

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه حرارت و سیالات

پایان نامه کارشناسی ارشد

مدلسازی جریان سیال در یک کانال میکرو
با استفاده از الکتروکنتیک غیرخطی

احمد حدادان

استاد راهنما:

دکتر محسن نظری

استاد مشاور:

دکتر یاسمن دقیقی

شهریور 1394



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

باسمه تعالی

شماره:
تاریخ:
ویرایش:

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانج / آقای احمد حدادان رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان مدلسازی جریان سیال در یک کانال مایکرو با استفاده از الکتروکننتیک غیر خطی که در تاریخ ۱۳۹۴/۶/۲۳ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد: شماره دانشجویی : ۹۱۲۴۴۹۴

قبول (با درجه : خوب امتیاز ۱۷/۸۸) دفاع مجدد مردود

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

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر محسن نظری	دانشیار	
۲- استاد مشاور	-	-	-
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	مهندس احمد مددی	مربی	
۴- استاد ممتحن	دکتر محمد محسن شاهمردان	دانشیار	
۵- استاد ممتحن	دکتر علی جباری مقدم	دانشیار	

رئیس دانشکده: ت. سرمدان امضاء



تقدیم به آنان که بهترین اند:

پدر بزرگوالم،

" اسوه سخت‌کوشی و ایثار که سختی‌های زندگی را به دوش کشید تا زندگی را زیباتر نظاره کنم."

مادر مهربانم،

" اسوه صبر و مهربانی که با دعا و بذل عطاقت، مسیر زندگی را برایم هموار نمود."

همسر فداکارم،

" که با قلبی آکنده از عشق و معرفت محیطی سرشار از آرامش و آسایش را برایم فراهم نمود."

تشکر و قدر دانی

من لم یشکر المخلوق، لم یشکر الخالق

حمد و سپاس یکتای بی همتا را که لطفش بر ما عیان است، ادای شکرش را هیچ زبان و دریای فضلش را هیچ کران نیست و اگر در این وادی هستیم، همه محبت اوست. الهی؛ ای مهربانتر از ما به ما، از تو می‌خواهم همه‌ی کسانی را که حتی ذره‌ای در انجام این امر مرا یاری نموده‌اند، در سایه لطف و محبت بی کرانت، سلامت، شادکام و موفق بداری.

از استاد گرامیم جناب آقای دکتر محسن نظری بسیار سپاسگذارم که در طول نگارش این مجموعه با راهنمایی‌های عالمانه و بجایشان، سکندار شایسته‌ای در هدایت این پایان نامه بوده و همواره از نظرات کارشناسانه‌شان، بهره‌جستم.

از سرکار خانم دکتر یاسمن دقیقی استادیار دانشگاه واترلو کانادا به دلیل مشاوره‌ها و راهنمایی‌های بی‌چشمداشت ایشان که بسیاری از سختی‌ها را برایم آسانتر نمودند.

پدر، مادر و همسر عزیزم، از زحمات بی دریغ و بی منت شما متشکرم. همیشه نیازمند محبت، لطف و دعای خیر شما هستم.

تعهد نامه

اینجانب **احمد حدادان** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی مکانیک** در گرایش **تبدیل انرژی** دانشکده **مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود** نویسنده پایان نامه **مدلسازی جریان سیال در یک کانال مایکرو با استفاده از الکتروکنتیک غیرخطی** 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.

چکیده

اختلاط یک مرحله‌ی مهم در عیارگیری‌های ترکیبی به خصوص در زمینه‌های بیوپزشکی و شیمی می‌باشد. در کانال‌هایی با ابعاد میکرومتر، عدد رینولدز خیلی کمتر از یک می‌باشد. بنابراین، فرآیند اختلاط در سیستم‌های میکرو (در غیاب هرگونه نیروی بهم‌زن) تنها متکی بر دیفیوژن است که معمولاً به زمان طولانی برای رسیدن به نتایج مطلوب نیاز دارد و در اکثر موارد با شکست مواجه می‌شود. روش‌هایی برای افزایش اختلاط در سیستم‌های میکرو در نظر گرفته شده است که برخی از آنها بر مبنای هندسه‌های پیچیده قرار داده شده که به روش‌های ساخت و تولید ویژه نیاز دارد و یا اینکه باید بخش‌های مکانیکی به آن اضافه گردد. در این پژوهش به معرفی یک اختلاط‌کننده‌ی جدید می‌پردازیم که بر مبنای حرکت جریان به واسطه‌ی اختلاف فشار و الکتروکنتیک با بار القایی عمل می‌کند. در اثر اعمال اختلاف فشار بر دو سر ورودی و خروجی کانال اصلی، دو جریان اصلی به ورودی کانال وارد می‌شوند. هدف این سیستم اختلاط کامل این دو سیال می‌باشد. کانال اصلی توسط دو کانال در اطراف خود احاطه شده (که بطور پیوسته توسط الکترولیت پر می‌باشد) و میدان الکتریکی به دو طرف این کانال‌های جانبی اعمال شده است. دو مانع رسانا بر روی دیواره‌های بالایی این کانال‌های جانبی تعبیه شده است. در آن منطقه، بر روی دیواره‌ی مشترک هر کدام از کانال‌های جانبی و کانال اصلی، یک غشای انعطاف پذیر قرار گرفته است. این غشاها می‌توانند به طرف میانه‌ی کانال اصلی حرکت کرده و نرخ جریان را کنترل و به اختلاط کمک کنند. زمانیکه میدان الکتریکی اعمال می‌شود، گردابه‌هایی را از اطراف موانع رسانا القا می‌کند و نیرویی را به غشاها اعمال می‌کند که آنها را به جلو فشار می‌دهد. بنابراین سطح متقاطع کانال اصلی تغییر می‌کند. با اعمال میدان الکتریکی متغیر با زمان در سیستم، حرکت پالسی در جابجایی غشا ایجاد می‌شود. در این پژوهش نشان می‌دهیم که این حرکت باعث افزایش در فرآیند اختلاط می‌شود و همگنی مخلوط در خروجی مخلوط کن میکرو را بهبود می‌بخشد.

در این پژوهش تأثیرات میدان الکتریکی، فشار اعمالی، محل و ارتفاع موانع، الاستیسیته‌ی غشا بر روی راندمان اختلاط را مورد بررسی قرار داده ایم. همچنین، این مخلوط کن برای یک مورد با چندین موانع رسانا مورد بررسی قرار گرفته و نتایج نشان می‌دهد که افزایش تعداد موانع رسانا راندمان اختلاط را بهبود خواهد داد.

کلمات کلیدی: اختلاط - الکترواسمتیک با بار القایی - میدان الکتریکی - مانع

1	فصل اول مقدمه	1
4	1.1.1 الکتروکنتیک کلاسیک	4
5	2.1.1 الکتروکنتیک با بار القا شده (غیرخطی)	5
9	فصل دوم پیشینه‌ی تحقیق	9
10	1.2 تعریف مسأله‌ی مورد بحث در این پایان نامه	10
10	2.2 نوآوری تحقیق	10
11	3.2 مبانی الکتروکنتیک	11
11	1.3.2 لایه مضاعف الکتریکی و زتاپتانسیل	11
14	2.3.2 الکترواسمتیک و الکتروفوریتیک	14
	4.2 کنترل جریان و اختلاط توسط جریان الکتروکنتیک با بار القایی در یک کانال با ابعاد میکرو با یک جفت مانع مثلثی رسانا [17]	16
16	5.2 مبانی جریان الکتروکنتیک با بار القا شده [17]	16
	1.5.2 جریان الکتروکنتیک با بار القایی در یک کانال با ابعاد میکرو با یک جفت مانع مثلثی رسانا و مدل ریاضیاتی [17] 22	
28	2.5.2 میدان جریان با تولید گردابه‌های میکرو [17]	28
29	3.5.2 افزایش اختلاط ذرات [16]	29
30	4.5.2 کنترل جریان [17]	30
38	1.4.5.2 نتیجه‌گیری	38
39	فصل سوم مدلسازی کانال‌ها، جریان سیال و معادلات حاکم بر آن	39
40	1.3 مقدمه	40
41	2.3 خصوصیات فیزیکی مدل	41
41	1.2.3 ابعاد کانال‌ها، غشاها و موانع مدلسازی شده	41
42	2.2.3 ابعاد و موقعیت موانع	42
42	3.2.3 دیواره‌های میانی و غشاها	42
43	3.3 روابط و معادلات دو بعدی حاکم بر مدل	43
44	1.3.3 میدان الکتریکی جریان مستقیم در یک محیط دی الکتریک	44
45	4.3 میدان جریان سیال	45
45	1.4.3 معادلات حاکم بر جریان سیال و شرایط مرزی در کانال‌های بالا و پایین	45
46	2.4.3 معادلات حاکم بر جریان سیال و شرایط مرزی در کانال میانی	46
47	5.3 میدان غلظت	47
48	6.3 مدلسازی میدان جریان سیال	48
48	1.6.3 مدلسازی میدان جریان در کانال‌های بالا و پایینی	48
50	2.6.3 مدلسازی میدان جریان در کانال میانی	50

52	7.3	مدلسازی جابجایی غشاها
53	8.3	مدلسازی میدان غلظت
54	9.3	توسعه‌ی مدل اول-مدلسازی کانال با 4 غشا(مدل دوم)
56	10.3	خلاصه
57	4	فصل چهارم نتایج و مباحث
58	1.4	معتبرسازی
59	1.1.4	اگر زوایای داخلی مثلث $\alpha_1 = \alpha_2 = 45^\circ$ باشد
60	2.1.4	اگر زوایای داخلی مثلث $\alpha_1 = 45^\circ$ و $\alpha_2 = 60^\circ$ باشد
65	2.4	مسأله‌ی تعریف شده در این پژوهش
65	3.4	نمودارها و نتایج حاصل شده از حل مدل‌ها
66	1.3.4	کانال ساده
68	2.3.4	کانال با دو غشای انعطاف پذیر
68	1.2.3.4	پتانسیل الکتریکی
69	2.2.3.4	میدان غلظت
71	3.2.3.4	میدان جریان
72	3.3.4	کانال با چهار غشای انعطاف پذیر
74	4.4	توزیع زتاپتانسیل در طول سطح مانع رسانا در مدل اول
75	5.4	تغییر بازده اختلاط تحت شرایط مختلف
80	6.4	جابجایی غشا بر حسب زمان
81	7.4	مطالعه پارامترها
81	1.7.4	تغییرات مدول یانگ در مدل اول (کانال با دو غشا)
83	2.7.4	تغییرات در میدان الکتریکی اعمالی
83	1.2.7.4	تغییر پارامترها در مدل با دو غشا
85	2.2.7.4	تغییر پارامترها در مدل با چهار غشا
86	3.7.4	کنترل جریان در مدل اول (کانال با دو غشا)
87	1.3.7.4	سرعت ورودی کانال میانی در مدل‌های مذکور
90	8.4	کاربردهای مدل ارائه شده
92	9.4	نتیجه گیری
93		پیوست
93		الف) مدلسازی طرح ارائه شده در این پژوهش در نرم افزار
99		ب) روش حل مدل مورد بررسی در این پژوهش در نرم افزار
101		منابع و مراجع

- شکل 1-1 فرآیند باردار شدن یک ذره‌ی رسانا با شکل دلخواه تحت یک میدان الکتریکی اعمالی یکنواخت 7
- شکل 1-2 خطوط میدان الکتریکی و جریان الکتروکنتیک با بار القایی در اطراف یک ذره‌ی رسانا 8
- شکل 1-2 شماتیک دیاگرام لایه مضاعف الکتریکی، صفحه برشی و زتاپتانسیل [23] 13
- شکل 2-2 نمایش شماتیک جریان الکترواستمیک و الکتروفورسیس 15
- شکل 3-2 زتاپتانسیل القایی بر روی یک سطح استوانه‌ای دایروی رسانا [17] 21
- شکل 4-2 میدان جریان الکتروکنتیک با بار القایی در اطراف یک جسم رسانا [17] 22
- شکل 5-2 دیاگرام شماتیک کانال میکرو با یک جفت مانع مثلثی [17] 23
- شکل 6-2 میدان الکتریکی در حالت پایدار در قسمت همگرا-واگرا و بار القایی بر روی موانع رسانا [17] 24
- شکل 7-2 توزیع زتاپتانسیل القایی در طی سطح مانع مثلثی رسانا [17] 25
- شکل 8-2 میدان‌های جریان در کانال با موانع رسانا و نارسانا. [17] 30
- شکل 9-2 میدان‌های جریان با موانع موجود. (a) یک جفت از موانع نارسانا. (b) یک جفت از موانع رسانا. [17]. 31
- شکل 10-2 اثر بالانس شده‌ی پمپ‌کردن در یک جفت از موانع مثلثی رسانای متقارن. [17] 31
- شکل 11-2 اثر پمپ‌کردن به سمت عقب در یک جفت مانع مثلثی نامتقارن. [17] 32
- شکل 12-2 میدان‌های جریان در نزدیکی مانع مثلثی نامتقارن تحت میدان‌های الکتریکی مختلف [17] 34
- شکل 13-2 دبی‌های جریان به عنوان تابعی از قدرت میدان الکتریکی اعمالی برای کانال‌های میکرو [17] 36
- شکل 14-2 قدرت میدان الکتریکی بحرانی که با زاویه‌ی مانع در طرف پایین دست جریان تغییر می‌کند. [17] ... 36
- شکل 15-2 دبی‌های جریان با فواصل مختلف بین دو مانع و در زوایای ثابت مانع [17] 37
- شکل 16-2 قدرت میدان الکتریکی بحرانی که با فاصله‌ی بین دو مانع تغییر می‌کند. [17] 37
- شکل 1-3 کانال‌های مدل سازی شده شامل سه کانال ، 2 مانع و 2 غشا 40
- شکل 2-3 ابعاد کلی کانال‌های مدل‌سازی شده با دو مانع و دو غشا 41
- شکل 3-3 ابعاد و موقعیت موانع موجود در کانال بالا و پایینی 42
- شکل 4-3 ابعاد و موقعیت دیواره‌های غشای موجود در پایین کانال بالایی 43
- شکل 5-3 کانال‌های مدل سازی شده شامل سه کانال ، 4 مانع و 4 غشا 54
- شکل 6-3 ابعاد و موقعیت موانع موجود در کانال بالا و پایینی 55
- شکل 1-4 هندسه مورد استفاده در مرجع [17] 58
- شکل 2-4 زوایای مورد مطالعه در مرجع [17] 58
- شکل 3-4 مقایسه قدرت میدان الکتریکی بر روی سطح مانع مثلثی در مدل‌سازی صورت گرفته با مرجع [17] .. 59
- شکل 4-4 مقایسه زتاپتانسیل القایی بر روی سطح مانع مثلثی در مدل‌سازی صورت گرفته با مرجع [17] 59
- شکل 5-4 مقایسه سرعت لغزشی القایی بر روی سطح مانع مثلثی در مدل‌سازی صورت گرفته با مرجع [17] 60
- شکل 6-4 مقایسه قدرت میدان الکتریکی بر روی سطح مانع مثلثی در مدل‌سازی صورت گرفته با مرجع [17] .. 60
- شکل 7-4 مقایسه زتاپتانسیل القایی بر روی سطح مانع مثلثی در مدل‌سازی صورت گرفته با مرجع [17] 61
- شکل 8-4 مقایسه سرعت لغزشی القایی بر روی سطح مانع مثلثی در مدل‌سازی صورت گرفته با مرجع [17] 61
- شکل 9-4 خطوط جریان سیال در نزدیکی مانع رسانا . مرجع [17] 62

- شکل 4-10 خطوط جریان سیال در نزدیکی مانع رسانا در مدلسازی انجام شده.....62
- شکل 4-11 خطوط جریان سیال به همراه کانتور توزیع غلظت در نزدیکی مانع رسانا.....62
- شکل 4-12 خطوط جریان سیال در اطراف مانع مثلثی با زوایای $\alpha_1 = 45^\circ$, $\alpha_2 = 60^\circ$63
- شکل 4-13 خطوط جریان سیال در اطراف مانع مثلثی با زوایای $\alpha_1 = 45^\circ$, $\alpha_2 = 60^\circ$63
- شکل 4-14 خطوط جریان سیال در اطراف مانع مثلثی با زوایای $\alpha_1 = 45^\circ$, $\alpha_2 = 60^\circ$64
- شکل 4-15 خطوط جریان سیال در اطراف مانع مثلثی با زوایای $\alpha_1 = 45^\circ$, $\alpha_2 = 60^\circ$64
- شکل 4-16 میدان جریان سیال در کانال ساده.....66
- شکل 4-17 میدان غلظت در کانال ساده در ناحیه ابتدایی کانال.....67
- شکل 4-18 میدان غلظت در کانال میانی به همراه دیواره‌های غشای انعطاف پذیر.....69
- شکل 4-19 گردابه‌های ایجاد شده و خطوط جریان سیال در ناحیه ی موانع رسانا در حداکثر ولتاژ (t=45 s).....71
- شکل 4-20 میدان غلظت در ناحیه اول کانال میانی به همراه دیواره‌های انعطاف پذیر غشا در t=45 s.....72
- شکل 4-21 میدان غلظت در ناحیه دوم کانال میانی به همراه دیواره‌های انعطاف پذیر غشا.....73

28.....	جدول 1-2 ثابت های مورد استفاده در شبیه سازی عددی
49.....	جدول 1-3 مشخصه های سیال الکترولیت موجود در کانال های بالا و پایین
51.....	جدول 2-3 ثوابت و شرایط مرزی برای مدل سازی جریان سیال در کانال میانی
52.....	جدول 3-3 ثوابت و شرایط موجود در قسمت کرنش صفحه ای برای نواحی محاسباتی مدل
75.....	جدول 1-4 پارامترهای خروجی مختلف بر حسب تغییر زمان در مدل اول (کانال با دو غشا)
83.....	جدول 2-4 پارامترهای مختلف خروجی در اثر تغییر ولتاژ در دو سر کانال های بالا و پایین در $t=45s$
89.....	جدول 3-4 حداکثر سرعت در مقطع ورودی کانال میانی در لحظه $t=45 s$
90.....	جدول 4-4 عدد رینولدز جریان ورودی در کانال میانی در لحظه $t=45 s$

فهرست نمودارها

صفحه

- نمودار 1-4 منحنی ولتاژ اعمال شده در مقطع ورودی کانال‌های بالا و پایین 66
- نمودار 2-4 غلظت در مقطع خروجی کانال ساده 67
- نمودار 3-4 غلظت در مقطع خروجی کانال میانی در مدل کانال با 2 غشا در لحظه $t=45$ s 70
- نمودار 4-4 غلظت در مقطع خروجی کانال میانی در مدل کانال با 4 غشا در لحظه $t=45$ s 73
- نمودار 5-4 توزیع زتاپتانسیل القایی بر روی سطح رسانای مانع در لحظه $t=45$ s 74
- نمودار 6-4 بازده اختلاط در مقطع خروجی کانال میانی در مدل با 2 غشا بر حسب زمان 76
- نمودار 7-4 بازده اختلاط در مقطع خروجی کانال میانی در مدل با 4 غشا بر حسب زمان 77
- نمودار 8-4 نمودار مقایسه‌ای بازده اختلاط در طول سه کانال مورد نظر در لحظه $t=45$ s 78
- نمودار 9-4 بازده اختلاط در مقطع خروجی کانال ساده و همچنین کانال میانی در 2 مدل ارائه شده 79
- نمودار 10-4 جابجایی غشا متحرک بر حسب زمان در مدل با 2 غشا 80
- نمودار 11-4 بازده اختلاط بر حسب مدول یانگ در خروجی کانال میانی در مدل با 2 غشا (در $t=45$ s) 81
- نمودار 12-4 جابجایی غشای انعطاف پذیر بر حسب مدول یانگ در مدل با 2 غشا در لحظه $t=45$ s 82
- نمودار 13-4 بازده اختلاط بر حسب تغییر پارامتر A در مقطع خروجی کانال میانی در مدل با 2 غشا 84
- نمودار 14-4 بازده اختلاط بر حسب تغییر پارامتر A در مقطع خروجی کانال میانی در مدل با 4 غشا 85
- نمودار 15-4 سرعت متوسط در خروجی کانال میانی بر حسب تغییر پارامتر A در مدل با 2 غشا (در $t=45$ s) .. 86
- نمودار 16-4 حداکثر سرعت در مقطع ورودی کانال‌های میانی بر حسب زمان 88

فهرست علائم

	علائم لاتین
ارتفاع کانال میانی	h
طول کانال	L
سرعت سیال	\vec{U}
سرعت لغزشی الکترواسمتیک بر روی دیواره‌های نارسانای کانال	$\vec{U}_{slip,w(C)}$
سرعت لغزشی الکترواسمتیک بر روی دیواره‌های رسانیای کانال (دیواره‌های موانع)	$\vec{U}_{slip,w(NC)}$
سرعت الکتروفورتیک	\vec{U}_{ep}
سرعت الکترواسمتیک	\vec{U}_{eo}
بار بنیادی الکترون $1.602 \times 10^{-19}C$	E
مقدار والانس یونی	Z
گرادیان فشار	∇P
سطح رسانا	S
ثابت دی الکتریک در محیط	ε
ثابت دی الکتریک در خلأ	ε_0
ثابت دی الکتریک، $\varepsilon_w = \varepsilon_0 \times \varepsilon$	ε_w
پتانسیل الکتریکی اعمالی	ϕ_e
پتانسیل الکتریکی ثابت	ϕ_c
میدان الکتریکی خارجی اعمال شده	$\vec{E}_{applied}(\vec{E}_e)$
میدان الکتریکی القایی محلی	$\vec{E}_{induced}(\vec{E}_i)$
طول صفحه ای دیبای	λ_D
پارامتر دیبای هاگل ¹	κ
ضخامت لایه مضاعف الکتریکی	κ^{-1}
ثابت بولتزمن $1.38 \times 10^{-23}J/K$	K_B
لزجت سیال	μ
موبیلیتی الکترواسمتیک	μ_{eo}

¹ Debye Huckel

موبیلیتی الکتروفورتیک	μ_{ep}
نیروی حاصله شده که بر روی غشا اعمال می شود	\vec{F}_{total}
نیروی هیدرودینامیک عمل کننده بر روی غشا توسط جریان سیال در ناحیه بیرونی لایه مضاعف الکتریکی	\vec{F}_{h_out}
نیروی هیدرودینامیک عمل کننده بر روی غشا توسط جریان سیال در ناحیه داخلی لایه مضاعف الکتریکی	\vec{F}_{h_in}
نیروی هیدرودینامیکی	\vec{F}_h
نیروی الکترواستاتیکی	\vec{F}_E
زتا پتانسیل	ζ
زتا پتانسیل اولیه	ζ_0
زتا پتانسیل بر روی دیواره ی کانال	ζ_w
زتا پتانسیل بر روی بخش نارسانای ذره ی ناهمگن	ζ_{P-NC}
زتا پتانسیل القایی بر روی سطح رسانا (دیواره ی مانع)	$\zeta_{induced}$
چگالی سیال	ρ
چگالی بار آزاد	ρ_e
غلظت خط جریان آم	C_i
ضریب دیفیوژن	D

لیست اختصارات

AC-EOF	AC electro-osmotic flow
C	Conducting
CHP	Circular Heterogeneous Particle
DC-ICEK	DC induced-charge electrokinetics
DEP	Dielectrophoresis
EDL	Electric double layer
EK	Electrokinetics
EP	Electrophoretic
EO	Electro-osmotic
EOF	Electro-osmotic Flow
ICEK	Induced-charge electrokinetics
ICEP	Induced-charge electrophoretic
ICEO	Induced-charge electro-osmotic
LOC	lab-on-a-chip
N/C	Non-conducting
THP	Triangular Heterogeneous Particle

1

فصل اول

مقدمه

مقدمه

اثر متقابل بین میدان الکتریکی اعمال شده (جریان مستقیم و یا جریان متناوب) و لایه مضاعف الکتریکی² که بر روی سطح هر جسم جامد تشکیل می شود را الکتروکنیتیک³ می نامند. الکتروکنیتیک یکی از قدیمی ترین زمینه های مطالعه در علوم سطح و کلوییدی می باشد، اما با این وجود پیشرفت ها در تکنولوژی منظرهای جدیدی را برای وارد کردن الکتروکنیتیک به سیال در مقیاس میکرو و کاربردهای آزمایشگاه بر روی تراشه⁴ مانند پمپ کردن، ایجاد اختلاط، جداسازی پروتئین و یا مولکولی و دیگر موارد گشوده است.

در طی دهه گذشته، پیشرفت قابل توجهی در زمینه ی سیستم های آنالیز کلی در ابعاد میکرو و یا وسایل آزمایشگاه روی تراشه حاصل شده است [1-5]. ابزارهای آزمایشگاه بر روی تراشه اغلب پدیده های فیزیکی جدید را شامل می شوند و فرآیندهای جدیدی که نیروهای مهم در ابعاد میکرو بر آنها حکم فرماست. انتقال کنترل شده ی سیال و نمونه های شیمیایی و زیست شناختی یکی از مسائل مهم در ابزارهای آزمایشگاه بر روی تراشه می باشد.

روش های الکتروکنیتیک که الکترواسمیس و الکتروفورسیس را شامل می شود، نقش های مهم در ابزارهایی که با سیال در ابعاد میکرو کار می کنند، ایفا می کنند. الکترواسمیس و الکتروفورسیس به ترتیب به حرکت سیال و ذره در یک میدان الکتریکی اعمالی باز می گردند و براساس عکس العمل متقابل بار الکترواستاتیک در فصل مشترک جامد و سیال با میدان الکتریکی خارجی اعمالی می باشد. این پدیده ها به طور وسیعی در پمپ کردن [۶]، انجام اختلاط [7-8]، جداسازی پروتئین و یا مولکول [9-10]، غلظت DNA و سلولی [11-12]، دسته بندی بر روی صفحات آزمایشگاه بر روی تراشه و ... مورد استفاده قرار می گیرد.

²Electric Double Layer (EDL)

³ Electrokinetics (EK)

⁴ Lab-on-a-Chip (LOC)

الکترواسمیس به علت پیشرفت‌های قابل توجهش به طور گسترده در شیوه‌ی پمپ‌کردن جریان سیال به وسیله‌ی اختلاف فشار متعارف، مورد استفاده قرار می‌گیرد که در آن نیاز به قسمت‌های حرکتی مکانیکی نبوده و کنترل و تعویض جهت جریان در آن آسان می‌باشد. به‌طور کلی، در وسایلی که با سیال در ابعاد میکرو کار می‌کنند به علت سرعت پایین جریان‌هایی که توسط الکتروکنتیک ایجاد می‌شود و مقیاس طول مشخصه‌ی کوچک⁵، عدد رینولدز کمتر از $1 \ll R_e$ و جریان لایه‌ای می‌باشد. در نتیجه اختلاط در اینگونه جریان‌های لایه‌ای با خطوط جریان موازی چندگانه تنها توسط عامل نفوذ انجام می‌شود که مشکلی است برای موقعیت‌هایی که به اختلاط سریع در محلول‌های مختلف در کانال‌هایی با ابعاد میکرو نیاز داریم.

به منظور کنترل جریان در کانال‌هایی با ابعاد میکرو، شیرها و پمپ‌های غشایی در شیوه‌های عملکردی و تحریک گوناگون مورد استفاده قرار می‌گیرند که می‌توان به تحریک به وسیله‌ی پیزوالکتریک، الکترواستاتیک و ترمونیوماتیک در سیلیکون، شیشه و برخی از ابزارهای پلاستیکی اشاره کرد که این مکانیزم‌ها به تکنیک‌های ساخت پیچیده‌ای نیاز دارد تا بتوان قسمت‌های متحرک را به سیستم‌هایی که با سیال در ابعاد میکرو کار می‌کنند، معرفی کنیم. جریان الکترواسمیتیک، کانال با طراحی و ساخت ساده را شامل می‌شود و نیاز به شیرهای مکانیکی ندارد با این حال کنترل جریان با استفاده از جریان الکترواسمیتیک می‌تواند پیچیدگی بیشتری داشته‌باشد، زیرا نیاز به منابع انرژی چندگانه دارد که در بین این منابع نیاز به تغییرات ولتاژ وابسته به زمان می‌باشد. در جستجو بین محلول‌های پتانسیلی به‌منظور چالش‌های ذکر شده، به نوع جدیدی از جریان الکتروکنتیک می‌رسیم که آن را الکترواسمیس با بار القا شده⁶ می‌نامند. ویژگی قابل توجه آن در جریان‌های چرخشی با ابعاد میکروبی است که در نزدیکی یک جسم رسانا با قابلیت قطبی‌شوندگی بالا در یک میدان الکتریکی خارجی تشکیل می‌شود.

این جریان‌های چرخشی به علت وجود بارهای غیریکنواخت القا شده در وجه مشترک بین سیال و جسم رسانا و جریان الکترواسمیس با بار القا شده‌ی غیریکنواخت می‌باشد. بنابراین می‌تواند پیش‌بینی شود که با ایجاد یک سطح رسانا در یک کانال با ابعاد میکرو، می‌تواند میدان جریان غیرمنظم با گردابه‌هایی

⁵ Characteristic length scale

⁶ Induced-charge electro osmosis (ICEO)

در ابعاد میکرو حاصل شود که می‌تواند در افزایش اختلاط ذرات مورد استفاده قرار گیرد. همچنین چرخش‌های جریان در کانال با ابعاد میکرو ممکن است یک راه پتانسیلی برای تنظیم عبور جریان مهیا کند. در اینجا یک طراحی جدید کانال در ابعاد میکرو با یک جفت مانع رسانای مثلثی شکل پیشنهاد می‌شود که یک مقطع همگرا-واگرا را تشکیل می‌دهند. یک روش اصلاحی برای تخمین عددی زتاپتانسیل بر روی سطح رسانا پیشنهاد می‌شود که در آن یک مدل عددی دو بعدی برای بدست آوردن میدان الکتریکی، میدان جریان و میدان غلظت مورد استفاده قرار می‌گیرد که رفتار جریان الکتروکننتیک با بار القا شده در کانال مورد بررسی قرار می‌گیرد. در اینجا هدف این مطالعه و بررسی، پیشنهاد دادن روش‌های جدید برای اختلاط سریع توسط جریان الکتروکننتیک و کنترل منحصر به فرد جریان با ساخت ساده و عملکرد آسان می‌باشد.

1.1.1 الکتروکننتیک کلاسیک

اگر لایه مضاعف الکتریکی بر روی یک سطح جامد نارسانا و یا یک ذره با بار الکتریکی ثابت تشکیل شود، زتاپتانسیل در صفحه‌ی برشی ثابت خواهد بود، این مورد را "الکتروکننتیک کلاسیک" نامند. سرعت الکتروکننتیک در مطالعه‌ی الکتروکننتیک کلاسیک تا زمانیکه زتاپتانسیل سطح تغییر نکند، ثابت می‌ماند. سرعت الکترواسمتیک توده‌ی سیال و سرعت الکتروفورس یک ذره بطور خطی متناسب با میدان الکتریکی اعمال شده \vec{E} می‌باشد [۱۶].

در نتیجه، در پدیده‌ی الکتروکننتیک کلاسیک، نظر به اینکه سرعت، یک رابطه‌ی مستقیم با میدان الکتریکی اعمالی دارد از آن به عنوان الکتروکننتیک خطی عنوان می‌شود.

تئوری الکتروکننتیک کلاسیک بر مبنای تعدادی از فرضیات برای مدل کردن پدیده‌ی الکتروکننتیک شکل گرفته است. در این تئوری محلول مایع به عنوان یک الکترولیت رقیق همگن در نظر گرفته می‌شود که بطور یکنواخت باردار شده و دارای سطح نارسانا است. همچنین فرض شده است که الکترولیت نامحدود می‌باشد، میدان الکتریکی یکنواخت بوده، لایه مضاعف الکتریکی نازک بوده و بار موجود بر روی سطح ثابت می‌باشد. بعلاوه آن ذره، صلب و همگن است و دارای ماده‌ی غیر قابل قطبی شدن می‌باشد. تحت این فرضیات، سرعت ذره در میدان الکتریکی با جریان مستقیم، خطی است. با این وجود، در واقعیت اغلب فرضیات الکتروکننتیک کلاسیک معتبر نمی‌باشد. به عنوان مثال اغلب مواد تا یک اندازه رسانا بوده و در نتیجه، بار سطحی آن مواد ثابت نمی‌باشد. از اینرو الکتروکننتیک کلاسیک

قابل مدلسازی برای مدل کردن در هر پدیده‌ی الکتروکنیتیک نمی‌باشد. برای محاسبه‌ی اشکال الکتروکنیتیک کلاسیک یک کلاس از پدیده‌های الکتروکنیتیک غیرخطی معرفی شده است. بنابر تئوری الکتروکنیتیک غیرخطی، زمانیکه که یک سطح رسانا در تماس با یک محلول الکتروولیت است میدان الکتریکی، یک بار سطحی را بر روی سطوح رسانا القا می‌کند. سپس میدان الکتریکی خارجی توسط لایه مضاعف الکتریکی که بر اثر بار القایی حاصل شده است، بطور متقابل اثر می‌گذارد. از آنجاییکه زتاپتانسیل القایی و میدان الکتریکی محلی در طول سطح رسانا تغییر می‌کند سرعت لغزشی حاصل شده، غیر خطی خواهد بود [۲۳].

$$\vec{u} = F(\vec{E}) \quad (1.1)$$

2.1.1 الکتروکنیتیک با بار القا شده⁷ (غیرخطی)

یکی از معادلات بنیادی برای ارزیابی توزیع پتانسیل الکتریکی در یک وسیله‌ی دی‌الکتریک، معادله‌ی پواسون [۲۳] می‌باشد

$$\nabla^2 \phi_e = \frac{\rho_e}{\epsilon_0 \epsilon} \quad (2.1)$$

که در آن ϕ_e توزیع پتانسیل الکتریکی اعمال شده، ϵ_0 ثابت دی‌الکتریک در خلاء، ϵ ثابت دی‌الکتریک در وسیله‌ی انجام کار و ρ_e چگالی بار آزاد می‌باشد. با فرض اینکه بار آزاد وجود ندارد (مانند سیال خالص، یا محلول‌های آبدار که از نظر الکتریکی خنثی می‌باشند) آنگاه ρ_e صفر بوده و معادله‌ی پواسون [۱۶] تبدیل به معادله‌ی لاپلاس می‌شود

$$\nabla^2 \phi_e = 0 \quad (3.1)$$

بنابراین توزیع پتانسیل الکتریکی اعمال شده، ϕ_e ، در سیال را می‌توان با حل معادله‌ی لاپلاس بدست آورد.

یک ذره‌ی رسانا که از نظر الکتریکی خنثی می‌باشد و با هندسه‌ی دلخواه را در نظر بگیرید که در یک محلول آبدار می‌باشد. زمانیکه یک میدان الکتریکی اعمال می‌شود، این میدان الکتریکی از روی ذره‌ی

⁷ Induced-Charge Electrokinetics

رسانا عبور می‌کند و بارها را به طرف سطح رسانای ذره می‌برد. اندکی پس از آن، بارهای منفی بطرف اطراف ذره حرکت می‌کنند که به ولتاژ بالاتر نزدیکتر می‌باشند، درحالیکه بارهای مثبت به سمت دیگر ذره حرکت می‌کنند. در نتیجه یک میدان الکتریکی داخلی در اطراف ذره ایجاد شده است که مانند یک محافظ عمل کرده و در برابر عبور میدان الکتریکی خارجی از ذره‌ی رسانا مقاومت می‌کند. در همین حین بارهای سطحی القا شده بر روی ذره‌ی رسانا، بارهای مخالف موجود در محلول را جذب می‌کنند و لایه مضاعف الکتریکی در اطراف آن شکل می‌گیرد. در این مرحله ذره مانند یک عایق عمل کرده و میدان الکتریکی موجود در اطراف ذره به شرایط حالت پایدار می‌رسد (شکل 1-1c). پیکره‌بندی ایجاد شده از بارها و لایه مضاعف الکتریکی بر روی ذره‌ی رسانا با شرایط مرزی عدم وجود شار الکترواستاتیکی معادل می‌باشد زیرا بارهای القایی در زیر سطح ذره‌ی رسانا علامت مخالف یون‌های جذب شده بر روی سطح ذره (از محلول الکترولیت آبدار) را دارند و همچنین میدان الکتریکی القا شده بر روی سطح مشترک ذره و الکترولیت باید در جهت مخالف میدان الکتریکی خارجی باشد [۲۳]:

$$\vec{E}_{induced} = -\vec{E}_{applied} \quad (4.1)$$

به عبارت دیگر قدرت میدان الکتریکی القا شده محلی $\vec{E}_{induced}$ در سطح کاملاً رسانای ذره برابر با قدرت میدان الکتریکی اعمال شده‌ی خارجی $\vec{E}_{applied}$ می‌باشد اما در جهت مخالف یکدیگر هستند.

$$\vec{E}_{induced} = -\vec{E}_{applied} \quad (5.1)$$

$$\nabla \zeta_{induced} = -\nabla \phi_e \quad (6.1)$$

که در معادله‌ی فوق، $\zeta_{induced}$ ، زتاپتانسیل القا شده‌ی محلی بر روی سطح ذره‌ی رسانا می‌باشد و ϕ_e بر اساس معادله‌ی (6.1) محاسبه می‌شود. ذره‌ی یاد شده در بالا در ابتدا خنثی بود و هیچ بار سطحی‌ای نداشت بنابراین انتگرال بارهای القا شده بر روی سطح رسانا می‌بایست صفر باشد. در نتیجه

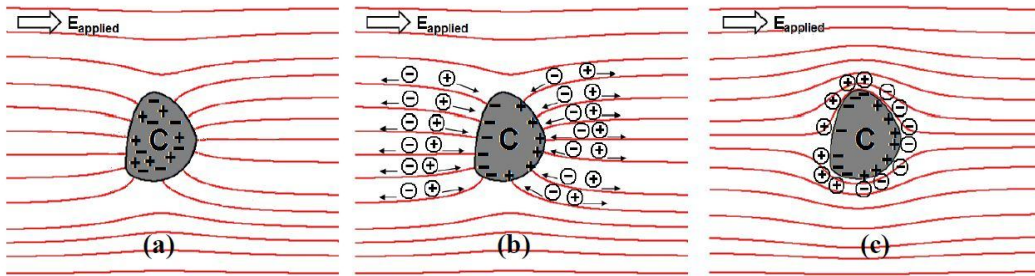
$$\oint_S \zeta_{induced} dS = 0 \quad (7.1)$$

که S سطح رسانا تحت میدان الکتریکی اعمال شده می‌باشد. با انتگرال‌گیری از معادله‌ی (7.1) [۱۶] رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود

$$\zeta_{induced} = -\phi_e + \phi_c \quad (8.1)$$

که ϕ_c یک ثابت برای یک سطح رسانای الکتریکی تحت یک میدان الکتریکی اعمال شده می‌باشد. با جایگذاری معادله‌ی (8.1) [۱۶] در معادله‌ی (7.1)، ϕ_c بر اساس رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\phi_c = \frac{\oint \phi_e dS}{S} \quad (9.1)$$



شکل 1-1 فرآیند باردار شدن یک ذره‌ی رسانا با شکل دلخواه تحت یک میدان الکتریکی اعمالی یکنواخت (a) میدان الکتریکی اولیه که از روی ذره‌ی رسانا عبور می‌کند (b) بارهای القایی بر روی سطح ذره‌ی رسانا، یون‌های الکتریکی در محلول الکترولیت را جذب می‌کنند و (c) میدان الکتریکی در حالت پایدار و لایه مضاعف الکتریکی القایی که دارای دو قطب می‌باشد [۲۳].

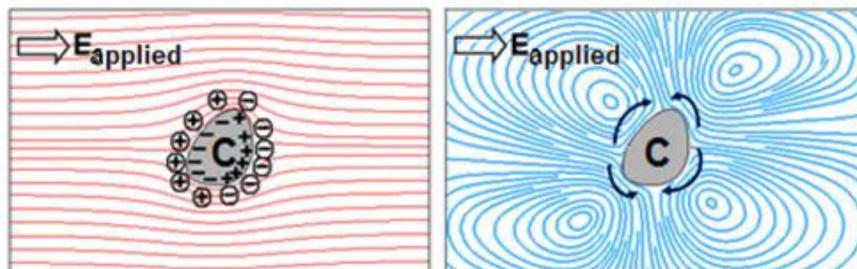
علامت لایه مضاعف الکتریکی در امتداد سطح ذره از مثبت در سمت بالادست جریان به منفی در سمت پایین دست جریان تغییر می‌کند (شکل 1-2a). همچنین توزیع بارهای خالص محلی زیر سطح ذره‌ی رسانا و از اینرو لایه مضاعف الکتریکی در اطراف ذره یکنواخت نیست. در نتیجه، سرعت لغزشی به عنوان تابعی از میدان الکتریکی محلی در جهات مختلف تغییر می‌کند و باعث ایجاد گردابه‌های میکرو در اطراف ذره می‌شود (شکل 1-2b). بر طبق فرمول هلم هولتز-اسملوچوفسکی⁸ داریم [۱۳]

$$\vec{U}_i = -\frac{\epsilon \epsilon_0 \zeta_{induced}}{\mu} \vec{E}_{applied} \quad (10.1)$$

دانستن توزیع دقیق زتاپتانسیل القایی یک کلید برای محاسبه‌ی سرعت الکترواسمتیک با بار القایی در اطراف ذره‌ی رسانا و حرکت الکتروفورتیک ذره می‌باشد. با این وجود زتاپتانسیل القایی با قدرت میدان الکتریکی محلی متناسب بوده و با موقعیت مکانی بر روی سطح ذره‌ی رسانا تغییر می‌کند. در نتیجه سرعت الکتروکنتیک با بار القایی، غیرخطی بوده و به زتاپتانسیل القایی وابسته می‌باشد. معادله (6.1)

⁸ Helmholtz-smoluchowski

توزیع زتاپتانسیل القایی را می‌دهد؛ اگرچه حل دقیق آن جز برای هندسه‌های نسبتاً ساده (مانند یک استوانه‌ی دایروی دوبعدی) در دسترس نیست. با این وجود، برای هندسه‌های پیچیده‌ی نامنظم برای حل معادله‌ی (6.1) هیچ حل دقیق یا تحلیلی وجود ندارد. بنابراین توزیع زتاپتانسیل القایی (و سرعت الکتروکنیتیک با بار القایی) بر روی این چنین هندسه‌هایی ناشناخته است.



شکل 2-1 خطوط میدان الکتریکی و جریان الکتروکنیتیک با بار القایی در اطراف یک ذره‌ی رسانا (a) خطوط میدان الکتریکی، (b) میدان جریان الکتروکنیتیک با بار القایی [۲۳]

بنابراین یک روش عددی کاملاً ضروری است که بتواند زتاپتانسیل القایی را به میدان الکتریکی اعمالی خارجی ارتباط دهد. وو و لی⁹ [14-17] یک روش محاسباتی برای محاسبه‌ی ساده زتاپتانسیل القایی، سرعت الکتروکنیتیک با بار القایی، میدان‌های جریان و الکتریکی به صورت عددی معرفی کرد. استفاده از معادلات (5.1) تا (9.1) یک روش عددی ساده برای محاسبه‌ی توزیع زتاپتانسیل القایی در حالت پایدار بر روی ذره‌ی رسانا با یک هندسه‌ی دلخواه ارائه می‌دهد. سرعت الکتروکنیتیک با بار القایی بر روی تمامی سطح مورد مطالعه می‌تواند مورد محاسبه قرار گیرد.

الکتروکنیتیک با بار القایی دارای برخی از خصوصیات منحصر به فرد می‌باشد که می‌تواند در توسعه‌ی سیال میکرو و تجهیزات آزمایشگاه بر روی تراشه مورد استفاده قرار گیرد؛ مانند کنترل زتاپتانسیل و داشتن رابطه‌ی غیرخطی با میدان الکتریکی که توسط جریان مستقیم اعمال می‌شود. معادله‌ی (8.1) نشان می‌دهد که زتاپتانسیل القایی، بطور مستقیم به میدان الکتریکی جریان مستقیم وابسته می‌باشد. کنترل کردن میدان الکتریکی اعمالی در نتیجه‌ی القا کردن *induced* مطلوب و دستکاری کردن حرکت (انتقالی و چرخشی) یک ذره با سطح رسانا در نتیجه‌ی کنترل بر روی سرعت آن می‌باشد.

⁹ Wu and Li

2

فصل دوم

پیشینه‌ی تحقیق

1.2 تعریف مساله‌ی مورد بحث در این پایان نامه

در این پژوهش به دنبال روشی برای افزایش اختلاط ذرات در جریان سیال در درون یک کانال میکرو می‌باشیم. دو نوع جریان سیال تعریف می‌شود که نوع اول مبتنی بر مبانی جریان الکترواسمتیک¹⁰ و نوع دوم بر اساس مبانی جریان بر اثر اختلاف فشار¹¹ موجود در دو سر کانال ایجاد می‌شود. در این مطالعه سه کانال موازی با یکدیگر و بدون تداخل سیال‌های مربوطه مدلسازی شده است. موانع با سطوح رسانا موجود در دو کانال بالا و پایین از اهمیت خاصی برخوردار است. این موانع باعث ایجاد گردابه‌های بر روی سطح خود در جریان الکترواسمتیک شده و تبع آن فشارهایی بر روی دیواره‌ی مشترک انعطاف پذیر اعمال می‌شود.

2.2 نوآوری تحقیق

نوآوری موجود در این مدلسازی، افزایش بازده اختلاط ذرات و کنترل جریان سیال به صورت غیرمستقیم می‌باشد. در مطالعات سال‌های گذشته به بررسی اختلاط ذرات و کنترل جریان سیال به صورت مستقیم پرداخته شده است بطوریکه در آن، عامل ایجاد اختلاط ذرات گردابه‌های حاصل شده از جریان الکترواسمتیک بوده که لازمی آن داشتن سیال الکتروولیت می‌باشد در نتیجه افزایش اختلاط توسط همان سیال و با ایجاد گردابه‌های مطلوب بر روی سطوح رسانای مانع اتفاق می‌افتد. اما در این مطالعه به بررسی و افزایش بازده اختلاط بطور غیرمستقیم می‌پردازیم. به طوریکه ذرات نیاز به حضور در محیط سیال الکتروولیت جهت ایجاد جریان الکترواسمتیک و تشکیل گردابه‌ها ندارند. جریان الکترواسمتیک به همراه موانع و گردابه‌های تشکیل شده، در کانالی دیگر ایجاد می‌شود تا بتوان از خواص آن جریان استفاده کرد.

گردابه‌های حاصل شده در جریان الکترواسمتیک باعث تحریک دیواره‌های انعطاف پذیر مشترک با کانال در برگیرنده ذرات شده و کنترل جریان سیال و افزایش بازده اختلاط را در خروجی کانال مذکور امکان پذیر می‌سازد.

¹⁰ Electro-osmotic Flow

¹¹ Pressure Driven

3.2 مبانی الکتروکنیتیک

- کلاسیک
- با بار القا شده

مطالعه بر روی رفتار الکتروکنیتیک با بار القا شده بر روی یک ذره ناهمگن تحت میدان الکتریکی جریان ثابت اعمال شده مورد نظر می‌باشد. علتی که یک ذره ناهمگن به یک میدان الکتریکی جریان ثابت اعمال شده عکس‌العمل نشان دهد بستگی به رسانندگی الکتریکی آن دارد. زمانیکه که یک ذره ناهمگن وجود دارد بررسی جنبه‌های مختلف پدیده‌ی الکتروکنیتیک با بار القایی¹² از اهمیت بالایی برخوردار است. در اینجا به بازنگری تعریف‌ها و موارد مهم می‌پردازیم که به پدیده‌های الکتروکنیتیک و الکتروکنیتیک با بار القایی وابسته می‌باشد و درباره‌ی تشکیل لایه مضاعف الکتریکی به روی یک سطح جامد که در تماس با یک محلول الکترولیت می‌باشد بحث می‌کنیم. تعریف زناپتانسیل، جریان الکترواسمتیک و سرعت الکتروکنیتیک تشریح داده شده و همچنین خصوصیات پایه ای "الکتروکنیتیک کلاسیک" و "الکتروکنیتیک با بار القایی" پوشش داده خواهد شد. سپس به این موضوع که چگونه رسانندگی سطح جامد تعیین کننده‌ی نوع پدیده‌ی الکتروکنیتیک متناظر با آن خواهد بود، توضیح داده خواهد شد.

1.3.2 لایه مضاعف الکتریکی¹³ و زناپتانسیل

زمانیکه یک سطح جامد در تماس با محلول الکترولیت باشد، آن سطح بار الکتریکی را حمل می‌کند. به عنوان مثال شیشه، بار الکتریکی مثبت را حمل می‌کند در صورتیکه پلاستیک، بار الکتریکی منفی را حمل می‌کند.

¹² Induced-Charge Electrokinetics (ICEK)

¹³ Electric double layer (EDL)

زمانیکه این سطح جامد در تماس با یک محلول الکترولیت منفی می‌باشد، بارهای موجود بر روی سطح آن، یون‌های مخالف در سیال را جذب می‌کنند. در نتیجه چیدمان یون‌های آزاد محلول الکترولیت تغییر پیدا می‌کند. یک لایه از این یون‌های مخالف فوراً در نزدیکی سطح جامد باردار تشکیل می‌شود و شدیداً سطح جامد را احاطه می‌کند. این لایه یک ناحیه ی باردار را در محلول الکترولیت ایجاد می‌کند که بارهای آن صفر نیست. این ناحیه‌ی باردار غیرصفر بارها را در سطح جامد بالانس می‌کند. این لایه را یک "لایه‌ی فشرده"¹⁴ نامند. تازمانیکه بار توده سیال الکترولیت صفر است، اگر از لایه‌ی فشرده دور شویم چگالی بار خالص به تدریج از لایه‌ی فشرده به سمت توده سیال که از نظر الکتریکی خنثی می‌باشد، کاهش می‌یابد. در فاصله‌ی بین لایه‌ی فشرده و توده سیال خنثی یک لایه می‌باشد که آن را "لایه‌ی دیفیوژن"¹⁵ نامند. برخلاف یون‌های موجود در لایه‌ی فشرده که به سطح جامد محصور شده‌اند، یون‌های موجود در لایه‌ی دیفیوژن متحرک می‌باشند، این دو لایه یعنی لایه‌ی فشرده و لایه‌ی دیفیوژن را با هم لایه مضاعف الکتریکی نامند [۱۸]. مرز بین لایه‌ها در لایه مضاعف الکتریکی به‌عنوان صفحه‌ی برشی شناخته می‌شود و پتانسیل الکتریکی بر روی این مرز را "زتا پتانسیل"¹⁶ نامند. زتا پتانسیل یک مقدار تقریبی از پتانسیل سطح در اکثر مدل‌های الکتروکنتیک می‌باشد. در الکتروکنتیک کلاسیک مقدار زتا پتانسیل به‌عنوان یک مقدار ثابت در نظر گرفته می‌شود [19-21]. زتا پتانسیل را می‌توان از رابطه‌ی زیر [۲۳] محاسبه کرد:

$$\zeta = \frac{Q}{\varepsilon \varepsilon_0 k} \quad (1.2)$$

که در آن Q بار خالص سطح و k^{-1} پارامتر دیبای هاکل¹⁷ [۲۳] می‌باشد که از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$k^{-1} = \lambda_D = \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 K_B T}{2n_0 (ze)^2}} \quad (2.2)$$

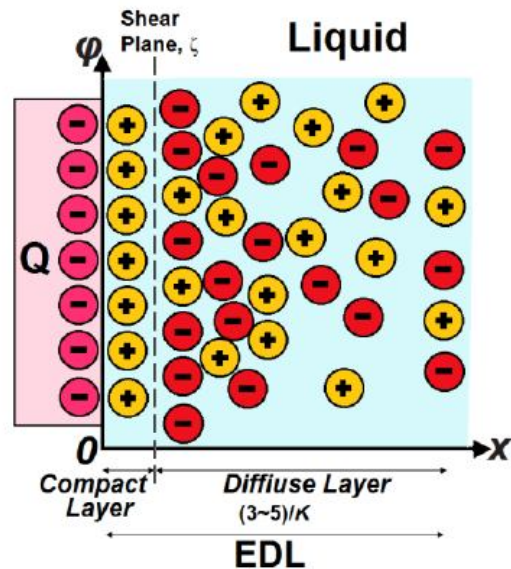
¹⁴ Compact layer

¹⁵ Diffuse layer

¹⁶ Zeta potential

¹⁷ Debye-hückel

که در آن K_B ثابت بولترمن، T دما و n_0 غلظت یونی توده سیال می باشد.



شکل 1-2 شماتیک دیاگرام لایه مضاعف الکتریکی، صفحه برشی و زتاپتانسیل [۲۳].

ضخامت لایه مضاعف الکتریکی دیبای، k^{-1} ، تنها به خواص سیال بستگی دارد (مانند غلظت های یونی توده سیال، بنیان ترکیب اتمی¹⁸ الکترولیت و ...) و طول دیبای¹⁹ وابسته بر خواص سطح جامد نمی باشد.

شکل 1-2 چیدمان لایه های مختلف از امکان لایه مضاعف الکتریکی و زتاپتانسیل را نشان می دهد. ما فرض می کنیم که در ناحیه ی بیرونی از لایه مضاعف الکتریکی، غلظت های یونی یکنواخت بوده و چگالی بار خالص حجمی محلی برابر صفر می باشد. این دلیلی است برای اینکه چرا ما از معادله ی لاپلاس برای محاسبه ی توزیع میدان الکتریکی اعمال شده در توده سیال استفاده می کنیم.

¹⁸ Valance

¹⁹ Debye length

2.3.2 الکترواسمتیک و الکتروفورتیک²⁰

لایه مضاعف الکتریکی در اطراف یک جسم با سطح نارسانای الکتریکی در تماس با یک محلول الکترولیت تشکیل می‌شود. زمانیکه یک میدان الکتریکی خارجی به آن اعمال می‌شود، یون‌های مثبت در لایه مضاعف الکتریکی به سمت طرف منفی میدان الکتریکی جذب می‌شوند و بالعکس یون‌های منفی به سمت طرف مثبت میدان الکتریکی جذب می‌شود.

این حرکت یون‌ها به سمت یون‌ها با علامت مخالف خود، مولکول‌های سیال اطرافشان را حرکت داده و در نتیجه توده سیال را حرکت می‌دهد. این حرکت را جریان الکترواسمتیک²¹ نامند.

اگر یک ذره‌ی نارسانای الکتریکی با بار اولیه در سیال معلق باشد و میدان الکتریکی خارجی اعمال شود، آن ذره در اثر نیروی حجمی الکتریکی اعمال شده و نیروی اصطکاک جریان بر روی ذره حرکت می‌کند. بالانس این دو نیرو، سرعت الکتروفورتیک ذره را تعیین می‌کند. شکل 2-2 جریان الکترواسمتیک و الکتروفورسیس در یک ذره‌ی نارسانا در تماس با محلول الکترولیت و تحت میدان الکتریکی اعمال شده را نشان می‌دهد.

طبق فرمول هلمهولتز-اسملوچوفسکی [۱۳] سرعت لغزشی طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\vec{U}_{eo} = -\frac{\varepsilon\varepsilon_0\zeta_w}{\mu}\vec{E}_e = -\mu_{eo}\vec{E}_e \quad (3.2)$$

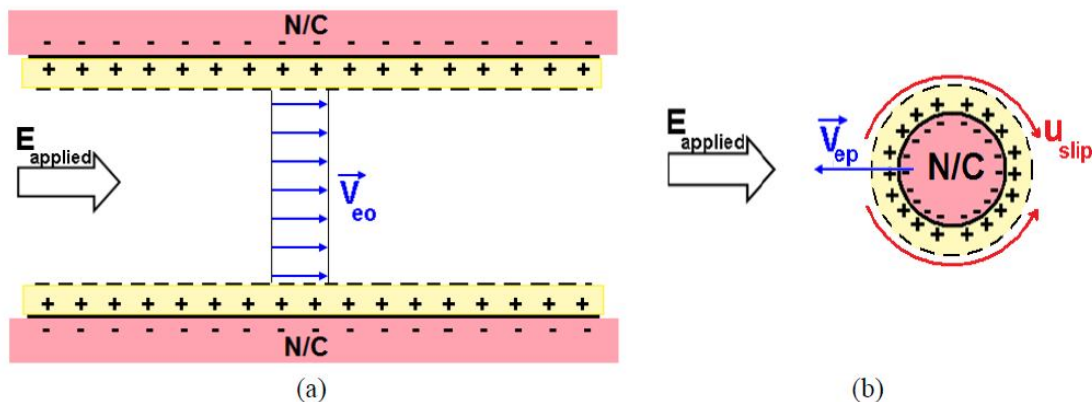
و همچنین سرعت الکتروفورتیک یک ذره باردار در یک محلول الکترولیت تحت میدان الکتریکی اعمال شده توسط فرمول هلمهولتز-اسملوچوفسکی [۱۳] محاسبه می‌شود:

$$\vec{U}_{ep} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0\zeta_p}{\mu} = \mu_{ep}\vec{E}_e \quad (4.2)$$

²⁰ Electrophoretic

²¹ Electro-osmotic (EOF)

که در آن μ ویسکوزیته‌ی سیال، ζ_w و ζ_p زتاپتانسیل در صفحه‌ی برشی سطح جامد و ذره، μ_{eo} برمی‌گردد به قابلیت حرکت الکترواستاتیک در سیال و μ_{ep} به قابلیت حرکت الکتروفوریتیک ذره بر می‌گردد.



شکل 2-2- نمایش شماتیک جریان الکترواستاتیک و الکتروفورسیس

(a) جریان الکترواستاتیک بر روی یک سطح نارسانا (b) الکتروفورسیس یک ذره نارسانا [۲۳].

فرمول هلمهولتز-اسملوچوفسکی بر اساس فرضیات زیر پایه‌گذاری شده‌است:

- ضخامت لایه مضاعف الکتریکی در مقایسه با قطر کانال میکرو یا اندازه‌ی یک ذره زیاد بزرگ نیست ($k \gg 1$)
- سطح کانال میکرو یا ذره نارساناست و لایه مضاعف الکتریکی قابلیت قطبی شدن را ندارد.
- سطح کانال میکرو یا ذره در خواص همگن است.

4.2 کنترل جریان و اختلاط توسط جریان الکتروکنتیک با بار القایی

در یک کانال با ابعاد میکرو با یک جفت مانع مثلثی رسانا [۱۷]

جریان الکتروکنتیک با بار القاشده²² در یک کانال مستطیلی با ابعاد میکرو با یک جفت مانع مثلثی رسانا که در میانه‌ی کانال قرار دارند در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در این بخش یک روش تصحیحی برای تخمین عددی زتا پتانسیل بر روی سطح رسانا پیشنهاد می‌گردد. معادلات ناویراستوکس دو بعدی که با فشار لینک شده‌اند، برای مدل کردن جریان در کانال مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج عددی، چرخش‌های جریان تولید شده حاصل از توزیع غیریکنواخت زتا پتانسیل القا شده در طول سطوح مانع مثلثی را نشان می‌دهد. به‌طور عددی اثبات شده‌است که چرخش‌های جریان محلی توانایی مؤثر برای افزایش اختلاط جریان بین محلول‌های مختلف را ایجاد می‌کند. توسط تنظیم و کنترل میدان الکتریکی اعمال شده در طول کانال با یک جفت مانع مثلثی نامتقارن می‌تواند تأثیر کنترل جریان الکتروکنتیک حاصل شود و این تأثیر بستگی به ابعاد قسمت همگرا-واگرای رسانا دارد.

در اینجا اختلاط و کنترل جریان با استفاده از جریان الکتروکنتیک با بار القایی توضیح داده شده‌است که می‌تواند در کاربردهای آزمایشگاه روی تراشه²³ و سیستم آنالیز کلی در ابعاد میکرو مورد استفاده قرار گیرد.

5.2 مبانی جریان الکتروکنتیک با بار القا شده [۱۷]

جریان الکتروکنتیک استاندارد شامل اثر متقابل بین میدان الکتریکی اعمالی خارجی و لایه مضاعف الکتریکی تشکیل شده در نزدیکی یک سطح نارسانا با بار الکتریکی ثابت می‌باشد. سرعت جریان الکترواسمیس حاصل شده به‌طور خطی با میدان الکتریکی اعمال شده متناسب است [۱۳]. با این وجود اگر سطح باردار به طور ایده‌آل قابلیت قطبی شدن داشته و از نظر الکتریکی رسانا باشد، این وابستگی

²² Induced-Charge Electrokinetics Flow (ICEKF)

²³ Lab-on-a-chip

سرعت جریان با میدان الکتریکی اعمال شده خیلی متفاوت خواهد بود. برای روشن شدن اصول و مبانی جریان الکتروکنتیک با بار القا شده، یک مورد ساده در نظر گرفته شده است: یک جسم رسانا با هندسه‌ی دلخواه با یک سطح رسانا که به طور ایده‌آل قابلیت قطبی شدن را دارد، در نظر می‌گیریم که درون یک محلول الکتروولیت و تحت یک میدان الکتریکی یکنواخت (\vec{E}_0) معلق می‌باشد.

یک میدان الکتریکی به یکدفعه بر روی جسم اعمال می‌شود که یک جریان غیرصفر $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ یون‌های موجود در محلول الکتروولیت را به سمت سطح رسانا با رسانندگی σ حرکت می‌دهد. بدینگونه، در ابتدا خطوط میدان الکتریکی سطح رسانا را در زوایای راست قطع می‌کنند. جریان الکتریکی یون‌های مثبت را به درون یک لایه‌ی نازک بر روی یک طرف رسانا و یون‌های منفی را به درون لایه‌ی نازک بر روی طرف دیگر رسانا حرکت می‌دهد که یک بار سطحی مساوی ولی مخالف‌العلامت q بر روی سطح رسانا القا کرده و همچنین بارهای فرضی مساوی و مختلف‌العلامت را در اطراف خود رسانا جذب می‌کند و در نتیجه یک ابر صفحه‌ای دو قطبی در نزدیکی سطح سیال و جامد شکل می‌گیرد. بار صفحه‌ای القا شده q و زتاپتانسیل القا شده‌ی نظیر به نظیر آن ζ_i با زمان تغییر می‌کند [22-23] و با رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

$$\frac{dq}{dt} = \vec{J} \cdot \vec{r} = \sigma \vec{E} \cdot \vec{r} \quad (5.2)$$

$$\frac{d\zeta_i}{dt} = \frac{\sigma}{\epsilon_w K} \vec{E} \cdot \vec{r} \quad (6.2)$$

که $k^{-1} = \lambda_D$ طول دیبای [۱۳]، ζ_i زتاپتانسیل القا شده و ϵ_w ضریب گذردهی دی الکتریک محلول می‌باشد.

به علت وجود ابر بار صفحه‌ای، خطوط میدان الکتریکی به طرف بیرون رانده شده و شار یونی به داخل ابر بار کاهش می‌یابد. زمانیکه جسم رسانا به‌طور کامل قطبی شود و به حالت پایدار برسد، رسانا مانند یک عایق رفتار می‌کند زیرا یک لایه مضاعف دو قطبی القا شده تشکیل می‌شود و سپس یک میدان الکتریکی پایدار برقرار می‌شود.

این پیکره‌بندی الکترواستاتیک در حالت پایدار معادل شرایط مرزی الکترواستاتیک عدم وجود شار می‌باشد که در آنالیز الکتروکنیتیک استاندارد فرض شده‌است و پتانسیل الکتریکی خارجی اعمال شده ϕ_e در این حالت پایدار توسط معادله‌ی لاپلاس مقرر می‌شود

$$\nabla^2 \phi_e = 0 \quad (7.2)$$

زمان بار گرفتن تا رسیدن به میدان پایدار برای یک رسانا با قابلیت قطبی شونده‌ی بالا بسیار اندک بوده (از مرتبه‌ی 10^{-4} ثانیه) که قابل چشم‌پوشی است.

زتاپتانسیل القا شده در حالت پایدار ζ_i با قدرت میدان الکتریکی محلی E متناسب است. بنابراین با موقعیت مکانی بر روی سطح رسانا تغییر می‌کند. برای هندسه‌های منظم و نسبتاً ساده، حل‌های دقیقی در حالت پایدار برای معادله‌ی (6.2) وجود دارد. فرمول تحلیلی دقیقی برای زتاپتانسیل القا شده بر روی سطح یک استوانه‌ای دایروی دو بعدی ارائه شده است که توسط رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود

$$\zeta_i(\theta) = 2E_0 a \cos \theta \quad (8.2)$$

که θ مختصات زاویه‌ای و a شعاع استوانه می‌باشد.

با این وجود برای یک سطح با یک شکل نامنظم و یا پیچیده، حل تحلیلی ساده برای توزیع زتاپتانسیل القا شده وجود ندارد. بنابراین به یک حل عددی برای ارتباط دادن بین زتاپتانسیل القا شده با میدان الکتریکی خارجی اعمالی نیاز داریم.

برای تعیین عددی توزیع زتاپتانسیل القا شده در حالت پایدار ζ_i ، موارد زیر را در نظر می‌گیریم:

1- ابر صفحه‌ای القا شده یک میدان الکتریکی محلی تولید می‌کند و به‌عنوان یک پیوسته‌ی عایق بر روی سطح عمل می‌کند بنابراین خطوط میدان الکتریکی خارجی اعمالی نمی‌تواند سطح را قطع کنند. پس مقدار میدان الکتریکی القا شده E_i بر روی سطح رسانا که اختلاف پتانسیل در طول سطح می‌باشد باید دارای مقداری برابر با مقدار میدان الکتریکی خارجی اعمالی E_e باشد.

$$|E_i| = |E_e| \quad (9.2)$$

2- به دلیل اینکه بارهای فرضی در رسانا دارای علامت مخالف با یون‌های جذب شده از سیال در سطح رسانا می‌باشد، میدان الکتریکی القا شده بر روی سطح مشترک بین سیال و رسانا باید در جهت مخالف با میدان الکتریکی خارجی اعمالی باشد

$$E_i = -E_e \quad (10.2)$$

در نتیجه

$$\nabla \zeta_i = -\nabla \phi_e \quad (11.2)$$

ϕ_e پتانسیل الکتریکی خارجی محلی اعمال شده بوده که توسط معادله‌ی (7.2) بدست می‌آید.

3- فرض می‌کنیم که موانع رسانا در ابتدا دارای بار نیستند، انتگرال بار القا شده 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 زتاپتانسیل $\zeta = \frac{q}{\epsilon_w k}$ ، انتگرال زتاپتانسیل القا شده در اطراف سطح رسانا صفر می‌شود [۱۷]

$$\oint_S \zeta_i ds = 0 \quad (12.2)$$

که S سطح رسانا در میدان الکتریکی اعمال شده می‌باشد.

اگر سطح رسانا در ابتدا دارای بار الکتریکی باشد، توزیع زتاپتانسیل نهایی در حالت پایدار به صورت مجموع زتاپتانسیل در حالت سکون اولیه $\zeta_0 = \zeta(t=0)$ و زتاپتانسیل القا شده ζ_i می‌باشد که از خطی بودن معادله‌ی (6.2) حاصل می‌شود. در اینجا تنها موردی را در نظر می‌گیریم که در آن موانع رسانا در ابتدا دارای بار الکتریکی نیستند.

اگر توجه خود را به موردی محدود کنیم که در آن لایه مضاعف نازک باشد و عدد داخین²⁴ خیلی کوچکتر از یک باشد ($Du \ll 1$) بدین معنی که رسانایی الکتریکی سطح در مقایسه با رسانای الکتریکی

²⁴ Dukhin Number

توده سیال ناچیز و قابل صرفنظر باشد و هیچگونه از واکنش‌های الکتروشیمیایی در سطح مشترک بین رسانا و سیال وجود نداشته باشد، آنگاه شرایط فوق معتبر است.

در مطالعات اخیر [۲۱] یک روش اصلاحی ساده برای تخمین عددی توزیع زتاپتانسیل القایی بر روی سطوح رسانا (ζ_i) که در معرض پتانسیل الکتریکی محلی خارجی اعمال شده (ϕ_e) قرار دارد، پیشنهاد می‌گردد [۲۱]

$$\zeta_i = -\phi_e + \phi_c \quad (13.2)$$

که در آن ϕ_c یک پتانسیل اصلاحی ثابت می‌باشد. با جایگذاری معادله‌ی (13.2) در معادله (12.2) می‌توانیم مقدار پتانسیل اصلاحی را محاسبه می‌کنیم [۱۷]

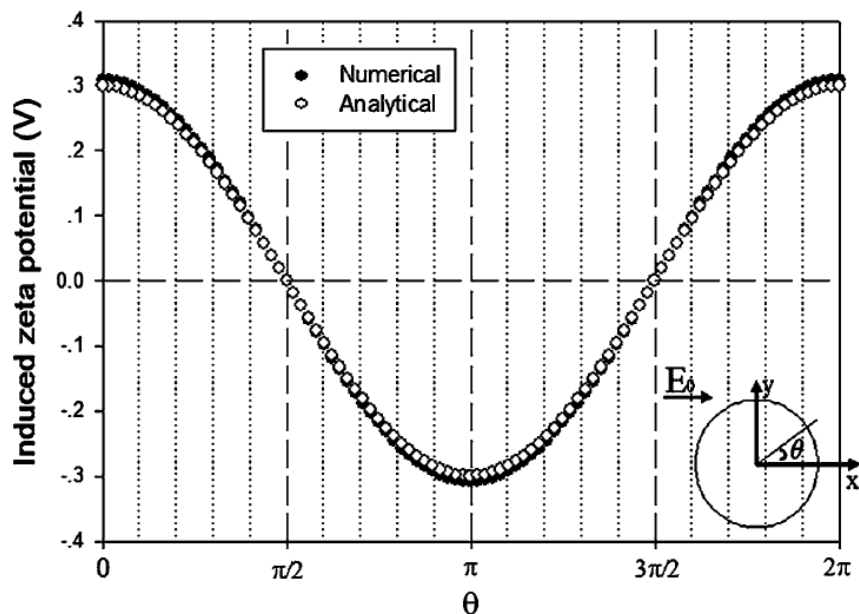
$$\phi_c = \frac{\int \phi_e dA}{A} \quad (14.2)$$

که در آن A مساحت کلی سطح جسم رسانا می‌باشد. با استفاده از فرمول عددی معادله‌ی (13.2)، تمام شرایط سه‌گانه در نظر گرفته می‌شود. معادلات (13.2) و (14.2) روش عددی ساده و سریع برای محاسبه‌ی توزیع زتاپتانسیل القایی بر روی سطوح رسانا با هندسه‌ی دلخواه در حالت پایدار نهایی را به ما می‌دهد. همانطور که در شکل 2-3 نشان داده شده‌است برای یک استوانه دو بعدی، طرح عددی توسط مقایسه با فرمول تحلیلی معادله‌ی (8.2) تأیید شده است. نتایج، یک انطباق خوب بین روابط عددی و تحلیلی را نشان می‌دهد.

زمانیکه یک لایه مضاعف القایی دوقطبی تشکیل می‌شود، میدان الکتریکی خارجی اعمالی یک نیروی حجمی بر روی یون‌ها در ابر صفحه‌ای در سیال وارد می‌کند که یون‌ها و سیال را به حرکت در می‌آورد (شکل 2-4). جریان الکتروکنتیک حاصل شده در خارج از لایه‌ی صفحه‌ای با ضخامت λ_D یک جریان لغزشی بر روی دیواره ایجاد می‌کند که سرعت جریان لغزشی به تناسب با مؤلفه‌ی مماسی از میدان الکتریکی $E_{||}$ تغییر می‌کند که توسط فرمول هلمهولتز-اسملوچوفسکی [۱۳] محاسبه می‌شود

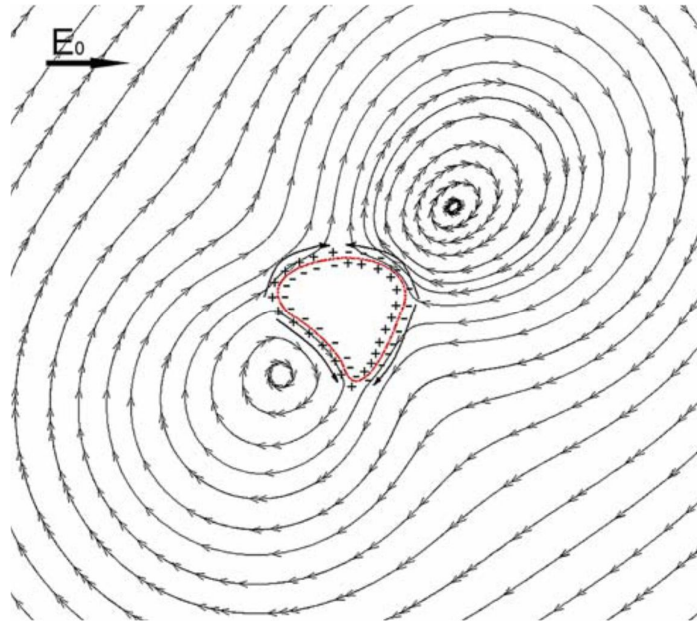
$$u = -\frac{\varepsilon_w \zeta_i}{\mu} E_{||} \quad (15.2)$$

که در آن μ ویسکوزیته‌ی سیال می‌باشد. یادآوری این نکته ضروری است که با در نظر گرفتن وابستگی زتاپتانسیل القایی محلی ζ_i به میدان الکتریکی محلی E ، سرعت جریان الکتروکنتیک با بار القایی به‌طور غیرخطی به میدان الکتریکی اعمالی وابسته است.



شکل 2-3 زتاپتانسیل القایی بر روی یک سطح استوانه‌ای دایروی رسانا [۱۷]

$$(a = 15\mu\text{m} , E_0 = 10 \text{ V/cm})$$



شکل 2-4 میدان جریان الکتروکننتیک با بار القایی در اطراف یک جسم رسانا [۱۷]

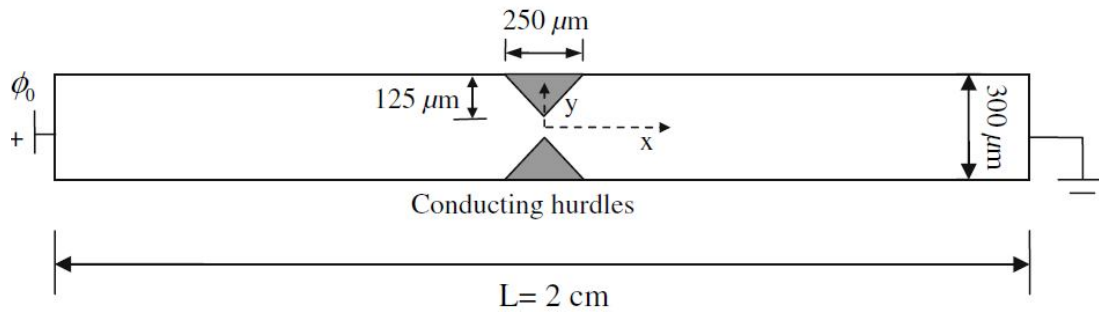
همانطور که در شکل 2-4 نشان داده شده‌است، جریان حاصل شده در گردابه نزدیک سطح مشترک سیال و جامد غیریکنواخت است.

1.5.2 جریان الکتروکننتیک با بار القایی در یک کانال با ابعاد میکرو با یک جفت

مانع مثلثی رسانا و مدل ریاضیاتی [۱۷]

این مبحث، جریان الکترواسمتیک در درون یک کانال مثلثی با ابعاد میکرو با یک جفت مثلثی رسانا را در نظر می‌گیرد که این مانع یک مقطع همگرا-واگرا را تشکیل می‌دهند. همانطور که در شکل 2-5 نشان داده شده، این کانال دارای عمقی برابر $40\mu m$ و عرض $300\mu m$ می‌باشد. به دلیل تأثیرات دیواره‌های بالا و پایین کانال، مسئله‌ای که در اینجا پیشنهاد شده، سه بعدی می‌باشد. با این وجود با فرض همگن بودن دیواره‌های نارسانای کانال با زتاپتانسیل ثابت و مشابه و به تبع آن سرعت لغزشی یکنواخت جریان الکترواسمتیک بر روی سطوح نارسانا، دیواره‌های بالا و پایین کانال تأثیری بر روی جریان الکترواسمتیک در شاخه‌های کانال اصلی نخواهد داشت.

در نواحی با موانع رسانا، زتاپتانسیل بر روی سطح رسانا بزرگتر از زتاپتانسیل بر روی دیواره‌های غیررسانای بالا و پایین کانال می‌باشد. بنابراین جریان حاصل شده توسط تأثیرات بار القایی در صفحه‌ی x-y حاکم می‌شود.



شکل 2-5 دیاگرام شماتیک کانال میکرو با یک جفت مانع مثلثی [۱۷]

برای مطالعه‌ی کیفی تأثیرات بار القایی حاکم در صفحه‌ی x-y، مسئله به عنوان مدل دو بعدی، همانطور که در شکل 2-5 نشان داده شده، ساده می‌شود. این عملیات هیچ تأثیری بر روی نتایج مسئله در حوزه‌ی تأثیرات کنترل جریان و عمل اختلاط در جریان نخواهد داشت. دو سر کانال میکرو به دو منبع که حاوی سیال الکتروولیت می‌باشد متصل شده و الکترودها در منبع‌های موجود قرار داده شده‌اند. همانطور که در قبل اشاره شده، زمانیکه یک میدان الکتریکی توسط الکترودها در درون کانال اعمال می‌شود، جریان الکترواسمتیک در کانال ایجاد خواهد شد و گردابه‌ها در اطراف قسمت همگرا-واگرای رسانا تولید خواهند شد که به علت بارهای غیریکنواخت القایی بر روی سطح رسانا می‌باشد. به یکدفعه میدان الکتریکی اعمال می‌شود و موانع رسانا فوراً قطبی می‌شوند. میدان الکتریکی نهایی در حالت پایدار در شکل 2-6 نشان داده شده‌است.

پتانسیل الکتریکی اعمالی در کانال میکرو ϕ_e ، از معادله‌ی لاپلاس (7.2) تبعیت می‌کند که شرایط مرزی حاکم بر آن به صورت زیر می‌باشد [۱۷]

$$n \cdot \nabla \phi_e = 0 \quad \text{در دیواره‌های کانال} \quad (16.2)$$

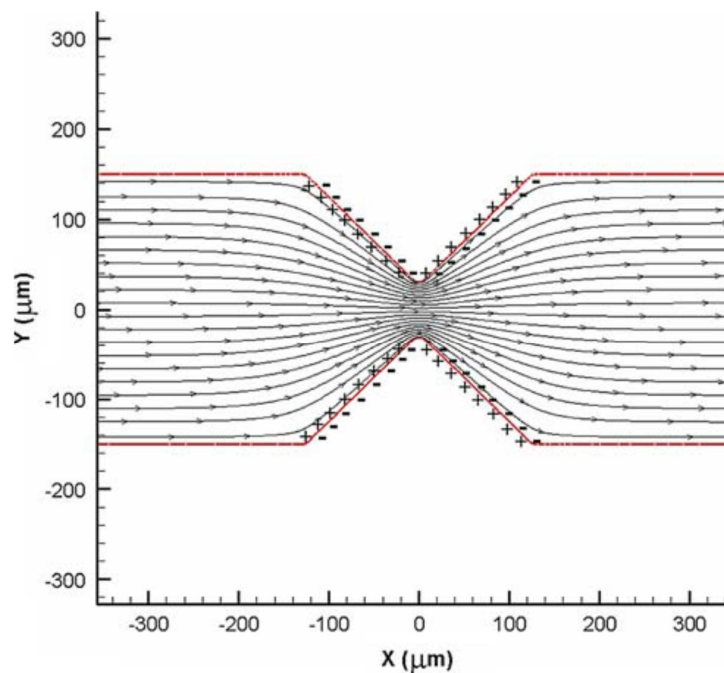
$$\phi_e = \phi_0 \quad \text{در ورودی کانال} \quad (17.2)$$

$$\phi_e = 0 \quad \text{در خروجی کانال} \quad (18.2)$$

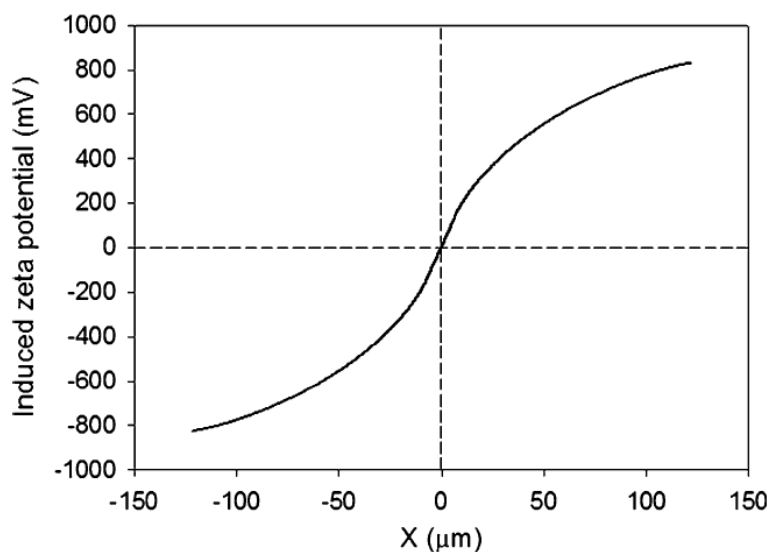
این ابر بار القایی بر روی سطوح موانع رسانا، همانطور که در معادله (13.2) نشان داده شده، به صورت یک توزیع زتاپتانسیل غیر ثابت افزایش می‌یابد. شکل 2-7 به صورت نمونه یک توزیع زتاپتانسیل القایی در طول سطح مانع مثلی رسانا با یک میدان الکتریکی خارجی $25 V/cm$ را نشان می‌دهد که به‌طور واضح مشخص است که زتاپتانسیل القایی به‌طور یکنواخت توزیع شده‌است.

زمانیکه میدان الکتریکی در درون سیال کانال میکرو اعمال می‌شود، نیروی الکتریکی بر روی بارهای خالص موجود در درون لایه مضاعف الکتریکی وارد می‌شود. حرکت بارهای خالص، سیال واقع در نزدیکی آن را حرکت می‌دهد و جریان الکترواستتیک را حاصل می‌کند که به‌دلیل این است که بارهای خالص محلی بر روی سطوح موانع رسانا به صورت غیریکنواخت توزیع شده‌اند و علامت مخالف بین طرف بالا دست و پایین دست جریان دارند (شکل 2-6).

حرکت حاصل شده‌ی سیال همچنین غیریکنواخت و در جهات مخالف می‌باشد که باعث ایجاد گردابه‌هایی در نزدیکی موانع رسانا می‌شود.



شکل 2-6 میدان الکتریکی در حالت پایدار در قسمت همگرا-واگرا و بار القایی بر روی موانع رسانا [۱۷]



شکل 2-7 توزیع زتاپتانسیل القایی در طی سطح مانع مثلثی رسانا [۱۷]

معادله حاکم بر جریان سیال تراکم ناپذیر، معادله‌ی ناوراستوکس [۱۷] و معادله‌ی پیوستگی می‌باشد.

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right] = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{u} + \vec{E} \rho_e \quad (19.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (20.2)$$

که در آن بردار سرعت، ∇P گرادیان فشار، μ ویسکوزیته، ρ چگالی سیال، ρ_e چگالی بار خالص محلی و $\vec{E} = -\nabla \phi_e$ قدرت میدان الکتریکی محلی اعمال شده می‌باشد. از آنجایی که چگالی بار خالص محلی تنها در لایه مضاعف الکتریکی غیرصفر است، نیروی حرکت دهنده برای جریان الکترواسمتیک، $\vec{E} \rho_e$ تنها در لایه مضاعف الکتریکی وجود دارد. سرعت جریان الکترواسمتیک در یک لایه‌ی باریک از سیال در نزدیکی دیواره‌ی جامد به تندی تغییر می‌کند. ضخامت لایه مضاعف الکتریکی توسط طول دیبای محاسبه می‌شود [۱۳]

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_w K_B T}{2n_0 (ze)^2}} \quad (21.2)$$

که در آن K_B ثابت بولتزمن، T دما و n_0 غلظت یونی توده‌ای می‌باشد. با این وجود به منظور مدل‌سازی جریان توده‌ای سیال در خارج از لایه مضاعف الکتریکی بخش نیروی محرک $\vec{E} \rho_e$ در معادله‌ی (19.2)

حذف خواهد شد و تأثیرات الکترواستاتیک توسط اعمال کردن سرعت لغزشی هلمهولتز-اسملوچوفسکی به‌عنوان شرایط مرزی، در نظر گرفته می‌شود

$$\bar{u}|_{wall} = \frac{\varepsilon_w \zeta}{\mu} \bar{E} \quad (22.2)$$

که در آن ζ زتاپتانسیل در دیواره‌ی کانال می‌باشد. در اینجا باید به این نکته توجه کرد که زتاپتانسیل تنها بر روی دیواره‌ی کانال نارسانا، ثابت می‌باشد. بر روی سطوح موانع رسانا، ζ با زتاپتانسیل القایی محلی ζ_i (همانطور که در معادله‌ی (13.2) تعریف شده است) جایگزین می‌شود. با در نظر گرفتن جریان در حالت پایدار، بخش گذرا در معادله‌ی (19.2) حذف شده و معادله‌ی (19.2) به حالت دو بعدی کاهش می‌یابد

$$\rho \left(u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right) \right) \quad (a) \quad (23.2)$$

$$\rho \left(u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right) \right) \quad (b)$$

شرایط مرزی مربوط برای سرعت به‌صورت زیر می‌باشد

$$u_x = \frac{\varepsilon_w \zeta}{\mu} E_x, \quad u_y = \frac{\varepsilon_w \zeta}{\mu} E_y \quad \text{در دیواره‌های کانال نارسانا} \quad (a)$$

$$u_x = \frac{\varepsilon_w \zeta_i}{\mu} E_x, \quad u_y = \frac{\varepsilon_w \zeta_i}{\mu} E_y \quad \text{در سطوح موانع رسانا} \quad (b) \quad (24.2)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial u_y}{\partial x} = 0 \quad \text{در ورودی و خروجی کانال} \quad (c)$$

مفهوم معادله‌ی (24.2c) در شرایط مرزی فوق این است که طول کانال میکرو به اندازه‌ی کافی بلند است و شرایط انتهایی هیچ تأثیری بر روی میدان جریان و نزدیکی موانع (قسمت همگرا-واگرا) ندارد.

در این مدل‌سازی، هیچ اختلاف فشاری در نظر گرفته نمی‌شود و جریان سیال کاملاً بر اثر الکتروکنتیک می‌باشد و فشار در دو سر میکرو کانال صفر می‌باشد

$$P = 0 \quad \text{در ورودی و خروجی کانال} \quad (25.2)$$

همچنین گرادیان فشار در دیواره‌ی کانال صفر می‌باشد که شرایط عدم وجود شار از میان دیواره در نظر می‌گیرد

$$n \cdot \nabla P = 0 \quad \text{در دیواره‌های کانال} \quad (26.2)$$

میدان غلظت الکترولیت‌ها یا دیگر موارد شیمیایی در یک جریان الکترواسمتیک توسط معادله‌ی زیر شرح داده می‌شود

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} C = D \nabla^2 C \quad (27.2)$$

که در آن C غلظت ذرات و D ضریب دیفیوژن ذرات²⁵ می‌باشد. در اثر کاربردهای سیالات میکرو، سرعت الکترواسمتیک از مرتبه‌ی 1 mm/s بوده و ضریب دیفیوژن اکثر الکترولیت‌های ساده به طور تقریبی $1.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ می‌باشد. می‌توان دریافت که مرتبه‌ی بزرگی بخش کانوکشن در معادله (27.2) تقریباً 1000 برابر بخش دیفیوژن می‌باشد. با این وجود، میدان جریان باید یک نمایش خوب از میدان غلظت را بدهد، که در نتیجه یک فهم از اثر بخشی اختلاط می‌باشد. به‌طور کلی در جایی که یک چرخش جریان محلی قدرتمندی وجود دارد، در آنجا یک اختلاط بهتر انجام می‌شود. بنابراین می‌توان انتظار داشت که چرخش جریان حاصل شده از زتاپتانسیل غیریکنواخت القایی بر روی سطوح موانع رسانا می‌تواند به اندازه‌ی خیلی زیاد اختلاط ذرات را افزایش دهد.

در توسعه‌ی شبیه‌سازی عددی، پارامترهای بی بعد شده‌ی زیر مورد استفاده قرار می‌گیرند

$$u'_x = \frac{u_x}{U}, \quad u'_y = \frac{u_y}{U}, \quad x' = \frac{x}{H}, \quad y' = \frac{y}{H}, \quad P' = \frac{P - P_a}{PU^2} \quad (28.2)$$

که در آن U سرعت مرجع، H عرض کانال و P_a فشار اتمسفر می‌باشد.

مسئله‌ی دو بعدی فوق، مانند معادلات (7.2)، (20.2)، (a23.2)، (b23.2) و (27.2)، توسط حلگر المان محدود غیرخطی بوسیله‌ی نرم افزار *COMSOL MULTIPHYSICS 3.2* حل شده‌است. یک شبکه با فواصل غیریکنواخت برای حل‌های دقیقتر مورد استفاده قرار گرفته‌است. مجموع المان‌های

²⁵ Diffusion coefficient of species

استفاده شده در محاسبات برابر 27268 عدد می‌باشد. خصوصیات فیزیکی برای سیال و مشخصات کانال میکرو که در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته، در جدول 1-2 نشان داده شده‌است.

جدول 1-2 ثابت‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی

80	ثابت دی الکتریک ϵ
8.854×10^{-12} , ($\epsilon_w = \epsilon \epsilon_0$)	ضریب گذردهی خلا ϵ_0 (C/Vm)
0.9×10^{-3}	ویسکوزیته μ (kg/ms)
998	چگالی ρ (kg/m ³)
2	طول کانال میکرو L (cm)
40	عمق کانال میکرو d (μm)
300	عرض کانال میکرو H (μm)
1.0×10^{-10}	ضریب دیفیوژن D (m ² /s)
-50	زتا پتانسیل بر روی دیواره ی کانال رسانا (mV)

2.5.2 میدان جریان با تولید گردابه‌های میکرو [۱۷]

معادلات فوق و شرایط مرزی منطبق بر میدان جریان به صورت عددی حل شده‌اند. یک میدان الکتریکی به مقدار $50 V/cm$ در طول کانال میکرو اعمال شده‌است [۱۷]. به منظور مقایسه، هر دو مورد موانع رسانا و نارسانا شبیه‌سازی شده‌اند. همانطور که قبلاً اشاره شده‌است، زمانیکه موانع رسانا در درون یک میدان الکتریکی اعمالی قرار گیرند، یک توزیع زتا پتانسیل غیریکنواخت بر روی سطوح رسانا القا خواهد شد که سبب ایجاد یک نیروی محرک متغیر در جریان الکترواستاتیک می‌شود. در نتیجه سرعت لغزشی بر روی سطوح رسانا با تغییر مکان، تغییر می‌کند که یک میدان جریان غیریکنواخت را حاصل می‌کند. شکل 2-8 میدان جریان در دو مورد را نشان می‌دهد. ویژگی قابل توجه در میدان جریان این است که جریان به طور قابل توجهی با حضور موانع رسانا تغییر می‌کند. در طی سطوح با بار مخالف (شکل 2-6)، چرخش جریان در نزدیکی ناحیه‌ی همگرا-واگرا در کانال ایجاد می‌شود. علامت‌های متضاد زتا پتانسیل القا شده، نیروهای محرک متضاد را در جریان الکترواستاتیک نشان می‌دهد که مسئول ایجاد

چرخش‌های جریان می‌باشند. در لایه مضاعف الکتریکی، در نواحی با زتاپتانسیل القایی مثبت، یک بار خالص منفی وجود دارد که یک جریان منفی به سمت ورودی کانال ایجاد می‌کند.

در نواحی با زتاپتانسیل القایی منفی، یک بار خالص مثبت در لایه مضاعف الکتریکی وجود دارد که یک جریان مثبت به طرف خروجی کانال ایجاد می‌کند. بنابراین برای تضمین ایجاد پیوستگی جریان، چرخش جریان ایجاد می‌شود.

واضح است که این رفتار سیال می‌تواند برای افزایش اختلاط جریان مورد استفاده قرار گیرد.

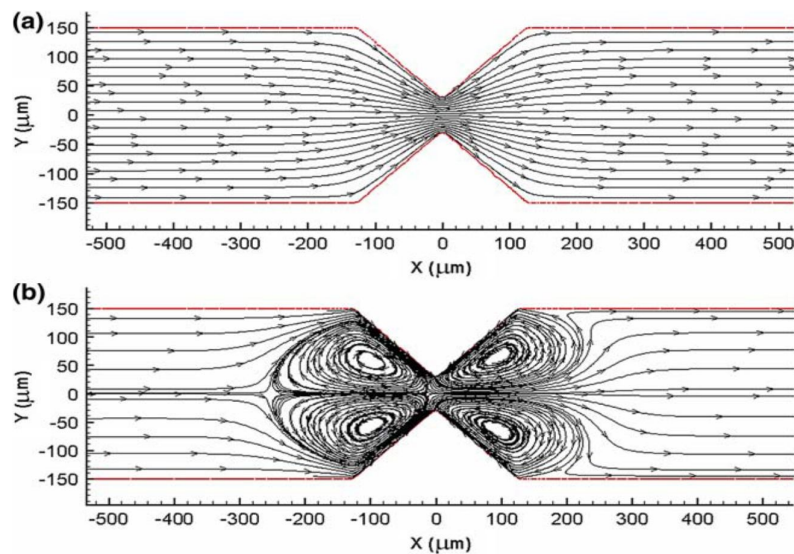
3.5.2 افزایش اختلاط ذرات [16]

برای بررسی امکان پذیری استفاده از جریان الکتروکنتیک با بار القا شده برای افزایش اختلاط ذرات، از دو دسته خط جریان وارد شده از ورودی کانال، با یک غلظت بی بعد و عمود شده‌ی صفر و یک امتحان می‌کنیم. این دو دسته خط جریان موازی ورودی، در ابتدا توسط خط مرکزی کانال جدا شده‌اند. همانطور که در مطالعات اخیر مشخص شده است [۲۲]، یک کانال ساده با قسمت همگرا-واگرا غیر رسانای می‌تواند در جریان‌های الکترواستمیک، گرادیان‌های غلظت فضایی پایدار و خطی ایجاد کند. با این وجود اگر چرخش جریان وجود نداشته باشد برای اختلاط خوب ذرات در پایین دست جریان نیاز به یک طول زیاد کانال برای اختلاط می‌باشد. بنابراین همانطور که در شکل 2-8 نشان داده شده، تولید گرده اختلاط جریان را افزایش خواهد داد. شکل 2-9 میدان غلظت در نزدیکی نواحی همگرا-واگرا با موانع رسانا و نارسانا را به ترتیب نشان می‌دهد. آشکار است که موانع رسانا یک اختلاط بهتر و قابل توجه و یک پروفیل غلظت یکنواختر، دقیقاً پس از ناحیه‌ی همگرا-واگرا، ایجاد می‌کند و طول اختلاط می‌تواند به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد. کاهش طول اختلاط به‌علت حضور چرخش‌های جریان در طرف بالادست ناحیه‌ی همگرا-واگرا می‌باشد که اختلاط جریان قابل توجهی قبل از عبور جریان از ناحیه‌ی همگرا-واگرا اتفاق می‌افتد. این خصوصیات ویژه‌ی افزایش اختلاط یک ابزار مفید برای تحلیل‌های شیمیایی و زیست‌شناختی بر روی تراشه است.

4.5.2 کنترل جریان [۱۷]

همانطور که در بالا اشاره شده، زتاپتانسیل القایی دارای علامت متضاد بین طرف بالادست جریان و پایین‌دست جریان نسبت به سطوح موانع رسانا می‌باشد که نیروهای محرک متضاد برای جریان الکترواستاتیک القایی حاصل می‌کند. بنابراین اگر خطوط جریان اصلی ایجاد شده توسط دیواره‌های کانال غیررسانا را در نظر بگیریم، موانع مثلی رسانا به عنوان یک جفت پمپ الکتروکننتیک با جهات پمپ کردن متضاد، عمل می‌کنند (شکل 2-10a). اگر موانع مثلی یک هندسه‌ی متقارن داشته باشند، یعنی زوایای موانع در بالادست و پایین‌دست جریان یکسان باشند، قدرت میدان الکتریکی محلی یکسان است (شکل 2-10b). به‌علاوه، زتاپتانسیل‌های القایی بر روی دو طرف مانع مثلی دارای مقادیر یکسان، ولی علامت مخالف می‌باشند (شکل 2-10c). مطابق با فرمول معادله‌ی هلمهولتز-اسملوچوفسکی معادله (15.2)، سرعت‌های لغزشی الکتروکننتیک القایی بر روی سطوح موانع بالادست و پایین‌دست جریان دارای مقدار یکسان در جهات مخالف می‌باشند (شکل 2-10d).

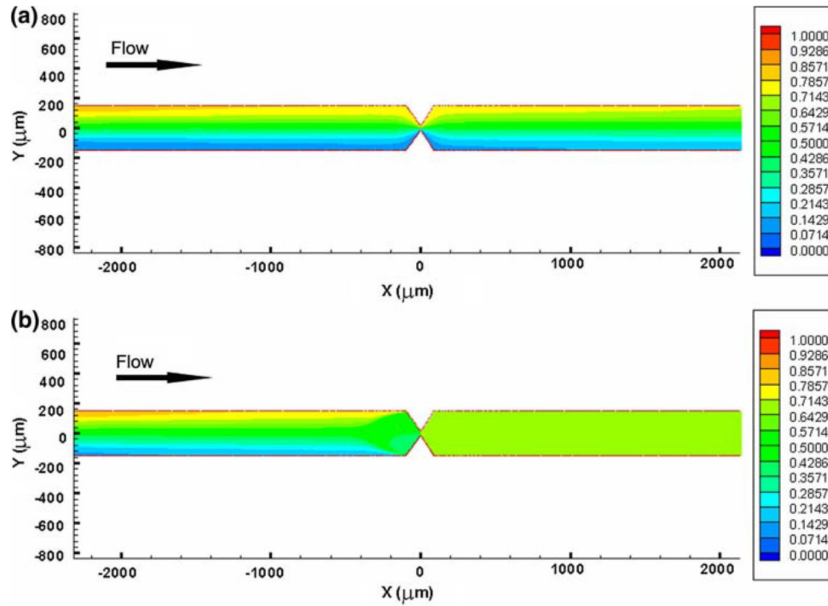
بنابراین یک بالانس بین جریان‌های عقبی و جلویی ایجاد شده و درنهایت یک اثر پمپ کردن خالص صفر می‌دهد.



شکل 2-8 میدان‌های جریان در کانال با موانع رسانا و نارسانا. [۱۷]

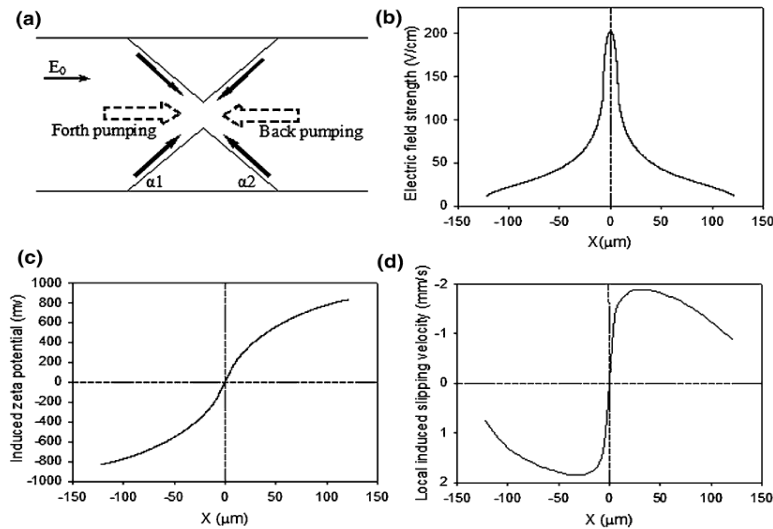
(a) یک جفت موانع نارسانا (b) یک جفت از موانع رسانا. خطوط نشان داده شده، خطوط جریان می‌باشند.

$$E_0 = 50 \text{ V/cm}$$



شکل 9-2 میدان‌های جریان با موانع موجود. (a) یک جفت از موانع نارسانا. (b) یک جفت از موانع رسانا. [۱۷]

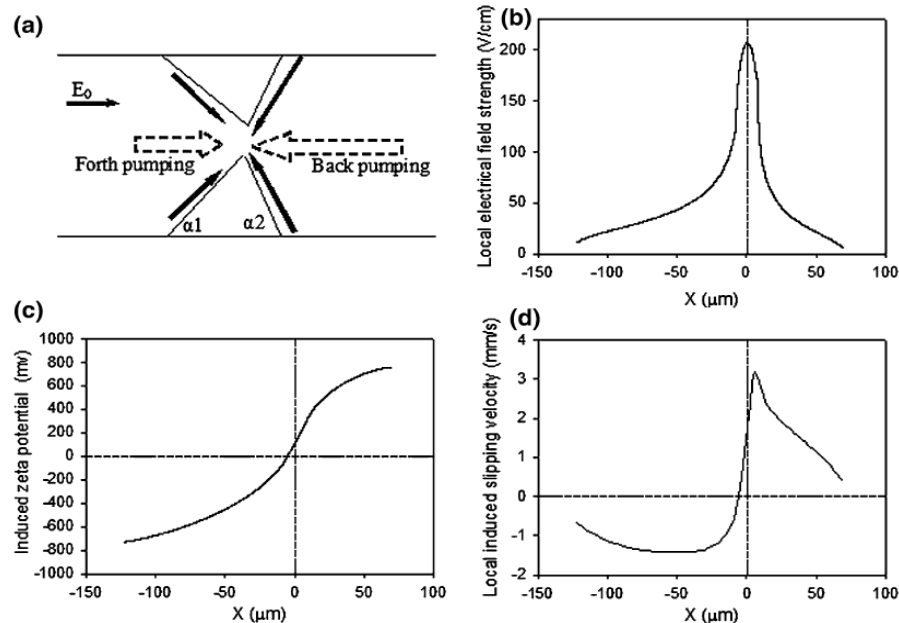
$$(E_0 = 50 \text{ V/cm}, D = 1.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s})$$



شکل 10-2 اثر بالانس شده‌ی پمپ کردن در یک جفت از موانع مثلثی رسانای متقارن. [۱۷]

(a) دیاگرام شماتیک از صفر بودن اثر پمپ کردن در موانع مثلثی متقارن ($\alpha_1 = \alpha_2 = 45^\circ$). (b) قدرت میدان الکتریکی محلی در طی سطح مانع. (c) توزیع زتا پتانسیل القایی. (d) سرعت جریان الکترواستاتیک القا شده محلی

$$(E_0 = 25 \text{ V/cm})$$



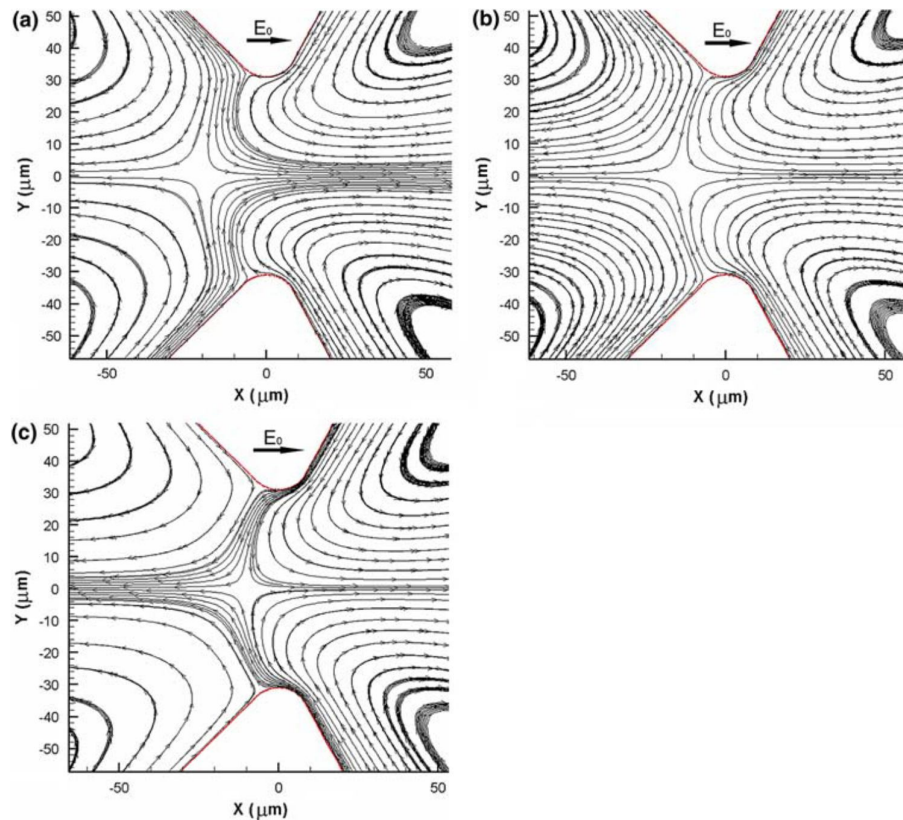
شکل 11-2 اثر پمپ کردن به سمت عقب در یک جفت مانع مثلثی نامتقارن. [۱۷]

(a) دیاگرام شماتیک اثر پمپ کردن منفی خالص در موانع مثلثی نامتقارن ($\alpha_1 = 45^\circ, \alpha_2 = 60^\circ$). (b) قدرت میدان الکتریکی محلی در طی سطح مانع. (c) توزیع زتاپتانسیل القایی. (d) سرعت جریان الکترواستاتیک القا شده‌ی محلی ($E_0 = 25 \text{ V/cm}$)

خطوط جریان اصلی در جریان الکترواستاتیک ایجاد شده از دیواره‌های غیرسانای کانال، این بالانس را نابود خواهد کرد و یک جریان مثبت خالص حاصل می‌شود. با بزرگتر کردن زاویه‌ی مانع در پایین دست جریان، تقارن مانع مثلثی از بین می‌رود (شکل 11-2a) و هر دو قدرت میدان الکتریکی محلی (شکل 11-2b) و زتاپتانسیل القایی (شکل 11-2c) بطور نامتقارن توزیع خواهد شد. مشخص شده است که با بزرگتر کردن زاویه‌ی مانع در پایین دست جریان، جریان الکترواستاتیک القایی در طرف پایین دست جریان نسبت به مانع، قوی‌تر می‌شود (شکل 11-2d) که یک جریان منفی قدرتمندتری را حاصل می‌کند و اثر پمپ کردن به سمت عقب به‌طور خالص ایجاد می‌شود. پمپ کردن به سمت عقب به قدرت میدان الکتریکی اعمالی در کانال میکرو بستگی دارد به‌طوری‌که میدان الکتریکی اعمالی قوی‌تر یک اثر پمپ کردن به عقب با قدرت بیشتری را می‌دهد که علت آن وابستگی غیرخطی جریان الکترواستاتیک با بار القایی نسبت به قدرت میدان الکتریکی می‌باشد.

انتظار می‌رود که با تنظیم میدان الکتریکی القایی، پمپ‌کردن به عقب می‌تواند کنترل شود به‌طوری‌که متناسب با آن کاهش یابد، بالانس شود و یا بر میدان جریان اصلی ایجاد شده توسط دیواره‌های غیررسانای کانال، غلبه کند. بنابراین یک اثر کنترل جریان می‌تواند حاصل شود.

شکل 2-12 یک نمایش بسط داده شده از میدان‌های جریان در ناحیه‌ی همگرا-واگرا برای مورد یک جفت مانع رسانای نامتقارن ($\alpha_1 = 45^\circ, \alpha_2 = 60^\circ$) تحت سه قدرت میدان الکتریکی اعمال شده مختلف به ترتیب 25, 45, $100 V/cm$ می‌باشد، نشان داده‌است. تحت یک میدان الکتریکی نسبتاً ضعیف ($25 V/cm$)، خطوط جریان رو به جلوی کوچکی به طرف ناحیه‌ی همگرا-واگرا می‌روند (شکل 2-12a). بنابراین یک جریان مثبت خالص ایجاد می‌شود. علت آن این است که تحت یک میدان الکتریکی ضعیف، پمپ‌کردن به عقب در نزدیکی موانع رسانا که در بالا اشاره شد، برای توقف جریان الکترواستاتیک ایجاد شده توسط دیواره‌های رسانای کانال در بالادست جریان به اندازه‌ی کافی قدرت ندارد. زمانیکه قدرت میدان الکتریکی اعمالی افزایش می‌یابد، اثر پمپ‌کردن به عقب هم قوی‌تر شده و می‌تواند جریان الکترواستاتیک ایجاد شده توسط دیواره‌ی کانال نارسانا در بالادست جریان را در یک قدرت الکتریکی بحرانی ($45 V/cm$) قطع کند. تحت میدان الکتریکی بحرانی، هیچ جریانی نمی‌تواند به ناحیه‌ی همگرا-واگرا وارد شود (شکل 2-12b) که معادل یک شیر بسته می‌باشد. اگر قدرت میدان الکتریکی اعمالی بیشتر شود، جریان برگشتی در نزدیکی طرف پایین دست موانع رسانا قوی‌تر از جریان الکترواستاتیک ایجاد شده توسط دیواره‌ی نارسانای کانال در بالادست جریان می‌شود. همانطور که در شکل 2-12c نشان داده‌شده، یک جریان منفی خالص در این مورد شکل می‌گیرد. واضح است که این اثر کنترل جریان مهم است و اشاره به این موضوع دارد که از یک جفت مانع رسانای نامتقارن می‌توان به‌عنوان یک شیر برای کنترل دبی جریان و کنترل جهت جریان، به سادگی با تنظیم قدرت میدان الکتریکی اعمالی در طول کانال استفاده کرد.

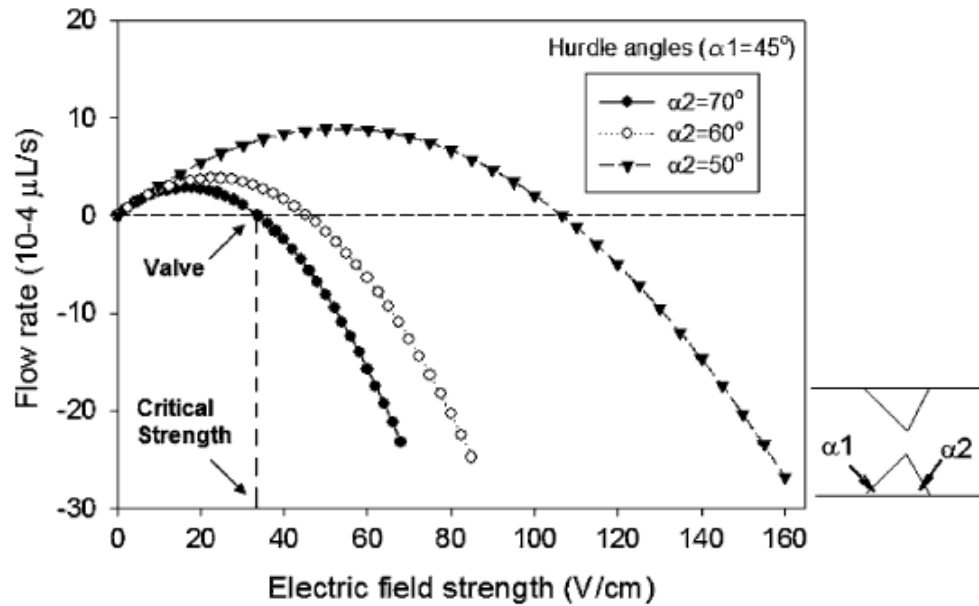


شکل 2-12 میدان های جریان در نزدیکی مانع مثلثی نامتقارن تحت میدان های الکتریکی مختلف [۱۷]
 $(\alpha 1 = 45^\circ, \alpha 2 = 60^\circ)$
 100 V/cm (c) 45 V/cm (b) 25 V/cm (a)

شکل 2-13 دبی های جریان درون یک کانال را به عنوان تابعی از قدرت میدان الکتریکی اعمالی رسم کرده است. واضح است که در ابتدا دبی جریان با توجه به میدان الکتریکی اعمالی افزایش یافته و به یک مقدار مثبت حداکثر می رسد. پس از آن، شروع به کاهش کرده و در یک مقدار میدان الکتریکی بحرانی به صفر می شود. زمانیکه میدان الکتریکی بیشتر افزایش می یابد، مسیر جریان تغییر کرده و دبی جریان منفی افزایش می یابد. بنابراین تنظیم جریان الکتروکنتیک می تواند این چنین توسط میدان الکتریکی اعمال شده، کنترل شود و هیچ قسمت مکانیکی اضافه ای مورد نیاز است. نتایج فوق متقاعد می کند که اثر تنظیم جریان می تواند توسط تنظیم قدرت میدان الکتریکی اعمال شده حاصل شود. وابستگی کنترل جریان بر روی زوایای مانع مورد بررسی قرار گرفته است. شکل 2-13 اثر زوایای مختلف مانع در پایین دست جریان بر روی دبی های جریان را نشان می دهد به طوریکه زاویه ی مانع در طرف بالادست جریان $(\alpha = 45^\circ)$ و فاصله ی بین دو لبه ی مانع در قسمت همگرا-واگرا $(50 \mu m)$ ثابت می باشد. به طور واضح

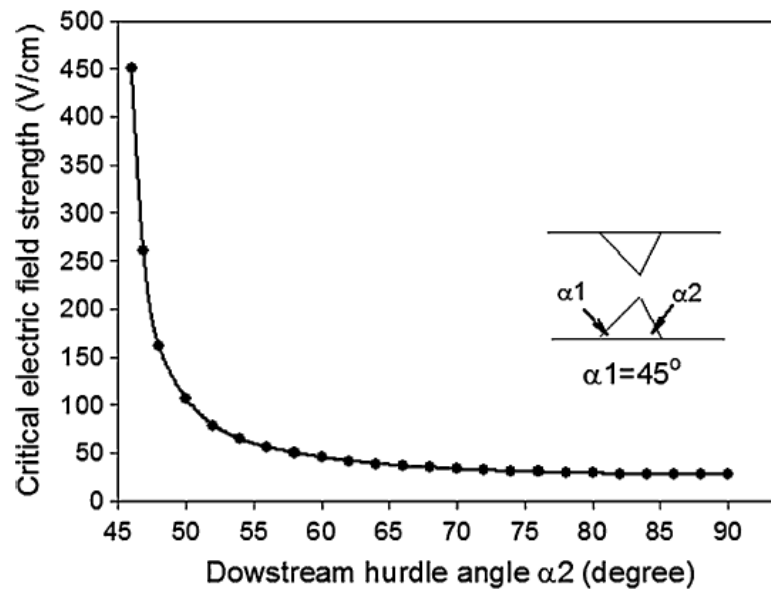
مشخص است که اثر کنترل جریان به زاویه‌ی مانع در طرف پایین دست جریان وابسته است. یک زاویه‌ی کوچکتر مانع در سمت پایین دست جریان، یک مقدار ماکزیمم دبی جریان مثبت بیشتری را می‌دهد و به یک قدرت میدان الکتریکی بحرانی بالاتری نیاز دارد تا به دبی جریان صفر برسد.

همانطور که در شکل 2-14 نشان داده شده، یافته‌ها حاکی از آن است که یک رابطه‌ی غیرخطی بین زاویه‌ی مانع در طرف پایین دست جریان و قدرت میدان الکتریکی بحرانی وجود دارد. اشاره‌ی یک نکته در اینجا حائز اهمیت است، هنگامیکه زاویه‌ی مانع در طرف پایین دست جریان به زاویه‌ی مانع در طرف بالادست جریان نزدیک شود آنگاه قدرت میدان الکتریکی بحرانی به سمت بینهایت میل می‌کند. 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 در بالادست ایجاد می‌شود، حاصل کرد. در اینجا وابستگی تابع کنترل جریان بر روی فاصله بین دو مانع در قسمت همگرا-واگرا مورد آزمایش قرار گرفته است. شکل 2-15 دبی جریان در فواصل مختلف بین موانع و با زوایای ثابت موانع ($\alpha_1 = 45^\circ, \alpha_2 = 60^\circ$) را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، اثر کنترل جریان نسبت به فاصله‌ی بین دو مانع خیلی حساس می‌باشد. هر قدر که فاصله‌ی بین دو مانع موجود افزایش یابد، حداکثر دبی جریان هم افزایش می‌یابد. همچنین یک فاصله‌ی بزرگ، یک میدان الکتریکی بزرگتری را برای رسیدن به حالت شیر بسته شده نیاز دارد بطوریکه دبی جریان صفر شود. شکل 2-16 رابطه‌ی بین فاصله‌ی دو سر مانع و قدرت میدان الکتریکی بحرانی را نشان می‌دهد. به این نکته باید اشاره کرد که قدرت میدان الکتریکی بحرانی با افزایش فاصله بین دو مانع خیلی سریع افزایش می‌یابد. با این وجود، تحت یک میدان الکتریکی قدرتمند، مدل با بار القایی که قبلاً مورد بحث قرار گرفت، معتبر نیست زیرا واکنش‌های الکتروشیمیایی با قدرت بالایی در فصل مشترک بین سیال و رسانا تحت میدان الکتریکی با قدرت بالا اتفاق می‌افتد. بنابراین برای کسب کنترل جریان مؤثر تحت یک میدان الکتریکی نسبتاً ضعیف باید از یک فاصله‌ی زیاد بین دو مانع در کانال اجتناب کنیم.

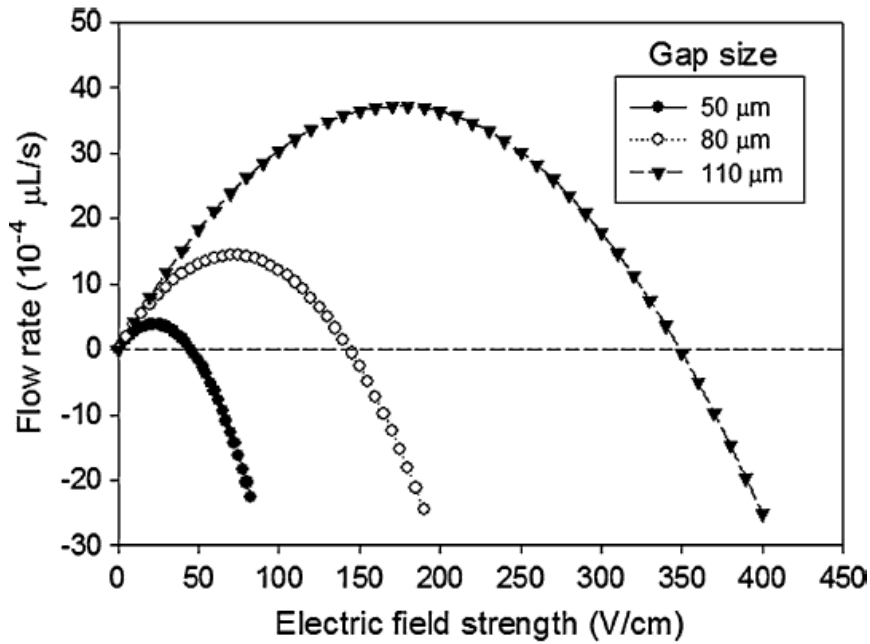


شکل 2-13 دبی‌های جریان به عنوان تابعی از قدرت میدان الکتریکی اعمالی برای کانال‌های میکرو [۱۷]

با زوایای مختلف مانع و در فاصله‌ی ثابت بین دو مانع $50\mu\text{m}$

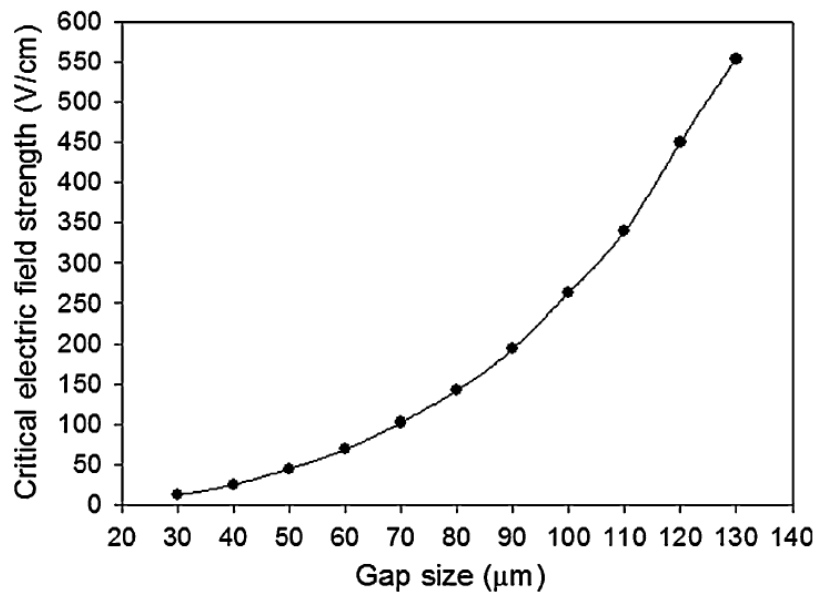


شکل 2-14 قدرت میدان الکتریکی بحرانی که با زاویه‌ی مانع در طرف پایین دست جریان تغییر می‌کند. [۱۷]



شکل 2-15 دبی های جریان با فواصل مختلف بین دو مانع و در زوایای ثابت مانع [۱۷]

$$(\alpha_1 = 45^\circ, \alpha_2 = 60^\circ)$$



شکل 2-16 قدرت میدان الکتریکی بحرانی که با فاصله ی بین دو سر مانع تغییر می کند. [۱۷]

$$(\text{تحت زوایای ثابت مانع } \alpha_1 = 45^\circ \alpha_2 = 60^\circ)$$

1.4.5.2 نتیجه گیری

جریان الکترواستاتیک با بار القا شده در یک کانال میکرو با یک جفت مثلثی رسانا که یک ناحیه‌ی همگرا-واگرا را تشکیل می‌دهند، در مطالعه‌ی فوق به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که یک توزیع غیریکنواخت زتاپتانسیل القایی بر روی سطوح رسانا باعث ایجاد سرعت‌های الکترواستاتیک متغیر بر روی سطوح مانع شده و جریان‌های چرخشی در نزدیکی ناحیه‌ی همگرا-واگرا تشکیل می‌شود. شبیه‌سازی نشان داد که اختلاط ذرات به‌طور قابل توجهی توسط گردابه‌های ایجاد شده در نزدیکی موانع می‌تواند افزایش یابد. زمانیکه از یک جفت مانع نامتقارن در کانال استفاده می‌کنیم می‌توان با تنظیم قدرت میدان الکتریکی اعمالی در درون کانال، جریان سیال را کنترل کنیم. این اثر کنترل جریان می‌تواند در رسیدن در دبی‌های مختلف جریان در جهات گوناگون و همچنین حالت شیربسته (دبی جریان صفر) مورد استفاده قرار بگیرد. اثر کنترل جریان به ابعاد ناحیه‌ی همگرا-واگرا وابسته می‌باشد. در مواردی که زاویه‌ی مانع در طرف پایین دست جریان نزدیک به زاویه مانع در طرف بالادست جریان باشد و یا یک فاصله‌ی زیاد بین دو مانع استفاده شود، یک قدرت میدان الکتریکی بحرانی بیشتری برای دستیابی به دبی جریان صفر مورد نیاز است.

میدان الکتریکی بحرانی وابستگی بیشتری نسبت به فاصله‌ی بین دو مانع دارد و وابستگی آن نسبت به زاویه‌ی مانع کمتر می‌باشد. برای دستیابی به کنترل جریان مؤثر تحت یک میدان الکتریکی نسبتاً ضعیف، ترکیب زاویه‌ی بزرگتر مانع در طرف پایین دست جریان و فاصله‌ی کمتر بین دو مانع پیشنهاد می‌گردد. این کار یک روش جریان الکترواستاتیک با بار القایی جدید و ساده‌ای برای افزایش اختلاط و کنترل جریان بدون هیچ قسمت مکانیکی متحرکی را ارائه می‌دهد.

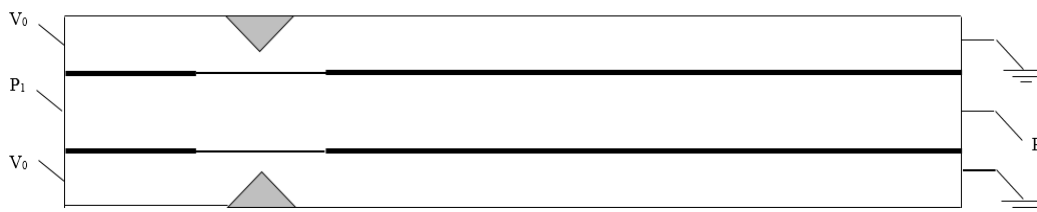
فصل سوم

مدلسازی کانال‌ها، جریان سیال و معادلات حاکم بر آن

1.3 مقدمه

در فصل 2 پدیده‌های الکتروکنیتیک با بار القایی و خصوصیات آن را معرفی کردیم. در این فصل معادلات حاکم که برای شبیه‌سازی عددی جریان الکتروکنیتیک با بار القایی، حرکت غشا و میدان غلظت مورد نیاز است را شرح داده شده و مدلسازی حرکت دیواره‌ی انعطاف پذیر (غشا) و تغییرات بازده اختلاط در میکرو کانال میانی مدنظر می‌باشند.

همچنین در این فصل قصد داریم تا با استفاده از مبانی موجود در پژوهش‌های گذشته، مدلی برای کنترل جریان سیال، ایجاد و بهبود اختلاط ذرات در سیال مورد نظر طراحی کنیم. نکته ای که بیان آن در ابتدا حائز اهمیت است، تفاوت عمده ایست که این کار با پژوهش‌های قبل دارد و آن اینست که در این پژوهش به بررسی اختلاط غیر مستقیم می‌پردازیم. بدین گونه که دو نوع سیال با خصوصیات متفاوت در این مدل مورد استفاده قرار گرفته است که با استفاده از ویژگی جریان الکترواستمیتیک القایی در یک سیال به کنترل جریان سیال و بهبود اختلاط در مقاطع مختلف کانال حاوی سیال دیگر می‌پردازیم. این سه کانال بصورت افقی بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند بطوریکه کانال‌های بالا و پایینی بطور متقارن نسبت به کانال میانی بوده و ارتباط آن‌ها با یکدیگر تنها در قسمتی از دیواره می‌باشد که در این قسمت، دیواره از یک غشا تشکیل شده است.



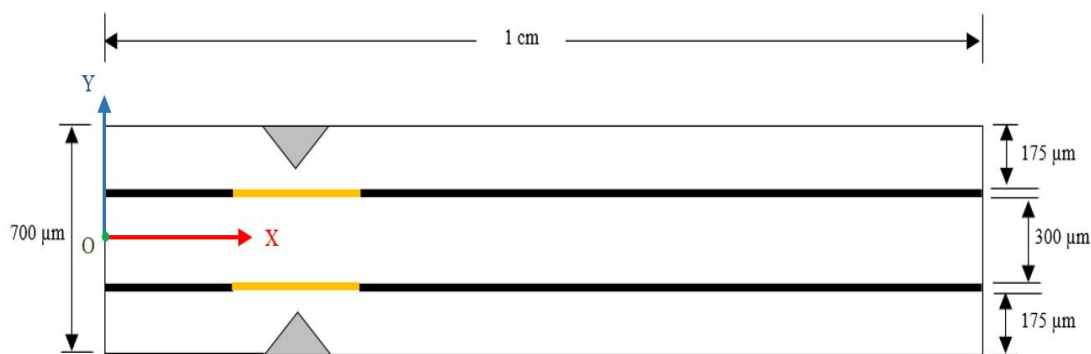
شکل 3-1 کانال‌های مدل سازی شده شامل سه کانال ، 2 مانع و 2 غشا

این غشا قابل تغییر شکل بوده که عامل تغییر شکل آن، ایجاد اختلاف فشار در دو طرف غشا (سطح بالا و پایین) می‌باشد. تغییر شکل ایجاد شده در غشا، توسط اختلاف پتانسیل اعمالی در دو سر کانال‌های بالا و پایینی قابل کنترل می‌باشد. در ادامه به تشریح کامل مدل می‌پردازیم.

2.3 خصوصیات فیزیکی مدل

مدل طراحی شده در این مطالعه، یک مدل دو بعدی می‌باشد. این سیستم نسبت به محور X متقارن بوده و همانطور که در شکل 2-3 نشان داده شده، مبدا سیستم مختصات در نقطه O انتخاب شده است. دیواره‌های موازی با محور Y در بالادست سیستم به عنوان ورودی تعریف شده درحالیکه دیواره‌های موجود در بالادست به عنوان خروجی انتخاب شده‌اند.

ابعاد مورد نظر که در مدلسازی کانال‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند در تصویر زیر آورده شده‌است :



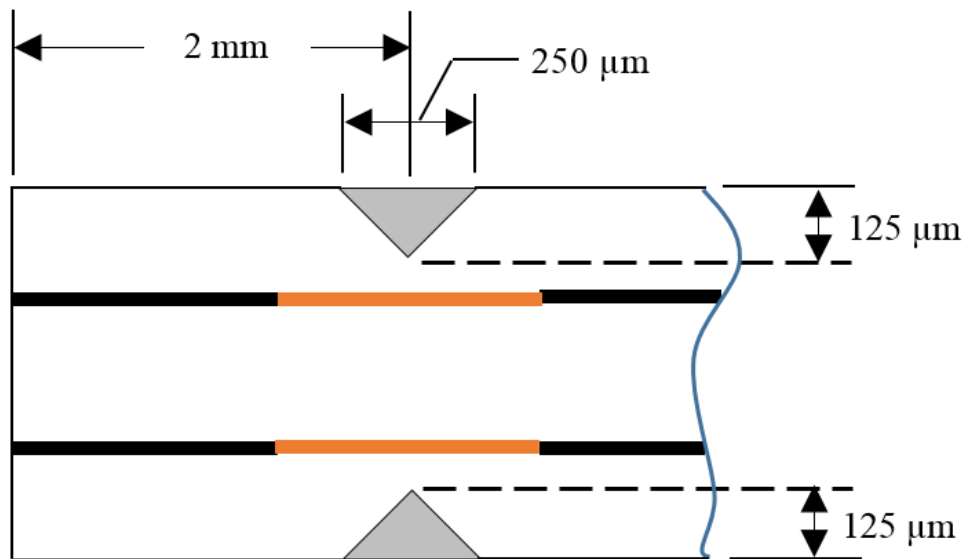
شکل 2-3 ابعاد کلی کانال‌های مدلسازی شده با دو مانع و دو غشا

1.2.3 ابعاد کانال‌ها، غشاها و موانع مدلسازی شده

این مدل شامل سه کانال می‌باشد که سیال موجود در آن‌ها کاملاً از یکدیگر جدا می‌باشند. ابعاد کلی مدل $10000 * 700 \mu m$ می‌باشد (طول کانال 1cm). ارتفاع کانال میانی $300 \mu m$ ، ارتفاع کانال‌های بالا و پایینی یکسان و برابر $175 \mu m$ می‌باشد. دو مانع موجود در کانال‌های بالا و پایینی دارای ابعاد کاملاً یکسان می‌باشند که دو غشای مورد نظر در بالا و پایین کانال میانی، در مقابل این دو غشا قرار دارند. تمام دیواره‌ها و مرزها به‌غیر از دو غشای موجود در یک ناحیه از بالا و پایین کانال میانی، صلب می‌باشند. غشاهای مذکور دارای ضخامت معین و انعطاف پذیر بوده که دارای مدول یانگ بسیار پایینی نسبت به مرزهای میانی موجود در بین کانال‌ها می‌باشد.

2.2.3 ابعاد و موقعیت موانع

اندازه‌ی موانع و فاصله‌ی آنها تا غشا در دو کانال بالا و پایین طبق مقاله‌ی ژمین²⁶ [۱۶] در نظر گرفته شده‌است. دو مانع موجود در کانال‌های بالا و پایین، دارای ابعاد یکسان بوده بطوریکه دو مثلث متساوی الساقین با ارتفاع $125\ \mu\text{m}$ و قاعده‌ی $250\ \mu\text{m}$ را تشکیل می‌دهند. زوایای پای دو ساق این مثلث‌ها 45° درجه می‌باشند. همچنین فاصله‌ی لبه‌ی مانع تا غشا $50\ \mu\text{m}$ می‌باشد.

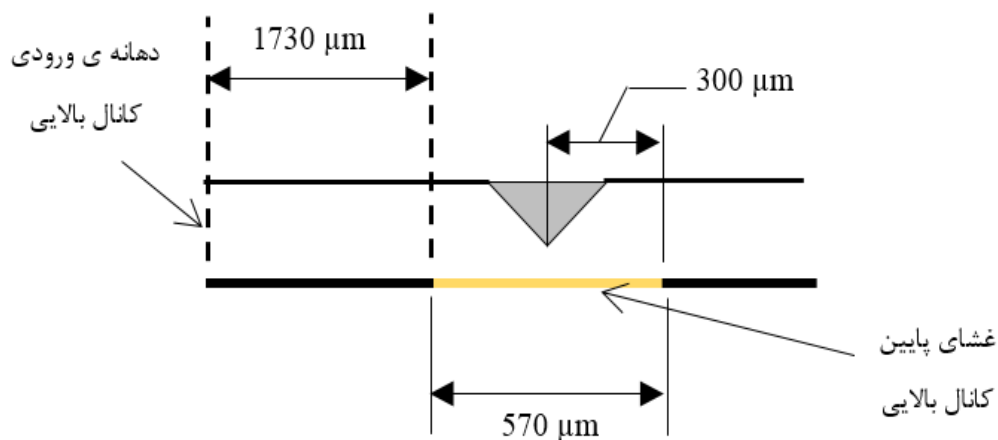


شکل 3-3 ابعاد و موقعیت موانع موجود در کانال بالا و پایینی

3.2.3 دیواره‌های میانی و غشاها

ضخامت دیواره‌های موجود در بین کانال‌ها و همچنین ضخامت دو غشا، با هم یکسان و برابر $25\ \mu\text{m}$ می‌باشد. طول غشاها نیز با توجه به ملاحظات فشار موجود بر روی سطوح بالا و پایین غشا، برابر $570\ \mu\text{m}$ در نظر گرفته شده که در بخش‌های بعد به توضیح کامل آن پرداخته شده است.

²⁶ zhemin



شکل 3-4 ابعاد و موقعیت دیواره‌های غشای موجود در پایین کانال بالایی

3.3 روابط و معادلات دو بعدی حاکم بر مدل

حرکت سیال در مدل ارائه شده به دو حالت کاملاً متفاوت جریان دارد، بدین گونه که جریان سیال در کانال‌های بالا و پایین طبق مبانی جریان الکترواسمیتیک با بار القایی انجام شده و جریان سیال در کانال میانی بر اثر اختلاف فشار حاکم در دو سر کانال صورت می‌پذیرد.

در کانال‌های بالا و پایین با اعمال اختلاف پتانسیل الکتریکی به دو سر کانال، یک میدان الکتریکی در طول کانال ایجاد می‌شود. زمانیکه یک سطح رسانا در تماس با محلول الکترولیت قرار گرفته و سپس میدان الکتریکی در آن اعمال شود، بارهای سطحی بر روی سطح رسانا القا خواهد شد. یک جفت مانع موجود که یکی در کانال بالا و دیگری در کانال پایین قرار دارند، دارای دیواره‌های رسانا بوده و دیگر دیواره‌های کانال نارسانا است. بارهای سطحی القاشده بر روی سطوح رسانا و میدان الکتریکی اعمالی باعث ایجاد گردابه‌هایی با ابعاد میکرو خواهند شد. توزیع زتاپتانسیل بر روی دیواره‌ی نارسانا با دیواره‌های رسانا کاملاً متفاوت است، زیرا زتاپتانسیل بر روی دیواره‌های نارسانا ثابت بوده و اما این توزیع بر روی دیواره‌ی رسانا متغیر می‌باشد. همچنین مقدار زتاپتانسیل بر روی دیواره‌های رسانا دارای مقدار بسیار بزرگتری نسبت به مقدار آن بر روی دیواره‌های نارسانا می‌باشد. به همین دلیل یک جهش بسیار بزرگ در مقدار زتاپتانسیل از دیواره‌ی نارسانا به دیواره‌ی رسانا داریم. جریان حاصل شده در کانال دارای یک سرعت لغزشی بر روی دیواره‌ها می‌باشد. مقدار سرعت لغزشی حاصل شده بر روی دیواره‌های کانال،

وابسته به توزیع زتاپتانسیل بر روی دیواره‌ها، میدان الکتریکی اعمال شده، لزجت و ضریب گذردهی سیال بوده و جهت آن در خلاف جهت میدان الکتریکی حاصله می‌باشد [۱۶].

1.3.3 میدان الکتریکی جریان مستقیم در یک محیط دی الکتریک

یکی از معادلات بنیادی برای محاسبه‌ی توزیع پتانسیل الکتریکی در یک محیط دی الکتریک، معادله‌ی پواسون [۲۳] می‌باشد:

$$\nabla^2 \phi_e = \frac{\rho_e}{\epsilon_0 \epsilon} \quad (1.3)$$

که در آن ϕ_e توزیع پتانسیل الکتریکی اعمالی، ϵ و ϵ_0 به ترتیب ثابت دی الکتریک در محیط و خلا و ρ_e چگالی بار آزاد می‌باشد. با فرض اینکه هیچ بار آزادی وجود ندارد، پس $\rho_e \approx 0$ بوده و معادله‌ی پواسون به معادله‌ی لاپلاس [۱۶] تبدیل می‌شود

$$\nabla^2 \phi_e = 0 \quad (2.3)$$

بدین‌گونه توزیع پتانسیل الکتریکی اعمالی، ϕ_e ، در سیال توسط حل معادله‌ی لاپلاس بدست می‌آید. برای حل معادله‌ی لاپلاس، همانطور که در جدول زیر لیست شده‌است، ما فرض می‌کنیم که بخش رسانای دیواره‌های کانال بطور کامل قطبی شده‌است (ماده‌ی کاملاً رسانا) و این قطبی شدن به اندازه‌ی کافی سریع رخ می‌دهد که می‌توانیم از مدت زمان قطبی شدگی چشم پوشی کنیم. بنابراین یک لایه مضاعف الکتریکی دوقطبی القا شده در حالت پایدار بر روی بخش کاملاً رسانا تشکیل می‌شود. شرایط مرزی حاکم بر مدل ما برای حل معادله‌ی لاپلاس بصورت زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned} \vec{n} \cdot \vec{\nabla} \phi &= 0 && \text{در دیواره‌های کانال بالا و پایینی} && \text{(a)} \\ \phi &= \phi_e && \text{در ورودی کانال بالا و پایینی} && \text{(b)} \\ \phi &= 0 && \text{در خروجی کانال بالا و پایینی} && \text{(c)} \end{aligned} \quad (3.3)$$

\vec{n} بردار نرمال یکه در سیال می‌باشد. شرایط فوق تنها در دو کانال بالا و پایینی حاکم است زیرا جریان الکترواستاتیک با بار القایی تنها در آن دو کانال حاکم می‌باشد. به همین دلیل اختلاف پتانسیل الکتریکی در دو سر کانال‌های بالا و پایینی اعمال می‌شود.

4.3 میدان جریان سیال

1.4.3 معادلات حاکم بر جریان سیال و شرایط مرزی در کانال‌های بالا و پایین

یک سیال تراکم ناپذیر نیوتنی که بطور پیوسته در کانال با ابعاد میکرو جریان دارد را در نظر می‌گیریم. معادله‌ی پیوستگی و معادله‌ی ناویر استوکس، معادلات حاکم هستند که برای داشتن توزیع جریان در کانال میکرو نیاز به حل آن‌ها می‌باشد.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{U} = 0 \quad (4.3)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{U} \cdot \vec{\nabla} \vec{U} \right] = -\vec{\nabla} P + \mu \nabla^2 \vec{U} + \vec{E} \rho_e \quad (5.3)$$

که ρ و μ ویسکوزیته و چگالی سیال، \vec{U} سرعت آن، و $\vec{\nabla} P$ گرادیان فشار در کانال می‌باشد. از آنجاییکه عدد رینولدز برای سیال در مقیاس میکرو کمتر از یک است ($Re \ll 1$)، ترم جابجایی در سمت چپ معادله مومنتم می‌تواند حذف شود؛ بنابراین می‌توان معادله (5.3) را به فرم زیر نوشت

$$\rho \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} = -\vec{\nabla} P + \mu \nabla^2 \vec{U} + \vec{E} \rho_e \quad (6.3)$$

با در نظر گرفتن جریان پایدار و عدم وجود نیروی فشاری محرک در درون لایه مضاعف الکتریکی، چگالی بار خالص محلی صفر نیست. بنابراین نیروی محرک برای جریان الکترواستاتیک، $\vec{E} \rho_e$ ، فقط در لایه مضاعف الکتریکی وجود دارد. برای لایه مضاعف الکتریکی بسیار نازک، نیروی محرک برای جریان الکترواستاتیک می‌تواند با شرایط مرزی لغزشی بر روی سطح جایگزین شود. شرایط مرزی موجود در مدل مورد نظر ما بصورت زیر می‌باشد:

$$\vec{n} \cdot \vec{\nabla} U = 0 \quad \text{در ورودی و خروجی کانال‌های بالا و پایین} \quad (7.3)$$

$$\vec{U}_{slip-w(N/C)} = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon \zeta_w}{\mu} \vec{E} \quad \text{در دیواره‌های نارسانای کانال بالا و پایین} \quad (8.3)$$

$$\vec{U}_{slip-w(C)} = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon \zeta_{induced}}{\mu} \vec{E} \quad \text{در دیواره‌های موانع رسانای کانال بالا و پایین} \quad (9.3)$$

حرکت سیال در دو کانال بالا و پایین با ابعاد میکرو، کاملاً بر اثر مبانی الکتروکنیتیک بوده و گرادینان فشار در این کانال‌ها وجود ندارد. $\vec{E} = -\vec{\nabla}\phi_e E$ میدان الکتریکی محلی اعمالی است که توزیع آن قبلاً توسط معادله‌ی (2.3) محاسبه شده‌است. ζ_w زتاپتانسیل بر روی دیواره‌های نارسانا و $\zeta_{induced}$ زتاپتانسیل القایی بر روی دیواره‌های رسانی در کانال‌های بالا و پایین می‌باشد. مدل مد نظر در این مطالعه، وابسته به زمان است در نتیجه بخش گذرا در معادله‌ی (5.3)، $\frac{\partial \vec{U}}{\partial t}$ ، نمی‌تواند حذف شود.

2.4.3 معادلات حاکم بر جریان سیال و شرایط مرزی در کانال میانی

در کانال میانی نیز یک جریان تراکم‌ناپذیر نیوتنی که در میکرو کانال به‌طور پیوسته جریان دارد را در نظر می‌گیریم. جریان سیال در کانال میانی، جریان بر اثر ایجاد اختلاف فشار در دو سر کانال می‌باشد. معادلات حاکم بر جریان در کانال میانی، معادلات پیوستگی و ناویر استوکس می‌باشند که به دست آوردن توزیع سرعت در کانال میانی، منوط به حل آنهاست. این معادلات به صورت زیر بیان می‌گردند:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{U} = 0 \quad \text{معادله پیوستگی} \quad (10.3)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{U} \cdot \vec{\nabla} \vec{U} \right] = -\vec{\nabla} P + \mu \nabla^2 \vec{U} \quad \text{معادله ناویر - استوکس} \quad (11.3)$$

همانطور که قبلاً اشاره شد، عدد رینولدز برای سیال در مقیاس میکرو کمتر از یک می‌باشد در نتیجه ترم جابجایی در سمت چپ معادله‌ی مومنتم می‌تواند حذف شود که معادله مومنتم به معادله‌ی زیر تبدیل می‌شود

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} \right] = -\vec{\nabla} P + \mu \nabla^2 \vec{U} \quad \text{معادله ناویر - استوکس} \quad (12.3)$$

شرایط مرزی حاکم بر مرزهای کانال میانی، شرط عدم لغزش بر روی تمامی دیواره‌ها، فشار ثابت در ورودی کانال و فشار صفر در خروجی کانال می‌باشند.

$$P = P_1 \quad \text{در ورودی کانال میانی} \quad (13.3)$$

$$P = P_2 \quad \text{در خروجی کانال میانی} \quad (14.3)$$

$$U|_{wall} = 0 \quad \text{در دیواره‌های کانال میانی (عدم لغزش)} \quad (15.3)$$

اختلاف فشار در دو سر کانال میانی $\Delta P = P_2 - P_1$ حائز اهمیت است.

5.3 میدان غلظت

در این مطالعه، میدان غلظت در خطوط جریان توسط معادله‌ی غلظت بیان می‌شود

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \vec{U} \cdot \vec{\nabla} C_i = D_i \nabla^2 C_i \quad i = 1, \dots, n \quad (16.3)$$

که C_i غلظت در خط جریان نام سیال و C_i ضریب دیفیوژن آن می‌باشد. شرایط مرزی به صورت زیر می‌باشد

$$C = C_i^* \quad \text{در ورودی نام } i=1, \dots, n \quad (17.3)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial n} \Big|_{r \geq 0} = 0 \quad \text{در تمامی دیواره‌ها} \quad (18.3)$$

و غلظت اولیه در کانال میانی به صورت زیر تعریف می‌شود

$$t=0 \quad \text{درون کانال میانی با ابعاد میکرو در زمان} \quad (19.3)$$

$$C_i|_{r=0} = 0$$

6.3 مدل‌سازی میدان جریان سیال

1.6.3 مدل‌سازی میدان جریان در کانال‌های بالا و پایینی

برای مدل‌سازی میدان جریان در کانال‌های بالا و پایین در ابتدا باید میدان الکتریکی را با ماژول میدان هادی²⁷ در نرم افزار مدل کنیم. به منظور مدل‌سازی میدان الکتریکی باید شرایط مرزی در تمامی مرزها از جمله رسانا و غیررسانا، بر روی دیواره‌های ثابت و متحرک، بغیر از مرزهای ورودی و خروجی را در دو کانال بر روی عایق الکتریکی²⁸ قرار دهیم و در مرز ورودی، شرط مرزی را بر روی پتانسیل الکتریکی²⁹ قرار داده و مقدار آن را طبق منحنی ولتاژ الکتریکی (20.3) اعمال می‌کنیم. در مرز خروجی همچنین شرط مرزی را بر روی پتانسیل الکتریکی قرار داده و مقدار آن را صفر ولت می‌دهیم. در نتیجه اختلاف ولتاژ ∇V را در طول کانال اعمال کرده‌ایم.

$$V_{in} = 70 + 30 \times \sin(\pi t / 150) \quad \text{ولتاژ اعمال شده در ورودی کانال بالا و پایینی} \quad (20.3)$$

$$V_{out} = 0 \quad V / cm$$

بدین گونه که ولتاژ اعمال شده در ورودی کانال بالا و پایینی مطابق با زمان تغییر می‌کند. میدان الکتریکی اعمال شده در طول کانال بصورت رابطه‌ی $E = \frac{\nabla V}{L} = \frac{V_{out} - V_{in}}{L}$ محاسبه می‌گردد. با توجه به اینکه طول کانال‌ها 1 cm می‌باشد، در نتیجه مقدار ولتاژ اعمالی در ورودی کانال‌ها برابر همان مقدار میدان در طول کانال می‌باشد که واحد آن [V/cm] می‌باشد. معادلات حاکم و شرایط مرزی در دو کانال بالا و پایین کاملاً مشابه هم و سیال در آن کانال‌ها بر اثر اعمال اختلاف پتانسیل در دو سر کانال و طبق مبانی جریان الکترواستاتیک جریان دارد. هر دو مرز ورودی و خروجی در دو کانال به عنوان مرز باز³⁰ تعریف شده است. بنابراین هیچ گونه گرادیان فشاری در طول این میکروکانال‌ها وجود ندارد. سیال الکترولیتی که در میکروکانال‌ها جریان دارد، آب با مشخصه‌های زیر می‌باشد:

²⁷ Conductive Media

²⁸ Electric Insulation

²⁹ Electric Potential

³⁰ Open Boundary

جدول 3-1 مشخصه‌های سیال الکترولیت موجود در کانال‌های بالا و پایین

$\varepsilon = 80$	ثابت دی الکتریک
$\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} C/Vm$	ضریب گذردهی خلأ
$\mu = 1 \times 10^{-3} [Pa.s]$	ویسکوزیته سیال
$\rho = 998 [kg/m^3]$	چگالی سیال
مرز باز	ورودی کانال
مرز باز	خروجی کانال
سرعت الکترواسمتیک	شرط مرزی بر روی دیواره های نارسانا
سرعت لغزشی ³¹	شرط مرزی بر روی دیواره های رسانی

که برای بدست آوردن سرعت الکترواسمتیک داریم

$$u = \mu_{eo} E_t \quad (21.3)$$

$$\mu_{eo} = -\varepsilon_r \varepsilon_0 \zeta / \eta \quad (22.3)$$

$$E_t = E - (n.E)n \quad (23.3)$$

با جایگذاری روابط (22.3) و (23.3) در رابطه‌ی (21.3)، سرعت الکترواسمتیک بصورت روابط (24.3) و (25.3) می‌باشد

$$u_x = -(\varepsilon_r \varepsilon_0 \zeta / \eta) E_x \quad (24.3)$$

$$u_y = -(\varepsilon_r \varepsilon_0 \zeta / \eta) E_y \quad (25.3)$$

³¹ Slip velocity

که رابطه‌ی (24.3) سرعت در جهت x و رابطه‌ی (25.3) سرعت در جهت y می‌باشد. با توجه به ثابت بودن زتاپتانسیل بر روی دیواره‌های نارسانا در نتیجه سرعت الکترواستاتیک بصورت خطی وابسته به میدان الکتریکی می‌باشد. برای بدست آوردن سرعت لغزشی داریم

$$u = \mu_{eo} E_t \quad (26.3)$$

$$\mu_{slip} = -\varepsilon_r \varepsilon_0 \zeta_{induced} / \eta \quad (27.3)$$

با جایگذاری روابط (23.3) و (27.3) در رابطه‌ی (26.3)، سرعت لغزشی بصورت روابط (28.3) و (29.3) می‌باشد

$$u_x = -(\varepsilon_r \varepsilon_0 \zeta_{induced} / \eta) E_x \quad (28.3)$$

$$u_y = -(\varepsilon_r \varepsilon_0 \zeta_{induced} / \eta) E_y \quad (29.3)$$

که رابطه‌ی (28.3) سرعت در جهت x و رابطه‌ی (29.3) سرعت در جهت y می‌باشد. با توجه به تغییرات زتاپتانسیل بر روی دیواره‌های رسانای مانع در نتیجه، تغییرات سرعت لغزشی بصورت غیرخطی صورت می‌گیرد.

2.6.3 مدل‌سازی میدان جریان در کانال میانی

جریان سیال در کانال میانی به وسیله‌ی ایجاد اختلاف فشار در دو سر کانال می‌گردد. ایجاد این اختلاف فشار در دو سر کانال میانی دارای محدودیت است زیرا باید فشار در ناحیه‌ی غشا، در سطح بالا و پایین آن به گونه‌ای باشد که حرکت غشاها به طرف داخل کانال میانی بوده و یک ناحیه‌ی همگرا-واگرا را در کانال میانی مدل ایجاد کند. به عنوان مثال غشا در دیواره‌ی بالایی کانال میانی را در نظر می‌گیریم. گردابه‌های ایجاد شده در جریان الکترواستاتیک بر روی سطوح رسانا فشاری را در محل غشا ایجاد می‌کنند. این فشار می‌بایست بیشتر از فشار موضعی در محل غشا در کانال میانی باشند تا با گذر زمان حل مسئله، تغییر شکل غشا به مقدار حداکثر خود به سمت پایین (داخل کانال میانی) برسد. ایجاد این اختلاف فشار مطلوب در سطوح بالا و پایینی غشا دارای محدودیت می‌باشد. این محدودیت شامل محدودیت در اعمال اختلاف ولتاژ در کانال بالا و پایینی بوده که اختلاف ولتاژ مذکور،

ایجاد کننده‌ی جریان در آن کانال‌ها می‌باشد. با توجه به این‌که اعمال اختلاف ولتاژ در دو سر کانال میکرو می‌بایست میدانی کمتر از 100 V/cm را در کانال ایجاد کند در نتیجه فشار ایجاد شده در سطح بالای غشا دارای محدودیت است. اعمال یک اختلاف فشار مطلوب در دو سر کانال میانی منوط به فشار موجود در سطح بالای غشا می‌باشد زیرا اختلاف فشار مذکور، تعیین کننده‌ی فشار در سطح پایینی غشا است. این اختلاف فشار اعمالی در دو سر کانال میانی اولاً باید شرط ایجاد و پیوستگی جریان سیال و در محدوده بودن رینولدز جریان در میکرو کانال را ارضا کرده و ثانیاً حرکت غشا به سمت داخل کانال میانی را امکان پذیر سازد.

ثوابت و شرایط مرزی مورد نظر برای مدل‌سازی جریان سیال در کانال میانی در این پژوهش در جدول زیر آورده شده است:

جدول 2-3 ثوابت و شرایط مرزی برای مدل‌سازی جریان سیال در کانال میانی

$\mu = 1 \times 10^{-3} [\text{Pa} \cdot \text{s}]$	ویسکوزیته سیال
$\rho = 998 [\text{kg} / \text{m}^3]$	چگالی سیال
$\Delta P = 1.7$	اختلاف فشار در دو سر کانال
$U _{\text{wall}} = 0$	شرط مرزی عدم لغزش بر روی دیواره‌ها

با داشتن شرایط فوق، معادلات پیوستگی (10.3) و ناویر استوکس (12.3)، می‌توان میدان جریان سیال را در کانال میانی حل و نتایج حاصل از آن که شامل کانتور فشار، مقدار سرعت و خطوط جریان سیال در تمامی نقاط می‌باشد را بدست آورد. علت انتخاب مقدار فشار بالا دست در این مدل‌سازی به خاطر توزیع فشار حاصل شده از جریان الکترواستاتیک با بار القایی در دو کانال بالا و پایین می‌باشد. مقدار فشار در ناحیه‌ی دیواره‌ی متحرک در کانال میانی نباید از مقدار فشار در همان ناحیه در دو کانال بالا و پایین بیشتر باشد.

7.3 مدل‌سازی جابجایی غشاها

برای مدل‌سازی برخورد سیال با سطح جامد و حرکت سطح جامد در میدان سیال، باید از نیروی متقابل سیال با سازه³² استفاده کنیم. این مکانیزم اعمال نیرو در ماژول سیستم الکترومکانیکی در میکرو³³ قرار دارد. قسمت‌های زیر مجموعه‌ی ماژول برخورد سیال با سازه شامل کرنش صفحه³⁴، المان متحرک و "ناویر-استوکس تراکم ناپذیر" می‌باشد. در قسمت "کرنش صفحه‌ای" پارامترهایی که باید لحاظ شود در جدول 3-3 آورده شده است

جدول 3-3 ثوابت و شرایط موجود در قسمت کرنش صفحه‌ای برای نواحی محاسباتی مدل

$E = 10^{20} Pa$	++ مدول یانگ	
$\nu = 0.35$	++ نسبت پواسون	+ دیواره های صلب
ثابت	++ شرط قید دهی	
$E = 45 Pa$	** مدول یانگ	
$\nu = 0.35$	** نسبت پواسون	* دیواره‌های انعطاف پذیر
با قابلیت حرکت	** شرط قید دهی	

قسمت کرنش صفحه‌ای صرفاً برای ناحیه محاسباتی سطح جامد است که شامل دیواره‌های میانی صلب و انعطاف پذیر می‌باشد. ناحیه محاسباتی سیال که شامل سه کانال می‌باشد، در این قسمت غیرفعال است. مقدار مدول یانگ برای سطوح انعطاف پذیر که در بالای مانع در کانال پایین و پایین مانع در کانال بالایی قرار دارند، برابر 45 Pa در نظر گرفته شده است. علت انتخاب این عدد به عنوان مدول یانگ، رسیدن دیواره‌ی انعطاف پذیر به حداکثر ارتفاع مطلوب (125 μm) می‌باشد. در این وضعیت باید فضای ایجاد شده در کانال میانی (قسمت همگرا-واگرا) برابر (50 μm) بوده که با در نظر گرفتن حداکثر مقدار

³² Fluid-Structure Interaction

³³ MicroElectroMechanical Systems (MEMS)

³⁴ Plane Strain

میدان اعمالی بر اساس رابطه‌ی منحنی ولتاژ اعمال شده (20.3) در ورودی کانال‌های بالا و پایین می‌باشد.

در نواحی مرز سطح جامد غشاهای متحرک با گذشت زمان و حرکت آن غشاها به درون کانال میانی، مش‌های موجود در کانال‌ها دچار تغییرات می‌شوند.

8.3 مدل‌سازی میدان غلظت

میدان غلظت تنها در کانال میانی مد نظر و مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای مدل‌سازی میدان غلظت در نرم افزار مذکور می‌بایست از ماژول جابجایی و دیفیوژن³⁵ استفاده کنیم. معادله‌ی حاکم بر محیط محاسباتی معادله‌ی (30.3) می‌باشد که می‌توان پارامترهای آن را در نرم افزار تعیین کرد.

$$\delta_{ts} \frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (-D \nabla C) = R - u \cdot \nabla C \quad (30.3)$$

که در آن $\delta_{ts} = 0.1$ ضریب مقیاس زمانی³⁶، $D = 10^{-10} \text{ [m}^2/\text{s]}$ ضریب دیفیوژن، $R=0$ ، C میدان غلظت و مقدار سرعت در جهت x, y از حل معادلات مومنتم جایگزین می‌شود. ضریب مقیاس زمانی طبق فواصل زمانی حل مساله تعیین می‌شود که در اینجا از صفر تا 45 ثانیه با بازه‌های 0.1 ثانیه حل انجام می‌پذیرد.

برای بررسی غلظت ذرات موجود در هر مقطع از کانال، می‌توان بازدهی اختلاط³⁷ در مقاطع دلخواه را محاسبه کرد که در هر مقطع از کانال با رابطه‌ی زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\int_0^w |C - C_\infty| dx}{\int_0^w |C_0 - C_\infty| dx} \right) \times 100\% \quad (31.3)$$

³⁵ Convection and Diffusion (ched)

³⁶ Time-scaling coefficient

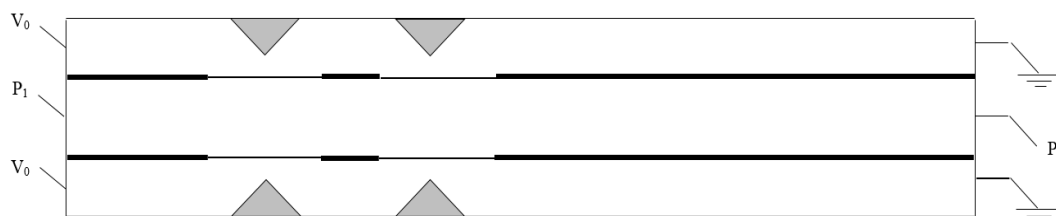
³⁷ Mixing efficiency

در حالیکه $C_\infty = 0.5$ بوده که با اختلاط کامل در یک مقطع متناظر است، C_0 توزیع غلظت بر روی عرض کانال (w) در ورودی کانال میانی بوده و C توزیع غلظت در مقاطع مختلف در پایین دست جریان می‌باشد. هرگاه اختلاط کامل داشته باشیم، بازده اختلاط 100% و در حالت عدم ایجاد اختلاط، 0% می‌باشد.

9.3 توسعه‌ی مدل اول-مدلسازی کانال با 4 غشا (مدل دوم)

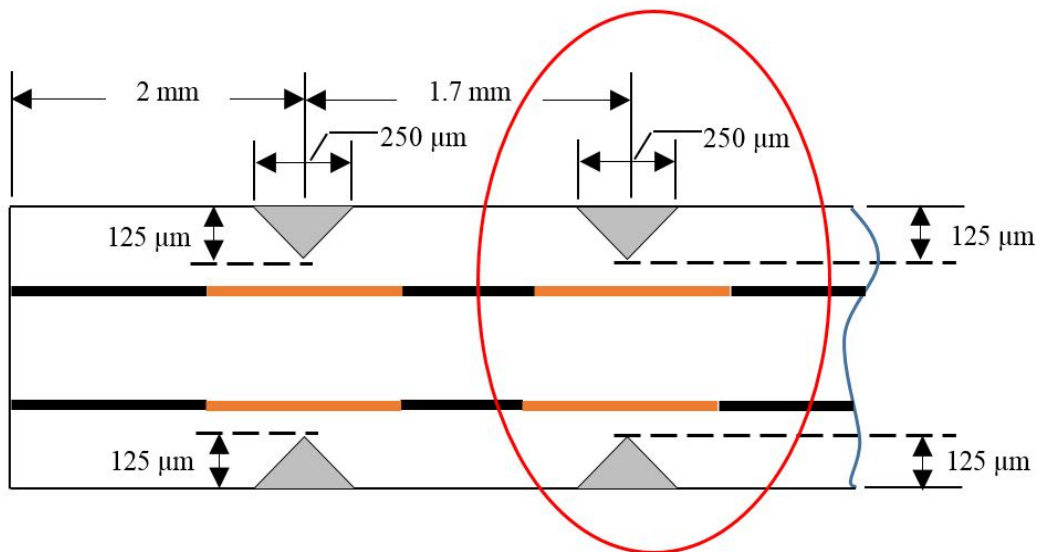
در اینجا برای توسعه دادن طرح مدلسازی شده برای افزایش میزان بازده اختلاط در یک مقطع کانال (به عنوان مثال در مقطع خروجی کانال)، تعداد موانع و غشاها را افزایش داده تا بتوان کنترل بیشتری را در افزایش میزان بازده اختلاط کسب کنیم. با اضافه کردن دو مانع دیگر بطور متقارن نسبت به محور افقی کانال میانی، یکی در کانال بالایی و دیگری در کانال پایینی و با یک فاصله‌ی موردنظر، باید افزایش بازده اختلاط را نسبت به دو مدل قبل مورد بررسی قرار داد. این موانع مانند دو مانع قبلی دارای سطوح رسانا بوده که گردابه‌های جریان نیز بر اثر مبانی الکتروکنتیک بر روی سطوح آنها ایجاد خواهد شد.

در این طرح با افزایش دو مانع و دو غشا به صورت متقارن نسبت به محور افقی در مرکز کانال میانی، می‌توان با ایجاد گردابه‌های مذکور در فصول قبل، به تحریک بیشتر دیواره‌های کانال میانی پرداخته و میزان بازده اختلاط را بطور مضاعف کنترل کرد. این موانع در فاصله $1.7 \times 10^{-3} \text{ m}$ از موانع موجود در مدل اصلی ارائه شده (کانال با دو مانع و دو غشا) قرار می‌گیرند که دقیقاً هندسه و شرایط مرزی حاکم بر آنها همان هندسه و شرایط مرزی حاکم بر موانع موجود در مدل اصلی می‌باشد.



شکل 3-5 کانال‌های مدل سازی شده شامل سه کانال ، 4مانع و 4 غشا

چهار مانع موجود در کانال‌های بالا و پایین، دارای ابعاد یکسان بوده بطوریکه مثلث متساوی الساقین با ارتفاع $125 \mu\text{m}$ و قاعده‌ی $250 \mu\text{m}$ را تشکیل می‌دهند. دو زاویه‌ی داخلی این مثلث ها 45 درجه می‌باشد. همچنین فاصله‌ی لبه‌ی مانع تا غشا $50 \mu\text{m}$ می‌باشد.



شکل 3-6 ابعاد و موقعیت موانع موجود در کانال بالا و پایینی

در شکل 3-6 قسمت اضافه شده در مقایسه با هندسه‌ی مدل اول که دارای دو غشا می‌باشد را نشان می‌دهد. در این هندسه‌ی جدید که یک مدل با چهار غشا را تشکیل می‌دهد، موانع اضافه شده به تعداد دو عدد در فاصله‌ی 1.7 mm از دو مانع قبلی که در مدل با دو غشا ایجاد شده، می‌باشد.

10.3 خلاصه

در این فصل معادلات مورد نیاز حاکم برای مدلسازی حرکت غشاها و اختلاط در کانال میانی که وابسته به زمان می‌باشد، تحت میدان الکتریکی جریان مستقیم اعمال شده در طول کانال‌های میکرو، دسته بندی شده است. این میدان الکتریکی طبق منحنی رابطه‌ی (20.3) نسبت به زمان متغیر می‌باشد. به علت ناپایدار بودن حل و وابستگی ولتاژ اعمالی به زمان، تغییر پارامترها در زمان‌های مختلف باید مدنظر قرار بگیرد که بیشتر در لحظه‌ی آخر ($t=45$ s) مطلوب ما می‌باشد. همچنین شرایط مرزی براساس معادلات متناظر برای هر کدام از سیستم معادلات تعریف شده است. با استفاده از معادلات حاکم بیان شده در این فصل و شرایط مرزی مناسب و مقتضی با آنها، یک استراتژی برخورد سیال با سازه که با هم جفت شده‌اند به صورت ناپایدار مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از این سیستم توانستیم برخورد بین میدان الکتریکی، جریان سیال، حرکت غشا و همچنین ایجاد اختلاط در جریان را به صورت عددی مدل کنیم. ماژول‌های مورد نیاز برای مدلسازی در نرم افزار مذکور معرفی و پارامترهای آن مشخص گردید. مدلسازی کانال با چهار غشا نیز آورده شده که به عنوان دومین مدل طراحی شده در این پژوهش می‌باشد. در فصل بعد به بیان نتایج، نمودارها و بررسی و تحلیل داده‌های حاصل از مدلسازی می‌پردازیم.

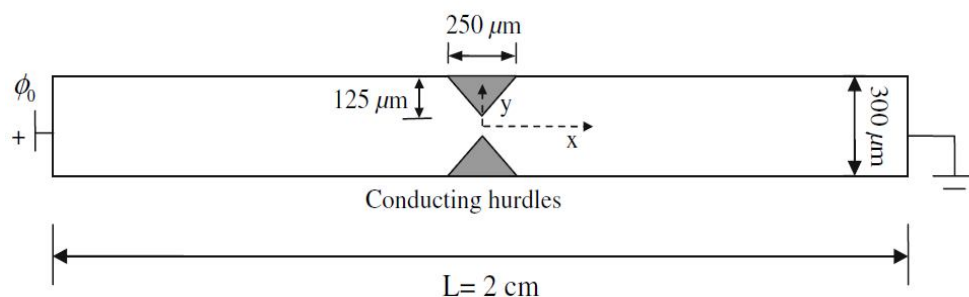
فصل چهارم
نتایج و مباحث

1.4 معتبرسازی

در این بخش به مدلسازی و بررسی نتایج یکی از مطالعات پیشین [۱۷] مشابه به این پژوهش می‌پردازیم. با این بررسی، اعتبار پژوهش خود را مورد سنجش قرار خواهیم داد.

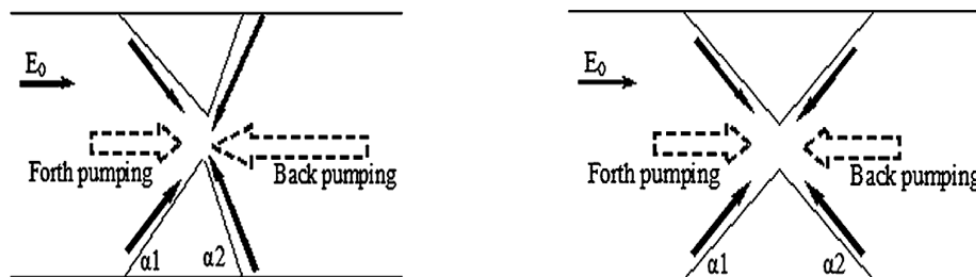
در بخش برای بررسی صحت نتایج، به مدلسازی یک کانال با دو مانع مثلثی می‌پردازیم. موانع دارای سطوح رسانا می‌باشد. هندسه و ابعاد، معادلات حاکم بر جریان سیال و غلظت ذرات را مطابق بر مقاله‌ی مذکور مدلسازی می‌کنیم.

هندسه به کار گرفته شده در این مرجع در شکل 4-1 به تصویر کشیده شده است. هدف رسم نمودارهای قدرت میدان الکتریکی، زتاپتانسیل القایی همچنين سرعت لغزشی القایی بر روی سطح مانع مثلثی می‌باشد.



شکل 4-1 هندسه مورد استفاده در مرجع [17]

در مرجع مذکور نمودارهای مورد بحث (قدرت میدان الکتریکی، زتاپتانسیل القایی و سرعت لغزشی القایی) به ازای زوایای مختلف α_1 و α_2 بدست آمده‌اند.

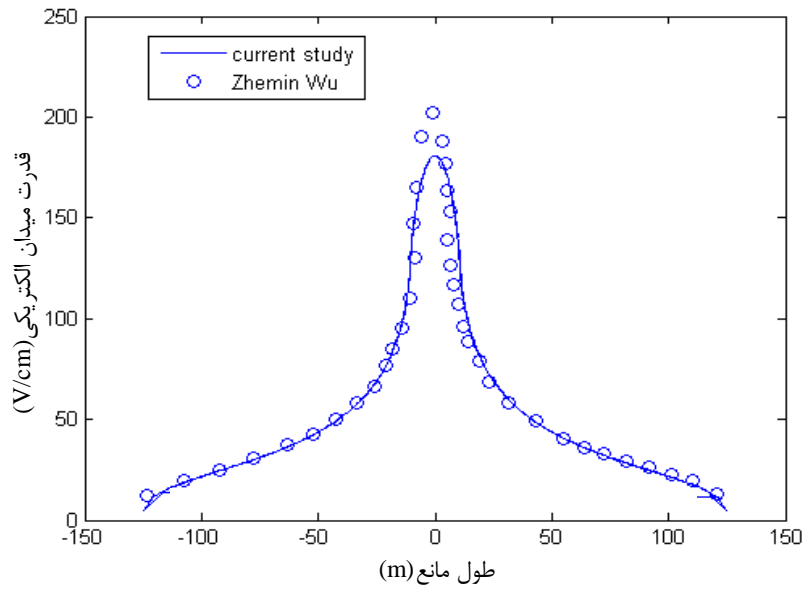


شکل 4-2 زوایای مورد مطالعه در مرجع [17]

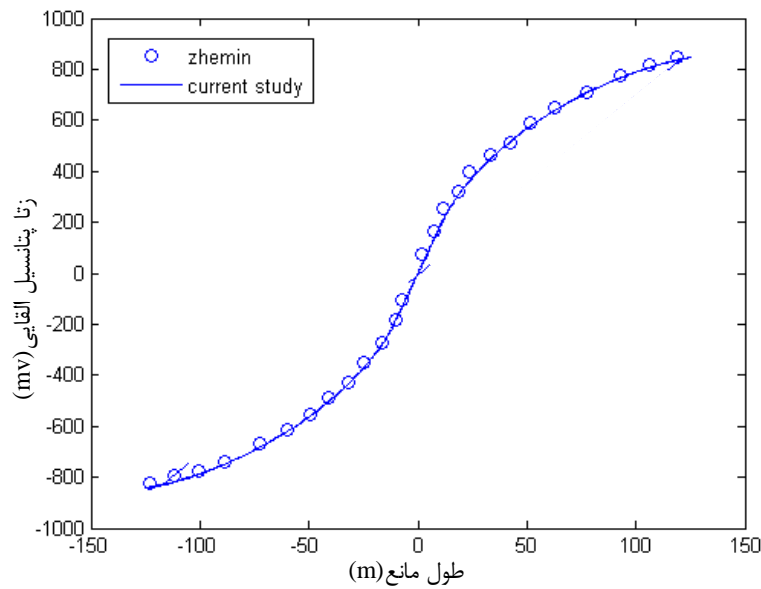
(ب) $\alpha_1 = 45^\circ$ و $\alpha_2 = 60^\circ$

(الف) $\alpha_1 = \alpha_2 = 45^\circ$

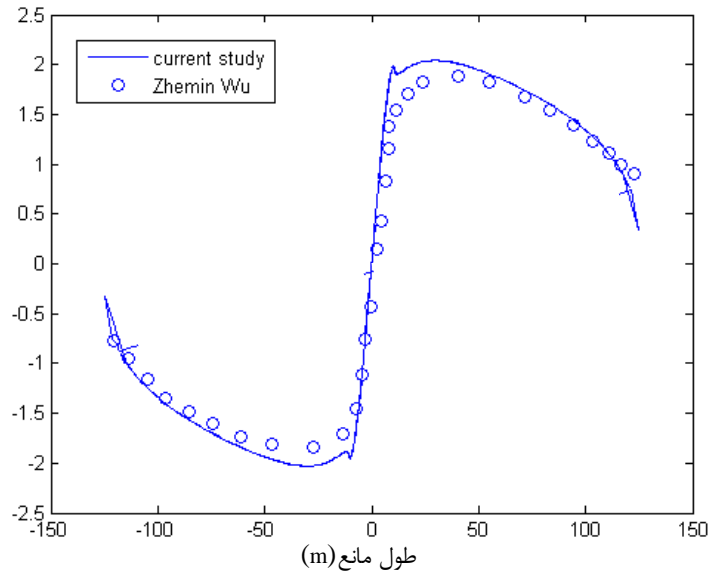
1.1.4 اگر زوایای داخلی مثلث $\alpha_1 = \alpha_2 = 45^\circ$ باشد



شکل 3-4 مقایسه قدرت میدان الکتریکی بر روی سطح مانع مثلثی در مدل‌سازی صورت گرفته با مرجع [17]

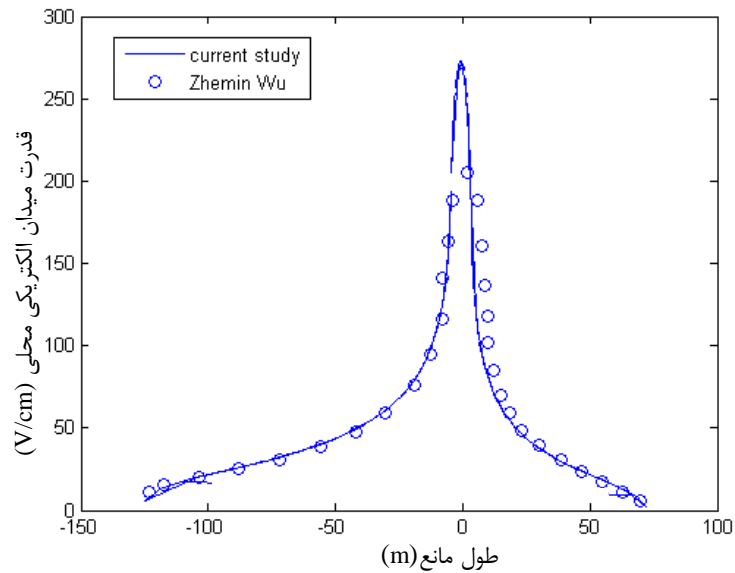


شکل 4-4 مقایسه زتا پتانسیل القایی بر روی سطح مانع مثلثی در مدل‌سازی صورت گرفته با مرجع [17]

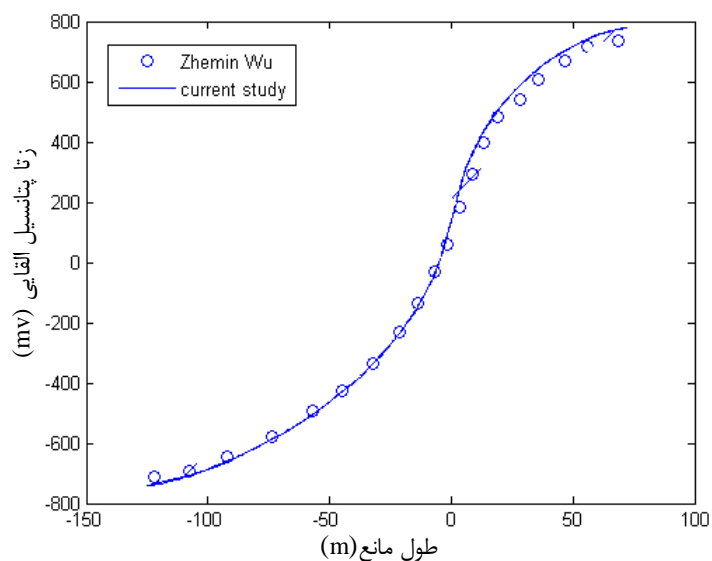


شکل 4-5 مقایسه سرعت لغزشی القایی بر روی سطح مانع مثلثی در مدل‌سازی صورت گرفته با مرجع [17]

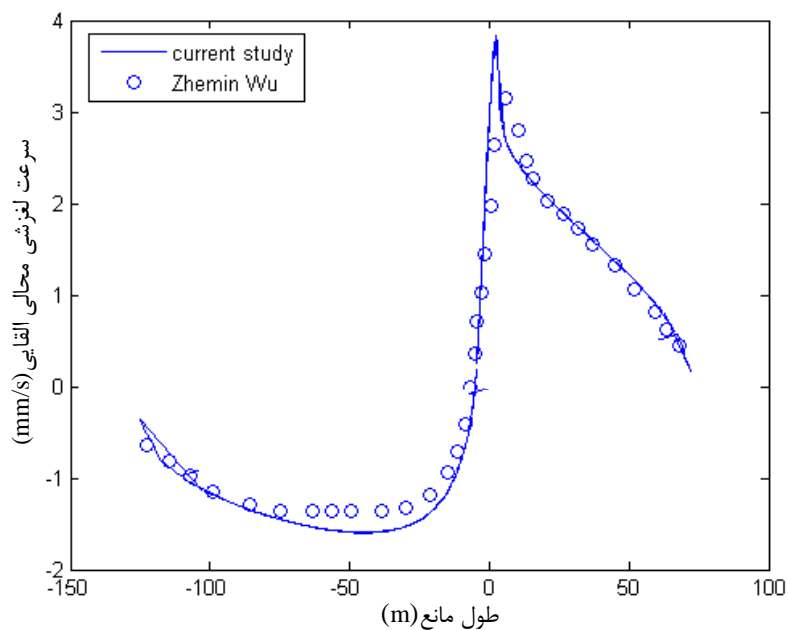
2.1.4 اگر زوایای داخلی مثلث $\alpha_1 = 45^\circ$ و $\alpha_2 = 60^\circ$ باشد



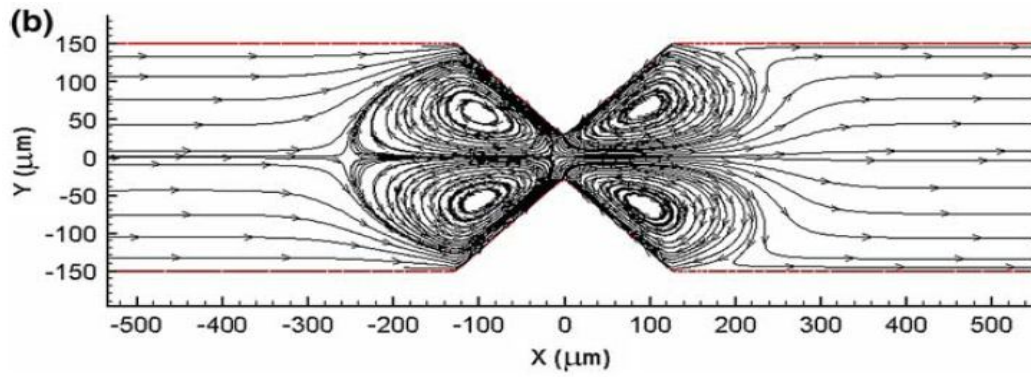
شکل 4-6 مقایسه قدرت میدان الکتریکی بر روی سطح مانع مثلثی در مدل‌سازی صورت گرفته با مرجع [17]



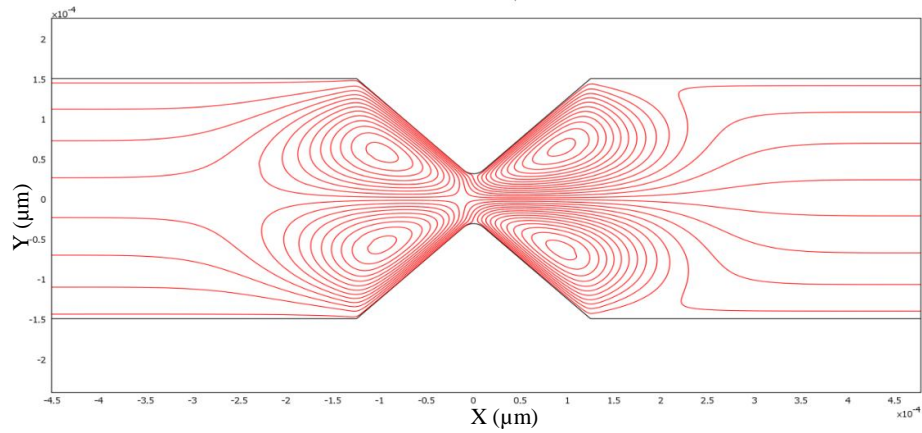
شکل 4-7 مقایسه زتا پتانسیل القایی بر روی سطح مانع مثلثی در مدل سازی صورت گرفته با مرجع [17]



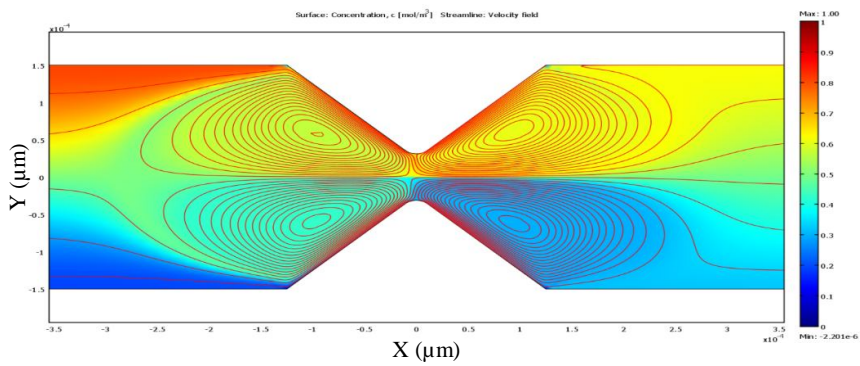
شکل 4-8 مقایسه سرعت لغزشی القایی بر روی سطح مانع مثلثی در مدل سازی صورت گرفته با مرجع [17]



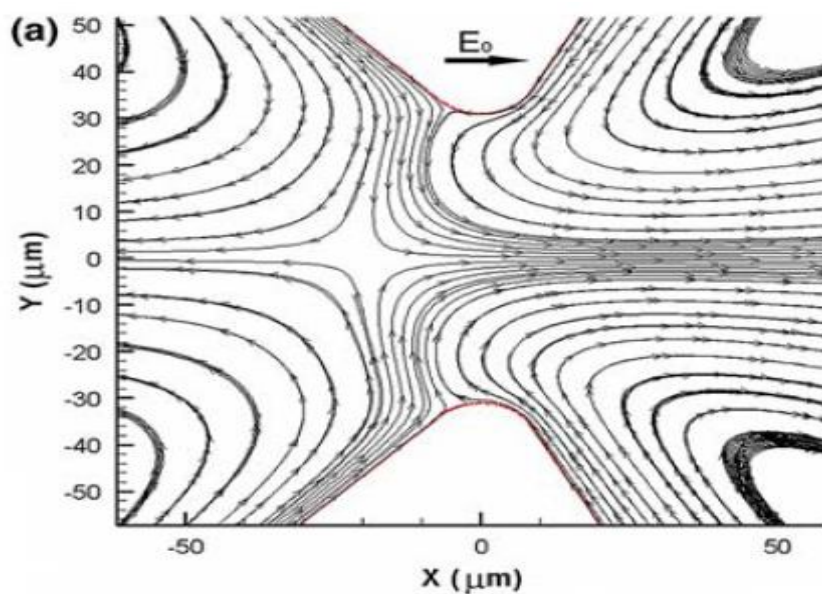
شکل 4-9 خطوط جریان سیال در نزدیکی مانع رسانا . مرجع [17]



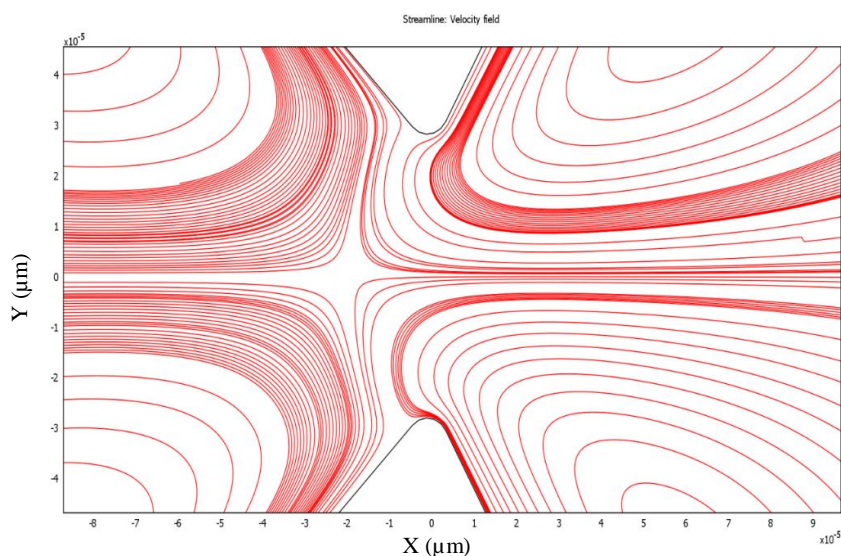
شکل 4-10 خطوط جریان سیال در نزدیکی مانع رسانا در مدلسازی انجام شده



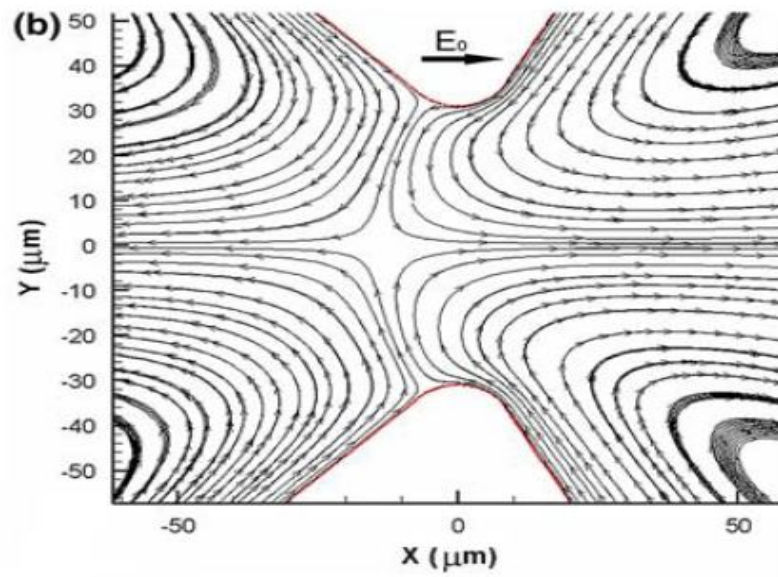
شکل 4-11 خطوط جریان سیال به همراه کانتر توزیع غلظت در نزدیکی مانع رسانا



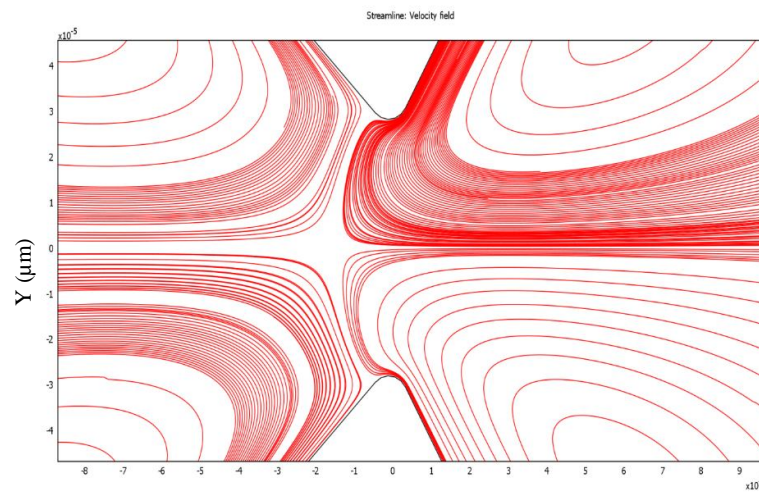
شکل 4-12 خطوط جریان سیال در اطراف مانع مثلثی با زوایای $\alpha_1 = 45^\circ$, $\alpha_2 = 60^\circ$ در قدرت میدان $E = 25V/cm$. مرجع [۱۷]



شکل 4-13 خطوط جریان سیال در اطراف مانع مثلثی با زوایای $\alpha_1 = 45^\circ$, $\alpha_2 = 60^\circ$ در قدرت میدان $E = 25V/cm$



شکل 4-14 خطوط جریان سیال در اطراف مانع مثلثی با زوایای $\alpha_1 = 45^\circ$, $\alpha_2 = 60^\circ$ در قدرت میدان $E = 45V/cm$. مرجع [۱۷]



شکل 4-15 خطوط جریان سیال در اطراف مانع مثلثی با زوایای $\alpha_1 = 45^\circ$, $\alpha_2 = 60^\circ$ در قدرت میدان $E = 45V/cm$

2.4 مساله‌ی تعریف شده در این پژوهش

در این پژوهش به مدلسازی و مطالعه‌ی طرحی می‌پردازیم که در آن به مدلسازی جریان در یک کانال میکرو و بررسی افزایش بازده اختلاط در خروجی کانال و کنترل سیال به کمک الکتروکنتیک غیر خطی (با بار القایی) در مدل می‌پردازیم. با مدلسازی سه کانال که در آنها جریان سیال در کانال میانی تحت اختلاف فشار موجود در دو سر کانال و جریان سیال در دو کانال بالا و پایین تحت میانی الکترواستمیتیک غیر خطی می‌باشد. در کانال‌های بالا و پایین، موانع مثلی با سطوح رسانا تعبیه شده که با ایجاد گردابه‌ها بر روی آن و اعمال نیرو بر روی غشاهای انعطاف پذیر موجود در زیر آن‌ها، به ایجاد اختلاط و کنترل جریان در کانال میانی کمک می‌کند.

• نوآوری طرح موجود در این:

- در مطالعات پیشین [۱۶] نوع اختلاط به صورت اختلاط مستقیم³⁸ بوده اما در طرح موجود در این پژوهش، نوع اختلاط از نوع اختلاط غیر مستقیم³⁹ می‌باشد.

- کنترل جریان در مدل موجود در مقاله‌ی ژمین به صورت تغییر در زوایای مانع صورت می‌گیرد اما در مدل ارائه شده در این پژوهش با اعمال ولتاژهای متفاوت در دو سر کانال‌های بالا و پایین می‌توان دیواره‌ی کانال میانی را تغییر داده و یک ناحیه‌ی همگرا-واگرا ایجاد کرده که با وجود اختلاف فشار ثابت در دو سر کانال میانی و تغییر سطح مقطع کانال میانی، می‌توان دبی جریان را کنترل کرد.

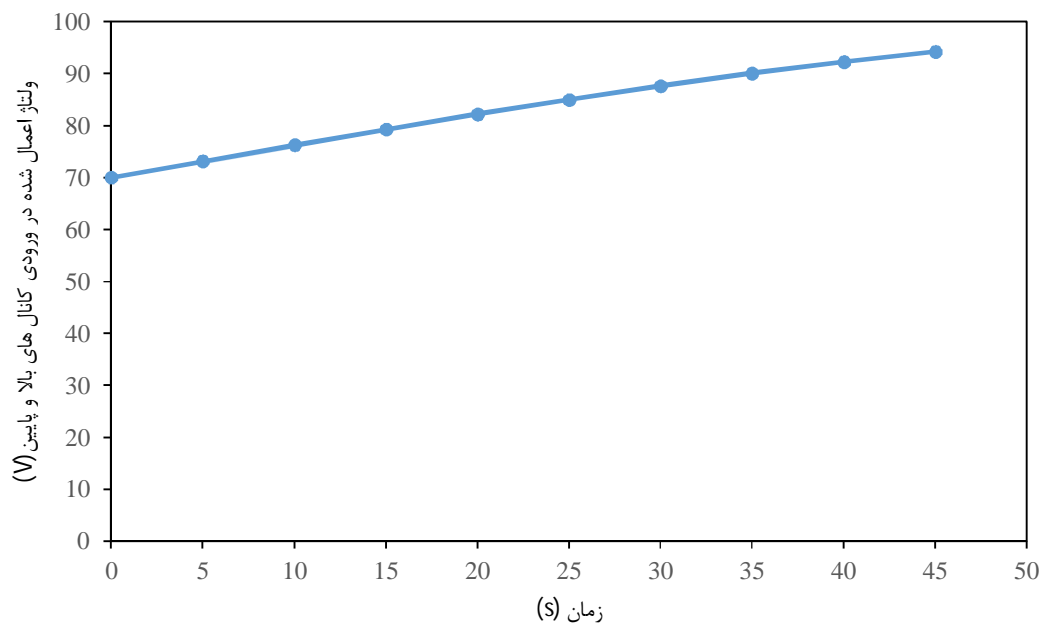
3.4 نمودارها و نتایج حاصل شده از حل مدل‌ها

در فصل قبل به بررسی مدلسازی کانال‌ها، جریان سیال و معادلات حاکم بر آنها پرداختیم. مقدار اختلاف پتانسیل القایی در دو سر کانال‌های بالا و پایینی بر حسب زمان تغییر می‌کند، پس باید نتایج حاصله را در زمان‌های مختلف مدنظر داشت. مقدار ولتاژ اعمال شده در مدل ما بر طبق منحنی (1.4) انتخاب شده است.

³⁸ Direct Mixing

³⁹ Indirect Mixing

$$E = 70 + 30 \times \sin(\pi t / 150) \quad (1.4)$$

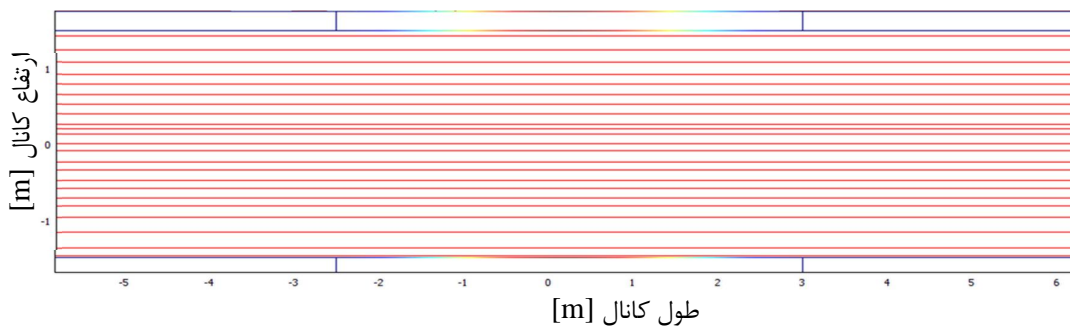


نمودار 1-4 منحنی ولتاژ اعمال شده در مقطع ورودی کانال های بالا و پایین

در این فصل اشکال و نمودارهای خطوط جریان سیال و گردابه های ایجاد شده در اطراف موانع رسانا، بردارهای سرعت در سه کانال موجود در مدلسازی های ارائه شده، میزان غلظت ذرات در مقاطع مختلف کانال میانی در مدل ها، جابجایی های غشای انعطاف پذیر در طول زمان و به بررسی و تحلیل نتایج حاصله می پردازیم.

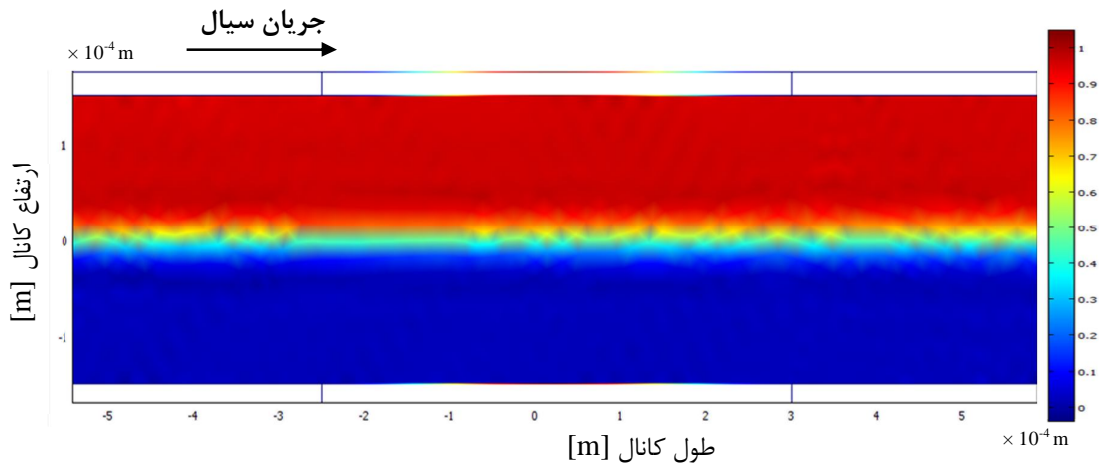
1.3.4 کانال ساده

شکل 4-16 یک کانال ساده بوده که مبنایی برای مدلسازی مورد نظر ما می باشد و حرکت سیال در آن بر اساس اختلاف فشار حاکم در طول کانال می باشد.



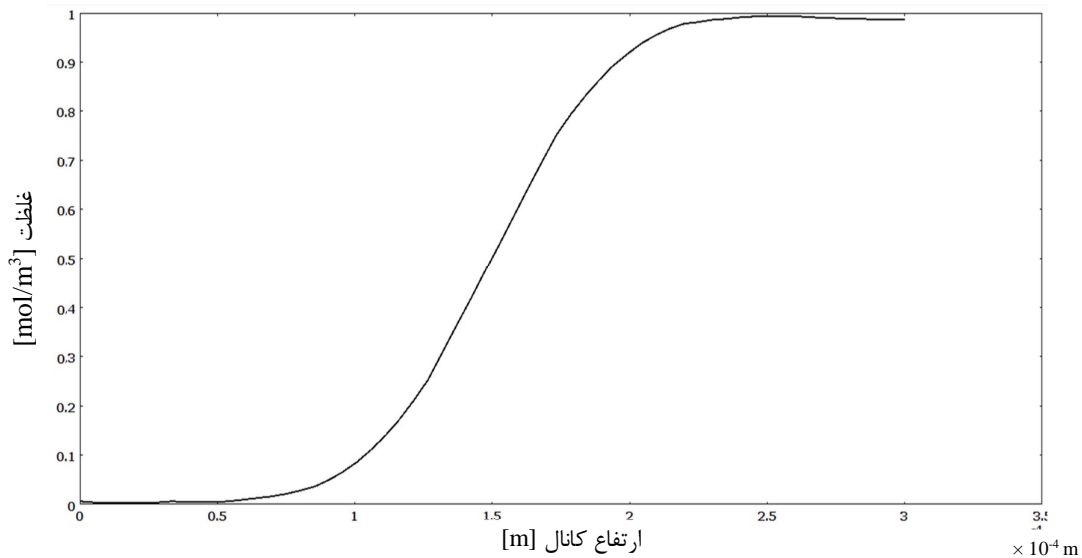
شکل 4-16 میدان جریان سیال در کانال ساده

میدان غلظت در کانال ساده به همراه رنگین کمان مربوط به آن، بصورت شکل 4-17 می باشد:



شکل 4-17 میدان غلظت در کانال ساده در ناحیه ابتدایی کانال

در این کانال که ابعاد کانال میانی در مدلسازهای مدنظر ما را داراست، بدون دیواره های انعطاف پذیر و متحرک می باشد. میدان غلظت حاصل شده در کانال ساده در شکل 4-17 نشان داده شده است. به طوریکه در نیمه ی بالایی مرز ورودی کانال، مقدار غلظت ذرات ورودی، برابر یک و در نیمه ی پایینی مرز ورودی کانال، مقدار غلظت ذرات ورودی برابر صفر در نظر گرفته شده است.



نمودار 4-2 غلظت در مقطع خروجی کانال ساده

توزیع غلظت از حالت صفر و یک در مقطع ورودی کانال به منحنی موجود در نمودار 2-4 تبدیل شده است. در این نمودار، توزیع زتاپتانسیل در مقطع خروجی کانال ساده نمایش داده شده که بیانگر میزان اختلاط ذرات در جریان سیال می‌باشد.

2.3.4 کانال با دو غشای انعطاف پذیر

1.2.3.4 پتانسیل الکتریکی

در اینجا، جریان الکترواستاتیک با بار القایی در دو کانال بالا و پایین مدنظر می‌باشد. از اینرو اختلاف پتانسیل الکتریکی تنها در کانال‌های مذکور اعمال شده و در کانال میانی به علت وجود عامل اختلاف فشار، سیال جریان دارد.

توزیع پتانسیل الکتریکی مستقل از هندسه‌ی کانال بوده و طبق تابع پتانسیل الکتریکی در ورودی کانال (نمودار 1-4) مقداره‌ی می‌شود که مقدار آن در زمان $t=45$ s برابر 94.27 V است. پتانسیل الکتریکی طبق معادله لاپلاس (2.4) در طول کانال توزیع می‌شود و مطابق با تابع (4.4) در هر زمان یک توزیع خطی نسبت به مکان دارد.

$$\nabla^2 \phi_e = 0 \quad (2.4)$$

$$\phi = E(t) \quad \text{شرط مرزی ورودی کانال}$$

$$\phi = 0 \quad \text{شرط مرزی خروجی کانال}$$

شرایط مرزی بر روی دیگر دیواره‌ها در کانال‌های بالا و پایین به غیر از ورودی و خروجی، شرط عایق الکتریکی می‌باشد که با حل معادله (2.4) در یک بعد داریم

$$\phi_e = a.x + b \quad (3.4)$$

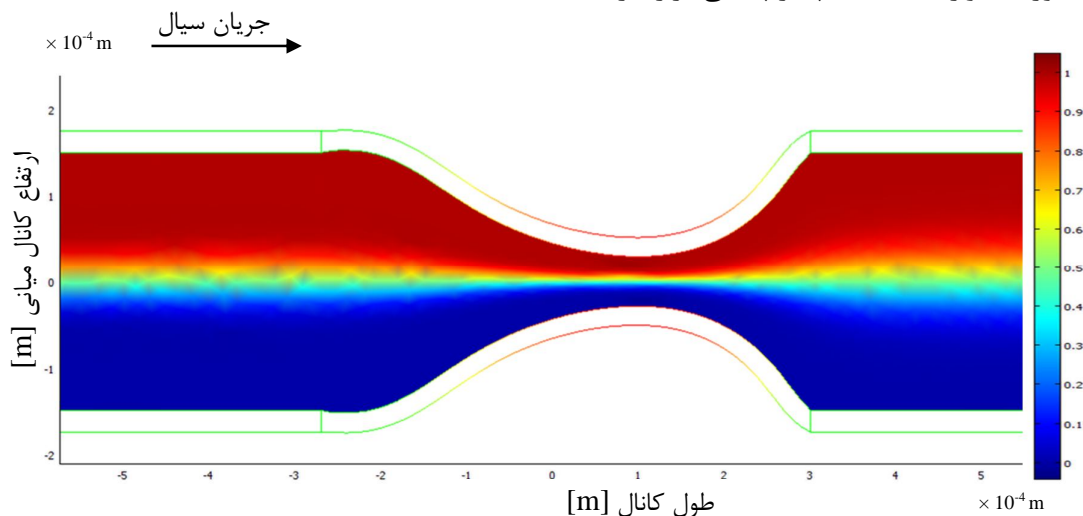
و با اعمال شرایط مرزی در مساله داریم

$$\phi_e = -\frac{E(t)}{L}.x + E(t) \quad (4.4)$$

L طول کانال، x فاصله از ابتدای کانال و مقدار $E(t)$ طبق نمودار 1-4 در ورودی کانال ها اعمال شده و وابسته به زمان است. همانطور که مشاهده می شود در هر لحظه، توزیع زتاپتانسیل، یک توزیع خطی و وابسته به طول کانال می باشد.

2.2.3.4 میدان غلظت

میدان غلظت در کانال میانی مدل با دو غشا و دو مانع به همراه دیواره های ثابت و غشای انعطاف پذیر در ناحیه ی اطراف غشاهای انعطاف پذیر در لحظه ی آخر ($t=45\text{ s}$) به صورت شکل 4-18 می باشد. همانطور که در فصل قبل ذکر گردید، در این مدل، یک مانع مثلی بر روی دیواره ی کانال بالا و در مجاورت دیواره ی انعطاف پذیر بالایی می باشد. مانع مثلی دوم، بر روی دیواره ی کانال پایین و در مجاورت دیواره ی انعطاف پذیر پایینی قرار دارد.

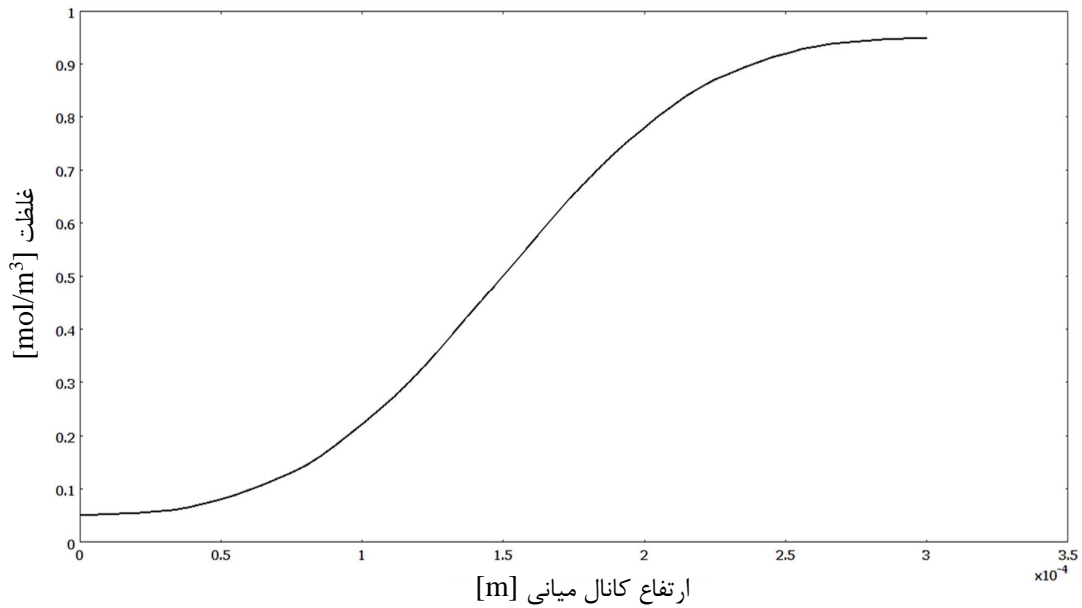


شکل 4-18 میدان غلظت در کانال میانی به همراه دیواره های غشای انعطاف پذیر

همانطور که در شکل فوق مشاهده می شود دیواره های متحرک در مجاورت موانع مثلی با دیواره های رسانا بر اثر نیروی حاصل از گردابه ها به طرف داخل کانال منحرف شده و با برهم زدن خطوط جریان افقی و ایجاد یک ناحیه ی همگرا-واگرا، میزان اختلاط ذرات را افزایش می دهد.

نمودار 3-4 توزیع غلظت در مقطع خروجی کانال مدلسازی شده با دو غشا را در لحظه ی آخر ($t=45\text{ s}$) نشان می دهد. با مقایسه ی نمودار مذکور و نمودار توزیع غلظت در مقطع خروجی کانال ساده (نمودار 2-4) به این نتیجه می رسیم که مقادیر موجود بر روی منحنی نمودار 3-4 به مقدار C نزدیک تر و شیب نمودار کمتر شده است. این موضوع نشان دهنده ی اینست که میزان 0.5 mol/m^3

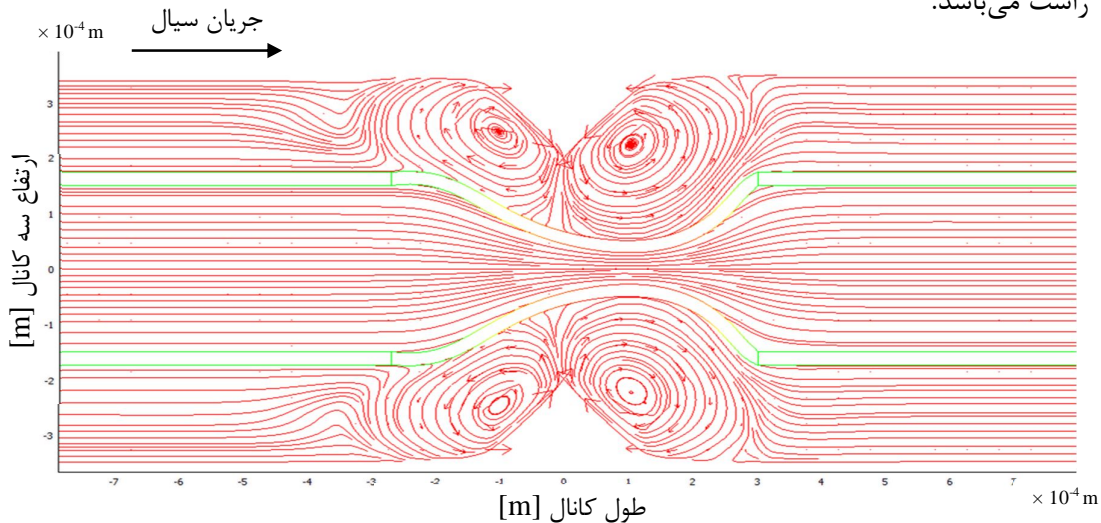
اختلاط ذرات در این کانال به نسبت میزان اختلاط در کانال ساده افزایش یافته است. زیرا با توجه به شرایط مرزی ورودی $C_1 = 0 \text{ mol/m}^3$ و $C_2 = 1 \text{ mol/m}^3$ ، هر گاه مقدار غلظت ذرات موجود بر روی منحنی در مقطعی از کانال به مقدار 0.5 mol/m^3 نزدیک تر شوند، آن اختلاط بهتر صورت گرفته است.



نمودار 3-4 غلظت در مقطع خروجی کانال میانی در مدل کانال با 2 غشا در لحظه $t=45 \text{ s}$

3.2.3.4 میدان جریان

با توجه به وجود جریان الکترواستاتیکی با بار القایی در کانال‌های بالا و پایین، گردابه‌هایی بر روی سطوح موانع رسانا تشکیل می‌شود. گردابه‌های ایجاد شده، در شکل 4-19 نشان داده شده‌اند. جهت جریان سیال در هر سه کانال با وجود عدم تداخل سیال و مستقل بودن هر سه کانال، از سمت چپ به راست می‌باشد.



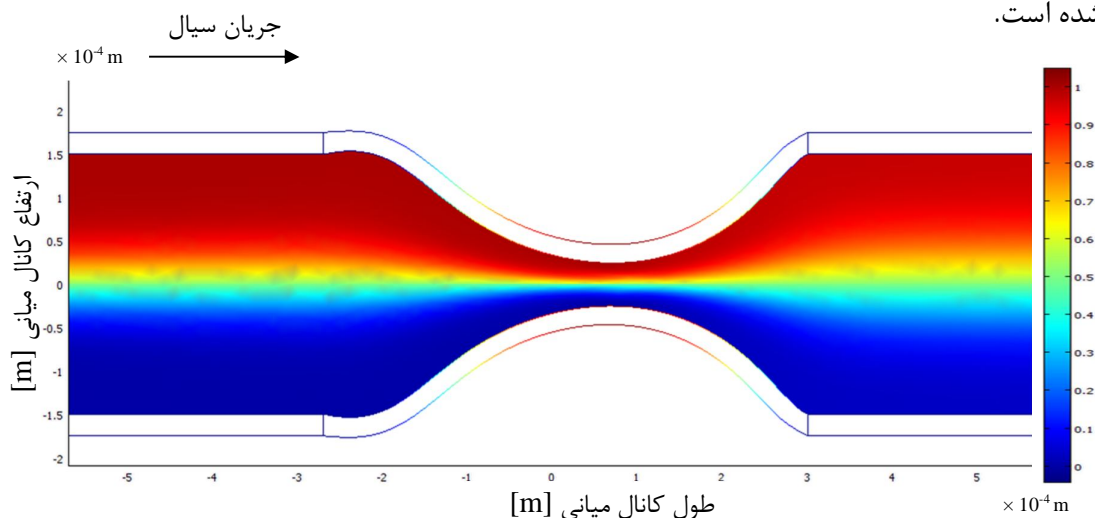
شکل 4-19 گردابه‌های ایجاد شده و خطوط جریان سیال در ناحیه‌ی موانع رسانا در حداکثر ولتاژ ($t=45$ s)

در شکل 4-19 بزرگنمایی در نمایش ناحیه‌ی موانع و غشاها در 3 کانال مدل‌سازی شده مدنظر می‌باشد. در این شکل، خطوط جریان سیال در سه کانال مدل‌سازی شده در زمان $t=45$ s نمایش داده شده است. با توجه به منحنی ولتاژ اعمال شده در مرز ورودی کانال‌های بالا و پایین، در لحظه‌ی $t=45$ s، حداکثر ولتاژ که برابر 94.27 V است را خواهیم داشت. همانطور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود گردابه‌های ایجاد شده بر روی سطوح رسانای موانع، نسبت به محور مرکزی کانال میانی متقارن می‌باشد. در صورت عدم وجود دیواره‌های میانی، هر چهار گردابه یکسان‌اند اما در اینجا کانال کلی با وجود دیواره‌های میانی به سه کانال تقسیم شده است. به دلیل وجود اختلاف فشار در طول کانال میانی، فشار موجود در کانال میانی در محدوده‌ی دو مانع در سمت بالادست جریان با فشار موجود در ناحیه‌ی دو مانع در سمت پایین‌دست جریان متفاوت و بیشتر است. در نتیجه با یکسان فرض کردن قدرت چهار گردابه، توانایی گردابه‌های پایین‌دست جریان در کانال‌های بالا و پایین برای غلبه بر فشار موجود در کانال میانی و حرکت دیواره‌های انعطاف پذیر به سمت داخل کانال میانی به نسبت گردابه‌های بالادست جریان بیشتر است.

3.3.4 کانال با چهار غشای انعطاف پذیر

در این مدل از چهار غشا برای ایجاد بازده اختلاط بیشتر در خروجی کانال میانی و کنترل جریان در آن استفاده شده است. دو غشا در فاصله‌ی 2 mm از ابتدای کانال و دو غشای دیگر در فاصله‌ی 1.7mm از دو غشای ابتدایی قرار دارند. در نتیجه دو ناحیه از کانال میانی دارای غشا در بالا و پایین کانال می‌باشد. در این نواحی، غشاهای انعطاف پذیر با مدول یانگ مطلوب می‌توانند با حرکت به درون کانال میانی، دهانه‌های همگرا-واگرایی ایجاد کنند که هدف ما در این مدلسازی را ارضا می‌کند.

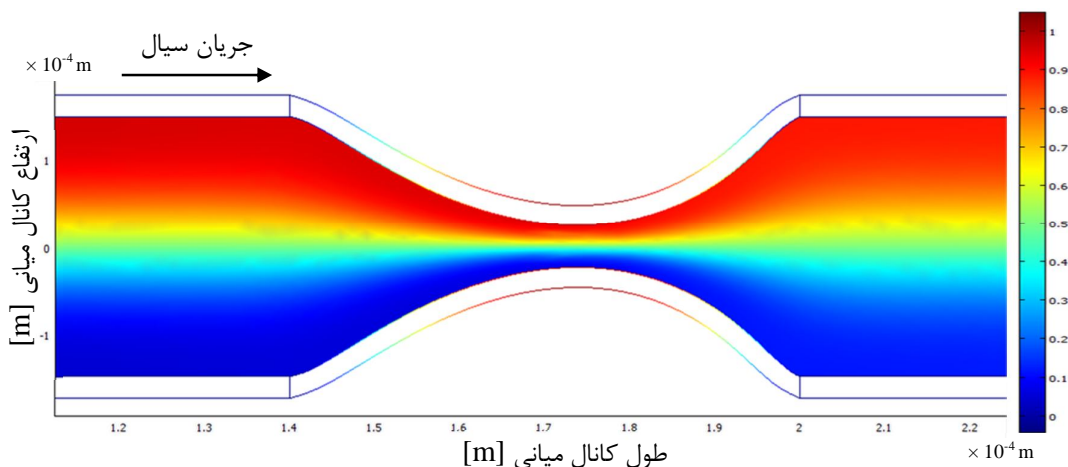
در شکل 4-20 میدان غلظت در کانال میانی در ناحیه‌ی دو غشای اول در لحظه‌ی آخر ($t=45$ s) ارائه شده است.



شکل 4-20 میدان غلظت در ناحیه اول کانال میانی به همراه دیواره‌های انعطاف پذیر غشا در $t=45$ s

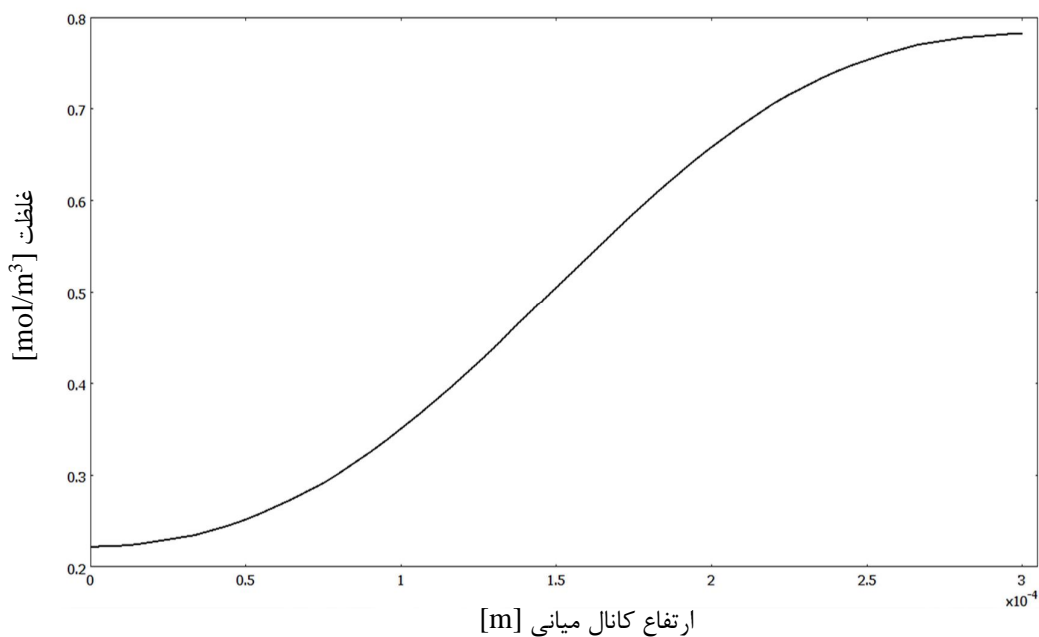
نواحی رنگی ایجاد شده، میزان غلظت در جریان سیال را در تمامی نقاط نمایش می‌دهد. منظور از ناحیه اول، دو غشای موجود در ناحیه‌ی ابتدایی مدل می‌باشد. یک مانع بر روی دیواره‌ی کانال بالا و مانع دوم بر روی دیواره‌ی کانال پایین قرار دارند. دو دیواره‌ی انعطاف پذیر نیز در مجاورت این دو مانع قرار دارند که قسمتی از دیواره‌های کانال میانی بوده و دارای مدول یانگ برابر می‌باشند. همانطور که مشاهده می‌شود، نواحی با رنگ قرمز، نواحی با غلظت بالا ($C = 1 \text{ mol/m}^3$) و نواحی با رنگ آبی، نواحی با غلظت پایین ($C = 0 \text{ mol/m}^3$) را نمایش می‌دهد.

در شکل 4-21 میدان غلظت در کانال میانی در ناحیه‌ی دو غشای دوم در لحظه‌ی آخر ($t=45$ s) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود میزان اختلاط در این ناحیه بیشتر از ناحیه‌ی اول است.



شکل 4-21 میدان غلظت در ناحیه دوم کانال میانی به همراه دیواره‌های انعطاف پذیر غشا

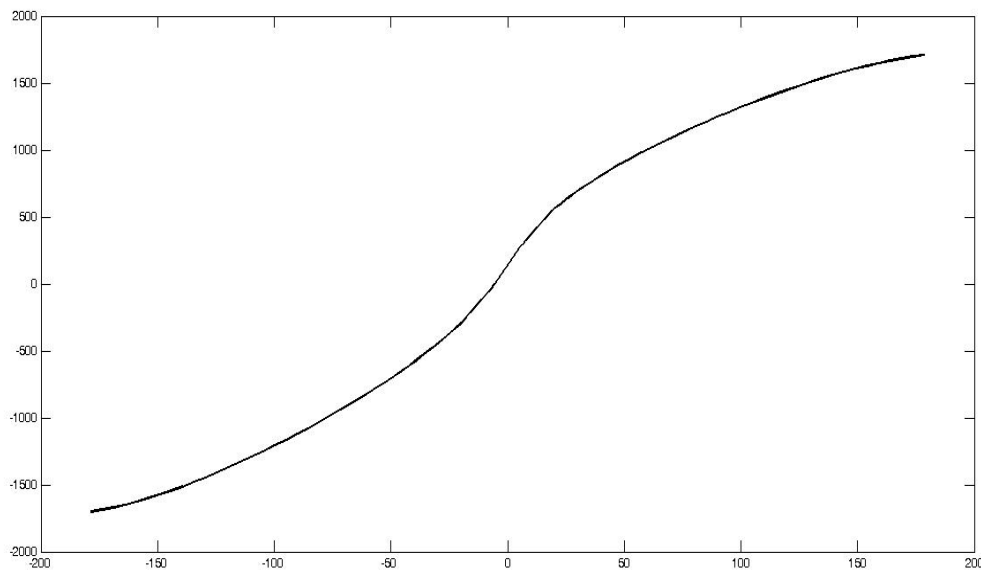
توزیع غلظت در مقطع خروجی کانال مدلسازی شده با 4 غشا در لحظه‌ی آخر ($t=45$ s) در نمودار 4-4 نشان داده شده که در مقایسه با توزیع غلظت در مقطع خروجی کانال مدلسازی شده با دو غشا (نمودار 3-4) به مقدار $C = 0.5$ نزدیکتر و شیب نمودار کمتر شده است. میزان اختلاط در این مدل نسبت به مدل با دو غشا و کانال ساده افزایش یافته است.



نمودار 4-4 غلظت در مقطع خروجی کانال میانی در مدل کانال با 4 غشا در لحظه $t=45$ s

4.4 توزیع زتاپتانسیل در طول سطح مانع رسانا در مدل اول

توزیع زتاپتانسیل القایی بر روی سطح رسانای موانع در کانال‌های بالا و پایین در مدل اول (کانال با دو غشا) در طول مانع نسبت به لبه ی مانع، متقارن است. این توزیع بر روی دو مانع موجود در مدل کاملا یکسان است. زتاپتانسیل القایی در ناحیه‌ی بالادست جریان و تا قبل از لبه‌ی مانع، دارای مقدار منفی و پس از آن مقداری مثبت دارد که مقدار قدرمطلق آن در قبل از لبه‌ی مانع با مقدار زتاپتانسیل القایی در بعد از لبه‌ی مانع، برابر است. با توجه به تغییر اختلاف ولتاژ اعمال شده در دو سر کانال که در این مدلسازی وجود دارد، توزیع زتاپتانسیل با تغییر زمان، تغییر می‌کند به طوری‌که با افزایش زمان و به تبع افزایش اختلاف پتانسیل اعمالی در دو سر کانال‌ها، مقدار زتاپتانسیل القایی بر روی سطح رسانای مانع نیز افزایش می‌یابد.



نمودار 5-4 توزیع زتاپتانسیل القایی بر روی سطح رسانای مانع در لحظه‌ی $t=45$ s

در نواحی با موانع رسانا، زتاپتانسیل بر روی سطح رسانا بزرگتر از زتاپتانسیل بر روی دیواره‌های غیررسانای در کانال‌های بالا و پایین کانال می‌باشد. زتاپتانسیل موجود بر روی دیواره‌های کانال که نارسانا هستند مقدار 50 mV داشته در حالیکه طبق نمودار 5-4 این پارامتر مقداری حدود 1600 mV هم به خود می‌گیرد.

5.4 تغییر بازده اختلاط تحت شرایط مختلف

در مدل اول (کانال با دو غشا) ارائه شده در این پژوهش، پارامترهای خروجی از مدل به صورت جدول 1-4 جمع‌آوری شده که در اینجا پارامتر زمان، متغیر ما می‌باشد. (همانطور که قبلاً اشاره شد، این حل در مدت زمان 45 ثانیه انجام پذیرفته است.)

جدول 1-4 پارامترهای خروجی مختلف بر حسب تغییر زمان در مدل اول (کانال با دو غشا)

عدد رینولدز	بازده اختلاط در مقطع خروجی کانال میانی (%)	ارتفاع تغییر شکل غشا (μm)	میدان اعمالی (V/cm)	زمان (s)
0.71	18.14	73.46	73.14	5
0.68	17.96	80.27	76.24	10
0.64	18.66	87.32	79.27	15
0.60	19.60	94.87	82.20	20
0.54	20.77	101.20	85.00	25
0.47	22.86	109.30	87.63	30
0.39	26.10	115.20	90.07	35
0.32	29.80	120.80	92.29	40
0.26	33.85	125.00	94.27	45

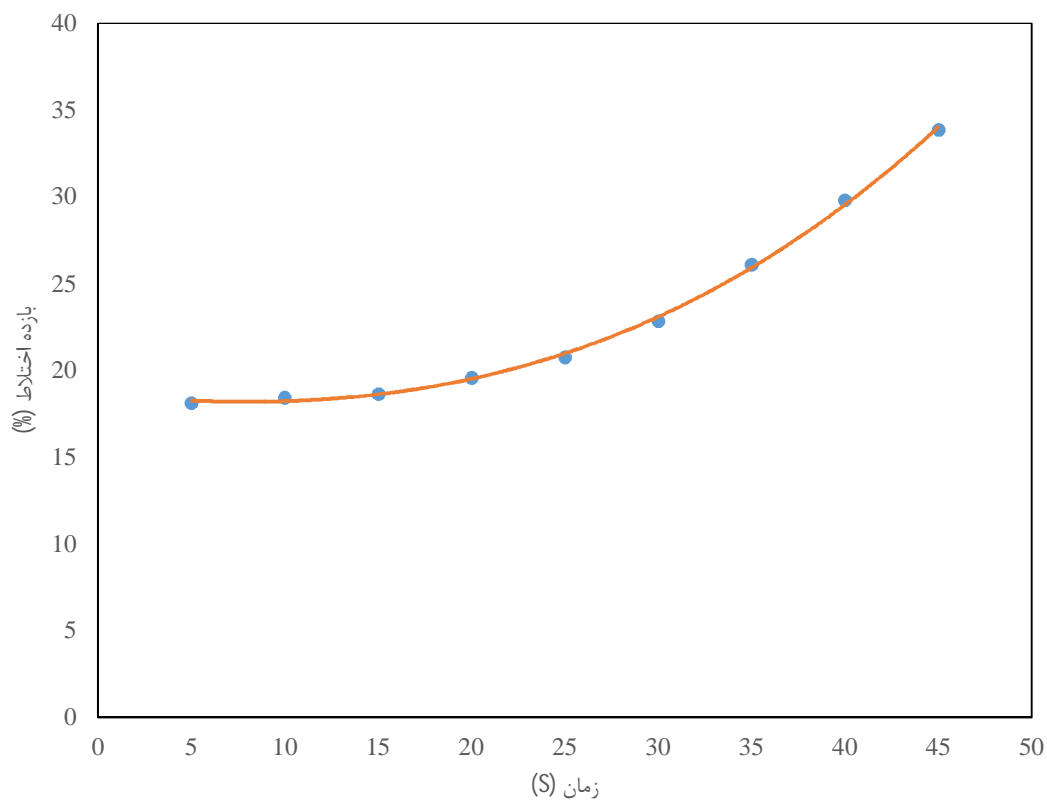
بازدهی اختلاط⁴⁰، ε ، برای محاسبه‌ی اختلاط صورت گرفته توسط جریان الکترواسمتیک با بار القایی در مقاطع دلخواه، مورد استفاده قرار می‌گیرد که در هر مقطع از کانال با رابطه‌ی زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\int_0^w |C - C_\infty| dx}{\int_0^w |C_0 - C_\infty| dx} \right) \times 100\% \quad (5.4)$$

⁴⁰ Mixing efficiency

در حالیکه $C_{\infty} = 0.5$ بوده که با اختلاط کامل در یک مقطع متناظر است، C_0 توزیع غلظت بر روی عرض کانال (w) در ورودی کانال میانی بوده و C توزیع غلظت در مقاطع مختلف در پایین دست جریان می باشد.

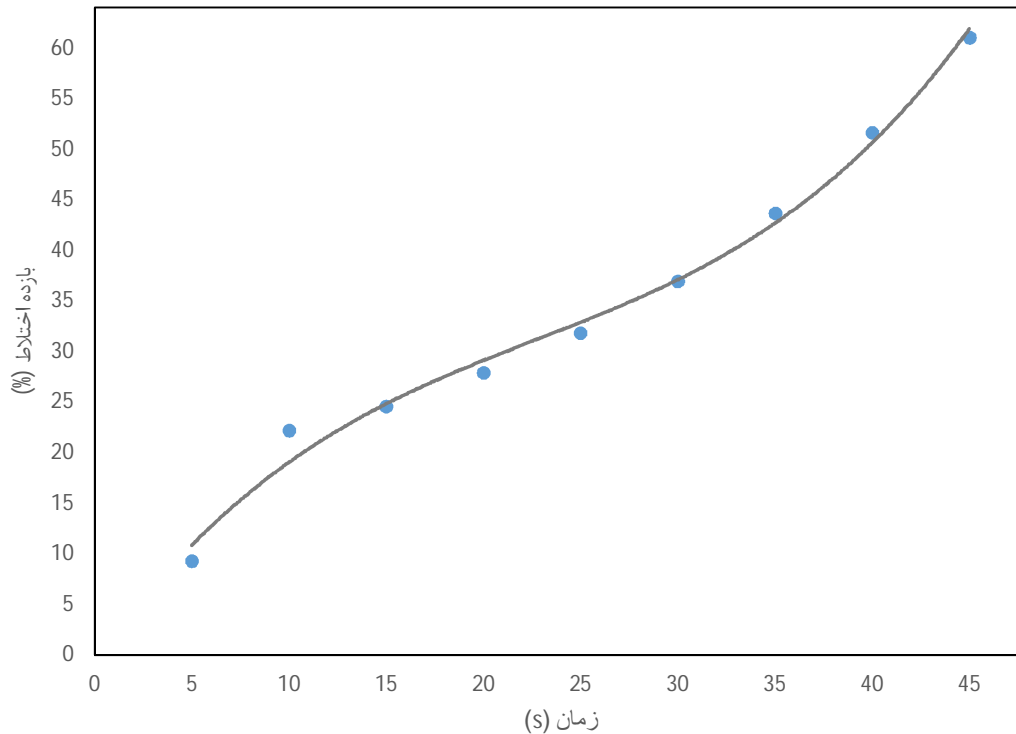
بازده اختلاط در مقطع خروجی کانال میانی مدل با دو غشا بر حسب زمان در قالب نمودار 4-6 و بازده اختلاط در مقطع خروجی کانال میانی مدل با چهار غشا بر حسب زمان توسط نمودار 4-7 نمایش داده شده که روند تحلیل آن را ساده تر خواهد کرد:



نمودار 4-6 بازده اختلاط در مقطع خروجی کانال میانی در مدل با 2 غشا بر حسب زمان

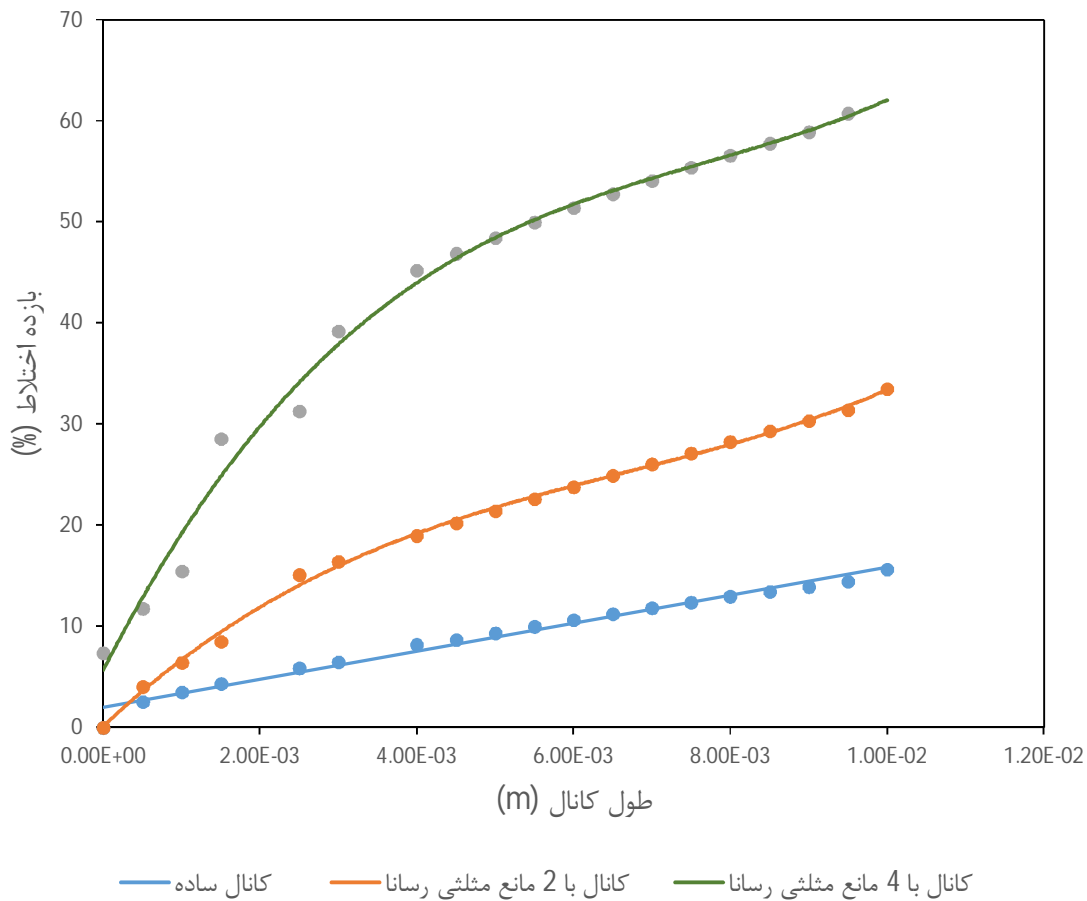
همانطور که در نمودار 4-6 مشاهده می شود مقدار بازده اختلاط بر حسب زمان تغییر می کند. این نمودار با متغیر در نظر گرفتن مقدار میدان اعمالی نسبت به زمان حاصل شده است. با ثابت بودن مدول یانگ غشاها و افزایش فشار ناشی از گردابه ها، غشاهای انعطاف پذیر با گذشت زمان مقدار

بیشتری به درون کانال میانی جابجا شده و سطح مقطع همگرا-واگرای ایجاد شده در کانال میانی را کمتر می‌کنند. این عمل باعث افزایش میزان اختلاط در خروجی کانال میانی می‌شود.



نمودار 4-7 بازده اختلاط در مقطع خروجی کانال میانی در مدل با 4 غشا بر حسب زمان

روند تغییرات غلظت در مقطع خروجی کانال میانی در هر دو مدل به گونه‌ایست که با افزایش زمان، بازده اختلاط در آن مقطع افزایش می‌یابد. دلیل افزایش بازده اختلاط این است که با گذشت زمان، اختلاف پتانسیل الکتریکی در دو سر کانال بالا و پایینی طبق منحنی (1.4) افزایش یافته و به تبع آن با افزایش قدرت گردابه‌ها باعث می‌شود که غشاها در بالا و پایین کانال میانی تغییر شکل داده و مقطع کانال میانی در محل غشاها را بیشتر کاهش دهد. این کاهش مقطع که با تنظیم میدان اعمالی در طول کانال و ایجاد بر روی غشاها انجام می‌پذیرد، باعث افزایش بازدهی غلظت در مقاطع موجود در بعد از دهانه‌ی همگرا-واگرا خصوصاً مقطع خروجی در کانال میانی می‌شود. با توجه به اینکه غشاها در مدل با چهار غشا در دو ناحیه از کانال وجود دارند و در آن مدل دو قسمت همگرا-واگرا ایجاد می‌شود، در نتیجه میزان اختلاط و به تبع آن بازده اختلاط در این مدل نسبت به مدل با دو غشا افزایش یافته است.



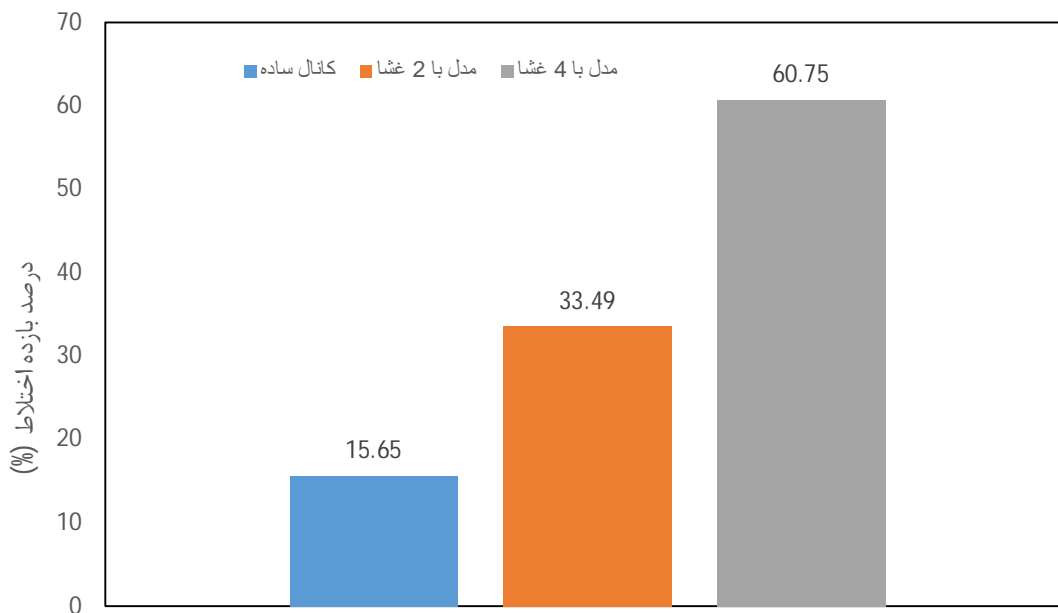
نمودار 8-4 نمودار مقایسه‌ای بازده اختلاط در طول سه کانال مورد نظر در لحظه $t=45$ s

با توجه به نمودار تغییر ولتاژ بر حسب زمان (1.4) ماکزیمم ولتاژ در نظر گرفته شده $E = 94.27 V / cm$ می‌باشد. طول کانال به مقاطعی با فاصله‌ی مساوی تقسیم شده است. هدف از ارائه‌ی نمودار 8-4 مقایسه‌ی بازده اختلاط در مقاطع مورد نظر با میدان مذکور، در کانال ساده و کانال‌های مدلسازی شده می‌باشد. این مقایسه در لحظه‌ی آخر ($t=45$ s) انجام پذیرفته است.

همانطور که در منحنی آبی رنگ (منحنی بازده اختلاط در کانال ساده) موجود در نمودار 8-4 مشاهده می‌شود، بازده اختلاط از بالادست جریان به سمت پایین دست جریان در کانال روندی افزایشی دارد. این روند به خاطر اینست که بر اثر سرعت کم سیال، ترم نفوذ در معادله مومنتم غالب بوده و اختلاط افزایش می‌باشد.

بازده اختلاط در طول کانال مدلسازی شده با دو غشا و دو مانع، به علت وجود دهانه‌ی همگرا-واگرا افزایش بیشتری در طول کانال نسبت به یک کانال ساده خواهد داشت.

همانطور که در نمودار بازده اختلاط در طول کانال با چهار غشا و چهار مانع مشاهده می‌شود، مقدار بازده اختلاط در طول کانال میانی آن نیز از ابتدا تا انتها روندی افزایشی دارد. نمودار 4-8 یک نمودار مقایسه‌ای بوده که بازده اختلاط در طول سه کانال مطرح شده در این پژوهش آورده شده است.

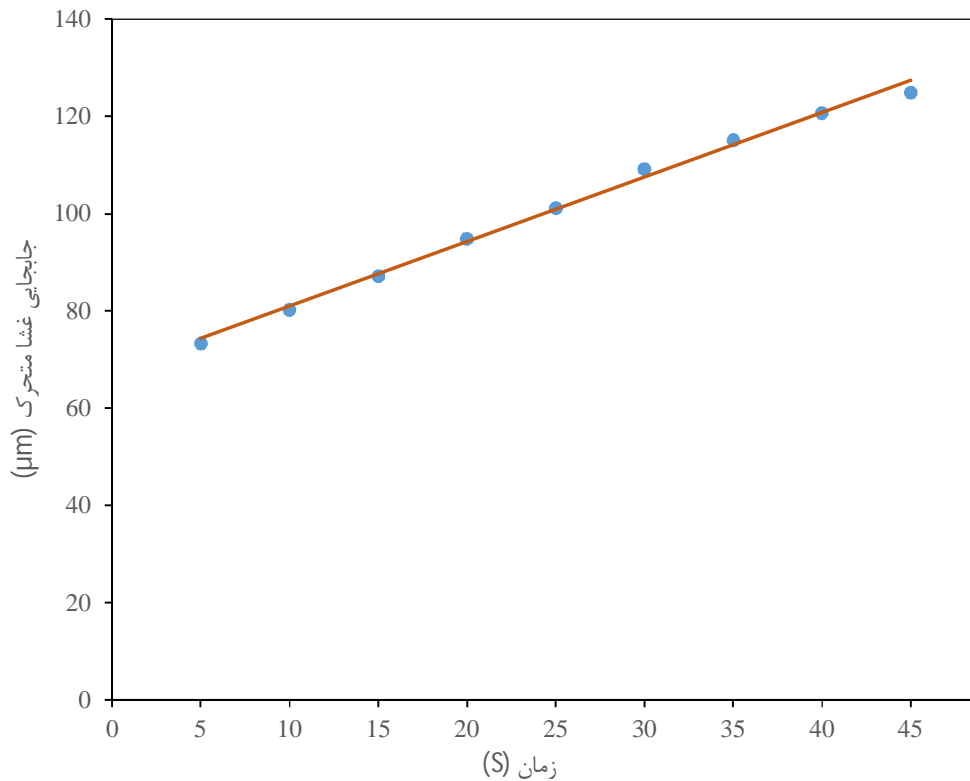


نمودار 4-9 بازده اختلاط در مقطع خروجی کانال ساده و همچنین کانال میانی در 2 مدل ارائه شده در لحظه $t=45$ s

با افزایش تعداد موانع و به تبع آن، تعداد غشا در مدلسازی جریان در کانال‌ها می‌توان میزان بازده اختلاط در یک مقطع از سه کانال مورد نظر را افزایش داد. نقص این طرح در کاهش سرعت در جریان سیال کانال میانی می‌باشد که دبی جریان را کاهش می‌دهد.

6.4 جابجایی غشا بر حسب زمان

در اینجا روند تغییرات ارتفاع غشا در راستای عمودی بر حسب زمان مورد بررسی قرار می‌گیرد که نقاط بدست آمده و بهترین منحنی گذرنده از آن نقاط در نمودار 10-4 رسم شده است.



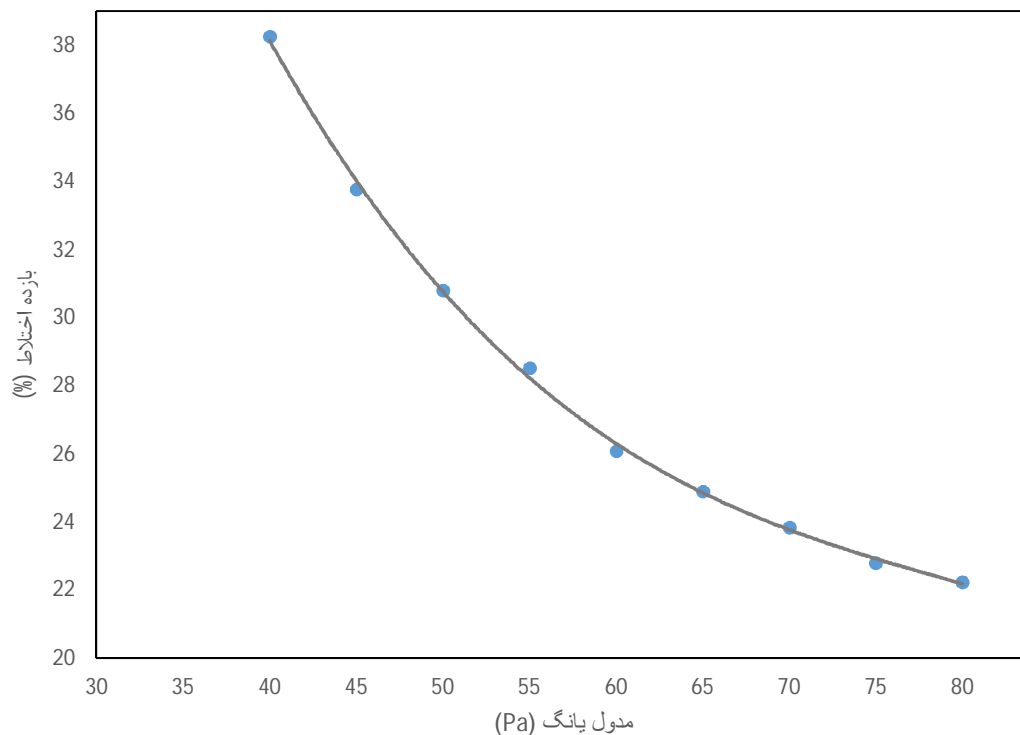
نمودار 10-4 جابجایی غشا متحرک بر حسب زمان در مدل با 2 غشا

همانطور که در نمودار 10-4 مشاهده می‌شود غشای موجود با گذشت زمان در روند حل مدل مورد نظر، تغییر شکل بیشتری پیدا می‌کند که به‌طور تقریبی رابطه‌ی خطی با زمان دارد. این جابجایی غشاها به سمت داخل کانال میانی افزایش می‌یابد که علت آن افزایش اختلاف پتانسیل جریان مستقیم اعمالی به دو سر کانال بالا و پایینی و به‌تبع آن افزایش میدان الکتریکی با افزایش زمان می‌باشد. این اختلاف پتانسیل اعمالی طبق منحنی (1.4) اعمال می‌شود. با تغییر میدان الکتریکی محلی در محل موانع رسانا، قدرت گردابه‌های ایجاد شده افزایش می‌یابد. با فرض ثابت بودن مدول یانگ غشاها در کل مدت زمان حل مسئله، افزایش فشار ناشی از گردابه‌ها بر روی سطح غشا بر حسب زمان، باعث جابجایی بیشتر آن می‌شود.

7.4 مطالعه پارامترها

1.7.4 تغییرات مدول یانگ در مدل اول (کانال با دو غشا)

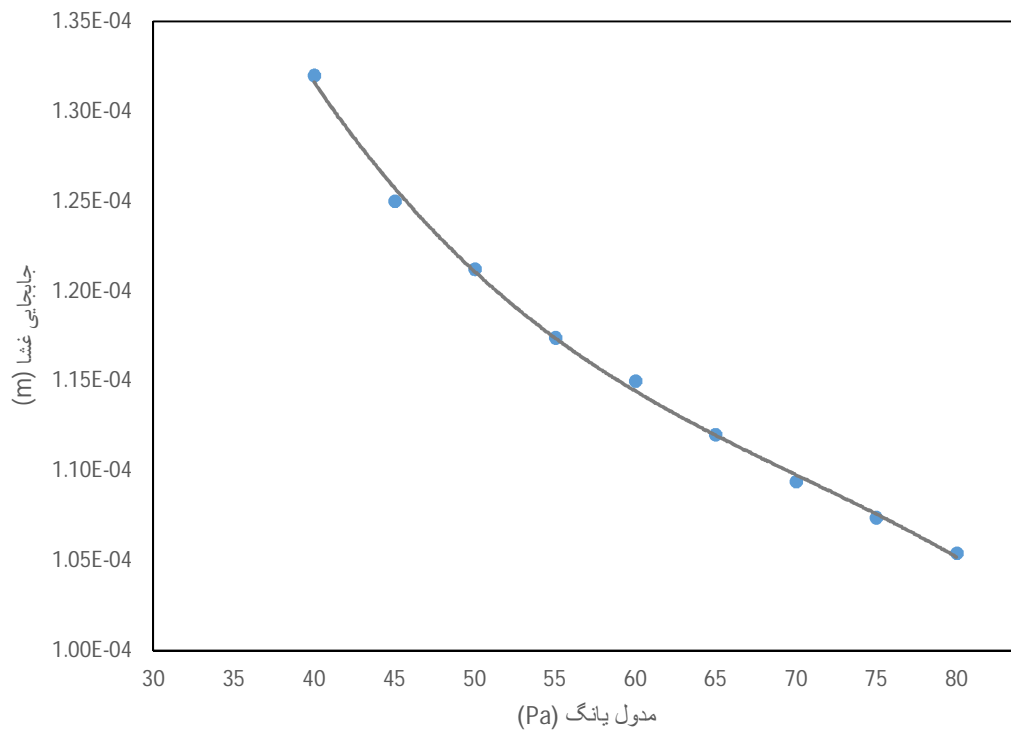
یکی از پارامترهای که بررسی آن حائز اهمیت است، تغییر بازده اختلاط در ازای تغییرات مدول یانگ غشاهاست. در بخش های قبل، مدول یانگ در مدل ارائه شده (کانال با دو غشا) در هر دو غشا یکسان و برابر $E=45 \text{ Pa}$ در نظر گرفته شده که به بازده اختلاط 33.49% در کانال میانی منتج شد. در این بخش با یکسان در نظر گرفتن تمامی پارامترها از جمله اختلاف ولتاژ اعمالی در دو سر کانال های بالا و پایین، در نمودار 11-4 بازه ی $[40 \text{ Pa} - 80 \text{ Pa}]$ از مدول الاستیسیته ی غشاها و با فرض یکسان بودن مدول در هر دو غشا، مورد بررسی قرار گرفته که درصد بازده اختلاط ایجاد شده متناظر با هر یک از مدول ها در خروجی کانال میانی به صورت نقاط آورده شده و بهترین نمودار گذرنده از میان نقاط رسم شده است.



نمودار 11-4 بازده اختلاط بر حسب مدول یانگ در خروجی کانال میانی در مدل با 2 غشا (در $t=45 \text{ s}$)

با افزایش مقدار مدول یانگ، غشاها صلب تر شده در نتیجه با یکسان در نظر گرفتن اختلاف ولتاژ اعمالی در دو سر کانال بالا و پایین و همچنین ثابت در نظر گرفتن اختلاف فشار 1.7 Pa در دو سر کانال میانی در مدل ارائه شده با دو غشا، غشاها تغییر شکل کمتری پیدا می‌کند. در نتیجه دهانه‌ی کانال میانی کمتر بسته شده و به تبع آن بازده اختلاط مقداری کمتری را خواهد داشت.

برای تکمیل شدن بحث و بررسی‌های فوق‌الذکر، روند تغییرات جابجایی غشا بر حسب مدول یانگ در شرایط ذکر شده در این بخش در نمودار 12-4 نشان داده شده است.



نمودار 12-4 جابجایی غشای انعطاف پذیر بر حسب مدول یانگ در مدل با 2 غشا در لحظه $t=45$ s

همانطور که انتظار می‌رود با افزایش مدول یانگ، غشا صلب تر شده و میزان جابجایی آن کاهش می‌یابد. این کاهش با توجه به منحنی گذرنده از نقاط بررسی شده در نمودار 12-4 یک روند غیر خطی را نشان می‌دهد.

2.7.4 تغییرات در میدان الکتریکی اعمالی

همانطور که در رابطه‌ی منحنی (6.4) مشاهده می‌شود، با تغییر پارامتر A می‌توان اختلاف ولتاژ در دو سر کانال را کنترل و در نتیجه میدان الکتریکی اعمالی در طول کانال تغییر می‌کند.

$$E = 70 + A \times \sin(\pi t / 150) \quad (6.4) \quad \text{میدان الکتریکی اعمال شده در دو سر کانال بالا و پایینی}$$

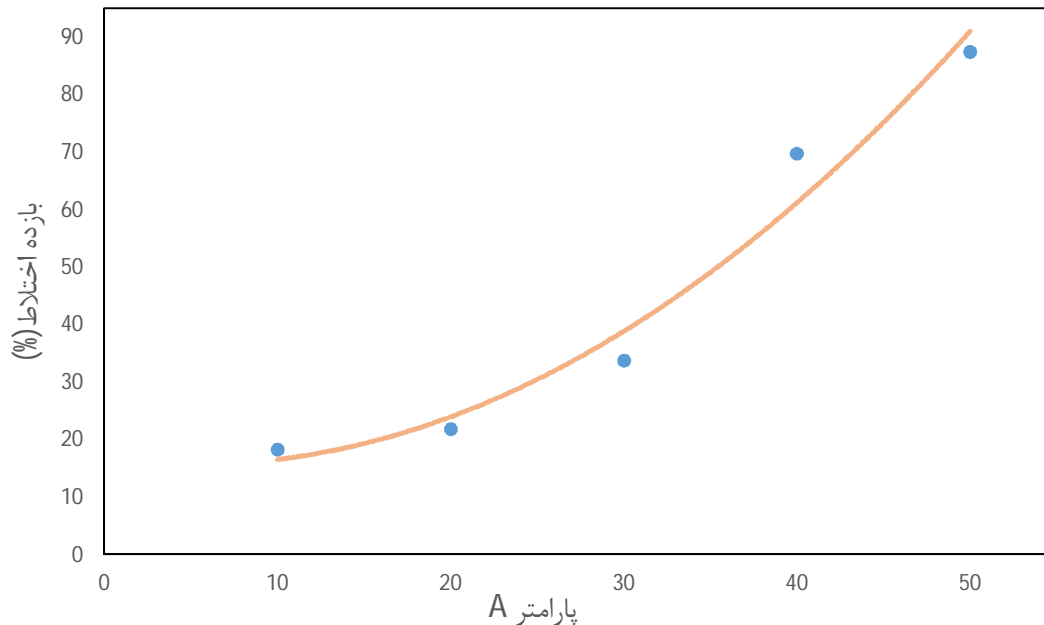
1.2.7.4 تغییر پارامترها در مدل با دو غشا

نتایج حاصل از تغییر پارامتر A بر روی متغیرهای موجود در مدل با دو غشا در لحظه‌ی آخر ($t=45$ s) در جدول 2-4 آورده شده است.

جدول 2-4 پارامترهای مختلف خروجی در اثر تغییر ولتاژ در دو سر کانال‌های بالا و پایین در $t=45$ s

عدد رینولدز Re	سرعت متوسط در مقطع خروجی کانال میانی $*10^{-3}$ (m/s)	بازده اختلاط در مقطع خروجی کانال میانی (%)	حداکثر تغییر شکل (μm)	حداکثر میدان الکتریکی اعمالی (V/cm)	پارامتر A
0.66	1.10	18.38	82.00	78.09	10
0.50	0.843	21.95	105.20	86.18	20
0.26	0.435	33.49	125.00	94.27	30
0.07	0.111	69.85	141.20	102.36	40
0.00117	0.00196	87.49	148.00	110.45	50

یکی از پارامترهای مهم در تغییر بازده اختلاط، میدان الکتریکی اعمالی در دو سر کانال می‌باشد. نمودار 4-13 میزان بازده اختلاط بر حسب پارامتر A را در مقطع خروجی کانال میانی در لحظه آخر ($t=45$ s) نمایش می‌دهد. پارامتر A نشان دهنده‌ی مقدار میدان الکتریکی اعمالی در دو سر کانال‌های بالا و پایین می‌باشد. با تغییر پارامتر A می‌توان میزان ولتاژ اعمالی به دو سر کانال‌های بالا و پایین را تغییر داده و در نتیجه‌ی تغییر حداکثر میدان الکتریکی اعمالی (در لحظه $t=45$ s)، میزان حرکت غشاها به درون کانال میانی در مدل با 2 غشا تغییر یافته و به تبع آن، بازده اختلاط تغییر می‌یابد.

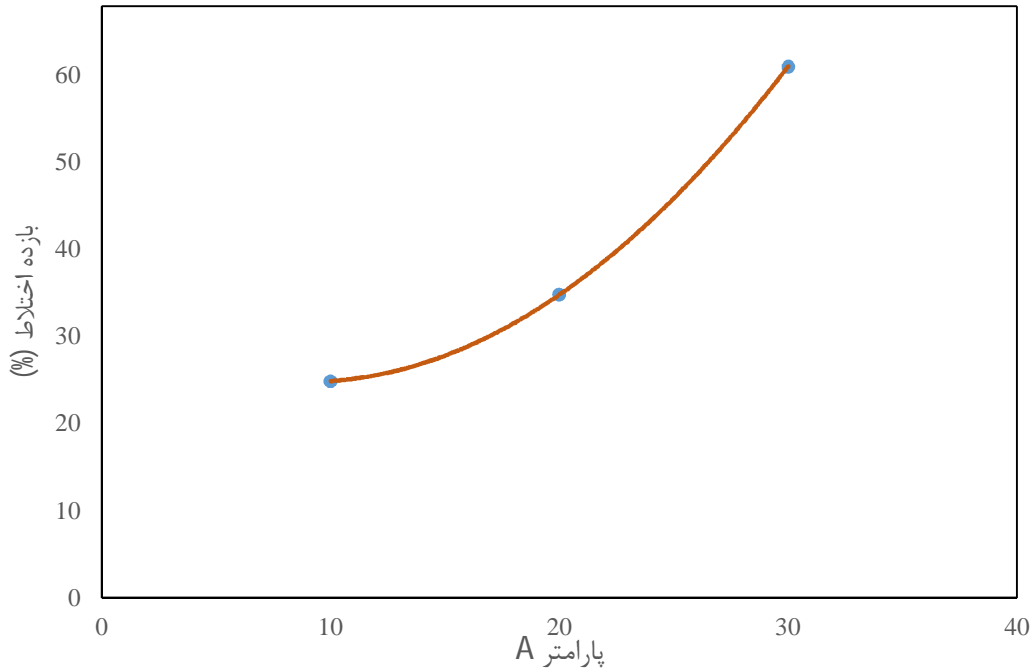


نمودار 4-13 بازده اختلاط بر حسب تغییر پارامتر A در مقطع خروجی کانال میانی در مدل با 2 غشا در لحظه $t=45$ s

هدف از ارائه‌ی نمودار 4-13 بررسی بازده اختلاط در خروجی کانالی میانی در مدل با دو غشا در لحظه‌ی آخر ($t=45$ s) می‌باشد که در آن طبق منحنی (6.4) با تغییر پارامتر A می‌توان مقدار اختلاف ولتاژ اعمالی در دو سر کانال‌های بالا و پایین را تغییر داد. با تغییر مقدار اختلاف ولتاژ، میدان الکتریکی اعمالی در طول کانال تغییر یافته و با توجه به تغییر میدان الکتریکی محلی در محل موانع رسانا، قدرت گردابه‌های ایجاد شده بر روی سطوح رسانای موانع تغییر می‌کند. در نتیجه‌ی تغییر میزان قدرت گردابه‌ها، اندازه حرکت غشاها به داخل کانال میانی تغییر می‌یابد. این عمل باعث تغییر در میزان اختلاط در خروجی کانال میانی می‌شود. همانطور که در نمودار 4-13 مشاهده می‌شود با افزایش پارامتر A (مقدار میدان الکتریکی اعمالی)، مقدار بازده اختلاط بصورت غیر خطی افزایش می‌یابد.

2.2.7.4 تغییر پارامترها در مدل با چهار غشا

میزان تغییر در بازده اختلاط بر حسب پارامتر A در مقطع خروجی کانال میانی در مدل با دو غشا در نمودار 13-4 مورد بررسی قرار گرفت.

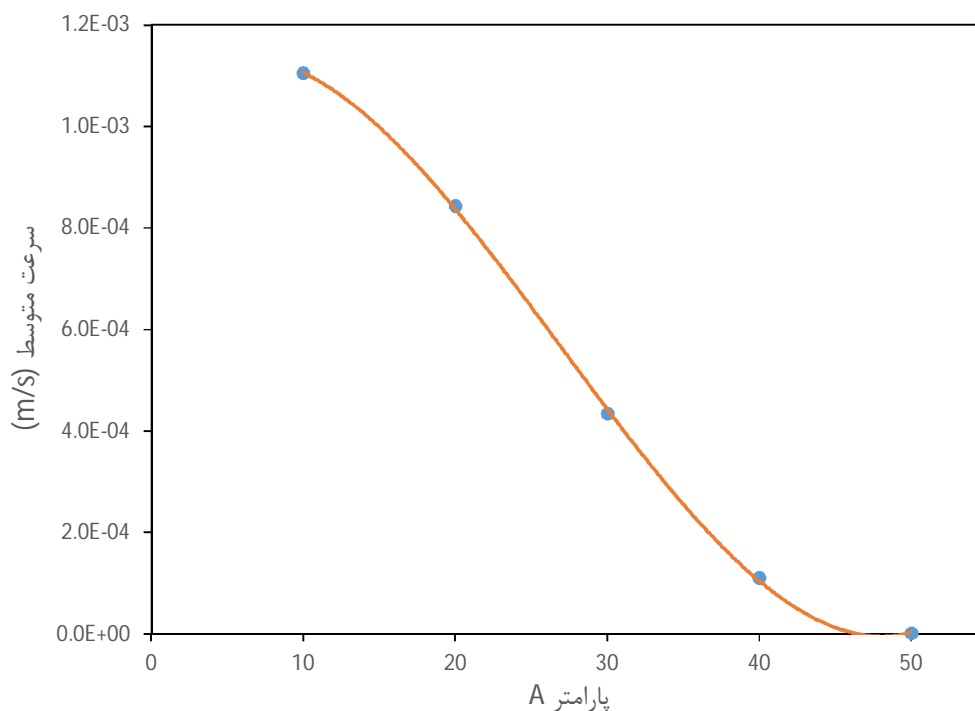


نمودار 14-4 بازده اختلاط بر حسب تغییر پارامتر A در مقطع خروجی کانال میانی در مدل با 4 غشا در لحظه $t=45$ s

همانطور که قبلاً اشاره شد، پارامتر A نشان دهنده‌ی مقدار میدان الکتریکی اعمالی در دو سر کانال‌های بالا و پایین می‌باشد. هدف از ارائه‌ی نمودار 14-4 بررسی روند تغییرات بازده اختلاط بر حسب مقدار پارامتر A در مقطع خروجی کانالی میانی در مدل با چهار غشا می‌باشد. این اطلاعات در لحظه‌ی $t=45$ s ثبت شده زیرا زمان حل مساله تمام شده و با توجه به صعودی بودن نمودار اختلاف ولتاژ اعمالی بر حسب زمان، حداکثر جابجایی غشای انعطاف پذیر اتفاق افتاده است. میزان بازده اختلاط با افزایش مقدار پارامتر A ، به صورت غیر خطی افزایش می‌یابد. دلیل آن این است که با افزایش پارامتر A ، میدان الکتریکی اعمالی در طول کانال‌های بالا و پایین افزایش یافته و قدرت گردابه‌های ایجاد شده بر روی سطوح موانع رسانا نیز افزایش می‌یابد. با افزایش قدرت گردابه‌ها، میزان جابجایی غشاها به درون کانال میانی افزایش یافته و به تبع آن سطح مقطع کانال میانی کاهش بیشتری می‌یابد که نتیجه‌ی آن، بر هم زدن خطوط افقی جریان و افزایش بازده اختلاط می‌باشد.

3.7.4 کنترل جریان در مدل اول (کانال با دو غشا)

برای کنترل جریان در کانال‌هایی با ابعاد میکرو از پمپ‌ها و شیرهای غشادار با روش‌های تحریک و به‌کاراندازی متفاوت استفاده می‌شود که شامل تحریک پیزوالکتریک، الکترواستاتیک و ترمونیوماتیک در سیلیکون، شیشه و برخی از ابزارهای پلاستیکی می‌باشد [۲۴]. تمامی این مکانیزم‌ها، تکنیک‌های ساخت پیچیده‌ای را برای معرفی قسمت‌های محرک در سیستم سیال میکرو نیاز دارند. یکی از کاربردهای مدل ارائه شده در این پژوهش، کنترل جریان سیال در کانال میانی می‌باشد. کنترل دبی جریان توسط تنظیم میدان الکتریکی در طول کانال‌های بالا و پایین انجام می‌پذیرد. این عمل با تغییر اختلاف ولتاژ اعمالی در دو سر کانال‌های مذکور امکان پذیر می‌باشد. کنترل دبی جریان با جابجایی غشا به درون کانال میانی و ایجاد یک ناحیه‌ی هم‌گرا-واگرا انجام می‌شود. جابجایی غشا با اعمال نیرو توسط گردابه‌های ایجاد شده در جریان الکترواستاتیک با بار القایی بر روی سطح غشا حاصل می‌شود.



نمودار 4-15 سرعت متوسط در خروجی کانال میانی بر حسب تغییر پارامتر A در مدل با 2 غشا (در $t=45$ s)

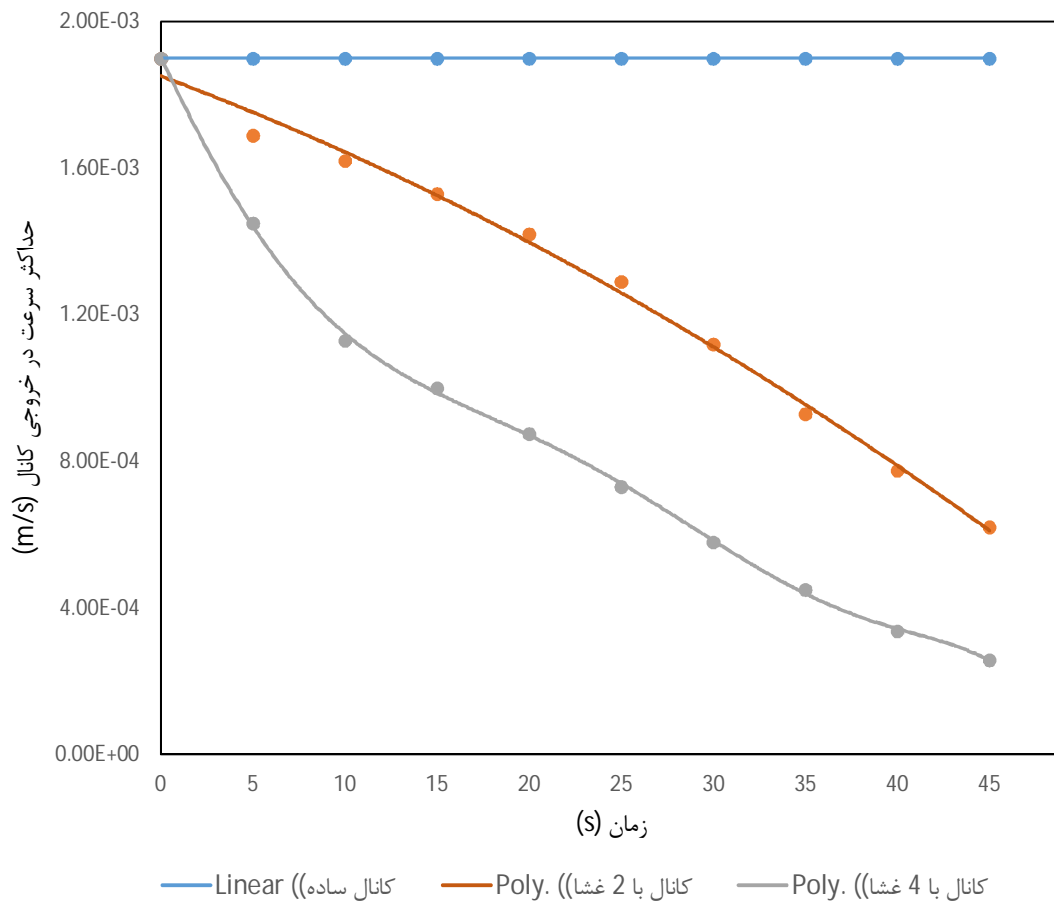
همانطور که قبلاً اشاره شد، پارامتر A نشان دهنده‌ی مقدار میدان الکتریکی اعمالی در دو سر کانال‌های بالا و پایین می‌باشد.

روند تغییرات سرعت متوسط بر حسب پارامتر A در نمودار 4-15 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش پارامتر A یعنی افزایش میدان الکتریکی اعمالی در دو سر کانال‌های بالا و پایین، سرعت متوسط کاهش می‌یابد. به دلیل افزایش قدرت گردابه‌های ایجاد شده و جابجایی بیشتر غشاها به طرف داخل کانال میانی، سطح مقطع کانال در ناحیه‌ی همگرا-واگرا کاهش بیشتری را خواهد داشت.

با ثابت در نظر گرفتن اختلاف فشار اعمالی در دو سر کانال میانی و کاهش بیشتر سطح مقطع کانال به این نتیجه می‌رسیم که سرعت متوسط در مقادیر بزرگتر از پارامتر A، کاهش بیشتری می‌یابد.

1.3.7.4 سرعت ورودی کانال میانی در مدل‌های مذکور

برای تحلیل سرعت ورودی جریان سیال در کانال میانی در دو مدل ارائه شده و همچنین سرعت در ورودی کانال ساده می‌بایست آن‌ها را با هم مقایسه کنیم. با فرض اینکه میدان الکتریکی جریان مستقیمی که به دو سر کانال بالا و پایین اعمال می‌شود طبق منحنی (6.4) بوده و با فرض ثابت در نظر گرفتن تمامی پارامترها، در نمودار 4-16 منحنی حداکثر مقدار سرعت در پروفیل سرعت جریان ورودی در سه کانال مذکور ارائه شده است. پارامتر حداکثر سرعت جریان، بهترین پارامتر با قابلیت مقایسه می‌باشد. از این پارامتر می‌توان به این نتیجه رسید که به طور تقریبی مقدار دبی جریان سیال در هر زمان از شبیه‌سازی و در هر کدام از مدل‌های ارائه شده چه وضعیتی دارد.



نمودار 16-4 حداکثر سرعت در مقطع ورودی کانال های میانی بر حسب زمان

در نمودار 16-4 خط آبی رنگ یک خط افقی می باشد که نشان دهنده ی مقدار حداکثر سرعت در مقطع ورودی کانال ساده (بدون غشا) از لحظه ی $t=0$ تا $t=45$ s می باشد. همانطور که مشاهده می شود به علت عدم جابجایی دیواره ها و به تبع آن، عدم تغییر در سطح مقطع کانال، پروفیل سرعت ورودی در تمامی زمان ها تغییر نمی یابد که نتیجه ی آن، ثابت ماندن حداکثر سرعت است. با فرض ثابت بودن اختلاف فشار موجود در دو سر کانال و عدم تغییر پروفیل سرعت در نتیجه دبی جریان سیال در کانال ثابت باقی می ماند.

در نمودار مذکور، منحنی قرمز رنگ روند تغییرات حداکثر سرعت ورودی سیال در کانال میانی بر حسب زمان را در مدل با دو غشا نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود به علت کاهش سطح مقطع کانال میانی و با ثابت در نظر گرفتن مقدار اختلاف فشار اعمالی در دو سر کانال میانی در نتیجه پروفیل سرعت در مقطع ورودی کانال بر حسب زمان تغییر یافته که به تبع آن حداکثر سرعت جریان

ورودی در کانال میانی کاهش می‌یابد. با کاهش حداکثر سرعت جریان سیال، دبی جریان عبوری از کانال مدنظر با ابعاد میکرو کاهش می‌یابد.

در همین نمودار منحنی خاکستری رنگ روند تغییرات حداکثر سرعت ورودی سیال در کانال میانی بر حسب زمان را در مدل با چهار غشا نشان می‌دهد. در این منحنی نیز مانند منحنی قرمز رنگ، حداکثر سرعت جریان ورودی در کانال میانی با افزایش زمان، کاهش می‌یابد. اما کاهش سرعت در این منحنی بیشتر از منحنی قرمز رنگ است زیرا سطح مقطع کانال در دو ناحیه از کانال میانی بصورت همگرا-واگرا می‌باشد.

حداکثر سرعت در مقطع ورودی کانال ساده و کانال‌های میانی در دو مدل ارائه شده در جدول 3-4 آورده شده است:

جدول 3-4 حداکثر سرعت در مقطع ورودی کانال میانی در لحظه $t=45$ s

حداکثر سرعت V_{\max} ($\frac{m}{s}$)	
1.90E-03	کانال ساده
6.20E-04	مدل با 2 مانع
2.57E-04	مدل با 4 مانع

همچنین سرعت متوسط در مقطع ورودی کانال میانی را می‌توان از رابطه‌ی زیر محاسبه کرد:

$$\bar{V} = \frac{1}{A} \int_s V dA \quad (7.4)$$

همچنین عدد رینولدز جریان ورودی در کانال میانی توسط رابطه‌ی (8.4) قابل محاسبه می‌باشد:

$$Re = \frac{\rho \bar{V} D}{\mu} = \frac{\rho \bar{V} (2 \times h)}{\mu} \quad (8.4)$$

$$Re = \frac{998 \times \bar{V} (2 \times h 300 \times 10^6)}{0.001} = 598.8 \bar{V} \quad (9.4)$$

نتایج حاصل شده از محاسبات سرعت متوسط و عدد رینولدز ورودی در جدول 4-4 آورده شده که یک جدول برای مقایسه‌ی سرعت متوسط در ورودی کانال ساده و کانال‌های میانی در دو مدل مدنظر می‌باشد:

جدول 4-4 عدد رینولدز جریان ورودی در کانال میانی در لحظه $t=45$ s

عدد رینولدز در ورودی کانال میانی	سرعت متوسط در ورودی کانال میانی (m/s)	
0.80	1.33E-03	کانال ساده
0.26	4.37E-04	مدل با 2 مانع
0.11	1.82E-04	مدل با 4 مانع

8.4 کاربردهای مدل ارائه شده

الکتروکنیتیک یکی از قدیمی‌ترین زمینه‌های مطالعه در علوم سطح و کلوییدی می‌باشد، اما با این وجود پیشرفت‌ها در تکنولوژی منظرهای جدیدی را برای وارد کردن الکتروکنیتیک به سیال در مقیاس میکرو و کاربردهای آزمایشگاه بر روی تراشه⁴¹ مانند پمپ کردن، ایجاد اختلاط، جداسازی پروتئین و یا مولکولی و دیگر موارد گشوده است.

در زمینه‌ی سیستم‌های آنالیز کلی در ابعاد میکرو⁴² و یا وسایل آزمایشگاه روی تراشه پیشرفت قابل توجهی حاصل شده‌است. ابزارهای آزمایشگاه بر روی تراشه اغلب پدیده‌های فیزیکی جدید را شامل می‌شوند. انتقال کنترل شده‌ی سیال و نمونه‌های شیمیایی و زیست‌شناختی یکی از مسائل مهم در ابزارهای آزمایشگاه بر روی تراشه می‌باشد.

الکترواسمیس به علت پیشرفت‌های قابل توجهش به طور گسترده در شیوه‌ی پمپ کردن در جریان به وسیله‌ی اختلاف فشار متعارف، مورد استفاده قرار می‌گیرد و کنترل و تعویض جهت جریان در آن آسان

⁴¹ Lab-on-a-Chip (LOC)

⁴² Micro Total Analysis Systems (μ TAS)

می‌باشد. به طور کلی جریان‌هایی که توسط الکتروکنتیک در وسایلی که با سیال در ابعاد میکرو کار می‌کنند، انجام می‌شود. به علت سرعت پایین جریان و مقیاس طول مشخصه‌ی کوچک⁴³، عدد رینولدز کمتر از 1 ($Re \ll 1$) و جریان لایه‌ای می‌باشد. در نتیجه اختلاط در اینگونه جریان‌های لایه‌ای با خطوط جریان موازی چندگانه تنها توسط نفوذ انجام می‌شود که مشکلی است برای موقعیت‌هایی که به اختلاط سریع در محلول‌های مختلف در کانال‌هایی با ابعاد میکرو نیاز داریم.

به منظور کنترل جریان در کانال‌هایی با ابعاد میکرو، شیرها و پمپ‌های غشایی در شیوه‌های عملکردی و تحریک گوناگون مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مکانیزم‌ها به تکنیک‌های ساخت پیچیده‌ای نیاز دارد تا بتوان قسمت‌های متحرک را به سیستم‌هایی که با سیال در ابعاد میکرو کار می‌کنند، معرفی کنیم. جریان الکترواسمتیک، کانال با طراحی و ساخت ساده را شامل می‌شود و نیاز به شیرهای مکانیکی ندارد با این حال کنترل جریان با استفاده از جریان الکترواسمتیک می‌تواند پیچیدگی بیشتری داشته‌باشد، زیرا نیاز به منابع انرژی چندگانه دارد که در بین این منابع نیاز به تغییرات ولتاژ وابسته به زمان می‌باشد. در جستجو بین محلول‌های پتانسیلی به منظور چالش‌های ذکر شده، به نوع جدیدی از جریان الکتروکنتیک می‌رسیم که آن را الکترواسمیس با بار القا شده می‌نامند. ویژگی قابل توجه آن در جریان‌های چرخشی با ابعاد میکروبی است که در نزدیکی یک جسم رسانا با قابلیت قطبی‌شوندگی بالا در یک میدان الکتریکی خارجی تشکیل می‌شود. دیواره‌های متحرک موجود در این مدل باعث مدلسازی، انجام اختلاط و کنترل جریان بطور غیرمستقیم در وسایل میکرو می‌شود. تحریک این دیواره‌ها بر اثر برخورد گردابه‌های ایجاد شده در جریان الکترواسمتیک با بار القایی انجام می‌شود.

⁴³ Characteristic length scale

9.4 نتیجه گیری

در مدل ارائه شده در این پژوهش، افزایش میزان اختلاط ذرات به وسیله‌ی تغییر در سطح مقطع کانال مدنظر انجام می‌شود. برای کاهش سطح مقطع کانال و ایجاد یک ناحیه‌ی همگرا-واگرا، در مناطقی به ایجاد دیواره‌های انعطاف پذیر پرداختیم، تا با استفاده از فشار ناشی از گردابه‌های ایجاد شده بر روی سطوح رسانای موانع در کانال‌های بالا و پایین بتوانیم این کاهش را امکان پذیر سازیم. در این مدل‌سازی، افزایش میزان اختلاط بطور غیر مستقیم انجام می‌پذیرد. این بدین معنی است که گردابه‌های ایجاد شده در جریان الکترواسمتیک با بار القایی در افزایش میزان اختلاط ذرات به طور مستقیم درگیر نبوده بلکه به طور غیر مستقیم و با تاثیر بر روی دیواره‌های انعطاف پذیر در افزایش میزان اختلاط نقش دارد. بدین دلیل برای ایجاد و افزایش اختلاط ذرات در سیال نیاز به این نمی‌باشد که ذرات در سیال الکتروولیت قرار داشته باشند. در اینجا از خواص جریان الکترواسمتیک با بار القایی برای افزایش میزان اختلاط، به طور غیر مستقیم استفاده شده است. به منظور عدم بسته شدن سطح مقطع کانال میانی به وسیله‌ی غشاهای، میزان تغییر شکل غشاهای انعطاف پذیر دارای محدودیت است، پس نمی‌توانیم با ایجاد یک مقطع همگرا-واگرا میزان قابل توجهی بازده اختلاط ذرات را افزایش دهیم. در نتیجه با افزایش تعداد موانع و به تبع آن تعداد غشا در مدل ارائه شده می‌توان میزان بازده اختلاط در مقطع خروجی یک کانال با ابعاد میکرو را افزایش داد.

در این طرح، سرعت جریان سیال در کانال میانی کاهش می‌یابد که دبی جریان را کاهش می‌دهد. اما می‌توان گفت که کاهش سرعت جریان سیال یک عیب نبوده بلکه یک ابزار برای کنترل دبی جریان با تغییر مقدار ولتاژ اعمالی در دو سر کانال‌های بالا و پایین می‌باشد. در نتیجه می‌توان یکی از کاربردهای مدل ارائه شده را کنترل دبی جریان در کانال میکرو ذکر کرد. بدین صورت که با کنترل میزان اختلاف ولتاژ اعمالی به دو سر کانال‌های بالا و پایین می‌توان قدرت گردابه‌های ایجاد شده بر روی سطوح رسانای موانع را افزایش و یا کاهش داد. این گردابه‌ها بر روی غشاهای انعطاف پذیر با مدول یانگ مورد نظر تاثیر گذاشته و آن‌ها را به داخل کانال میانی حرکت می‌دهد. بدین صورت می‌توانیم سطح مقطع کانال میانی را افزایش و یا کاهش دهیم. با توجه به اختلاف فشار ثابت اعمال شده در دو سر کانال میانی و ایجاد یک مقطع همگرا-واگرا در یک مقطعی از کانال، می‌توان دبی جریان را تغییر داد. در نتیجه با کنترل اختلاف ولتاژ اعمالی در مدل ارائه شده، می‌توان دبی جریان را کنترل کرد.

پیوست

الف) مدلسازی طرح ارائه شده در این پژوهش در نرم افزار

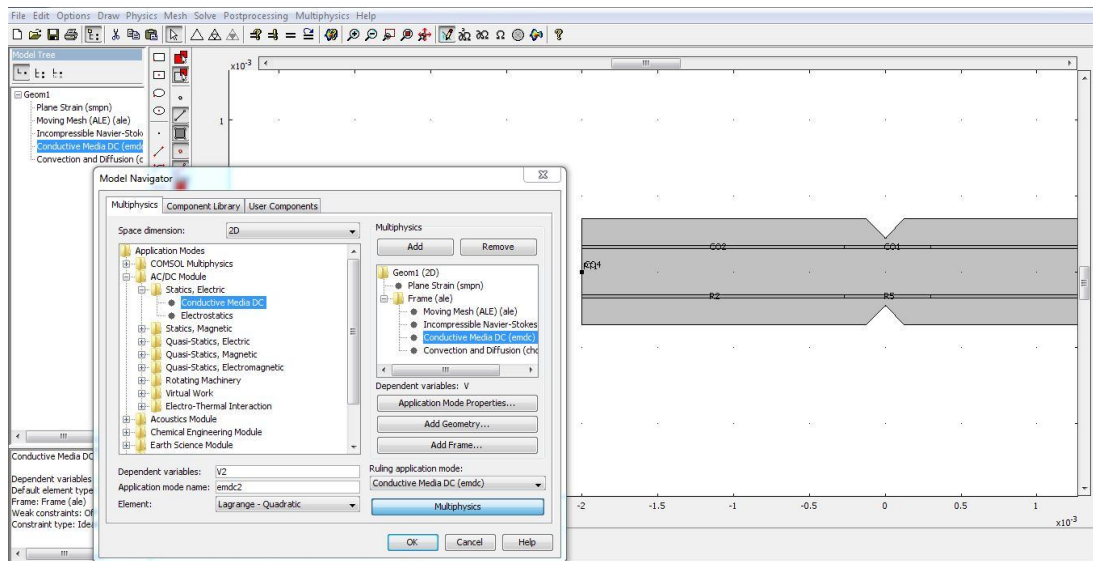
مدلسازی انجام شده در این پژوهش در نرم افزار COMSOL MULTIPHYSICS Version 3.5 صورت پذیرفته که شامل سه کانال بهم پیوسته می باشد. این سه کانال بصورت افقی بر روی یکدیگر قرار گرفته اند بطوریکه کانالهای بالا و پایینی بطور متقارن نسبت به کانال میانی بوده و ارتباط آنها با یکدیگر تنها در قسمتی از دیواره می باشد که در این قسمت، دیواره از یک غشا تشکیل شده است.

1- مدلسازی جریان الکتریکی تنها در دو کانال بالا و پایین مد نظر می باشد زیرا جریان سیال در آن دو کانال توسط جریان الکترواستاتیک انجام می پذیرد. برای مدلسازی میدان جریان الکتریکی در کانال های بالا و پایین در ابتدا باید میدان الکتریکی را توسط مازول میدان هادی⁴⁴ در نرم افزار مدل کنیم. بدین منظور می بایست شرایط مرزی در تمامی دیواره های رسانا و غیررسانا از جمله دیواره های ثابت و متحرک، بغیر از مرزهای ورودی و خروجی را در دو کانال بر روی عایق الکتریکی⁴⁵ قرار دهیم. در مرز ورودی، شرط مرزی را بر روی پتانسیل الکتریکی⁴⁶ قرار داده و مقدار آن را طبق منحنی ولتاژ الکتریکی (20.3) به عنوان ورودی می دهیم. در مرز خروجی همچنین شرط مرزی را بر روی پتانسیل الکتریکی قرار داده و مقدار آن را صفر ولت می دهیم. در نتیجه اختلاف ولتاژ ∇V را در طول کانال اعمال کرده ایم.

⁴⁴ Conductive Media

⁴⁵ Electric Insulation

⁴⁶ Electric Potential



شکل پیوست 1- ماژول میدان الکتریکی در نرم افزار مذکور

2- مدلسازی برخورد سیال با سازه انعطاف پذیر: برای مدلسازی میدان جریان سیال می بایست معادله ناویر استوکس در محیط محاسباتی سیال در سه کانال مذکور توسط حلگر مورد محاسبه قرار گیرد. در این حین باید برخورد سیال با سازه ی انعطاف پذیر (غشا) نیز مدنظر گرفته شود که برای مدلسازی برخورد سیال با سطوح جامد (غشاها) و جابجایی آنها در درون سیال می توان از ماژول برخورد سیال با سطح جامد⁴⁷ در نرم افزار مذکور استفاده کنیم. این ماژول یکی از زیر مجموعه های قسمت سیستم الکترومکانیکی در ابعاد میکرو⁴⁸ می باشد. زیر بخش های ماژول مذکور شامل کرنش صفحه ای⁴⁹، المان متحرک⁵⁰ و ناویر استوکس تراکم ناپذیر⁵¹ می شود.

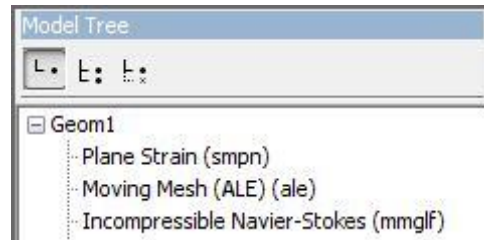
⁴⁷ Fluid-Structure Interaction

⁴⁸ MicroElectroMechanical Systems (MEMS)

⁴⁹ Plane Strain

⁵⁰ Moving Mesh

⁵¹ Incompressible Navier-Stokes



شکل پیوست 2 - زیر بخش‌های مربوط به ماژول برخورد سیال با سطح جامد

زیر بخش های ماژول برخورد سیال با سطح جامد به شرح زیر می‌باشد:

1-2 قسمت کرنش صفحه‌ای صرفاً به منظور محاسبات در ناحیه‌ی سطح جامد بوده که این نواحی شامل دیواره های میانی صلب و انعطاف پذیر می‌باشد. در این قسمت، ناحیه‌ی محاسباتی سیال که شامل سه کانال می‌باشد غیرفعال است.

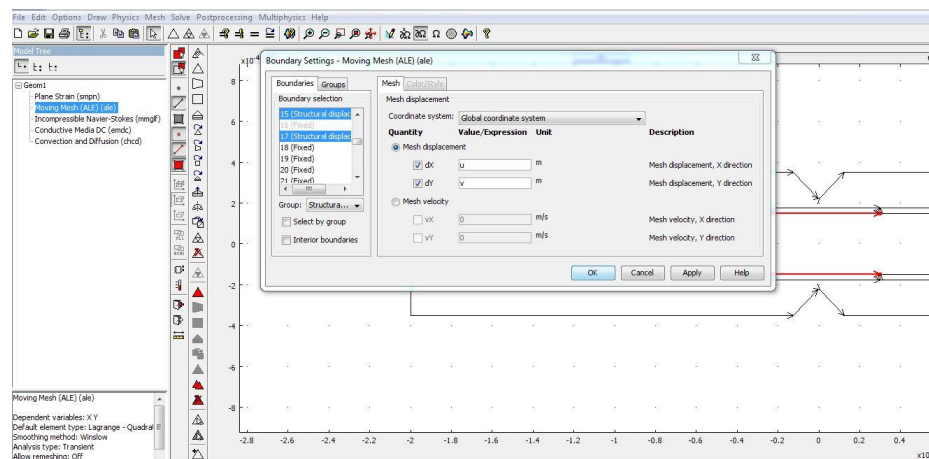
در قسمت کرنش صفحه‌ای، پارامترهایی که باید لحاظ شود در جدول **3-3** آورده شده است:

جدول پیوست 1 - ثوابت و شرایط موجود در قسمت کرنش صفحه‌ای برای نواحی محاسباتی مدل

$E = 10^{20} Pa$	++ مدول یانگ	
$\nu = 0.35$	++ نسبت پواسون	+ دیواره های صلب
ثابت	++ شرط قید دهی	
$E = 45 Pa$	** مدول یانگ	
$\nu = 0.35$	** نسبت پواسون	* دیواره های انعطاف پذیر
آزاد	** شرط قید دهی	

مقدار مدول یانگ برای سطوح انعطاف پذیر که در بالای مانع در کانال پایین و پایین مانع در کانال بالایی قرار دارند، برابر 45 Pa در نظر گرفته شده است. علت انتخاب این عدد به عنوان مدول یانگ، رسیدن دیواره‌ی انعطاف پذیر به حداکثر ارتفاع مطلوب ($125 \mu m$) می‌باشد. در این وضعیت باید فضای ایجاد شده در کانال میانی (قسمت همگرا-واگرا) برابر ($50 \mu m$) بوده که با در نظر گرفتن مقدار ماکزیمم میدان اعمالی بر اساس رابطه‌ی منحنی ولتاژ اعمال شده (20.3) در ورودی کانالهای بالا و پایین می‌باشد.

2-2 در قسمت مش متحرک در نرم افزار مربوطه، تصویری از قسمت شرایط مرزی حاکم بر مرزها در شکل پیوست 3 و پارامترهایی که باید لحاظ شود در جدول آورده شده است:



شکل پیوست 3- پنجره‌ی شرایط مرزی از زیربخش مش متحرک

جدول پیوست 2 - ثوابت و شرایط موجود در قسمت مش متحرک برای نواحی محاسباتی مدل

++ مدول یانگ	+ میدان سیال ⁵²
جابجایی آزاد	
$dX = u$	**متغیر جابجایی ⁵⁴ در جهت X
$dY = v$	**متغیر جابجایی در جهت Y
ثابت (بدون حرکت)	**میدان جامد ⁵³
جابجایی سازه‌ای	** مرزهای متحرک

در نواحی مرزسطح جامد غشاهای متحرک با گذشت زمان و حرکت آن غشاها به درون کانال میانی، مش های موجود در کانال ها دچار تغییرات می شوند. مرزهای متحرک دارای شرط مرزی جابجایی

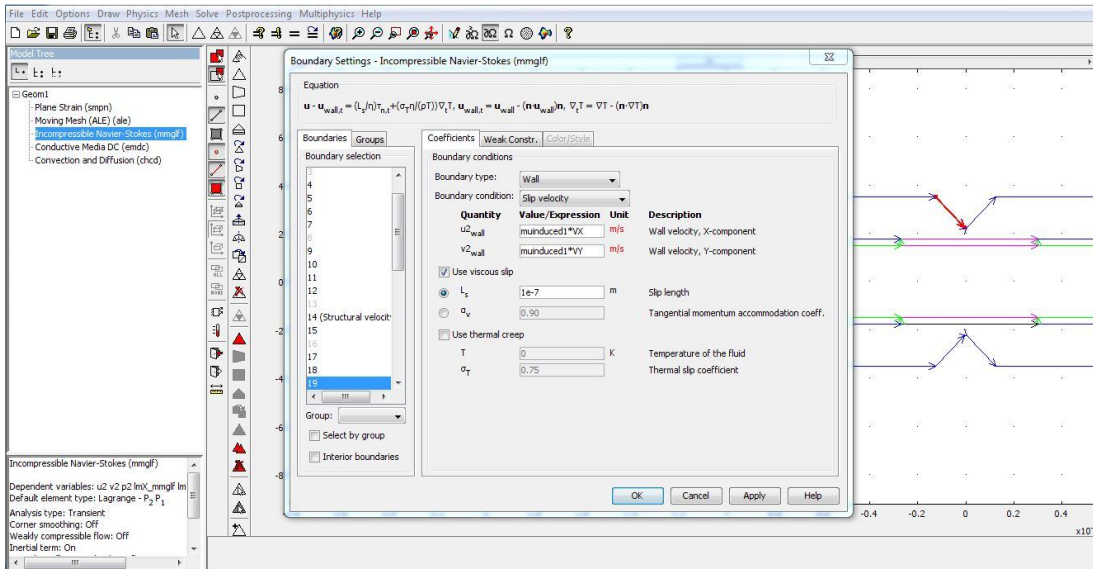
⁵² Fluid Domain

⁵³ Solid Domain

⁵⁴ Displacement Variable

سازه‌ای⁵⁵ می باشد که در این نواحی، تغییرات مش بر اساس جابجایی dX و dY انجام شده که دیمانسیون مکان دارد.

2-3 در قسمت ناویر استوکس تراکم ناپذیر، تمامی شرایط مرزی لغزشی از جمله سرعت الکترواستمیک بر روی دیواره‌های رسانا و سرعت لغزشی الکترواستمیک با بار القایی بر روی دیواره‌های رسانا اعمال می‌شود. در شکل پیوست 4 قسمت شرایط مرزی اعمالی بر روی دیواره‌ها از جمله بر روی دیواره‌ی موانع رسانا آورده شده است:



شکل پیوست 4 - قسمت ناویر استوکس تراکم ناپذیر

3-3 مدلسازی غلظت: به علت بررسی اختلاط در کانال میانی، میدان غلظت تنها در این کانال مد نظر و مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای مدلسازی میدان غلظت در نرم افزار مذکور می‌بایست از ماژول جابجایی و دیفیوژن⁵⁶ استفاده کنیم. معادله‌ی حاکم بر محیط محاسباتی معادله‌ی (30.3) می‌باشد که می‌توان پارامترهای آن را در نرم افزار تعیین کرد.

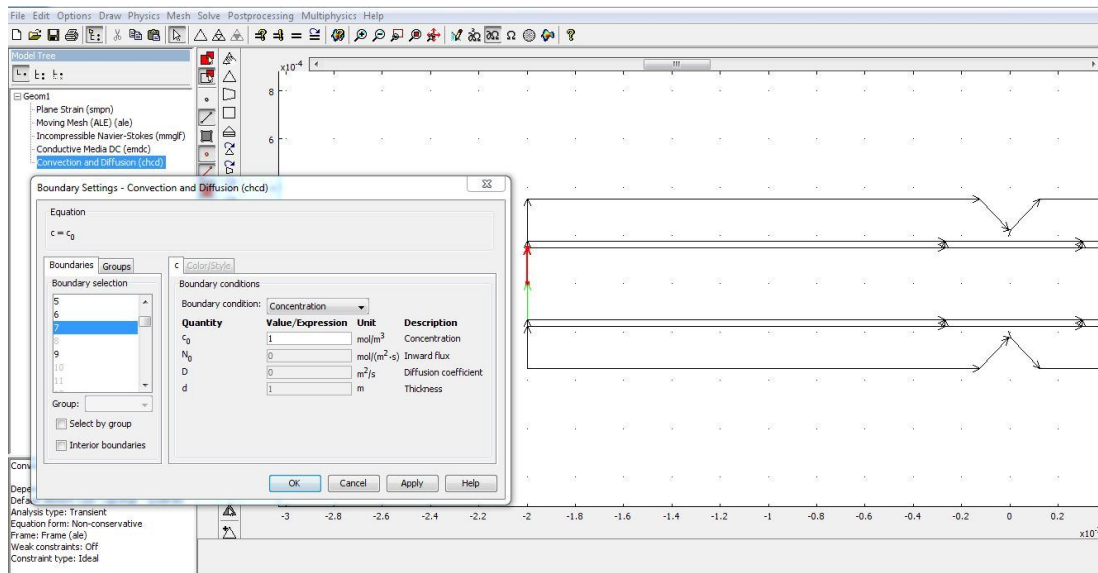
$$\delta_{is} \frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (-D \nabla C) = R - u \cdot \nabla C \quad (1.0)$$

⁵⁵ Structural Displacement

⁵⁶ Convection and Diffusion (chcd)

که در آن $\delta_{ts} = 0.1$ ضریب مقیاس زمانی⁵⁷، $D=10^{-10}$ [m²/s] ضریب دیفیوژن، $R=0$ ، C میدان غلظت و مقدار سرعت در جهت x,y از حل معادلات مومنتم جایگزین می‌شود. ضریب مقیاس زمانی طبق فواصل زمانی حل مساله تعیین می‌شود که در اینجا از صفر تا 45 ثانیه با بازه‌های 0.1 ثانیه حل انجام می‌پذیرد.

در شکل پیوست 5 تصویری از قسمت نایر استوکس تراکم ناپذیر نرم افزار مورد بحث آورده شده است:



شکل پیوست 5 - قسمت نایر استوکس تراکم ناپذیر

⁵⁷ Time-scaling coefficient

ب) روش حل مدل مورد بررسی در این پژوهش در نرم افزار

در این نرم افزار از روش‌های مختلفی برای حل مسائل مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مدل‌سازی از روش حل مش متحرک اویلر-لاگرانژ دلخواه⁵⁸ استفاده شده است. این تکنیک یک روش برای مسیریابی مش‌های متحرک میدان محاسباتی متغییر مهیا می‌کند. این روش توسط نگاشت مختصات گره‌های مش اولیه ثابت شده‌ی آن (X, Y) به مختصات فضایی تغییر شکل یافته (x, y) مطابق هندسه‌ی در حال حرکت سیستم سیال-ذره صورت می‌پذیرد.

توابع نگاشت بصورت زیر می‌باشد:

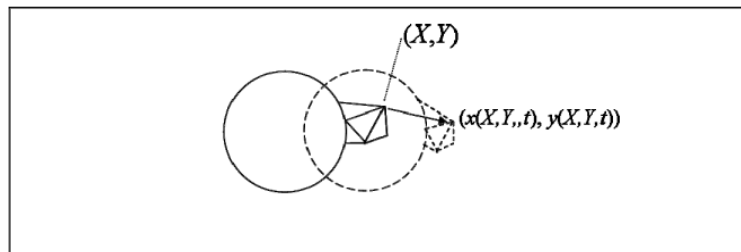
(1)

$$x = x(X, Y, t)$$

(2)

$$y = y(X, Y, t)$$

که در آن t متغیر زمان است. برای این مدل، فرض می‌کنیم که در ابتدا، در $t=0$ ، دو سیستم مختصات بر هم منطبق می‌باشند. بنابراین، همانطور که در شکل پیوست 6 نشان داده شده است نگاشت در نقطه‌ی گره در ابتدا که در (X, Y) قرار گرفته به نقطه‌ی متحرک (x, y) در زمان t حرکت می‌کند.



شکل پیوست 6- دیاگرام شماتیک از نگاشت مختصات در سیستم ذره - سیال

⁵⁸ Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) moving mesh technique

بنابراین مدل اصلی ICEP که بر مبنای مختصات متحرک (x,y) بنا شده است می تواند توسط تبدیل مختصات زیر به مدلی که بر مبنای مختصات ثابت (X,Y) بنا شده است تبدیل شود

$$dxdy = |J|dXdY \quad (3)$$

که در آن J ماتریس ژاکوبین تبدیل می باشد که بصورت زیر است:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial X} & \frac{\partial x}{\partial Y} \\ \frac{\partial y}{\partial X} & \frac{\partial y}{\partial Y} \end{pmatrix} \quad (4)$$

برای یک سیستم ذره-سیال، حرکت مش در درون سیال می تواند برای ارضای معادله ی لاپلاس برای تضمین تغییر هموار، فرض شود

$$\nabla^2 \psi_x = 0 \quad (5)$$

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

$$x = X + \int_0^t \psi_x dt \quad (7)$$

$$y = Y + \int_0^t \psi_y dt \quad (8)$$

که در آن $(\psi_x, \psi_y) = \vec{\psi}$ سرعت مش در مختصات تغییر یافته می باشد. شرایط مرزی برای حرکت مش داده شده است بنابراین در فصل مشترک ذره-سیال، سرعت مش با سرعت ذره برابر است.

نر افزار مذکور برای حل مدل دوبعدی ICEP بیان شده در بالا مورد استفاده قرار گرفته که با طرح مش متحرک جفت شده است. علاوه بر معادله ی میدان الکتریکی، میدان جریان و حرکت ذره، یک مدول که بر طبق معادله ی دیفرانسیل مشتق جزئی بنا شده است برای حل فرمول-اولر-لاگرانژ دلخواه، معادله های (5) الی (8) برای به روز رسانی مرز و مش مورد استفاده قرار می گیرد.

مراجع و مراجع

- [١] Whitesides GM (2006) "The origins and the future of microfluidics" *Nature* **442** : 368–373
- [٢] DeMello AJ (2006) "Control and detection of chemical reactions in microfluidic systems" *Nature* **442**: 394–402
- [٣] Chin CD, Linder V, Sia SK (2007) "Lab-on-a-chip devices for global health: past studies and future opportunities" *Lab Chip* **7**: 41–57
- [٤] Dittrich PS, Manz A (2006) "Lab-on-a-chip: microfluidics in drug discovery" *Nat Rev Drug Discov* **5**:210–218
- [٥] El-Ali J, Sorger PK, Jensen KF (2006) "Cells on chips" *Nature* **442**:403–411
- [٦] C. J. Easley, J. M. Karlinsey, J. M. Bienvenue, L. A. Legendre, M. G. Roper, S. H. Feldman, M. A. Hughes, E. L. Hewlett, T. J. Merkel, J. P. Ferrance and J. P. Landers (2006) "A fully integrated microfluidic genetic analysis system with sample-in-answer-out capability" *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. **103**, pp. 19272-19277
- [٧] A. Ould El Moctar, N. Aubry and J. Batton (2003) "Electro-hydrodynamic microfluidic mixer" *Lab on a Chip - Miniaturisation for Chemistry and Biology*, vol. **3**, pp. 273-280
- [٨] L. -. Lu, K. S. Ryu and C. Liu (2002) "A magnetic microstirrer and array for microfluidic mixing" *J Microelectromech Syst*, vol. **11**, pp. 462-469
- [٩] M. L. Chabinyc, D. T. Chiu, J. C. McDonald, A. D. Stroock, J. F. Christian, A. M. Karger and G. M. Whitesides(2001) "An integrated fluorescence detection system in poly(dimethylsiloxane) for microfluidic applications" *Anal. Chem.*, vol. **73**, pp. 4491-4498
- [١٠] E. A. S. Doherty, R. J. Meagher, M. N. Albarghouthi and A. E. Barron (2003) "Microchannel wall coatings for protein separations by capillary and chip electrophoresis" *Electrophoresis*, vol. **24**, pp. 34-54
- [١١] H. Jiang, Y. Daghighi, C. H. Chon and D. Li. (2010) "Concentrating molecules in a simple microchannel" *J. Colloid Interface Sci.*, vol. **347**, pp. 324-331
- [١٢] Y. Daghighi and D. Li. (2010) "Numerical studies of electrokinetic control of DNA concentration in a closed-end microchannel" *Electrophoresis*, vol. **31**, pp. 868-878

- [١٣] R.J. Hunter (1981) "Zeta Potential in Colloid Science: Principals and Applications" *Academic Press, New York, , pp. 364*
- [١٤] Z. Wu, Y. Gao and D. Li. (2009) "Electrophoretic motion of ideally polarizable particles in a microchannel" *Electrophoresis, vol. 30, pp. 773-781*
- [١٥] Z. Wu and D. Li. (2009) "Induced-charge electrophoretic motion of ideally polarizable particles" *Electrochim. Acta, vol. 54, pp. 3960-3967*
- [١٦] Z. Wu and D. Li. (2008) "Micromixing using induced-charge electrokinetic flow" *Electrochim. Acta, vol. 53, pp. 5827-5835*
- [١٧] Z. Wu and D. Li. (2008) "Mixing and flow regulating by induced-charge electrokinetic flow in a microchannel with a pair of conducting triangle hurdles" *Microfluidics and Nanofluidics, vol. 5, pp. 65-76*
- [١٨] D. Li. (2004) "Electrokinetics in Microfluidics" *Academic Press*
- [١٩] H. Helmholtz. (1879) "Studies on Eletrical boundary layers," *vol. 243, pp. 337-398*
- [٢٠] V. G. Levich (1962) "Physicochemical Hydrodynamics" Englewood Cliffs, N.J., *Prentice-Hall*
- [٢١] Z. Wu, D. Li. (2007) "Microfluidics and nanofluidics" *published online, doi:10.1007/s10404-007-0227-7*
- [٢٢] Lee J, Hu Y, Li D (2005) "Electrokinetic concentration gradient generation using a converging–diverging microchannel" *Anal Chim Acta 543:99–108*
- [٢٣] Y.daghighi, "Induced-Charge Electrokinetic Motion of a Heterogeneous Particle and Its Corresponding Applications". **2013**
- [٢٤] Laser DJ, Santiago JG (2004) "A review of micropumps" *J Micromech Microeng 14:R35-R64*

Abstract

Mixing is an important step in many sequential assays particularly in the field of biomedical and chemical. In micro channels the Reynolds number is much less than one ($Re \ll 1$). Therefore, the mixing process in micro-systems (in the absence of any agitating force) only relies on diffusion which usually needs a very long time to achieve good results, and in most cases it fails. Several methods have been developed to enhance mixing in micro-systems, some of which are based on complicated geometries, require special fabrication, or need mechanical parts to be added in to the system.

In this project we introduced a novel micro-mixer which works based on pressure driven flow and induced charge electrokinetics (ICEK). Two main streams enter the inlet of the main micro channel as a result of pressure gradient that is applied to the inlet and outlet of the main-channel. The goal of this system is well-mixing these two main fluids. The main-channel is surrounded by two side-channels (which are contentiously filled with electrolyte) and electric field is applied to the ends of these side-channels. Two conducting hurdles are embedded on the upper walls of these side-channels. At that area, on the interface wall of each side-channel and main channel, a flexible membrane is placed. These membranes can move towards the middle of main-channel to control the flow rate and boost mixing. Once the electric field is applied, induced vortices form around the conducting hurdles and apply repelling force to the membranes, and push it forward; thus, the cross section of the main-channel changes. Applying time-varying electric field to the system causes pulse motion in membrane displacement. We have shown that this motion enhances the mixing process and improves the homogeneity of the mixture at the outlet of the proposed micro-mixer.

We have investigated the effect of electric field, applied pressure, location and height of the hurdles, elasticity of the membrane on the efficiency of our mixer. Also, this micro-mixer has been tested for a case with several conducting hurdles and results show that increasing the number of conducting hurdles will improve the mixing results.

Keyword: Mixing - induced charge electrokinetics (ICEK) - electric field - hurdle



University of Shahrood

Faculty of Mechanical Engineering

**Fluid flow in a micro channel using
Nonlinear Electrokinetics**

Ahmad Hadadan

**Supervisor
Dr. Mohsen Nazari**

**Advisor
Dr. Yasaman Daghighi**

September 2015