریکی به حالت پایدار می‌رسد.

۳-۴ روابط و معادلات حاکم

هنگامی که میدان الکتریکی به دو سر میکرو کانال اعمال می‌شود، بر روی بارهای خالص موجود در درون لایه مضاعف، نیروی الکتریکی وارد می‌شود. حرکت این بارها، سیال واقع در نزدیکی آن را نیز حرکت می‌دهد و جریان الکترواسمتیک ایجاد می‌شود. علت تشکیل جریان الکترواسمتیک آن است که بارهای خالص محلی بر روی سطوح موانع رسانا به‌صورت غیریکنواخت توزیع شده‌اند و در بالادست و پایین‌دست جریان مختلف‌العلامت هستند؛ بنابراین حرکت سیال نیز غیریکنواخت و در جهات مخالف است که باعث ایجاد گردابه‌هایی در نزدیکی موانع می‌شود. جریان ایجادشده در کانال شامل یک سرعت لغزشی بر روی دیواره‌ها نیز می‌باشد. این سرعت لغزشی به عواملی چون زتاپتانسیل بر روی دیواره‌ها، میدان الکتریکی اعمال شده، ضریب گذردهی و لزجت سیال وابسته می‌باشد. مقدار زتاپتانسیل بر روی دیواره‌های نارسانا نیز دارای مقدار بسیار کمتری نسبت به مقدار آن بر روی دیواره‌های رسانا می‌باشد و یک تغییر بسیار بزرگ در مقدار زتاپتانسیل از دیواره‌های نارسانا به دیواره‌های رسانا داریم. همچنین توزیع زتاپتانسیل بر روی دیواره‌های نارسانا ثابت بوده و اما این توزیع بر روی دیواره‌های رسانا متغیر است. در ادامه به تشریح معادلات حاکم و شرایط مرزی مربوطه می‌پردازیم.

۳-۴-۱ میدان الکتریکی جریان مستقیم

برای محاسبه توزیع پتانسیل الکتریکی ϕ_e در محیط‌های دی‌الکتریک، همان‌طور که در فصل ۲ گفته شد از معادله ۲-۵ که معادله‌ی پواسون گفته می‌شود، کمک گرفته می‌شود.

اگر فرض کنیم که هیچ بار آزادی وجود ندارد، یعنی در معادله پواسون مقدار ρ_e صفر باشد، معادله پواسون به معادله لاپلاس (معادله‌ی ۲-۶) تبدیل می‌شود و بنابراین با حل معادله لاپلاس، توزیع پتانسیل الکتریکی اعمال شده ϕ_e در سیال حاصل می‌شود. شرایط مرزی حاکم برای حل معادله لاپلاس، به‌صورت زیر می‌باشد.

در ورودی کانال:

$$\phi_e = V_0 \quad 3-4$$

در خروجی کانال:

$$\phi_e = V_{out} \quad 3-5$$

در دیواره‌های کانال:

$$\vec{n} \cdot \overline{\nabla \phi_e} = 0 \quad 3-6$$

که n بردار نرمال یکه در سیال است. قابل ذکر است که برای حل معادله لاپلاس با شرایط مرزی فوق، فرض می‌شود که دیواره‌های رسانای کانال به‌سرعت و به‌طور کامل قطبی شده‌اند و می‌توان از این زمان کوتاه صرف‌نظر کرد. درنهایت هنگامی که جسم کاملاً قطبی شده و به وضعیت پایداری برسد مانند یک جسم نارسانا رفتار خواهد کرد، زیرا نفوذ یون‌ها به درون جسم متوقف و میدان الکتریکی دائم شده است.

۳-۴-۲ معادلات حاکم بر میدان جریان سیال

در قسمت مطالعه‌ی سیال غیرنیوتنی، سیالی تراکم ناپذیر و غیرنیوتنی که به‌طور پیوسته

در میکرو کانال جریان دارد در نظر گرفته می‌شود. معادله‌ی پیوستگی، معادله‌ی مومنوم و تابع لزجت سیال غیرنیوتنی با مدل کاریو معادلات حاکم هستند که برای داشتن توزیع جریان در میکرو کانال باید حل شوند. قابل ذکر است که در قسمت بررسی اختلاط سیال نیوتنی، تمامی شرایط مطابق معادلات و روابط بیان شده برای سیال غیرنیوتنی می‌باشد، با این تفاوت که لزجت ثابت و برابر با مقدار $\mu = 0.01 \frac{kg}{m.s}$ و چگالی سیال $\rho = 998 \frac{kg}{m^3}$ در نظر گرفته شده است.

معادله پیوستگی:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{U} = 0 \quad 7-3$$

معادله مومنوم:

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{U} \nabla \vec{U} \right] = -\vec{\nabla} P + \mu \nabla^2 \vec{U} + \vec{E} \rho_e \quad 8-3$$

معادله لزجت سیال غیرنیوتنی با مدل کاریو:

$$\mu = \mu_{inf} + (\mu_0 - \mu_{inf}) \left[1 + (\lambda \dot{\gamma})^2 \right]^{\frac{n-1}{2}} \quad 9-3$$

که در آن U سرعت سیال، μ و ρ به ترتیب لزجت و چگالی سیال، \vec{E} و ρ_e به ترتیب قدرت میدان الکتریکی و چگالی بار خالص محلی و $\vec{\nabla} P$ گرادیان فشار در کانال می‌باشد.

مدل مدنظر در این مطالعه، مستقل از زمان است و در نتیجه از بخش گذرا در معادله مومنوم می‌توان صرف نظر کرد.

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 میکرو کانال (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 در فصل دوم به طور کامل توضیح داده شده است. در تحقیق حاضر از دیدگاه دوم استفاده شده است.

شرط مرزی سرعت برای دیواره‌های نارسانا کانال:

$$\vec{U}_{slip(N.C)} = \frac{-\varepsilon_0 \varepsilon \zeta}{\mu} \vec{E} \quad 10-3$$

شرط مرزی سرعت برای دیواره‌های رسانا کانال:

$$\vec{U}_{slip(C)} = \frac{-\varepsilon_0 \varepsilon \zeta_{induced}}{\mu} \vec{E} \quad 11-3$$

که $E = -\vec{\nabla}\phi_e$ قدرت میدان الکتریکی محلی اعمالی است که توزیع آن از معادله‌ی لاپلاس به دست می‌آید. دقت شود که در مورد دیواره‌های نارسانا، ζ زتاپتانسیل ثابت است اما در مورد موانع رسانا $\zeta_{induced}$ زتاپتانسیل القایی بوده و نسبت به مکان متغیر است.

در این تحقیق، جریان با استفاده از نیروی الکتریکی (الکتروکینتیک) ایجاد می‌شود و گرادیان فشار وجود ندارد. همچنین شاری از دیواره‌های کانال عبور نمی‌کند ($n \cdot \nabla P = 0$).

شرط مرزی در ورودی و خروجی کانال:

$$P = 0 \quad 12-3$$

قابل ذکر است که طول کانال میکرو به اندازه کافی بلند در نظر گرفته می‌شود به طوری که شرایط ابتدا و انتهای هیچ تأثیری بر روی میدان جریان در نزدیکی موانع ندارد.

۳-۴-۳ میدان غلظت

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

$$\nabla \cdot (-D_i \nabla C_i) = R_i - U \cdot \nabla C_i \quad i=1, \dots, n \quad ۱۳-۳$$

نشان داده می‌شود. C_i غلظت در خط جریان i ام سیال ورودی و D_i ضریب پخش ذرات^{۱۸}، U سرعت جریان و R_i ضریب واکنش است. مقدار سرعت در جهت x و y از حل معادلات مومنوم جایگزین می‌شود. در این مسئله واکنشی صورت نمی‌گیرد و مقدار ضریب R_i صفر است. شرایط مرزی مربوط به میدان غلظت در زیر آورده شده است.

در ورودی‌های کانال:

$$C_i = C_0 \quad ۱۴-۳$$

در خروجی کانال:

$$n \cdot (-D_i \nabla C_i) = 0 \quad ۱۵-۳$$

در تمامی دیواره‌ها:

$$-n \cdot (-D \nabla C_i + U C_i) = 0 \quad ۱۶-۳$$

معادله‌ی ۱۶-۳، نشان‌دهنده‌ی عدم شار جرمی از سطوح دیواره‌های کانال می‌باشد.

۳-۵ مدل‌سازی میدان الکتریکی و میدان جریان

برای مدل‌سازی میدان جریان، ابتدا در نرم‌افزار، میدان الکتریکی را در قسمت میدان رسانا جریان مستقیم مدل می‌کنیم. برای مدل‌سازی میدان الکتریکی باید شرط مرزی را در

¹⁸ Diffusion coefficient of species

ورودی و خروجی بر روی پتانسیل الکتریکی^{۱۹} قرار دهیم. در مرز ورودی ولتاژی که مدنظر است تا در طول کانال برقرار شود اعمال می‌کنیم. در این مطالعه، برای بررسی میزان اختلاط سیالات غیر نیوتنی، پتانسیل الکتریکی در دو مقدار $12/5V/cm$ و $17V/cm$ و در مورد سیالات نیوتنی مقادیر $25V/cm$ ، $50V/cm$ و $100V/cm$ در طول کانال ایجاد شده است. همچنین در بحث کنترل جریان، برای یافتن ولتاژ بحرانی، پتانسیل الکتریکی متعددی به ورودی کانال اعمال شده است که در فصل ۵ به تفصیل توضیح داده می‌شود. در مرز خروجی نیز شرط مرزی را بر روی پتانسیل الکتریکی قرار داده و مقدار آن را صفر ولت قرار می‌دهیم. بدین صورت اختلاف ولتاژ در طول میکرو کانال اعمال شده است. ولتاژ خارجی اعمالی زیر $100V/cm$ می‌باشد زیرا در ولتاژهای بالاتر از این مقدار، در واقعیت محلول الکترولیت یونیزه می‌شود.

ولتاژ اعمال شده در ورودی کانال برای سیال غیرنیوتنی:

$$V_0 = 25,34 V \quad 17-3$$

ولتاژ اعمال شده در ورودی کانال برای سیال نیوتنی:

$$V_0 = 50,100,200 V \quad 18-3$$

ولتاژ اعمال شده در خروجی کانال:

$$V_{out} = 0 V \quad 19-3$$

شرط مرزی در بقیه مرزها از جمله رسانا و غیررسانا، به‌غیر از مرزهای ورودی و خروجی

کانال را بر روی عایق الکتریکی^{۲۰} قرار می‌دهیم.

نکته‌ی قابل توجه این است که میدان الکتریکی اعمال شده در طول کانال به صورت

رابطه‌ی $E = \frac{\nabla V}{L} = \frac{V_{out}-V_0}{L}$ محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه طول کانال 2cm است،

¹⁹ Electric Potential

²⁰ Electric Insulation

در نتیجه مقدار میدان ایجاد شده در طول کانال نصف مقدار ولتاژ اعمالی در ورودی کانال است. واحد میدان ایجاد شده (V/cm) می باشد. به طور مثال با اعمال ولتاژ ۲۵V در مرز ورودی، مقدار میدان ایجاد شده در طول کانال ۱۲.۵V/cm می باشد. هر دو مرز خروجی و ورودی در کانال به عنوان مرز باز^{۲۱} تعریف شده است و هیچ گرادیان فشاری در طول میکروکانال وجود نخواهد داشت. سیال الکترولیتی که در میکروکانال جریان دارد، سیال غیرنیوتنی خون است. مشخصه-هایی از این سیال و شرایط مرزی استفاده شده که در حل مسئله مورد نیاز است در جدول زیر آمده است.

جدول ۱-۳ مشخصه‌های سیال الکترولیت غیرنیوتنی

چگالی سیال	۱۰۶۰ (Kg/m ³)
لزجت سیال	لزجت حاصل از مدل کاریو
شرط مرزی برای دیواره‌های نارسانا	سرعت الکترواسمتیک
شرط مرزی برای دیواره‌های رسانا	سرعت لغزشی
شرط مرزی در ورودی کانال	مرز باز
شرط مرزی در خروجی کانال	مرز باز

برای مدل‌سازی لزجت خون، مدل کاریو انتخاب و ثابت‌های مدل از مرجع [۳۹] در

جدول ۲-۳ گزارش شده است.

جدول ۲-۳ پارامترهای مدل کاریو [۳۹]

لزجت در نرخ برش صفر	$\mu_0 = 0.0456 \text{ (Pa.s)}$
لزجت در نرخ برش بی‌نهایت	$\mu_{inf} = 0.0032 \text{ (Pa.s)}$
ثابت زمانی	$\lambda = 10.03 \text{ (s)}$

²¹ Open Boundary

مشخص است که لزجت ثابت نبوده و با تغییرات سرعت سیال و به تبع آن تغییرات نرخ برش تغییر می‌کند. توان نمایی n نشان‌دهنده‌ی غلظت سیال است به طوری که با کم شدن n سیال رقیق تر می‌شود. توان نمایی n برای این مدل در محدوده $0/344$ تا 1 در نظر گرفته شده است در این پژوهش با تغییر مقدار n ، تأثیر آن بر میزان اختلاط و همچنین کنترل جریان بررسی شده است.

جدول ۳-۳ ثابت‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی

$8/85 \times 10^{-12}$ (C/Vm)	ضریب گذردهی خلأ ϵ_0
۸۰	ثابت دی‌الکتریک ϵ
1×10^{-10} (m^2/s)	ضریب پخش D
$-0/05(V)$	زتا پتانسیل ثابت ζ
$40(\mu m)$	عمق میکرو کانال d
2 (cm)	طول میکرو کانال L
$300(\mu m)$	عرض میکرو کانال W

برای به دست آوردن سرعت الکترواسمتیک داریم:

$$U = \frac{-\epsilon_0 \epsilon \zeta}{\mu} E_t \quad 20-3$$

$$E_t = E - (n \cdot E)n \quad 21-3$$

با جایگذاری معادله‌ی ۲۱-۳ در معادله‌ی ۲۰-۳، سرعت الکترواسمتیک به صورت روابط

زیر حاصل می‌شود:

$$U_x = \frac{-\varepsilon_0 \varepsilon \zeta}{\mu} E_x \quad ۲۲-۳$$

$$U_y = \frac{-\varepsilon_0 \varepsilon \zeta}{\mu} E_y \quad ۲۳-۳$$

رابطه‌ی ۲۲-۳ سرعت در جهت x و رابطه‌ی ۲۳-۳ سرعت در جهت y است. چون زتاپتانسیل بر روی دیواره‌های نارسا ثابت است، بنابراین سرعت الکترواستاتیک به صورت خطی به میدان الکتریکی وابسته است.

سرعت لغزشی بر روی دیواره‌های رسا به صورت زیر به دست می‌آید:

$$U_x = \frac{-\varepsilon_0 \varepsilon \zeta_{\text{induced}}}{\mu} E_x \quad ۲۴-۳$$

$$U_y = \frac{-\varepsilon_0 \varepsilon \zeta_{\text{induced}}}{\mu} E_y \quad ۲۵-۳$$

رابطه‌ی ۲۴-۳ سرعت در جهت x و رابطه‌ی ۲۵-۳ سرعت در جهت y است. چون ζ_{induced} بر روی موانع رسا با مکان تغییر می‌کند و با میدان الکتریکی رابطه‌ی غیرخطی دارد، بنابراین تغییرات سرعت لغزشی غیرخطی خواهد بود.

۳-۶ مدل سازی میدان غلظت

برای مدل سازی میدان غلظت در نرم افزار باید از مازول انتقال ذرات^{۲۲} استفاده کنیم. معادله‌ی حاکم بر ناحیه محاسباتی در حالت پایا، معادله‌ی ۱۳-۳ است که در بالا بیان شد. در نیمه‌ی بالایی مرز ورودی کانال، مقدار غلظت ذرات ورودی برابر $C_0 = 1$ و در نیمه‌ی پایینی مرز ورودی کانال، مقدار غلظت ذرات ورودی برابر $C_0 = 0$ در نظر گرفته شده است

²² Transport of Diluted Species

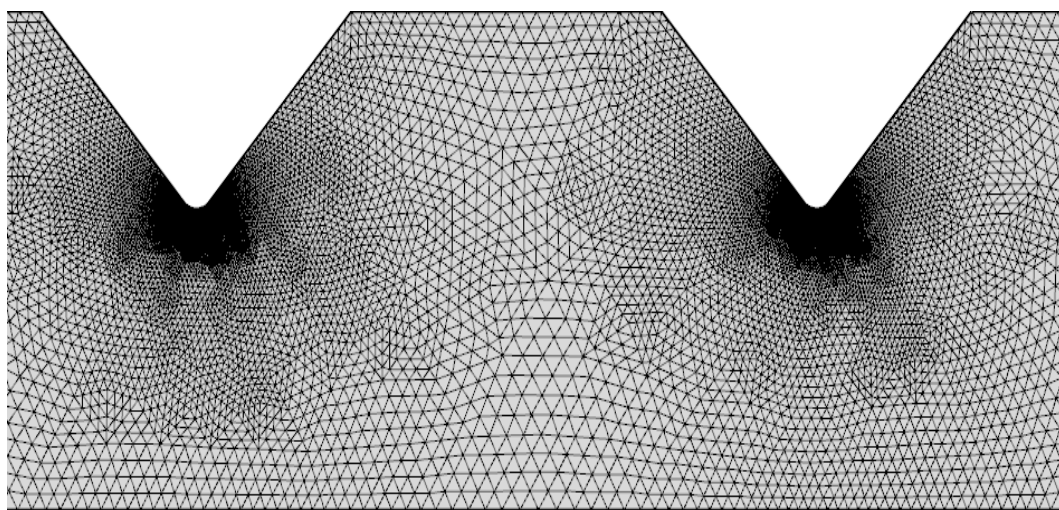
برای تعیین میزان اختلاط ناشی از جریان الکتروکینتیک القایی در هر مقطع از کانال، بازده اختلاط β در هر مقطع با رابطه‌ی زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$\beta = \left(1 - \frac{\int_0^w |C - C_\infty| dx}{\int_0^w |C_0 - C_\infty| dx} \right) \times 100\% \quad ۲۶-۳$$

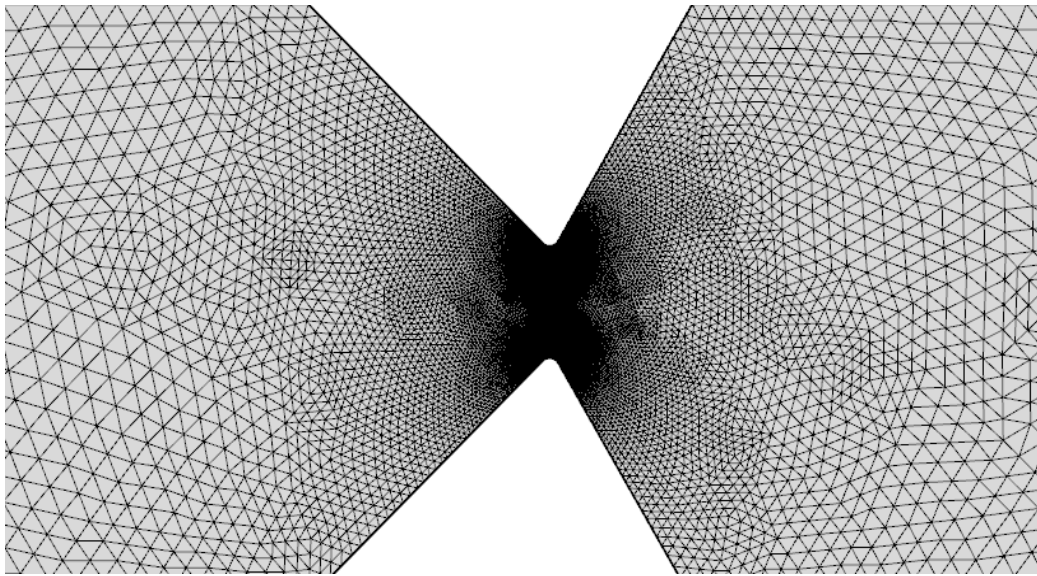
که $C_\infty = 0/5$ نشان‌دهنده‌ی اختلاط کامل در یک مقطع است. C_0 توزیع غلظت بر روی عرض کانال در ورودی و C توزیع غلظت مقطع عرضی دلخواه در پایین دست جریان می‌باشد. بدیهی است در شرایطی که اختلاط کامل داشته باشیم بازده اختلاط ۱۰۰٪ خواهد بود. در فصل‌های بعد به بیان نتایج، نمودارها و تحلیل داده‌های حاصل از مدل‌سازی می‌پردازیم.

۷-۳ نمایی از شبکه تولید شده

در این تحقیق از شبکه‌بندی مثلثی جهت گسسته سازی میدان حل استفاده شده است. به علت اهمیت نتایج در قسمت همگرا-واگرای میکرو کانال شبکه محاسباتی در نزدیکی موانع ریز شده است. نمایی از شبکه‌ی ریز شده در نزدیکی موانع در شکل ۳-۳ و شکل ۴-۳ نشان داده شده است.



شکل ۳-۳ شبکه ریز شده نزدیک موانع در هندسه مربوط به اختلاط نیوتنی



شکل ۴-۳ شبکه ریز شده نزدیک موانع در هندسه مربوط به مسئله غیرنیوتنی

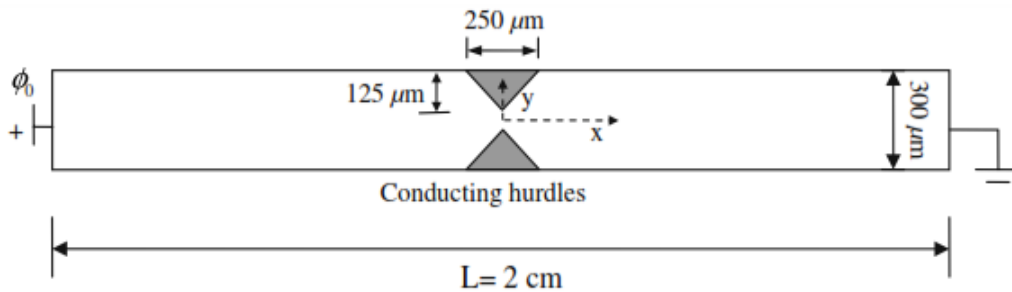
۴ فصل چهارم: نتایج اختلاط سیالات نیوتنی

۱-۴ معتبر سازی

در این بخش ابتدا به مدل سازی و بررسی انطباق نتایج به دست آمده با نتایج مطالعات وو و لی [۳۴ و ۱۷] که مشابه با حوزه ی پژوهش ما می باشد، می پردازیم.

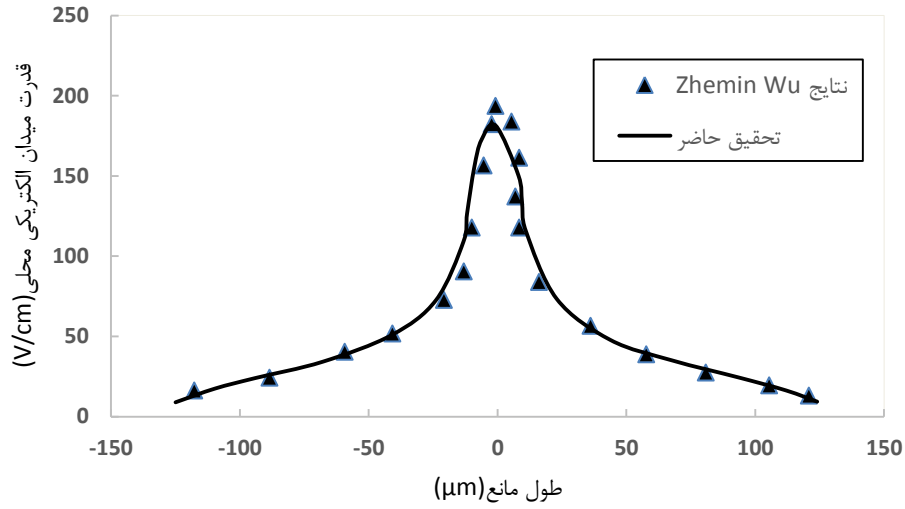
هدف از این معتبر سازی آن است که اعتبار و صحت پژوهش خود را مورد سنجش قرار دهیم. در این قسمت به مدل سازی میکرو کانال با دو مانع رسانای مثلثی مطابق شکل ۱-۴ پرداخته و بقیه ی موارد از جمله هندسه و ابعاد کانال و موانع، قدرت میدان الکتریکی اعمالی، معادلات حاکم بر میدان جریان و میدان غلظت را مطابق مقاله ی ذکر شده اعمال می کنیم.

برای اعتبار سنجی مورد نظر، نمودارهای قدرت میدان الکتریکی بر روی موانع، سرعت لغزشی القایی بر روی سطوح مانع مثلثی و زتاپتانسیل القایی بر روی سطوح مانع رسم شده است.

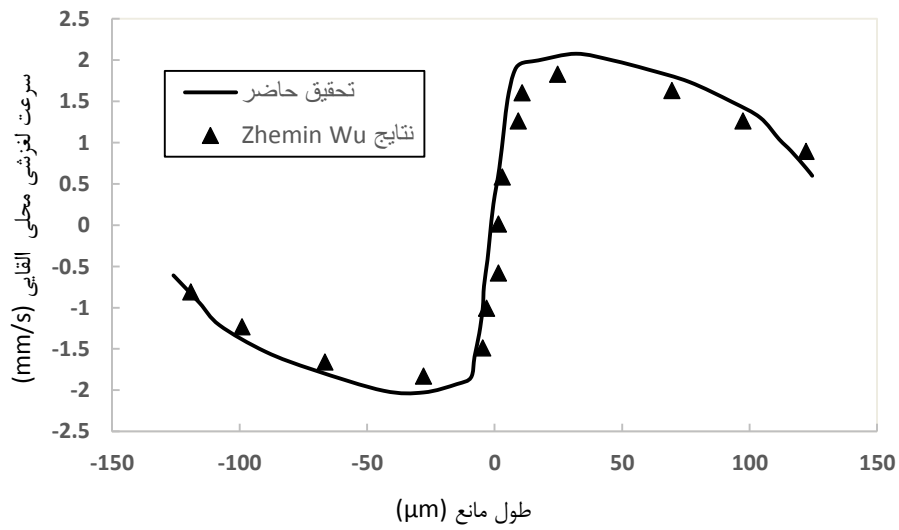


شکل ۱-۴ هندسه مرجع [۳۴]

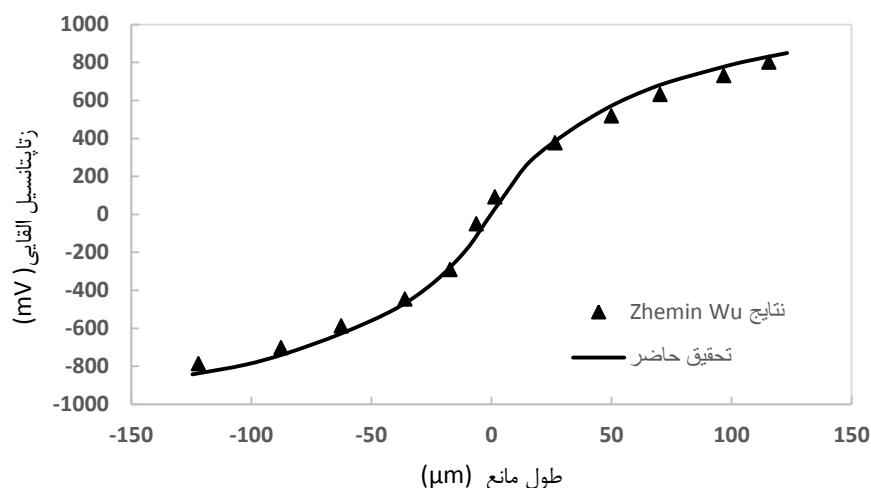
در مرجع ذکر شده نمودارهای قدرت میدان الکتریکی، سرعت لغزشی و زتاپتانسیل القایی به ازای زوایای مختلف از مانع آمده است. در اینجا ما موردی را بررسی کرده ایم که زوایای مانع مشابه و مساوی ۴۵ درجه باشد (مثلث متساوی الساقین باشند). منظور از طول مانع در نمودارهای زیر، طول مانع در راستای x مطابق شکل ۱-۴ می باشد.



شکل ۲-۴ مقایسه قدرت میدان الکتریکی بر روی سطوح مانع با مرجع [۳۴]



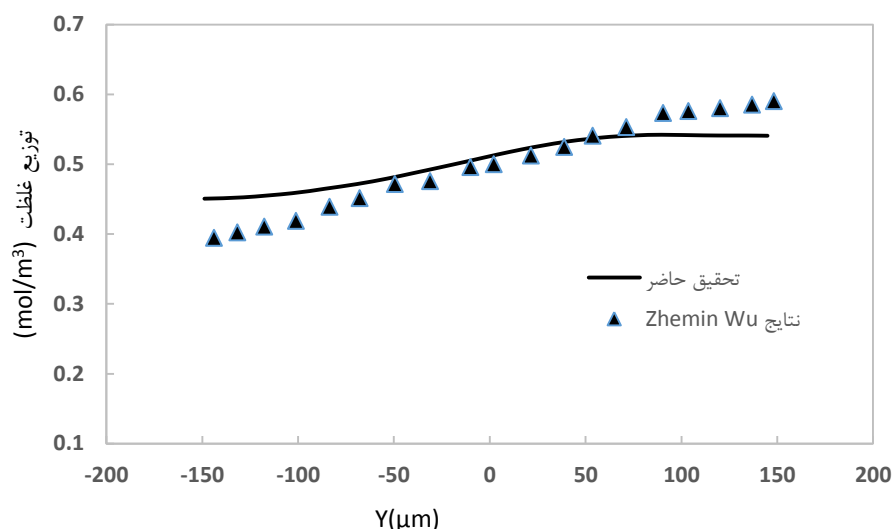
شکل ۳-۴ مقایسه سرعت لغزشی القایی بر روی سطوح مانع با مرجع [۳۴]



شکل ۴-۴ مقایسه زتا پتانسیل القایی بر روی سطوح مانع با نتایج مرجع [۳۴]

زتا پتانسیل القایی دارای علامت متضاد بین طرف بالادست و پایین دست جریان نسبت به سطوح موانع رسانا می باشد که نیروهای محرک متضاد برای جریان الکترواستاتیک القایی حاصل می کند؛ بنابراین اگر خطوط جریان اصلی ایجاد شده توسط دیواره های نارسای کانال را در نظر بگیریم، موانع رسانای مثلی به عنوان یک جفت پمپ الکتروکینتیک با جهات پمپ کردن متضاد عمل می کنند. اگر موانع، هندسه ی متقارن داشته باشند یعنی زوایای موانع در بالادست و پایین دست جریان یکسان باشد، همان طور که در شکل ۴-۲ مشخص است، قدرت میدان الکتریکی محلی یکسان است. به علاوه، زتا پتانسیل القایی بر روی دو طرف مانع مثلی دارای مقادیر یکسان، ولی علامت مخالف می باشند (شکل ۴-۴). مطابق فرمول سرعت هلم-هولتز - اسملوچوفسکی، سرعت های لغزشی الکتروکینتیک القایی نیز بر روی سطوح موانع بالادست و پایین دست جریان دارای مقدار یکسان در جهات مخالف می باشند (شکل ۴-۳).

همچنین میدان غلظت مطابق مرجع [۱۵] که هندسه و ابعادی دقیقاً مشابه با هندسه ی بالا دارد، مدل سازی شده است و نمودار توزیع غلظت در پایین دست جریان به ازای میدان الکتریکی اعمالی 50 V/cm رسم و نتایج مقایسه شده اند.



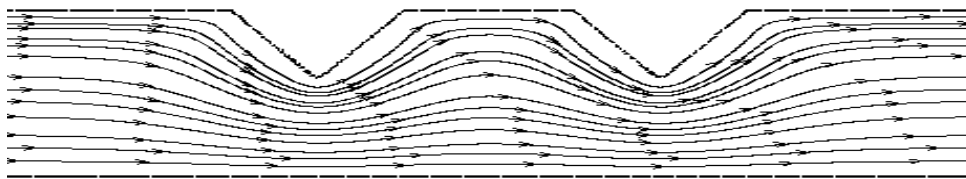
شکل ۴-۵ مقایسه توزیع غلظت در فاصله‌ی ۵۰۰ میکرومتر از وسط میکرو کانال با نتایج مرجع [۱۵]

۴-۲ ارائه میکرومیکسری با دو مانع رسانا

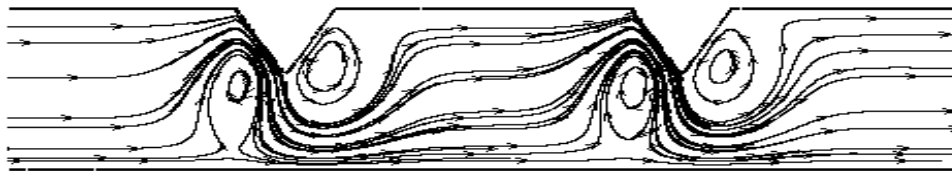
در فصل ۳ به مدل‌سازی هندسه میکرو کانال و معادلات حاکم بر میدان جریان و غلظت پرداختیم. در این قسمت از پژوهش حاضر، قسمت اختلاط سیالات نیوتنی، دو جریان موازی با غلظت بدون بعد ۰ و ۱ از ورودی به میکرو کانال وارد شده است. موانع استفاده‌شده در داخل کانال، هادی الکتریکی هستند و بنابراین بار القایی بر روی این موانع در نظر گرفته شده و به صورت فیزیکی مدل شده است. گردابه‌های محلی در اثر بار القایی (بر روی موانع) به صورت عددی مدل شده و درصد اختلاط ایجادشده بررسی شده است. همان‌طور که در فصل ۳ بیان شد، اثر نسبت 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 به‌نوعی یک میکرومیکسر با بازده بالاتر (در مقایسه با موانع با بار ثابت) ارائه گردیده است.

۳-۴ نمودارها و نتایج به دست آمده از مدل سازی

شکل ۴-۶ خطوط 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 زاپتانسیل القاشده بر روی موانع، نیروهای محرک متضاد را در جریان الکترواستاتیک نشان می‌دهد که عامل ایجاد چرخش‌های جریان است.



(الف)

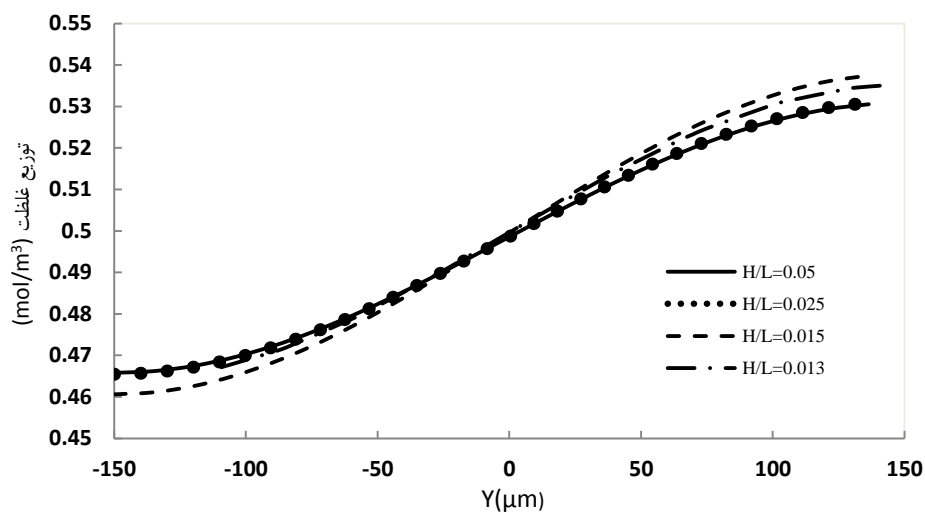


(ب)

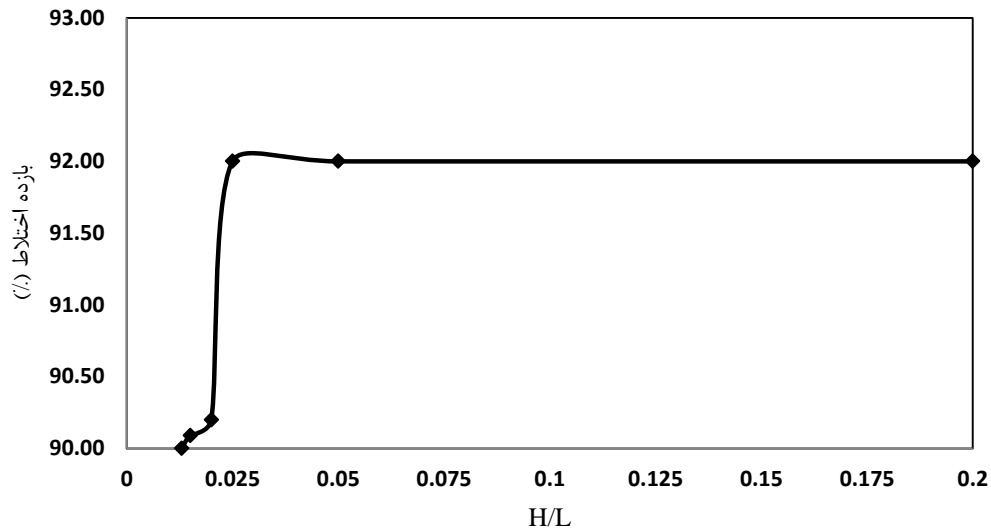
شکل ۴-۶ مقایسه خطوط جریان کانال با موانع رسانا و نارسانا در ولتاژ اعمالی 50 V/cm (الف) کانال دارای موانع نارسانا، (ب) کانال دارای موانع رسانا

شکل ۴-۷ 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. پارامترهای H و L که به ترتیب فاصله‌ی بین دو مانع و طول کانال است، در شکل ۳-۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، از نسبت $H/L=0/0.25$ 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 $H/L=0/0.25$ بازده روند افزایشی داشته و به مقدار بیشینه 92 درصد

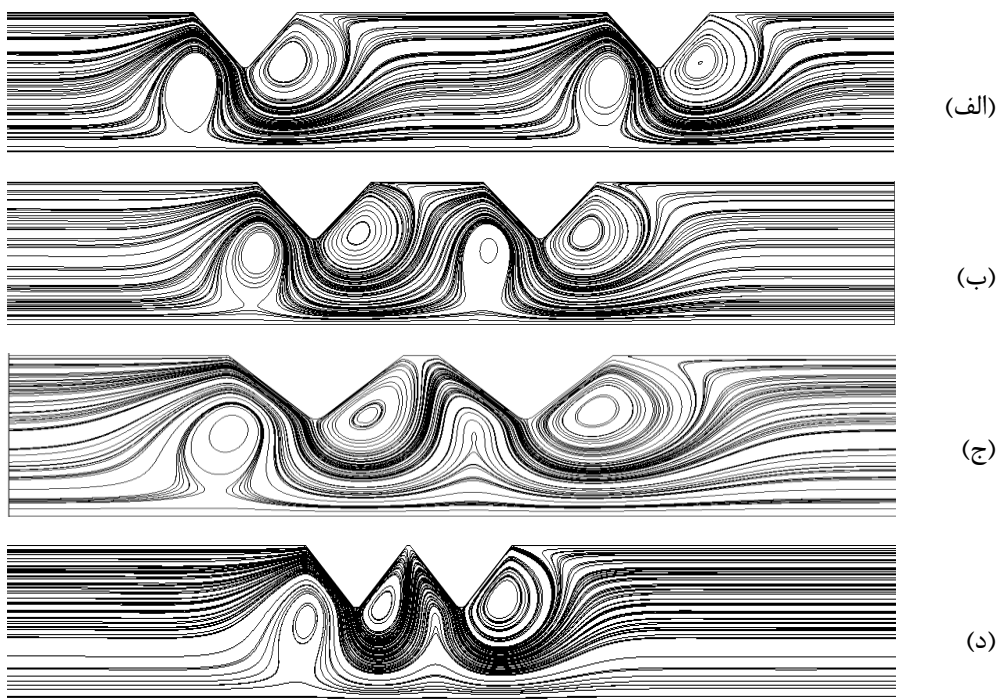
می‌رسد و با افزایش H/L به بالاتر از این مقدار بهبودی در میزان اختلاط حاصل نشده و فرآیند اختلاط مستقل از موقعیت موانع می‌شود (شکل ۴-۸). با افزایش فاصله بین دو مانع (همان‌طور که در شکل ۴-۹ نشان داده شده است)، در ناحیه بین دو مانع، به تدریج جریان از حالت تک گردابه به دو گردابه تبدیل شده و سپس دو گردابه‌ی 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 نمی‌کند که باعث ثابت ماندن مقدار درصد اختلاط می‌شود. در شکل ۴-۹، گردابه‌های تشکیل شده در اطراف موانع رسانا مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۹ نمودار توزیع غلظت به ازای H/L های مختلف، $D/W=0.41$ ، $\alpha=45^\circ$ در مقطع عرضی به فاصله $4000 \mu\text{m}$ از وسط کانال



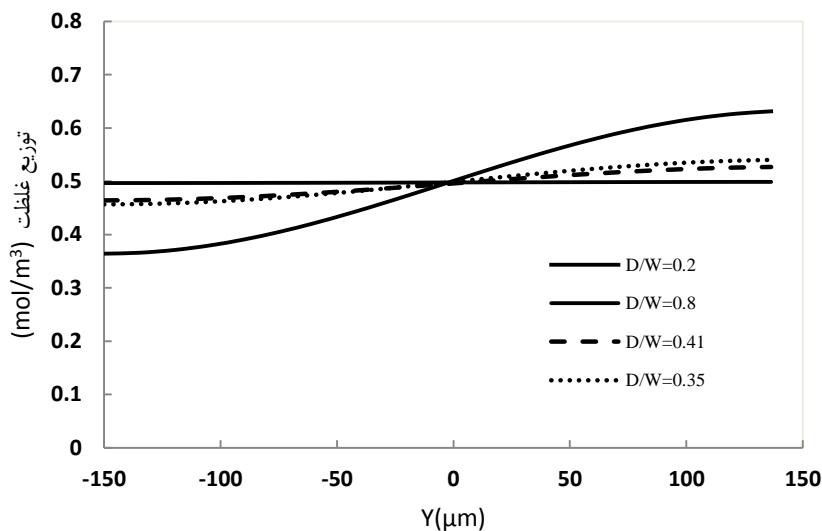
شکل ۴-۸ درصد بازده اختلاط در H/L های مختلف، در $\alpha=45$ در مقطع عرضی به فاصله $4000 \mu m$ از وسط کانال



شکل ۴-۹ تغییرات خطوط جریان با در H/L های مختلف، $D/W=0.41$ و $\alpha=45$ ، (الف) $H/L=0.05$ ، (ب) $H/L=0.25$ ، (ج) $H/L=0.15$ ، (د) $H/L=0.13$

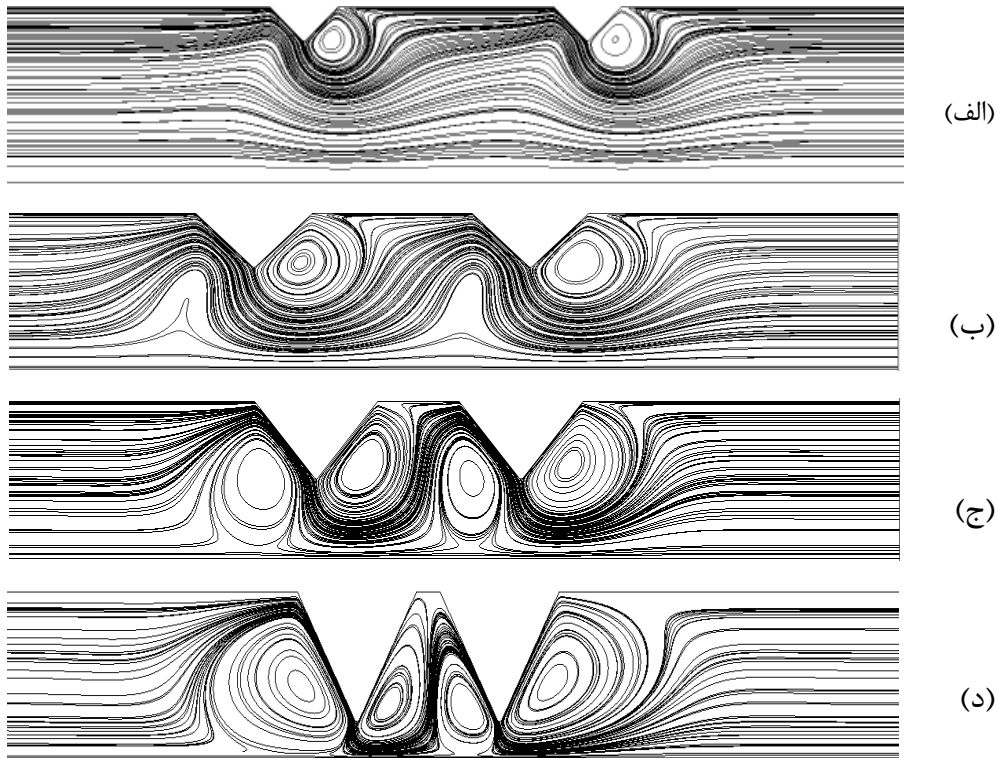
توزیع غلظت در D/W های مختلف (با زاویه مانع 45 درجه) در $H/L=0.25$ که دارای بیشترین بازده اختلاط است در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است. پارامترهای D و W که به

ترتیب ارتفاع مانع و ارتفاع میکرو کانال است، در شکل ۳-۲ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۴-۹ داده شده است با افزایش نسبت D/W ، نمودار به شرایط بهترین میزان اختلاط یعنی $C_{\infty}=0.5$ نزدیک می شود. زیرا با افزایش ارتفاع موانع، گردابه‌هایی که در نزدیکی آن‌ها تشکیل می شود بزرگ تر شده به طوری که در $D/W=0.8$ ، قسمت قابل توجهی از جریان سیال در کانال به واسطه‌ی گردابه‌های تشکیل شده، تحت تأثیر قرار گرفته و مخلوط شده‌اند.



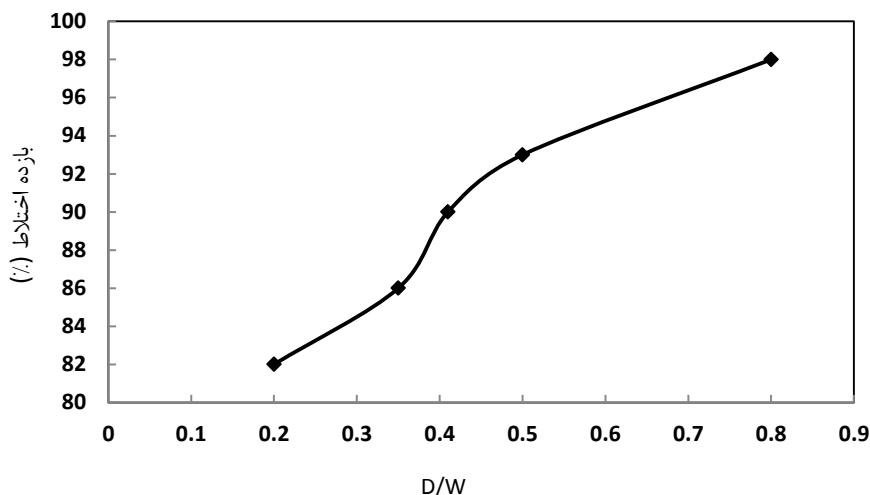
شکل ۴-۱۰ نمودار توزیع غلظت به ازای D/W های مختلف، $H/L=0.25$ ، $\alpha=45$ در مقطع عرضی به فاصله $4000 \mu\text{m}$ از وسط کانال

شکل ۴-۱۱ رفتار خطوط جریان را در اندازه‌های مختلف موانع نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می شود (شکل ۴-۱۱ الف و ۴-۱۱ ب) با افزایش نسبت D/W ، اندازه گردابه‌ها بزرگ تر می شود. همچنین از $D/W=0.35$ به بالا دو گردابه میانی نیز تشکیل می شود در نتیجه دو سیال اختلاط بهتری خواهند داشت (شکل ۴-۱۱ ج و ۴-۱۱ د).



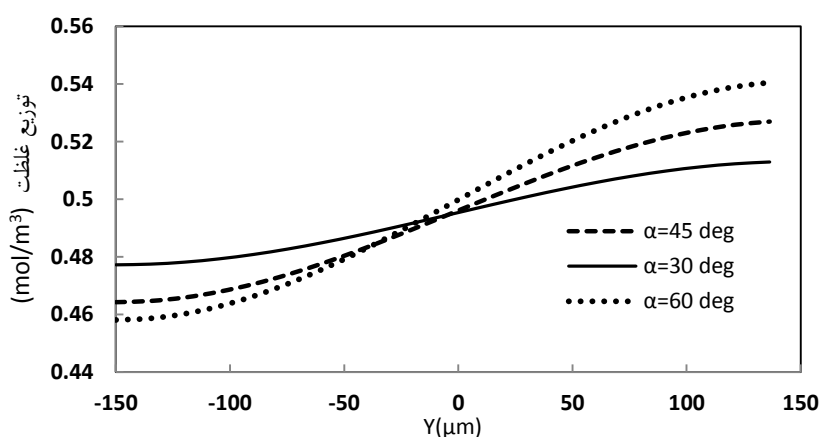
شکل ۴-۱۱ تغییرات خطوط جریان با D/W در $\alpha=45\text{deg}$ ، الف) $D/W=0.2$ ، ب) $D/W=0.35$ ، ج) $D/W=0.41$ ، د) $D/W=0.8$

شکل ۴-۱۲ 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 میکرو کانال اندازه‌گیری شده‌اند.



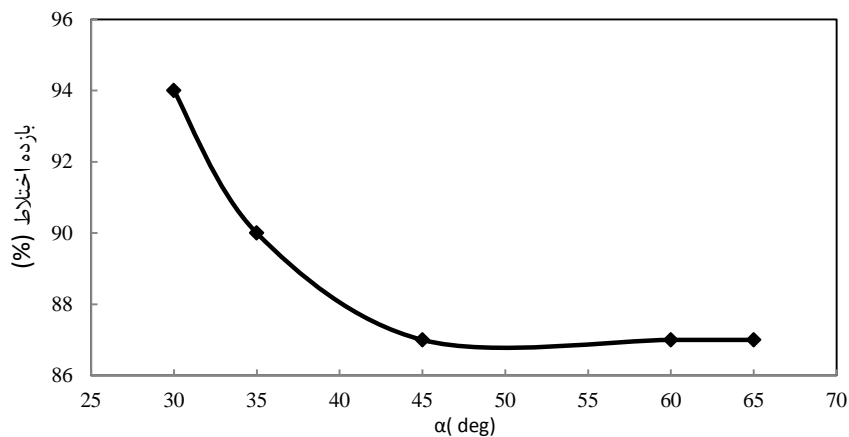
شکل ۴-۱۲ درصد بازده اختلاط در D/W های مختلف، $H/L=0.25$ ، $\alpha=45$ در مقطع عرضی به فاصله $4000 \mu\text{m}$ از وسط کانال

از دیگر موارد مورد مطالعه، تأثیر تغییر زاویه‌ی موانع بر میزان اختلاط است. همان‌طور که در شکل ۴-۱۳ مشاهده می‌شود با کاهش زاویه از ۶۰ به ۳۰ درجه شاهد نزدیک شدن توزیع غلظت در مقطع عرضی از کانال به شرایط بیشینه میزان اختلاط $C_{\infty}=0.5$ خواهیم بود. زیرا با افزایش زاویه‌ی مانع، سطح مانع عمود بر جهت جریان کاهش یافته که سبب کاهش اندازه گردابه‌ها می‌شود. بنابراین میزان چرخش کاهش یافته و در نتیجه درصد اختلاط کم می‌شود.



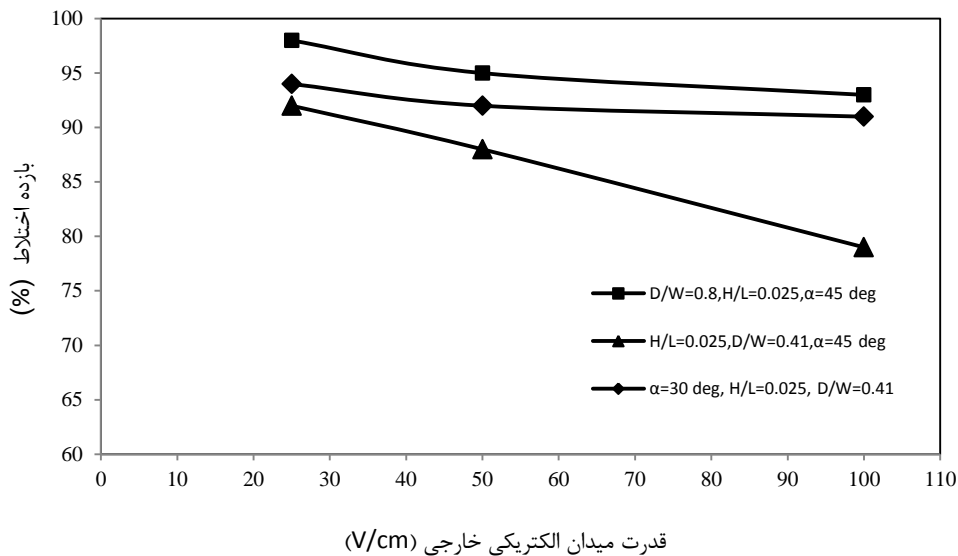
شکل ۴-۱۳ نمودار توزیع غلظت به ازای زاویه‌های مختلف، $D/W=0.41$ ، $H/L=0.25$ در مقطع عرضی به فاصله $4000 \mu\text{m}$ از وسط کانال

بازده اختلاط در شکل ۴-۴ نیز گویای کاهش بازده اختلاط با افزایش زاویه مانع است.



شکل ۴-۴ درصد بازده اختلاط در زوایای مختلف، $H/L=0/025$ ، $D/W=0/41$ در مقطع عرضی به فاصله $4000 \mu m$ از وسط کانال

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 $H/L=0/025$ و $D/W=0/8$ و $\alpha=45$. در همه موارد با کاهش ولتاژ اعمالی به دوسر کانال، بازده اختلاط افزایش می‌یابد. در ولتاژ پایین که سرعت جریان سیال کم است، عامل اصلی اختلاط، پدیده پخش مولکولی است اما در ولتاژهای بالا (سرعت بالای جریان) جابه‌جایی سیال بر پدیده پخش مولکولی غلبه می‌کند و بازده اختلاط کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۱۵ درصد بازده اختلاط در قدرت میدان الکتریکی خارجی مختلف

۴-۴ نتیجه گیری

در این قسمت از پژوهش، جریان الکتروکینتیک القایی در میکرومیکسری با دو مانع رسانای مثلثی متوالی بررسی شده است و اختلاط سیالات نیوتنی 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 می دهد که با تشکیل گردابه در نزدیکی موانع رسانا و چرخش جریان اختلاط بهبود می یابد. همچنین مشاهده شد که با کاهش زاویه موانع و همین طور کاهش قدرت میدان الکتریکی خارجی بازده اختلاط افزایش می یابد. نتایج نشان می دهد که در $H/L=0/0.25$ بیشترین میزان اختلاط را داریم. همچنین با افزایش نسبت ارتفاع موانع به ارتفاع کانال، بازده اختلاط افزایش می یابد.

با توجه به جمع بندی نتایج در حوزه ی مورد بررسی، می توان گفت که میکرومیکسری با

زاویه مانع ۳۰ درجه در شرایطی که نسبت $H/L=0/0.25$ ، $D/W=0/8$ و قدرت میدان الکتریکی خارجی $25V/cm$ باشد، یک میکرومیکسر مطلوب با درصد اختلاط بالا است. درصد بهبود این میکرو میکسر نسبت به میانگین بازده اختلاط در حالت الکتروکینتیک کلاسیک که موانع نارسا می‌باشند، حدوداً ۵۰ درصد می‌باشد.

۵ فصل پنجم: نتایج اختلاط و کنترل جریان سیالات

غیر نیوتنی

۵-۱ مسئله مورد بررسی در این فصل

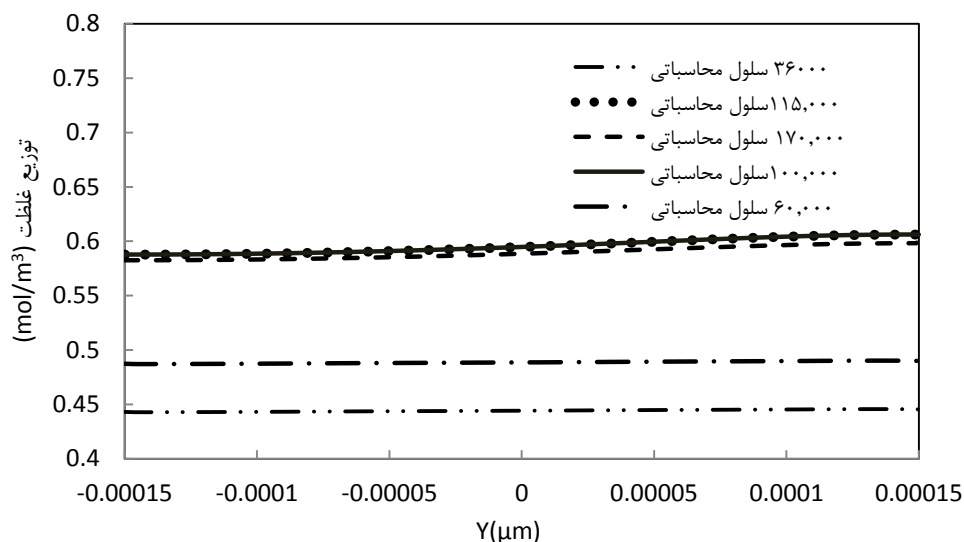
همان طور که قبلاً بیان شد، این قسمت از نتایج مربوط به سیالات غیرنیوتنی به دو قسمت تقسیم می‌شود. قسمت اول، مربوط به مدل‌سازی میدان جریان و غلظت به‌منظور بررسی میزان اختلاط سیالات غیرنیوتنی در هندسه‌ی شکل ۳-۲ می‌باشد. وابستگی لزجت به نرخ برش در اغلب سیالات غیرنیوتنی مانند خون به‌صورت رقیق‌شونده می‌باشد. در این شبیه‌سازی از مدل غیرنیوتنی کاریو استفاده شده که وابستگی تنش به نرخ برش را به‌خوبی می‌توان با آن مدل کرد. توان نمایی n برای این مدل در محدوده 0.344 تا 1 در نظر گرفته شده است. معادلات حاکم با استفاده از روش المان محدود گسسته‌سازی و حل شده است. هدف از مطالعه تأثیر قدرت میدان الکتریکی خارجی و توان نمایی n سیال غیرنیوتنی، بر میزان اختلاط می‌باشد.

در قسمت دوم از این مطالعه با استفاده از یک جفت مانع نامتقارن در میکرو کانال و تنظیم قدرت میدان الکتریکی اعمالی در درون کانال، جریان سیال کنترل می‌شود. کنترل جریان در زوایای مختلف از موانع و همچنین در توان نمایی n مختلف مورد بررسی قرار گرفته است و تأثیر پارامتر n بر میزان دبی‌های مختلف جریان مشخص شده است. همچنین در توان نمایی مختلف n ، یک میدان الکتریکی بحرانی به دست می‌آید که در آن دبی جریان صفر شده و حالت شیر بسته اتفاق می‌افتد.

۵-۲ استقلال شبکه

در این قسمت، استقلال روش عددی از شبکه بررسی شده است. برای این منظور از جریان سیال غیرنیوتنی با $n=0.5$ در میدان الکتریکی $12/5 \text{ V/cm}$ استفاده شده است و توزیع غلظت یک مقطع عرضی پایین دست جریان ($x=5000 \mu\text{m}$) در چند تعداد شبکه مقایسه شده است. به‌طور کلی ریز کردن اندازه‌ی شبکه از یک سو سبب دقیق‌تر شدن مقادیر عددی شده و

از سوی دیگر هزینه‌ی محاسباتی را افزایش می‌دهد. بر مبنای نتایج نشان داده شده در شکل ۱-۵، بهترین تعداد سلول محاسباتی ۱۰۰۰۰۰ سلول می‌باشد زیرا در تعداد سلول بیشتر از این مقدار، نمودارهای توزیع غلظت بر یکدیگر منطبق می‌شود.



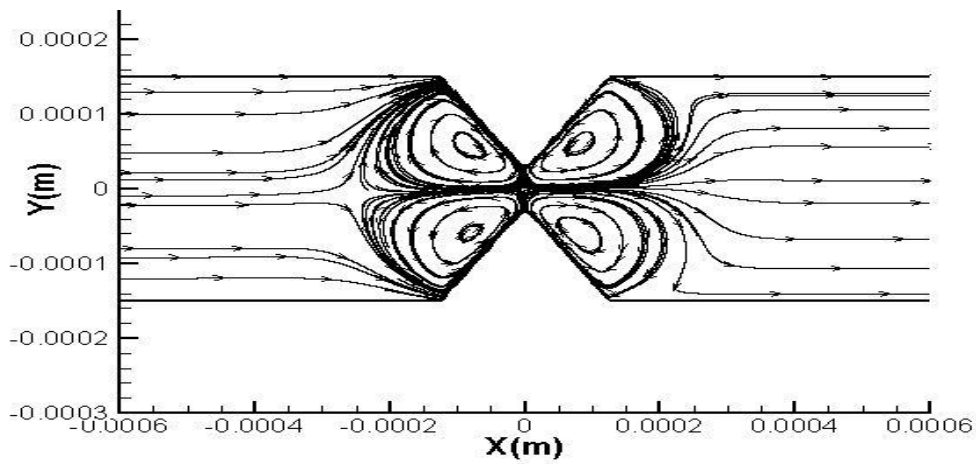
شکل ۱-۵ بررسی استقلال از شبکه: توزیع غلظت در مقطع عرضی به فاصله‌ی $5000 \mu\text{m}$ از وسط کانال

۳-۵ تأثیر پارامتر n و قدرت میدان الکتریکی خارجی بر میزان اختلاط

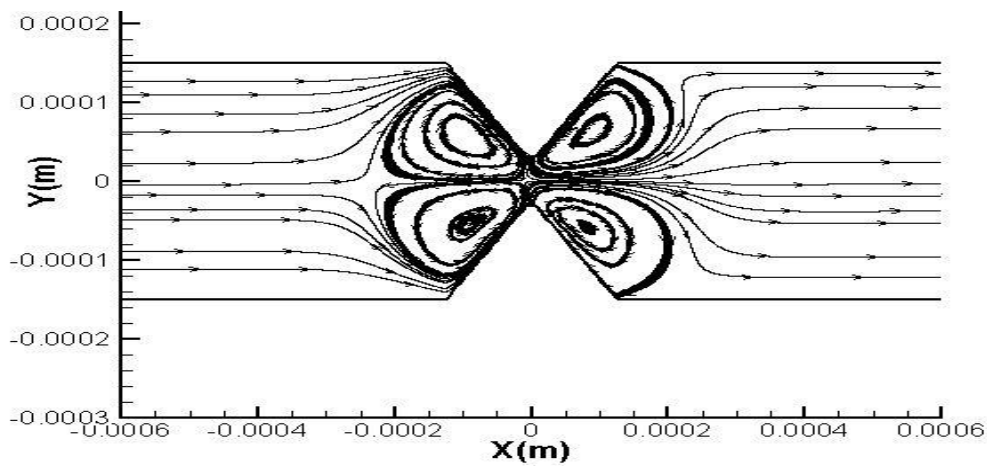
دو سیال غیرنیوتنی

در فصل ۳ هندسه‌ی میکرو کانال با موانع رسانا، معادلات مربوط به میدان الکتریکی، میدان جریان سیال و میدان غلظت به‌طور کامل تشریح شد. شکل ۲-۵ میدان جریان درون کانال در سه مقدار مختلف از n را در قدرت میدان الکتریکی خارجی $12/5 \text{ V/cm}$ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار n از $0/344$ تا 1 ، اندازه‌ی گردابه‌ها کوچک‌تر شده است به‌طوری‌که طول گردابه‌ها در راستای x از 2400 میکرومتر در $n=0/344$ به 1700 میکرومتر در $n=1$ تغییر پیدا کرده است. علت این رویداد این است که با افزایش n

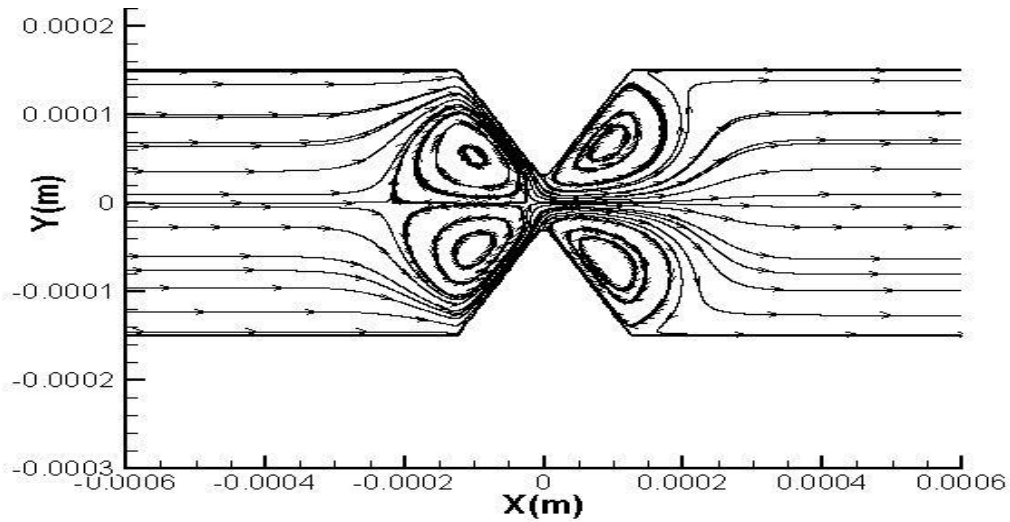
لزجت ظاهری سیال افزایش پیدا کرده و سرعت سیال در یک میدان الکتریکی ثابت، کاهش پیدا می‌کند و باعث کاهش طول گردابه‌های پشت مانع می‌شود.



(الف)



(ب)



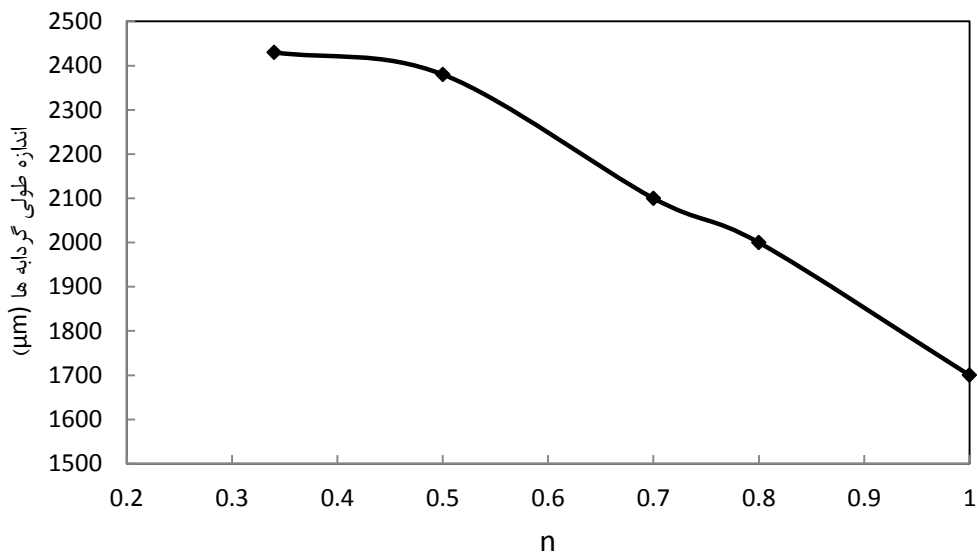
(ج)

شکل ۲-۵ میدان جریان در قدرت میدان الکتریکی خارجی $12/5V/cm$ برای n های مختلف،

الف) $n=0/344$ (ب) $n=0/7$ (ج) $n=1$

این تغییر اندازه‌ی گردابه‌ها به صورت کمی برحسب n در شکل ۳-۵ نشان داده شده

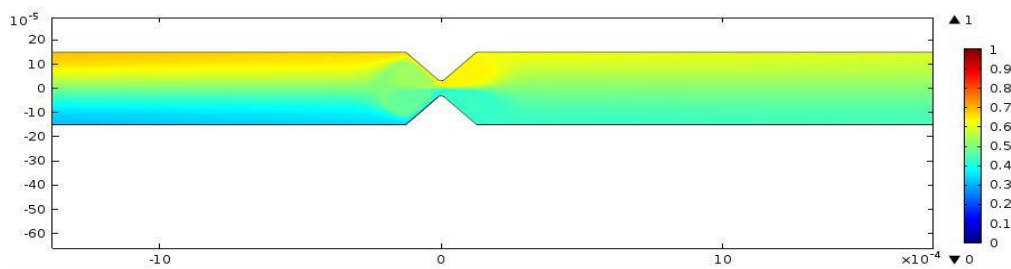
است که نشانگر رفتار کاهش‌ی طول گردابه‌ها با افزایش لزجت است.



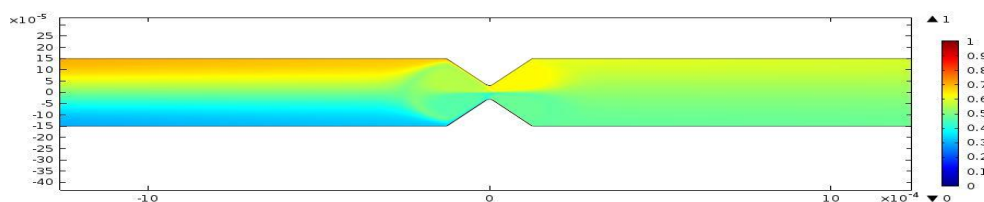
شکل ۳-۵-۵ نمودار اندازه طولی گردابه‌های بالادست جریان به ازای n های مختلف

شکل ۴-۵ میدان غلظت در توان‌های $n=1, 0/7, 0/344$ را نشان می‌دهد. در نیمه‌ی

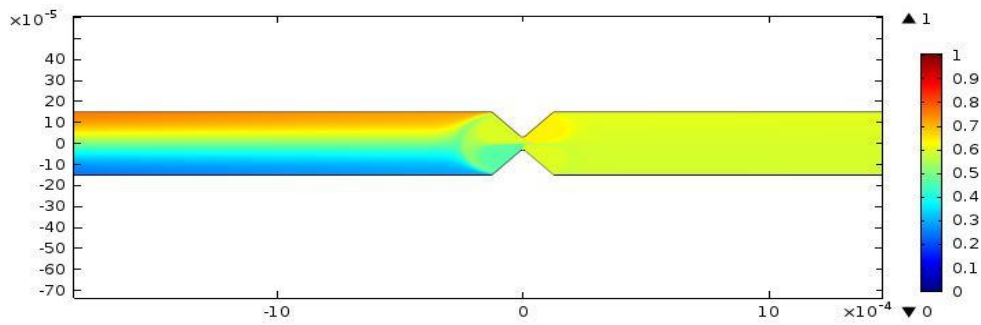
بالایی مرز ورودی کانال، مقدار غلظت ذرات ورودی برابر ۱ و در نیمه‌ی پایینی مرز ورودی کانال، مقدار غلظت ذرات ورودی برابر صفر در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اختلاط دو سیال قبل از رسیدن به موانع و گردابه‌های شکل گرفته، کم است. بعد از رسیدن جریان به موانع و چرخش جریان، برای $n=1$ در پایین دست، جریان به‌طور کامل مخلوط نشده و دو سیال در برخی نواحی دارای مرز هستند و رنگ‌های مختلف قابل مشاهده است؛ اما با کاهش n به تدریج اختلاط کامل‌تر شده است به‌طوری‌که برای $n=0.344$ در پایین دست، کانتور غلظت جریان یکنواخت شده و یک رنگ را نشان می‌دهد که نشانگر رسیدن به مخلوطی همگن با درصد اختلاط بالا است. با مقایسه سه شکل زیر نتیجه‌گیری می‌شود که با افزایش نرخ برش یا به عبارت دیگر کاهش لزجت سیال، اختلاط به صورت کامل‌تری صورت می‌گیرد. به بیان دیگر، وقتی سیال رقیق‌تر می‌شود و طول گردابه‌ها افزایش پیدا می‌کند، جریان عبوری از روی موانع، چرخش بیشتر و در نتیجه اختلاط بیشتری را تجربه می‌کند.



(الف)



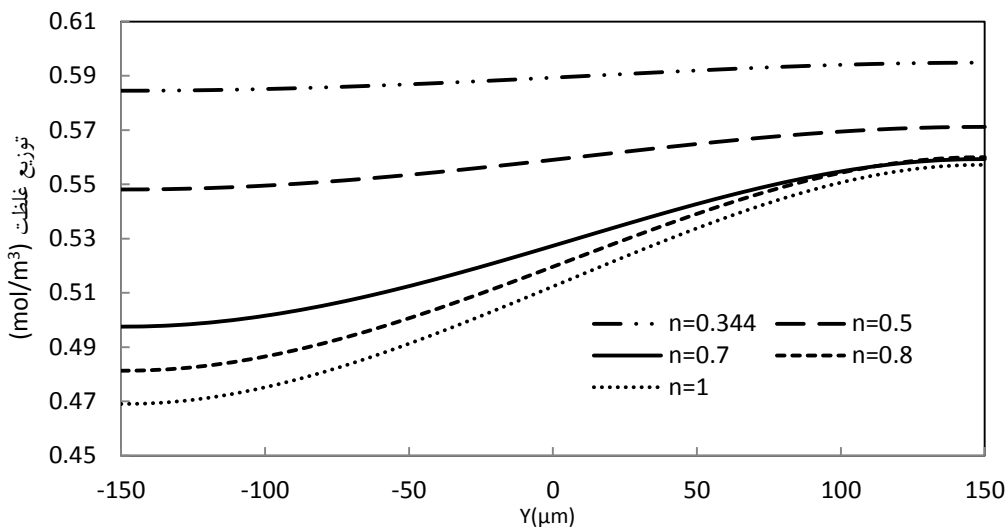
(ب)



(ج)

شکل ۴-۵ میدان غلظت در قدرت میدان الکتریکی خارجی $12/5V/cm$ برای n های مختلف، الف) $n=1$ ب) $n=0.7$ ج) $n=0.344$

در شکل ۵-۵ توزیع غلظت برای n های مختلف در یک مقطع عرضی ثابت به فاصله‌ی 5000 میکرومتر از وسط میکرو کانال رسم شده است. این شکل نیز نتایج شکل ۳-۵ را به‌طور کمی نشان می‌دهد به‌طوری‌که مشاهده می‌شود در $n=0.344$ نمودار غلظت سیال در مقطع عرضی ذکر شده دارای کمترین تغییرات می‌باشد که حاکی از اختلاط بالا در این نواحی است.

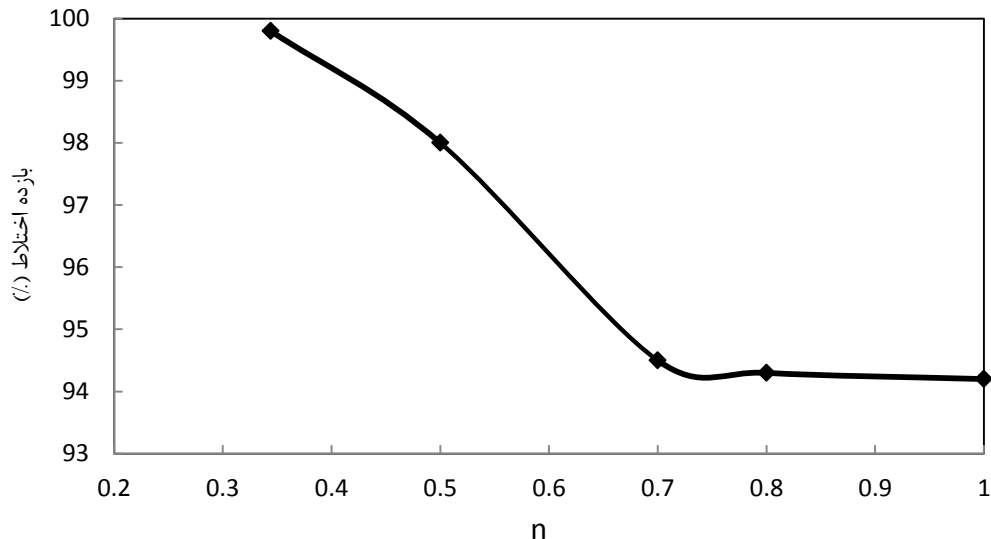


شکل ۵-۵ نمودار توزیع غلظت به ازای n های مختلف، قدرت میدان الکتریکی خارجی $12/5V/cm$ در مقطع عرضی به فاصله $5000 \mu m$ از وسط کانال

شکل ۶-۵ بازده اختلاط محاسبه‌شده را مطابق معادله ۳-۲۶ در یک مقطع عرضی

پایین دست جریان نشان می‌دهد. همان‌طور که ذکر شد، با نزدیک شدن به سیال نیوتنی ($n=1$)

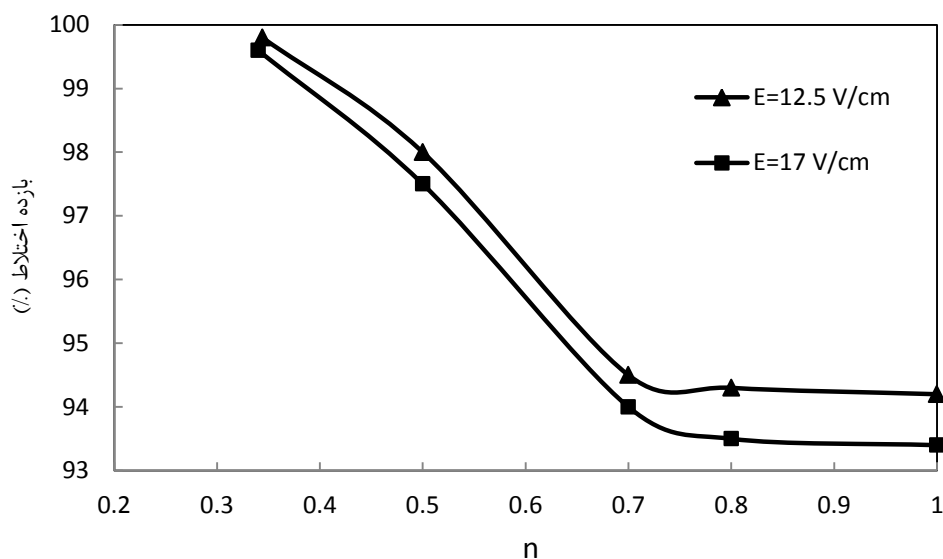
میزان اختلاط کاهش می‌یابد. در این شکل دیده می‌شود که در n های نزدیک به $n=1$ جریان دارای کمترین بازده اختلاط بوده و مقدار این بازده تقریباً ثابت می‌ماند.



شکل ۵-۶ درصد بازده اختلاط، قدرت میدان الکتریکی خارجی $12/5 \text{ V/cm}$ در مقطع عرضی به فاصله

$5000 \mu\text{m}$ از وسط کانال

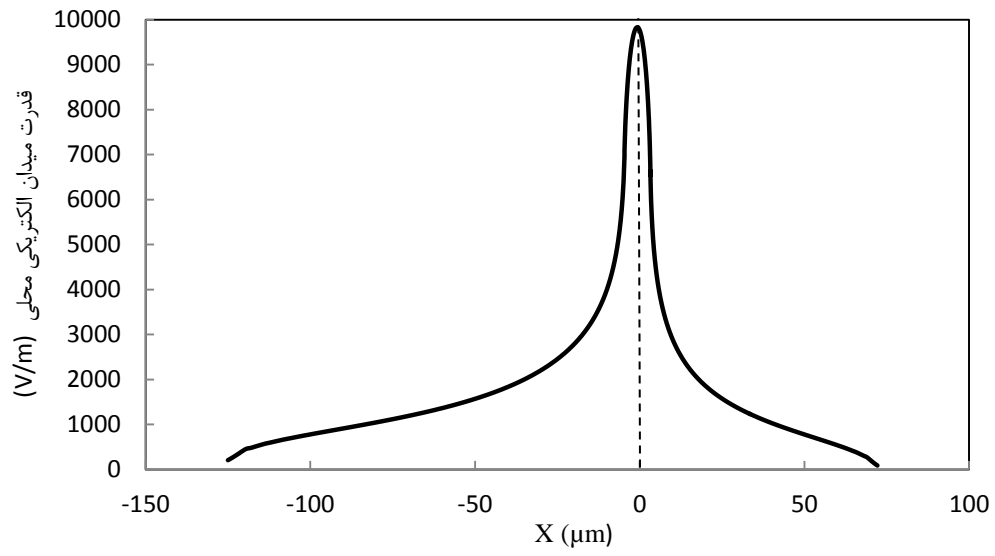
همچنین تأثیر قدرت میدان الکتریکی خارجی نیز بر میزان اختلاط مورد بررسی قرار گرفته است و مشاهده می‌شود که درصد اختلاط با قدرت میدان اعمالی تغییر می‌کند. همان‌طور که در شکل ۵-۷ مشاهده می‌شود، با افزایش قدرت میدان الکتریکی خارجی اعمالی از $12/5 \text{ V/cm}$ به 17 V/cm درصد اختلاط کاهش یافته است؛ زیرا قدرت میدان الکتریکی بر روی پدیده پخش تأثیرگذار است، به طوری که هرچه میدان الکتریکی افزایش یابد، مومنوم (سرعت) اجازه نفوذ یک سیال را در دیگری نمی‌دهد. به عبارت دیگر، با افزایش مومنوم زمان اختلاط کاهش یافته و پخش سیال به طور کامل صورت نمی‌گیرد.



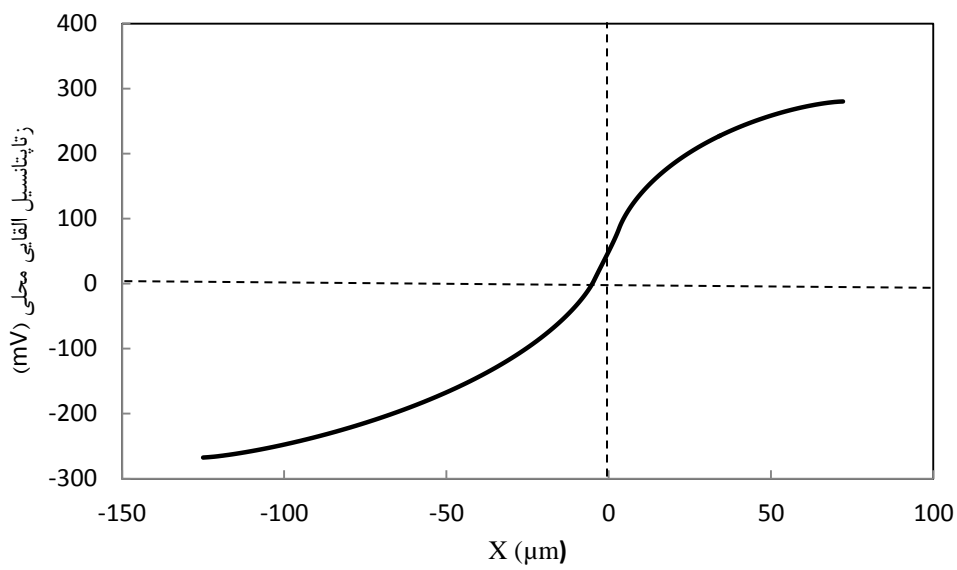
شکل ۷-۵-۵ بازده اختلاط برحسب تغییر قدرت میدان الکتریکی خارجی در n های مختلف

۴-۵ بررسی رفتار سیال غیرنیوتنی بر کنترل جریان

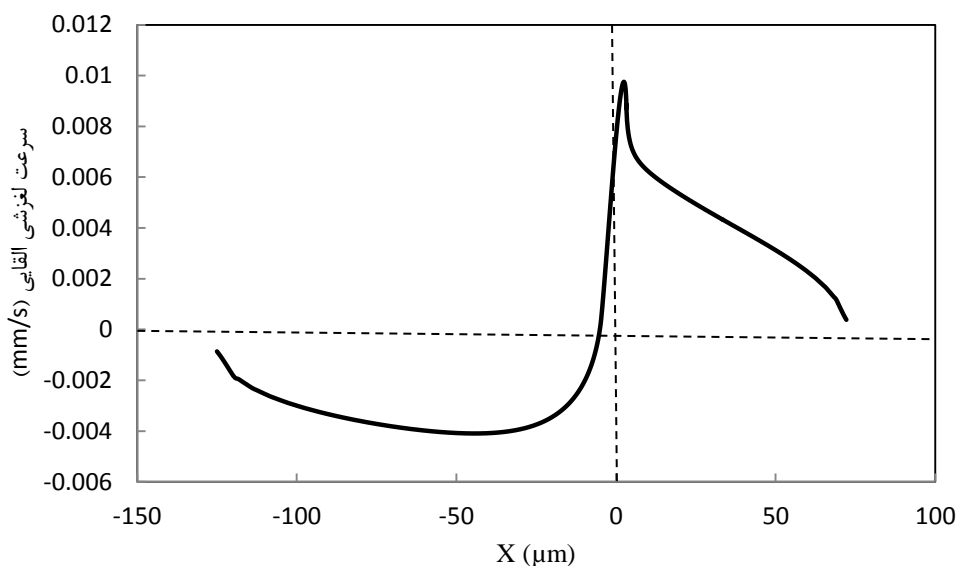
همان‌طور که در فصل ۴ اشاره شد، اگر زوایای موانع مثلثی در بالادست و پایین‌دست جریان یکسان باشد، یک بالانس بین جریان‌های عقبی و جلویی ایجاد شده و در نهایت یک اثر پمپ کردن خالص با دبی صفر را نتیجه می‌دهد؛ اما اگر زوایای موانع یکسان نباشد، این بالانس جریان از بین خواهد رفت. با بزرگ‌تر کردن زاویه‌ی مانع در پایین‌دست جریان یعنی α_2 تقارن مانع مثلثی از بین می‌رود و قدرت میدان الکتریکی محلی و زتا پتانسیل القایی به‌طور نامتقارن توزیع می‌شوند (شکل ۸-۵ الف و ۸-۵ ب). همچنین مطابق شکل ۸-۵ ج مشخص است که با بزرگ‌تر کردن زاویه مانع در پایین‌دست ($\alpha_2 = 60$) جریان الکترواسمتیک القایی در طرف پایین‌دست جریان قوی‌تر شده، جریان منفی قدرتمندتری را به وجود می‌آورد و اثر پمپ کردن به سمت عقب ایجاد می‌شود.



(الف)



(ب)



(ج)

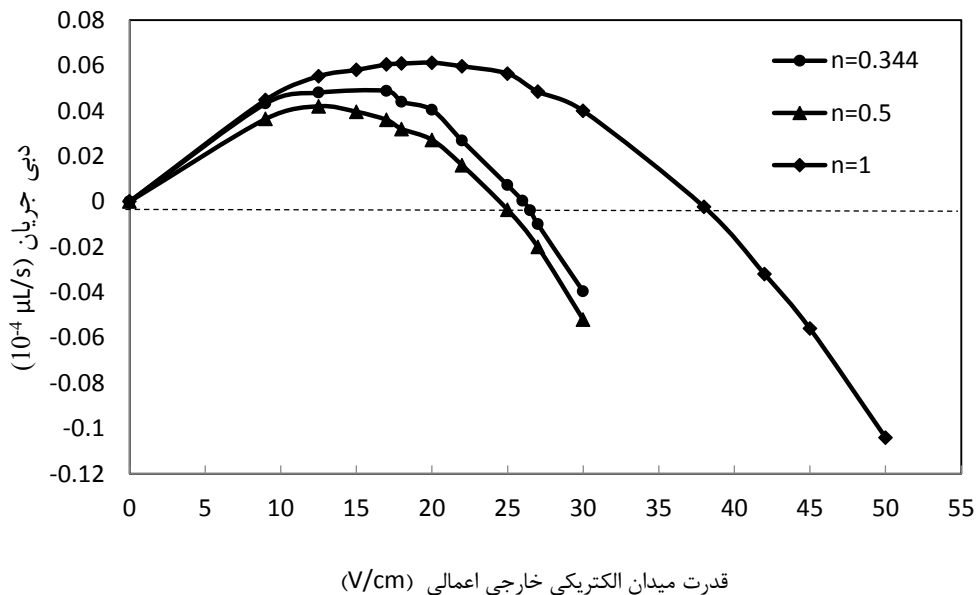
شکل ۵-۸ اثر پمپ کردن به عقب در قدرت میدان الکتریکی محلی $n=1,9V/cm$ در یک جفت مانع نامتقارن ($\alpha_1=45$ و $\alpha_2=60$)، الف) قدرت میدان الکتریکی در سطح مانع، ب) توزیع زناپتانسیل القایی، ج) سرعت لغزشی القایی

پمپ کردن به سمت عقب به قدرت میدان الکتریکی اعمالی در کانال میکرو بستگی دارد به طوری که میدان الکتریکی اعمالی قوی تر یک اثر پمپ کردن به عقب با قدرت بیشتری را نتیجه می دهد که علت آن وابستگی غیرخطی جریان الکترواستاتیک با بار القایی به قدرت میدان الکتریکی می باشد. انتظار می رود که با تنظیم میدان الکتریکی اعمالی، پمپ کردن به عقب می تواند کنترل شود به طوری که متناسب با آن کاهش یابد، بالانس شود و یا بر میدان جریان اصلی ایجاد شده توسط دیواره های غیررسانای کانال غلبه کند و در نتیجه یک اثر کنترل جریان می تواند حاصل شود. تأثیر توان نمایی n سیال غیرنیوتنی بر کنترل جریان سیال نیز بررسی شده است. شکل ۵-۹ دبی های جریان درون یک کانال را به عنوان تابعی از قدرت میدان الکتریکی اعمالی در سه n مختلف نشان می دهد. در یک n ثابت و مشخص، واضح است که در ابتدا دبی جریان با توجه به میدان الکتریکی اعمالی افزایش یافته و به یک مقدار مثبت حداکثر

می‌رسد. پس از آن شروع به کاهش کرده و در یک مقدار میدان الکتریکی بحرانی دبی جریان صفر می‌شود. منظور از میدان الکتریکی بحرانی، اندازه‌ای از میدان است که در آن دبی خالص جریان صفر شده و حالت شیر بسته اتفاق می‌افتد. بعد از آن اگر میدان الکتریکی بیشتر افزایش یابد، مسیر جریان تغییر کرده و دبی جریان منفی زیاد می‌شود؛ بنابراین این چنین توسط میدان الکتریکی اعمال شده می‌توان جریان الکتروکینتیک را در کانال تنظیم کرد بدون آن که نیاز به قسمت مکانیکی در میکرو کانال باشد.

با مقایسه سه نمودار در n های مختلف، مشاهده می‌شود که محل برخورد نمودار با محور x که نشان‌دهنده‌ی مقدار ولتاژ بحرانی (دبی جریان صفر) است، در n های مختلف، متفاوت است. به طوری که $n=0/5$ نسبت به $n=0/344$ دارای ولتاژ بحرانی کمتری است. به این معنی که در $n=0/5$ نیاز به اعمال قدرت میدان الکتریکی کمتری نسبت به $n=0/344$ می‌باشد تا حالت شیر بسته (دبی جریان صفر) اتفاق بیفتد. بعد از آن با افزایش مقدار n از $n=0/5$ به $n=1$ ، مقدار ولتاژ بحرانی افزایش می‌یابد و روند برعکس می‌شود. با توجه به این نتایج انتظار می‌رود که بین $n=0/344$ و $n=1$ یک مقدار اکسترمم برای n وجود داشته باشد، به طوری که تا این n مشخص، دبی جریان درون کانال کاهش یافته و بعد از آن تا $n=1$ دبی افزایش می‌یابد. از طرفی جهت یافتن علت پیدایش نقطه‌ی اکسترمم در نمودار دبی برحسب ولتاژ، دو عامل مؤثر در شکل‌گیری این نوع رفتار خاص از جریان الکترواستاتیک را در غیاب عامل دیگر بررسی می‌کنیم. به عبارت دیگر می‌توان عامل حرکت رو به جلو و رو به عقب جریان را ناشی از زتاپتانسیل ثابت روی دیواره‌های نارسانای کانال و زتاپتانسیل غیرثابت روی موانع دانست. برای مشخص شدن میزان تاثیر این عوامل، ابتدا زتاپتانسیل روی دیواره‌های نارسانای کانال را مساوی صفر و زتاپتانسیل روی موانع رسانی را غیرثابت و سرعت لغزشی روی موانع را با مطابق معادله ۳-۲۴ و ۳-۲۵ تعریف می‌کنیم. در حالت دوم، زتاپتانسیل روی دیواره‌های نارسانا را ثابت و دارای مقدار $-0/05$ ولت در نظر گرفته و زتاپتانسیل روی موانع را صفر در نظر می‌گیریم.

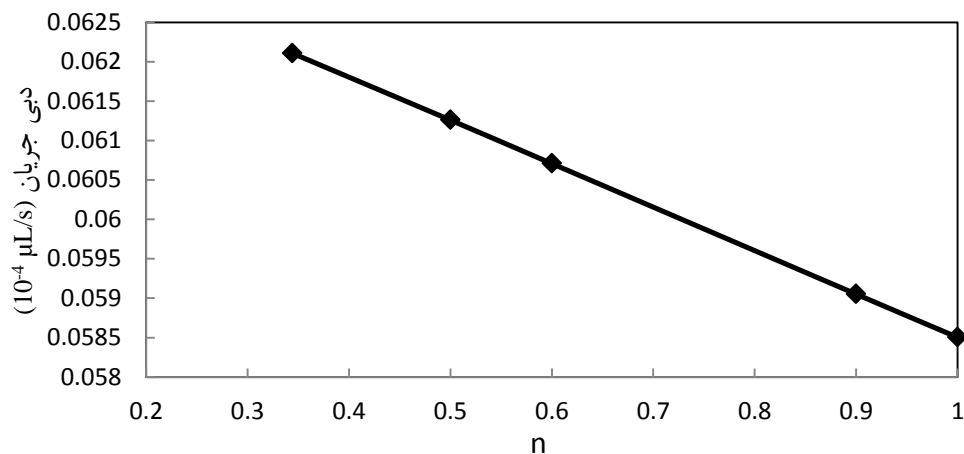
نکته قابل ذکر این است که با وجود غیرخطی بودن معادلات، روند نتایج حاصل از هریک از عوامل ذکر شده و جمع آثار آن‌ها با هم می‌تواند گواهی بر ایجاد این نوع رفتار سیال تحت اثر مجموع عوامل مؤثر باشد.



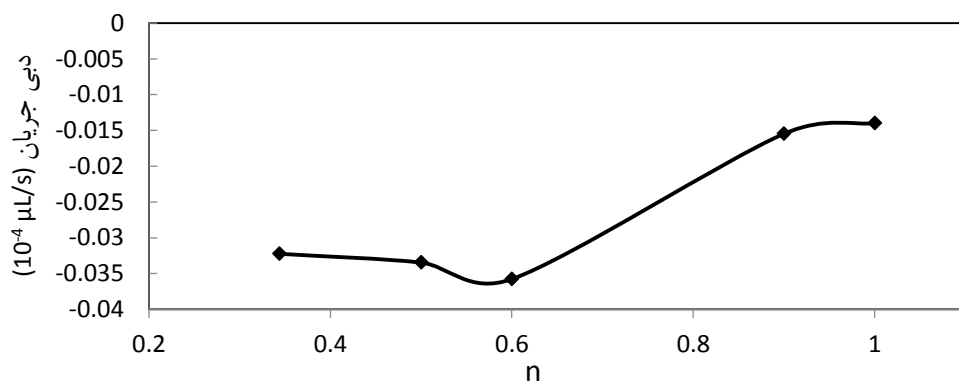
شکل ۵-۹ دبی‌های جریان به‌عنوان تابعی از قدرت میدان الکتریکی اعمالی به ازای توان نمایی مختلف n سیال غیرنیوتنی

در شکل ۵-۱۰ و شکل ۵-۱۱ به ترتیب دبی جریان داخل کانال برحسب توان نمایی n نشان داده شده است. در شکل ۵-۱۰ مشاهده می‌شود در حالتی که زتاپتانسیل صفر روی موانع رسانا داریم، با افزایش لزجت سیال، دبی جریان کاهش پیدا می‌کند. همین‌طور شکل ۵-۱۱ که در شرایط زتاپتانسیل صفر روی دیواره‌های نارسانای بالا و پایین کانال رسم شده است، نشان می‌دهد که زتاپتانسیل القایی به‌تنهایی قادر به تغییر روند مقدار دبی برحسب n است. به عبارت دیگر، با افزایش n تا مقدار $0/6$ ، دبی منفی (جریان برگشتی) افزایش یافته و سپس از $n=0/6$ تا $n=1$ مقدار دبی برگشتی کاهش پیدا می‌کند. با یک جمع آثار اولیه، می‌توان این نتیجه را گرفت که در مقادیر n کوچک‌تر از $0/6$ ، دبی در دو نمودار دارای شیب منفی بوده و

در نتیجه روند دبی کلی کاهش می‌یابد. از طرفی وقتی n بزرگ‌تر از 0.6 است، در شرایط زتاپتانسیل صفر روی دیواره‌های رسانا، روند تغییرات دبی از $n=0.6$ تا $n=1$ (همانطور که گفته شد) کاهش می‌یابد. اما با در نظر گرفتن عامل دوم یعنی فقط ایجاد زتاپتانسیل القایی بر روی موانع (و زتاپتانسیل صفر روی دیواره‌های نارسانا)، مقدار کاهش دبی خالص از $n=0.6$ تا $n=1$ کاهش می‌یابد. در واقع مقدار دبی برگشتی با افزایش n کم شده که در نهایت مجموع شرایط ذکر شده، باعث بالا رفتن مقدار دبی کلی در $n=1$ نسبت به $n=0.6$ می‌شود (شکل ۵-۱۲ را ببینید).

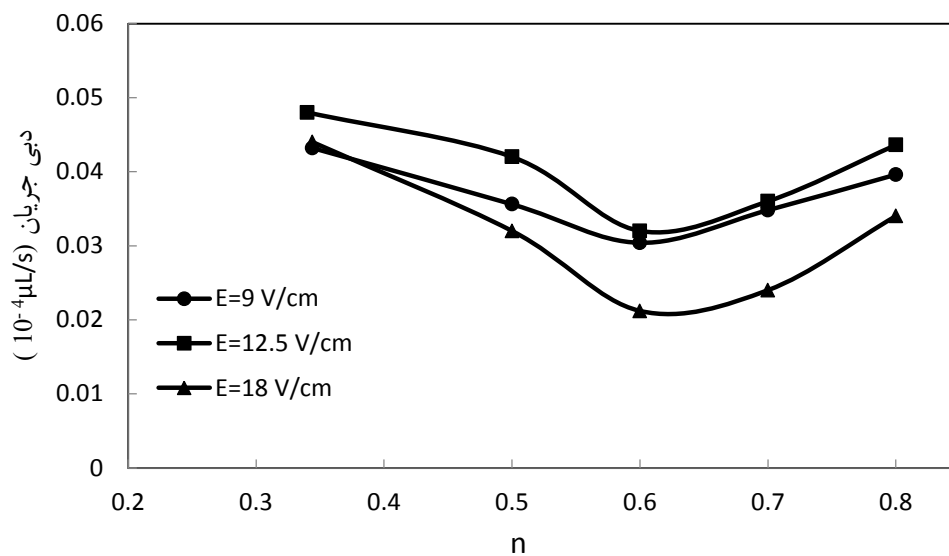


شکل ۵-۱۰ دبی‌های جریان به‌عنوان تابعی از n در قدرت میدان الکتریکی خارجی 9V/cm با شرط $\zeta_{\text{induced}} = 0$

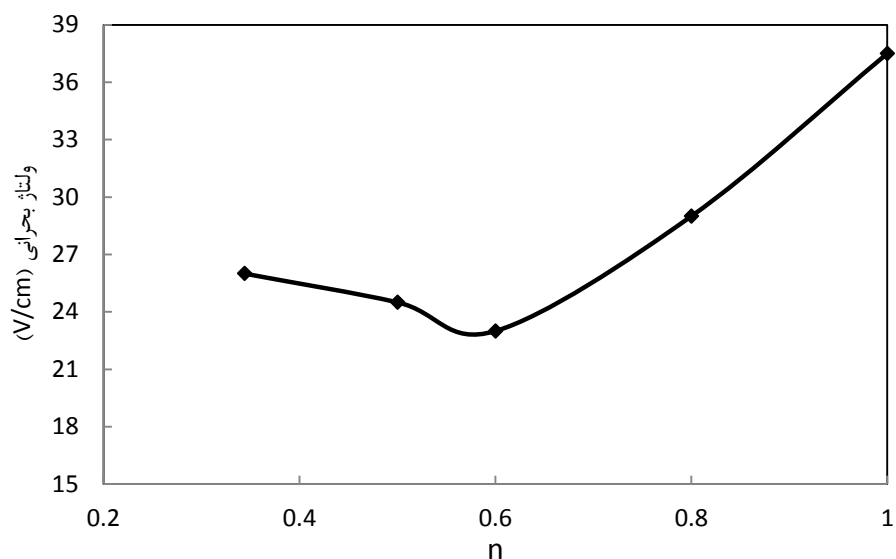


شکل ۵-۱۱ دبی‌های جریان به‌عنوان تابعی از n در قدرت میدان الکتریکی خارجی 9V/cm با شرط $\zeta = 0$

نمودار دبی‌های جریان درون کانال به عنوان تابعی از n در سه قدرت میدان الکتریکی متفاوت نیز در شکل ۱۲-۵ رسم شده است. همان‌طور که از نمودار مشخص است در تمامی میدان‌های الکتریکی اعمالی $n=0.6$ دارای کمترین دبی جریان خالص می‌باشد. مقدار ولتاژ بحرانی به ازای n های مختلف در شکل ۱۳-۵ نشان داده شده است که نشان می‌دهد در $n=0.6$ کمترین قدرت میدان الکتریکی خارجی برای ایجاد شیر بسته مورد نیاز است.



شکل ۱۲-۵ دبی‌های جریان به‌عنوان تابعی از n در قدرت میدان الکتریکی خارجی مختلف

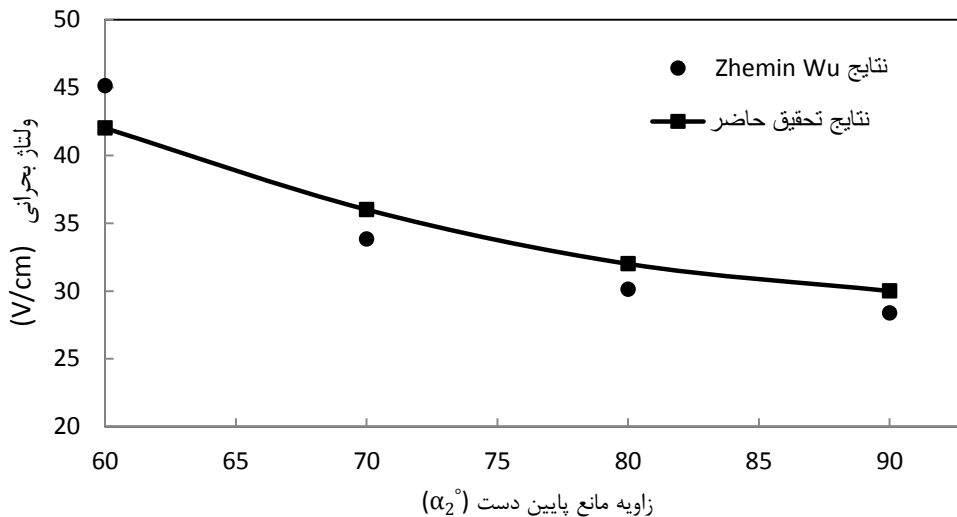


شکل ۵-۱۳ مقدار ولتاژ بحرانی به عنوان تابعی از n

همچنین اثر زوایای مختلف مانع در پایین دست جریان بر روی کنترل جریان سیال غیر-نیوتنی مورد بررسی قرار گرفته است به طوری که زاویه‌ی مانع در طرف بالادست جریان ($\alpha=45^\circ$) و فاصله‌ی بین دو لبه‌ی مانع در قسمت واگرا-همگرا $50\ \mu\text{m}$ ثابت باشد.

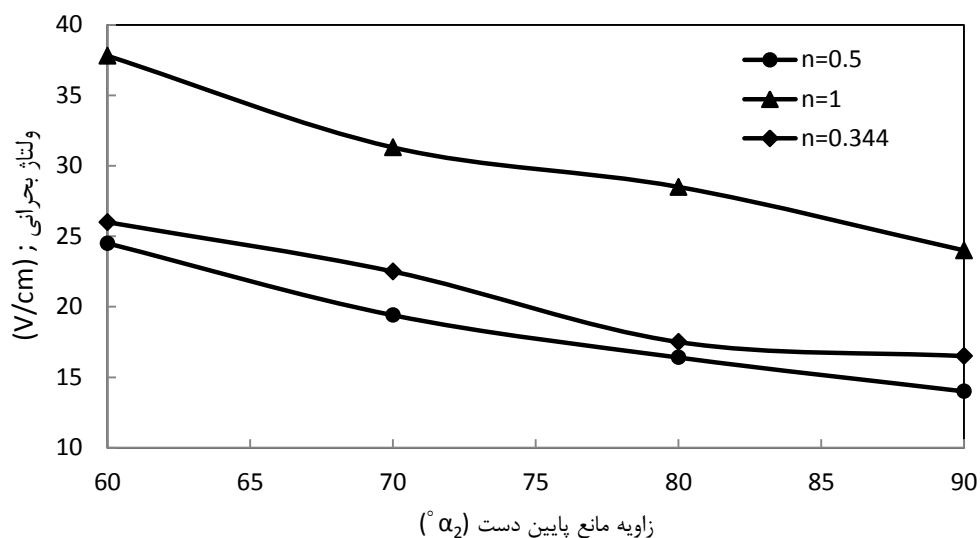
شکل ۵-۱۳ مقایسه نتایج حاصل از مرجع [۳۴] که وابستگی ولتاژ بحرانی به زاویه مانع پایین دست، در جریان سیال نیوتنی را تعیین کرده است، با نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد. حداکثر مقدار خطای نسبی تحقیق حاضر با نتایج زمین وو^{۲۳} مقدار ۷ درصد می‌باشد.

²³ Zhemin Wu



شکل ۵-۱۴ مقایسه ولتاژ بحرانی در زوایای مختلف مانع پایین دست با نتایج مرجع [۳۴]

شکل ۵-۱۴ وابستگی کنترل جریان بر روی زاویه مانع در پایین دست جریان، در توان نمایی مختلف n از سیال غیرنیوتنی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، کنترل جریان به زاویه مانع در طرف پایین دست جریان وابسته است. در یک مقدار n مشخص، یک زاویه بزرگ‌تر مانع در سمت پایین دست جریان، نیاز به قدرت میدان الکتریکی کمتری برای رسیدن به حالت شیر بسته دارد و هرچه زاویه مانع در طرف پایین دست جریان به زاویه مانع در طرف بالادست جریان نزدیک شود، ولتاژ بحرانی افزایش می‌یابد زیرا برای یک جفت مانع متقارن، اثرات پمپ کردن به سمت جلو و عقب بالانس می‌باشد بنابراین نمی‌توان یک جریان با قدرت بازگشتی به سمت عقب را برای بالانس با جریان الکترواستاتیک اصلی که توسط دیواره‌ی نارسانای کانال که در بالادست ایجاد می‌شود، حاصل کرد. از این رو هرچه موانع از حالت تقارن فاصله بگیرند، برای ایجاد یک جریان با قدرت بازگشتی به سمت عقب، به میدان الکتریکی خارجی ضعیف‌تری برای غلبه بر جریان الکترواستاتیک اصلی که توسط دیواره‌های نارسانا کانال ایجاد می‌شود نیاز است.



شکل ۵-۱۵ ولتاژ بحرانی به عنوان تابعی از زاویه مانع پایین دست در توان نمایی n مختلف

۵-۵ نتیجه گیری

در این بخش تاثیر توان نمایی n از سیال غیرنیوتنی بر میزان اختلاط و همچنین کنترل جریان سیال بررسی شده است. به این منظور جریان الکترواستاتیک با بار القا شده در یک میکروکانال با موانع رسانا ایجاد شده است. نتایج نشان می دهد که با افزایش توان نمایی n در یک قدرت میدان الکتریکی ثابت، میزان اختلاط کاهش می یابد. همچنین مشاهده شد، زمانیکه از یک جفت مانع نامتقارن در کانال استفاده شود می توان با تنظیم قدرت میدان الکتریکی اعمالی در درون کانال، جریان سیال را کنترل کرد. با بررسی اثر توان نمایی n بر کنترل جریان، مشاهده شده است که یک مقدار n اکستریم برای دبی جریان عبوری وجود دارد به طوری تا $n=0.6$ دبی خالص جریان کاهش یافته و بعد از آن با افزایش n تا $n=1$ دبی افزایش می یابد. همچنین تاثیر زاویه پایین دست مانع نیز بر کنترل جریان بررسی شده است و این نتیجه حاصل شد که با افزایش زاویه مانع در پایین دست، مقدار ولتاژ بحرانی کاهش پیدا می کند، یعنی به قدرت میدان الکتریکی خارجی کمتری برای ایجاد شیر بسته در سیستم نیاز است.

۶ پیوست: مدل سازی مسئله مورد بررسی در این

پژوهش با نرم افزار کامسول^۵

مدل‌سازی مسئله در این پژوهش که یک میکرو کانال با دو مانع مثلثی می‌باشد، در

نرم‌افزار COMSOL MULTIPHYSICS 5.0 انجام شده است. تمامی معادلات ذکر شده

در فصل ۳، توسط حل گر المان محدود در این نرم‌افزار حل شده است.

مدل‌سازی میدان الکتریکی:

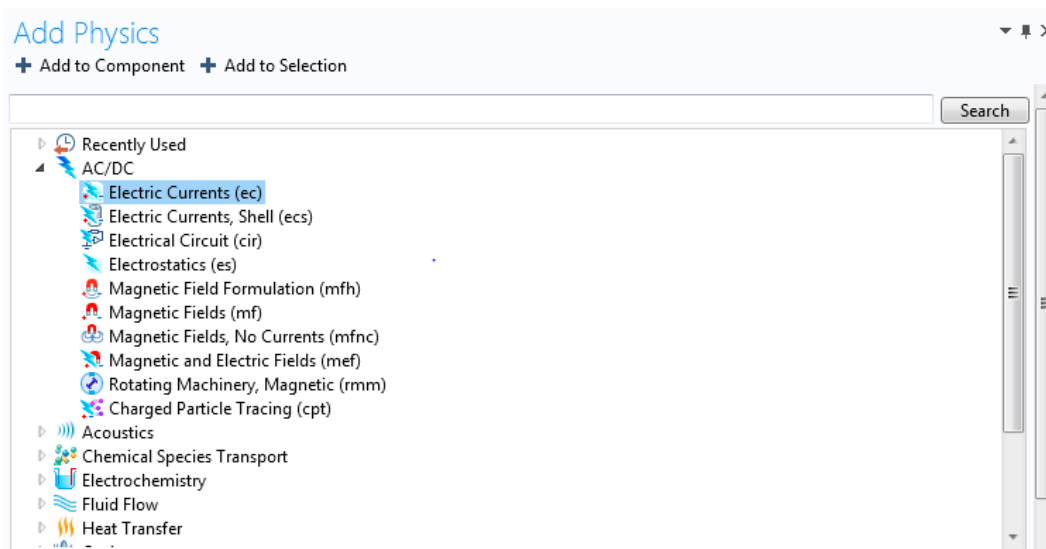
مدل‌سازی جریان الکتریکی در کانال به این علت که عامل ایجاد جریان سیال، جریان الکترواستاتیک است در ابتدا انجام می‌گیرد. برای مدل‌سازی میدان جریان الکتریکی در میکرو کانال، ابتدا باید میدان الکتریکی را توسط ماژول جریان الکتریکی^{۲۴} در نرم‌افزار مدل کنیم. بدین صورت که از منوی اصلی نرم‌افزار گزینه‌ی فیزیک جدید را فعال کرده و ماژول جریان الکتریکی را انتخاب کنیم.

در این ماژول، شرایط مرزی در تمامی دیواره‌های نارسانا و رسانای کانال، به‌غیر از مرز-های ورودی و خروجی به کانال عایق الکتریکی^{۲۵} قرار داده شده است. در مرزهای ورودی، شرط مرزی را بر روی پتانسیل الکتریکی^{۲۶} قرار می‌دهیم و مقدار آن را مطابق مقادیر فصل ۳ که مربوط به میدان الکتریکی می‌باشد، تنظیم می‌کنیم. برای ایجاد اختلاف ولتاژ در طول میکرو کانال، شرط مرزی در خروجی را نیز بر روی پتانسیل الکتریکی قرار می‌دهیم و مقدار آن را صفر می‌گذاریم.

²⁴ Electric Currents

²⁵ Electric Insulation

²⁶ Electric potential

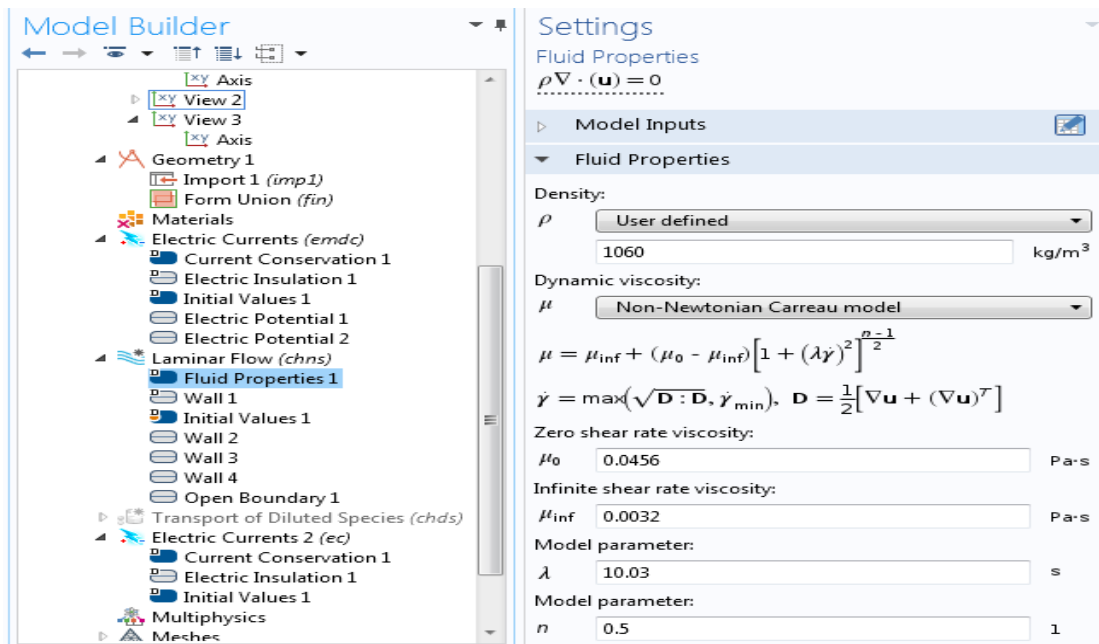


شکل پیوست ۱ ماژول میدان الکتریکی در کامسول

مدل سازی میدان جریان سیال (معادلات پیوستگی و مومنتوم)

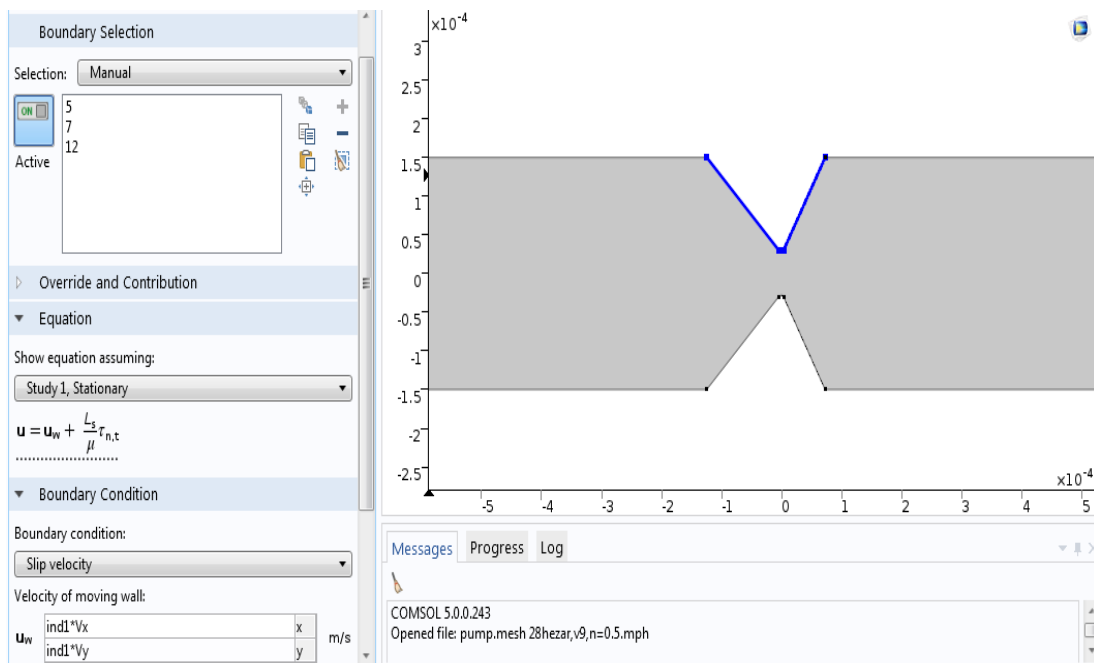
در قسمت مومنتوم سیال تراکم ناپذیر، تنظیمات مربوط به سیال غیرنیوتنی با مدل کاریو در قسمت خواص سیال^{۲۷} انجام می شود. مقادیر مدل با توجه به مقادیر مرجع [۳۹] که برای سیال خون استخراج شده است، انتخاب شده اند. در شکل پیوست ۲، این تنظیمات آورده شده است.

²⁷ Fluid Properties



شکل پیوست ۲ تنظیمات قسمت سیال غیرنیوتنی

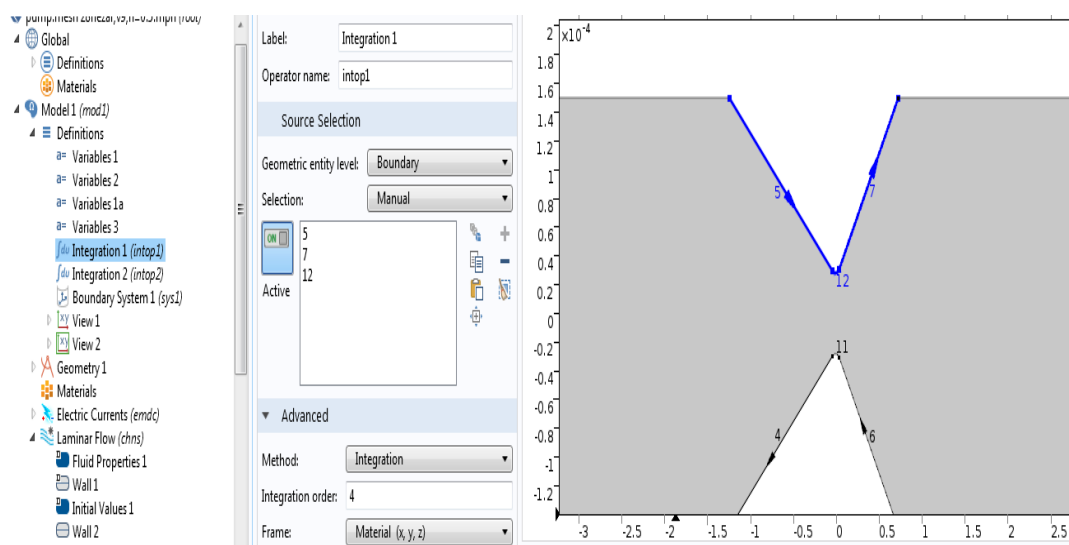
تمامی شرایط مرزی سرعت لغزشی مانند سرعت الکترواسمتیک بر روی دیواره‌های نارسانای کانال و سرعت لغزشی الکترواسمتیک با بار القایی بر روی موانع رسانا نیز در این قسمت اعمال می‌شود.



شکل پیوست ۳ تنظیمات مربوط به دیواره‌های رسانا

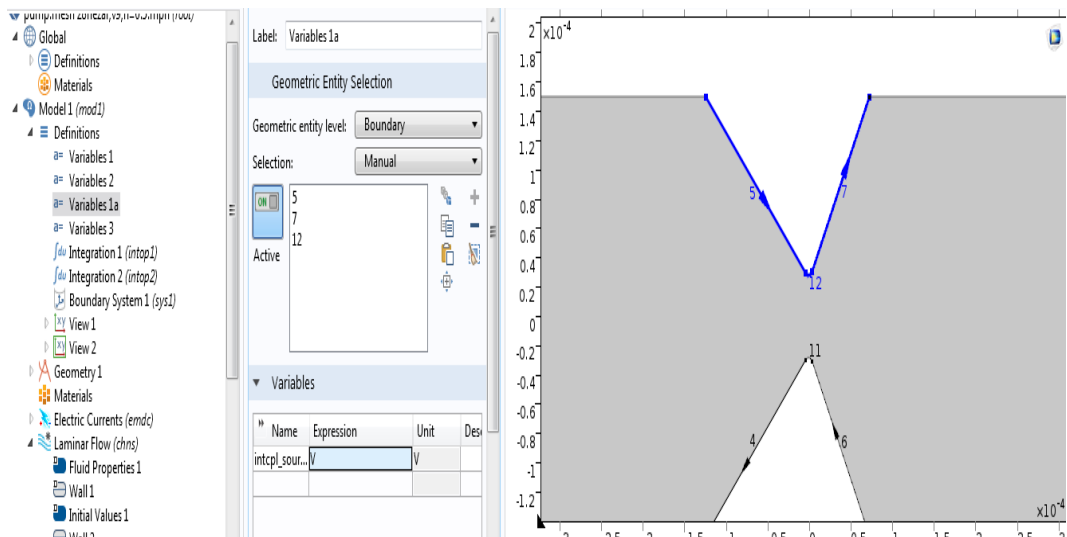
قابل ذکر است که منظور از ind1 در تنظیمات سرعت لغزشی، عبارت $\frac{-\epsilon_0 \epsilon \zeta_{induced}}{\mu}$

می باشد. $\zeta_{induced}$ می بایست مطابق معادله ی ۲-۱۴ ایجاد شود. از طرفی با توجه به معادله- ی ۲-۱۵ باید انتگرال ولتاژ بر روی مانع رسانا محاسبه شده و در معادله ی ۲-۱۴ جایگزین شود تا عبارت $\zeta_{induced}$ محاسبه شود. به این منظور برای محاسبه سرعت لغزشی بر روی موانع مثلثی، ابتدا باید انتگرال ولتاژ بر روی موانع در نرم افزار تعریف گردد. ابتدا در قسمت integration یک انتگرال بر روی هر مانع تعریف می شود.

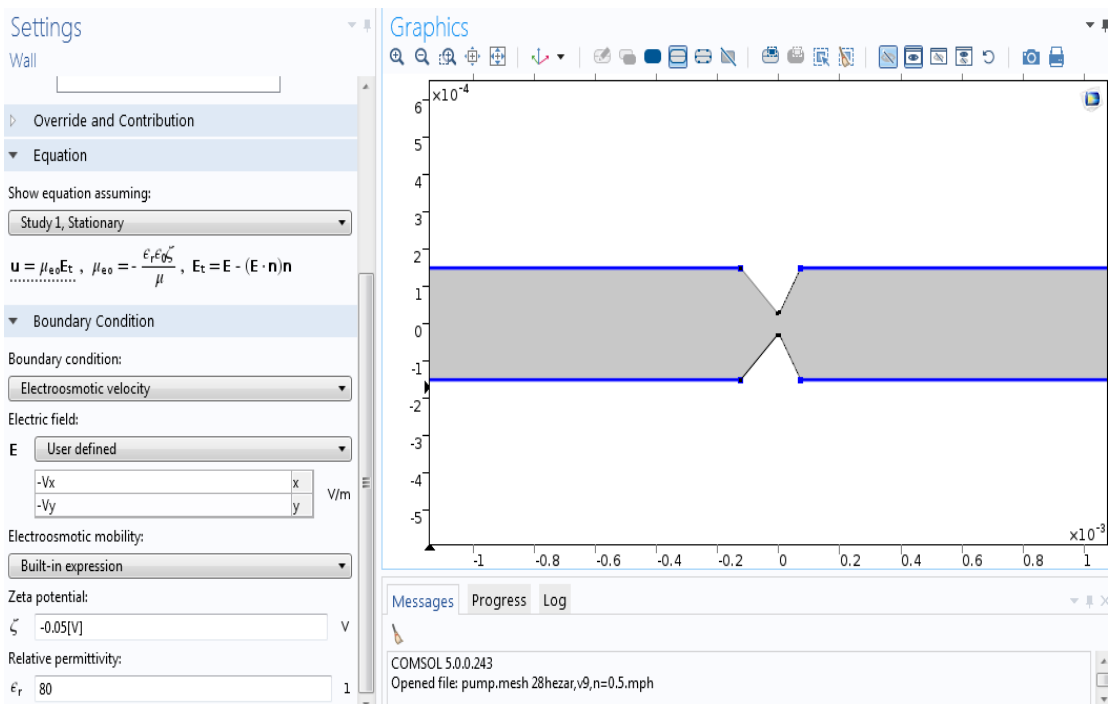


شکل پیوست ۴ تعریف انتگرال بر روی مانع

سپس یک variables ایجاد می کنیم تا مقدار این انتگرال را ولتاژ (V) تعریف کنیم.



شکل پیوست ۵ مقداردهی ولتاژ (V) به انتگرال



شکل پیوست ۶ تنظیمات مربوط به دیواره‌های نارسانا

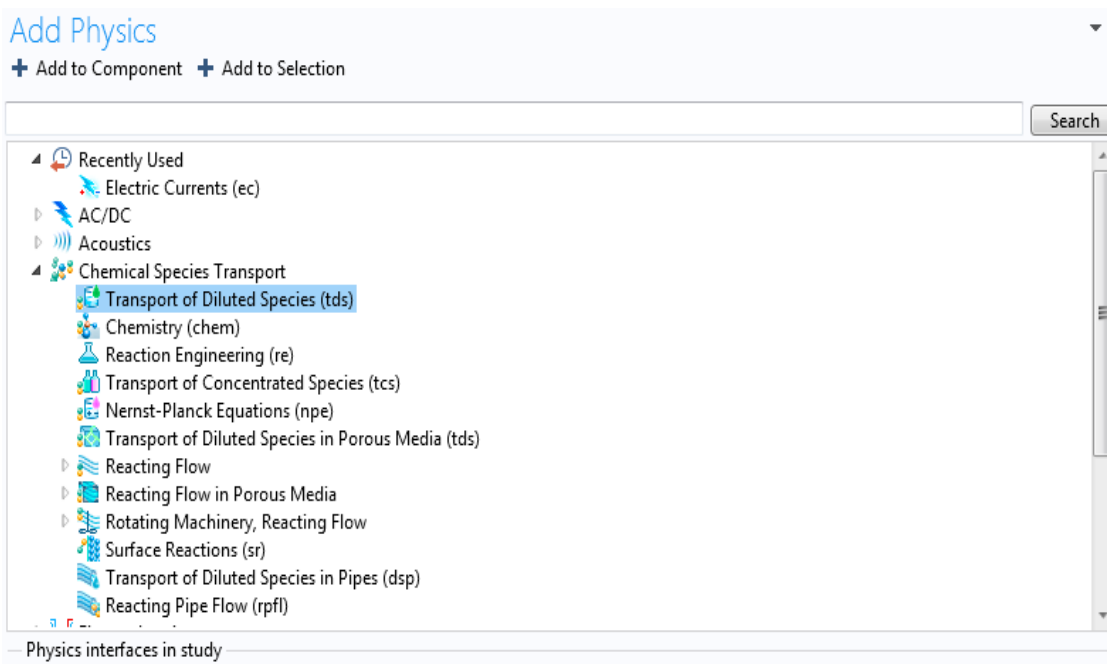
مدل سازی میدان غلظت:

به علت بررسی اختلاط در قسمت اول این پژوهش، میدان غلظت مورد بررسی قرار می-

گیرد. برای مدل سازی میدان غلظت در این نرم افزار، باید از ماژول انتقال ذرات^{۲۸} استفاده کنیم.

این ماژول از نرم افزار مطابق شکل پیوست ۵، به عنوان یک فیزیک جدید به مدل سازی اضافه

می شود.



شکل پیوست ۷ ماژول میدان غلظت در کامسول

معادله‌ی حاکم بر محیط محاسباتی معادله‌ی ۳-۲۲ می باشد که می بایست پارامترهای

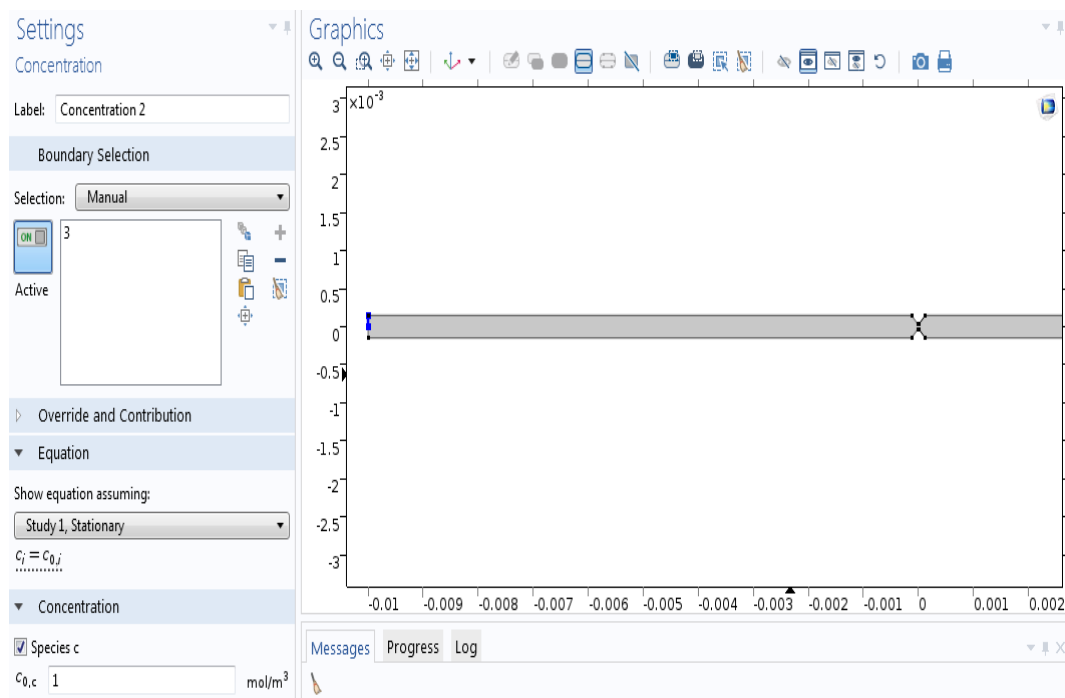
آن را در نرم افزار تعیین کنیم.

$$\nabla \cdot (-D \nabla C) = R - u \cdot \nabla C$$

که در آن $D = 10^{-10} \text{ (m}^2/\text{s)}$ ضریب دیفیوژن، C میدان غلظت، ضریب واکنش $R=0$ است.

²⁸ Transport of Diluted Species

مقدار سرعت در جهت x و y از حل معادلات مومنتوم جایگزین می‌شود. در شکل پیوست ۶، پنجره‌ای از نرم‌افزار که مربوط به شرایط مرزی غلظت ورودی می‌باشد نشان داده شده است.



شکل پیوست ۸ تنظیمات مربوط به شرط مرزی ورودی

روش حل عددی

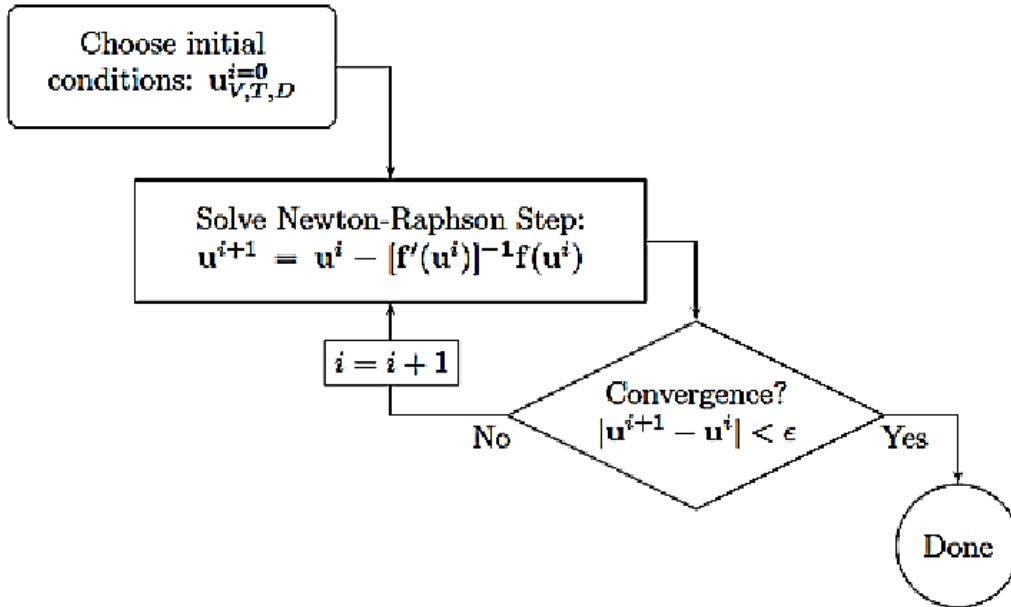
به‌طور کلی برای حل معادلات می‌توان از روش‌های مستقیم (مانند روش حذفی گوس یا تجزیه LU) و روش‌های تکراری استفاده نمود. مسائل خطی و غیرخطی با استفاده از روش‌های مستقیم یا روش‌های تکراری حل می‌شوند. حلگرهای مستقیم مورد استفاده در کامسول در جدول پیوست ۱ بیان شده است که از میان این حلگرها، حلگر پردایزو^{۲۹} یک حلگر سریع و با همگرایی بالا می‌باشد و در این تحقیق نیز از این روش برای حل معادلات استفاده شده است. تمام این حلگرها، روی یک سیستم خطی به شکل $Ax = b$ عمل می‌کنند و از روش مستقیم تجزیه LU روی ماتریس A به منظور محاسبه ضرایب x استفاده می‌شود.

مزایا	کاربرد	نوع حلگر
حلگر مستقیم بسیار قوی است	برای مسائل غیر متقارن	UMFPACK
حلگر مستقیم آهسته که نسبت به حلگر UMFPACK حافظه کمتری اشغال می کند	برای مسائل غیر متقارن و متقارن	SPOOLES
حلگر مستقیم بسیار قوی که نسبت به حلگر UMFPACK حافظه کمتری اشغال می کند	برای مسائل متقارن و غیر متقارن	PARDISO
حلگر مستقیم قوی است	برای مسائل متقارن	CHOLESKY

مسائل چند فیزیک با استفاده از روش های کوپل کامل^{۳۰} و جدا شده^{۳۱} حل می شوند. در این مسئله از روش کوپل کامل استفاده می شود. این حلگر از یک حدس اولیه استفاده می کند و با به کارگیری روش نیوتن-رافسون، مسئله را تا رسیدن به همگرایی تکرار می کند که الگوریتم مورد استفاده در این حلگر، در شکل زیر نشان داده شده است. وقتی مسئله ای با این حلگر حل می شود، نمودار خطای تقریبی در هر تکرار نیوتن-رافسون کاهش می یابد تا به همگرایی برسد. در حل مسائل چند فیزیک و غیرخطی از این روش استفاده می شود.

³⁰ Fully couple

³¹ Segregated



شکل پیوست ۹ الگوریتم مورد استفاده در روش کوپل کامل

مراجع:

- [١] A. Manz, C. S. Effenhauser, N. Burggraf, D. J. Harrison, K. Seiler, and K. Fluri, "Electroosmotic pumping and electrophoretic separations for miniaturized chemical analysis systems," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 4, p. 257, 1994.
- [٢] A. O. El Moctar, N. Aubry, and J. Batton, "Electro-hydrodynamic microfluidic mixer," *Lab on a Chip*, vol. 3, pp. 273-280, 2003.
- [3] A. Manz and H. Becker, *Microsystem technology in chemistry and life sciences*: Springer Science & Business Media, 2003.
- [4] J. Khandurina and A. Guttman, "Bioanalysis in microfluidic devices," *Journal of Chromatography A*, vol. 943, pp. 159-183, 2002.
- [٥] D. R. Reyes, D. Iossifidis, P.-A. Auroux, and A. Manz, "Micro total analysis systems.1. Introduction, theory, and technology," *Analytical chemistry*, vol. 74, pp. 2623-2636, 2002.
- [٦] P.-A. Auroux, D. Iossifidis, D. R. Reyes, and A. Manz, "Micro total analysis systems.2. Analytical standard operations and applications," *Analytical chemistry*, vol. 74, pp. 2637-2652, 2002.
- [٧] M. N. Albarghouthi and A. E. Barron, "Microchannel wall coatings for protein separations by capillary and chip electrophoresis," *adsorption*, vol. 35, p. 2, 2003.
- [٨] Y. Daghighi and D. Li, "Numerical studies of electrokinetic control of DNA concentration in a closed-end microchannel," *Electrophoresis*, vol. 31, pp. 868-878, 2010.
- [٩] V. G. Levich, *Physicochemical Hydrodynamics*. Englewood Cliffs, N.J.,

Prentice-Hall,1962.

[10] I. N. Simonov and S. S. Dukhin, "Theory of electrophoresis of solid conducting particles in case of ideal polarization of a thin diffuse double-layer," vol. 35, pp. 191-193, 1973.

[11] N. I. Gamayunov, G. I. Mantrov, and V. A. Murtsovkin, "Investigation of the flows induced by an external electric field in the vicinity of conducting particles," *J of Colloid*, vol. 54, pp. 26-30, 1992.

[12] A. Ramos, H. Morgan, N. G. Green, and A. Castellanos, "AC electric-field-induced fluid flow in microelectrodes," *Journal of colloid and interface science*, vol. 217, pp. 420-422, 1999.

[13] G. H. Tang, X. F. Li, Y. L. He, and W. Q. Tao, "Electroosmotic flow of non-Newtonian fluid in microchannels," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 157, pp. 133-137, 2009.

[14] Z. Wu, N.-T. Nguyen, and X. Huang, "Nonlinear diffusive mixing in microchannels: theory and experiments," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 14, p. 604, 2004.

[15] Z. Wu and D. Li, "Micromixing using induced-charge electrokinetic flow," *ElectrochimicaActa*, vol. 53, pp. 5827-5835, 2008

[16] Daghighi Y., and Li D., "Numerical study of a novel induced-charge electrokinetic micro-mixer," *Analyticachimicaacta*, vol. 763, pp. 28-37, 2013.

[17] C. L. A. Berli and M. L. Olivares, "Electrokinetic flow of non-Newtonian fluids in microchannels," *Journal of Colloid and Interface science*, vol. 320, pp. 582-589, 2008.

[18] Y. C. Lam, H. Y. Gan, N.-T.Nguyen, and H. Lie, "Micromixer based on viscoelastic flow instability at low Reynolds number," *Biomicrofluidics*, vol. 3, p.

014106, 2009.

[۱۹] M. Hadigol, R. Nosrati, A. Nourbakhsh, and M. Raisee, "Numerical study of electroosmotic micromixing of non-Newtonian fluids," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 166, pp. 965-971, 2011.

[۲۰] A. Afzal and K.-Y. Kim, "Flow and mixing analysis of non-Newtonian fluids in straight and serpentine microchannels," *Chemical Engineering Science*, vol. 116, pp. 263-274, 2014.

[۲۱] A. A. Yazdi, A. Sadeghi, and M. H. Saidi, "Rheology effects on cross-stream diffusion in a Y-shaped micromixer," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 456, pp. 296-306, 2014.

[۲۲] D. J. Laser and J. G. Santiago, "A review of micropumps," *Journal of micromechanics and microengineering*, vol. 14, p. R35, 2004.

[۲۳] N. L. Jeon, D. T. Chiu, C. J. Wargo, H. Wu, I. S. Choi, J. R. Anderson, *et al.*, "Microfluidics section: design and fabrication of integrated passive valves and pumps for flexible polymer 3-dimensional microfluidic systems," *Biomedical Microdevices*, vol. 4, pp. 117-121, 2002

[۲۴] S. C. Terry, J. H. Jerman, and J. B. Angell, "A gas chromatographic air analyzer fabricated on a silicon wafer," *Electron Devices, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 1880-1886, 1979.

[۲۵] M. J. Zdeblick and J. B. Angell, "A microminiature electric-to-fluidic valve," p. 2.

[۲۶] M. Shikida, K. Sato, S. Tanaka, Y. Kawamura, and Y. Fujisaki, "Electrostatically driven gas valve with high conductance," *Microelectromechanical Systems, Journal of*, vol. 3, pp. 76-80, 1994.

- [۲۷] D. J. Harrison, K. Fluri, K. Seiler, Z. Fan, C. S. Effenhauser, and A. Manz, "Micromachining a miniaturized capillary electrophoresis-based chemical analysis system on a chip," *Science-new york then Washington* -, vol. 261, pp. 895-895, 1993.
- [۲۸] Y. Daghighi and D. Li, "Micro-valve using induced-charge electrokinetic motion of Janus particle," *Lab on a Chip*, vol. 11, pp. 2929-2940, 2011.
- [۲۹] D. J. Harrison, A. Manz, Z. Fan, H. Luedi, and H. M. Widmer, "Capillary electrophoresis and sample injection systems integrated on a planar glass chip," *Analytical chemistry*, vol. 64, pp. 1926-1932, 1992.
- [۳۰] T. M. Squires and M. Z. Bazant, "Breaking symmetries in induced-charge electro-osmosis and electrophoresis," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 560, pp. 65-101, 2006.
- [۳۱] V. G. Levich and S. Technica, *Physicochemical hydrodynamics* vol. 689: Prentice-hall Englewood Cliffs, NJ, 1962.
- [۳۲] T. M. Squires and M. Z. Bazant, "Induced-charge electro-osmosis," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 509, pp. 217-252, 2004.
- [۳۳] Dongqing Li," Electrokinetics in Microfluidics", Department of Mechanical & Industrial Engineering, Canada , 2004 .
- [۳۴] Z. Wu, and D. Li, "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.
- [۳۵] Z. Wu, "Nonlinear Induced-charge Electrokinetics," 2008.
- [۳۶] Y. Daghighi, "Induced-Charge Electrokinetic Motion of a Heterogeneous Particle and Its Corresponding Applications," 2013.

[37] R. J. Hunter, *Zeta potential in colloid science: principles and applications* vol. 2: Academic press, 2013.

[38] Z. Wu and D. Li, "Micromixing using induced-charge electrokinetic flow," *Electrochimica Acta*, vol. 53, pp. 5827-5835, 2008.

[39] J. M. C. Pereira, J. P. S. e Moura, A. R. Ervilha, and J. C. F. Pereira, "On the uncertainty quantification of blood flow viscosity models," *Chemical Engineering Science*, vol. 101, pp. 253-265, 2013.

Abstract

In this study, mixing of non-Newtonian fluids in a micro channel with conductive hurdles and flow control of non-Newtonian fluids are investigated numerically. These studies are based on the concept of induced electro-kinetic phenomena. In comparison with classic electro-kinetic, in the induced electro-kinetic, induced charges on the conductive surfaces are not constant. In other word, the induced charges are functions of electric field; therefore, the electro-osmotic velocity has non-linear correlation with of the electric field. Electro-kinetic with induced charges contains special properties which can be used in development of lab on a chip in microfluidic field. For this aim, Finite Element Method (FEM) is used for simulation of flow and concentration fields. In this problem, triangular mesh is created to discretize the computational domain. To validate the presented model, a comparison between Newtonian flow in the presence of the conductive hurdles (available in the literature) and present model is implemented. In the first section of results, in mixing of two Newtonian fluids, the effects of hurdles position, hurdles height, hurdles angles and electric field strength on mixing performance are investigated. When electric field is applied, the vortices are generated around the conductive hurdles. The Results showed that when position and angles of hurdles are constant, by increasing the ratio of hurdles height to the channel width, the mixing efficiency is increased; which is mainly due to the enlarged vortices around the hurdles. In this research, for the first time, mixing of two non-Newtonian fluids (i.e. Carreau model) in presence of two conducting triangle hurdles is analyzed by using of induced electro-kinetic concept. By analyzing the effect of non-Newtonian index (i.e. n) on the performance of mixing, it was observed that decreasing of n leads to increase in mixing efficiency. When fluid becomes more shear-thinning and the length of generated vortex is enlarged : therefore the rate of mixing in the micro channel is increased. Finally, effect of electric field strength, n -index of non-Newtonian fluid and angle of hurdles on flow control in micro channel with conductive asymmetrical hurdles were studied. The obtained results showed when angle of hurdles in downstream is close to angle of hurdles in upstream, larger critical electric field strength is needed to achieve a zero flow rate.

Keyword: mixing-flow control- non-Newtonian fluid- induced charge -
electrokinetics(ICEK)



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical Engineering

MSc Thesis in Mechanical Engineering-convert of energy

**Numerical solution of induced charge electrokinetic in a
microchannel with Non-Newtonian Fluid**

By: Mahsa Mostafavi

**Supervisor:
Dr. M. Nazari**

February 2016