

الله الرحمن الرحيم



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه حرارت و سیالات

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بررسی جریان الکتروکنتیک القایی پیرامون لینک رسانای تغییر شکل پذیر

شهریار عظیمی

استاد راهنما:

دکتر محسن نظری

بهمن ۱۳۹۴



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه حرارت و سیالات

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای شهریار عظیمی

تحت عنوان: بررسی جریان الکتروکنتیک القایی پیرامون لینک رسانای تغییر شکل پذیر

در تاریخ ۹۴/۱۱/۲۵ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد

مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید راهنما
	دکتر محسن نظری

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی : دکتر مصطفی کاهانی		نام و نام خانوادگی :د. محمود نوروزی
			نام و نام خانوادگی :د. علی جباری مقدم
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیم به آنان که به من آموختند و تقدیم به خانواده‌ام که با
شکیبایی و مهربانی در کنارم بودند...

سپاسگزاری

من متشکرم از کسی که در تمام طول زندگی و تحصیلم مواظبم بود و کمکم کرد، آنچه امروز دارم مدیون لطف او هستم. من می‌خواهم تشکر کنم از زحمات استادم آقای دکتر محسن نظری که به من اجازه دادند زیر نظر ایشان کار کنم، مباحثه‌های علمی ما همیشه برای من لذت‌بخش بود و در خاطر من باقی می‌ماند. من واقعاً خوشحالم از اینکه دوره ارشدم را زیر نظر راهنمایی‌ها و کمک‌های خانم دکتر یاسمن دقیقی گذراندم، من درس‌هایی فراتر از چهارچوب پایان‌نامه از ایشان یاد گرفتم که برای من خیلی باارزش هستند همچنین جا دارد تشکر کنم از ایشان برای اینکه اجازه دادند تا تصاویر آزمایشگاهی کارهایشان در این پایان‌نامه استفاده شود. این تحقیق هیچ‌گاه بدون فداکاری‌ها و زحمات پدر و مادرم به سرانجام نمی‌رسید و من متشکرم از خانواده‌ام که محیطی آرام را برای من فراهم کردند تا بتوانم دوره ارشد خود را به اتمام برسانم

تعهد نامه

اینجانب شهریار عظیمی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک، گرایش تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی جریان الکتروکنیتک القایی پیرامون لینک رسانی تغییر شکل پذیر تحت راهنمایی آقای دکتر محسن نظری و خانم دکتر یاسمن دقیقی متعهد می شوم

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده 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 است و مقالات مستخرج بانام « 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 بافت های آن ها) 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

این پایان نامه حرکت یک لینک رسانای تغییر شکل پذیر را که تحت تأثیر میدان الکتریکی ثابت DC قرار گرفته است به صورت عددی بررسی می کند و کاربردهایی را در حوزه میکروفلوئیدیک ارائه می کند که اساس عملکرد آن ها وابسته به حرکت لینک رسانای تغییر شکل پذیر است.

در این پایان نامه، حرکت دوبعدی و وابسته به زمان یک لینک رسانای تغییر شکل پذیر در سه وضعیت افقی، عمودی و مایل بررسی شده است. برای اولین بار برای توصیف نحوه حرکت لینک رسانا از مفهوم جدیدی به نام نقطه سکون استفاده شده. نقطه سکون مکانی روی سطح لینک رسانا است که زتا پتانسیل القایی آن صفر است بنابراین سرعت جریان سیال در این نقطه صفر می شود و به تبع آن فشار در این نقطه به حداکثر مقدار خود خواهد رسید. نتایج بررسی ها نشان می دهد که جهت حرکت لینک رسانا وابسته به موقعیت نقطه سکون روی سطح آن است. به عنوان مثال در این پژوهش نشان داده شده که یک لینک رسانا با زاویه منفرجه در خلاف جهت میدان الکتریکی اعمالی حرکت می کند چراکه در این شرایط نقطه سکون روی سطحی از لینک قرار دارد که پشت به میدان الکتریکی است. در این پژوهش اثر دیواره کانال بر لینک افقی مجاور آن بررسی شده و نتایج نشان می دهد که همواره دیواره کانال، لینک افقی مجاور خود را دفع می کند.

تقابل دو لینک رسانای عمودی یکی دیگر از مطالعاتی است که در این پژوهش انجام شده است و نتایج حاصل از آن نشان می دهد که اگر دو لینک رسانا روی یک دیواره کانال باشند دو گردابه با جهت چرخش مخالف یکدیگر بین دو لینک ایجاد می شود و این گردابه ها ناحیه کم فشار را بین دو لینک ایجاد می کنند که در نتیجه آن دو لینک یکدیگر را جذب می کنند. اما زمانی که هر یک از لینک ها روی یکی از دیواره های کانال باشند، دو گردابه با جهت چرخش یکسان بین دو لینک ایجاد می شود و این دو گردابه به یکدیگر می پیوندند و ناحیه ای با فشار بالا بین لینک ها ایجاد می شود که در نتیجه آن دو لینک یکدیگر را دفع می کنند.

این پایان نامه یک میکرومیکسر جدید را معرفی کرده است این میکرومیکسر شامل یک کانال مستقیم و یک لینک رسانای تغییر شکل پذیر است، یک انتهای لینک رسانا روی دیواره بالایی کانال ثابت شده است و انتهای دیگر آن آزادانه در داخل کانال جابجا می شود. با اعمال میدان الکتریکی DC متغیر بازمان، لینک حرکت رفت و برگشتی در داخل کانال انجام می دهد و مشابه یک همزن اختلاط میان دو

جریان سیال را بهبود می‌دهد. علاوه بر حرکت رفت و برگشتی لینک، گردابه‌های ناشی از جریان الکتروکنتیک القایی پیرامون لینک رسانا عامل دیگری می‌باشند که به بهبود اختلاط میکرومیکسر کمک می‌کند.

روش دیگری نیز برای بهبود اختلاط دو جریان سیال در این تحقیق ارائه شده است که در آن از چندین لینک رسانای تغییر شکل‌پذیر استفاده می‌شود ولی این بار، میدان الکتریکی ثابت به سیستم اعمال می‌شود. نتایج بررسی‌های نشان می‌دهد که زاویه قرارگیری لینک‌ها رسانا در داخل کانال تأثیر مهمی در بهبود اختلاط دو جریان سیال دارند چراکه زاویه قرارگیری لینک‌های رسانا روی اندازه گرادیان فشار مخالف به وجود آمده در سیستم تأثیر می‌گذارد. با مقایسه صورت گرفته روی اثر زاویه لینک‌ها مشخص شد که بازده اختلاط میکرومیکسر با لینک عمودی حداکثر است چراکه لینک عمودی بیشترین گرادیان فشار مخالف را نسبت به سایر لینک‌ها ایجاد می‌کند.

کاربرد دیگری که در این پایان‌نامه برای لینک‌های رسانا ارائه شده است میکروولو می‌باشد. میکروولو ارائه شده در این پایان‌نامه شامل یک کانال مستقیم است که دو لینک رسانای عمودی به صورت متقارن روی دیواره‌های آن قرار گرفته‌اند و میدان الکتریکی ثابت به سیستم اعمال می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که جهت جریان در داخل کانال را می‌توان با تنظیم میدان الکتریکی اعمالی تغییر داد. با کنترل جهت جریان می‌توان دبی‌های مختلف را در جهت‌های مختلف و حتی دبی صفر را برای حالت ولو به دست آورد. این میکروولو یک روش ساده را پیشنهاد می‌دهد که بدون تغییر جهت میدان الکتریکی اعمالی می‌توان جهت جریان سیال را در داخل کانال کنترل نمود.

واژگان کلیدی: الکتروکنتیک القایی، گردابه، مواد تغییر شکل‌پذیر، میکرومیکسر، میکروولو.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
سیاسگزاری.....	ج.....
چکیده.....	خ.....
فهرست جدول ها.....	ع.....
فهرست کلمات کوتاه شده.....	غ.....
فهرست علامت های به کاررفته.....	ف.....

متن اصلی پایان نامه

فصل ۱- مقدمه: تاریخچه از الکتروکنیتیک و کاربردهای مرتبط با آن.....	۱.....
۱-۱- کشف پدیده الکتروکنیتیک.....	۲.....
۲-۱- پیشینه الکتروکنیتیک غیرخطی.....	۳.....
۳-۱- پیشینه میکرومیکسرها.....	۵.....
۴-۱- پیشینه میکرو ولوها.....	۷.....
۵-۱- ساختار و فصل بندی پایان نامه:.....	۹.....
۶-۱- نوآوری و گام های ابتکاری.....	۱۱.....
فصل ۲- تئوری: مفاهیم الکتروکنیتیک کلاسیک و الکتروکنیتیک غیرخطی.....	۱۳.....
۱-۲- لایه الکتریکی دوگانه:.....	۱۴.....
۲-۲- الکترواسموتیک و الکتروفورتیک.....	۱۵.....
۳-۲- الکتروکنیتیک کلاسیک.....	۱۷.....
۴-۲- الکتروکنیتیک ناشی از بارهای القایی.....	۱۸.....
۴-۲-۱- چگونگی القاشده بار روی سطح جسم رسانا.....	۲۰.....
۴-۲-۲- ارائه اصول روش عددی برای محاسبه زتا پتانسیل القایی.....	۲۱.....
۵-۲- خلاصه و نتیجه گیری.....	۲۴.....
فصل ۳- روش حل: معادلات حاکم و شرایط مرزی.....	۲۵.....
۱-۳- توزیع پتانسیل الکتریکی.....	۲۸.....
۲-۳- توزیع سرعت سیال.....	۲۸.....
۳-۳- حرکت لینک.....	۳۰.....

۳۱	۴-۳- توزیع غلظت.....
۳۱	۵-۳- خلاصه.....
۳۳	فصل ۴- الکتروکنیتیک غیرخطی: حرکت لینک رسانای تغییر شکل پذیر.....
۳۵	۱-۴- هندسه تعریف شده و پارامترهای حاکم بر ناحیه محاسباتی.....
۳۷	۲-۴- اعتبار سنجی نتایج.....
۳۸	۳-۴- مطالعه استقلال نتایج از شبکه بندی ناحیه حل.....
۴۰	۴-۴- بررسی حرکت یک لینک عمودی.....
۴۰	۱-۴-۴- توزیع زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک رسانای عمودی.....
۴۲	۲-۴-۴- تأثیر مدول یانگ بر میزان جابجایی لینک رسانا و نارسانای عمودی.....
۴۳	۳-۴-۴- تأثیر میدان الکتریکی بر میزان جابجایی لینک رسانا و نارسانا.....
۴۴	۴-۴-۴- تأثیر طول لینک بر میزان جابجایی لینک رسانا و نارسانای عمودی.....
۴۵	۵-۴- بررسی حرکت یک لینک رسانای افقی.....
۴۸	۱-۵-۴- تأثیر فاصله لینک افقی از دیواره پایینی کانال بر میزان نیروی وارد بر آن.....
۴۹	۶-۴- نحوه حرکت لینک رسانای مایل.....
۵۱	۷-۴- تقابل دو لینک عمودی.....
۵۵	۸-۴- خلاصه و نتیجه گیری.....
۵۷	فصل ۵- کاربرد (۱): میکرومیکسر تک لینک با میدان الکتریکی متغیر با زمان.....
۵۹	۱-۵- هندسه مدل و مشخصات فیزیکی به کاررفته در مدل سازی.....
۶۰	۲-۵- ارائه نتایج و بحث پیرامون آن.....
۶۰	۳-۵- مقایسه چهار میکرومیکسر مختلف.....
۶۳	۴-۵- تأثیر میدان الکتریکی خارجی.....
۶۵	۵-۵- اثر میدان الکتریکی متغیر با زمان بر بازده اختلاط میکرومیکسر.....
۶۵	۱-۵-۵- تأثیر دامنه میدان الکتریکی متغیر با زمان بر بازده اختلاط.....
۶۶	۲-۵-۵- تأثیر میانگین میدان الکتریکی متغیر با زمان بر بازده اختلاط.....
۶۸	۶-۵- تأثیر طول لینک.....
۶۹	۷-۵- تأثیر موقعیت لینک رسانا.....
۷۰	۸-۵- خلاصه و نتیجه گیری.....
۷۱	فصل ۶- کاربرد (۲): میکرومیکسر چند لینکی با میدان الکتریکی ثابت.....
۷۳	۱-۶- میکرومیکسر تک لینک با میدان الکتریکی ثابت.....

۷۳.....	۱-۱-۶- هندسه میکرومیکسر تک لینک.....
۷۵.....	۲-۱-۶- تأثیر زاویه لینک بر بازده اختلاط میکرومیکسر تک لینک.....
۷۹.....	۲-۶- میکرومیکسر با سه لینک و میدان الکتریکی اعمالی ثابت.....
۷۹.....	۱-۲-۶- هندسه میکرومیکسر با سه لینک.....
۸۰.....	۲-۲-۶- تأثیر زاویه لینک بر بازده اختلاط میکرومیکسر سه لینکی.....
۸۳.....	۳-۲-۶- تأثیر طول لینک بر بازده اختلاط میکرومیکسر با سه لینک.....
۸۴.....	۴-۲-۶- تأثیر میدان الکتریکی بر بازده اختلاط میکرومیکسر با سه لینک.....
۸۵.....	۳-۶- اعتبارسنجی نتایج میکرومیکسر با میدان الکتریکی ثابت.....
۸۶.....	۴-۶- خلاصه و نتیجه‌گیری.....
۸۷.....	فصل ۷- کاربرد (۳): ارائه یک میکروولو با استفاده از لینک‌های رسانای متقارن.....
۸۹.....	۱-۷- هندسه و خصوصیات فیزیکی بکار رفته در مدل‌سازی.....
۹۰.....	۲-۷- چگونگی تغییر جهت جریان توسط لینک‌های رسانا.....
۹۴.....	۳-۷- تأثیر فاصله بین دو لینک بر دبی عبوری از خروجی کانال.....
۹۵.....	۴-۷- تأثیر مدول یانگ لینک‌های رسانا بر دبی عبوری از خروجی کانال.....
۹۶.....	۵-۷- تأثیر مدول یانگ لینک‌های رسانا بر میدان الکتریکی بحرانی.....
۹۷.....	۶-۷- تأثیر فاصله بین دو لینک رسانا بر میدان الکتریکی بحرانی.....
۹۸.....	۷-۷- تأثیر طول کانال بر میدان الکتریکی بحرانی.....
۹۹.....	۸-۷- محدودیت اندازه میدان الکتریکی اعمالی.....
۱۰۰.....	۹-۷- خلاصه و نتیجه‌گیری.....
۱۰۱.....	فصل ۸- جمع‌بندی: ارائه نتایج.....
۱۰۲.....	۱-۸- ارائه نتایج.....
۱۰۵.....	پیوست الف: روش حل عددی.....
۱۰۶.....	الف-۱- روش اویلری-لاگرانژی.....
۱۰۹.....	فهرست منابع.....

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۲. طرح ساده‌ای از لایه الکتریکی دوگانه به همراه لایه برش و موقعیت محاسبه زتا پتانسیل را نشان می‌دهد.....	۱۵
شکل ۲-۲. طرح ساده‌ای از جریان الکتروکنیتیک کلاسیک پیرامون یک لینک نارسانا را نشان می‌دهد. (الف) توزیع یون داخل میکروکانال با لینک نارسانا (ب) توزیع یون و سرعت جریان الکترواسموتیک و الکتروفورتیک روی یک لینک نارسانا.....	۱۶
شکل ۳-۲. توزیع بار القاشده و جریان الکتروکنیتیک القایی پیرامون یک‌ذره رسانا را در حالت پایدار نشان می‌دهد.....	۱۸
شکل ۴-۲. جریان الکتروکنیتیک القایی پیرامون یک‌ذره رسانا را نشان می‌دهد. برای به تصویر کشیدن گردابه‌ها از ذرات فلورسنت با قطر $1.9 \mu m$ استفاده شده است. میدان الکتریکی با اندازه $E = 40 V/cm$ از چپ به راست به سیستم اعمال می‌شود. خط‌چین نشان داده شده مرز ذره رسانا را نشان می‌دهد. (منبع: دقیقی و همکاران [۲۶]).....	۱۹
شکل ۵-۲. تغییر الگوی گردابه‌ها را با توجه به میدان الکتریکی اعمالی به سیستم نشان می‌دهد. خط‌چین نشان داده شده در شکل مرز ذره رسانا را نشان می‌دهد. (منبع: دقیقی و همکاران [۲۶]).....	۱۹
شکل ۶-۲. فرآیند باردارشدن یک‌ذره رسانا را در حضور میدان الکتریکی یکنواخت نشان می‌دهد. (الف) خطوط میدان الکتریکی اولیه را نشان می‌دهد که از یک‌ذره رسانا می‌گذرد. (ب) بارهای القاشده روی سطح رسانا، یون‌های با بار مخالف خود را از داخل محلول الکترولیت جذب می‌کنند. (ج) میدان الکتریکی حالت پایدار و لایه الکتریکی دوگانه را پیرامون یک‌ذره رسانا با شکل دلخواه نشان می‌دهد.....	۲۰
شکل ۷-۲. (الف) خطوط میدان الکتریکی و (ب) خطوط جریان الکتروکنیتیک القایی پیرامون یک‌ذره رسانا با هندسه دلخواه در حالت پایدار نشان می‌دهد.....	۲۱
شکل ۸-۲. طرح ساده‌ای از توزیع زتا پتانسیل القایی و سرعت لغزشی متناظر با آن را روی سطح یک لینک رسانا نشان می‌دهد. (الف) توزیع یون داخل میکروکانال با لینک رسانا (ب) توزیع بار القاشده روی سطح لینک رسانا و سرعت لغزشی متناظر با این توزیع بار است.....	۲۱
شکل ۱-۳. طرح ساده‌ای از میکروکانال را به همراه لینک رسانای تغییر شکلی‌پذیر، نشان می‌دهد.....	۲۷
شکل ۱-۴. هندسه کانال به همراه لینک جای گرفته روی دیواره بالایی کانال به تصویر کشیده شده است.....	۳۵
شکل ۲-۴. سه وضعیت قرارگیری لینک را نشان می‌دهد. در هر یک از این سه وضعیت پارامترهایی برای تعیین ابعاد و اندازه لینک استفاده شده. این پارامترها (الف) برای لینک عمودی X, h ، (ب) برای لینک افقی X, Y, h و (ج) برای لینک مایل X, α, h است.....	۳۵
شکل ۳-۴. نمودارهای به دست آمده از مدل سازی جریان الکتروکنیتیک غیرخطی را در کنار نمودارهای پژوهش واو و لی [۲۳] نشان می‌دهد. در پژوهش یادشده جریان الکتروکنیتیک غیرخطی پیرامون مانع‌های مثلثی متقارن و نامتقارن بررسی شده است. (الف) قدرت میدان الکتریکی و (ب) توزیع زتا پتانسیل القایی روی سطح مانع مثلثی متقارن و نامتقارن را نشان می‌دهد.....	۳۷

شکل ۴-۴. (الف) شبکه‌بندی انجام‌شده در سراسر ناحیه محاسباتی را نشان می‌دهد. (ب)، (ج) و (د) به ترتیب نمای نزدیکی از شبکه‌بندی انجام‌شده در خروجی، فصل مشترک جامد و سیال و در ورودی کانال را نشان می‌دهد. ۳۸.....

شکل ۴-۵. شبکه‌بندی انجام‌شده در فصل مشترک جامد و سیال را به ازای تعداد المان مختلف نشان می‌دهد. تعداد المانهای به‌کاررفته در سراسر ناحیه حل به ازای حالت‌های الف، ب و ج به ترتیب برابر است با ۱۳۷۰، ۳۱۶۲، ۴۹۱۸، ۳۹۰۰۰.....

شکل ۴-۶. تغییرات جابجایی نقطه P1 برحسب تعداد المان‌های به‌کاررفته در ناحیه حل را نشان می‌دهد. ۳۹.....

شکل ۴-۷. توزیع زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک عمودی به همراه نمایی از لینک (الف) در لحظه اولیه و (ب) در زمان پایدار سیستم $\bar{tsteady}$ نشان داده‌شده. در نمودار زتا پتانسیل القایی دایره پرشده بیانگر نقطه سکون می‌باشد و دایره توخالی زتا پتانسیل نقطه P1 را نشان می‌دهد. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل‌سازی عبارت‌اند از $\bar{h} = 0.5, \bar{X} = 10, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30$ ۴۱

شکل ۴-۸. توزیع فشار پیرامون لینک رسانای عمودی (الف) در لحظه اولیه و (ب) در زمان پایدار سیستم $\bar{tsteady}$ نشان می‌دهد. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل‌سازی عبارت‌اند از $\bar{h} = 0.5, \bar{X} = 10, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30$ ۴۱

شکل ۴-۹. میزان جابجایی افقی نقطه P1 از لینک رسانا و نارسانای عمودی برحسب مدول یانگ لینک در زمان پایدار سیستم $\bar{tsteady}$ را نشان می‌دهد. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل‌سازی عبارت‌اند از $\bar{h} = 0.5, \bar{X} = 10, \bar{E} = 15$ ۴۲

شکل ۴-۱۰. میزان جابجایی افقی نقطه P1 از لینک رسانا و نارسانای عمودی برحسب میدان الکتریکی اعمالی در زمان پایدار سیستم $\bar{tsteady}$ نشان می‌دهد. مشخصات لینک در این مدل‌سازی عبارت‌اند از $\bar{h} = 0.5, \bar{X} = 10, \bar{M} = 1$ ۴۳

شکل ۴-۱۱. اثر طول لینک بر میزان جابجایی لینک رسانا و نارسانا نشان داده‌شده. در موارد (الف)، (ب) و (ج) به ترتیب طول لینک برابر 38، 48 و 58 می‌باشد. وضعیت لینک رسانا و نارسانا در زمان پایدار سیستم $\bar{tsteady}$ رسم شده است. خطوط قرمز رنگ در این شکل‌ها بیانگر خطوط جریان می‌باشند و بردار آبی رنگ، جهت حرکت سیال در داخل کانال را نشان می‌دهد. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل‌سازی عبارت‌اند از $\bar{h} = 0.5, \bar{X} = 10, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30$ ۴۴

شکل ۴-۱۲. نحوه حرکت لینک افقی در سه حالت A، B و C نشان داده‌شده، در این سه حالت فاصله لینک افقی از دیواره پایینی کانال به ترتیب 0.25، 0.5 و 0.75 می‌باشد. خطوط قرمز نشان داده‌شده در شکل، بیانگر خطوط جریان سیال می‌باشند و بردارهای آبی رنگ بیانگر جهت حرکت سیال است. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل‌سازی عبارت‌اند از $\bar{h} = 0.5, \bar{X} = 10, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30$ ۴۶

شکل ۴-۱۳. توزیع زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک افقی در زمان پایدار سیستم $\bar{tsteady}$ برای سه حالت A، B و C نشان داده‌شده، در این سه حالت فاصله لینک افقی از دیواره پایینی کانال به ترتیب 0.25، 0.5 و 0.75 می‌باشد. در طرح لینک موقعیت نقطه حداکثر فشار به همراه نقطه P2 در لحظه اولیه و پس از تغییر شکل لینک نشان داده‌شده. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل‌سازی عبارت‌اند از $\bar{h} = 0.5, \bar{X} = 10, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30$ ۴۷

شکل ۴-۱۴. نیروی عمودی وارد بر لینک افقی برحسب فاصله لینک از دیواره پایینی کانال Y در زمان پایدار سیستم $\bar{tsteady}$ نشان می‌دهد. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل‌سازی عبارت‌اند از $\bar{h} = 0.5, \bar{X} = 10, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30$ ۴۸

شکل ۴-۱۵. نحوه حرکت لینک رسانای مایل در دو حالت D و E در زمان پایدار سیستم $\bar{t}_{steady}$ را نشان می‌دهد. در دو حالت D و E زاویه قرارگیری لینک نسبت به دیواره بالایی به ترتیب 1.5 و $\bar{\alpha} = 4.5$ می‌باشد. خطوط قرمز نشان داده‌شده بیانگر خطوط جریان سیال می‌باشد و بردارهای آبی جهت حرکت سیال را نشان می‌دهند. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل‌سازی عبارت‌اند از $\bar{h} = 0.5, \bar{X} = 10, \bar{M} = 2, \bar{E} = 30$ ۴۹

شکل ۴-۱۶. توزیع زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک مایل را در زمان $\bar{t}_{steady}$ برای دو حالت D و E نشان داده‌شده. در حالت D و E زاویه لینک مایل با دیواره بالایی کانال به ترتیب 1.5 و $\bar{\alpha} = 4.5$ می‌باشد. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل‌سازی عبارت‌اند از $\bar{h} = 0.5, \bar{X} = 10, \bar{M} = 2, \bar{E} = 30$ ۵۰

شکل ۴-۱۷. توزیع فشار پیرامون لینک رسانای مایل برای دو حالت D و E در زمان پایدار سیستم $\bar{t}_{steady}$ نشان داده‌شده. زاویه قرارگیری لینک مایل نسبت به دیواره کانال در دو حالت D و E به ترتیب 1.5 و $\bar{\alpha} = 4.5$ است. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل‌سازی عبارت‌اند از $\bar{h} = 0.5, \bar{X} = 10, \bar{M} = 2, \bar{E} = 30$ ۵۰

شکل ۴-۱۸. تقابل دو لینک عمودی، زمانی که فاصله بین آن‌ها کاهش می‌یابد را نشان می‌دهد. خطوط رسم شده در شکل بیانگر خطوط جریان در داخل میکرو کانال می‌باشد. فاصله اولیه بین لینک‌ها (d) در حالت‌های (الف)، (ب) و (ج) به ترتیب 1.5، 1 و 0.75 می‌باشد. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی عبارت‌اند از: $\bar{h} = 0.5, \bar{X} = 10, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30$ ۵۱

شکل ۴-۱۹. تأثیر فاصله بین دو لینک بر نیروی خالص افقی وارد بر لینک‌ها را نشان می‌دهد. این نمودار برای مطالعه اول که هر دو لینک روی دیواره بالایی کانال قرار دارند استخراج شده است. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل‌سازی عبارت‌اند از $\bar{h} = 0.5, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30$ ۵۲

شکل ۴-۲۰. تأثیر فاصله بین دو لینک بر نیروی خالص افقی وارد بر لینک‌ها را نشان می‌دهد. این نمودار برای مطالعه دوم که هر یک از لینک‌ها روی یکی از دیواره‌های کانال قرار دارند استخراج شده است. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل‌سازی عبارت‌اند از $\bar{h} = 0.5, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30$ ۵۳

شکل ۴-۲۱. طرح ساده‌ای از نحوه تقابل دو لینک عمودی در (الف) مطالعه اول و (ب) مطالعه دوم را نشان می‌دهد. در مطالعه اول ناحیه کمفشار بین لینک‌ها ایجاد می‌شود چراکه جهت چرخش گردابه‌های بین لینک‌ها مخالف یکدیگر است. اما در مطالعه دوم جهت چرخش گردابه‌های بین لینک‌ها یکسان است و آن‌ها به یکدیگر می‌پیوندند و گردابه بزرگ‌تر را ایجاد می‌کنند که مانع از عبور جریان سیال می‌شود و در نتیجه آن فشار بین دو لینک افزایش می‌یابد. ۵۴

شکل ۵-۱. طرح ساده‌ای از کانال را به همراه لینک رسانای تغییر شکل‌پذیر در وسط آن نشان می‌دهد. ۵۹

شکل ۵-۲. الگوی جریان سیال و توزیع غلظت در چهار میکرومیکسر مختلف نشان داده‌شده است. خطوط رسم شده در شکل بیانگر خطوط جریان سیال می‌باشند و طیف رنگی رسم شده نیز توزیع غلظت بی‌بعد را نشان می‌دهد. (الف) حالت A: میکرومیکسر بدون لینک است و میدان الکتریکی ثابت به سیستم اعمال می‌شود. (ب) حالت B: میکرومیکسر با لینک نارسانای تغییر شکل‌پذیر است که میدان الکتریکی ثابت به این سیستم اعمال می‌شود. (ج) حالت C: میکرومیکسر با لینک رسانای تغییر شکل‌پذیر و میدان الکتریکی ثابت به سیستم اعمال می‌شود. (د) حالت D: میدان الکتریکی متغیر با زمان به میکرومیکسری با لینک رسانای تغییر شکل‌پذیر اعمال می‌شود. فلش سیاه‌رنگ، جهت حرکت لینک را در داخل کانال نشان می‌دهد. ۶۱

شکل ۵-۳. مقایسه توزیع غلظت در خروجی کانال چهار میکرومیکسر مختلف در زمان $\bar{t} = 11.2 \times 10 - 3$ نشان می‌دهد. حالت (A) بیانگر میکرومیکسر بدون لینک است و میدان الکتریکی ثابت به این سیستم اعمال می‌شود. حالت (B) مربوط به میکرومیکسر با لینک نارسانا است و حالت (C) نیز معرف میکسر با لینک رسانا است، در دو حالت B و C میدان

الکتریکی ثابت به سیستم اعمال می‌شود. اما در حالت (D) میدان الکتریکی متغیر با زمان به میکرومیکسری با لینک رسانا اعمال می‌شود. میدان الکتریکی ثابت اعمال شده در حالت‌های A تا C، $\bar{E} = 25$ است، همچنین میدان الکتریکی متغیر با زمان در حالت (D) دارای مقدار میانگین $\overline{Eave} = 25$ و فرکانس آن $\bar{f} = 156.25$ است. مدول یانگ برای لینک تغییر شکل‌پذیر در تمام حالت‌ها $\bar{M} = 2$ انتخاب شده است. ۶۳

شکل ۴-۵. توزیع غلظت و جابجایی لینک در (الف) حالت A، (ب) حالت B و (ج) حالت C به ازای دو میدان الکتریکی $\bar{E} = 45$ و $\bar{E} = 25$ نشان می‌دهد. خط چین نشان داده شده در تمام حالت‌ها، بیانگر خط تقارن عمودی کانال است. طیف رنگی رسم شده توزیع غلظت بی‌بعد را نشان می‌دهد. لینک استفاده شده در حالت‌های B و C در وسط کانال قرار گرفته و طول و مدول یانگ آن به ترتیب برابر است با $\bar{h} = 0.5$ و $\bar{M} = 2$. ۶۴

شکل ۵-۵. سه میدان الکتریکی متغیر با زمان را نشان می‌دهد که به میکرومیکسری با لینک رسانای تغییر شکل‌پذیر (حالت D) اعمال می‌شوند. این توابع موجها مربعی هستند با مقدار میانگین $\overline{Eave} = 25$ و دامنه (الف) $\Delta E = 40$ ، (ب) $\Delta E = 30$ و (ج) $\Delta E = 20$ می‌باشند. ۶۵

مطابق شکل ۵-۶، سه میدان الکتریکی که دارای دامنه یکسان $\Delta E = 20$ می‌باشند و تنها مقدار میانگین آن‌ها متفاوت است به سیستم اعمال می‌شوند تا اثر میانگین میدان الکتریکی بر بازده اختلاط مشخص شود. ۶۶

شکل ۵-۷. سه تابع موج مربعی را نشان می‌دهد که برای بررسی اثر میانگین میدان الکتریکی به میکرومیکسر اعمال شده‌اند. این توابع دارای دامنه $\Delta E = 20$ می‌باشند و تنها مقدار میانگین آن‌ها متفاوت است. مقدار میانگین میدان الکتریکی (الف) $\overline{Eave} = 15$ ، (ب) $\overline{Eave} = 30$ و (ج) $\overline{Eave} = 45$ می‌باشد. ۶۶

شکل ۵-۸. تأثیر میدان الکتریکی بر بازده اختلاط میانگین چهار میکرومیکسر مختلف را نشان می‌دهد. حالت (A) مربوط به میکرومیکسر بدون لینک می‌باشد که میدان الکتریکی ثابت به آن اعمال می‌شود. حالت (B) مربوط به میکرومیکسر با لینک نارسانا است، حالت (C) بیانگر میکرومیکسر با لینک رسانا می‌باشد، میدان الکتریکی اعمالی در سه حالت A، B و C ثابت است. در حالت (D) میدان الکتریکی متغیر با زمان با تابع‌هایی که در شکل ۵-۷. ۶۷

شکل ۵-۹. بازده اختلاط میانگین را برحسب تابعی از طول لینک نشان می‌دهد. حالت (A) مربوط به میکسر بدون لینک می‌باشد. حالت (B) بیانگر میکسر با لینک نارسانا است و حالت (C) معرف میکرومیکسر با لینک رسانا است. در حالت‌های A تا C میدان الکتریکی ثابت به اندازه $\bar{E} = 25$ به سیستم اعمال می‌شود. در حالت (D) میدان الکتریکی متغیر با زمان با تابع I (مطابق شکل ۵-۵) به میکرومیکسر همراه با لینک رسانا اعمال می‌شود. مشخصات لینک در تمام این حالت‌ها عبارت‌اند از: $\bar{h} = 0.5$, $\bar{X} = 10$, $\bar{M} = 2$. ۶۸

شکل ۵-۱۰. اثر موقعیت لینک در داخل کانال بر بازده اختلاط میانگین نشان می‌دهد. برای حالت‌های B و C میدان الکتریکی ثابت به اندازه $\bar{E} = 25$ به سیستم اعمال می‌شود. در حالت (D) میدان الکتریکی متغیر با زمان با تابع I (مطابق شکل ۵-۵) به میکرومیکسر با لینک رسانا اعمال می‌شود. مشخصات لینک در تمام این حالت‌ها عبارت‌اند از: $\bar{h} = 0.5$, $\bar{X} = 10$, $\bar{M} = 2$. ۶۹

شکل ۶-۱. هندسه میکرومیکسر را نشان می‌دهد. در این میکرومیکسر برای بهبود اختلاط از لینک رسانای تغییر شکل‌پذیر استفاده شده است و میدان الکتریکی ثابت به سیستم اعمال می‌شود. ۷۳

شکل ۶-۲. سه الگوی قرارگیری لینک رسانا را نشان می‌دهد. در حالت‌های (الف)، (ب) و (ج) زاویه قرارگیری لینک نسبت به دیواره بالایی کانال به ترتیب ۲، ۳ و $\bar{\alpha} = 4$ است و میدان الکتریکی ثابت $\bar{E}$ از چپ به راست به سیستم اعمال می‌شود. ۷۳

شکل ۳-۶. توزیع غلظت و خطوط جریان سیال را پیرامون یک لینک رسانای تغییر شکل پذیر نشان می دهد. در حالت های الف، ب و ج زاویه لینک رسانا نسبت به دیواره کانال به ترتیب 2، 3 و $\bar{\alpha} = 4$ است. طیف رنگی رسم شده توزیع غلظت بی بعد را نشان می دهد. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل سازی عبارت اند از $\bar{h} = 0.5, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30$ ۷۵

شکل ۴-۶. پروفیل توزیع غلظت در خروجی کانال میکرومیکسر بدون لینک، میکرومیکسر با لینک نارسانا و میکرومیکسر با لینک رسانا را نشان می دهد. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل سازی عبارت اند از $\bar{h} = 0.5, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30$ ۷۶

شکل ۵-۶. نمودار سرعت لغزشی روی سطح لینک رسانا با زاویه (الف) $\bar{\alpha} = 3$ ، (ب) $\bar{\alpha} = 2$ را نشان می دهد. همچنین طرحی از سرعت لغزشی روی سطح لینک رسانا در هر دو زاویه رسم شده است. بردارهای روی سطح لینک بیانگر سرعت لغزشی ناشی از زتا پتانسیل القایی می باشند. پیکان توخالی نشان دهنده گرادیان فشار مخالف در داخل کانال است. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل سازی عبارت است از $\bar{h} = 0.5, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30$ ۷۷

شکل ۶-۶. پروفیل توزیع سرعت محوری روی خروجی کانال، برای میکرومیکسر تک لینک را نشان می دهد. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل سازی عبارت است از $\bar{h} = 0.5, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30$ ۷۸

شکل ۷-۶. چیدمان و نحوه قرارگیری لینک ها را در میکرومیکسر سه لینکی نشان می دهد. زاویه قرارگیری لینک ها در حالت (الف)، (ب) و (ج) به ترتیب 2، 3 و $\bar{\alpha} = 4$ است. میدان الکتریکی اعمالی به سیستم مقداری ثابت و از چپ به راست است. ۷۹

شکل ۸-۶. توزیع غلظت و خطوط جریان سیال را پیرامون سه لینک رسانای تغییر شکل پذیر نشان می دهد. در حالت های الف، ب و ج زاویه لینک های رسانا نسبت به دیواره کانال به ترتیب 2، 3 و $\bar{\alpha} = 4$ است. طیف رنگی رسم شده توزیع غلظت بی بعد را نشان می دهد. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل سازی عبارت اند از $\bar{h} = 0.5, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30$ ۸۰

شکل ۹-۶. پروفیل توزیع غلظت در خروجی کانال میکرومیکسر بدون لینک، میکرومیکسر با سه لینک نارسانا و سه لینک رسانا را نشان می دهد. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل سازی عبارت اند از $\bar{h} = 0.5, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30$ ۸۱

شکل ۱۰-۶. پروفیل توزیع سرعت محوری روی خروجی کانال، برای میکرومیکسر با سه لینک رسانا را نشان می دهد. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل سازی عبارت است از $\bar{h} = 0.5, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30$ ۸۲

شکل ۱۱-۶. تأثیر طول لینک رسانا و نارسانا را بر بازده اختلاط میکرومیکسر با سه لینک نشان می دهد. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل سازی عبارت است از $\bar{M} = 1, \bar{E} = 30$ ۸۳

شکل ۱۲-۶. اثر میدان الکتریکی بر بازده اختلاط میکرومیکسر بدون لینک، میکرومیکسر با سه لینک نارسانا و سه لینک رسانا را نشان می دهد. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل سازی عبارت است از $\bar{h} = 0.5, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30$ ۸۴

شکل ۱۳-۶. (الف) پروفیل توزیع سرعت در خروجی کانال میکرومیکسر با مانع های مستطیلی، دایره ای و مثلثی را نشان می دهد. (ب) طرح ساده ای از اندازه گرادیان فشار مخالف را پیرامون مانع های رسانای صلب نشان می دهد. ۸۵

شکل ۷-۱. طرح ساده‌ای از هندسه میکروولو را نشان می‌دهد. در این میکروولو از دو لینک رسانای متقارن استفاده شده که فاصله بین آن‌ها با پارامتر GAP مشخص شده است. ۸۹.....

شکل ۷-۲. طرح ساده‌ای از نحوه عملکرد میکروولو در این تصویر نشان داده شده است. میدان الکتریکی اعمالی در این میکروولو از چپ به راست است، و میدان الکتریکی اعمالی در حالت (الف)، (ب) و (ج) به ترتیب کمتر، مساوی و بیشتر از میدان الکتریکی بحرانی $\bar{E}_{cr}$ است. در حالت (ب) که میدان الکتریکی بحرانی اعمال می‌شود، سیستم مشابه ولو عمل می‌کند و جریان بالادست اجازه نمی‌یابد تا از بین دو لینک عبور کند. ۹۱.....

شکل ۷-۳. سرعت لغزشی روی سطح لینک رسانا را در زمان پایداری سیستم به ازای میدانهای الکتریکی $\bar{E} = 30, 45, 60$ نشان می‌دهد. مشخصات لینک در این مدل‌سازی عبارت‌اند از $\bar{X} = 10, \bar{M} = 9, \bar{GAP} = 0.16$. ۹۲.....

شکل ۷-۴. خطوط جریان سیال را پیرامون دو لینک رسانا متقارن نشان می‌دهد. در میدان‌های الکتریکی $\bar{E} = 15, 30$ جریان در جهت میدان الکتریکی در داخل کانال ایجاد می‌شود. تحت میدان الکتریکی بحرانی $\bar{E}_{cr} = 45$ جریان ورودی به داخل کانال راهی به سمت خروجی نمی‌یابد و در میدان الکتریکی $\bar{E} = 75$ جریانی بازگشتی در خلاف جهت میدان الکتریکی اعمالی در داخل کانال به وجود می‌آید. مشخصات لینک در این مدل‌سازی عبارت‌اند از $\bar{M} = 9, \bar{X} = 10, \bar{GAP} = 0.16$. ۹۳.....

شکل ۷-۵. نمودار دبی عبوری از خروجی کانال را برحسب میدان الکتریکی اعمالی نشان می‌دهد. این نمودار به ازای فواصل مختلف بین دو لینک رسم شده است. در هر یک از این نمودارها نقطه‌ای را می‌توان یافت که به ازای آن دبی خروجی از کانال صفر می‌شود میدان الکتریکی متناظر با این نقطه بانام میدان الکتریکی بحرانی نام‌گذاری می‌شود. مشخصات لینک در این مدل‌سازی عبارت‌اند از $\bar{M} = 10, \bar{X} = 10$. ۹۴.....

شکل ۷-۶. نمودار دبی عبوری از خروجی کانال برحسب میدان الکتریکی اعمالی به ازای مدول‌های یانگ $\bar{M} = 7, 9, 11$ رسم شده است. مشخصات لینک‌ها در این مدل‌سازی عبارت است از: $\bar{X} = 10, \bar{GAP} = 0.2$. ۹۵.....

شکل ۷-۷. میدان الکتریکی بحرانی برحسب مدول یانگ لینک را نشان می‌دهد، این نمودار به ازای فواصل مختلف بین دو لینک رسانا رسم شده است. مشخصات لینک‌ها در این مدل‌سازی عبارت است از: $\bar{X} = 10$. ۹۶.....

شکل ۷-۸. نمودار میدان الکتریکی بحرانی برحسب فاصله بین دو لینک را نشان می‌دهد. این نمودار به ازای مدول‌های یانگ مختلف لینک رسم شده‌اند. مشخصات لینک‌ها در این مدل‌سازی عبارت است از: $\bar{X} = 10$. ۹۷.....

شکل ۷-۹. سه میکرومیکسر مختلف را نشان می‌دهد که طول آن‌ها ۲۰، ۳۰ و ۴۰ است. در هر سه میکرومیکسر لینک‌ها در فاصله $\bar{X} = 10$ از ورودی کانال قرار گرفته‌اند. ۹۸.....

شکل ۷-۱۰. تغییرات میدان الکتریکی بحرانی برحسب فاصله بین دو لینک به ازای کانال با طول‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ را نشان می‌دهد. در این مدل‌سازی مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی عبارت‌اند از: $\bar{M} = 10, \bar{X} = 10$. ۹۹.....

شکل الف-۱. طرح ساده‌ای از نحوه نگاشت نقاط روی سطح لینک در لحظه اولیه و پس از تغییر شکل لینک. ۱۰۷.....

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲. فهرستی از فرضیات انجام‌شده در مدل‌سازی پدیده الکتروکنیتیک کلاسیک.....	۱۷
جدول ۱-۳. فرضیات انجام‌شده برای شبیه‌سازی حرکت لینک رسانای تغییر شکل‌پذیر.....	۲۶
جدول ۱-۴. ثوابت مورد استفاده در مدل‌سازی عددی را بیان می‌کند.....	۳۶
جدول ۱-۵. بازده اختلاط میانگین را بر حسب قدرت میدان الکتریکی و مدول یانگ لینک بیان می‌کند.....	۶۶
جدول ۱-۶. ثوابت بکار رفته در مدل‌سازی میکرومیکسر را بیان می‌کند.....	۷۴
جدول ۱-۷. ثوابت بکار رفته در شبیه‌سازی عددی میکروولو را نشان می‌دهد.....	۸۹

فهرست کلمات کوتاه شده

C	Conducting
NC	Non-conducting
EK	Electrokinetic
EO	Electroosmotic
EP	Electrophoretic
EDL	Electric double layer
ALE	Arbitrary Lagrangian Eulerian
ICEK	Induced-charge electrokinetic
ICEO	Induced-charge electroosmotic
ICEP	Induced-charge electrophoretic

فهرست علامت‌های به کار رفته

Re	عدد رینولدز	g	شتاب جاذبه
$\bar{U}$	سرعت جریان سیال	ρ_L	چگالی لینک
$\bar{U}_i$	سرعت ناشی از بار القاشده روی سطح رسانا	ρ_e	چگالی بار الکتریکی
$\bar{U}_{slip}$	سرعت لغزشی روی سطح جسم جامد	$\vec{F}_E$	نیروی الکترواستاتیک وارد بر لینک
$\bar{U}_{slip-W}$	سرعت لغزشی روی دیواره کانال	$\vec{F}_h$	نیروی هیدرودینامیک
$\bar{U}_{slip-NC}$	سرعت لغزشی روی سطح جسم نارسانا	t	زمان
$\bar{U}_{slip-C}$	سرعت لغزشی روی سطح جسم رسانا	t_{steady}	زمان حالت پایدار سیستم (0.1 s)
$\bar{U}_{eo}$	سرعت جریان الکترواسموتیک	m_L	جرم لینک
$\bar{U}_{ep}$	سرعت جریان الکتروفوریتیک	C_i	غلظت جریان i ام
$\bar{V}_L$	سرعت انتقالی مرکز جرم لینک	D_i	ضریب نفوذ جریان i ام
$\bar{V}_{ep}$	سرعت الکتروفوریتیک لینک	M	مدول یانگ لینک تغییر شکل پذیر
μ	لزجت	M_{ref}	مدول یانگ مبنای لینک (1 Kpa)
μ_{eo}	تحرك الکترواسموتیک	ϵ	ثابت دی‌الکتریکی محلول الکترولیت
μ_{ep}	تحرك الکتروفوریتیک	ϵ_0	ثابت دی‌الکتریک خلا
$\bar{E}_{applied}$	میدان الکتریکی خارجی	$\bar{\epsilon}$	بازده اختلاط میانگین در یک بازه زمانی
$\bar{E}_{induced}$	میدان الکتریکی ناشی از بارهای القایی	P	فشار
$\bar{E}_{ave}$	میدان الکتریکی میانگین	$\vec{G}$	کل نیروی حجمی وارد بر لینک
$\bar{E}_{cr}$	میدان الکتریکی بحرانی	Γ	پارامتر محلی روی سطح لینک
ζ_w	زتا پتانسیل روی دیواره کانال	L	طول کانال
$\zeta_{L/NC}$	زتا پتانسیل لینک نارسانا	W	عرض کانال
$\zeta_{induced}$	زتا پتانسیل القاشده روی سطح رسانا	α	زاویه لینک
Φ_e	پتانسیل الکتریکی	h	طول لینک
Φ_c	ثابت تصحیح پتانسیل الکتریکی	d	فاصله طولی بین دو لینک عمودی
f	فرکانس میدان الکتریکی	κ^{-1}	ضخامت لایه الکتریکی دوگانه
σ_L	تانسور تنش روی سطح لینک	n_0	غلظت یون‌ها در محلول الکترولیت
V_L	حجم لینک	e	بار پایه الکترون‌ها (1.602×10^{-9} C)
T	دما	Z	والانس یون محلول الکترولیت
		K_B	ثابت بولتزمن

فصل اول:

مقدمه

تاریخچه از الکتروکنیتیک و کاربردهای مرتبط با آن

پدیده الکتروکنیتیک یکی از قدیمی‌ترین شاخه‌های علوم کلوئیدی محسوب می‌شود. این شاخه از علم یک تاریخچه قدیمی دارد که به زمان دستیار نیوتون (فرانسیس هوکسبی) بازمی‌گردد [۱]. کشف پدیده‌های الکتروفوریز^۱، الکترواسموزیز^۲ برخاسته از مفهوم لایه الکتريکی دوگانه^۳ می‌باشد، از این‌رو مفهوم لایه الکتريکی دوگانه نقش مهمی در درک پایداری‌های کلوئیدی ایفا می‌کند. مطالعه تاریخچه الکتروکنیتیک و آشنایی با تفکرات اولین محققین این زمینه، سبب درک عمیق پدیده‌های کلوئیدی خواهد شد. در این فصل به‌طور خلاصه چگونگی کشف پدیده الکتروکنیتیک بیان می‌شود و در ادامه به پیشرفت‌هایی که در این زمینه حاصل شده است اشاره خواهد شد.

۱-۱- کشف پدیده الکتروکنیتیک

در قرن هجدهم، روش‌های محدودی برای ایجاد جریان الکتريکی و پتانسیل الکتريکی ارائه شده بود. در این سال‌ها، از تجهیزات ابتدایی مانند ژنراتورهای الکتريسیته ساکن برای ایجاد الکتريسیته استفاده می‌شد. در سال ۱۷۹۸، الکساندر ولتا یک منبع پایدار و قابل اطمینان برای تولید الکتريسیته اختراع نمود، این وسیله پیل ولتا نام گرفت. پیل ولتا شامل ورق‌های روی و نقره بود که توسط صفحات خیس شده در آب‌نمک به یکدیگر متصل شده بودند. این وسیله یک منبع قابل اعتماد برای تولید پتانسیل الکتريکی ثابت محسوب می‌شد و به‌عنوان مهم‌ترین وسیله در بسیاری از آزمایش‌های الکتريکی مورد استفاده قرار می‌گرفت [۱].

در میان آزمایش‌های تجربی که با استفاده از الکتريسیته انجام می‌شد، در سال ۱۸۰۸، فردیناند فردریچ رئوس [۲] در مسکو دو آزمایش ساده را با استفاده از یک لوله U شکل و دو الکتروود که هریک از آن‌ها در یکی از شاخه‌های لوله U شکل قرار گرفته بودند، انجام داد. در آزمایش اول، او مقداری رس

^۱. Electrophoresis

^۲. Electroosmosis

^۳. Electric Double Layers (EDL)

را داخل لوله U شکل ریخت و مشاهده کرد که با اعمال ولتاژ به الکترودها، سطح آب دریکی از شاخه‌های لوله بالا می‌آید. با اطلاعات پیشرفته امروزی، ما می‌دانیم که او پدیده الکترواسموزیس را مشاهده کرده است. در آزمایش دوم، او ذرات شن را علاوه بر ذرات رس به لوله‌آزمایش خود اضافه کرد و مشاهده کرد که ذرات رس به سمت لایه شن حرکت می‌کنند، امروزه می‌دانیم که مهاجرت ذرات رس در این آزمایش به واسطه پدیده الکتروفورزیز اتفاق می‌افتد. این آزمایش ساده به‌عنوان سرآغازی برای پیدایش پدیده الکتروکنتیک شناخته می‌شود.

۱-۲- پیشینه الکتروکنتیک غیرخطی

لویج [۳] را می‌توان اولین شخصی دانست که در سال ۱۹۶۲ جریان الکتروکنتیک القایی^۴ پیرامون یک کره رسانا را مطالعه کرد. او توانست پروفیل سرعت پیرامون یک کره رسانا را محاسبه کند و به‌این ترتیب وجود گردابه‌ها را در نزدیکی سطح رسانا توجیه کند. این گردابه‌ها از مهم‌ترین مشخصه‌های جریان الکتروکنتیک القایی محسوب می‌شوند. در ادامه سایر افراد، مطالعات محدودی را روی جریان الکتروکنتیک القایی پیرامون سایر سطوح رسانا انجام دادند [۴-۷]. در سال ۱۹۷۳، سیمونو و دوخین یک آنالیز تئوری روی ساختار لایه الکتریکی دوگانه القاشده روی سطح جسم رسانا انجام دادند [۶]. گامایونو و همکاران [۵] اولین گروهی بودند که توانستند با مشاهدات آزمایشگاهی خود وجود چهار گردابه پیرامون یک کره رسانا را گزارش کنند، آن‌ها همچنین تقابل هیدرودینامیک بین ذرات رسانا را برای اولین بار ثبت کردند. مورستوکین و مانترو [۸، ۹] و گامایونو و همکاران [۵]، حرکت ذرات با شکل‌های نامنظم را بررسی کردند، آن‌ها نشان دادند که حرکت ذرات با شکل نامنظم رابطه مرتبه دو با میدان الکتریکی اعمالی دارد. راموس و همکاران [۱۰] با اعمال میدان الکتریکی متناوب به الکترودهای روی دیواره کانال توانستند جریان سیال را در داخل کانال به‌وجود آورند، یک سال بعد اژدري [۱۱] با استفاده از این ایده توانست یک میکرو پمپ جدید پیشنهاد کند، ویژگی منحصر به فرد میکروپمپ اژدري، پایین بودن ولتاژ اعمالی نسبت به سایر میکروپمپ‌ها می‌باشد. بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۴ میکروپمپ‌های مشابه دیگری با استفاده از همین ایده ساخته شدند [۱۲-۱۴]. در سال ۲۰۰۵، لویتان و همکاران [۱۵] جریان الکترواسموتیک القایی^۵ پیرامون یک سیم رسانا را بررسی کردند. آن‌ها با

^۴. Induced-Charge Electrokinetic flow (ICEK flow)

^۵. Induced-Charge Electroosmotic flow (ICEO flow)

مشاهدات آزمایشگاهی خود نشان دادند که در صورت اعمال میدان الکتریکی متناوب AC، گردابه‌هایی پیرامون سیم رسانا ایجاد می‌شود. یاریو [۱۶] با ارائه یک مدل ریاضی کلی، توانست سرعت پایدار جریان الکتروکنیتیک القایی روی یک جسم رسانای دلخواه را محاسبه کند. تقابل هیدرودینامیک بین دو میله رسانا و حرکت الکتروفوریتیک القایی آن‌ها توسط سین‌تی‌لان و همکاران [۱۷، ۱۸] مطالعه شد. رز و همکاران [۱۹] حرکت و چرخش ذرات رسانای نامتقارن را مطالعه کردند. واو و لی [۲۰، ۲۱] با ارائه یک مدل عددی توانستند حرکت ذرات رسانا با هندسه دلخواه و تقابل آن‌ها با یکدیگر را شبیه‌سازی کنند. آن‌ها نتایج مدل‌سازی عددی خود را با نتایج آزمایشگاهی یک میکرومیکسر الکتروکنیتیک القایی مطابقت دادند [۲۲، ۲۳]. کیم و همکاران [۲۴] با اعمال میدان الکتریکی متناوب به سه الکتروود فعال توانستند با بهره‌گیری از گردابه‌های جریان الکتروکنیتیک القایی سیال را پمپ کنند. در سال ۲۰۱۱، دقیقی و همکاران [۲۵] حرکت یک‌ذره ژانوس^۶ را تحت تاثیر میدان الکتریکی DC به صورت عددی مطالعه کردند. آن‌ها نشان دادند که اگر بخش رسانای ذره ژانوس پشت به میدان الکتریکی قرار گیرد، ذره در خلاف جهت میدان الکتریکی حرکت می‌کند. با توجه به اطلاعات نویسندگان تاکنون هیچ گزارشی در مورد حرکت یک جسم رسانا در خلاف جهت میدان الکتریکی انجام نشده است. اولین تصویربرداری آزمایشگاهی از وجود چهار گردابه پیرامون یک‌ذره کروی رسانا تحت تاثیر میدان الکتریکی DC، توسط دقیقی و لی [۲۶] انجام شده است. در سال‌های اخیر، ژانگ و لی [۲۷] تاثیر میزان قطبش‌پذیری مواد دی‌الکتریک را بر روی جریان الکتروکنیتیک القایی پیرامون مواد رسانا بررسی نمودند.

با وجود تحقیقات متعددی که در زمینه جریان الکتروکنیتیک القایی پیرامون مواد رسانا انجام شده است، اما این تحقیقات تنها محدود به مواد صلب می‌شوند، در صورتیکه مواد رسانای تغییر شکل‌پذیر (مانند غشاهای دیافراگم‌ها) نقش مهمی در سیستم‌های میکروفلوئیدیک ایفا می‌کنند، چراکه این مواد دارای مزایای منحصربه‌فرد زیادی می‌باشند، از جمله این مزایا می‌توان به امکان سازگاری با بخش وسیعی از مواد بکاررفته در حوزه میکروفلوئیدیک و روش‌های ساخت متعدد را نام برد [۲۷]. با توجه به مزیت‌های یادشده، این مواد به طور گسترده در زمینه میکروراکتورها [۲۸]، سنسورهای گاز [۲۹] و دریچه‌های عبور جریان سیال [۳۰] مورد استفاده قرار می‌گیرند. با وجود اهمیت و کاربرد فراوان مواد رسانای تغییر شکل‌پذیر، تاکنون مطالعه‌های محدودی در این زمینه انجام شده است. از جمله مطالعه‌های صورت گرفته در این زمینه، می‌توان به کار لاکوست و همکاران [۳۱] اشاره کرد، آن‌ها حرکت یک

^۶. Janus particle

غشای رسانا را که میدان الکتریکی DC به صورت عمودی به آن اعمال می‌شود بررسی نموده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که در حالت پایدار جهت چرخش گردابه‌های پیرامون یک غشا رسانا در خلاف جهت گردابه‌های پیرامون یک‌ذره رسانا می‌باشد. زیبورت و همکاران [۳۲] یک مدل ریاضی را ارائه کردند که با استفاده از آن می‌توان شرایط مرزی واقعی‌تری را برای شبیه‌سازی حرکت یک غشای رسانا اعمال نمود. هر دو این کارها، تغییر شکل حالت پایدار یک غشای رسانا را که میدان الکتریکی DC به صورت عمودی به آن اعمال می‌شود بررسی کرده‌اند و تاکنون هیچ مطالعه‌ای در زمینه حرکت وابسته به زمان یک غشای رسانا که به صورت موازی یا مورب نسبت به میدان الکتریکی قرار گرفته باشد انجام نشده است، بعلاوه هیچ مطالعه‌ای تقابل دو غشای رسانا را مطالعه نکرده است.

۱-۳- پیشینه میکرومیکسرها

در دهه گذشته پیشرفت‌های فراوانی در زمینه‌ی دستگاه‌های میکرو و همچنین فناوری آزمایشگاه-روی-یک-تراشه انجام شده است [۳۳، ۳۴]. این پیشرفت‌ها سبب توسعه آنالیز شیمیایی و بیوشیمیایی شده است. به‌عنوان نمونه امروزه بسیاری از تجهیزات ضروری یک آزمایشگاه واقعی روی یک تراشه کوچک جای داده شده، این تراشه قادر است وظیفه انتقال و واکنش شیمیایی بین نمونه‌های شرکت‌کننده در یک آنالیز را انجام دهد، همچنین تحلیل و بررسی فرآورده‌های یک واکنش شیمیایی از دیگر وظایف این تراشه می‌باشد. هرچند ابعاد کوچک یک تراشه آنالیز بیوشیمیایی سبب سهولت در حمل‌ونقل آن می‌شود و هزینه تمام‌شده آن را کاهش می‌دهد، اما پدیده‌های فیزیکی که در ابعاد کوچک اتفاق می‌افتد، چالش‌های جدیدی را پیش روی محققین قرار می‌دهد. کنترل و انتقال نمونه‌های بیولوژیک در ابعاد میکرو از مهم‌ترین چالش‌هایی است که محققین با آن روبه‌رو هستند.

روش الکتروکنتیک شامل الکترواسموزیز، الکتروفوریز می‌باشد، این روش‌ها نقش مهمی در انتقال و کنترل نمونه‌های بیولوژیک در ابعاد میکرو ایفا می‌کند. روش الکتروکنتیک به‌طور گسترده به‌منظور پمپاژ، بهبود اختلاط، جداسازی و مرتب‌سازی نمونه‌های بیولوژیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. الکترواسموزیز به دلیل مزایای منحصر به فرد خود از جمله کنترل ساده، امکان تغییر جهت جریان سیال، عدم استفاده از قطعه متحرک و پروفیل سرعت شبیه به یک پلاگ به‌طور گسترده به‌منظور پمپاژ سیال و نمونه‌های بیولوژیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌طور کلی جریان الکتروکنتیک سیال در داخل کانال، دارای رژیمی آرام می‌باشد، چراکه سرعت جریان بسیار کم است بعلاوه طول مشخصه کانال نیز کوچک

می‌باشد، بنابراین عدد رینولدز جریان الکتروکنتیک بسیار کوچک خواهد بود ($Re \ll 1$)، و دو جریان الکتروکنتیک موازی تنها به واسطه پدیده نفوذ با یکدیگر مخلوط می‌شوند.

یکی از چالش‌های استفاده از پدیده الکتروکنتیک، اختلاط سریع دو جریان سیال در یک طول کوتاه می‌باشد. به منظور بهبود اختلاط در دستگاه‌های میکرو تلاش‌های متعددی صورت گرفته و محققان توانستند روش‌های مختلفی را برای بهبود اختلاط ارائه کنند. از جمله این روش‌ها می‌توان به استفاده از پیزوالکتریک‌ها [۳۵]، ایجاد اغتشاش با استفاده از فناوری پنوماتیک [۳۶]، امواج آکوستیک [۳۷]، و اعمال ولتاژ متناوب [۳۸] اشاره نمود. در میان روش‌های ارائه‌شده روش الکتروکنتیک در بسیاری از دستگاه‌های میکرو کاربرد دارد. از جمله میکرومیکسرهای الکتروکنتیک می‌توان به میکسر T شکل اشاره کرد. در این میکسر با استفاده از میدان الکتریکی، دو سیال با غلظت‌های متفاوت از طریق دو کانال عمودی به سمت کانال اصلی پمپ می‌شوند و با حرکت سیال در طول کانال اصلی اختلاط بهبود می‌یابد. میکسرهای T شکل در بخش‌های مختلف آزمایشگاه روی یک تراشه استفاده می‌شوند. به عنوان نمونه، هاریسون و همکاران [۳۹] با استفاده از میکسر T شکل، نمونه‌ها مشخصی را در یک محلول پایه پخش نمودند. درتینجر و همکاران [۴۰] با استفاده از میکسر T توانستند به گرادیان توزیع غلظت دلخواه در خروجی کانال دست یابند. جاکوبسن و همکاران [۴۱] چندین جریان موازی با استفاده از ورودی‌های مختلف به داخل یک کانال اصلی هدایت کردند و توانستند تنها با استفاده از یک کانال چندین جریان موازی را با یکدیگر مخلوط کنند. یکی دیگر از روش‌های بهبود اختلاط، روش لایه لایه کردن^۷ می‌باشد. در این روش جریان ورودی با استفاده از شکل خاص هندسه کانال به دو یا چندین جریان فرعی تقسیم می‌شود و پس از لایه لایه شدن جریان اصلی، بار دیگر جریان‌های فرعی به یکدیگر می‌پیوندند [۴۲]. در این روش با کوتاه شدن طول نفوذ، دو جریان سیال با طی مسیری کوتاه با یکدیگر مخلوط می‌شوند. میکرومیکسرهای لایه‌ای دو عیب اساسی دارند، عیب اول ساختار پیچیده کانال در این میکرومیکسرها می‌باشد. عیب دوم انرژی الکتریکی زیاد برای غلبه بر اصطکاک در داخل کانال می‌باشد. با توزیع غیریکنواخت بارهای سطحی روی دیواره کانال، در جریان الکترواسموتیک اغتشاش ایجاد می‌شود و به این ترتیب میزان اختلاط بهبود می‌یابد [۴۳، ۴۴]. این روش توسط بیدیس و همکاران [۴۵] توسعه یافت و آن‌ها با استفاده از توزیع غیریکنواخت زتا پتانسیل روی دیواره کانال توانستند گردابه‌هایی را

^۷. Lamination mixing

داخل کانال ایجاد کنند و به این ترتیب اختلاط دو جریان سیال با استفاده از این روش به میزان چشم-گیری افزایش یافت. اختلاط توسط ناپایداری الکتروکنتیک روش دیگری است که اساس عملکرد آن بر مبنای تفاوت در ضریب ضریب رسانندگی دو جریان ورودی به داخل کانال می باشد. این روش در میدان های الکتریکی DC ضعیف [۴۶] و در میدان های الکتریک AC قوی [۴۷] سبب بهبود اختلاط می شود. برای اختلاط به روش ناپایداری الکتروکنتیک می بایست دو جریان سیال دارای ضریب رسانندگی الکتریکی مختلف باشند و میدان الکتریکی بالا به دو جریان سیال اعمال شود. به کمک پدیده الکترواسموزیز نوع دو، میکرومیکسرهای جدید ارائه شده اند به عنوان نمونه، ونگ و همکاران [۴۸] در سال ۲۰۰۴ توانستند با استفاده از گردابه های ناشی از جریان الکترواسموتیک القایی پیرامون یک گرانشولار رسانا، اختلاط دو جریان سیال را بهبود دهند. اما این روش تنها برای دستگاه هایی با جریان بسته قابل استفاده می باشد.

۴-۱- پیشینه میکرو ولوها

میکروولوها و میکروسوئیچ ها یکی از کلیدی ترین تجهیزات حوزه میکروفلوئیدیک محسوب می شوند. این تجهیزات سبب توسعه تراشه های میکروفلوئیدیک با کارکرد مقطعی خواهند شد. هرچند مطالعه های وسیعی در زمینه ی میکرو پمپ ها و میکرومیکسر ها انجام شده است، با این وجود توجه کمی در زمینه ی میکروولوها صورت گرفته است [۴۹]. به طور کلی میکروولوها به دودسته (۱) فعال و (۲) غیرفعال تقسیم می شوند.

از آنجاکه بحث این پایان نامه پیرامون میکروولوهای فعال می باشد بنابراین تنها به بیان تقسیم بندی این دسته از میکروولوها به همراه تفسیر آن ها اکتفا می کنیم. میکروولوهای فعال براساس روش تحریک آن ها به سه گروه کلی تقسیم می شوند، (۱) میکروولوهای فعال مکانیکی (۲) میکروولوهای فعال غیرمکانیکی (۳) میکروولوهای فعال خارج از سیستم. میکروولوهای فعال مکانیکی از فناوری ماشین کاری در ابعاد میکرو استفاده می کنند و در آن ها غشای متحرک در کنار مکانیزم تحریک جای می گیرد. میکروولوهای فعال غیرمکانیکی از مواد هوشمند استفاده می کنند در این میکروولوها غشای متحرک توسط مواد هوشمندی مانند مواد رئولوژیک یا مواد همراه با تغییر فاز تحریک می شود. میکروولوهای خارج از سیستم، توسط دستگاه خارجی نظیر پمپ پنوماتیک که به صورت جداگانه روی دستگاه اصلی سوار شده اند تحریک می شود.

در میکروولولهای فعال مکانیکی، غشای متحرک توسط روش مغناطیسی، الکتریکی، پیزوالکتریکی و حرارتی تحریک می‌شود. در ادامه نمونه‌ای از هریک از روش‌های تحریک بیان می‌شود. اولین میکروولو الکترومغناطیس توسط تری و همکاران [۵۰] در سال ۱۹۷۹ ارائه شد، آن‌ها با استفاده از یک سلنئید پلانجری توانستند غشای جای‌گرفته روی دیواره کانال را تحریک کنند.

در میان میکروولولهای الکترومغناطیس ولولهای گیره‌ای^۸ جایگاه ویژه‌ای دارند. این ولوها شامل یک سلنئید، غشای سیلیکونی و یک فنر می‌باشند که توسط پلانجر فشرده می‌شود [۵۱]. بدلیل نیروی فشاری فنر، پلانجر مانند یک گیره غشای سیلیکونی را فشرده می‌سازد و مانع از عبور جریان سیال از داخل کانال می‌شود. از جمله مزایای این میکروولوها می‌توان به نشتی صفر، حجم مرده صفر، مدت زمان عملکرد کوتاه، اجازه عبور جریان زیاد و سادگی در جایگزین کردن غشا را نام برد.

از جمله میکروولولهای الکتریکی می‌توان به ولولهای الکترواستاتیکی اشاره نمود. میکروولولهای الکترواستاتیکی از دو الکترود صفحه‌ای تشکیل شده‌اند که به صورت متقارن داخل یک میکروکانال با دیواره‌های سیلیکونی جای‌گرفته‌اند، در نتیجه اعمال ولتاژ به سیستم، بین الکترودها نیروی جاذبه یا دافعه شکل می‌گیرد که در نتیجه آن دیواره‌های کانال به یکدیگر نزدیک و یا از یکدیگر دور می‌شوند و سیستم مشابه ولو عمل می‌کند [۵۲]. میکروولولهای الکترواستاتیک برای کنترل جریان گاز مناسب می‌باشند چراکه در صورت استفاده از سیالات، پدیده الکترولیز در ولتاژهای بالا اتفاق می‌افتد و عملکرد میکرو ولو مختل می‌شود [۵۳].

میکروولولهای پیزوالکتریک از کریستال‌های خاصی استفاده می‌کنند که تحت اعمال میدان الکتریکی دچار تنش‌های مکانیکی شده و انبساط می‌یابند و به وسیله آن‌ها می‌توان یک غشا را تحریک نمود [۵۴]. مهم‌ترین چالش پیش‌روی توسعه میکروولولهای پیزوالکتریک، کورس جابجایی بسیار کم غشا در این میکروولوها می‌باشد که برای ایجاد آن می‌بایست ولتاژ بالایی به سیستم اعمال شود [۵۵].

اولین میکروولو حرارتی توسط زدبلیک و انجل [۵۶] در سال ۱۹۸۷ معرفی شد. آنها توانستند با استفاده از یک مقاومت الکتریکی، سیال محبوس شده در یک محفظه بسته را منبسط کرده و با استفاده از آن یک غشا را جابجا نمایند. اصول عملکرد بسیاری از میکروولولهای حرارتی مشابه مکانیزم زدبلیک و انجل می‌باشد. عیب اساسی میکروولولهای حرارتی کنترل پیچیده آن‌ها حین کارکرد می‌باشد چراکه

^۸. Pinch-type microvalve

جایابی غشا در این میکرو ولوها تنها وابسته به حرارت داده شده به سیستم نمی باشد بلکه وابسته به انبساط سیال داخل محفظه نیز است.

۱-۵- ساختار و فصل بندی پایان نامه:

این پایان نامه در هشت فصل ارائه شده است. فصل اول گذری اجمالی بر سیر تکامل پدیده الکتروکنیتیک دارد و تاریخچه میکرومیکسرها و میکروولولهای الکتروکنیتیک را بررسی می کند. این فصل ضمن بحث پیرامون تاریخچه میکسرها و ولوها، انواع مختلف این تجهیزات را از دیدگاه های مختلف مورد نقد و ارزیابی قرار می دهد و مزایا و معایب و چالش های پیشروی هر نوع را برمی شمارد.

در فصل دوم مفاهیم اصلی حوزه الکتروکنیتیک بحث می شود. این مفاهیم شامل لایه الکتریکی دوگانه و آشنایی با الکترواسموزیز و الکتروفوریز خواهد بود، پس از آشنایی با این مفاهیم، دوشاخه اصلی الکتروکنیتیک که شامل الکتروکنیتیک کلاسیک و الکتروکنیتیک غیرخطی است تشریح می شود و اختلاف آن ها بیان خواهد شد.

در فصل سوم معادلات حاکم بر حرکت لینک رسانای تغییر شکل پذیر در داخل کانال بیان می شود، این معادلات برای شبیه سازی عددی حرکت لینک رسانا و همچنین طراحی میکرومیکسر و میکروولو با استفاده از لینک رسانا مورد استفاده قرار می گیرد.

در فصل چهارم چگونگی حرکت لینک رسانای تغییر شکل پذیر در سه وضعیت افقی، عمودی و مایل بحث می شود، همچنین اثر دیواره کانال بر لینک افقی مجاور آن بررسی می شود. یکی دیگر از مطالعاتی که در این فصل انجام شده، تقابل دو لینک عمودی است. در این مطالعه دو لینک عمودی در فاصله های افقی مختلف نسبت به یکدیگر نصب شده اند و در صورتی که فاصله بین آن ها کاهش یابد، این دو لینک می توانند یکدیگر را جذب و یا دفع نمایند. جذب و دفع لینک ها بستگی به وضعیت قرارگیری لینک ها روی دیواره کانال خواهد داشت. نتایج به دست آمده از این فصل درک درستی از نحوه حرکت لینک رسانا را در شرایط مختلف ارائه می دهد. با استفاده از نتایج ارائه شده در این فصل می توان میکرو میکسرها، میکروولوها و حتی میکروپمپ های جدیدی را طراحی نمود.

در فصل پنجم میکرومیکسر جدیدی ارائه شده که با استفاده از حرکت رفت و برگشتی تنها یک لینک رسانای تغییر شکل پذیر در داخل کانال، اختلاط بین دو جریان سیال را بهبود می دهد. این میکرومیکسر شامل یک کانال مستقیم و یک لینک رسانای عمودی است که روی دیواره بالایی کانال نصب شده است.

با اعمال میدان الکتریکی متغیر با زمان به این سیستم، لینک شروع به حرکت رفت و برگشتی داخل کانال می‌کند و مشابه یک همزن در صد اختلاط میان دو جریان ورودی به داخل کانال را که داری غلظت‌های متفاوتی می‌باشند افزایش می‌دهد. اثر عوامل مختلف از جمله دامنه و میانگین میدان الکتریکی اعمالی بر عملکرد این میکرومیکسر مطالعه شده است.

فصل ششم اثر تعداد بیش از یک لینک را بر عملکرد میکرومیکسر مطالعه می‌کند، ولی این بار از میدان الکتریکی ثابت برای ایجاد جریان داخل کانال استفاده می‌شود. در این فصل اثر زاویه قرارگیری لینک‌ها نسبت به دیواره کانال بر عملکرد میکرومیکسر مطالعه می‌شود و توضیح داده می‌شود که چگونه زاویه قرارگیری لینک رسانا می‌تواند نقش بسزایی در بهبود اختلاط یک میکرومیکسر ایفا کند. طول لینک رسانا و اندازه میدان الکتریکی ثابت از دیگر عواملی هستند که اثر آن‌ها بر کارایی این میکرومیکسر مطالعه شده است. با توجه به نتایج این فصل می‌توان دریافت که چه ارتباطی میان زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک رسانا و گرادیان فشار به وجود آمده در داخل کانال وجود دارد.

فصل هفتم یک میکروولو و درعین حال یک میکروسوئیچ جدید را معرفی می‌کند که نه تنها قادر است دبی عبوری از خروجی کانال را صفر کند بلکه قادر است جهت جریان را در داخل کانال تغییر دهد. تمام این مزایا در شرایطی به دست می‌آید که هیچ تغییری در جهت میدان الکتریکی اعمالی انجام نمی‌شود. ساختمان این میکروولو شامل یک کانال مستقیم و ساده است که دو لینک رسانای متقارن روی دیواره‌های آن قرار گرفته‌اند و میدان الکتریکی ثابت به سیستم اعمال می‌شود. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که در میدان‌های الکتریکی قوی، میزان تغییر شکل لینک‌ها افزایش می‌یابد و زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک‌ها به نحوی تغییر می‌کند که گرادیان فشار مخالف در سیستم به وجود می‌آید. در این فصل میدان الکتریکی که به ازای آن سیستم تبدیل به ولو می‌شود به نام میدان الکتریکی بحرانی نامگذاری شده است، حال اگر میدان الکتریکی اعمالی به سیستم بیشتر از میدان الکتریکی بحرانی باشد جهت جریان خالص در داخل کانال عوض می‌شود و این بار جریانی در خلاف جهت میدان الکتریکی در داخل کانال به وجود می‌آید. اثر عوامل مختلف از جمله مدول یانگ لینک‌ها و طول لینک و طول کانال بر عملکرد این میکروولو بررسی شده است.

آخرین فصل از این پایان‌نامه به نتیجه‌گیری و جمع‌بندی دستاوردهای حاصل از پژوهش اختصاص دارد. در این بخش به‌طور خلاصه به مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش اشاره می‌شود و قابلیت این نتایج برای استفاده در کارهای آینده بحث می‌شود.

۱-۶- نوآوری و گام‌های ابتکاری

این پایان‌نامه حرکت وابسته به زمان یک غشای رسانا را بررسی کرده و از آنجاکه یک انتهای این غشا روی دیواره کانال ثابت‌شده و انتهای دیگر آن می‌تواند آزادانه حرکت کند، بنابراین در سرتاسر متن پایان‌نامه از واژه لینک برای توصیف این غشا استفاده‌شده است.

این پژوهش برای اولین بار مکانی از سطح رسانا را که زتا پتانسیل القایی آن صفر می‌شود به‌طور ویژه موردبررسی قرار داده و این مکان را بانام نقطه سکون نام‌گذاری کرده است و نشان داده است که جهت حرکت لینک رسانا با توجه به موقعیت نقطه سکون روی سطح لینک مشخص می‌شود. در این تحقیق تقابل دو لینک عمودی بررسی‌شده و نشان داده‌شده که جهت چرخش گردابه‌های بین دو لینک سبب جذب و یا دفع لینک‌های رسانا از یکدیگر می‌شوند. پیش‌تر جذب و دفع دو ذره کروی رسانا گزارش‌شده بود [۲۱] اما در این گزارش جهت میدان الکتریکی اعمالی به سیستم عوض می‌شد حال آنکه در این تحقیق جهت میدان الکتریکی اعمالی به سیستم عوض نمی‌شود بلکه تنها موقعیت قرارگیری لینک‌ها روی دیواره کانال عوض می‌شود.

با توجه به ویژگی‌های حرکت لینک رسانا، یک میکرومیکسر جدید در این پایان‌نامه معرفی شده است. این میکرومیکسر شامل لینک‌های رسانای تغییر شکل‌پذیر است و میدان الکتریکی ثابت به سیستم اعمال می‌شود. بررسی‌های انجام‌شده روی این میکرومیکسر نشان می‌دهد که زاویه قرارگیری لینک‌های رسانا در داخل کانال روی اندازه گرادیان فشار مخالف در سیستم تأثیر می‌گذارد و هرچه این اندازه این گرادیان فشار مخالف بیشتر باشد، بازده اختلاط میکرومیکسر بیشتر خواهد بود. این توجیه تاکنون برای میکرومیکسرهای با میدان الکتریکی ثابت ارائه نشده است.

پیش‌ازاین تحقیق واو و لی [۲۳] نشان دادند که با استفاده از مانع‌های رسانای نامتقارن در داخل کانال می‌توان دبی خروجی از کانال و جهت جریان را در سیستم تغییر داد. در این تحقیق نشان داده‌شده که حتی با استفاده از مانع‌های رسانای متقارن هم دبی عبوری و جهت جریان را در داخل کانال کنترل نمود. در این تحقیق از دو لینک رسانای تغییر شکل‌پذیر متقارن استفاده‌شده که پس از اعمال میدان الکتریکی به سیستم، لینک‌ها دچار تغییر شکل می‌شوند و توزیع زتا پتانسیل روی آن‌ها نامتقارن می‌شود و به‌این ترتیب گرادیان فشار مخالف در سیستم ایجاد می‌شود. با کنترل اندازه گرادیان فشار مخالف در سیستم می‌توان دبی و جهت جریان را در داخل کانال کنترل نمود.

فصل دوم:

مفاهیم الکتروکنتیک کلاسیک و غیر خطی

مفاهیم الکتروکنیتیک کلاسیک و الکتروکنیتیک غیر خطی

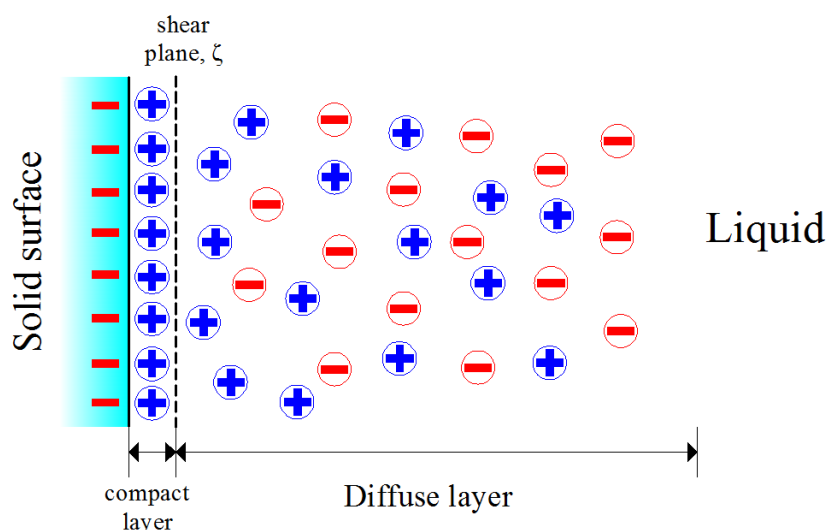
۲-۱- لایه الکتریکی دوگانه:

بیشتر اجسام جامد (مانند پلاستیک و شیشه)، پس از آنکه در تماس با محلول الکترولیت قرار می گیرند بار الکترواستاتیک و یا پتانسیل الکتریکی سطحی به دست می آورند. به طور کلی محلول الکترولیت از نظر بار الکتریکی خنثی است (چراکه تعداد یون های مثبت و منفی آن با یکدیگر برابرند). با وجود خنثی بودن محلول الکترولیت، بارهای الکترواستاتیک روی سطح جسم جامد، یون های با بار مخالف خود را از درون محلول الکترولیت جذب می کنند. به دلیل این جاذبه الکترواستاتیک، تمرکز یون های با بار مخالف سطح جامد، در نزدیکی این سطح بیشتر خواهد بود. در این شرایط یون های هم نام با سطح جامد کماکان در نزدیکی این سطح حضور دارند اما تمرکز آن ها در نزدیکی سطح کمتر از ناحیه دور از سطح است، چراکه نیروی دافعه الکترواستاتیک این بارها را از سطح جامد دور می کند. به این ترتیب ناحیه ای با بار خالص مخالف سطح جامد در نزدیکی آن ایجاد می شود. این ناحیه از بارهای مخالف می بایست بار سطحی جسم جامد را خنثی کند. بارهای سطحی جسم جامد و لایه ای از بارهای مخالف که پیرامون جسم جامد تشکیل می شوند به نام لایه الکتریکی دوگانه شناخته می شود.

همان طور که در شکل ۲-۱ نشان داده شده است، بلافاصله پس از بارهای سطحی جسم جامد، لایه ای از یون های مخالف جذب سطح جامد شده اند، این یون های مخالف به دلیل جاذبه الکترواستاتیک قادر به حرکت نمی باشند و به این لایه از یون های مخالف لایه متراکم^۹ گفته می شود که ضخامت آن حدود چند انگستریم بیشتر نیست. توزیع پتانسیل الکتریکی در لایه متراکم به طور کلی بر اساس محدودیت های هندسی مانند اندازه مولکول ها و یون ها و همچنین میزان تقابل یون ها با یکدیگر و تقابل یون ها با دیواره جسم جامد محاسبه می شوند. با فاصله گرفتن از لایه متراکم به تدریج چگالی بار نیز کاهش می یابد و در نهایت در فاصله دور از لایه متراکم چگالی بار صفر می شود. در ناحیه دور از لایه

۹. Compact layer

متراکم دیگر نیروی جاذبه الکترواستاتیک روی یون‌ها تأثیر نمی‌گذارد و به همین دلیل در این ناحیه یون‌ها متحرک می‌باشند. ناحیه یون‌های متحرک بانام لایه دیفیوز^{۱۰} شناخته می‌شود. ضخامت لایه دیفیوز وابسته به توزیع یون‌های محلول و خواص الکتریکی سیال است و به‌طور معمول از چندین نانومتر برای محلول‌هایی با چگالی یون زیاد شروع می‌شود و به یک یا دو میکرون برای آب خالص که چگالی یون کمی دارد می‌رسد. مرز میان لایه فشرده و لایه دیفیوز بانام صفحه برش^{۱۱} شناخته می‌شود. با در نظر گرفتن جاذبه الکترواستاتیک بین یون‌های مخالف و بارهای سطحی جسم جامد می‌توان فرض نمود که سرعت سیال در لایه برش صفر است و از این فرض به‌عنوان یک شرط مرزی برای محاسبه توزیع سرعت استفاده نمود. پتانسیل الکتریکی در لایه برش بانام زتا پتانسیل شناخته می‌شود و مقدار آن در بسیاری از مدل‌های الکتروکنتیک به‌صورت تقریبی همان پتانسیل سطح جامد در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱-۲. طرح ساده‌ای از لایه الکتریکی دوگانه به همراه لایه برش و موقعیت محاسبه زتا پتانسیل را نشان می‌دهد.

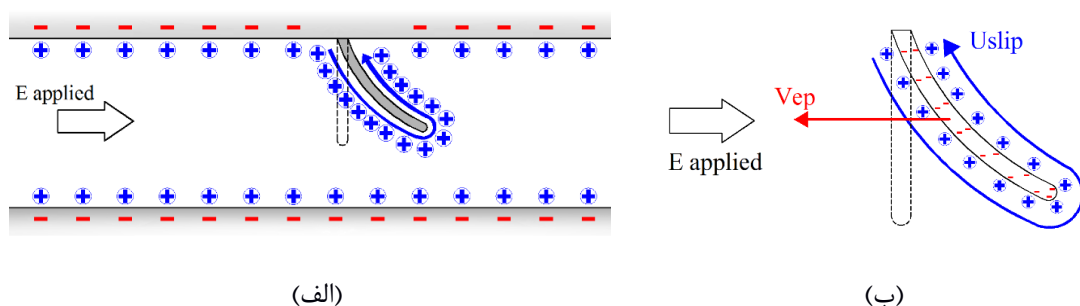
۲-۲- الکترواسموتیک و الکتروفورتیک

با قرارگیری یک لینک نارسانا در تماس با محلول الکترولیت و اعمال میدان الکتریکی به سیستم، یک لایه الکتریکی دوگانه پیرامون لینک نارسانا شکل می‌گیرد، در صورتی که لینک نارسانا دارای بار الکتریکی منفی باشد، مطابق شکل ۲-۲ یون‌های با بار مثبت پیرامون سطح نارسانا قرار می‌گیرند. یون‌های مجاور سطح لینک نارسانا تحت تأثیر میدان الکتریکی شروع به حرکت می‌کنند و این حرکت یون‌ها سبب

۱۰. Diffuse layer

۱۱. Shear plane

می‌شود تا مولکول‌های سیال مجاور آن‌ها نیز در نتیجه اثرات لزجت وادار به حرکت شوند و به این ترتیب جریانی از سیال در داخل کانال شکل می‌گیرد که به آن جریان الکترواسموتیک گفته می‌شود. اگر ذره نارسانا دارای بار الکتریکی اولیه باشد علاوه بر نیروی اصطکاک که از طرف سیال به ذره وارد می‌شود یک نیروی دیگر به نام نیروی الکترواستاتیک نیز به ذره وارد می‌شود. نیروی الکترواستاتیک نتیجه اعمال میدان الکتریکی به بار خالص موجود داخل جسم نارسانا است. نیروی اصطکاک و الکترواستاتیک در جهت مخالف یکدیگر به ذره وارد می‌شوند بنابراین سرعت نهایی ذره، در جهت برآیند این دونیرو خواهد بود. شکل ۲-۲ سرعت جریان الکترواسموتیک U_{slip} و سرعت حرکت الکتروفورتیک V_{ep} یک لینک نارسانای تغییر شکل پذیر را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲. طرح ساده‌ای از جریان الکتروکنتیک کلاسیک پیرامون یک لینک نارسانا را نشان می‌دهد. (الف) توزیع یون داخل میکروکانال با لینک نارسانا (ب) توزیع یون و سرعت جریان الکترواسموتیک و الکتروفورتیک روی یک لینک نارسانا.

با فرض نازک بودن ضخامت لایه الکتریکی دوگانه می‌توان سرعت لغزشی روی دیواره نارسانای کانال را مطابق فرمول هلمهولتز - اسمولوچوسکی محاسبه نمود [۵۷].

$$U_{eo} = -\frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta_w}{\mu} \vec{E}_e = -\mu_{eo} \vec{E}_e \quad (1-2)$$

همچنین سرعت الکتروفورتیک یک لینک باردار در داخل محلول الکترولیت با توجه به رابطه هلمهولتز - اسمولوچوسکی مطابق رابطه زیر به دست می‌آید [۵۷].

$$V_{ep} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta_p}{\mu} \vec{E}_e = \mu_{ep} \vec{E}_e \quad (2-2)$$

در این رابطه μ لزجت سیال است، ζ_w و ζ_p به ترتیب زتا پتانسیل روی دیواره کانال و سطح ذره است. همچنین μ_{eo} و μ_{ep} به ترتیب بیانگر تحرک الکترواسموتیک^{۱۲} و تحرک الکتروفورتیک^{۱۳} می‌باشد.

^{۱۲}. Electroosmotic mobility

^{۱۳}. Electrophoretic mobility

فرمول هلمهولتز - اسمولوچوسکی بر خواسته از فرضیات زیر می‌باشد.

- ضخامت لایه الکتریکی دوگانه در مقایسه با ابعاد میکروکانال و لینک بسیار کوچک است.
- فرض می‌شود دیواره کانال و سطح لینک نارسانا هستند و این سطوح قابلیت قطبی شدن را ندارند.
- سطوح میکروکانال و لینک از نظر خواص فیزیکی همگن می‌باشند.

۲-۳- الکتروکنیتیک کلاسیک

الکتروکنیتیک تقابل بین میدان الکتریکی خارجی و لایه الکتریکی دوگانه روی سطح جامد را بررسی می‌کند، لایه الکتریکی دوگانه که پیرامون سطح نارسانا شکل می‌گیرد دارای زتا پتانسیل ثابت و یکنواخت روی صفحه برش است، این شاخه از الکتروکنیتیک که محدود به مطالعه رفتار مواد نارسانا است، الکتروکنیتیک کلاسیک نامیده می‌شود. با توجه به رابطه (۲-۱) و (۲-۲) می‌توان دریافت که سرعت لغزشی در الکتروکنیتیک کلاسیک مقدار ثابتی است، چراکه زتا پتانسیل روی سطح یک جسم نارسانا همواره ثابت است. همچنین با توجه به این روابط می‌توان نتیجه گرفت که سرعت الکترواسموتیک سیال و الکتروفورتیک لینک رابطه خطی با میدان الکتریکی دارند. با توجه به این موضوع پدیده الکتروکنیتیک کلاسیک به نام الکتروکنیتیک خطی نیز نام‌گذاری می‌شود.

تئوری الکتروکنیتیک کلاسیک پس از انجام فرضیات بسیار تنها قادر است پدیده الکتروکنیتیک را پیرامون مواد نارسانا مدل‌سازی کند. در جدول (۲-۱) فهرستی از فرضیات انجام شده در این تئوری ارائه شده است.

جدول ۲-۱. فهرستی از فرضیات انجام‌شده در مدل‌سازی پدیده الکتروکنیتیک کلاسیک.

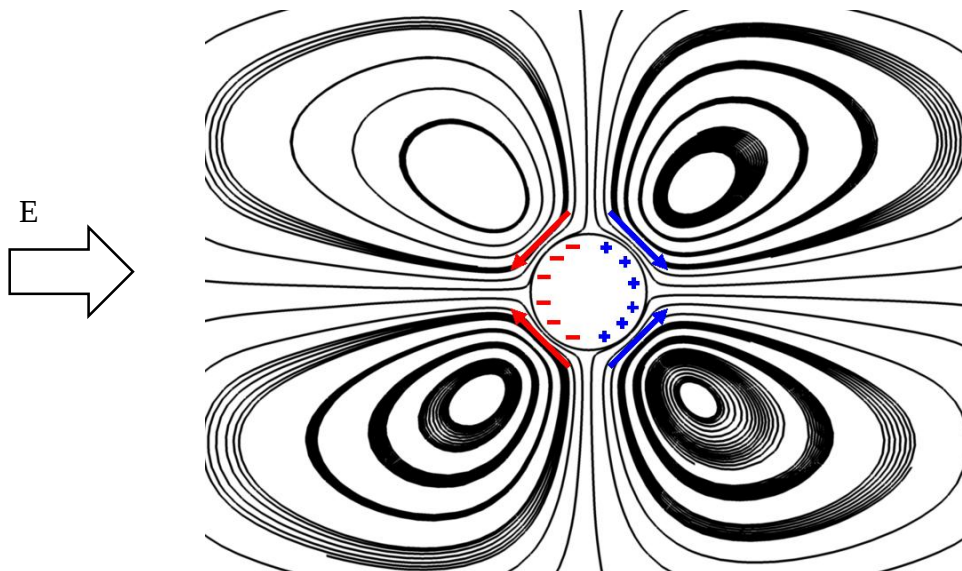
محلول الکترولیت همگن فرض می‌شود، همچنین محلول از نظر توزیع بار یکنواخت و خنثی است.
محلول الکترولیت نامحدود است.
میدان الکتریکی یکنواخت به سیستم اعمال می‌شود.
لایه الکتریکی دوگانه نازک است.
سطوح کانال و جسم نارسانا دارای بار الکتریکی ثابت و یکنواخت می‌باشند.

با استفاده از این فرضیات می‌توان جریان الکتروکنیتیک پیرامون اجسام نارسانا را با استفاده از الکتروکنیتیک کلاسیک مدل‌سازی نمود. با این وجود در واقعیت فیزیکی، الکتروکنیتیک کلاسیک قادر نیست بسیاری از پدیده‌های فیزیکی را مدل‌سازی کند. به عنوان نمونه بسیاری از مواد مورد استفاده در حوزه میکروفلوئیدیک رسانا می‌باشند و با توجه به آزمایش‌ها انجام‌شده محققان دریافته‌اند که توزیع بار

روی مواد رسانا ثابت و یکنواخت نیست. بنابراین تئوری الکتروکنتیک کلاسیک قادر نخواهد بود پدیده-های الکتروکنتیک را که با مواد رسانا سروکار دارند مدل سازی کند. برای برطرف کردن این نقص یک شاخه جدید در الکتروکنتیک به نام الکتروکنتیک غیرخطی به وجود آمد. بر اساس تئوری الکتروکنتیک غیرخطی زتا پتانسیل القایی روی سطح جسم رسانا ثابت نیست بلکه تابعی از میدان الکتریکی اعمالی می باشد.

۲-۴- الکتروکنتیک ناشی از بارهای القایی

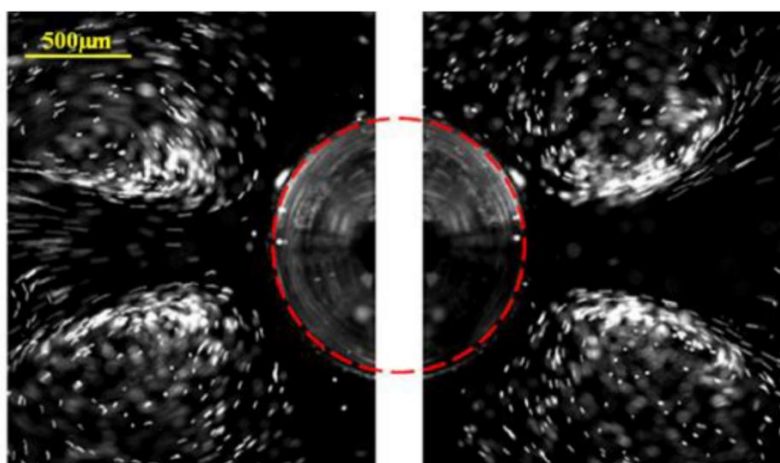
همان طور که اشاره شد، پیرامون یک جسم نارسانا توزیع بار یکنواخت است، اما پیرامون یک جسم رسانا، توزیع بار غیریکنواخت است. به عنوان مثال یک ذره رسانا دایره ای را فرض کنید که در تماس با محلول الکترولیت قرار گرفته است. همان طور که در شکل ۲-۳ نشان داده شده، در حالت پایدار روی سطحی از رسانا که رو به روی میدان الکتریکی است، بار منفی القا می شود و روی سطح دیگر رسانا بار مثبت القا می شود. این توزیع بار القایی روی سطح رسانا، یون های با بار مخالف خود را از داخل محلول الکترولیت جذب می کنند و در نتیجه حرکت این یون ها جریان الکتروکنتیک القایی^{۱۴} پیرامون یک جسم رسانا به وجود می آید. مشخصه اصلی جریان الکتروکنتیک القایی وجود گردابه هایی است که پیرامون سطح رسانا ایجاد می شوند. این گردابه ها در نتیجه توزیع بار غیریکنواخت پیرامون سطح رسانا ایجاد می شوند.



شکل ۲-۳. توزیع بار القاشده و جریان الکتروکنتیک القایی پیرامون یک ذره رسانا را در حالت پایدار نشان می دهد.

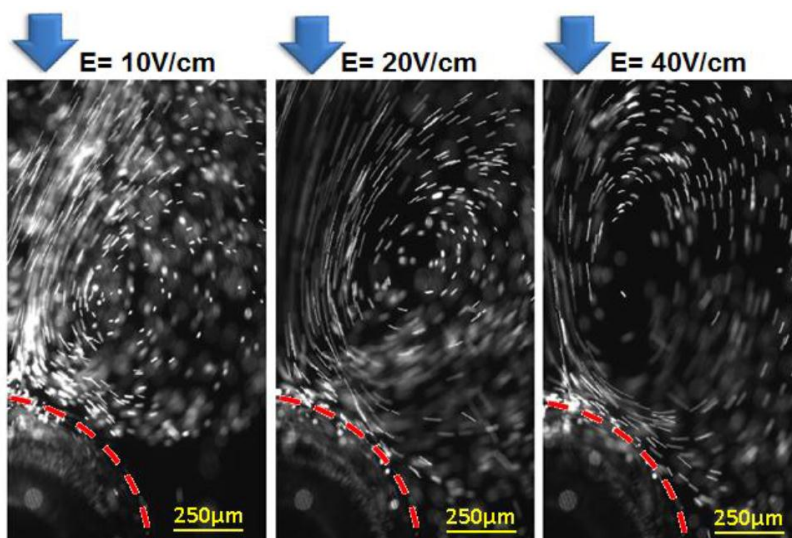
۱۴. Induced-Charge Electrokinetic (ICEK)

دقیقی و همکاران [۲۶] برای اولین بار جریان الکتروکنتیک القایی پیرامون یک ذره رسانا در حضور میدان DC تصویربرداری کردند. تصویر یادشده در شکل ۲-۴ نشان داده شده است.



شکل ۲-۴. جریان الکتروکنتیک القایی پیرامون یک ذره رسانا را نشان می دهد. برای به تصویر کشیدن گردابه ها از ذرات فلورسنت با قطر $1.9 \mu m$ استفاده شده است. میدان الکتریکی با اندازه $E = 40 (V/cm)$ از چپ به راست به سیستم اعمال می شود. خط چین نشان داده شده مرز ذره رسانا را نشان می دهد. (منبع: دقیقی و همکاران [۲۶])

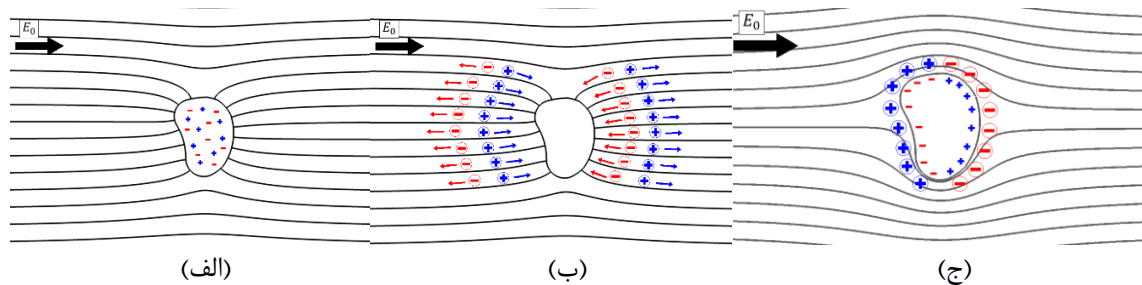
یکی دیگر از ویژگی های بارز الکتروکنتیک القایی وابستگی آن به میدان الکتریکی اعمالی است. در الکتروکنتیک القایی می توان با تغییر میدان الکتریکی اعمالی، اندازه زتا پتانسیل القایی روی سطح جسم رسانا را تغییر داد. شکل ۲-۵ تغییر الگوی گردابه های پیرامون یک ذره رسانا را همزمان با تغییر میدان الکتریکی اعمالی به آن نشان می دهد. با افزایش میدان الکتریکی اعمالی، گردابه های بزرگ تری با قدرت بیشتر پیرامون ذره رسانا ایجاد می شوند [۲۶].



شکل ۲-۵. تغییر الگوی گردابه ها را با توجه به میدان الکتریکی اعمالی به سیستم نشان می دهد. خط چین نشان داده شده در شکل مرز ذره رسانا را نشان می دهد. (منبع: دقیقی و همکاران [۲۶])

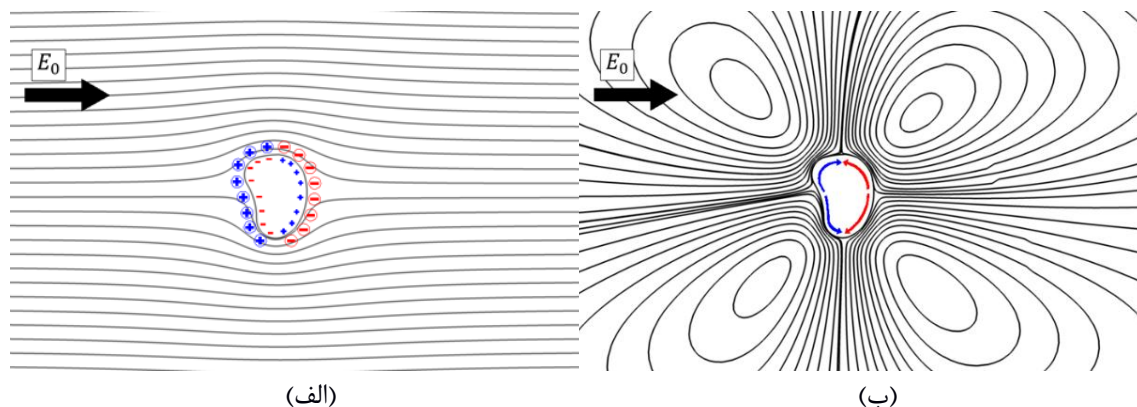
۲-۴-۱- چگونگی القاشده بار روی سطح جسم رسانا

فرض کنید یک ذره رسانا با هندسه دلخواه که از نظر بار الکتریکی خنثی است، درون محلول الکترولیت قرار گیرد. بلافاصله پس از آنکه میدان الکتریکی اعمال شود، خطوط میدان الکتریکی از داخل جسم رسانا عبور می‌کنند و سبب حرکت بارهای داخلی جسم رسانا به سمت سطح رسانا می‌شوند (مطابق شکل ۲-۶ الف). این جابجایی در مدت زمان بسیار کوتاه (کمتر از 10^{-4} s) اتفاق می‌افتد، در این فاصله کوتاه، بارهای منفی به سمت سطحی از ذره که نزدیک به ولتاژ بیشتر است حرکت می‌کنند، و در مقابل بارهای مثبت نیز در خلاف جهت بارهای منفی جابجا می‌شوند (مطابق شکل ۲-۶ ب). در نتیجه تغییر آرایش بارها، روی سطح جسم رسانا یک میدان الکتریکی محلی ایجاد می‌شود که مانند یک لایه محافظ از ورود میدان الکتریکی به داخل جسم رسانا جلوگیری می‌کند (مطابق شکل ۲-۶ ج).



شکل ۲-۶. فرآیند باردار شدن یک ذره رسانا را در حضور میدان الکتریکی یکنواخت نشان می‌دهد. (الف) خطوط میدان الکتریکی اولیه را نشان می‌دهد که از یک ذره رسانا می‌گذرد. (ب) بارهای القاشده روی سطح رسانا، یون‌های با بار مخالف خود را از داخل محلول الکترولیت جذب می‌کنند. (ج) میدان الکتریکی حالت پایدار و لایه الکتریکی دوگانه را پیرامون یک ذره رسانا با شکل دلخواه نشان می‌دهد.

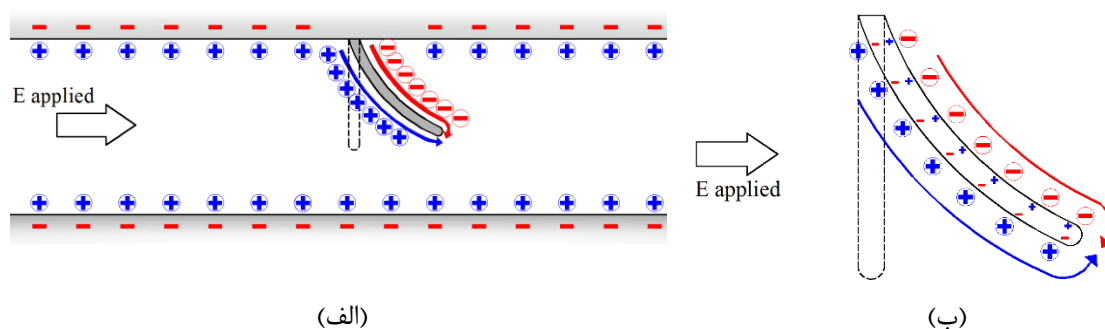
بارهای القاشده روی سطح جسم رسانا یون‌های با بار مخالف خود را از داخل محلول الکترولیت جذب می‌کنند و به این ترتیب لایه الکتریکی دوگانه پیرامون ذره رسانا شکل می‌گیرد. با شکل‌گیری لایه الکتریکی دوگانه ذره مشابه یک جسم عایق عمل می‌کند و خطوط میدان الکتریکی اجازه نمی‌یابند تا از داخل جسم رسانا عبور کنند. شکل ۲-۷ خطوط میدان الکتریکی و میدان جریان سیال را پیرامون یک ذره رسانا با هندسه دلخواه در حالت پایدار نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، پس از القا شدن بار روی سطح جسم رسانا، چهار جریان الکتروکنتیک القایی در جهت مخالف یکدیگر روی سطح جسم رسانا ایجاد می‌شود که در نتیجه آن چهار گردابه پیرامون ذره رسانا به وجود می‌آید،



شکل ۷-۲. (الف) خطوط میدان الکتریکی و (ب) خطوط جریان الکتروکنیتک القایی پیرامون یک ذره رسانا با هندسه دلخواه در حالت پایدار نشان می‌دهد.

۲-۴-۲- ارائه اصول روش عددی برای محاسبه زتا پتانسیل القایی

برای آنکه بتوان حرکت یک لینک رسانای تغییر شکل‌پذیر را شبیه‌سازی نمود، می‌بایست توزیع زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک رسانا مشخص باشد. با مشخص بودن توزیع زتا پتانسیل القایی و نازک فرض نمودن لایه الکتریکی دوگانه القاشده پیرامون سطح رسانا، می‌توان با استفاده از شرط مرزی سرعت لغزشی هلمهولتز-اسمولوچوسکی جریان الکتروکنیتک القایی پیرامون یک جسم رسانا را شبیه‌سازی نمود. شکل ۸-۲ توزیع زتا پتانسیل القایی و جهت سرعت لغزشی ناشی از این زتا پتانسیل القایی را روی سطح لینک رسانا نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود به دلیل آنکه زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک رسانا غیریکنواخت است و علامت بار القاشده روی سطح لینک تغییر می‌کند بنابراین دو سرعت لغزشی در خلاف جهت یکدیگر روی سطح لینک رسانا ایجاد می‌شود که در نتیجه آن‌ها دو گردابه با جهت چرخش مخالف یکدیگر پیرامون لینک رسانا ایجاد می‌شوند.



شکل ۸-۲. طرح ساده‌ای از توزیع زتا پتانسیل القایی و سرعت لغزشی متناظر با آن را روی سطح یک لینک رسانا نشان می‌دهد. (الف) توزیع یون داخل میکروکانال با لینک رسانا (ب) توزیع بار القاشده روی سطح لینک رسانا و سرعت لغزشی متناظر با این توزیع بار است.

در این بخش روش عددی واو و لی [۲۲] برای محاسبه زتا پتانسیل القایی روی سطح یک جسم رسانا تشریح می‌شود. با استفاده از این روش می‌توان زتا پتانسیل القایی روی هر سطح کاملاً رسانا را در حالت پایدار محاسبه نمود. اصول حاکم بر این روش به شرح زیر است.

یکی از معادله‌های بنیادین برای محاسبه توزیع زتا پتانسیل الکتریکی در یک ناحیه دی‌الکتریک معادله پواسون است.

$$\nabla^2 \phi_e = \frac{\rho_e}{\epsilon \epsilon_0} \quad (۳-۲)$$

در این رابطه ϕ_e توزیع پتانسیل الکتریکی است. ϵ و ϵ_0 ثابت دی‌الکتریک در خلأ و در ناحیه حل می‌باشند. همچنین ρ_e چگالی بار آزاد در ناحیه حل است. در صورتی که فرض شود محلول سیالی خالص است و از نظر بار الکتریکی خنثی است، در این صورت $\rho_e \approx 0$ خواهد بود و معادله پواسون به صورت رابطه زیر درمی‌آید.

$$\nabla^2 \phi_e = 0 \quad (۴-۲)$$

بنابراین برای یافتن توزیع زتا پتانسیل در ناحیه حل کافی است معادله لاپلاس حل شود. از آنجاکه بارهای القاشده روی سطح رسانا دارای علامت مخالف نسبت به یون‌های مجاور خود می‌باشند، بنابراین میدان الکتریکی القایی روی سطح مشترک لینک رسانا - الکترولیت در جهت مخالف میدان الکتریکی خارجی خواهد بود، ضمن آنکه اندازه این دو میدان الکتریکی با یکدیگر برابر است.

$$|\vec{E}_{induced}| = |\vec{E}_{applied}| \quad (۵-۲)$$

$$\vec{E}_{induced} = -\vec{E}_{applied} \quad (۶-۲)$$

رابطه (۶-۲) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$\nabla \zeta_{induced} = -\nabla \phi_e \quad (۷-۲)$$

در رابطه (۷-۲) $\zeta_{induced}$ زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک رسانا است. ϕ_e پتانسیل الکتریکی ناشی از میدان الکتریکی خارجی روی سطح لینک رسانا است، مقدار پتانسیل الکتریکی با توجه به حل معادله لاپلاس مطابق رابطه (۴-۲) محاسبه می‌شود. از آنجاکه لینک در ابتدا بی‌بار فرض شده بود بنابراین

انتگرال بار القاشده روی سطح لینک رسانا نیز می‌بایست صفر باشد. (به عبارت دیگر لینک رسانا پس از تشکیل لایه الکتریکی دوگانه پیرامون آن همچنان بی‌بار باقی می‌ماند)

$$\oint_S \zeta_{induced} ds = 0 \quad (8-2)$$

در این رابطه S سطح لینک رسانا است که تحت اعمال میدان الکتریکی قرار گرفته است. اما در صورتی که لینک رسانا دارای بار اولیه باشد، زتا پتانسیل نهایی در حالت پایدار با استفاده از مجموع زتا پتانسیل اولیه و زتا پتانسیل القایی محاسبه می‌شود.

با انتگرال گیری مستقیم از رابطه (۷-۲) می‌توان زتا پتانسیل القاشده روی سطح لینک رسانا را به صورت زیر محاسبه کرد.

$$\zeta_{induced} = -\phi_e + \phi_c \quad (9-2)$$

در این رابطه ϕ_c ، ثابت تصحیح پتانسیل الکتریکی است. این مقدار ثابت با جایگذاری رابطه (۹-۲) در رابطه (۸-۲) به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\phi_c = \frac{\oint_S \phi_e dS}{S} \quad (10-2)$$

در این رابطه S سطح لینک رسانا است. زتا پتانسیل القاشده روی سطح رسانا با توجه به رابطه (۹-۲) و (۱۰-۲) محاسبه می‌شود. با فرض ناچیز بودن لایه الکتریکی دوگانه القاشده پیرامون لینک رسانا، می‌توان از شرط مرزی سرعت لغزشی هلمهولتز-اسمولوچوسکی استفاده کرد [۵۷] و جریان الکتروکنتیک القایی پیرامون یک لینک رسانا را شبیه سازی نمود.

$$\vec{U}_i = -\frac{\epsilon \epsilon_0 \zeta_{induced}}{\mu} \vec{E}_{applied} \quad (11-2)$$

با استفاده از روش عددی ارائه شده در این بخش می‌توان زتا پتانسیل القایی روی سطح جسم رسانا با هندسه دلخواه را محاسبه نمود. روش‌های تحلیلی محدودی وجود دارند که تنها قادرند زتا پتانسیل القایی را روی اجسام رسانا با هندسه ساده محاسبه کند [۵۸]. از این رو در این تحقیق از روش عددی واو و لی برای محاسبه زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک رسانا استفاده می‌شود.

۲-۵- خلاصه و نتیجه‌گیری

در این فصل مفاهیمی مانند لایه الکتریکی دوگانه و زتا پتانسیل توضیح داده شده، همچنین دوشاخه مهم از الکتروکنیتیک به نام‌های الکتروکنیتیک کلاسیک و الکتروکنیتیک القایی معرفی شده‌اند و تفاوت آن‌ها با یکدیگر بررسی شده است. همان‌طور که در این فصل اشاره شده مهم‌ترین اختلاف میان الکتروکنیتیک القایی و الکتروکنیتیک کلاسیک در چگونگی توزیع بار روی سطح جسم رسانا و نارسانا است. در الکتروکنیتیک کلاسیک توزیع بار روی سطح جسم نارسانا یکنواخت و ثابت است اما در الکتروکنیتیک القایی، توزیع بار القاشده روی سطح جسم رسانا غیریکنواخت و وابسته به میدان الکتریکی اعمالی است. به دلیل توزیع غیریکنواخت بار در الکتروکنیتیک القایی، جهت سرعت لغزشی روی سطح یک جسم رسانا تغییر می‌کند و به این ترتیب گردابه‌هایی پیرامون جسم رسانا ایجاد می‌شوند. این گردابه‌ها مهم‌ترین مشخصه جریان الکتروکنیتیک القایی محسوب می‌شوند. در این فصل فرآیند باردارشدن یک جسم رسانا با هندسه دلخواه بررسی شده و همچنین اصول حاکم بر روش عددی واو و لی [۲۲] برای محاسبه زتا پتانسیل القایی روی سطح جسم رسانا بیان شده است.

فصل سوم

معادلات حاکم و شرایط مرزی

فصل ۳- روش حل:

معادلات حاکم و شرایط مرزی

همان‌طور که در فصل دوم توضیح داده شد، در صورت اعمال میدان الکتریکی به یک جسم رسانا که در تماس با محلول الکترولیت قرار دارد، روی سطح رسانا بار القا می‌شود. بار القایی روی سطح رسانا دارای توزیع غیریکنواخت بوده و علامت بار روی سطح جسم رسانا تغییر می‌کند، در نتیجه این تغییر علامت بار، جهت سرعت الکترواسموتیک لغزشی روی سطح رسانا نیز تغییر می‌کند و گردابه‌هایی اطراف جسم رسانا ایجاد می‌شوند.

در این فصل معادلات حاکم بر حرکت یک لینک رسانای تغییر شکل‌پذیر بررسی می‌شود، یک انتهای لینک رسانا روی دیواره بالایی کانال ثابت‌شده و انتهای دیگر آن می‌تواند آزادانه در داخل کانال جابجا شود و دو جریان سیال با غلظت‌های مختلف به واسطه جریان الکترواسموتیک از طریق دهانه ورودی کانال به سمت لینک پمپ می‌شوند. لینک رسانا به واسطه عبور جریان سیال از روی آن و همچنین گردابه‌های جریان الکتروکنتیک القایی، تغییر شکل می‌دهد و از موقعیت اولیه خود منحرف می‌شود. برای مشخص شدن حرکت لینک و سایر پارامترهای حاکم بر این فیزیک می‌بایست معادلات کوپله شده (۱) پتانسیل الکتریکی (۲) سرعت سیال (۳) تقابل سیال و لینک (۴) توزیع غلظت حل شوند. جدول ۳-۱ فهرست فرضیات انجام‌شده برای مدل‌سازی حرکت لینک رسانای تغییر شکل‌پذیر را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۱. فرضیات انجام‌شده برای شبیه‌سازی حرکت لینک رسانای تغییر شکل‌پذیر.

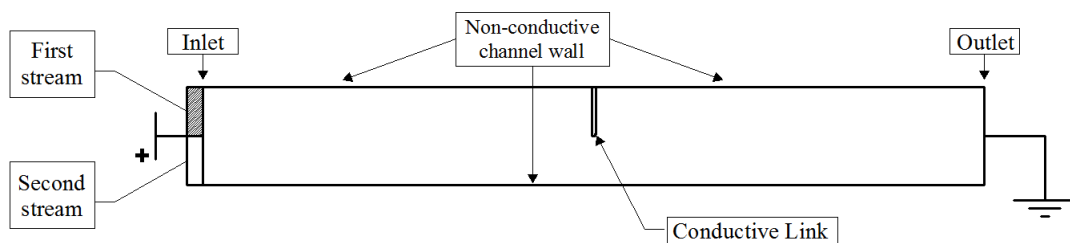
فرض شده است که توزیع یون‌ها در خارج لایه الکتریکی دوگانه یکنواخت است و چگالی بار محلی در این ناحیه صفر است، بنابراین برای محاسبه پتانسیل الکتریکی می‌توان از معادله لاپلاس استفاده کرد.
میدان الکتریکی DC به سیستم اعمال می‌شود.
پروسه باردارشدن لینک رسانا بسیار سریع (حدود 10^{-4} s) اتفاق می‌افتد و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد.
سرتاسر لینک خاصیت قطبی شوندگی یکنواخت دارد.
سیال نیوتونی و غیرقابل تراکم در داخل میکروکانال در جریان است.
از رابطه هلمهولتز-اسمولوچوسکی برای محاسبه سرعت لغزشی روی دیواره کانال و سطح لینک استفاده می‌شود.
پس از تشکیل لایه دوگانه الکتریکی، دیگر بار روی سطح لینک القا نمی‌شود.
طول دبای (κ^{-1}) در مقایسه با ابعاد لینک و کانال ناچیز است.

طول دبی^{۱۵} (κ^{-1}) بیانگر ضخامت لایه الکتریکی دوگانه است و مطابق رابطه (۱-۳) محاسبه می شود.

$$\kappa^{-1} = \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 K_B T}{2 n_0 (Ze)^2}} \quad (1-3)$$

در این رابطه K_B ثابت بولتزمن است، T دمای محلول الکترولیت و n_0 غلظت یون های موجود در محلول می باشد. می بایست توجه نمود که طول دبی وابسته به خواص سطح جامد نمی باشد بلکه وابسته به خصوصیات سیال از جمله غلظت یون های موجود و مقدار والانس یون های محلول Z می باشد. به عنوان نمونه طول دبی برای محلول KCL با غلظت $10^{-3} M$ و $10^{-6} M$ به ترتیب 9.6 nm و 304.0 nm است، برای آب خالص با غلظت یون $10^{-2} M$ و $10^{-6} M$ طول دبی به ترتیب 3 nm و 304.0 nm است.

فرآیند قطبی شدن لینک رسانا در زمان کوتاهی اتفاق می افتد و با تشکیل لایه دوگانه الکتریکی، لینک رسانا مشابه یک عایق عمل می کند و خطوط میدان الکتریکی نمی توانند از داخل آن عبور کنند. می بایست توجه داشت که زتا پتانسیل القاشده روی سطح لینک رسانا یکنواخت و ثابت نیست بلکه وابسته به میدان الکتریکی اعمالی است و از نقطه ای به نقطه ای دیگر روی سطح لینک تغییر می کند. شکل ۱-۳ هندسه مطالعه شده در این پایان نامه را نشان می دهد. در این هندسه یک لینک رسانای تغییر شکل پذیر بر روی دیواره بالایی کانال نصب شده است و این لینک تحت تاثیر جریان سیال که از داخل عبور می کند تغییر شکل داده و از موقعیت اولیه خود منحرف می شود. در بررسی میکرومیکسر با استفاده از لینک رسانا فرض می شود دو جریان با غلظت های مولی متفاوت از ورودی کانال به داخل سیستم راه می یابند و این دو جریان پس از مخلوط شدن از سمت دیگر کانال سیستم را ترک می کنند.



شکل ۱-۳. طرح ساده ای از میکروکانال را به همراه لینک رسانای تغییر شکل پذیر، نشان می دهد.

^{۱۵}. Debye length

۳-۱- توزیع پتانسیل الکتریکی

با استفاده از معادله پواسون می توان توزیع پتانسیل الکتریکی را در ناحیه حل به دست آورد.

$$\nabla^2 \phi_e = \frac{\rho_e}{\epsilon_0 \epsilon} \quad (۲-۳)$$

در این رابطه ϕ_e پتانسیل الکتریکی ناشی از میدان الکتریکی خارجی است، همچنین ϵ_0 و ϵ به ترتیب گذردهی خلأ و ثابت دی الکتریک می باشند. ρ_e چگالی بار آزاد محلول است. در این مطالعه فرض شده که چگالی بار خالص محلول صفر است و محلول از نظر بار الکتریکی خنثی است بنابراین $\rho_e \approx 0$ خواهد بود و معادله پواسون تبدیل به معادله لاپلاس می شود.

$$\nabla^2 \phi_e = 0 \quad (۳-۳)$$

بنابراین پتانسیل الکتریکی ϕ_e از طریق حل معادله لاپلاس محاسبه می شود. شرایط مرزی لازم برای حل پتانسیل الکتریکی در ادامه بیان شده است.

$$\vec{n} \cdot \vec{\nabla} \phi = 0 \quad \text{روی دیواره کانال و سطح لینک} \quad (۱-۴-۳)$$

$$\phi = \phi_0 \quad \text{روی دیواره ورودی کانال} \quad (۲-۴-۳)$$

$$\phi = 0 \quad \text{روی دیواره خروجی کانال} \quad (۳-۴-۳)$$

در اینجا $\vec{n}$ بردار یکه نرمال روی سطح جامد است که به سمت سیال اشاره می کند.

۳-۲- توزیع سرعت سیال

فرض شده است که سیال تراکم ناپذیر و نیوتونی در داخل کانال جریان دارد و برای محاسبه توزیع سرعت جریان سیال از معادلات پیوستگی و ناویراستوکس مطابق روابط زیر استفاده می شود.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{U} = 0 \quad (۵-۳)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{U} \cdot \vec{\nabla} \vec{U} \right] = -\vec{\nabla} p + \mu \nabla^2 \vec{U} + \vec{E} \rho_e \quad (۶-۳)$$

در این روابط μ و ρ به ترتیب لزجت و چگالی سیال می‌باشند، همچنین $\vec{U}$ سرعت سیال و $\vec{\nabla}p$ گرادیان فشار است. از آنجاکه عدد رینولدز در جریان‌های میکرو بسیار کوچک است ($Re \ll 1$)، بنابراین می‌توان ترم کانوکشن $\vec{U} \cdot \vec{\nabla} \vec{U}$ در سمت چپ معادله مومنوم را حذف کرد، از طرفی چگالی بار تنها روی دیواره کانال و سطح لینک مقداری غیر صفر است و در سایر نقاط صفر است، بنابراین می‌توان شرط مرزی سرعت لغزشی را جایگزین ترم نیروی حجمی نمود و این ترم را از معادله ناویراستوکس حذف نمود به این ترتیب معادله (۳-۶) به فرم زیر درمی‌آید.

$$\rho \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} = -\vec{\nabla}p + \mu \nabla^2 \vec{U} \quad (۷-۳)$$

شرایط مرزی برای محاسبه توزیع سرعت سیال به صورت زیر است.

$$\vec{n} \cdot \vec{\nabla} \vec{U} = 0 \quad \text{در ورودی و خروجی کانال} \quad (۱-۸-۳)$$

$$\vec{U}_{slip-W} = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon \zeta_W}{\mu} \vec{E} \quad \text{روی دیواره میکرو کانال} \quad (۲-۸-۳)$$

$$\vec{U}_{slip-N/C} = \vec{V}_L - \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \zeta_{L/NC}}{\mu} \vec{E} \quad \text{روی سطح لینک نارسانا} \quad (۳-۸-۳)$$

$$\vec{U}_{slip-C} = \vec{V}_L - \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \zeta_{induced}}{\mu} \vec{E} \quad \text{روی سطح لینک رسانا} \quad (۴-۸-۳)$$

برای محاسبه توزیع سرعت فرض شده که جریان سیال تنها به واسطه پدیده الکتروکنیتیک ایجاد می‌شود و گرادیان فشار در طول کانال وجود ندارد. در این روابط میدان الکتریکی محلی بر حسب رابطه $\vec{E} = -\vec{\nabla}\phi_e$ محاسبه می‌شود. ζ_W و $\zeta_{L/NC}$ به ترتیب زتا پتانسیل روی دیواره نارسانای کانال و روی لینک نارسانا می‌باشند. همچنین $\zeta_{induced}$ زتا پتانسیل القاشده روی سطح لینک رسانا است (زتا پتانسیل القایی با توجه به رابطه (۲-۹) محاسبه می‌شود). $\vec{V}_L$ سرعت انتقالی لینک است. با توجه به آنکه حرکت لینک وابسته به زمان است بنابراین نمی‌توان ترم وابسته به زمان $\left(\frac{\partial \vec{U}}{\partial t}\right)$ از معادله ناویراستوکس حذف نمود.

۳-۳- حرکت لینک

حرکت لینک تحت تأثیر دو عامل است. عامل اول نیروی الکترواستاتیک ($\vec{F}_E$) است، این نیرو بلافاصله پس از اعمال میدان الکتریکی به بارهای آزاد داخل لینک رسانا وارد می‌شود. عامل دوم نیروی هیدرودینامیک ($\vec{F}_h$) است که در نتیجه عبور جریان سیال از روی سطح لینک ایجاد می‌شود؛ بنابراین نیروی خالص وارد شده به لینک را می‌توان به صورت زیر بیان کرد.

$$\vec{F}_{net} = \vec{F}_E + \vec{F}_h \quad (۹-۳)$$

در این رابطه $\vec{F}_E$ و $\vec{F}_h$ به ترتیب نیروی الکترواستاتیک و نیروی هیدرودینامیک وارد بر لینک می‌باشند. با توجه به اینکه بار خالص القاشده روی سطح لینک رسانا صفر است بنابراین مقدار نیروی الکترواستاتیک وارد بر لینک رسانا نیز صفر می‌شود، در نهایت نیروی خالص وارد بر لینک به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$F_{net} = \vec{F}_h \quad (۱۰-۳)$$

$$\vec{F}_{net} = \vec{F}_h = \vec{G} - \oint \sigma_L \cdot \vec{n} dS = (\rho - \rho_L)gV_L - \oint \sigma_L \cdot \vec{n} dS \quad (۱۰-۲)$$

در اینجا g شتاب جاذبه و $\vec{G}$ نیروی حجمی وارد بر لینک است. همچنین V_L و ρ_L به ترتیب حجم و چگالی لینک می‌باشند. تانسور تنش با σ_L نشان داده شده و با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\sigma_L = -p\vec{I} + \mu \left[(\vec{\nabla}\vec{U}) + (\vec{\nabla}\vec{U})^T \right] \quad (۱۱-۳)$$

در اینجا $\vec{I}$ ماتریس همانی است و معادله حاکم بر حرکت لینک را می‌توان بر اساس قانون دوم نیوتون به صورت زیر نوشت.

$$m_L \frac{d\vec{V}_L}{dt} = \vec{F}_{net} \quad (۱۲-۳)$$

در این رابطه m_L جرم لینک و $\vec{V}_L$ سرعت انتقالی مرکز جرم لینک است که با توجه به بردار جابجایی این نقطه به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\frac{d\vec{X}_L}{dt} = \vec{V}_L \quad (۱۳-۳)$$

شرایط اولیه برای حرکت لینک و سرعت سیال نیز به صورت زیر است.

$$\vec{V}_L|_{t=0} = 0 \quad , \quad \vec{U}|_{t=0} = 0 \quad (۱۴-۳)$$

۳-۴- توزیع غلظت

برای محاسبه توزیع غلظت بین چند جریان از رابطه زیر استفاده می شود.

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \vec{U} \cdot \vec{\nabla} C_i = D_i \nabla^2 C_i \quad , \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (۱۵-۳)$$

در این رابطه C_i غلظت جریان i ام است و D_i ضریب نفوذ مربوط به جریان i ام است. شرایط مرزی و اولیه موردنیاز برای حل معادله غلظت در زیر بیان شده است.

$$C = C_i \quad \text{روی دیواره ورودی کانال} \quad (۱۶-۳)$$

$$\left. \frac{\partial C_i}{\partial n} \right|_{t \geq 0} = 0 \quad \text{روی تمامی دیواره ها} \quad (۲-۱۶-۳)$$

$$C_i|_{t=0} = 0 \quad \text{در سرتاسر میکرو کانال و در لحظه آغازین} \quad (۳-۱۶-۳)$$

۳-۵- خلاصه

در این فصل معادلات حاکم همراه با شرایط مرزی و شرایط اولیه موردنیاز برای حرکت لینک رسانای تغییر شکل پذیر ارائه شده است. با استفاده از این معادلات و شرایط مرزی حاکم بر آنها یک مدل ریاضی خواهیم داشت که قادر است تقابل لینک و سیال را شبیه سازی کند. برای حل این مدل ریاضی می بایست از یک روش عددی استفاده کرد تا بتوان پتانسیل الکتریکی، سرعت سیال، سرعت لینک و توزیع غلظت را در داخل میکرو کانال محاسبه نمود.

در فصل بعد، نتایج مربوط به شبیه سازی حرکت یک لینک رسانا در داخل کانال ارائه می شود و اثر پارامترهای مختلف از جمله میدان الکتریکی DC، اندازه و نحوه قرارگیری لینک و چگونگی تقابل دو لینک با یکدیگر مطالعه می شود.

فصل چهارم:

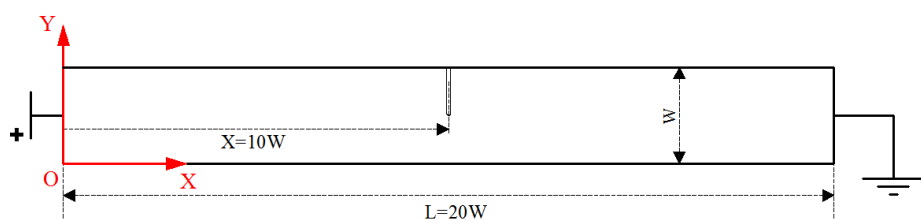
حرکت لینک رسانای تغییر شکل پذیر

حرکت لینک رسانای تغییر شکل پذیر

در فصل دوم پدیده الکتروکنتیک غیرخطی به همراه ویژگی‌های منحصربه‌فرد آن بیان شد. در فصل سوم معادلات حاکم و شرایط مرزی موردنیاز برای شبیه‌سازی حرکت یک لینک رسانای تغییر شکل پذیر ارائه شد. در این فصل ابتدا صحت مدل‌سازی با نتایج کارهای پیشین مقایسه می‌شود، سپس نتایج حاصل از مدل‌سازی یک لینک رسانای تغییر شکل پذیر ارائه خواهد شد. در این فصل حرکت لینک رسانا در سه وضعیت عمودی، افقی و مایل موردبررسی قرار می‌گیرد تا به نحو مطلوبی تمام حالت‌های ممکن قرارگیری یک لینک رسانا پوشش داده شود. در هر یک از این سه وضعیت، چگونگی توزیع زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک بیان شده است. در بررسی توزیع زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک، برای اولین بار به مفهوم نقطه سکون اشاره شده است. نتایج بررسی نشان می‌دهد که حرکت لینک رسانا وابسته به مکان قرارگیری نقطه سکون روی سطح لینک رسانا است. علاوه بر توزیع زتا پتانسیل القایی اثر پارامترهای دیگری از جمله مدول یانگ لینک، میدان الکتریکی اعمالی و طول لینک بر چگونگی حرکت لینک عمودی بررسی شده است. یکی دیگر از بررسی‌هایی که در این فصل انجام شده مربوط به تأثیر دو لینک عمودی روی یکدیگر می‌باشد، در این بررسی مشاهده شد که دو لینک رسانای عمودی می‌توانند یکدیگر را جذب کنند یا اینکه یکدیگر را دفع نمایند و حرکت آن‌ها وابسته به جهت چرخش گردابه‌های بین دو لینک می‌باشد. در بررسی حرکت لینک افقی، اثر دیواره کانال بر نحوه حرکت لینک نیز مطالعه شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که همواره دیواره کانال لینک رسانای افقی مجاور خود را دفع می‌کند، همچنین مشخص شد که با نزدیک شدن لینک به دیواره کانال، نیروی دافعه بیشتری به لینک افقی وارد می‌شود که در نتیجه آن لینک افقی از دیواره کانال دور می‌شود. در بررسی حرکت لینک مایل مشاهده شد که با توجه به زاویه قرارگیری لینک مایل نسبت به دیواره کانال، این لینک در جهت میدان الکتریکی یا در خلاف جهت میدان الکتریکی حرکت خواهد کرد. بررسی‌های یادشده به همراه جزئیات هرکدام و دلیل ایجاد آن‌ها در ادامه بیان شده است.

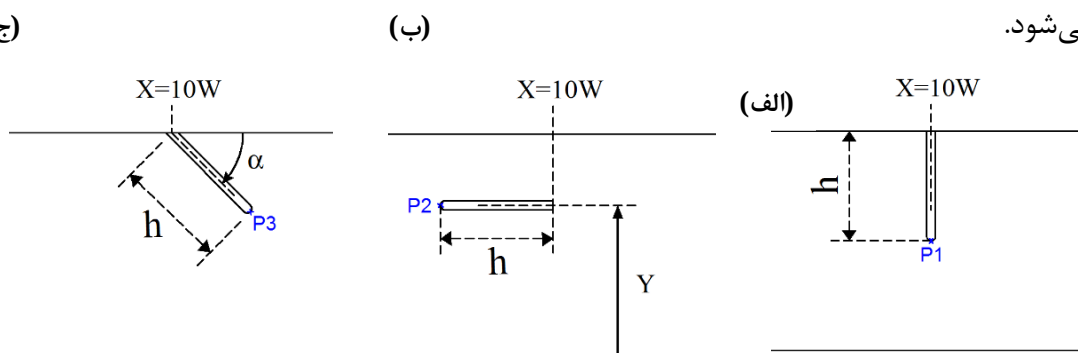
۱-۴- هندسه تعریف شده و پارامترهای حاکم بر ناحیه محاسباتی

در این فصل حرکت لینک رسانای تغییر شکل پذیر به صورت دوبعدی شبیه سازی شده است. با توجه به شکل ۱-۴ ناحیه حل شامل یک کانال مستقیم و یک لینک رسانای تغییر شکل پذیر می باشد. کانال دوبعدی دارای عرض $W = 250 \mu m$ و طول $L = 20W$ است، در وسط این کانال یک لینک رسانای تغییر شکل پذیر جای گرفته است، همچنین دو الکتروود در ابتدا و انتهای کانال قرار داده شده که میدان الکتریکی ثابت DC را از چپ به راست در داخل کانال ایجاد می کنند. دو انتهای کانال به دو منبع بزرگ از محلول الکترولیت متصل است به این ترتیب هیچ گونه گرادیان فشار خارجی به سیستم اعمال نمی شود



شکل ۱-۴. هندسه کانال به همراه لینک جای گرفته روی دیواره بالایی کانال به تصویر کشیده شده است.

در این فصل حرکت لینک رسانا در سه وضعیت عمودی، افقی و مایل مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به شکل ۲-۴ موقعیت و اندازه لینک در وضعیت عمودی با استفاده از پارامترهای (X, h) ، در وضعیت افقی با (X, Y, h) و در وضعیت مایل با (X, α, h) مشخص می شود. در وضعیت عمودی، افق و مایل یک نقطه مشخص از لینک به ترتیب با نام $P1$ ، $P2$ و $P3$ نام گذاری شده است. در ادامه برای بیان میزان جابجایی لینک و چگونگی توزیع زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک از این سه نقطه استفاده می شود.



شکل ۲-۴. سه وضعیت قرارگیری لینک را نشان می دهد. در هر یک از این سه وضعیت پارامترهایی برای تعیین ابعاد و اندازه لینک استفاده شده. این پارامترها (الف) برای لینک عمودی (X, h) ، (ب) برای لینک افقی (X, Y, h) و (ج) برای لینک مایل (X, α, h) است.

خصوصیات فیزیکی محلول الکترولیت و ثوابت بکار رفته در مدل سازی لینک رسانا در جدول ۴-۱ بیان شده است. مدل ریاضی ارائه شده برای شبیه سازی حرکت لینک رسانا، توسط نرم افزار تجاری کامسول 3.5 a حل شده است. این نرم افزار با استفاده از روش مش متحرک ALE قادر است، تقابل بین لینک و سیال را با استفاده از معادلات کوپله شده بین آنها شبیه سازی کند.

جدول ۴-۱. ثوابت مورد استفاده در مدل سازی عددی را بیان می کند.

80	ثابت دی الکتریک، ϵ
8.854×10^{-12}	گذردهی خلاء، $\epsilon_0 (C/V.m)$
0.9×10^{-3}	لزجت سیال، $\mu (kg/m.s)$
998	چگالی سیال، $\rho (kg/m^3)$
-50	زتا پتانسیل روی دیواره نارسانای کانال، $\zeta_w (mV)$
1	مدول یانگ لینک، $M_{ref} (kPa)$
250	عرض کانال، $W (\mu m)$
20W	طول کانال، L
0.04W	پهنای لینک، W

نتایج ارائه شده در این پژوهش برحسب پارامترهای زیر بی بعد شده اند.

$$\bar{\zeta}_i = \frac{\zeta_i}{\zeta_w} \quad \bar{u} = \frac{\bar{u}}{U_{ref}} \quad \bar{x} = \frac{\bar{x}}{W} \quad \bar{t} = \frac{t}{W/U_{ref}}$$

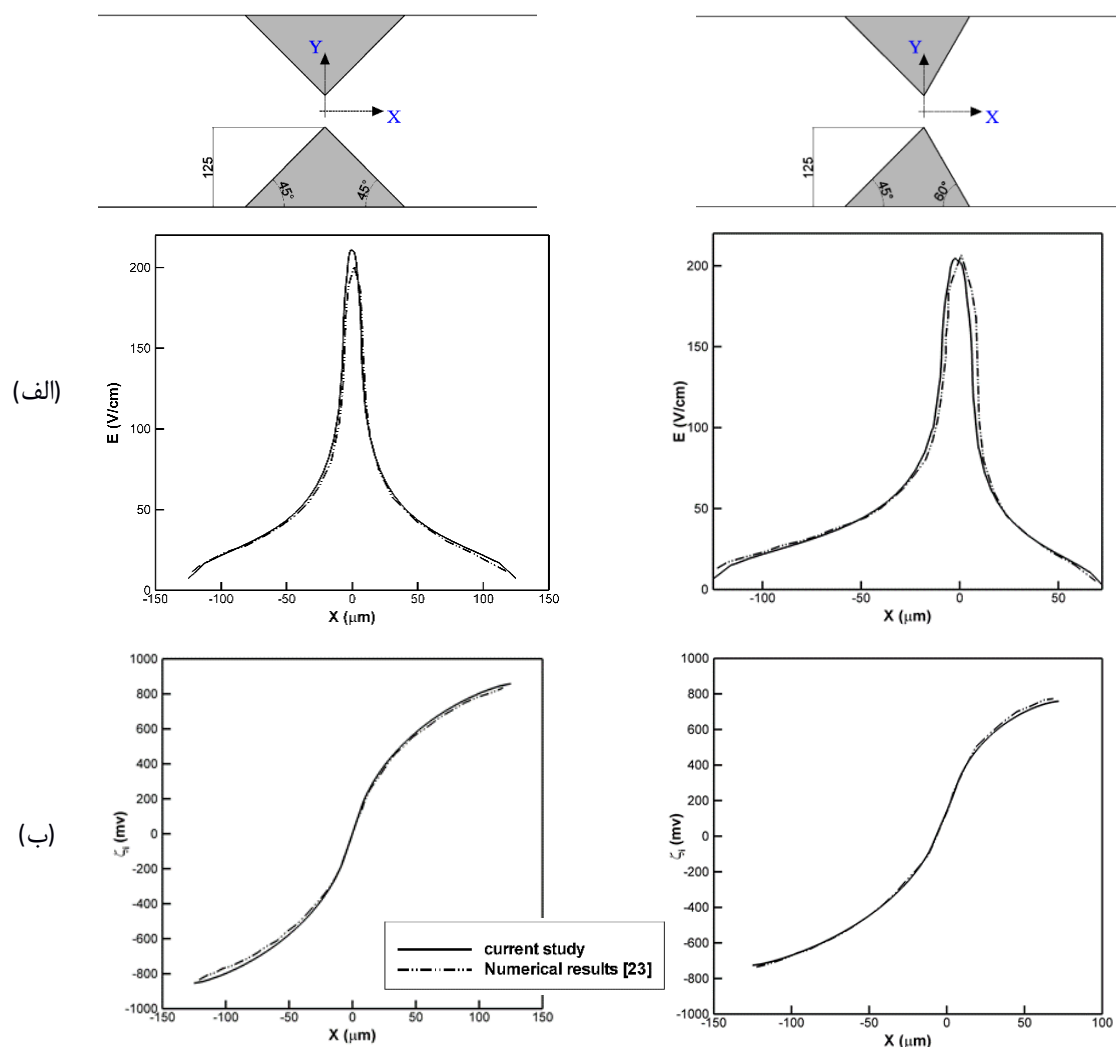
$$\bar{E} = \frac{\bar{E}}{\zeta_w/W} \quad \bar{F} = \frac{F \cdot \mu^2}{\rho (\epsilon \epsilon_0 \zeta_w^2)^2} \quad \bar{\alpha} = \frac{\alpha}{30} \quad \bar{M} = \frac{M}{M_{ref}}$$

در این روابط سرعت مرجع با توجه به رابطه $U_{ref} = \frac{\epsilon \epsilon_0 \zeta_w^2}{\mu}$ محاسبه می شود.

مواد متعددی در ساخت سیستم های میکروفلوئیدیک به کار می روند که علاوه بر خاصیت رسانندگی، قابلیت تغییر شکل نیز دارند. در این بین می توان به ترکیبی از دو پلیمر به نام های سیلگارد ۵۲۷ و سیلگارد ۱۸۴ (Sylgrd 527, Sylgard 184) اشاره کرد. با ترکیب این دو پلیمر با درصد وزنی مختلف می توان غشاهایی را تولید نمود که دارای مدول یانگ بین $5 (KPa)$ تا $1.72 (MPa)$ می باشند [۶۰، ۵۹]. سپس با پوشاندن این غشا با یک لایه نازک از نیکل به ضخامت $100 (nm)$ می توان غشایی را تولید نمود که علاوه بر خاصیت رسانندگی، قابلیت تغییر شکل را نیز داشته باشد.

۲-۴- اعتبار سنجی نتایج

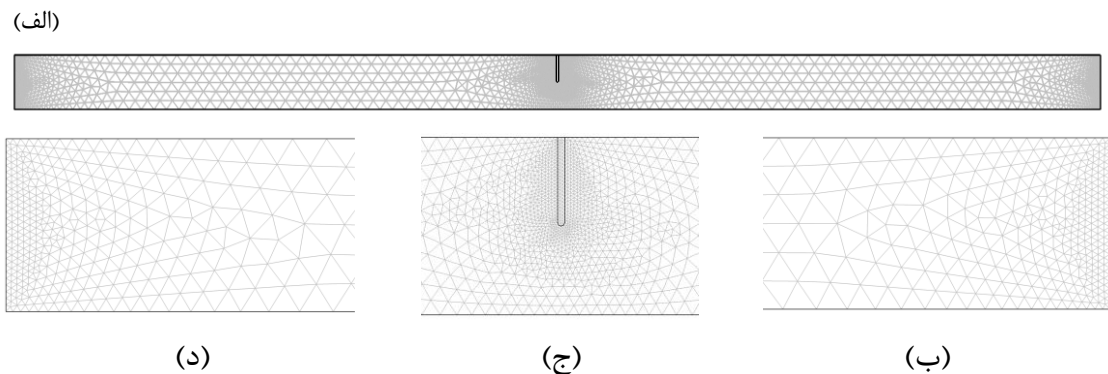
برای اطمینان از درستی مدل سازی جریان الکتروکنتیک غیرخطی، بار دیگر مدل سازی پژوهش واو و لی [۲۳] انجام شد. در این مدل سازی جریان الکتروکنتیک غیرخطی پیرامون مانع های مثلثی متقارن و نامتقارن بررسی شده است. شکل ۳-۴ نمودارهای مربوط به پژوهش واو و لی را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود این نمودارها به نحو مطلوبی با نتایج حاصل از پژوهش اصلی مطابقت دارند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که روش به کاررفته در پژوهش حاضر برای مدل سازی جریان الکتروکنتیک القایی صحیح می باشد.



شکل ۳-۴. نمودارهای به دست آمده از مدل سازی جریان الکتروکنتیک غیرخطی را در کنار نمودارهای پژوهش واو و لی [۲۳] نشان می دهد. در پژوهش یادشده جریان الکتروکنتیک غیرخطی پیرامون مانع های مثلثی متقارن و نامتقارن بررسی شده است. (الف) قدرت میدان الکتریکی و (ب) توزیع زتا پتانسیل القایی روی سطح مانع مثلثی متقارن و نامتقارن را نشان می دهد.

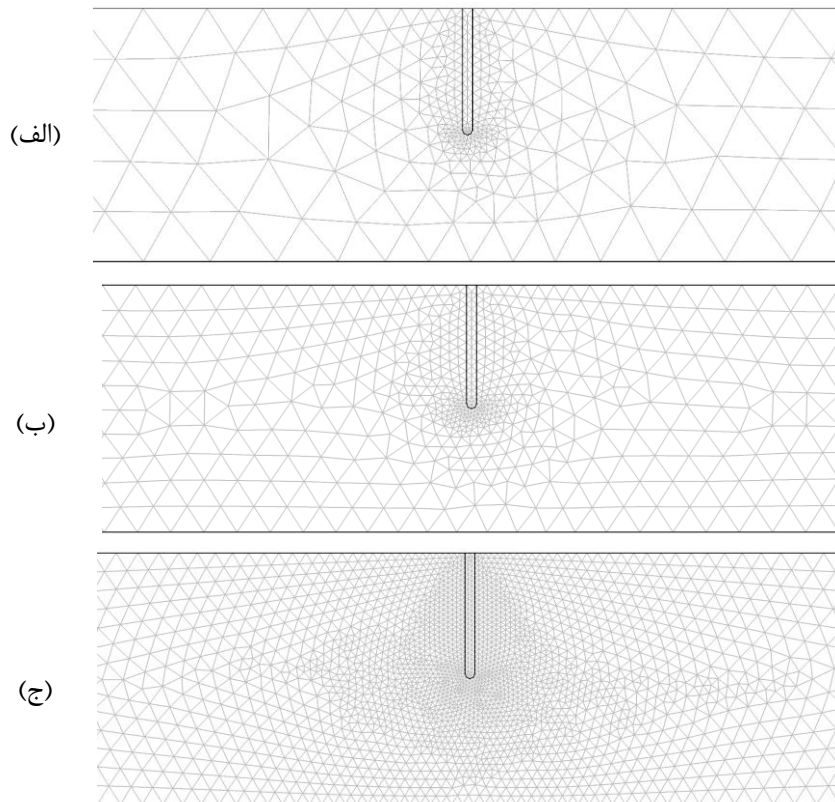
۴-۳- مطالعه استقلال نتایج از شبکه‌بندی ناحیه حل

در این پژوهش از مش بی‌سازمان برای شبکه‌بندی ناحیه حل استفاده شده است. مش بی‌سازمان این اجازه را می‌دهد تا اثر مرزهای دارای انحنا به خوبی در نظر گرفته شود. همان طور که در شکل ۴-۴ نشان داده شده، شبکه بکاررفته در سه ناحیه (ورودی کانال، فصل مشترک جامد و سیال و خروجی کانال) ریزتر می‌باشد که در نتیجه آن دقت بیشتری در این ناحیه‌ها برای حل بدست می‌آید. لازم به یادآوری است که بیشتر نتایج ارائه شده در این پژوهش روی فصل مشترک جامد و سیال و یا خروجی کانال گزارش شده‌اند، بنابراین با ریز کردن مش در این دو ناحیه تلاش شد تا دقت نتایج گزارش شده افزایش یابد.

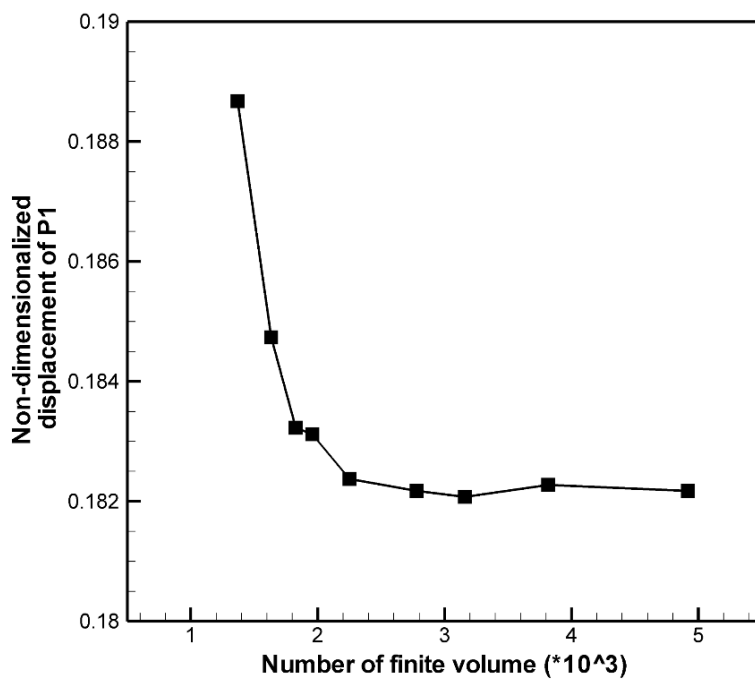


شکل ۴-۴. (الف) شبکه‌بندی انجام‌شده در سراسر ناحیه محاسباتی را نشان می‌دهد. (ب)، (ج) و (د) به ترتیب نمای نزدیکی از شبکه‌بندی انجام‌شده در خروجی، فصل مشترک جامد و سیال و در ورودی کانال را نشان می‌دهد.

شکل ۴-۵، شبکه‌بندی انجام‌شده در فصل مشترک جامد و سیال را از نمای نزدیک به ازای سه تعداد المان مختلف نشان می‌دهد. شکل ۴-۶، تغییرات جابجایی نقطه P1 از لینک عمودی را برحسب تعداد کل المان‌های به‌کاررفته در ناحیه محاسباتی را نشان می‌دهد. در این مطالعه سعی شده همزمان با افزایش تعداد المان‌های بکاررفته در ناحیه محاسباتی، مش در سرتاسر ناحیه حل ریزتر شود و افزایش در تعداد المان‌ها محدود به ناحیه‌ای خاص نباشد. همان طور که در شکل ۴-۶ نشان داده شده، در صورت استفاده از 3817 المان مثلثی بی‌سازمان، نتایج شبیه‌سازی مستقل از شبکه‌بندی ناحیه حل خواهند بود، بنابراین در صورت استفاده از 3817 المان مثلثی بی‌سازمان، ضمن آنکه کمترین حجم محاسبات رایانه‌ای را خواهیم داشت، بلکه در کنار این مزیت، نتایج بدست‌آمده از محاسبات عددی نیز مستقل از شبکه‌بندی ناحیه حل خواهند بود.



شکل ۴-۵. شبکه‌بندی انجام‌شده در فصل مشترک جامد و سیال را به ازای تعداد المان مختلف نشان می‌دهد. تعداد المان‌های به‌کاررفته در سرتاسر ناحیه حل به ازای حالت‌های الف، ب و ج به ترتیب برابر است با ۱۳۷۰، ۳۱۶۲، ۴۹۱۸.



شکل ۴-۶. تغییرات جابجایی نقطه P1 برحسب تعداد المان‌های به‌کاررفته در ناحیه حل را نشان می‌دهد.

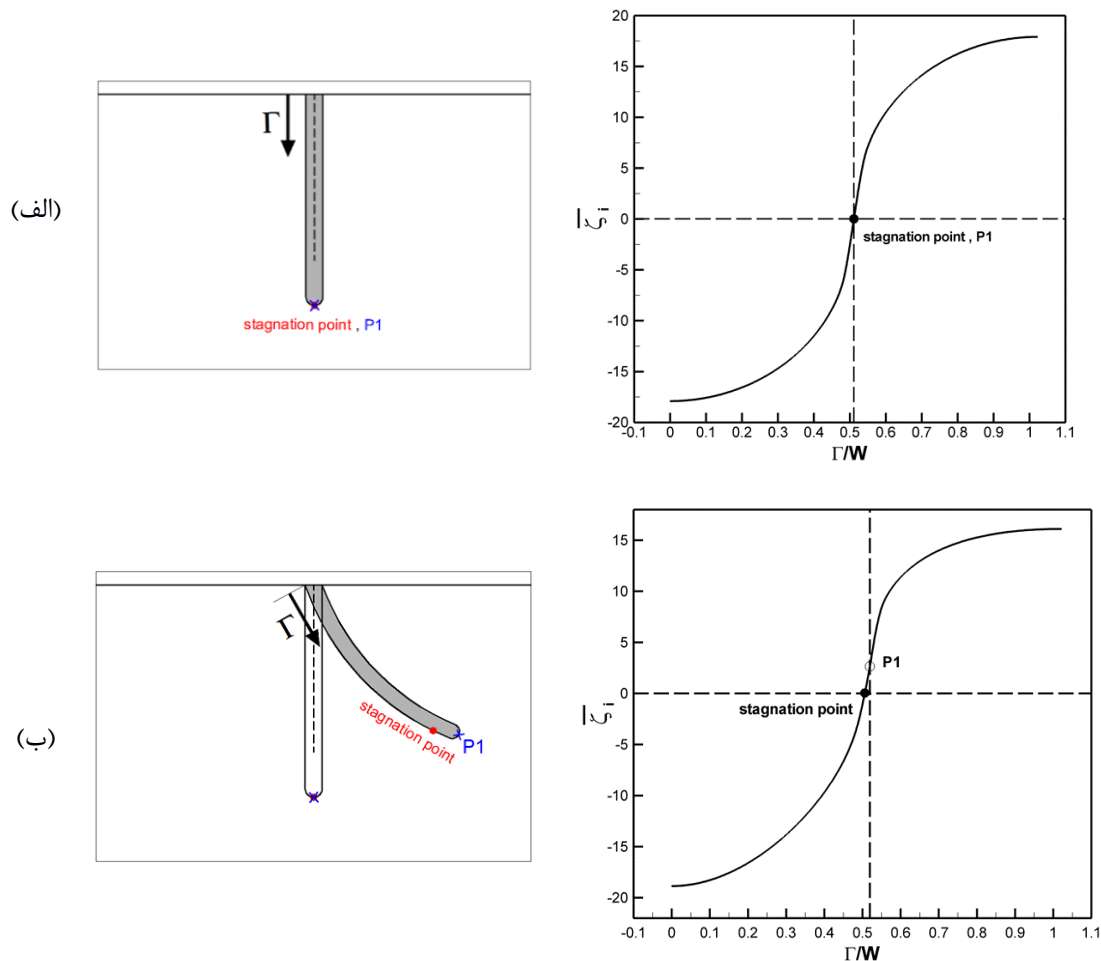
۴-۴- بررسی حرکت یک لینک عمودی

با اعمال میدان الکتریکی جریان الکتروکنتیک در داخل کانال به وجود می‌آید، این جریان ناشی از زتا پتانسیل ثابت روی دیواره نارسانای کانال است. علاوه بر جریان سیال ناشی از زتا پتانسیل ثابت دیواره کانال، جریان الکتروکنتیک القایی نیز در مجاورت لینک رسانا به وجود می‌آید. لینک رسانا تحت تأثیر نیروی هیدرودینامیک ناشی از جریان سیال از موقعیت اولیه خود شروع به حرکت می‌کند و در جهت میدان الکتریکی حرکت خود را ادامه می‌دهد. زمانی که نیروی هیدرودینامیک ناشی از جریان سیال با نیروی عکس‌العمل لینک برابر شود، لینک متوقف خواهد شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در زمان $t = 0.1 \text{ s}$ ($\bar{t} = 3.15 \times 10^{-3}$) لینک در هر سه وضعیت به حالت پایدار خود رسیده است و دیگر تحت تأثیر میدان الکتریکی ثابت حرکتی انجام نمی‌دهد. در این زمان توزیع پتانسیل الکتریکی و میدان جریان سیال نیز به حالت پایدار خود رسیده‌اند. در ادامه پژوهش زمان $t = 0.1 \text{ s}$ با نام $\bar{t}_{steady}$ نام‌گذاری شده و از آن برای بیان وضعیت لینک در حالت پایدار استفاده می‌شود.

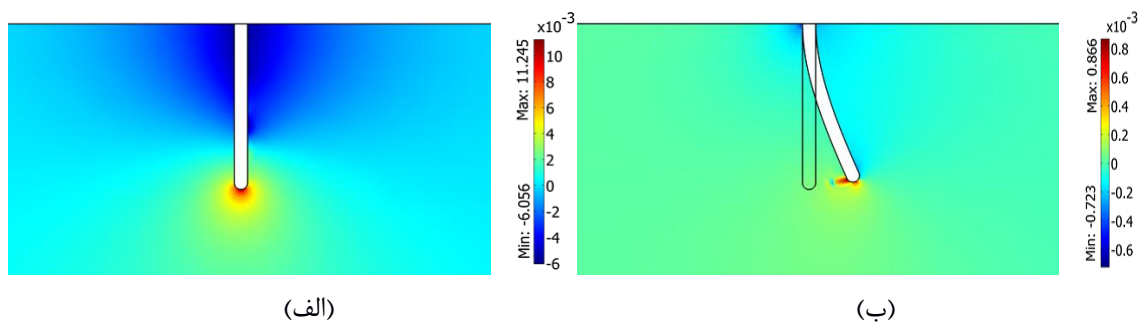
۴-۴-۱- توزیع زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک رسانای عمودی

در طی حرکت لینک رسانا از لحظه شروع تا زمان توقف، توزیع زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک تغییر می‌کند. می‌بایست توجه داشت که نحوه حرکت لینک کاملاً وابسته به توزیع زتا پتانسیل القایی است. برای درک چگونگی ارتباط بین حرکت لینک رسانا و توزیع زتا پتانسیل القایی، حرکت رسانا از لحظه شروع حرکت تا زمان توقف بررسی می‌شود. در لحظه $t = 0 \text{ s}$ ، زمانی که لینک در موقعیت اولیه خود قرار گرفته، توزیع زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک متقارن می‌باشد و زتا پتانسیل القایی روی خط تقارن لینک (در نقطه $P1$) صفر می‌شود. با بررسی توزیع فشار اطراف لینک در این لحظه می‌توان دریافت که بیشترین فشار در ناحیه‌ای وجود دارد که زتا پتانسیل القایی آن صفر است. در این ناحیه به دلیل آنکه سرعت سیال صفر می‌شود (به رابطه (۳-۸-۱) مراجعه کنید) فشار به حداکثر مقدار خود می‌رسد در این پژوهش نقطه‌ای از لینک که زتا پتانسیل القایی آن صفر است با نام "نقطه سکون" نام‌گذاری شده. در ادامه‌ی حرکت لینک و پس‌از آنکه لینک از موقعیت اولیه خود منحرف می‌شود دیگر توزیع زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک متقارن نخواهد بود و نقطه زتا پتانسیل صفر که در آغاز

حرکت روی نقطه $P1$ قرار داشت از این نقطه فاصله می گیرد و به سطح چپ لینک منتقل می شود، به این ترتیب ناحیه فشار حداکثر نیز به سطح چپ لینک منتقل می شود.



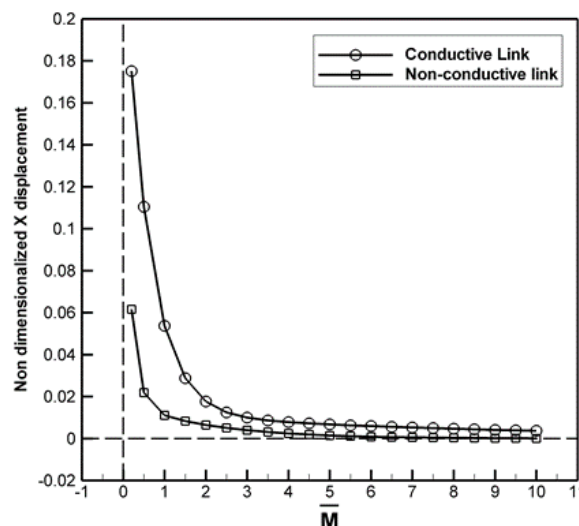
شکل ۴-۷. توزیع زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک عمودی به همراه نمایی از لینک (الف) در لحظه اولیه و (ب) در زمان پایدار سیستم $\bar{t}_{steady}$ نشان داده شده. در نمودار زتا پتانسیل القایی دایره پر شده بیانگر نقطه سکون می باشد و دایره توخالی زتا پتانسیل نقطه $P1$ را نشان می دهد. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل سازی عبارتند از ($\bar{h} = 0.5, \bar{X} = 10, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30$)



شکل ۴-۸. توزیع فشار پیرامون لینک رسانای عمودی (الف) در لحظه اولیه و (ب) در زمان پایدار سیستم $\bar{t}_{steady}$ نشان می دهد. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل سازی عبارتند از ($\bar{h} = 0.5, \bar{X} = 10, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30$)

۴-۴-۲- تأثیر مدول یانگ بر میزان جابجایی لینک رسانا و نارسانای عمودی

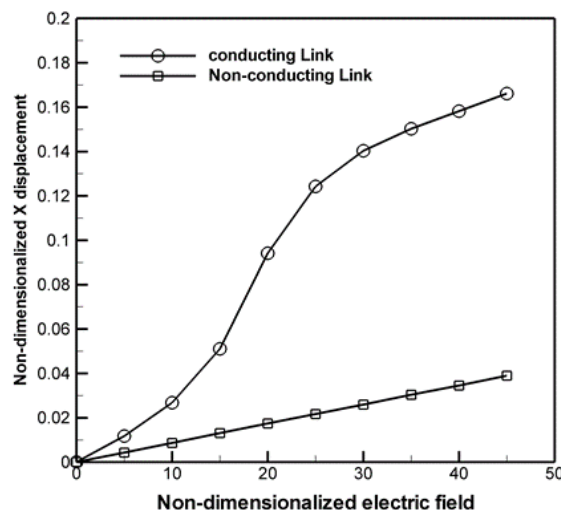
در این بخش اثر مدول یانگ بر میزان جابجایی لینک رسانا و نارسانا مطالعه شده است. در این مطالعه از یک لینک رسانا به طول $\bar{h} = 0.5$ استفاده شده که در فاصله $\bar{X} = 10$ از ورودی کانال قرار گرفته است. همچنین میدان الکتریکی ثابتی به اندازه $\bar{E} = 15$ ، از چپ به راست به سیستم اعمال می‌شود و میزان جابجایی افقی نقطه $P1$ از لینک عمودی رسانا و نارسانا در زمان پایدار $\bar{t}_{steady}$ به ازای مدول‌های یانگ مختلف محاسبه می‌شود. شکل ۹-۴ میزان جابجایی افقی نقطه $P1$ از لینک رسانا و نارسانا را به ازای مدول‌های یانگ مختلف نشان می‌دهد، به ازای مدول‌های یانگ زیاد، لینک مانند یک لینک صلب رفتار می‌کند. اما با کاهش مدول یانگ لینک، رفته‌رفته میزان جابجایی لینک افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که همواره میزان جابجایی لینک رسانا بیشتر از لینک نارسانا است، زیرا زتا پتانسیل القاشده روی سطح لینک رسانا چندین برابر (۱۰ تا ۲۰ برابر) زتا پتانسیل ثابت روی لینک نارسانا می‌باشد. بنابراین نیروی هیدرودینامیک بیشتری از طرف جریان سیال به لینک رسانا اعمال می‌شود، ضمن آنکه نبایست نقش نقطه سکون را در میزان جابجایی لینک رسانا فراموش نمود. این نقطه مانند یک نیروی نقطه‌ای بسیار قوی عمل می‌کند و دامنه جابجایی لینک رسانا را افزایش می‌دهد. در حالت حدی، زمانی که مدول یانگ به سمت مقادیر بسیار بزرگ میل می‌کند لینک رسانای تغییر شکل‌پذیر مشابه یک لینک صلب رفتار می‌کند.



شکل ۹-۴. میزان جابجایی افقی نقطه $P1$ از لینک رسانا و نارسانای عمودی برحسب مدول یانگ لینک در زمان پایدار سیستم $\bar{t}_{steady}$ را نشان می‌دهد. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل‌سازی عبارت‌اند از $(\bar{h} = 0.5, \bar{X} = 10, \bar{E} = 15)$.

۴-۳- تأثیر میدان الکتریکی بر میزان جابجایی لینک رسانا و نارسانا

میدان الکتریکی یکی دیگر از پارامترهایی است که اثر آن بر میزان جابجایی لینک رسانا و نارسانا بررسی شده است. در این مطالعه از لینکی به طول $\bar{h} = 0.5$ و مدول یانگ $\bar{M} = 1$ استفاده شده این لینک در فاصله ($\bar{X} = 10$) از ورودی کانال قرار داده شد و میدان الکتریکی ثابت به سیستم اعمال می‌شود. در این مطالعه میزان جابجایی افقی نقطه $P1$ از لینک به ازای میدان‌های الکتریکی مختلف بررسی می‌شود. شکل ۴-۱۰، نمودار جابجایی افقی نقطه $P1$ به ازای میدان‌های الکتریکی مختلف برای لینک رسانا و نارسانا نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان جابجایی لینک رسانا برحسب میدان الکتریکی به صورت خطی تغییر می‌کند چراکه زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک نارسانا ثابت و یکنواخت می‌باشد، اما تغییرات جابجایی لینک رسانا برحسب میدان الکتریکی غیرخطی است. این رفتار غیرخطی به دلیل توزیع زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک رسانا می‌باشد. اندازه زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک رابطه‌ای غیرخطی $f(E) = \zeta_0$ با میدان الکتریکی اعمالی دارد. ضمن آنکه در میدان‌های الکتریکی ضعیف ($0 \leq \bar{E} \leq 15$) لینک رسانا چندان دچار تغییر شکل نمی‌شود چراکه نقطه سکون تقریباً روی نقطه $P1$ است، اما رفته‌رفته با افزایش میدان الکتریکی نقطه سکون به سمت چپ لینک منتقل می‌شود که در نتیجه آن شاهد یک سیر صعودی با شیب زیاد در نمودار جابجایی لینک رسانا خواهیم بود.

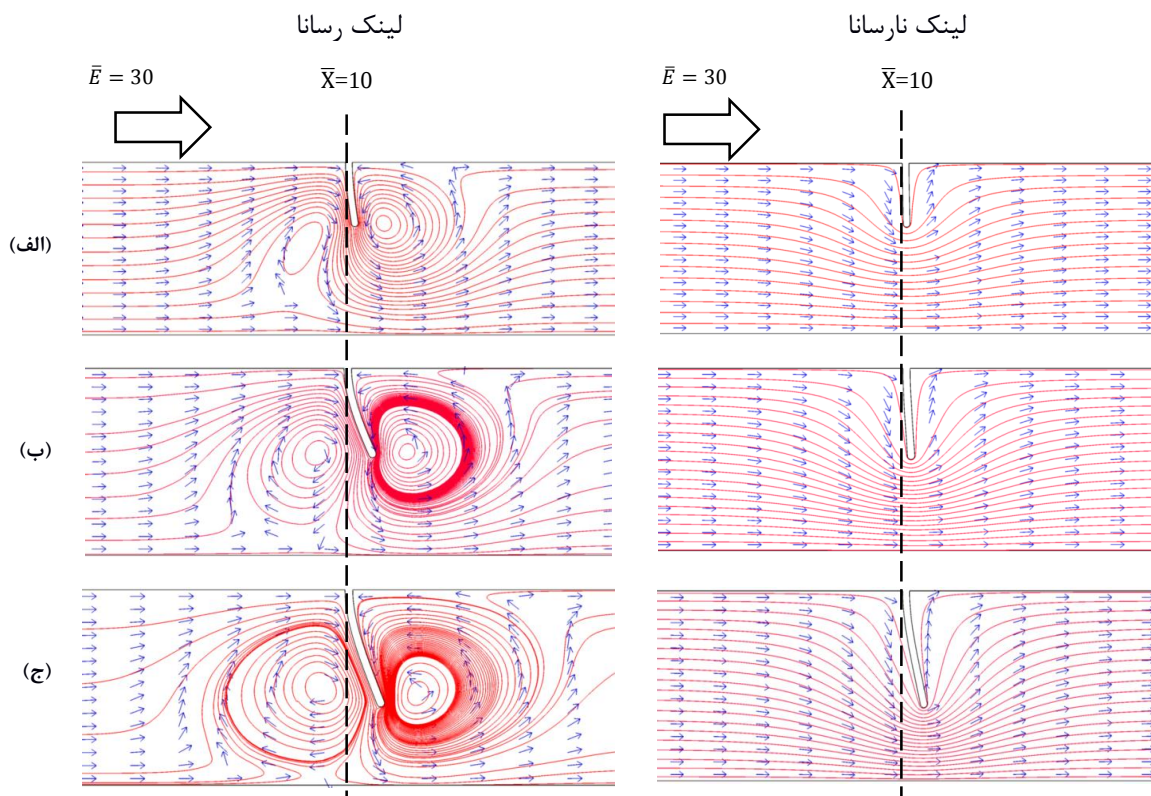


شکل ۴-۱۰. میزان جابجایی افقی نقطه $P1$ از لینک رسانا و نارسانا عمودی برحسب میدان الکتریکی اعمالی در زمان پایدار سیستم $\bar{t}_{steady}$ نشان می‌دهد. مشخصات لینک در این مدل‌سازی عبارت‌اند از ($\bar{h} = 0.5, \bar{X} = 10, \bar{M} = 1$).

۴-۴-۴- تأثیر طول لینک بر میزان جابجایی لینک رسانا و نارسانای عمودی

در ادامه بررسی عوامل تأثیرگذار بر نحوه حرکت لینک عمودی این بار اثر طول لینک بر میزان جابجایی لینک رسانا و نارسانا مطالعه می‌شود. برای این منظور سه لینک با مدول یانگ یکسان $\bar{M} = 1$ و طول‌های متفاوت $3/8$ ، $4/8$ و $5/8$ $\bar{h}$ انتخاب شدند. این لینک‌ها در فاصله $\bar{X} = 10$ از ورودی کانال و روی دیواره بالایی قرار داده شد و به سیستم میدان الکتریکی $\bar{E} = 30$ اعمال گردید.

شکل ۴-۱۱ به صورت کیفی تأثیر افزایش طول لینک بر میزان جابجایی لینک رسانا و نارسانا در زمان پایدار $\bar{t}_{steady}$ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش طول لینک رسانا میزان جابجایی لینک و همچنین اندازه گردابه‌های مجاور لینک رسانا افزایش می‌یابد. افزایش طول لینک سبب می‌شود که میزان جابجایی افقی لینک نارسانا نیز افزایش یابد.

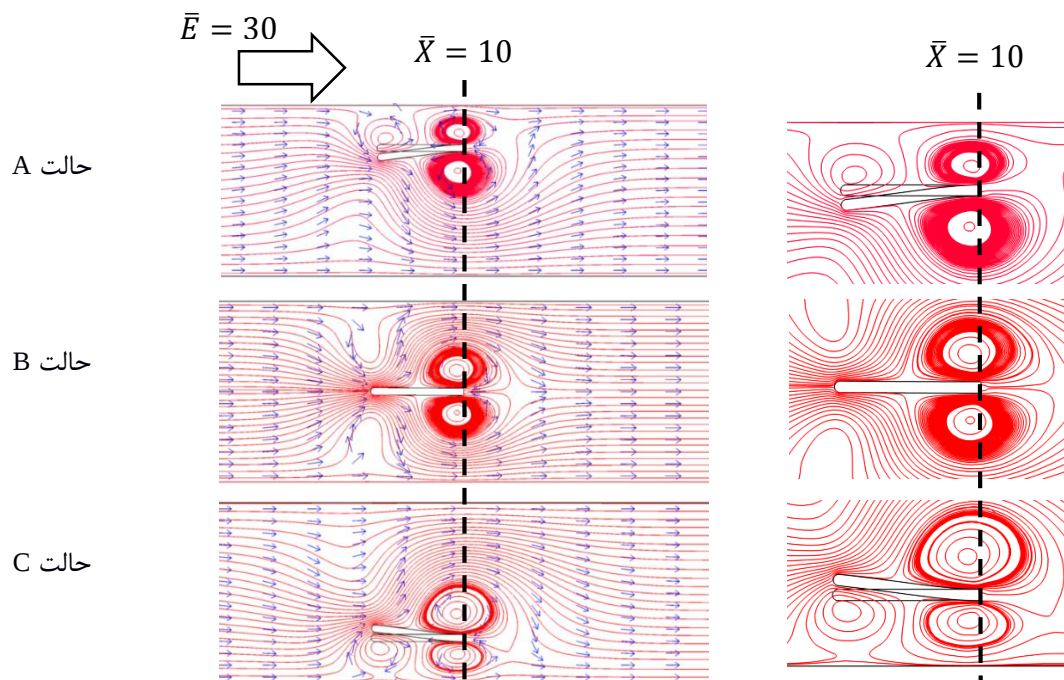


شکل ۴-۱۱. اثر طول لینک بر میزان جابجایی لینک رسانا و نارسانا نشان داده شده. در موارد (الف)، (ب) و (ج) به ترتیب طول لینک برابر $3/8$ ، $4/8$ و $5/8$ $\bar{h}$ می‌باشد. وضعیت لینک رسانا و نارسانا در زمان پایدار سیستم $\bar{t}_{steady}$ رسم شده است. خطوط قرمز رنگ در این شکل‌ها بیانگر خطوط جریان می‌باشند و بردار آبی رنگ، جهت حرکت سیال در داخل کانال را نشان می‌دهد. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل‌سازی عبارت‌اند از $(\bar{h} = 0.5, \bar{X} = 10, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30)$

با افزایش طول لینک رسانا زتا پتانسیل القاشده روی سطح لینک رسانا افزایش می‌یابد و این عامل سبب می‌شود تا نیروی هیدرودینامیک بیشتری به لینک رسانا اعمال شود همچنین افزایش زتا پتانسیل القایی، باعث افزایش اندازه گردابه‌های مجاور لینک رسانا می‌شود. همان‌طور که اشاره شد با افزایش طول لینک نارسانا میزان جابجایی افقی آن نیز افزایش می‌یابد، با افزایش طول لینک نارسانا نیروی هیدرودینامیک بیشتری به لینک وارد می‌شود که در نتیجه آن جابجایی لینک نارسانا افزایش می‌یابد.

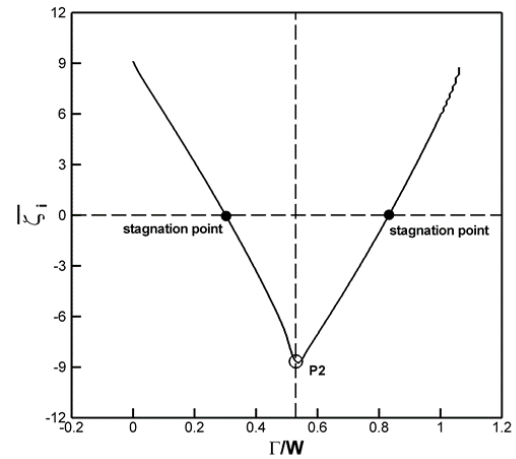
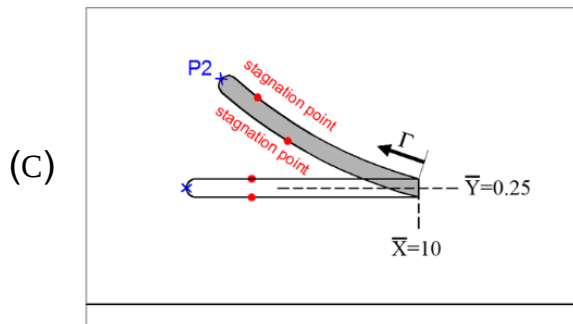
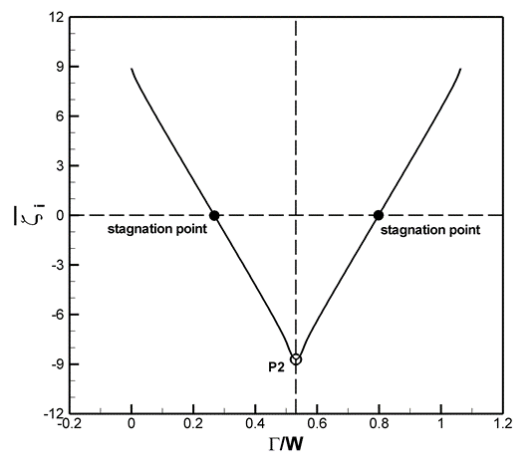
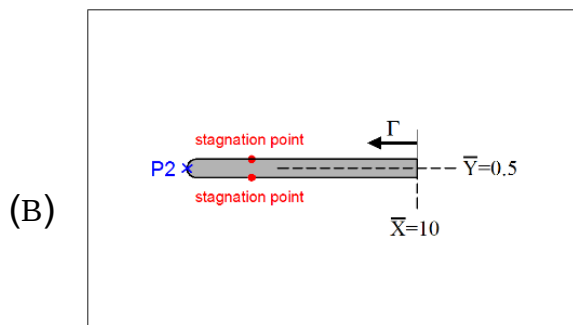
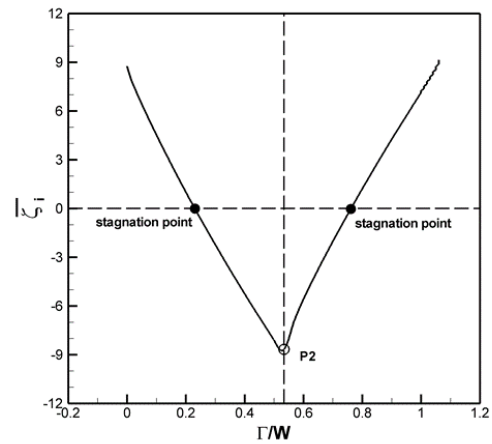
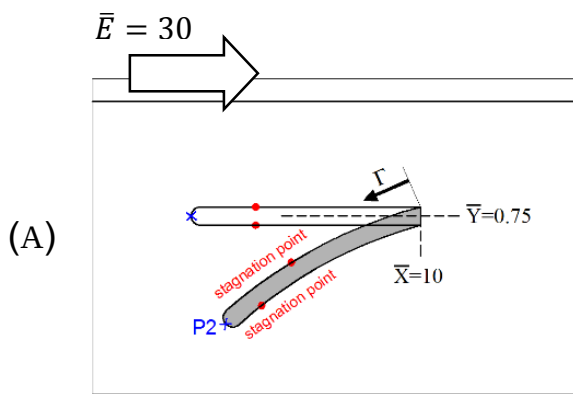
۴-۵- بررسی حرکت یک لینک رسانای افقی

در این بخش حرکت لینک رسانای افقی در سه حالت A، B و C مطالعه شده است. در حالت A لینک افقی بالای خط تقارن افقی کانال قرار گرفته و در حالت B لینک روی خط تقارن افقی کانال است و در حالت C لینک پایین خط تقارن افقی کانال قرار دارد. در این سه حالت از یک لینک رسانای افقی با طول $\bar{h} = 0.5$ و مدول یانگ $\bar{M} = 1$ استفاده شده است. انتهای ثابت لینک افقی در فاصله $\bar{X} = 10$ از ورودی کانال قرار گرفت و فاصله لینک افقی از دیواره پایینی کانال در حالت‌های A، B و C به ترتیب 0.25، 0.5 و $\bar{Y} = 0.75$ است. در این سه حالت میدان الکتریکی $\bar{E} = 30$ به لینک رسانای افقی اعمال می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده در صورتی که لینک رسانا در نزدیکی دیواره کانال قرار گیرد، فاصله لینک از دیواره افزایش می‌یابد (به عبارت دیگر همواره دیواره کانال، لینک رسانای مجاور خود را دفع می‌کند)؛ اما اگر لینک روی خط تقارن افقی کانال قرار گیرد، نیروی خالص وارد بر لینک در جهت Y صفر می‌شود چراکه هندسه کاملاً متقارن است؛ بنابراین در این شرایط لینک هیچ‌گونه تغییر شکلی انجام نمی‌دهد و در موقعیت اولیه خود ثابت باقی می‌ماند.



شکل ۴-۱۲. نحوه حرکت لینک افقی در سه حالت A، B و C نشان داده شده، در این سه حالت فاصله لینک افقی از دیواره پایینی کانال به ترتیب 0.25، 0.5 و $\bar{Y} = 0.75$ می باشد. خطوط قرمز نشان داده شده در شکل، بیانگر خطوط جریان سیال می باشند و بردارهای آبی رنگ بیانگر جهت حرکت سیال است. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل سازی عبارتند از ($\bar{h} = 0.5, \bar{X} = 10, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30$).

برای درک چگونگی دفع لینک رسانای افقی توسط دیواره کانال می بایست توزیع زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک و توزیع فشار در نزدیکی دیواره کانال را بررسی نمود. شکل ۴-۱۳ توزیع زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک افقی در سه حالت A، B و C در زمان پایدار سیستم $\bar{t}_{steady}$ نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود روی سطح لینک رسانا در دونقطه، زتا پتانسیل القایی صفر می شود بنابراین یک لینک رسانای افقی دارای دونقطه سکون می باشد. وقتی لینک افقی در مجاورت دیواره بالایی کانال قرار می گیرد، وجود نقطه حداکثر فشار روی سطح بالایی لینک سبب می شود ناحیه ای با فشار بالا بین لینک افقی و دیواره کانال ایجاد شود که در نتیجه آن لینک افقی از دیواره کانال دور می شود. زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک رسانای افقی در لحظه $\bar{t} = 0$ برای هر سه موقعیت لینک، کاملاً متقارن می باشد؛ اما پس از تغییر شکل لینک توزیع زتا پتانسیل روی سطح آن نامتقارن می شود و نقطه سکون روی سطح لینک جابجا می شود اما این جابجایی اثری در نحوه حرکت لینک نخواهد داشت چراکه پس از تغییر شکل نیز یکی از نقاط سکون روی سطح بالایی لینک و نقطه دیگر روی سطح پایینی لینک کماکان وجود خواهد داشت؛ بنابراین پس از تغییر شکل همچنان ناحیه فشار بالا بین دیواره کانال و لینک رسانا وجود خواهد داشت که در نتیجه آن دیواره کانال، لینک را دفع می کند.

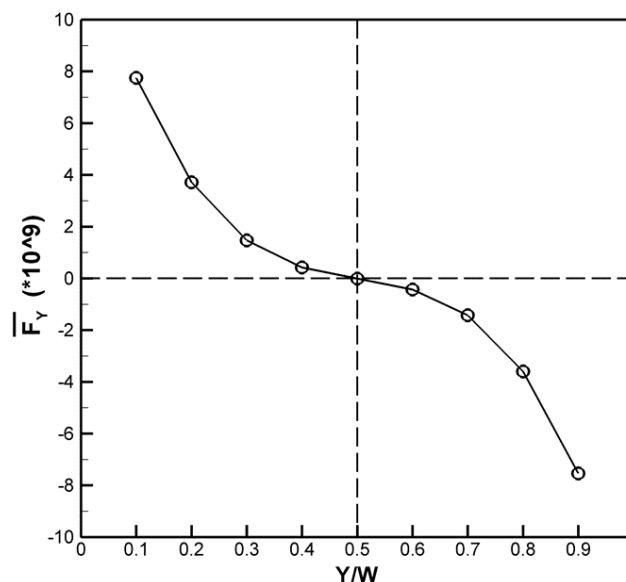


شکل ۴-۱۳. توزیع زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک افقی در زمان پایدار سیستم $\bar{t}_{steady}$ برای سه حالت A، B و C نشان داده شده، در این سه حالت فاصله لینک افقی از دیواره پایینی کانال به ترتیب 0.25، 0.5 و $\bar{Y} = 0.75$ می باشد. در طرح لینک موقعیت نقطه حداکثر فشار به همراه نقطه $P2$ در لحظه اولیه و پس از تغییر شکل لینک نشان داده شده. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل سازی عبارتند از ($\bar{h} = 0.5, \bar{X} = 10, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30$).

۴-۵-۱- تأثیر فاصله لینک افقی از دیواره پایینی کانال بر میزان نیروی وارد بر آن

در این بخش اثر فاصله لینک افقی از دیواره پایینی کانال بر میزان نیروی عمودی خالص وارد بر لینک مطالعه می‌شود. برای این منظور از یک لینک افقی با طول $\bar{h} = 0.5$ و مدول یانگ $\bar{M} = 1$ استفاده شده، انتهای ثابت این لینک در فاصله $\bar{X} = 10$ از ورودی کانال قرار گرفته و اثر فاصله لینک افقی از دیواره پایینی کانال بر میزان نیروی عمودی خالص وارد بر آن بررسی می‌شود.

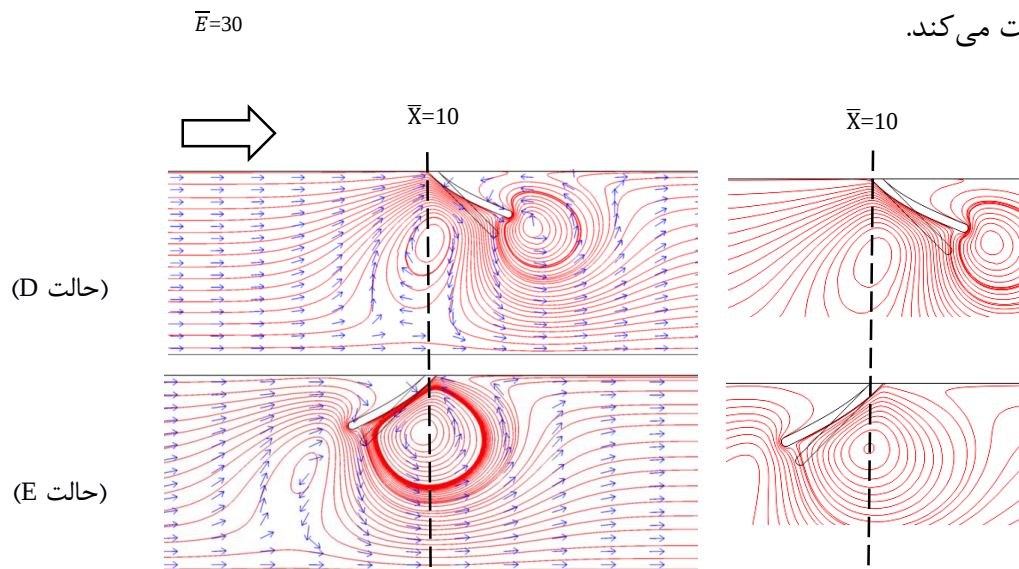
شکل ۴-۱۴ نیروی عمودی وارد بر لینک برحسب فاصله لینک از دیواره پایینی کانال نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نیروی عمودی وارد بر لینک در نزدیکی دیواره‌ها حداکثر است و زمانی که لینک روی خط تقارن افقی کانال قرار گرفته مقدار این نیرو صفر است و لینک بدون جابجایی در موقعیت اولیه خود باقی می‌ماند. در محدوده $0 < \bar{Y} < 0.5$ نیروی عمودی وارد بر لینک مثبت است و لینک از دیواره پایینی کانال دور می‌شود، اما در محدوده $0.5 < \bar{Y} < 1$ نیروی عمودی وارد بر لینک منفی است که در نتیجه آن لینک از دیواره بالایی کانال دور می‌شود. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که هرچه لینک رسانای افقی به دیواره کانال نزدیک‌تر باشد، نیروی عمودی بیشتری از طرف دیواره به آن اعمال می‌شود.



شکل ۴-۱۴. نیروی عمودی وارد بر لینک افقی برحسب فاصله لینک از دیواره پایینی کانال $\bar{Y}$ در زمان پایدار سیستم $\bar{t}_{steady}$ نشان می‌دهد. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل‌سازی عبارت‌اند از $(\bar{h} = 0.5, \bar{X} = 10, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30)$.

۴-۶- نحوه حرکت لینک رسانای مایل

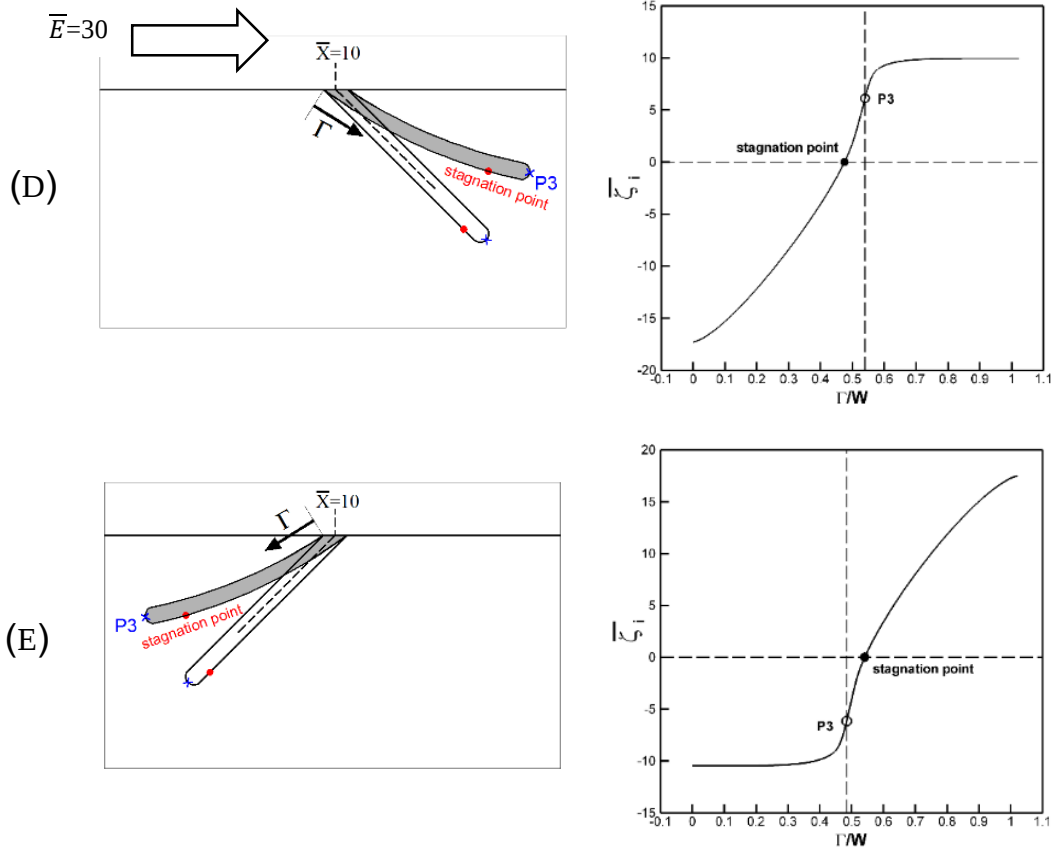
دو حالت D و E به عنوان نمونه برای بررسی حرکت لینک رسانای مایل انتخاب شده است. در حالت D و E، لینک رسانای مایل به ترتیب با زاویه $\bar{\alpha} < 3$ و $\bar{\alpha} > 3$ نسبت به دیواره بالایی کانال نصب شده است. در این دو حالت از لینک رسانایی با طول $\bar{h} = 0.5$ و مدول یانگ $\bar{M} = 2$ استفاده شده، این لینک در فاصله $\bar{X} = 10$ از ورودی کانال و روی دیوار بالایی جای گرفته است. در حالت های D و E زاویه قرارگیری لینک نسبت به دیوار به ترتیب $\bar{\alpha} = 1.5$ و $\bar{\alpha} = 4.5$ است و میدان الکتریکی $\bar{E} = 30$ به سیستم اعمال می شود. همان طور که در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده، لینک رسانای مایل در حالت D، در جهت میدان الکتریکی حرکت می کند؛ اما لینک مایل در حالت E در خلاف جهت میدان الکتریکی حرکت می کند.



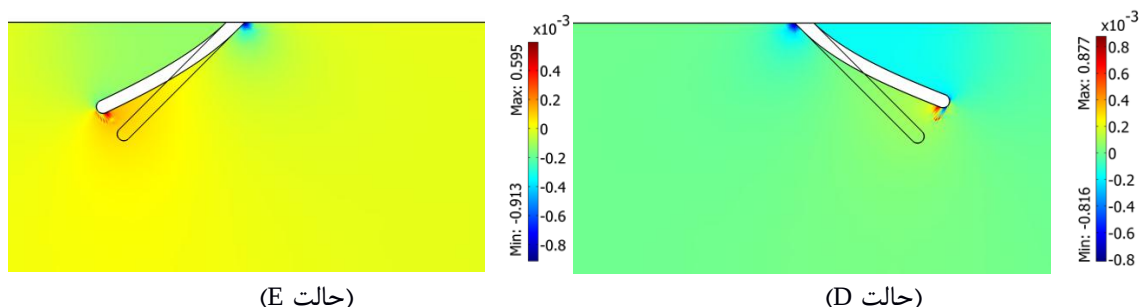
شکل ۴-۱۵. نحوه حرکت لینک رسانای مایل در دو حالت D و E در زمان پایدار سیستم $\bar{t}_{steady}$ را نشان می دهد. در دو حالت D و E زاویه قرارگیری لینک نسبت به دیواره بالایی به ترتیب 1.5 و $\bar{\alpha} = 4.5$ می باشد. خطوط قرمز نشان داده شده بیانگر خطوط جریان سیال می باشد و بردارهای آبی جهت حرکت سیال را نشان می دهند. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل سازی عبارتند از ($\bar{h} = 0.5, \bar{X} = 10, \bar{M} = 2, \bar{E} = 30$).

برای درک چگونگی حرکت لینک رسانای مایل می بایست توزیع زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک رسانا را بررسی نمود. شکل ۴-۱۶ توزیع زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک مایل در دو حالت D و E در زمان پایدار سیستم $\bar{t}_{steady}$ نشان می دهد. همان طور که در این شکل نشان داده شده در حالت D، زتا پتانسیل القایی چه در لحظه اولیه و چه در زمان پایدار سیستم $\bar{t}_{steady}$ روی سطح چپ لینک و در موقعیتی پیش از نقطه P3 برابر صفر می شود بنابراین در این شرایط نقطه سکون روی سطح چپ لینک قرار دارد که در اثر آن لینک در جهت میدان الکتریکی حرکت می کند. در حالت E لینک در زاویه

$\bar{\alpha} = 4.5$ نسبت به دیواره کانال نصب شده است. زتا پتانسیل القایی در لحظه اولیه و در ادامه حرکت، روی سطح راست لینک و در موقعیتی پس از نقطه $P3$ برابر صفر می شود، بنابراین نقطه سکون روی سطح راست لینک قرار دارد که در نتیجه آن لینک در خلاف جهت میدان الکتریکی حرکت می کند.



شکل ۴-۱۶. توزیع زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک مایل را در زمان $\bar{t}_{steady}$ برای دو حالت D و E نشان داده شده. در حالت D و E زاویه لینک مایل با دیواره بالایی کانال به ترتیب 1.5 و $\bar{\alpha} = 4.5$ می باشد. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل سازی عبارتند از $(\bar{h} = 0.5, \bar{X} = 10, \bar{M} = 2, \bar{E} = 30)$.

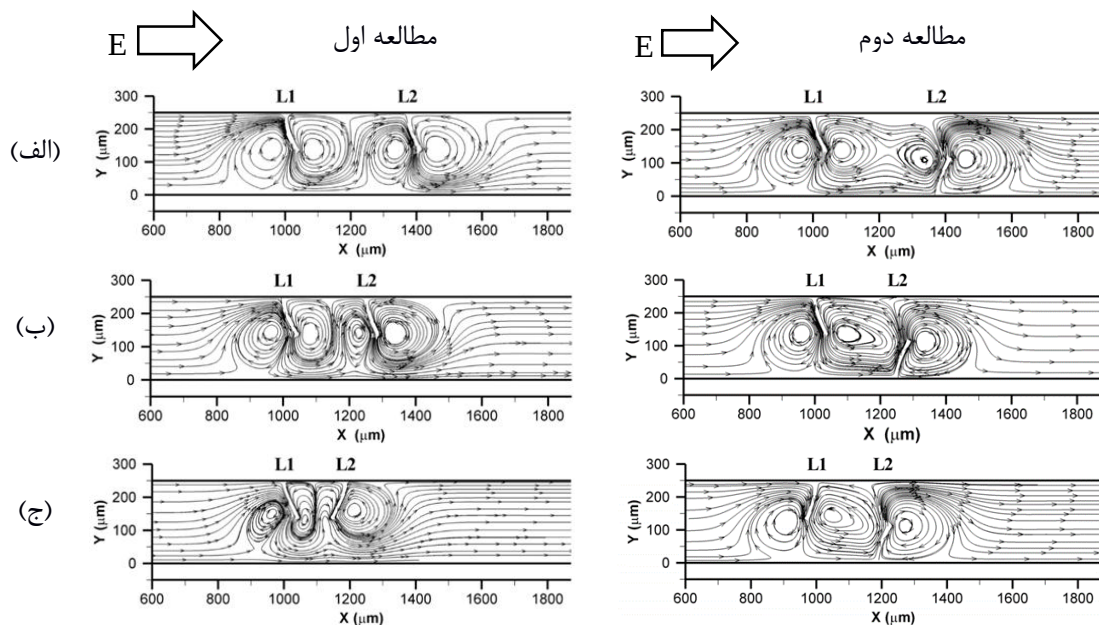


شکل ۴-۱۷. توزیع فشار پیرامون لینک رسانای مایل برای دو حالت D و E در زمان پایدار سیستم $\bar{t}_{steady}$ نشان داده شده. زاویه قرارگیری لینک مایل نسبت به دیواره کانال در دو حالت D و E به ترتیب 1.5 و $\bar{\alpha} = 4.5$ است. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل سازی عبارتند از $(\bar{h} = 0.5, \bar{X} = 10, \bar{M} = 2, \bar{E} = 30)$.

۷-۴- تقابل دو لینک عمودی

در این بخش دو مطالعه جداگانه روی نحوه تقابل دو لینک عمودی انجام شده است. در مطالعه اول تقابل دو لینک عمودی که روی یک دیواره کانال قرار دارند بررسی شده است و در مطالعه دوم تقابل دو لینک عمودی که یکی روی دیواره بالایی و دیگری روی دیواره پایینی کانال جای گرفته‌اند بررسی شده است. برای سهولت در ارائه نتایج، لینک سمت راست بانام $L1$ نام‌گذاری شده و لینک سمت چپ نیز بانام $L2$ نام‌گذاری شده است. در هر دو مطالعه از لینک‌های رسانای عمودی به طول $\bar{h} = 0.5$ و مدول یانگ $\bar{M} = 1$ استفاده شده است، ضمن آنکه میدان الکتریکی $\bar{E} = 30$ به سیستم اعمال می‌شود.

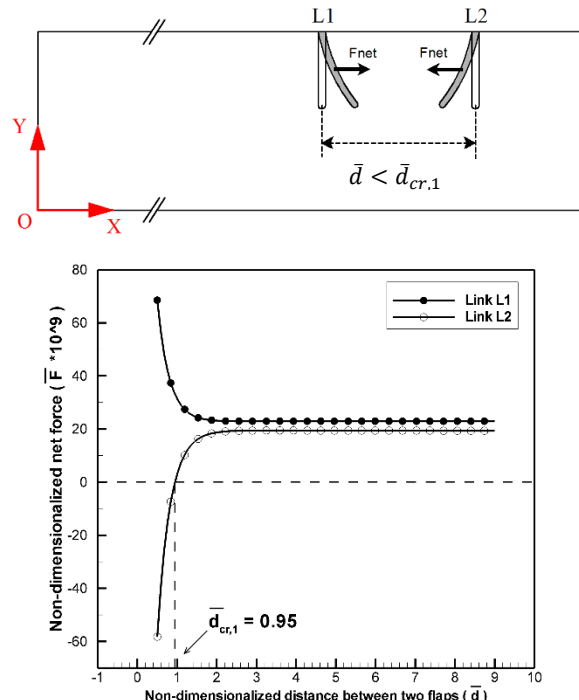
همان‌طور که در شکل شکل ۴-۱۸ نشان داده شده، در مطالعه اول لینک $L1$ روی دیواره بالایی کانال و در فاصله $\bar{X} = 4$ از ورودی کانال قرار گرفته است و لینک $L2$ نیز روی دیواره بالایی کانال و در فاصله $\bar{d}$ از لینک $L1$ قرار گرفته است. در صورتی که فاصله بین دو لینک زیاد باشد ($\bar{d} > 0.95$)، دو لینک هیچ‌گونه تاثیری روی یکدیگر ندارند و در این شرایط دو لینک در جهت میدان الکتریکی حرکت می‌کنند. اما با نزدیک کردن لینک $L2$ به لینک $L1$ و کاهش فاصله بین دو لینک مشاهده می‌شود که در محدوده $\bar{d} \leq 0.95$ دو لینک یکدیگر را جذب می‌کنند.



شکل ۴-۱۸. تقابل دو لینک عمودی، را نشان می‌دهد. خطوط رسم شده در شکل بیانگر خطوط جریان در داخل میکرو کانال می‌باشد. فاصله اولیه بین لینک‌ها ($\bar{d}$) در حالت‌های (الف)، (ب) و (ج) به ترتیب 1، 1.5 و 0.75 می‌باشد. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی عبارت‌اند از: ($\bar{h} = 0.5, \bar{X} = 10, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30$).

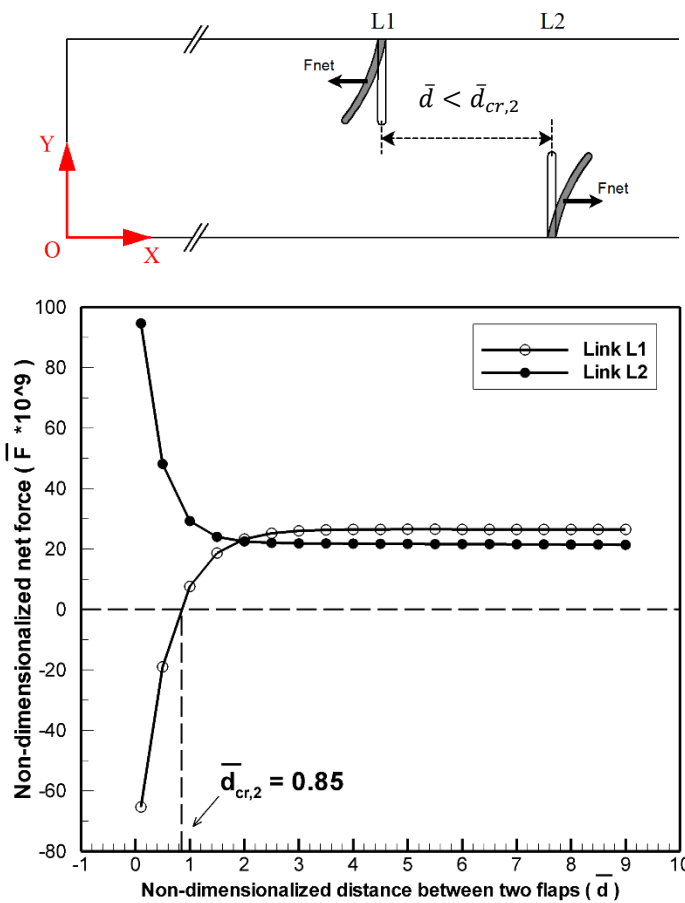
شکل ۴-۱۸ چگونگی تقابل لینک‌ها را در مطالعه دوم را نیز نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود لینک $L1$ روی دیواره بالایی کانال و در فاصله $\bar{X} = 4$ از ورودی کانال قرار گرفته است و لینک $L2$ روی دیواره پایینی کانال و در فاصله $\bar{d}$ از لینک قرار دارد. در صورتی که فاصله بین دو لینک زیاد باشد ($\bar{d} > 0.85$)، دو لینک روی یکدیگر تأثیر نخواهند داشت و هر دو در جهت میدان الکتریکی جابجا می‌شوند. اما اگر لینک $L2$ در محدوده $\bar{d} \leq 0.85$ نسبت به لینک $L1$ قرار گیرد دو لینک یکدیگر را دفع می‌کنند. در این شرایط ناحیه‌ای با فشار بالا بین دو لینک ایجاد می‌شود که در نتیجه آن دو لینک یکدیگر را دفع می‌کنند.

شکل ۴-۱۹ نیروی افقی وارد بر لینک‌ها را برحسب فاصله بین دو لینک نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در فاصله $\bar{d} > 0.95$ دو لینک هیچ‌گونه تأثیری روی یکدیگر ندارند اما در محدوده $\bar{d} \leq 0.95$ نیروی جاذبه به دو لینک رسانا اعمال می‌شود. در این محدوده هرچه فاصله بین دو لینک کمتر باشد نیروی جاذبه بیشتر خواهد بود. محدوده $0 \leq \bar{d} \leq 0.95$ به‌عنوان فاصله بحرانی بین دو لینک در مطالعه اول شناخته می‌شود و اگر لینک $L2$ در این محدوده نسبت به لینک $L1$ قرار گیرد دو لینک یکدیگر را جذب خواهند کرد.



شکل ۴-۱۹. تأثیر فاصله بین دو لینک بر نیروی خالص وارد بر لینک‌ها را نشان می‌دهد. این نمودار برای مطالعه اول که هر دو لینک روی دیواره بالایی کانال قرار دارند استخراج شده است. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل‌سازی عبارت‌اند از ($\bar{h} = 0.5, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30$).

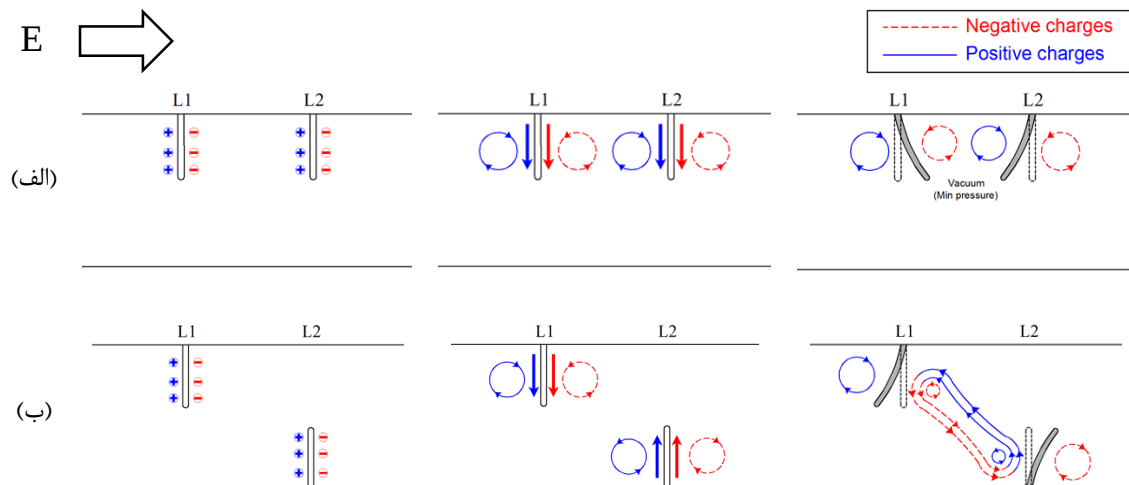
شکل ۴-۲۰ نیروی وارد بر دو لینک عمودی را برحسب فاصله بین آن‌ها در مطالعه دوم نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده در محدوده $\bar{d} > 0.85$ دو لینک روی یکدیگر اثر نمی‌گذارند اما در محدوده $\bar{d} \leq 0.85$ نیروی دافعه بین دو لینک شکل می‌گیرد و هرچه فاصله بین دو لینک در این محدوده کمتر باشد نیروی دافعه بیشتری به لینک‌ها اعمال می‌شود. در مطالعه دوم محدوده $0 \leq \bar{d} \leq 0.85$ به عنوان فاصله بحرانی بین دو لینک شناخته می‌شود و اگر لینک $L2$ در این محدوده نسبت به لینک $L1$ قرار گیرد دو لینک در خلاف جهت یکدیگر حرکت می‌کنند.



شکل ۴-۲۰. تأثیر فاصله بین دو لینک بر نیروی خالص وارد بر لینک‌ها را نشان می‌دهد. این نمودار برای مطالعه دوم که هر یک از لینک‌ها روی یکی از دیواره‌های کانال قرار دارند استخراج شده است. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل‌سازی عبارت‌اند از ($\bar{h} = 0.5, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30$).

برای درک چگونگی جذب و دفع دو لینک عمودی می‌بایست به جهت چرخش گردابه‌های پیرامون لینک رسانا دقت نمود. همان‌طور که در شکل ۴-۲۱ نشان داده شده در مطالعه اول، جهت چرخش گردابه‌های بین دو لینک متفاوت است (یکی ساعت‌گرد و دیگری پادساعت‌گرد است)، در نتیجه این دو گردابه ناحیه کم‌فشار بین دو لینک ایجاد می‌شود و افت فشار در این ناحیه سبب می‌شود تا دو لینک

یکدیگر را جذب کنند. شکل ۴-۲۱ نحوه تقابل لینک‌ها در مطالعه دوم را نیز نشان می‌دهد، با توجه به این شکل در مطالعه دوم جهت چرخش گردابه‌های بین دو لینک یکسان است (هر دو پادساعت‌گرد می‌چرخند)، همین عامل سبب می‌شود تا دو گردابه به یکدیگر بپیوندند و گردابه‌ای بزرگ‌تر با جهت چرخش پادساعت‌گرد ایجاد کنند. گردابه بزرگ‌تر ناحیه‌ای با فشار بالا بین دو لینک رسانا ایجاد می‌کند که در نتیجه آن دو لینک از یکدیگر دور می‌شوند.



شکل ۴-۲۱. طرح ساده‌ای از نحوه تقابل دو لینک عمودی در (الف) مطالعه اول و (ب) مطالعه دوم را نشان می‌دهد. در مطالعه اول ناحیه کم‌فشار بین لینک‌ها ایجاد می‌شود چراکه جهت چرخش گردابه‌های بین لینک‌ها مخالف یکدیگر است. اما در مطالعه دوم جهت چرخش گردابه‌های بین لینک‌ها یکسان است و آن‌ها به یکدیگر می‌پیوندند و گردابه بزرگ‌تر را ایجاد می‌کنند که مانع از عبور جریان سیال می‌شود و در نتیجه آن فشار بین دو لینک افزایش می‌یابد.

توجیه فیزیکی، به هم پیوستن گردابه‌ها را می‌توان در مسیر مهاجرت یون‌های بین دو لینک پیدا کرد. ناحیه بین دو لینک را تصور کنید، یون‌های مثبت و منفی به ترتیب به سمت پتانسیل الکتریکی بیشتر و کمتر مهاجرت می‌کنند، از طرفی سمت راست لینک $L1$ دارای پتانسیل الکتریکی بیشتر است (چراکه دارای بار القایی مثبت است) و سمت چپ لینک $L2$ نیز دارای پتانسیل الکتریکی کمتر است (چراکه دارای بار القایی منفی است). با این توضیحات می‌توان نتیجه گرفت که بارهای مثبت لینک $L2$ به سمت لینک $L1$ مهاجرت می‌کنند و بارهای منفی لینک $L1$ نیز به سمت لینک $L2$ مهاجرت می‌کنند. این مهاجرت یون‌ها و جابجایی آن‌ها یک گردابه بزرگ‌تری را بین دو لینک ایجاد می‌کند که در نتیجه آن دو لینک از یکدیگر فاصله می‌گیرند.

۴-۸- خلاصه و نتیجه‌گیری

در این فصل حرکت لینک رسانا در سه وضعیت افقی، عمودی و مایل بررسی شده است. برای توجیه نحوه حرکت لینک در هریک از این سه وضعیت از مفهوم نقطه سکون استفاده شده است. نقطه سکون مکانی روی سطح لینک رسانا است که زتا پتانسیل القایی آن صفر می‌باشد در این نقطه سرعت جریان سیال صفر است و فشار حداکثر می‌باشد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که جهت حرکت لینک رسانا وابسته به موقعیت نقطه سکون روی سطح لینک رسانا می‌باشد. تقابل دو لینک عمودی یکی دیگر از مواردی است که در این فصل بررسی شده است. نتایج به‌دست‌آمده از تقابل دو لینک عمودی نشان می‌دهد که اگر دو لینک روی یک دیواره کانال قرار گیرند، گردابه‌هایی با جهت چرخش مخالف بین آن‌ها ایجاد می‌شود که در نتیجه آن‌ها دو لینک یکدیگر را جذب می‌کنند، اما اگر هر یک از لینک‌ها روی یک دیواره کانال قرار گیرند، آن‌ها یکدیگر را دفع می‌کنند چراکه در این حالت جهت چرخش گردابه‌های بین لینک‌ها در این حالت یکسان است.

فصل پنجم:

میکرومیکسر

تک لینک با میدان الکتریکی متغیر با زمان

میکرومیکسر تک لینک با میدان الکتریکی متغیر بازمان

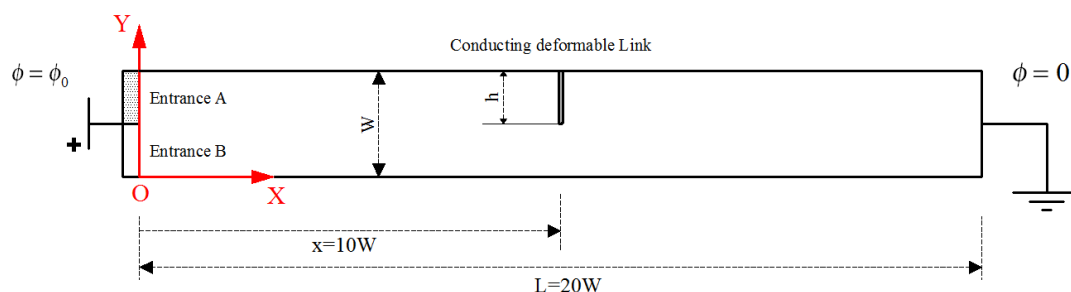
این فصل به مطالعه درصد اختلاط دو جریان سیال با غلظت‌های مختلف می‌پردازد که در داخل یک کانال مستقیم جریان دارند. برای بهبود اختلاط این دو جریان سیال، چهار روش مختلف پیشنهاد شده است. در روش اول دو جریان ورودی بدون هیچ‌گونه مانعی طول کانال را می‌پیمایند و در این روش اختلاط تنها به واسطه پدیده نفوذ بین دو جریان سیال انجام می‌شود. در روش دوم از یک لینک نارسانای تغییر شکل‌پذیر استفاده شده و به سیستم میدان الکتریکی ثابت اعمال می‌شود. در روش سوم هرچند میدان الکتریکی ثابت به سیستم اعمال می‌شود ولی این بار از لینک رسانا برای بهبود اختلاط دو جریان سیال استفاده شده است. در روش چهارم نه تنها از لینک رسانای تغییر شکل‌پذیر استفاده شده بلکه میدان الکتریکی متغیر بازمان نیز به سیستم اعمال می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که روش چهارم بهترین روش اختلاط میان روش‌های ارائه شده است چراکه با اعمال میدان الکتریکی متغیر بازمان لینک رسانا حرکت رفت و برگشتی در داخل کانال انجام می‌دهد و مشابه یک همزن اختلاط بین دو جریان سیال را بهبود می‌دهد، علاوه بر حرکت رفت و برگشتی لینک رسانا، گردابه‌های ایجاد شده توسط جریان الکتروکنتیک غیرخطی نیز به بهبود اختلاط در سیستم کمک می‌کنند.

در این فصل تأثیر میانگین و دامنه میدان الکتریکی متغیر بازمان بر روی کارایی میکرومیکسر مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش میانگین تابع و افزایش دامنه آن، عملکرد میکرومیکسر بهبود می‌یابد. یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار در بهبود اختلاط طول لینک رسانا است، هر چه طول لینک رسانا بیشتر باشد درصد اختلاط بیشتر می‌شود. مدول یانگ لینک تغییر شکل‌پذیر و موقعیت آن عوامل دیگری می‌باشند که تأثیر آن‌ها بر روی درصد اختلاط مطالعه شده است. میکرومیکسر ارائه شده در این فصل دارای ساختمان و مکانیسم عملکرد ساده‌ای است، این مزایا سبب می‌شود تا از آن بتوان در بسیاری از کاربردهای میکروفلوئیدیک استفاده نمود.

۵-۱- هندسه مدل و مشخصات فیزیکی به کاررفته در مدل سازی

در این بخش، برای اختلاط دو جریان سیال با غلظت‌های مختلف از یک لینک رسانای تغییر شکل پذیر استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۵-۱ نشان داده شده، یک انتهای این لینک رسانا بر روی دیواره بالایی کانال ثابت شده است و انتهای دیگر آن می‌تواند آزادانه در داخل کانال جابجا شود. در غیاب لینک تغییر شکل پذیر، اختلاط دو جریان تنها به واسطه نفوذ انجام می‌شود. در صورتی که میدان الکتریکی ثابت به سیستم اعمال شود، لینک از موقعیت اولیه خود منحرف شده اما پس از طی جابجایی مشخص متوقف می‌شود چراکه نیروی هیدرودینامیک وارد بر لینک با نیروی عکس‌العمل لینک برابر می‌شود. با اعمال میدان الکتریکی متغیر بازمان دیگر لینک در موقعیت نهایی خود متوقف نمی‌شود بلکه پیوسته حرکت رفت و برگشتی را انجام می‌دهد و می‌توان انتظار داشت که درصد اختلاط در این روش به میزان بیشتری نسبت به سایر روش‌ها افزایش یابد.

در این بخش برای بررسی اثر لینک رسانا بر درصد اختلاط، از یک کانال دوبعدی به پهنای $W = 250 \mu m$ استفاده شده است. طول لینک $h = 0.5W$ و طول کانال $L = 20W$ هستند که برحسب پهنای کانال بی بعد شده‌اند.



شکل ۵-۱. طرح ساده‌ای از کانال را به همراه لینک رسانای تغییر شکل پذیر در وسط آن نشان می‌دهد.

معادلات حاکم بر این شبیه‌سازی، با استفاده از نرم‌افزار تجاری کامسول 3.5a حل شده‌اند. این نرم‌افزار با استفاده از روش اویلری-لاگرانژی قادر است تقابل لینک و سیال را در یک هندسه که به‌طور پیوسته در آن ساختار مش عوض می‌شود حل نماید. برای اطمینان از عدم وابستگی نتایج به شبکه‌بندی حل، درصد اختلاط به ازای شبکه‌بندی‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت و مشاهده شد که با استفاده از ۲۷۰۰ المان مربعی، درصد اختلاط مستقل از تعداد مش به کاررفته خواهد بود.

در این پژوهش برای بررسی کمی میزان اختلاط دو جریان سیال از تعریف بازده اختلاط $\mathcal{E}$ استفاده می‌شود. بازده اختلاط مطابق رابطه (۵-۱) محاسبه می‌شود.

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\int_0^W |C - C_\infty| dy}{\int_0^W |C_0 - C_\infty| dy} \right) \times 100 \quad (۱-۵)$$

در این رابطه ε بازده اختلاط است. همچنین C_0 و C_∞ به ترتیب بیانگر میزان غلظت در حالت ایده‌ال و غلظت در ورودی کانال می‌باشند. برای دو جریان ورودی که دارای غلظت‌های صفر و یک هستند، غلظت در حالت ایده‌ال برابر با $C_\infty = 0.5$ است. C توزیع غلظت در خروجی کانال با عرض W را نشان می‌دهد. واضح است که بازده اختلاط زمانی که دو جریان سیال به‌طور کامل با یکدیگر مخلوط شوند 100% است و زمانی که هیچ اختلاطی صورت نگیرد، بازده اختلاط 0% است.

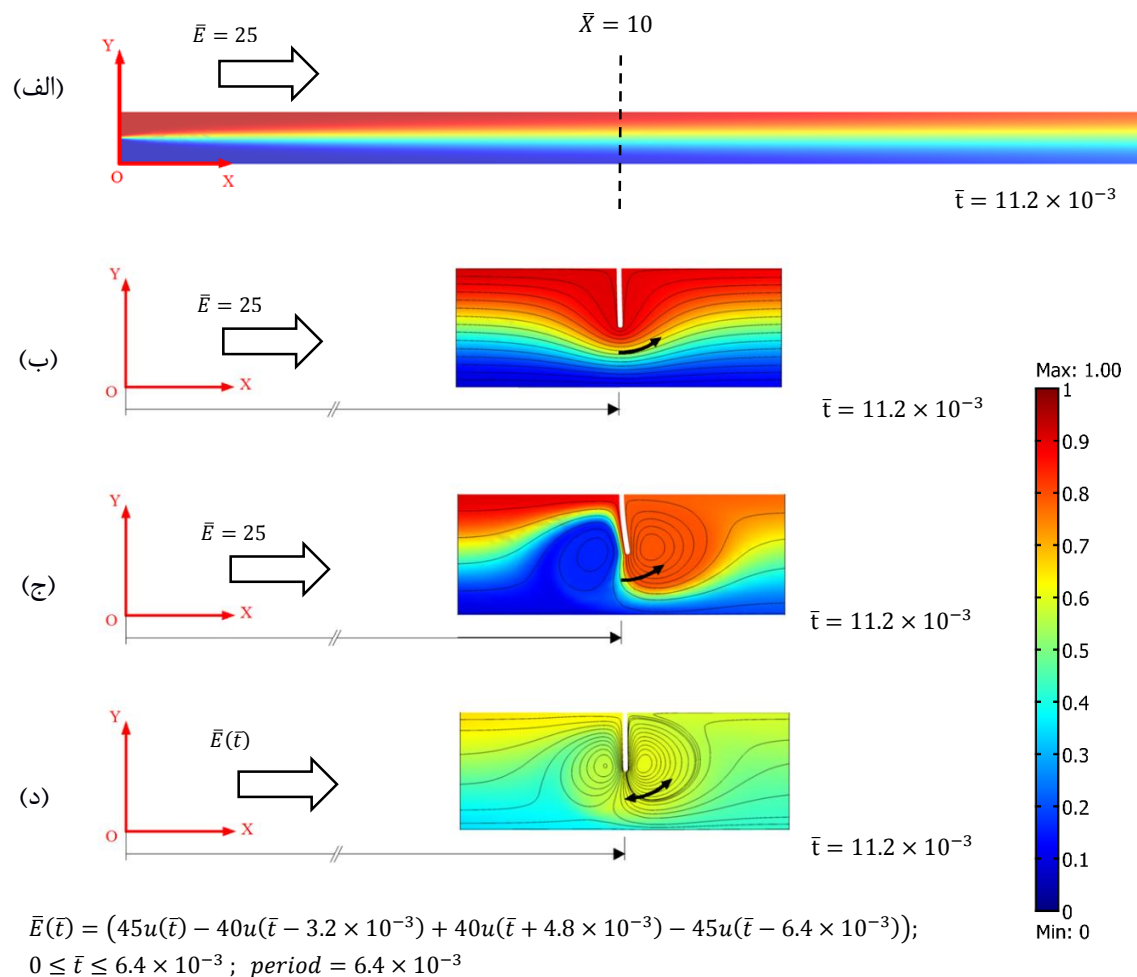
۵-۲- ارائه نتایج و بحث پیرامون آن

چهار حالت مختلف مطابق شکل ۵-۲ برای میکرومیکسر معرفی شده است. نتایج این چهار حالت در ادامه ارائه شده و مقایسه بین آن‌ها صورت گرفته است. حالت A، یک میکرومیکسر مستقیم بدون لینک را بیان می‌کند. در این میکرومیکسر نفوذ عامل تأثیرگذار در بهبود اختلاط است و عامل دیگری برای بهبود اختلاط در این حالت وجود ندارد. در حالت دوم و سوم به ترتیب از لینک نارسانا (حالت B) و لینک رسانا (حالت C) برای ایجاد اغتشاش استفاده شده است. برای هر سه حالت یادشده (حالت‌های A، B و C)، میدان الکتریکی اعمالی ثابت است اما در حالت D میدان الکتریکی متغیر با زمان به سیستم اعمال می‌شود در این شرایط دیگر لینک رسانا بعد از حداکثر جابجایی خود متوقف نمی‌شود بلکه حرکت رفت و برگشتی به‌طور پیوسته انجام می‌دهد. در ادامه تأثیر پارامترهای مختلف از جمله میدان الکتریکی اعمالی، طول لینک و موقعیت لینک بر روی بازده اختلاط در هر یک از این چهار حالت بررسی می‌شود.

۵-۳- مقایسه چهار میکرومیکسر مختلف

اولین میکرومیکسری که مورد ارزیابی قرار گرفته، میکروکانالی مستقیم است که تحت تأثیر میدان الکتریکی ثابت $E = 25$ قرار گرفته است (حالت A). به‌طور کلی در دستگاه‌های در ابعاد میکرو به دلیل آنکه عدد رینولدز کوچک است ($Re \ll 1$) جریان سیال آرام است و اختلاط تنها به واسطه نفوذ بین مولکولی در فصل مشترک دو جریان اتفاق می‌افتد. همان‌طور که در شکل ۵-۳ نشان داده شده است. نمودار توزیع غلظت در حالت A بهبود اختلاط چندانی را نشان نمی‌دهد و بازده اختلاط حالت A، 59.93% است. برای بهبود اختلاط در حالت B، یک لینک نارسانا به داخل کانال اضافه شده است در

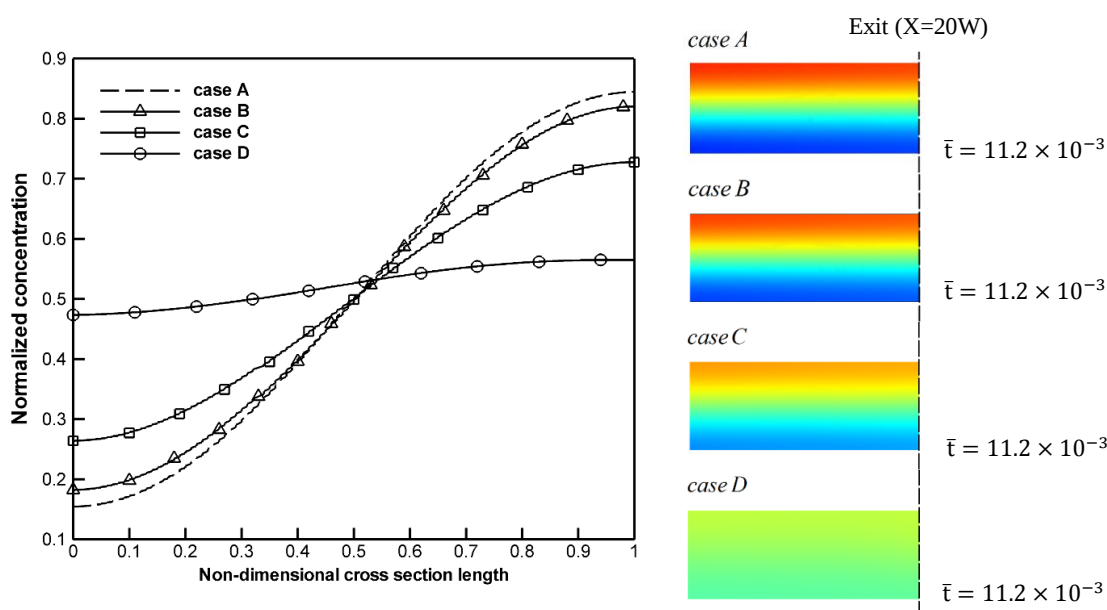
این حالت نیروی هیدرودینامیک ناشی از جریان سیال، لینک را وادار می کند در جهت جریان پایین دست حرکت کند. جهت جریان سیال به واسطه وجود لینک نارسا تغییر می کند اما افزایش قابل ملاحظه ای در بازده اختلاط نسبت به حالت A مشاهده نمی شود. و بازده اختلاط تنها به میزان 4% نسبت به حالت A افزایش یافته و بازده اختلاط در حالت B به میزان 59.92% می رسد.



شکل ۵-۲. الگوی جریان سیال و توزیع غلظت در چهار میکرومیکسر مختلف نشان داده شده است. خطوط رسم شده در شکل بیانگر خطوط جریان سیال می باشند و طیف رنگی رسم شده نیز توزیع غلظت بی بعد را نشان می دهد. (الف) حالت A: میکرومیکسر بدون لینک است و میدان الکتریکی ثابت به سیستم اعمال می شود. (ب) حالت B: میکرومیکسر با لینک نارسای تغییر شکل پذیر است که میدان الکتریکی ثابت به این سیستم اعمال می شود. (ج) حالت C: میکرومیکسر با لینک رسانای تغییر شکل پذیر و میدان الکتریکی ثابت به سیستم اعمال می شود. (د) حالت D: میدان الکتریکی متغیر با زمان به میکرومیکسری با لینک رسانای تغییر شکل پذیر اعمال می شود. فلش سیاه رنگ، جهت حرکت لینک را در داخل کانال نشان می دهد.

در حالت سوم از یک لینک رسانای تغییر شکل پذیر برای ایجاد اغتشاش استفاده شده است (حالت C). در این حالت میدان الکتریکی ثابت $\bar{E} = 25$ به سیستم اعمال می شود که در نتیجه آن لایه الکتریکی دوگانه بر روی سطح لینک رسانا القا می شود. در این لایه الکتریکی دوگانه توزیع بار غیریکنواخت است و بار الکتریکی روی سطح لینک رسانا در بالادست و پایین دست جریان مخالف یکدیگر است بنابراین دو گردابه پیرامون لینک رسانا تشکیل می شود. این گردابه ها با مغشوش کردن رژیم جریان بازده اختلاط را به میزان چشم گیری افزایش می دهند. همان طور که در شکل ۵-۲ نشان داده شده، بازده اختلاط در حالت C، 70.80% است، اما این حالت هنوز با حالت ایدئال یک میکرومیکسر فاصله دارد. در حالت C میدان الکتریکی ثابت به سیستم اعمال می شود و در این حالت لینک رسانا پس از طی مسافت مشخص متوقف می شود. اما واضح است که جابجایی لینک رسانا (حالت C) بیشتر از جابجایی لینک نارسانا (حالت B) است. برای توجیه این نتیجه می بایست توجه نمود که زتا پتانسیل القاشده روی سطح لینک رسانا چندین برابر (10 تا 20 برابر) بیشتر از زتا پتانسیل روی سطح لینک نارسانا است به همین علت نیروی هیدرودینامیک اعمالی به لینک رسانا چندین مرتبه بزرگ تر از لینک نارسانا است.

در حالت D، میدان الکتریکی متغیر با زمان به سیستم اعمال می شود. این میدان الکتریکی متغیر با زمان دارای مقدار میانگین $\bar{E} = 25$ و دامنه $\Delta E = 20$ است که با فرکانس $\bar{f} = 156.25$ (یا $f = 5 \text{ Hz}$) به سیستم اعمال می شود. در این حالت نیروی هیدرودینامیکی وارد بر لینک نسبت به زمان تغییر می کند و اندازه آن متناسب با میدان الکتریکی اعمالی است. وقتی این میدان الکتریکی متغیر با زمان به مقدار حداکثر خود می رسد ($\bar{E} = 45$)، به لینک رسانا به طول $\bar{h} = 0.5$ نیروی هیدرودینامیکی معادل $\bar{F}_h = 1.1 \times 10^6$ اعمال می شود. تحت این شرایط لینک به حداکثر جابجایی خود می رسد، با کاهش میدان الکتریکی و رسیدن به مقدار حداقل خود ($\bar{E} = 5$)، نیروی هیدرودینامیک وارد بر لینک نیز تا میزان $\bar{F}_h = 1.13 \times 10^4$ کاهش می یابد. بنابراین لینک به سمت موقعیت اولیه خود حرکت می کند. در نتیجه این میدان الکتریکی متغیر با زمان، لینک رسانا حرکت رفت و برگشتی در داخل کانال انجام می دهد و این لینک رسانا مشابه یک همزن میکرو بازده اختلاط سیستم را افزایش می دهد. بازده اختلاط برای حالت D در زمان $\bar{t} = 11.2 \times 10^{-3}$ (یا $t = 0.35 \text{ s}$) مقدار 93.24% است. پروفیل توزیع غلظت هر یک از این چهار حالت در شکل ۵-۳ رسم شده است.

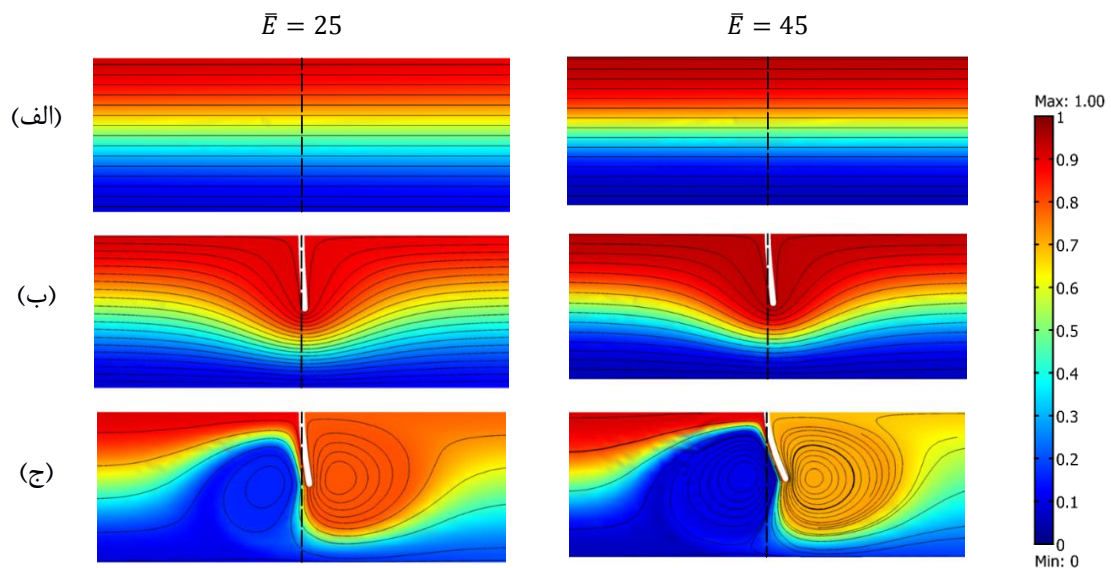


شکل ۳-۵. مقایسه توزیع غلظت در خروجی کانال چهار میکرومیکسر مختلف در زمان $\bar{t} = 11.2 \times 10^{-3}$ نشان می‌دهد. حالت (A) بیانگر میکرومیکسر بدون لینک است و میدان الکتریکی ثابت به این سیستم اعمال می‌شود. حالت (B) مربوط به میکرومیکسر با لینک نارسا است و حالت (C) نیز معرف میکسر با لینک رسانی است، در دو حالت B و C میدان الکتریکی ثابت به سیستم اعمال می‌شود. اما در حالت (D) میدان الکتریکی متغیر با زمان به میکرومیکسری با لینک رسانی اعمال می‌شود. میدان الکتریکی ثابت اعمال شده در حالت‌های A تا C، $\bar{E} = 25$ است، همچنین میدان الکتریکی متغیر با زمان در حالت (D) دارای مقدار میانگین $\bar{E}_{ave} = 25$ و فرکانس آن $\bar{f} = 156.25$ است. مدول یانگ برای لینک تغییر شکل‌پذیر در تمام حالت‌ها $\bar{M} = 2$ انتخاب شده است.

۵-۴- تأثیر میدان الکتریکی خارجی

با افزایش میدان الکتریکی سرعت جریان افزایش می‌یابد و در نتیجه دو جریان به سرعت طول کانال را طی می‌کنند بنابراین فرصت کافی برای انجام پدیده نفوذ به وجود نمی‌آید و به این ترتیب بازده اختلاط حالت‌های A و B با افزایش میدان الکتریکی اعمالی کاهش می‌یابد چراکه عامل اختلاط در این دو حالت پدیده نفوذ است. به علاوه در حالت B، با افزایش میدان الکتریکی جابجایی لینک نارسا افزایش می‌یابد چراکه در این شرایط نیروی هیدرودینامیک بیشتری به لینک نارسا اعمال می‌شود. (به عنوان نمونه می‌توان گفت زمانی که میدان الکتریکی $\bar{E} = 45$ به لینک نارسا اعمال می‌شود، جابجایی لینک تقریباً 1.5 برابر زمانی است که میدان الکتریکی $\bar{E} = 25$ به لینک نارسا اعمال می‌شود.) در حالت B با افزایش میدان الکتریکی از $\bar{E} = 25$ به $\bar{E} = 45$ بازده اختلاط به میزان 14.88% کاهش می‌یابد. در حالتی که از لینک رسانی تغییر شکل‌پذیر در کانال استفاده شود (حالت C)، علاوه بر پدیده نفوذ بین مولکولی، گردابه‌های پیرامون لینک رسانی نیز عاملی تأثیرگذار در بهبود اختلاط می‌باشند. با افزایش

میدان الکتریکی، اندازه و قدرت گردابه‌ها افزایش می‌یابد. به علاوه با افزایش میدان الکتریکی، حداکثر جابجایی لینک رسانا نیز افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه، زمانی که میدان الکتریکی $\bar{E} = 45$ به سیستم اعمال می‌شود جابجایی لینک رسانا تقریباً 2.5 برابر بیشتر از زمانی است که میدان الکتریکی $\bar{E} = 25$ به سیستم اعمال می‌شود. مقایسه کیفی جابجایی لینک در این دو میدان الکتریکی در شکل ۴-۵ نشان داده شده است.



شکل ۴-۵. توزیع غلظت و جابجایی لینک در (الف) حالت A، (ب) حالت B و (ج) حالت C به ازای دو میدان الکتریکی $\bar{E} = 25$ و $\bar{E} = 45$ نشان می‌دهد. خط چین نشان داده شده در تمام حالت‌ها، بیانگر خط تقارن عمودی کانال است. طیف رنگی رسم شده توزیع غلظت بی بعد را نشان می‌دهد. لینک استفاده شده در حالت‌های B و C در وسط کانال قرار گرفته و طول و مدول یانگ آن به ترتیب برابر است با $\bar{h} = 0.5$ و $\bar{M} = 2$.

با در نظر گرفتن هر سه عامل (۱) سرعت جریان (۲) قدرت گردابه‌ها (۳) جابجایی لینک می‌توان انتظار داشت که بازده اختلاط با افزایش میدان الکتریکی کاهش یابد. در حالت C با افزایش میدان الکتریکی به میزان $\Delta \bar{E} = 20$ ، بازده اختلاط 6.38% کاهش می‌یابد.

به ازای افزایش میدان الکتریکی به میزان مشخص، بازده اختلاط در حالت B به میزان بیشتری نسبت به حالت C کاهش می‌یابد (کاهش بازده اختلاط در حالت B و C به ترتیب 14.88% و 6.38% است) بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که حالت B نسبت به تغییرات میدان الکتریکی حساس تر است زیرا تنها عامل بهبود اختلاط در این حالت نفوذ است که با افزایش میدان الکتریکی کاهش می‌یابد. در حالت C، هرچند با افزایش میدان الکتریکی، پدیده نفوذ زمان کافی را نمی‌یابد تا در بهبود اختلاط نقش ایفا

کند باین وجود افزایش اندازه و قدرت گردابه‌ها عامل مثبتی است که تا حدودی اثر منفی کاهش زمان اختلاط را کم‌رنگ می‌کند.

۵-۵- اثر میدان الکتریکی متغیر با زمان بر بازده اختلاط میکرومیکسر

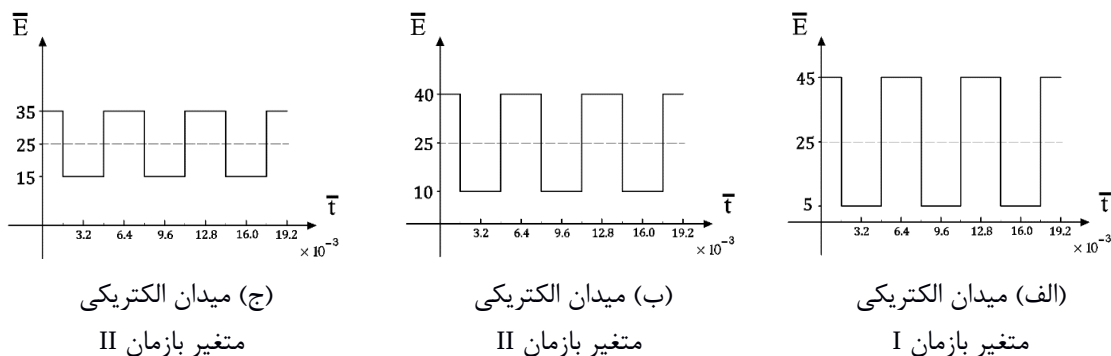
برای محاسبه اثر میدان الکتریکی متغیر با زمان بر بازده اختلاط، دو مطالعه جداگانه بر روی حالت D انجام شده است. در مطالعه اول، رابطه بین دامنه میدان الکتریکی و بازده اختلاط مطالعه شده است و در مطالعه دوم اثر میدان الکتریکی میانگین بر بازده اختلاط بررسی شده است. بازده اختلاط میانگین ($\bar{\varepsilon}$) که در رابطه زیر معرفی شده برای ارزیابی بازده اختلاط در حالت D مورد استفاده قرار گرفته است.

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\int \varepsilon dt}{\Delta t}$$

در این رابطه ε بازده اختلاط در زمان t است و $\bar{\varepsilon}$ بازده اختلاط میانگین در زمان Δt است.

۵-۵-۱- تأثیر دامنه میدان الکتریکی متغیر با زمان بر بازده اختلاط

سه میدان الکتریکی متغیر با زمان (مطابق شکل ۵-۵) به سیستم اعمال می‌شوند. این سه میدان الکتریکی متشکل از توابع موج مربعی با مقدار میانگین $\bar{E}_{ave} = 25$ و فرکانس $\bar{f} = 156.25$ (یا $f = 5 \text{ Hz}$) می‌باشند که با دامنه‌های مختلف به سیستم اعمال می‌شوند.



شکل ۵-۵. سه میدان الکتریکی متغیر با زمان را نشان می‌دهد که به میکرومیکسری با لینک رسانای تغییر شکل‌پذیر (حالت D) اعمال می‌شوند. این توابع موج مربعی هستند با مقدار میانگین $\bar{E}_{ave} = 25$ و دامنه (الف) $\Delta \bar{E} = 40$ ، (ب) $\Delta \bar{E} = 30$ و (ج) $\Delta \bar{E} = 20$ می‌باشند.

جدول ۵-۱، درصد اختلاط میانگین این سه میدان الکتریکی در بازه زمانی $6.4 \times 10^{-3} \leq \bar{t} \leq 12.8 \times 10^{-3}$ (یا $0.2 \text{ s} \leq t \leq 0.4 \text{ s}$) را به ازای مدول‌های یانگ مختلف نشان می‌دهد. بر طبق این جدول، بازده اختلاط با افزایش دامنه میدان الکتریکی افزایش می‌یابد. دامنه میدان

الکتریکی رابطه‌ای مستقیم با محدوده جابجایی لینک دارد. بنابراین با افزایش دامنه میدان الکتریکی، لینک محدوده وسیع‌تری از کانال را جاروب می‌کند. به علاوه با افزایش دامنه میدان الکتریکی، اندازه و قدرت گردابه‌های القایی افزایش می‌یابد این عوامل دست‌به‌دست هم می‌دهند تا با افزایش دامنه میدان الکتریکی، بازده اختلاط افزایش یابد.

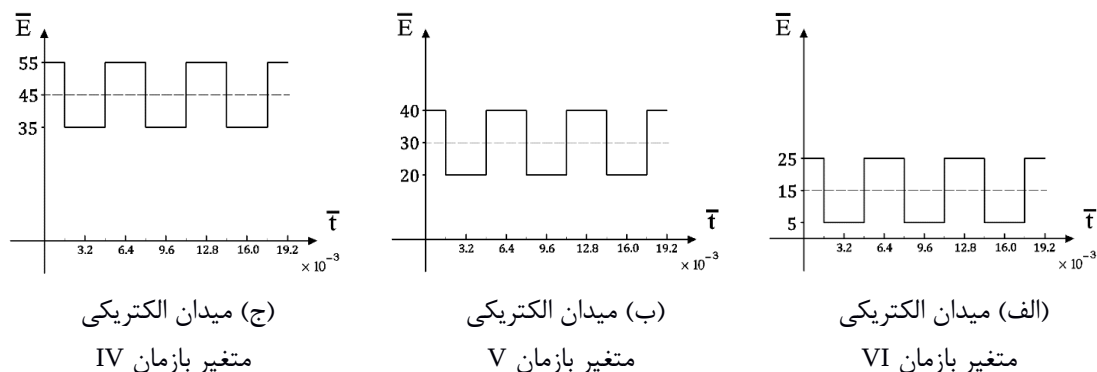
جدول ۵-۱. بازده اختلاط میانگین را برحسب قدرت میدان الکتریکی و مدول یانگ لینک بیان می‌کند.

میدان الکتریکی متغیر با زمان III	میدان الکتریکی متغیر با زمان II	میدان الکتریکی متغیر با زمان I	$\bar{E}(\bar{t})$ $\bar{M}$
77.82	80.28	81.69	$\bar{M} = 1$
76.49	78.76	80.04	$\bar{M} = 2$
75.36	77.48	78.67	$\bar{M} = 3$
74.43	76.46	77.58	$\bar{M} = 4$

مدول یانگ بالاتر معرف موادی است که در مقابل تغییر شکل بیشتر مقاومت می‌کنند. استفاده از لینکی با مدول یانگ پایین‌تر در میکرومیکسر باعث افزایش تغییر شکل لینک و همچنین افزایش حرکت رفت و برگشتی لینک در داخل کانال می‌شود. بنابراین تحت شرایط یکسان، میکرومیکسرهایی که دارای لینک با مدول یانگ کمتر می‌باشند بازده اختلاط را به میزان بیشتری بهبود می‌دهند.

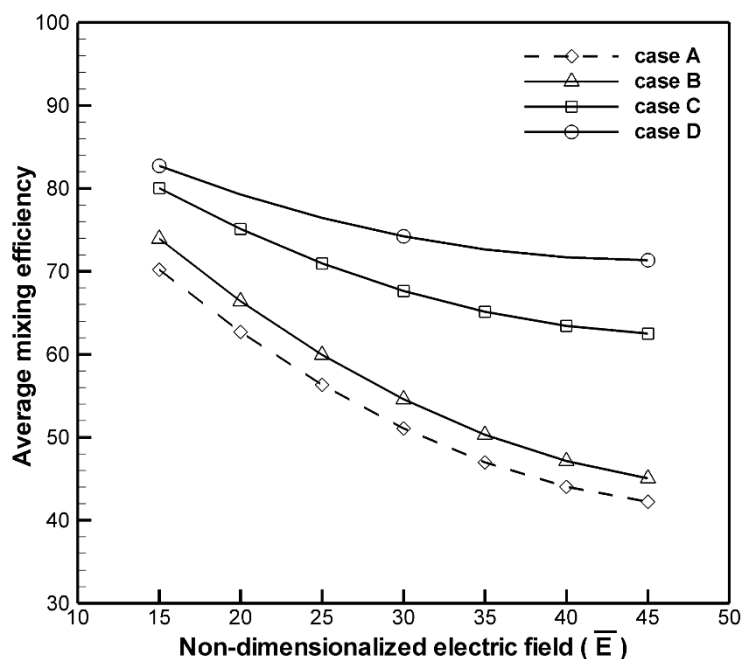
۵-۵-۲- تأثیر میانگین میدان الکتریکی متغیر با زمان بر بازده اختلاط

مطابق شکل ۵-۶، سه میدان الکتریکی که دارای دامنه یکسان $\Delta E = 20$ می‌باشند و تنها مقدار میانگین آن‌ها متفاوت است به سیستم اعمال می‌شوند تا اثر میانگین میدان الکتریکی بر بازده اختلاط مشخص شود.



شکل ۵-۷. سه تابع موج مربعی را نشان می‌دهد که برای بررسی اثر میانگین میدان الکتریکی به میکرومیکسر اعمال شده‌اند. این توابع دارای دامنه $\Delta E = 20$ می‌باشند و تنها مقدار میانگین آن‌ها متفاوت است. مقدار میانگین میدان الکتریکی (الف) $\bar{E}_{ave} = 15$ ، (ب) $\bar{E}_{ave} = 30$ و (ج) $\bar{E}_{ave} = 45$ می‌باشد.

همان‌طور که در شکل ۵-۸ نشان داده شده، زمانی که از یک لینک رسانای تغییر شکل پذیر استفاده می‌شود، بازده اختلاط وابسته به میدان الکتریکی اعمالی می‌باشد. تأثیر میدان الکتریکی میانگین بر بازده اختلاط میکرومیکسرهای B، C و D مطالعه شده است. در هر سه میکرومیکسر با افزایش میدان الکتریکی میانگین، بازده اختلاط کاهش می‌یابد.

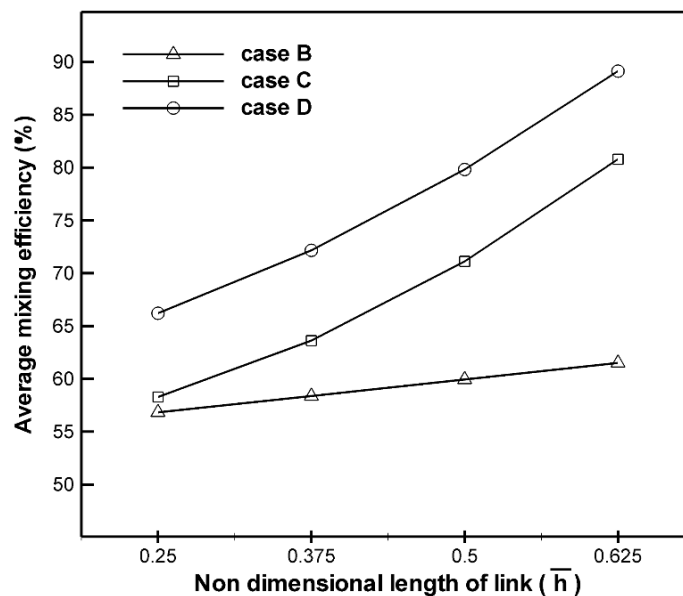


شکل ۵-۸. تأثیر میدان الکتریکی بر بازده اختلاط میانگین چهار میکرومیکسر مختلف را نشان می‌دهد. حالت (A) مربوط به میکرومیکسر بدون لینک می‌باشد که میدان الکتریکی ثابت به آن اعمال می‌شود. حالت (B) مربوط به میکرومیکسر با لینک نارسا است، حالت (C) بیانگر میکرومیکسر با لینک رسانا می‌باشد، میدان الکتریکی اعمالی در سه حالت B، A و C ثابت است. در حالت (D) میدان الکتریکی متغیر با زمان با تابع‌هایی که در شکل ۵-۷ نشان داده شده است به سیستم اعمال می‌شود.

مطابق نتایج ارائه شده در شکل ۵-۸ می‌توان مشاهده کرد که بازده اختلاط با افزایش میدان الکتریکی میانگین کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش بازده اختلاط متعلق به حالت‌های A و B می‌باشد. با افزایش میدان الکتریکی از میزان $\bar{E} = 15$ به میزان $\bar{E} = 45$ ، میانگین بازده اختلاط در حالت A و B به میزان 28% و در حالت C به میزان 17% و در حالت D به میزان 11% کاهش می‌یابد. کمترین کاهش بازده اختلاط مربوط به حالت D می‌باشد چراکه در این حالت افزایش اندازه و قدرت گردابه‌های ناشی از جریان الکتروکنتیک القایی می‌تواند تا حد زیادی اثر منفی کوتاه شدن زمان اختلاط را جبران نماید.

۵-۶- تأثیر طول لینک

شکل ۵-۹، تأثیر طول لینک را بر بازده اختلاط برای حالت B تا D را نشان می‌دهد. در این مطالعه میدان الکتریکی ثابت $\bar{E} = 25$ به سیستم اعمال می‌شود. با توجه به این شکل افزایش طول اولیه لینک نارسا (حالت B) تنها به میزان ناچیزی درصد اختلاط را بهبود می‌دهد. در حالت B، با افزایش 2.5 برابری طول لینک نارسا، بازده اختلاط کمتر از 5% افزایش می‌یابد. برای توجیه این نتیجه می‌بایست به جابجایی لینک و نقش آن در بهبود اختلاط دقت نمود. با افزایش طول لینک رسا هرچند جریان به میزان بیشتری از مسیر اولیه خود منحرف می‌شود اما اغتشاش ناشی از وجود لینک نارسا به اندازه کافی بزرگ نیست که بتواند پدیده نفوذ را بهبود دهد. افزایش طول لینک رسا در حالت C، سطح رسانایی بیشتری را در تماس با محلول الکترولیت قرار می‌دهد و گردابه‌های بزرگ‌تری اطراف لینک رسا ایجاد می‌شوند. افزایش اندازه گردابه‌ها اختلاط را در سیستم بهبود می‌دهد. در حالت C، با افزایش 2.5 برابری طول لینک رسا، بازده اختلاط به میزان 23% بهبود می‌یابد.

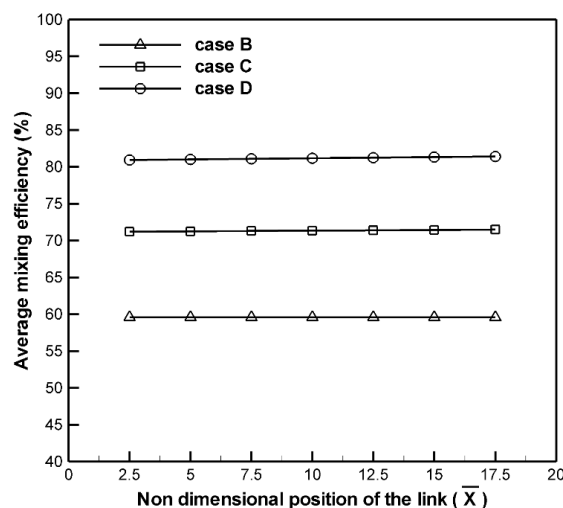


شکل ۵-۹. بازده اختلاط میانگین را برحسب تابعی از طول لینک نشان می‌دهد. حالت (A) مربوط به میکسر بدون لینک می‌باشد. حالت (B) بیانگر میکسر با لینک نارسا است و حالت (C) معرف میکرومیکسر با لینک رسا است. در حالت‌های A تا C میدان الکتریکی ثابت به اندازه $\bar{E} = 25$ به سیستم اعمال می‌شود. در حالت (D) میدان الکتریکی متغیر با زمان تابع I (مطابق شکل ۵-۵) به میکرومیکسر همراه با لینک رسا اعمال می‌شود. مشخصات لینک در تمام این حالت‌ها عبارتند از: ($\bar{h} = 0.5, \bar{X} = 10, \bar{M} = 2$)

در شکل ۵-۹ مقدار بازده اختلاط میانگین ($\bar{\varepsilon}$) برای حالت D در بازه زمانی $6.4 \times 10^{-3} \leq \bar{t} \leq 12.8 \times 10^{-3}$ (یا $0.2 \text{ s} \leq t \leq 0.4 \text{ s}$) به ازای لینک‌هایی با طول‌های مختلف رسم شده است. در حالت D برای بررسی اثر طول لینک، میدان الکتریکی متغیر با زمان IV به سیستم اعمال شده است. این میدان الکتریکی دارای مقدار میانگین $\bar{E}_{ave} = 25$ ، دامنه $\Delta E = 20$ و فرکانس $\bar{f} = 156.25$ (یا $f = 5 \text{ Hz}$) می‌باشد. در حالت D، با افزایش 2.5 برابری طول لینک رسانا بازده اختلاط به میزان 22.93% افزایش می‌یابد و به ازای طول لینک $\bar{h} = 0.625$ ، بازده اختلاط به میزان 89.13% می‌رسد. با افزایش طول لینک رسانا، ابعاد و قدرت گردابه‌ها افزایش می‌یابد ضمن آنکه لینک رسانا می‌تواند محدوده وسیع‌تری در داخل کانال جاروب کند.

۵-۷- تأثیر موقعیت لینک رسانا

در این بخش رابطه موقعیت لینک بر بازده اختلاط برای حالت‌های B تا D مطالعه شده است. همان‌طور که در شکل ۵-۱۰ نشان داده شده است. تغییر موقعیت لینک، تأثیری بر بازده اختلاط در هیچ‌یک از حالات ندارد. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد پدیده اختلاط وابسته به (۱) میزان اغتشاش جریان سیال (۲) میدان الکتریکی اعمالی (۳) طول لینک رسانا (۴) اندازه و قدرت گردابه‌ها می‌باشد، این عوامل هیچ‌کدام وابسته به موقعیت لینک نمی‌باشند.



شکل ۵-۱۰. اثر موقعیت لینک در داخل کانال بر بازده اختلاط میانگین نشان می‌دهد. برای حالت‌های B و C میدان الکتریکی ثابت به اندازه $\bar{E} = 25$ به سیستم اعمال می‌شود. در حالت (D) میدان الکتریکی متغیر با زمان با تابع I (مطابق شکل ۵-۵) به میکرومیکسر با لینک رسانا اعمال می‌شود. مشخصات لینک در تمام این حالت‌ها عبارت‌اند از: $(\bar{h} = 0.5, \bar{X} = 10, \bar{M} = 2)$.

۵-۸- خلاصه و نتیجه گیری:

در این فصل میکرومیکسر جدیدی معرفی شده است و اثر عوامل مختلف بر عملکرد آن به صورت عددی مطالب شده است. این میکرومیکسر شامل یک کانال مستقیم می باشد که روی دیواره بالایی آن یک لینک رسانای تغییر شکل پذیر نصب شده است. با اعمال میدان الکتریکی متغیر بازمان این لینک رسانا، حرکت رفت و برگشتی در داخل کانال انجام می دهد و مشابه یک همزن اختلاط بین دو جریان سیال را بهبود می دهد.

نتایج مطالعات عددی نشان می دهد که با افزایش دامنه میدان الکتریکی متغیر بازمان میزان جابجایی لینک بیشتر می شود و همین عامل سبب می شود تا درصد اختلاط در میکرومیکسر افزایش یابد، از طرف دیگر با کاهش دامنه میدان الکتریکی متغیر بازمان، فرصت کافی به دو جریان سیال داده می شود تا از طرق پدیده نفوذ با یکدیگر مخلوط شوند بنابراین میدان الکتریکی مناسب که می بایست به سیستم اعمال شود تا درصد اختلاط افزایش یابد می بایست دارای دامنه زیاد و مقدار میانگین کمی باشد. طول لینک رسانا و مدول یانگ آن از دیگر عوامل مؤثر بر کارایی میکرومیکسر می باشد، هر چه طول لینک رسانا بیشتر و مدول یانگ آن کمتر باشد، لینک قادر است محدوده بیشتری را در داخل کانال جاروب کند، از طرفی افزایش طول لینک رسانا سبب می شود تا گردابه های بزرگتری در داخل کانال ایجاد شود که به بهبود اختلاط در میکرومیکسر کمک می کنند. میکرومیکسر ارائه شده در این فصل به دلیل طراحی ساده و عملکرد بسیار سریع و مطلوب آن (درصد اختلاط میانگین ۸۱٪ در کمتر از ۱ ثانیه) قادر است در بسیاری از کاربردهای میکروفلوئیدیک جهت بهبود اختلاط جریان های سیال به کار رود.

فصل ششم:

میکرومیکسر

چند لینی با میدان الکتریکی ثابت

میکرومیکسر چند لینکی با میدان الکتریکی ثابت

پس از مشخص شدن چگونگی حرکت لینک رسانا در سه وضعیت عمودی، افقی و مایل که در فصل چهارم بررسی شد. اکنون می‌خواهیم به کمک این ویژگی‌ها میکرومیکسر جدیدی را معرفی کنیم که با استفاده از میدان الکتریکی ثابت کار می‌کند. این میکرومیکسر از زتا پتانسیل القاشده روی سطح لینک رسانا برای بهبود اختلاط دو جریان ورودی بهره می‌برد. در این فصل نشان خواهیم داد که چه ارتباطی میان زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک رسانا و گرادیان فشار مخالف ایجادشده در سیستم وجود دارد. نتایج این فصل به سه بخش تقسیم شده است. در بخش اول میکرومیکسر تک لینک معرفی شده است، این میکرومیکسر با استفاده از میدان الکتریکی ثابت کار می‌کند.

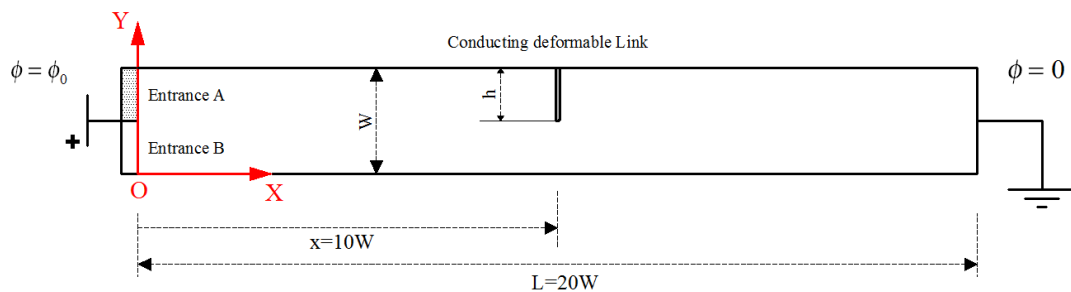
در بخش دوم از سه لینک رسانای تغییر شکل‌پذیر در داخل کانال استفاده شده و میدان الکتریکی ثابت DC به آن‌ها اعمال می‌شود. در این روش ضمن آنکه اثر تعداد لینک‌ها بر عملکرد میکرومیکسر مطالعه شده است، اثر عوامل دیگری از جمله طول لینک و اندازه میدان الکتریکی بر بازده اختلاط میکرومیکسر مطالعه شده است. در این فصل برای توجیه نتایج به دست آمده، از مفهوم گرادیان فشار مخالف استفاده شده است و اشاره شده که هرچه گرادیان فشار مخالف در یک سیستم بیشتر باشد، مدت زمان بیشتری طول می‌کشد تا دو جریان ورودی، کانال را ترک کنند و در این مدت زمان، به دلیل پدیده نفوذ اختلاط بین دو جریان سیال بهبود می‌یابد.

در بخش سوم برای اعتبارسنجی توجیه ارائه شده، نتایج میکرومیکسر واو و لی [۲۲] مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. آن‌ها در تحقیق خود نشان‌دارند که مانع صلب رسانا با شکل مستطیلی بازده اختلاط را به میزان بیشتری نسبت به مانع‌های مثلثی و دایره‌ای افزایش می‌دهد. با بررسی‌های صورت گرفته روی این میکرومیکسر مشخص شد که مانع مستطیلی تحت میدان الکتریکی ثابت DC، گرادیان فشار مخالف بیشتری را در سیستم به وجود می‌آورد و به همین دلیل بازده اختلاط آن نسبت به سایر مانع‌ها بیشتر است.

۱-۶- میکرومیکسر تک لینک با میدان الکتریکی ثابت

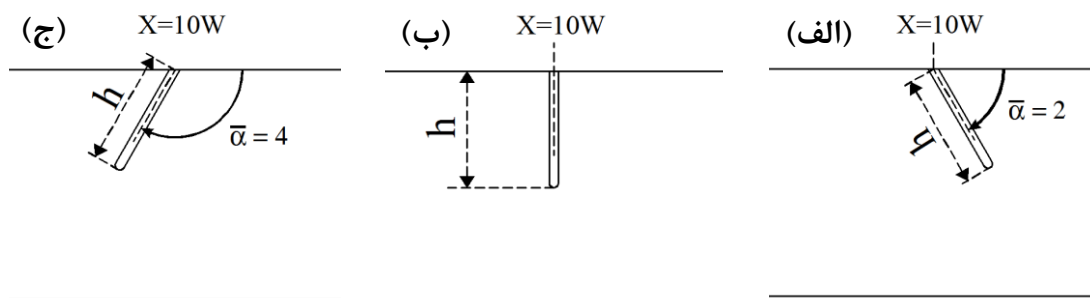
۱-۱-۶- هندسه میکرومیکسر تک لینک

در مدل سازی میکرومیکسر تک لینک از کانال مستقیمی به عرض $W = 250 \mu m$ و طول $L = 20W$ استفاده شده است. همان طور که در شکل ۱-۶ نشان داده شده، در وسط کانال، یک لینک رسانای تغییر شکل پذیر با طول $h = 0.5W$ قرار داده شده. دو انتهای کانال نیز به دو منبع بزرگ از محلول الکترولیت متصل است بنابراین هیچ گونه گرادیان فشار خارجی به سیستم اعمال نمی شود و جریان سیال در داخل کانال تنها به واسطه پدیده الکتروکنتیک ایجاد می شود.



شکل ۱-۶. هندسه میکرومیکسر را نشان می دهد. در این میکرومیکسر برای بهبود اختلاط از لینک رسانای تغییر شکل پذیر استفاده شده است و میدان الکتریکی ثابت به سیستم اعمال می شود.

$\bar{\alpha} = 2$ سه الگو به عنوان نمونه برای بررسی تأثیر زاویه لینک بر میزان کارایی میکرومیکسر انتخاب شد. مطابق شکل ۲-۶ زاویه قرارگیری لینک نسبت به دیواره کانال برای الگوی الف، ب و ج به ترتیب ۲، ۳ و ۴ $\bar{\alpha}$ است.



شکل ۲-۶. سه الگوی قرارگیری لینک رسانا را نشان می دهد. در حالت های (الف)، (ب) و (ج) زاویه قرارگیری لینک نسبت به دیواره بالایی کانال به ترتیب ۲، ۳ و ۴ α است و میدان الکتریکی ثابت $\vec{E}$ از چپ به راست به سیستم اعمال می شود.

معادلات ریاضی حاکم برای این مدل سازی توسط نرم افزار تجاری کامسول 3.5 a حل شده اند. این نرم افزار با استفاده از روش مش متحرک (ALE) قادر است تقابل لینک و سیال را شبیه سازی کند. بررسی های انجام شده در زمینه ی استقلال نتایج از شبکه بندی ناحیه حل نشان می دهد که در صورت استفاده از 5000 المان مثلثی نتایج مدل سازی میکرومیکسر تک لینک، مستقل از شبکه بندی حل خواهد بود.

خصوصیات فیزیکی محلول الکترولیت و مشخصات هندسی مدل در جدول ۶-۱ بیان شده است. خصوصیات ارائه شده در مدل سازی میکرومیکسر با میدان الکتریکی ثابت با خصوصیات میکرومیکسر با میدان الکتریکی متغیر نسبت به زمان یکسان است.

جدول ۶-۱. ثوابت بکار رفته در مدل سازی میکرومیکسر را بیان می کند.

80	ثابت دی الکتریک، ϵ
8.854×10^{-12}	گذردهی خلأ، $\epsilon_0 (C/V.m)$
0.9×10^{-3}	لزجت سیال، $\mu (kg/m.s)$
998	چگالی سیال، $\rho (kg/m^3)$
-50	زتا پتانسیل روی دیواره نارسانای کانال، $\zeta_w (mV)$
-20	زتا پتانسیل روی لینک نارسانا، $\zeta_L (mV)$
1	مدول یانگ لینک، $M_{ref} (kPa)$
250	عرض کانال، $W (\mu m)$
20W	طول کانال، L
1.52×10^{-10}	ضریب نفوذ، $D_i (m^2 s^{-1})$
1	غلظت مولی ورودی A، (mol/m^3)
0	غلظت مولی ورودی B، (mol/m^3)

نتایج ارائه شده در این بخش از پژوهش برحسب پارامترهای زیر بی بعد شده اند.

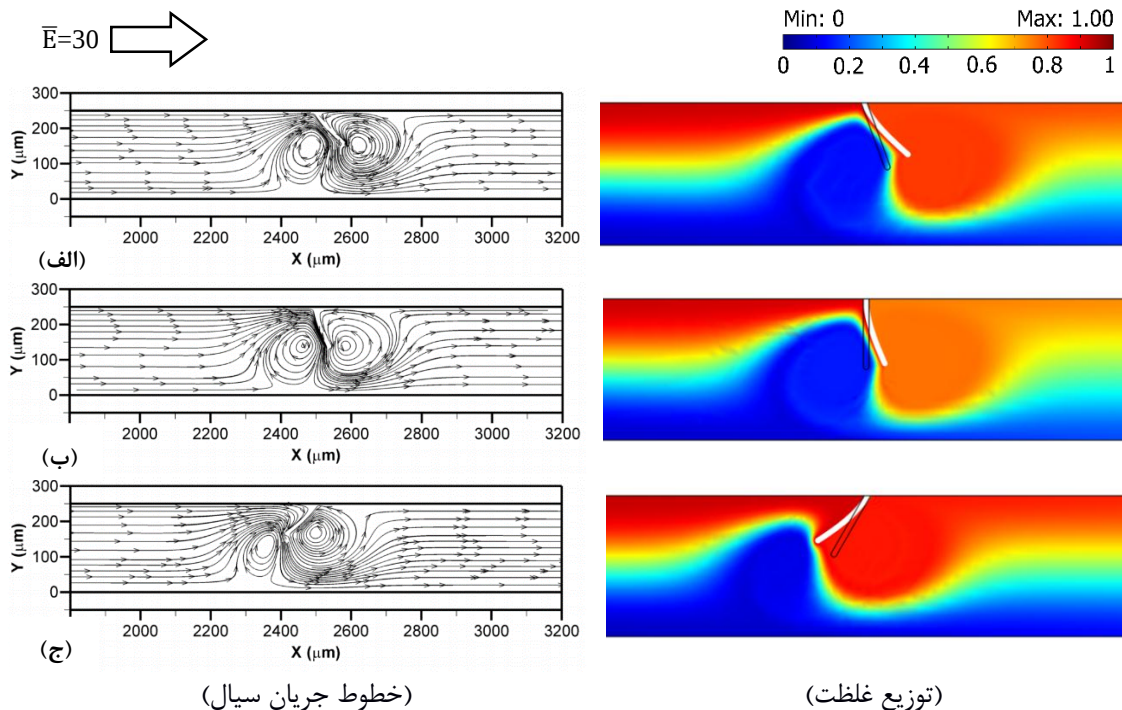
$$\bar{\zeta}_i = \frac{\zeta_i}{\zeta_w} \quad \bar{u} = \frac{\vec{u}}{U_{ref}} \quad \bar{x} = \frac{\vec{x}}{W} \quad \bar{t} = \frac{t}{W/U_{ref}}$$

$$\bar{E} = \frac{\vec{E}}{\zeta_w/W} \quad \bar{M} = \frac{M}{M_{ref}} \quad \bar{\alpha} = \frac{\alpha}{30^\circ}$$

در این روابط، سرعت مرجع با توجه به رابطه $U_{ref} = \frac{\epsilon \epsilon_0}{\mu} \frac{\zeta_w^2}{W}$ محاسبه می شود.

۶-۱-۲- تأثیر زاویه لینک بر بازده اختلاط میکرومیکسر تک لینک

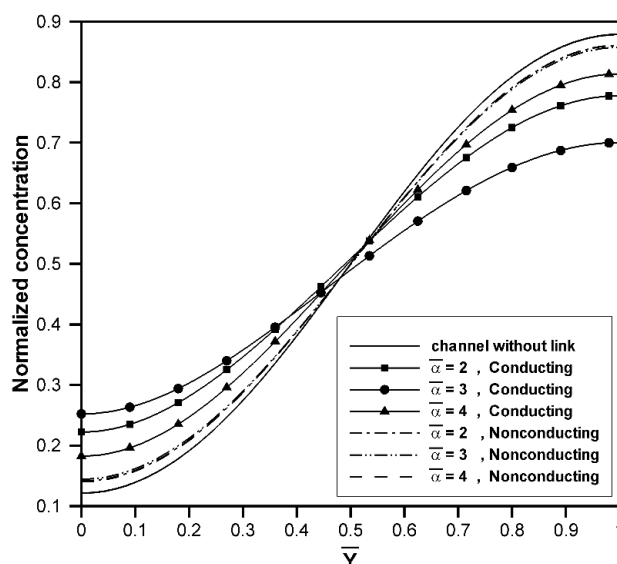
در این قسمت اثر زاویه لینک بر بازده اختلاط میکرومیکسر تک لینک بررسی می‌شود. برای این منظور از یک لینک تغییر شکل‌پذیر به طول $\bar{h} = 0.5$ و مدول یانگ $\bar{M} = 1$ استفاده شده. این لینک در وسط کانال و در سه زاویه ۲، ۳ و $\bar{\alpha} = 4$ نسبت به دیواره کانال نصب شده، و میدان الکتریکی $\bar{E} = 30$ به سیستم اعمال می‌شود. در یک میکرومیکسر بدون لینک بازده اختلاط بین دو جریان ورودی 50% است و این مقدار فاصله زیادی تا بازده اختلاط میکرومیکسر ایده‌آل دارد. در میکرومیکسر بدون لینک عامل اصلی اختلاط پدیده نفوذ است و در این پدیده مدت‌زمان زیادی طول می‌کشد تا اختلاط بین دو جریان سیال به‌طور کامل انجام شود. برای این منظور طول کانال مستقیم می‌بایست بزرگ باشد. اما برای دستیابی به اختلاط مطلوب در یک طول کوتاه می‌توان موانعی را در داخل کانال قرارداد در صورتی که این موانع نارسا نباشند تنها مسیر عبور جریان در داخل کانال دستخوش تغییر می‌شود که در نتیجه آن بازده اختلاط اندکی بهبود می‌یابد اما در صورتی که از موانع رسا در داخل کانال استفاده شود گردابه‌های ناشی از جریان الکتروکنتیک القایی پیرامون مانع‌های رسا، بازده اختلاط را به میزان چشم‌گیری افزایش می‌دهند.



شکل ۶-۳. توزیع غلظت و خطوط جریان سیال را پیرامون یک لینک رسانای تغییر شکل‌پذیر نشان می‌دهد. در حالت‌های الف، ب و ج زاویه لینک رسا نسبت به دیواره کانال به ترتیب ۲، ۳ و $\bar{\alpha} = 4$ است. طیف رنگی رسم شده توزیع غلظت بی‌بعد را نشان می‌دهد. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل‌سازی عبارت‌اند از $(\bar{h} = 0.5, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30)$.

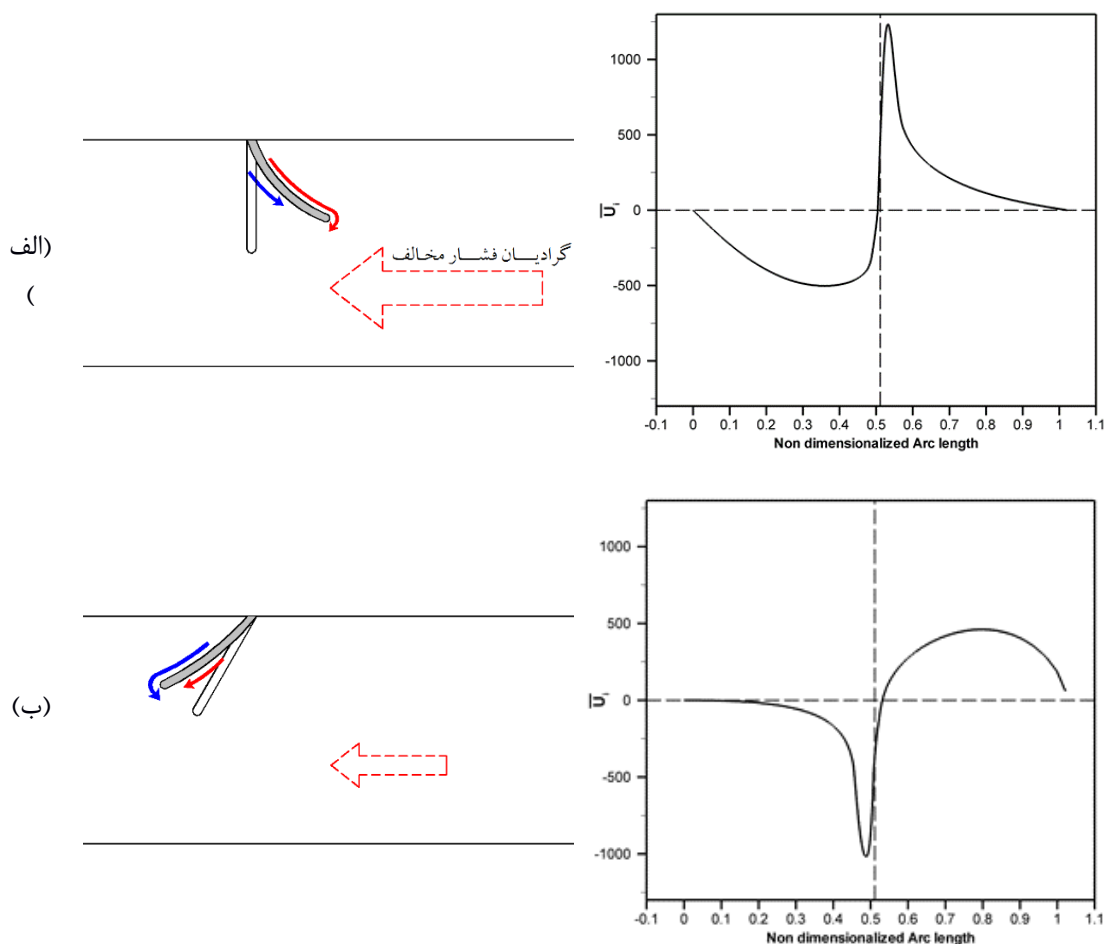
پس از آنکه چگونگی ایجاد اختلاط برای میکرومیکسر بدون لینک، میکرومیکسر با لینک نارسانا و میکرومیکسر با لینک رسانا تشریح شد. اکنون می‌خواهیم درصد اختلاط هر یک از این روش‌ها را با یکدیگر مقایسه کنیم. در شرایط مشابه که میدان الکتریکی $E = 30$ به سیستم اعمال می‌شود، بازده اختلاط برای میکرومیکسر بدون لینک 50% است. با اضافه کردن یک لینک نارسانا به داخل کانال، بازده اختلاط تنها به میزان 4% نسبت به میکرومیکسر بدون لینک افزایش می‌یابد و بررسی‌ها نشان می‌دهد که زاویه قرارگیری لینک نارسانا در داخل کانال تأثیری بر بازده اختلاط ندارد.

با اضافه کردن یک لینک رسانا با زاویه $\bar{\alpha} = 3$ به داخل کانال، بازده اختلاط به میزان 19% نسبت به میکرومیکسر بدون لینک افزایش می‌یابد. این افزایش بازده اختلاط برای لینک‌های رسانا با زاویه $\bar{\alpha} = 2$ و $\bar{\alpha} = 4$ به ترتیب 14% و 9% است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که بهترین زاویه قرارگیری لینک رسانا برای دستیابی به بازده اختلاط حداکثر، زاویه قائمه است، در مقابل کمترین بازده اختلاط بین لینک‌های رسانا، مربوط به لینک با زاویه $\bar{\alpha} = 4$ است. شکل ۴-۶ توزیع غلظت در خروجی کانال میکرومیکسرهای بررسی شده را در زمان $t = 0.1$ s نشان می‌دهد. هرچه پروفیل توزیع غلظت یک میکرومیکسر به خط $C = 0.5$ نزدیک‌تر باشد، بازده اختلاط در آن میکرومیکسر بیشتر خواهد بود بنابراین بیشترین بازده اختلاط با توجه به شکل ۴-۶ مربوط به میکسر با لینک رسانای عمودی است.



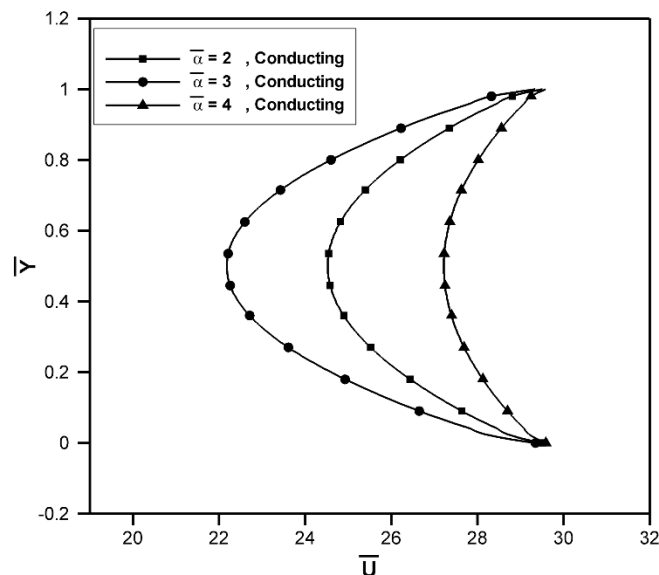
شکل ۴-۶. پروفیل توزیع غلظت در خروجی کانال میکرومیکسر بدون لینک، میکرومیکسر با لینک نارسانا و میکرومیکسر با لینک رسانا را نشان می‌دهد. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل‌سازی عبارتند از $(\bar{h} = 0.5, \bar{M} = 1, E = 30)$.

با بررسی نتایج این سؤال پیش می‌آید که چگونه زاویه قرارگیری یک لینک رسانا بر بازده اختلاط میکرومیکسر تأثیر می‌گذارد؟ برای پاسخ به این سؤال می‌بایست سرعت لغزشی روی سطح راست لینک رسانا را بررسی نمود. سرعت لغزشی روی سطح راست لینک رسانا به جهت آنکه در خلاف جهت جریان در داخل کانال است، گرادیان فشار مخالف را در سیستم به وجود می‌آورد و در مقابل سرعت لغزشی روی سطح چپ لینک به جهت آنکه در جهت جریان است گرادیان فشار موافق را در سیستم به وجود می‌آورد. با توجه به شکل ۵-۶ سرعت لغزشی سیال روی سطح راست لینک رسانا با زاویه $\bar{\alpha} = 3$ و $\bar{\alpha} = 4$ به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار می‌باشند. بنابراین برای لینک رسانا با زاویه $\bar{\alpha} = 3$ و $\bar{\alpha} = 4$ ، گرادیان فشار مخالف به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار خواهد بود.



شکل ۵-۶. نمودار سرعت لغزشی روی سطح لینک رسانا با زاویه (الف) $\bar{\alpha} = 3$ ، (ب) $\bar{\alpha} = 2$ را نشان می‌دهد. همچنین طرحی از سرعت لغزشی روی سطح لینک رسانا در هر دو زاویه رسم شده است. بردارهای روی سطح لینک بیانگر سرعت لغزشی ناشی از زتا پتانسیل القایی می‌باشند. پیکان توخالی نشان‌دهنده گرادیان فشار مخالف در داخل کانال است. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل‌سازی عبارت است از ($\bar{h} = 0.5, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30$).

گرادیان فشار مخالف که در نتیجه سرعت لغزشی روی سطح راست لینک به وجود می‌آید به اندازه کافی بزرگ نیست که بتواند مسیر عبور جریان سیال را مسدود کند، بلکه تنها قادر است پروفیل توزیع سرعت را در داخل کانال تغییر دهد. همان‌طور که در شکل ۶-۶ نشان داده شده سرعت سیال در خروجی کانال در زمان $t = 0.1 \text{ s}$ ، برای هر سه زاویه لینک همواره مثبت است. اما با بررسی پروفیل‌های سرعت می‌توان دریافت که پروفیل سرعت لینک رسانا با زاویه $\bar{\alpha} = 3$ بیشتر دچار نقص شده و کوچکتر است. این ویژگی نشان می‌دهد گرادیان فشار مخالف بیشتری به لینک رسانا با زاویه $\bar{\alpha} = 3$ وارد می‌شود، در مقابل پروفیل سرعت لینک رسانا با زاویه $\bar{\alpha} = 4$ کمتر فرو رفته است و همین عامل نشان می‌دهد که گرادیان فشار مخالف کمتری به لینک رسانا با زاویه $\bar{\alpha} = 4$ وارد می‌شود.



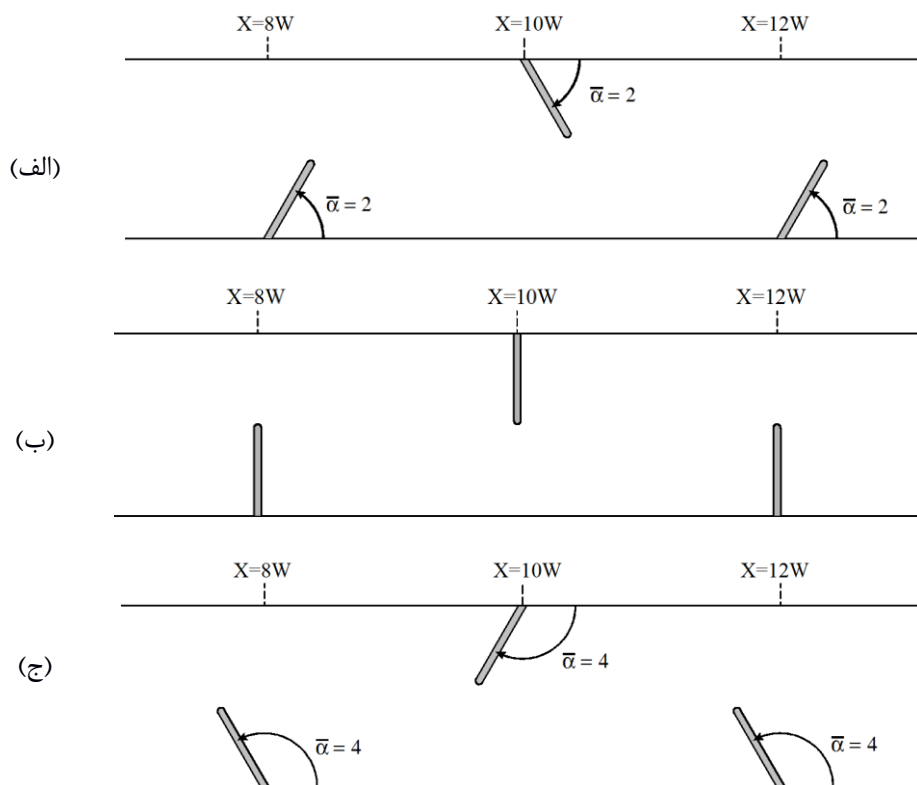
شکل ۶-۶. پروفیل توزیع سرعت محوری روی خروجی کانال، برای میکرومیکسر تک لینک را نشان می‌دهد. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل‌سازی عبارت است از: $(\bar{h} = 0.5, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30)$.

هرچه گرادیان فشار مخالف در یک میکرومیکسر بیشتر باشد دو جریان سیال مدت‌زمان بیشتری می‌یابند تا با یکدیگر مخلوط شوند. در مقابل با کاهش گرادیان فشار مخالف دو جریان سیال به سرعت طول کانال را طی می‌کنند و در این شرایط زمان کافی برای انجام پدیده نفوذ به دو جریان سیال داده نمی‌شود و بازده اختلاط کاهش می‌یابد. با توجه به آنچه گفته شد می‌توان نتیجه‌گیری نمود که لینک رسانا با زاویه $\bar{\alpha} = 3$ به سبب آنکه دارای گرادیان فشار مخالف قوی‌تری است بنابراین بازده اختلاط آن نیز بالاتر خواهد بود. اما لینک رسانا با زاویه $\bar{\alpha} = 4$ چون دارای گرادیان فشار مخالف کمتری نسبت به دو لینک رسانای دیگر است، بنابراین بازده اختلاط آن نیز نسبت به این دو لینک، کمتر خواهد بود.

۲-۶- میکرومیکسر با سه لینک و میدان الکتریکی اعمالی ثابت

۱-۲-۶- هندسه میکرومیکسر با سه لینک

پس از آنکه اثر یک لینک را بر بازده اختلاط میکرومیکسر بررسی کردیم. اکنون می‌خواهیم اثر سه لینک را بر بازده اختلاط میکرومیکسر با میدان الکتریکی ثابت بررسی کنیم. برای این منظور مطابق شکل ۷-۶، سه الگو برای چینش لینک‌ها در داخل کانال پیشنهاد شد. الگوهای پیشنهاد شده برای میکرومیکسر سه لینکی، مشابه میکرومیکسر تک لینک است و در این الگوها لینک‌ها در سه زاویه 2 ، 3 و 4 $\bar{\alpha}$ نسبت به دیواره کانال نصب شده‌اند. در میکرومیکسر با سه لینک، فاصله لینک‌های قرار گرفته روی دیواره پایینی کانال نسبت به لینک وسطی $2W$ است. مطالعه استقلال نتایج از شبکه‌بندی ناحیه حل نشان می‌دهد که در صورت استفاده از 15000 المان مثلثی، نتایج به دست آمده مستقل از تعداد شبکه به کاررفته در ناحیه حل خواهد بود. مشخصات فیزیکی محلول الکترولیت و ابعاد هندسی مدل مطابق جدول ۱-۶ است

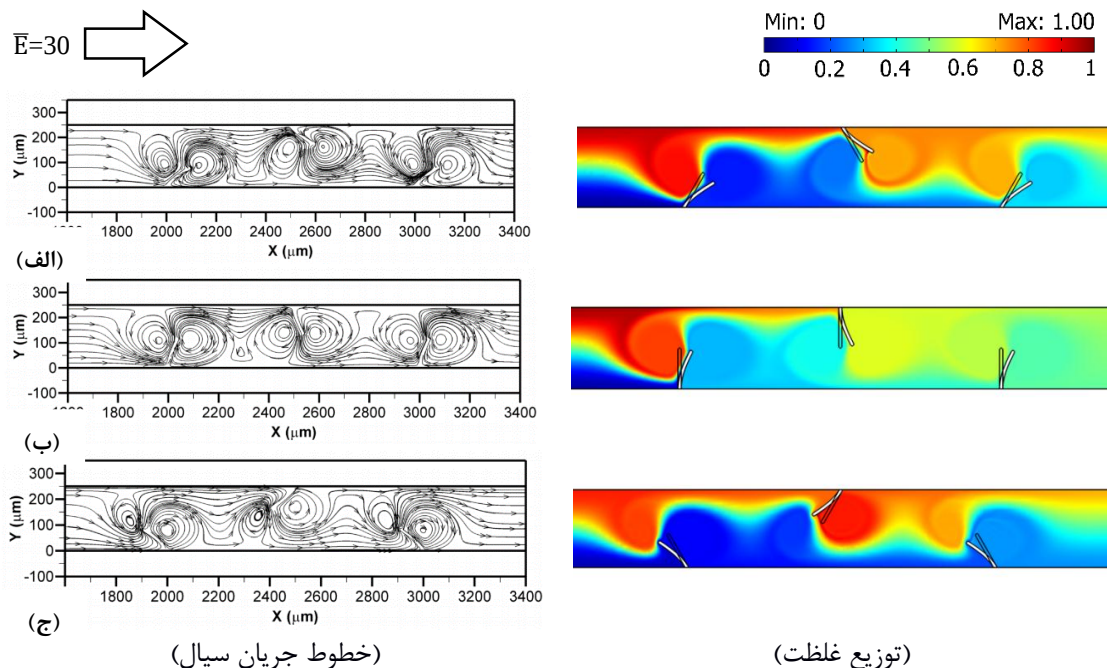


شکل ۷-۶. چیدمان و نحوه قرارگیری لینک‌ها را در میکرومیکسر سه لینکی نشان می‌دهد. زاویه قرارگیری لینک‌ها در حالت (الف)، (ب) و (ج) به ترتیب 2 ، 3 و 4 $\bar{\alpha}$ است. میدان الکتریکی اعمالی به سیستم مقداری ثابت و از چپ به راست است.

۶-۲-۲- تأثیر زاویه لینک بر بازده اختلاط میکرومیکسر سه لینکی

در این بخش اثر زاویه و تعداد لینک‌ها بر عملکرد میکرومیکسر بررسی می‌شود. همان‌طور که اشاره شد، در میکرومیکسر بدون لینک، دو جریان ورودی تنها به واسطه پدیده نفوذ با یکدیگر مخلوط می‌شوند و در این حالت بازده اختلاط برای میدان الکتریکی $\bar{E} = 30$ ، تنها 50% است با اضافه کردن سه لینک نارسانا به داخل کانال، بازده اختلاط به میزان 9% نسبت به میکرومیکسر بدون لینک افزایش می‌یابد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که زاویه قرارگیری لینک‌های نارسانا هیچ تأثیری بر بازده اختلاط میکرومیکسر ندارد.

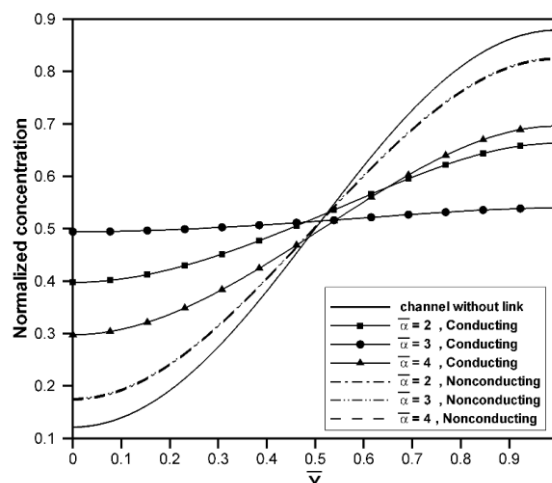
در صورت استفاده از سه لینک رسانای عمودی بازده اختلاط به میزان 91% می‌رسد که رشدی 41% نسبت به بازده اختلاط میکرومیکسر بدون لینک را نشان می‌دهد. اگر سه لینک رسانا با زاویه $\bar{\alpha} = 2$ و $\bar{\alpha} = 4$ در یک میکرومیکسر استفاده شود، بازده اختلاط به میزان 33% و 24% نسبت به میکرومیکسر بدون لینک افزایش می‌یابد. شکل ۶-۸ توزیع غلظت و خطوط جریان سیال را در میکرومیکسر با سه لینک رسانا نشان می‌دهد. پیرامون هر لینک رسانا دو گردابه ایجاد می‌شود که هریک از آن‌ها به ایجاد اغتشاش و اختلاط بیشتر در داخل کانال کمک می‌کنند.



شکل ۶-۸. توزیع غلظت و خطوط جریان سیال را پیرامون سه لینک رسانای تغییر شکل‌پذیر نشان می‌دهد. در حالت‌های الف، ب و ج زاویه لینک‌های رسانا نسبت به دیواره کانال به ترتیب 2، 3 و $\bar{\alpha} = 4$ است. طیف رنگی رسم شده توزیع غلظت بی‌بعد را نشان می‌دهد. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل‌سازی عبارت‌اند از $(\bar{h} = 0.5, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30)$.

با بررسی نتایج می‌توان دریافت که افزایش تعداد لینک‌های رسانا نسبت به لینک‌های نارسانا، تأثیر بیشتری بر بازده اختلاط میکرومیکسر می‌گذارد چراکه با اضافه کردن یک لینک رسانا به داخل کانال، دو گردابه پیرامون آن ایجاد می‌شود که به بهبود اختلاط میکرومیکسر کمک می‌کنند اما با اضافه کردن یک لینک نارسانا، اغتشاش ناچیزی در جریان سیال داخل کانال به وجود می‌آید و این اغتشاش کم، نمی‌تواند بازده اختلاط را به میزان قابل توجهی افزایش دهد.

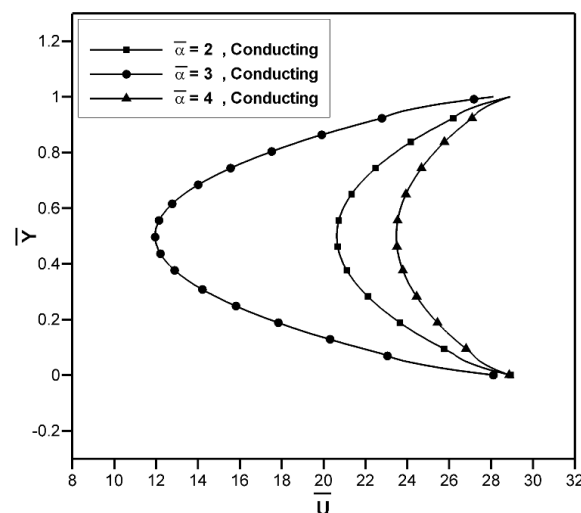
شکل ۶-۹ پروفیل توزیع غلظت در خروجی کانال را برای میکرومیکسر با سه لینک تغییر شکل‌پذیر نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، پروفیل توزیع غلظت مربوط به میکرومیکسر با سه لینک رسانای عمودی بسیار نزدیک به خط $C = 0.5$ است و این نتیجه نشان می‌دهد که اختلاط انجام‌شده در میکسر با لینک‌های رسانای عمودی، به حالت ایدئال بسیار نزدیک است. از طرفی پروفیل توزیع غلظت مربوط به میکرومیکسر بدون لینک بیشترین انحراف را نسبت به خط $C = 0.5$ دارد و این نتیجه نشان می‌دهد که کمترین بازده اختلاط بین میکرومیکسرهای مطالعه شده مربوط به میکسر بدون لینک است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، زاویه لینک نارسانا هیچ تأثیری بر بازده اختلاط میکرومیکسر ندارد، در شکل ۶-۹ نیز می‌توان مشاهده نمود که پروفیل توزیع غلظت لینک‌های نارسانا با زاویه‌های مختلف بر یکدیگر منطبق می‌باشند اما در مقابل مشاهده می‌شود که پروفیل توزیع غلظت لینک‌های رسانا با زاویه‌های مختلف با یکدیگر متفاوت است و همین عامل نشان می‌دهد که زاویه قرارگیری لینک‌های رسانا بر بازده اختلاط میکرومیکسر تأثیر می‌گذارد.



شکل ۶-۹. پروفیل توزیع غلظت در خروجی کانال میکرومیکسر بدون لینک، میکرومیکسر با سه لینک نارسانا و سه لینک رسانا را نشان می‌دهد. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل‌سازی عبارت‌اند از $(\bar{h} = 0.5, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30)$.

برای توجیه اینکه چرا بازده اختلاط میکرومیکسر با لینک‌های رسانای عمودی بیشتر از سایر لینک‌ها است می‌بایست اندازه گرادیان فشار مخالف به ازای میکرومیکسرهای مختلف را مقایسه نمود. شکل ۶-۱۰ پروفیل توزیع سرعت در خروجی کانال میکرومیکسر با سه لینک رسانای مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود پروفیل توزیع سرعت مربوط به لینک رسانای عمودی نسبت به سایر لینک‌ها بیشتر فرورفته است (کوژتر است)، با توجه به این مشاهده می‌توان گفت که گرادیان فشار مخالف بیشتری در میکرومیکسر با لینک‌های رسانای عمودی به وجود می‌آید. در مقابل پروفیل توزیع سرعت مربوط به میکرومیکسر با لینک‌های رسانایی با زاویه $\bar{\alpha} = 4$ در مقایسه با سایر پروفیل‌ها کم‌تر فرورفته است (کم‌تر کوژ است)، بنابراین می‌توان گفت که گرادیان فشار مخالف کمتری در این میکرومیکسر ایجاد می‌شود.

از طرفی می‌دانیم هرچه گرادیان فشار مخالف بیشتری در سیستم وجود داشته باشد، دو جریان سیال فرصت بیشتری را می‌یابند تا با یکدیگر مخلوط شوند، بنابراین با افزایش گرادیان فشار مخالف در سیستم بازده اختلاط نیز افزایش می‌یابد. با توجه به آنچه گفته شد می‌توان نتیجه‌گیری کرد که میکرومیکسر با لینک‌های رسانای عمودی به جهت آنکه دارای بیشترین گرادیان فشار مخالف می‌باشند، بیشترین بازده اختلاط را خواهند داشت و در مقابل میکرومیکسر با لینک‌های رسانا با زاویه $\bar{\alpha} = 4$ به جهت آنکه دارای کمترین گرادیان فشار مخالف است، کمترین بازده اختلاط را نیز بین میکرومیکسر با لینک‌های رسانا خواهد داشت.

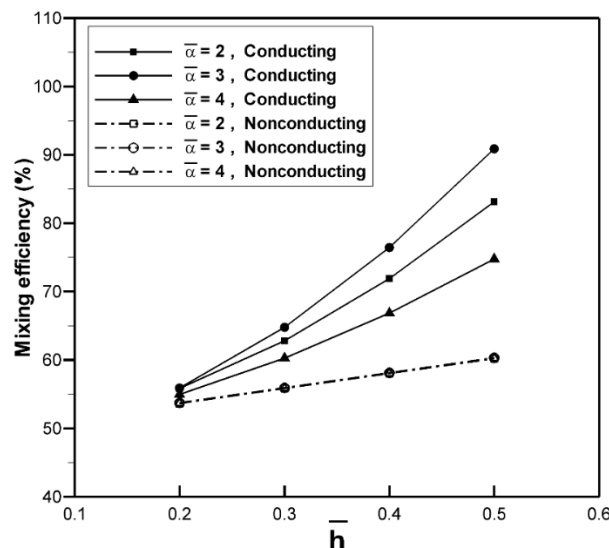


شکل ۶-۱۰. پروفیل توزیع سرعت محوری روی خروجی کانال، برای میکرومیکسر با سه لینک رسانا را نشان می‌دهد. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل‌سازی عبارت است از ($\bar{h} = 0.5, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30$).

۳-۲-۶- تأثیر طول لینک بر بازده اختلاط میکرومیکسر با سه لینک

طول لینک یکی از عوامل تأثیرگذار بر بازده اختلاط میکرومیکسر است. برای بررسی تأثیر این عامل بر بازده اختلاط، مطالعه‌ای در این بخش انجام شده است. در این مطالعه از لینکی با مدول یانگ $\bar{M} = 1$ استفاده شده و میدان الکتریکی $\bar{E} = 30$ به سیستم اعمال می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۱۱-۶ مشاهده می‌شود بازده اختلاط یک میکرومیکسر با سه لینک چه در حالت رسانا و چه در حالت نارسا با افزایش طول لینک افزایش می‌یابد اما این افزایش در بازده اختلاط، برای لینک‌های رسانا بیشتر است. به‌عنوان مثال با افزایش ۲.۵ برابری طول لینک نارسا در هر سه زاویه لینک، بازده اختلاط به میزان ۷٪ افزایش می‌یابد، در صورتی که با ۲.۵ برابر کردن طول لینک رسانا در وضعیت عمودی، بازده اختلاط میکرومیکسر به میزان ۳۵٪ افزایش می‌یابد. به‌طور مشابه با افزایش ۲.۵ برابری طول لینک‌های رسانا با زاویه $\bar{\alpha} = 2$ و $\bar{\alpha} = 4$ ، بازده اختلاط به ترتیب به میزان ۲۷٪ و ۲۰٪ افزایش می‌یابد. این افزایش قابل توجه برای بازده اختلاط لینک‌های رسانا پس از افزایش طول آن‌ها، به دلیل رابطه مستقیم بین اندازه گردابه‌ها با طول لینک رسانا است. با افزایش طول لینک رسانا زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک رسانا نیز بیشتر می‌شود که در نتیجه آن گردابه‌های بزرگ‌تر با قدرت بیشتر پیرامون لینک رسانا ایجاد می‌شوند. این افزایش در قدرت و اندازه گردابه‌ها سبب می‌شود تا بازده اختلاط به میزان قابل توجهی افزایش یابد.

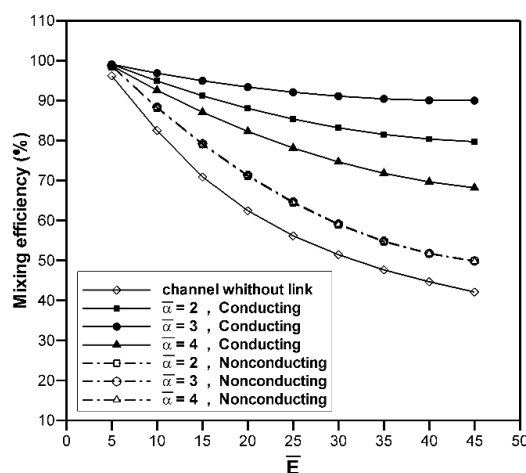


شکل ۱۱-۶. تأثیر طول لینک رسانا و نارسا را بر بازده اختلاط میکرومیکسر با سه لینک نشان می‌دهد. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل‌سازی عبارت است از ($\bar{M} = 1, \bar{E} = 30$).

۴-۲-۶- تأثیر میدان الکتریکی بر بازده اختلاط میکرومیکسر با سه لینک

برای مطالعه اثر میدان الکتریکی از لینک‌هایی با طول $\bar{h} = 0.5$ و مدول یانگ $\bar{M} = 1$ استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۲-۶ نشان داده شده در میدان الکتریکی $\bar{E} = 5$ بازده اختلاط تمامی میکرومیکسرهای بالای ۹۵٪ است چراکه در این شرایط زمان کافی به دو جریان سیال داده می‌شود که تحت تأثیر پدیده نفوذ با یکدیگر مخلوط شوند. اما در میدان‌های الکتریکی قوی ($\bar{E} > 30$) سرعت سیال در داخل کانال افزایش می‌یابد که طی آن، سهم پدیده نفوذ در بهبود اختلاط کمتر می‌شود اما با افزایش میدان الکتریکی، اندازه و قدرت گردابه‌های مجاور لینک رسانا افزایش می‌یابد و این عامل مثبت مانع از کاهش بازده اختلاط در میدان‌های الکتریکی قوی ($\bar{E} > 30$) برای میکرومیکسرهای با لینک رسانا می‌شود.

با توجه به شکل ۱۲-۶ مشاهده می‌شود که با افزایش میدان الکتریکی در محدوده ($\bar{E} > 30$)، بازده اختلاط برای میکرومیکسر بدون لینک و میکرومیکسر با لینک‌های نارسا کاهش می‌یابد در صورتی که در این محدوده بازده اختلاط میکرومیکسر با لینک‌های رسانا تقریباً ثابت است. برای توجیه این نتیجه می‌بایست توجه نمود که با افزایش میدان الکتریکی در میکرومیکسرهای با لینک رسانا، اندازه و قدرت گردابه‌ها در داخل کانال افزایش می‌یابد و این عامل مثبت اثر منفی کاهش زمان اختلاط را جبران می‌کند. در میکرومیکسر بدون لینک و میکرومیکسر با لینک‌های نارسا عامل مثبت گردابه‌ها وجود ندارد بنابراین با افزایش میدان الکتریکی، بازده اختلاط این میکرومیکسرهای کاهش می‌یابد.

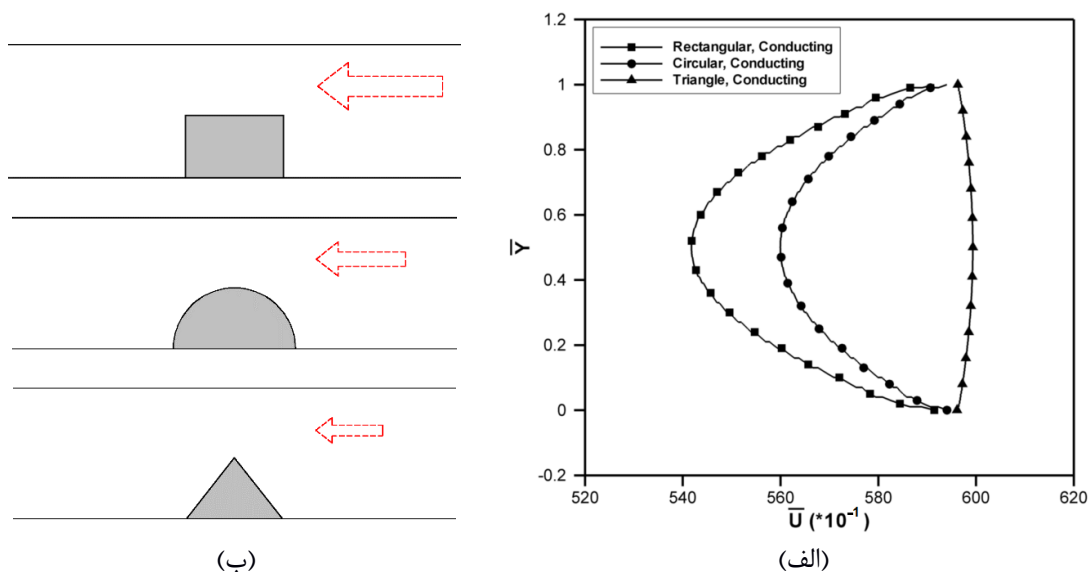


شکل ۱۲-۶. اثر میدان الکتریکی بر بازده اختلاط میکرومیکسر بدون لینک، میکرومیکسر با سه لینک نارسا و سه لینک رسانا را نشان می‌دهد. مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی در این مدل‌سازی عبارت است از ($\bar{h} = 0.5, \bar{M} = 1, \bar{E} = 30$).

۳-۶- اعتبارسنجی نتایج میکرومیکسر با میدان الکتریکی ثابت

واو و لی [۲۲] در سال ۲۰۰۸ میکرومیکسری را معرفی کردند که با اعمال میدان الکتریکی ثابت DC به مانع‌های رسانای صلب با شکل‌های هندسی مختلف، عمل اختلاط بین دو جریان سیال را انجام می‌داد. میکرومیکسر آن‌ها از یک کانال مستقیم ساده تشکیل شده بود که روی دیواره‌های آن مانع‌های رسانای صلب با هندسه مثلث، مستطیل و دایره جای گرفته بودند و به سیستم میدان الکتریکی ثابت اعمال می‌شد. واو و لی گزارش کردند که تحت اعمال یک میدان الکتریکی ثابت، میکرومیکسر با مانع رسانای مستطیلی، بازده اختلاط را به میزان بیشتری نسبت به مانع‌های مثلثی و دایره‌ای افزایش می‌دهد همچنین نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که پس از مانع مستطیلی، مانع دایره‌ای بیشترین بازده اختلاط را خواه داشت و کمترین بازده اختلاط نیز متعلق به مانع مثلثی است. این دو محقق، شکل گردابه‌های پیرامون مانع‌های رسانا را دلیل اصلی اختلاف در بازده اختلاط گزارش کردند.

در این پژوهش بار دیگر میکرومیکسر واو و لی شبیه‌سازی شد و پروفیل توزیع سرعت برای هر سه مانع مثلثی، مستطیلی و دایره‌ای استخراج شد. شکل ۶-۱۳ پروفیل توزیع سرعت برای میکرومیکسر با هر یک از سه مانع را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده، پروفیل سرعت مربوط به مانع مستطیلی فرورفته‌تر است (کوژتر است) و در مقابل پروفیل توزیع سرعت میکرومیکسر با مانع مثلثی کمترین فرورفتگی را دارد.



شکل ۶-۱۳. (الف) پروفیل توزیع سرعت در خروجی کانال میکرومیکسر با مانع‌های مستطیلی، دایره‌ای و مثلثی را نشان می‌دهد. (ب) طرح ساده‌ای از اندازه گرادیان فشار مخالف را پیرامون مانع‌های رسانای صلب نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۶-۱۳، بیشترین و کمترین گرادیان فشار مخالف به ترتیب به میکرومیکسر با مانع مستطیلی و مثلثی اعمال می‌شود. با توجه به آنکه گرادیان فشار مخالف بزرگ‌تر، زمان بیشتری را در اختیار دو جریان سیال قرار می‌دهد تا با یکدیگر مخلوط شوند بنابراین می‌توان انتظار داشت که به ترتیب میکرومیکسر با مانع مستطیلی، دایره‌ای و مثلثی دارای بیشترین بازده اختلاط باشند و این نتیجه به‌طور کامل منطبق با گزارش‌های واو و لی است. در انتها می‌توان گفت که برای مقایسه بازده اختلاط چندین میکرومیکسر با میدان الکتریکی ثابت، می‌توان اندازه گرادیان فشار مخالف را در این میکرومیکسرها با یکدیگر مقایسه نمود.

۶-۴- خلاصه و نتیجه‌گیری:

در این فصل یک میکرومیکسر جدید معرفی شده است، این میکرومیکسر شامل یک کانال مستقیم است که روی دیواره‌های آن لینک‌های رسانای تغییر شکل‌پذیر جای گرفته‌اند و به سیستم میدان الکتریکی ثابت اعمال می‌شود. با اعمال میدان الکتریکی، زتا پتانسیل روی سطح لینک رسانا القا می‌شود و این زتا پتانسیل القایی، گرادیان فشار مخالف را در سیستم به وجود می‌آورد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که اندازه گرادیان فشار مخالف در سیستم وابسته به زاویه قرارگیری لینک‌های رسانا در داخل کانال است. هرچه اندازه گرادیان فشار مخالف در سیستم بیشتر باشد، دو جریان سیال مدت‌زمان بیشتری را می‌یابند تا با یکدیگر مخلوط و بازده اختلاط به میزان بیشتری افزایش می‌یابد. توجیه ارائه‌شده بر مبنای گرادیان فشار مخالف برای تحلیل نتایج میکرومیکسر واو و لی بکار گرفته شد و مشاهده شد که نتایج حاصل از این توجیه با نتایج ارائه‌شده توسط واو و لی مطابقت دارد. در این فصل اثر عوامل دیگری از جمله طول لینک رسانا، اندازه میدان الکتریکی اعمالی و تعداد لینک‌های رسانا بر عملکرد میکرومیکسر با لینک‌های رسانا مطالعه شده است.

فصل هفتم:

میکروولو

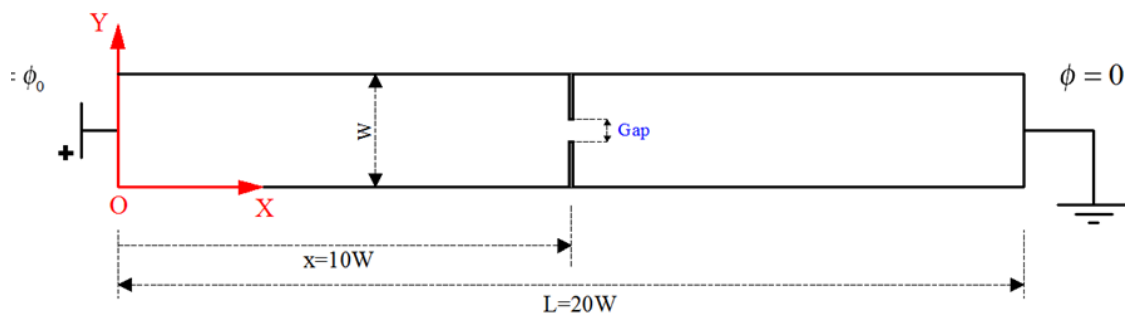
ارائه یک میکروولو با استفاده از لینک‌های رسانای متقارن

در این فصل یک میکروولو جدید معرفی شده است، این میکروولو بر اساس تغییر شکل دو لینک رسانای متقارن عمل می‌کند. با تغییر شکل لینک‌ها، توزیع زتا پتانسیل القایی روی سطح آن‌ها نیز تغییر می‌کند و این عامل سبب می‌شود تا گرادیان فشار مخالف در کانال ایجاد شود. در اثر گرادیان فشار مخالف ایجادشده، دبی عبوری از خروجی کانال کاهش می‌یابد. به تدریج با افزایش تغییر شکل لینک‌ها، گرادیان فشار مخالف در کانال افزایش می‌یابد تا زمانی که دبی عبوری از خروجی کانال صفر می‌شود. تحت این شرایط سیستم تبدیل به ولو می‌شود. در این فصل میدان الکتریکی که به ازای آن سیستم تبدیل به ولو می‌شود بانام میدان الکتریکی بحرانی نام‌گذاری شده است. در صورتی که میدان الکتریکی بیشتر از میدان الکتریکی بحرانی به سیستم اعمال شود، جریان بازگشتی در داخل کانال ایجاد خواهد شد. این جریان در خلاف جهت میدان الکتریکی اعمالی است و جهت آن از خروجی به سمت ورودی کانال است. در میکرومیکسر معرفی شده با تغییر اندازه میدان الکتریکی نه تنها می‌توان جریان ورودی را مسدود نمود بلکه می‌توان جهت جریان را داخل کانال را نیز تغییر داد و جریان خالصی از خروجی به سمت ورودی کانال ایجاد نمود این مزیت‌ها در شرایطی به دست می‌آید که هیچ‌گونه تغییری در جهت میدان الکتریکی انجام نشده است. این عملکرد ساده سبب می‌شود تا این میکروولو قابلیت به کارگیری در بسیاری از کاربردهای میکروفلوئیدیک را داشته باشد.

در این فصل اثر فاصله بین دو لینک و مدول یانگ لینک‌ها بر میزان دبی خروجی از کانال مطالعه شده است. همچنین اثر عوامل مختلفی از جمله مدول یانگ لینک‌ها و طول کانال بر میدان الکتریکی بحرانی نیز مطالعه شده است.

۱-۷- هندسه و خصوصیات فیزیکی بکار رفته در مدل سازی

در این فصل برای مدل سازی میکروولو از یک کانال مستقیم دوبعدی به عرض $W = 250 \mu m$ و طول کانال $L = 20W$ استفاده شده است. مطابق شکل ۱-۷، در وسط این کانال $\bar{X} = 10$ ، دو لینک رسانای مشابه با مدول یانگ $\bar{M}$ جای گرفته اند. فاصله بین دو لینک با متغیر Gap نام گذاری شده است. در ابتدا و انتهای کانال دو الکتروود جای گرفته اند که میدان الکتریکی DC را، از چپ به راست در داخل کانال ایجاد می کنند. دو انتهای این کانال مستقیم به دو منبع بزرگ از محلول الکتروولیت متصل است بنابراین هیچ گونه گرادیان فشار خارجی به سیستم اعمال نمی شود و تنها عامل ایجاد جریان سیال در داخل کانال، پدیده ی الکتروکنتیک است. خصوصیات فیزیکی محلول الکتروولیت و ثوابت به کار رفته در مدل سازی میکروولو در جدول ۱-۷ بیان شده است.



شکل ۱-۷. طرح ساده ای از هندسه میکروولو را نشان می دهد. در این میکروولو از دو لینک رسانای متقارن استفاده شده که فاصله بین آن ها با پارامتر Gap مشخص شده است.

جدول ۱-۷. ثوابت بکار رفته در شبیه سازی عددی میکروولو را نشان می دهد.

80	ثابت دی الکتریک، ϵ
8.854×10^{-12}	گذردهی خلأ، $\epsilon_0 (C/V.m)$
0.9×10^{-3}	لزجت سیال، $\mu (kg/m.s)$
998	چگالی سیال، $\rho (kg/m^3)$
-50	زتا پتانسیل روی دیواره نارسانای کانال، $\zeta_w (mV)$
1	مدول یانگ لینک، $M_{ref} (kPa)$
250	عرض کانال، $W (\mu m)$
$20 W$	طول کانال، L
$0.08 W$	عمق کانال، D
$0.04 W$	پهنای لینک، W

شبیه‌سازی عملکرد این میکروولو توسط نرم‌افزار کامسول 3.5a انجام شده است. این نرم‌افزار با استفاده از روش مش متحرک (ALE) قادر است تقابل لینک و سیال را به‌درستی شبیه‌سازی کند. ناحیه مدل‌سازی در این شبیه‌سازی با استفاده از مش مثلثی غیر ساختاریافته شبکه‌بندی شده است. مطالعه عدم وابستگی نتایج به شبکه‌بندی حل نشان می‌دهد که در صورت استفاده از ۵۰۰۰ المان مثلثی، نتایج مدل‌سازی مستقل از شبکه‌بندی حل خواهد بود.

میکروولو طراحی شده در زمان $t=0.1s$ (به عبارت دیگر $\bar{t} = 7.87022e-6$) به حالت پایدار خود می‌رسد. در این شرایط نیروی هیدرودینامیک وارد بر لینک با نیروی عکس‌العمل لینک برابر می‌شود و لینک دیگر جابجا نمی‌شود همچنین در این شرایط تغییری در جریان سیال داخل کانال ایجاد نمی‌شود. نتایج ارائه شده برای بیان عملکرد میکروولو در این لحظه که سیستم حالت پایدار خود را طی می‌کند استخراج شده‌اند. در این بخش زمان پایدار سیستم با نماد $\bar{t}_{steady}$ نشان داده شده است. نتایج ارائه شده در این پژوهش برحسب پارامترهای زیر بی‌بعد شده‌اند.

$$\begin{aligned} \bar{X} &= \frac{\bar{X}}{W} & \bar{Y} &= \frac{\bar{Y}}{W} & \bar{E} &= \frac{\bar{E}}{\zeta_W/W} & M &= \frac{M}{M_{ref}} & \bar{\alpha} &= \frac{\alpha}{90^\circ} \\ \bar{\zeta}_i &= \frac{\zeta_i}{\zeta_W} & \bar{U} &= \frac{U}{U_{ref}} & \bar{t} &= \frac{t}{W/U_{ref}} & \bar{P} &= \frac{P - P_a}{\rho U_{ref}^2} & F &= \frac{F \cdot \mu^2}{\rho (\varepsilon \varepsilon_0 \zeta_W^2)^2} \end{aligned}$$

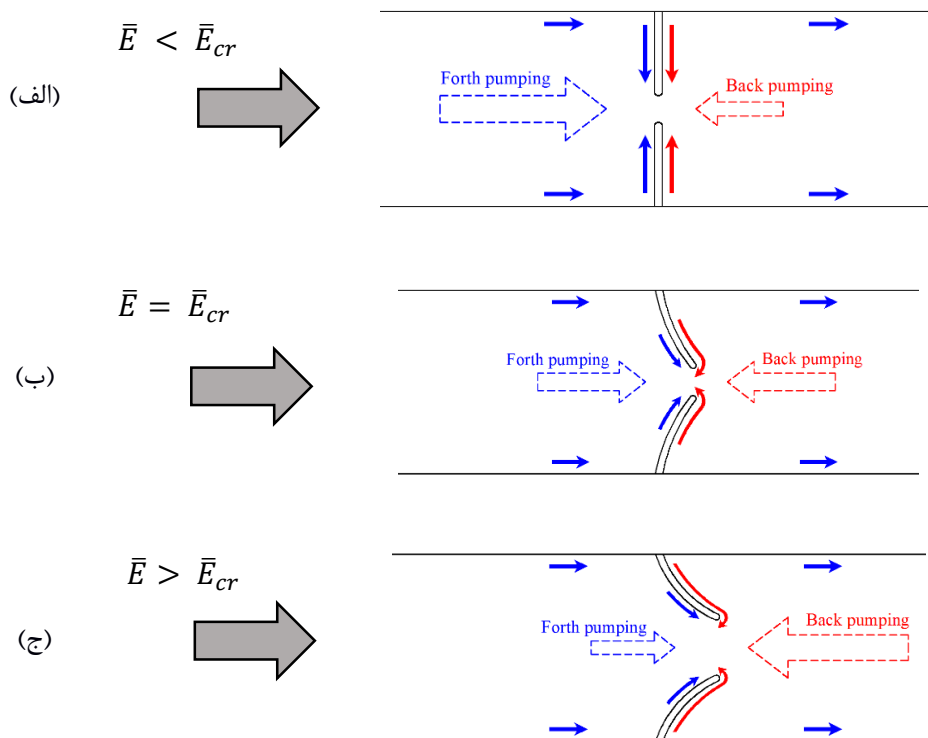
در بین این پارامترهای بی‌بعد، سرعت مرجع با توجه به رابطه $U_{ref} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{\mu} \frac{\zeta_W^2}{W}$ محاسبه می‌شود.

۷-۲- چگونگی تغییر جهت جریان توسط لینک‌های رسانا

در این بخش نحوه عملکرد ولو و چگونگی تغییر جهت جریان توسط دو لینک رسانای متقارن تشریح می‌شود. دستگاهی که در این بخش برای تشریح عملکرد ولو انتخاب شده شامل دو لینک رسانای متقارن با مدول یانگ $\bar{M} = 9$ ($M = 9 \text{ kpa}$) است، فاصله بین این دو لینک $\bar{Gap} = 0.16$ است و این لینک‌ها در فاصله $\bar{X} = 10$ از ورودی کانال قرار گرفته‌اند. در ادامه این بخش، چگونگی جابجایی لینک‌های رسانا و جریان سیال ایجاد شده در داخل کانال به ازای میدان‌های الکتریکی مختلف بررسی شده است.

همان‌طور که در شکل ۷-۲ نشان داده شده، با افزایش میدان الکتریکی، نیروی هیدرودینامیک بیشتری به لینک‌های رسانا وارد می‌شود که در نتیجه آن جابجایی لینک‌ها افزایش می‌یابد. با افزایش جابجایی لینک‌ها و تغییر شکل آن‌ها نسبت به موقعیت اولیه خود، توزیع زتا پتانسیل القایی روی سطح

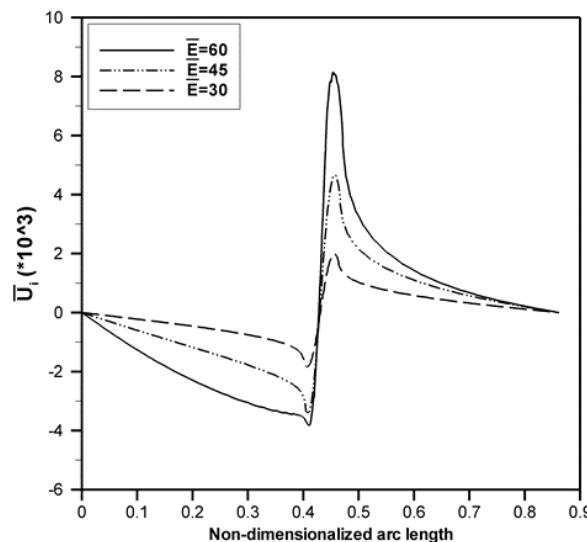
لینک رسانا نیز تغییر می‌کند و نقطه حداکثر فشار به سمت چپ لینک منتقل می‌شود (برای اطلاعات بیشتر پیرامون نقطه حداکثر فشار به فصل چهارم مراجعه کنید). از طرفی سرعت لغزشی روی سطح لینک رسانا رابطه‌ای مستقیم با زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک دارد. بنابراین با تغییر زتا پتانسیل القایی، جهت و اندازه سرعت لغزشی روی سطح لینک رسانا نیز تغییر می‌کند. همان‌طور که در شکل ۲-۷ نشان داده‌شده با افزایش میدان الکتریکی، سرعت لغزشی روی سطح راست لینک رسانا افزایش می‌یابد و در مقابل سرعت لغزشی روی سطح چپ لینک کاهش می‌یابد.



شکل ۲-۷. طرح ساده‌ای از نحوه عملکرد میکروولو در این تصویر نشان داده‌شده است. میدان الکتریکی اعمالی در این میکروولو از چپ به راست است، و میدان الکتریکی اعمالی در حالت (الف)، (ب) و (ج) به ترتیب کمتر، مساوی و بیشتر از میدان الکتریکی بحرانی (E_{cr}) است. در حالت (ب) که میدان الکتریکی بحرانی اعمال می‌شود، سیستم مشابه ولو عمل می‌کند و جریان بالادست اجازه نمی‌یابد تا از بین دو لینک عبور کند.

شکل ۳-۷ تغییرات سرعت لغزشی روی سطح لینک رسانا را به ازای سه میدان الکتریکی مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش میدان الکتریکی، اندازه سرعت لغزشی روی سطح راست لینک بیشتر از سطح چپ آن می‌شود. جهت سرعت لغزشی روی سطح راست لینک به سمت ورودی کانال خواهد بود چراکه نقطه حداکثر فشار به سطح چپ لینک منتقل شده است. سرعت لغزشی روی سطح راست لینک باعث ایجاد یک گرادیان فشار مخالف در سیستم می‌شود. در مقابل سرعت لغزشی روی سطح چپ لینک به سمت خروجی کانال است که در نتیجه آن گرادیان فشار

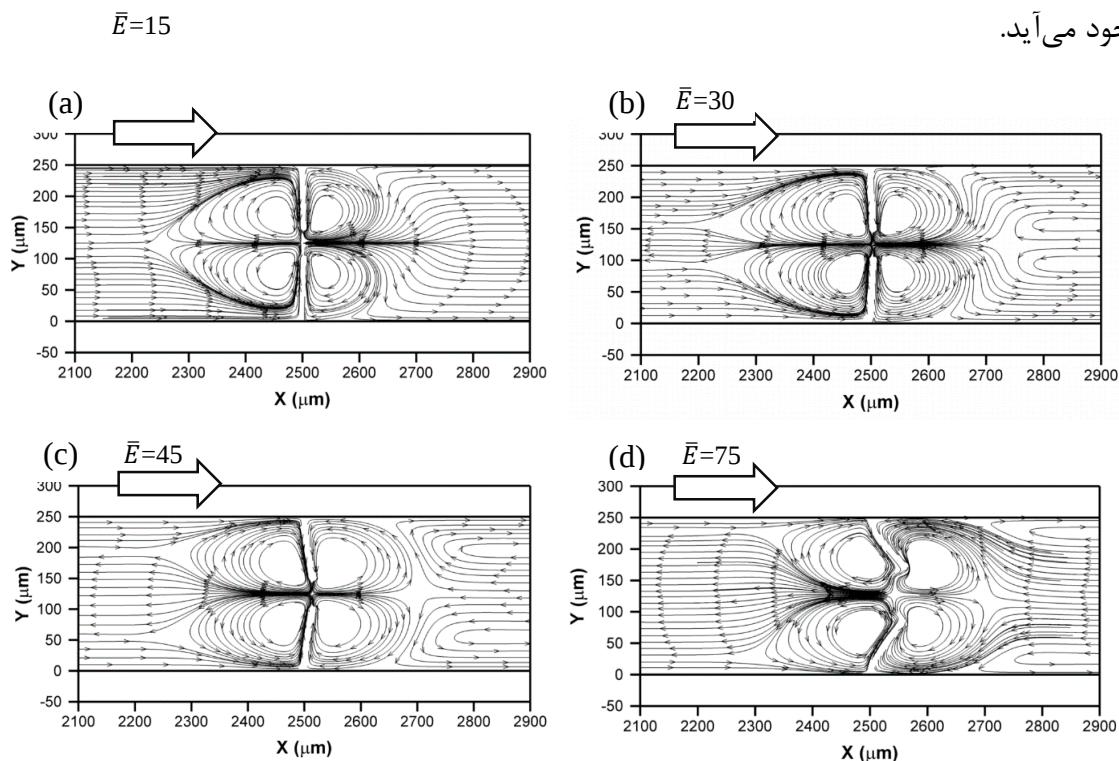
موافق در سیستم ایجاد می‌شود. زتا پتانسیل ثابت قرار گرفته روی دیواره‌های نارسانای کانال، همواره گرادیان فشار موافق را در کانال ایجاد می‌کنند اما بایستی توجه داشت که گرادیان فشار ناشی از دیواره‌های کانال همواره کمتر از گرادیان فشار لینک رسانا است، چراکه زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک رسانا چندین برابر (۱۰ تا ۲۰ برابر) بیشتر از زتا پتانسیل ثابت دیواره نارسانای کانال است.



شکل ۷-۳. سرعت لغزشی روی سطح لینک رسانا را در زمان پایداری سیستم به ازای میدان‌های الکتریکی $\bar{E} = 30, 45, 60$ نشان می‌دهد. مشخصات لینک در این مدل‌سازی عبارتند از $(\bar{X} = 10, \bar{M} = 9, \bar{Gap} = 0.16)$.

همان‌طور که در شکل ۷-۲ نشان داده شده، در میدان الکتریکی کم ($\bar{E} = 30$)، گرادیان فشار موافق بیشتر از گرادیان فشار مخالف است، بنابراین در این شرایط جریان خالصی از ورودی به سمت خروجی کانال ایجاد می‌شود. اما با افزایش میدان الکتریکی، اندازه گرادیان فشار موافق کاهش می‌یابد و در مقابل گرادیان فشار مخالف افزایش می‌یابد در این بین به ازای یک میدان الکتریکی مشخص ($\bar{E} = 45$)، اندازه گرادیان فشار موافق و مخالف با یکدیگر برابر می‌شوند و در این شرایط دبی ورودی به داخل کانال راهی به سوی خروجی نمی‌یابد و سیستم تبدیل به ولو می‌شود. میدان الکتریکی اعمالی در این شرایط به نام، میدان الکتریکی بحرانی $\bar{E}_{cr}$ نام‌گذاری می‌شود. در صورتی که میدان الکتریکی قوی ($\bar{E} = 60$) به سیستم اعمال شود، گرادیان فشار مخالف بر گرادیان فشار موافق غلبه می‌کند و جریان خالصی از خروجی به سمت ورودی کانال ایجاد می‌شود. جریان سیال ایجاد شده در این شرایط، در خلاف جهت میدان الکتریکی اعمالی است و این جریان تنها به واسطه تغییر زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک رسانا در میدان‌های الکتریکی قوی به وجود می‌آید.

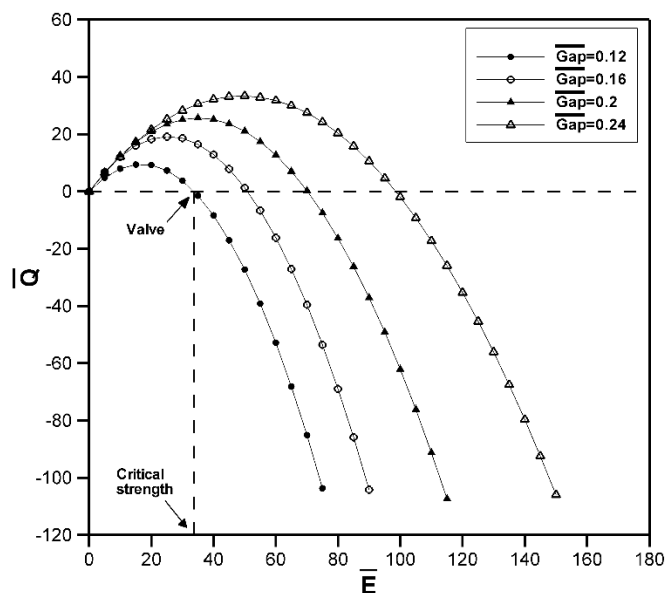
شکل ۴-۷ خطوط جریان سیال در نزدیکی دو لینک رسانا را به ازای میدان‌های الکتریکی مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در میدان الکتریکی کم ($\bar{E} = 15$) جریان خالصی در جهت میدان الکتریکی، از ورودی به سمت خروجی کانال ایجاد می‌شود. با افزایش میدان الکتریکی گرادیان فشار مخالف در سیستم افزایش می‌یابد و این گرادیان فشار مخالف دبی عبوری از خروجی کانال را کاهش می‌دهد. در یک میدان الکتریکی خاص ($\bar{E} = 45$) که به نام میدان الکتریکی بحرانی شناخته می‌شود، اندازه گرادیان فشار مخالف با گرادیان فشار موافق برابر می‌شود و جریان وارد شده به داخل کانال راهی به‌سوی خروجی نمی‌یابد. در این شرایط همان‌طور که در شکل ۴-۷ نشان داده شده، دبی عبوری از خروجی کانال صفر می‌شود و سیستم مشابه یک ولو عمل می‌کند. در صورتی که میدان الکتریکی بزرگ‌تر از میدان الکتریکی بحرانی به سیستم اعمال شود، گرادیان فشار مخالف بیشتر از گرادیان فشار موافق خواهد بود و جریان خالصی در خلاف جهت میدان الکتریکی در داخل کانال به وجود می‌آید.



شکل ۴-۷. خطوط جریان سیال را پیرامون دو لینک رسانا متقارن نشان می‌دهد. در میدان‌های الکتریکی $\bar{E} = 15, 30$ جریان در جهت میدان الکتریکی در داخل کانال ایجاد می‌شود. تحت میدان الکتریکی بحرانی $\bar{E}_{cr} = 45$ جریان ورودی به داخل کانال راهی به سمت خروجی نمی‌یابد و در میدان الکتریکی $\bar{E} = 75$ جریانی بازگشتی در خلاف جهت میدان الکتریکی اعمالی در داخل کانال به وجود می‌آید. مشخصات لینک در این مدل‌سازی عبارت‌اند از $(\bar{Gap} = 0.16, \bar{M} = 9, \bar{X} = 10)$.

۷-۳- تأثیر فاصله بین دو لینک بر دبی عبوری از خروجی کانال

در این بخش اثر فاصله بین دو لینک $\overline{Gap}$ بر دبی عبوری از خروجی کانال مطالعه شده است. در این مطالعه از دو لینک رسانای مشابه با مدول یانگ $\overline{M} = 10$ استفاده شده، این دو لینک در فاصله $\overline{X} = 10$ از ورودی کانال جای گرفته‌اند. شکل ۷-۵ دبی عبوری از خروجی کانال را به ازای میدان‌های الکتریکی مختلف نشان می‌دهد. این نمودار به ازای فواصل مختلف بین دو لینک رسم شده است. به عنوان نمونه در صورتی که فاصله بین دو لینک $\overline{Gap} = 0.12$ باشد، با افزایش میدان الکتریکی دبی عبوری از خروجی کانال افزایش می‌یابد، تا اینکه در میدان الکتریکی $\overline{E} = 15$ به حداکثر مقدار خود $\overline{Q} = 9.41$ می‌رسد. در ادامه با افزایش میدان الکتریکی دبی عبوری از خروجی کانال افت می‌کند تا اینکه در میدان الکتریکی $\overline{E}_{cr} = 67$ دبی عبوری از خروجی کانال به میزان صفر می‌رسد. در این شرایط سیستم تبدیل به ولو می‌شود و میدان الکتریکی اعمالی بانام میدان الکتریکی بحرانی نام‌گذاری می‌شود. با افزایش میدان الکتریکی، دبی عبوری از خروجی کانال با علامت منفی نشان داده شده که بیانگر جریان بازگشتی از خروجی به سمت ورودی کانال است. جریان بازگشتی ناشی از زتا پتانسیل القایی روی سطح لینک رسانا می‌باشد که در خلاف جهت میدان الکتریکی ایجاد شده است.

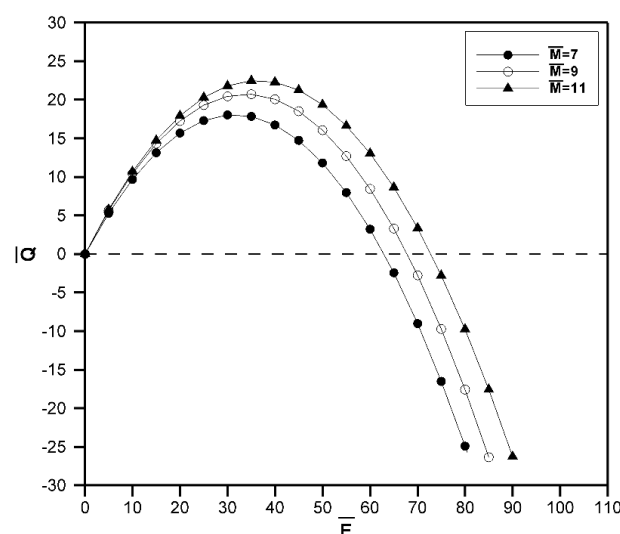


شکل ۷-۵. نمودار دبی عبوری از خروجی کانال را برحسب میدان الکتریکی اعمالی نشان می‌دهد. این نمودار به ازای فواصل مختلف بین دو لینک رسم شده است. در هر یک از این نمودارها نقطه‌ای را می‌توان یافت که به ازای آن دبی خروجی از کانال صفر می‌شود میدان الکتریکی متناظر با این نقطه بانام میدان الکتریکی بحرانی نام‌گذاری می‌شود. مشخصات لینک در این مدل‌سازی عبارت‌اند از $(\overline{M} = 10, \overline{X} = 10)$.

با بررسی شکل ۵-۷ می‌توان دریافت که با افزایش فاصله بین دو لینک، میدان الکتریکی بحرانی که به ازای آن سیستم تبدیل به ولو می‌شود افزایش می‌یابد. برای توجیه این نتیجه می‌توان این‌گونه استدلال نمود که با افزایش فاصله بین دو لینک، گرادیان فشار مخالف بیشتری باید به سیستم اعمال شود تا سیستم مانع از عبور جریان پایین‌دست شود. این گرادیان فشار مخالف بیشتر توسط میدان الکتریکی قوی‌تر ایجاد می‌شود.

۴-۷- تأثیر مدول یانگ لینک‌های رسانا بر دبی عبوری از خروجی کانال

در این بخش اثر مدول یانگ لینک بر دبی عبوری از خروجی کانال مطالعه شده است. در این مطالعه از دو لینک رسانای مشابه استفاده شده، فاصله بین این دو لینک رسانا $\overline{Gap} = 0.2$ می‌باشد و این دو لینک در فاصله $\bar{X} = 10$ از ورودی کانال جای گرفته‌اند. شکل ۶-۷ دبی عبوری از خروجی کانال را برحسب میدان الکتریکی اعمالی به ازای سه مدول یانگ مختلف نشان می‌دهد. این نمودار نیز مشابه نمودار بخش قبل دارای یک سیر سهموی می‌باشد. با افزایش میدان الکتریکی دبی عبوری از خروجی کانال افزایش می‌یابد تا اینکه به حداکثر مقدار خود می‌رسد، پس‌از آن با افزایش میدان الکتریکی، دبی عبوری از خروجی کانال افت می‌کند تا اینکه به مقدار صفر می‌رسد در این شرایط سیستم مشابه ولو عمل می‌کند. در ادامه با افزایش میدان الکتریکی، جریان بازگشتی در داخل کانال ایجاد می‌شود. دبی عبوری ناشی از این جریان بازگشتی با علامت منفی نشان داده شده، چراکه جهت جریان بازگشتی در خلاف جهت میدان الکتریکی اعمالی می‌باشد.

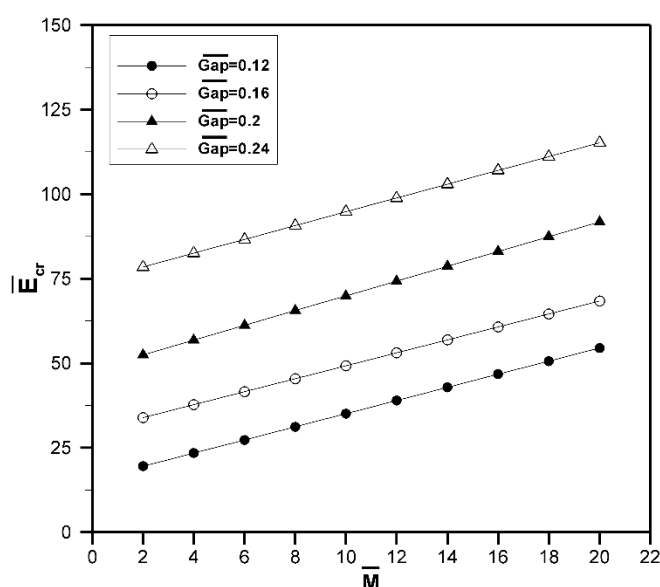


شکل ۶-۷. نمودار دبی عبوری از خروجی کانال برحسب میدان الکتریکی اعمالی به ازای مدول‌های یانگ $\bar{M} = 7, 9, 11$ رسم شده است. مشخصات لینک‌ها در این مدل‌سازی عبارت است از: $(\bar{Gap} = 0.2, \bar{X} = 10)$.

۷-۵- تأثیر مدول یانگ لینک‌های رسانا بر میدان الکتریکی بحرانی

میدان الکتریکی بحرانی یکی از مشخصه‌های اصلی میکروولو ارائه شده است. چراکه با اعمال میدان الکتریکی بحرانی به سیستم می‌توان جریان ورودی را مسدود نمود از طرف دیگر با مشخص بودن میدان الکتریکی بحرانی، می‌توان جهت جریان را در داخل کانال کنترل نمود، به این ترتیب که با اعمال میدان الکتریکی کمتر از میدان الکتریکی بحرانی، جریانی در جهت میدان الکتریکی در سیستم به وجود می‌آید و در مقابل اگر میدان الکتریکی اعمالی بیشتر از میدان الکتریکی بحرانی باشد، جریانی در خلاف جهت میدان الکتریکی اعمالی از خروجی به سمت ورودی شکل می‌گیرد.

با توجه به شکل ۷-۷ می‌توان دریافت که با افزایش مدول یانگ لینک‌های رسانا، میدان الکتریکی بحرانی که به ازای آن سیستم تبدیل به ولو می‌شود افزایش می‌یابد. برای توجیه این نتیجه می‌بایست به تأثیر تغییر شکل لینک رسانا توجه نمود. در صورتی که فاصله بین دو لینک ثابت باشد، هرچه تغییر شکل لینک‌ها نسبت به موقعیت اولیه خود بیشتر باشد، گرادیان فشار مخالف بیشتری در سیستم ایجاد می‌شود، بنابراین در مدول‌های یانگ زیاد به دلیل آنکه تغییر شکل لینک رسانا کم است گرادیان فشار مخالف کمتری در سیستم ایجاد می‌شود. در این شرایط برای افزایش گرادیان فشار مخالف می‌بایست اندازه میدان الکتریکی اعمالی به سیستم را افزایش داد تا سیستم مشابه یک ولو عمل کند.

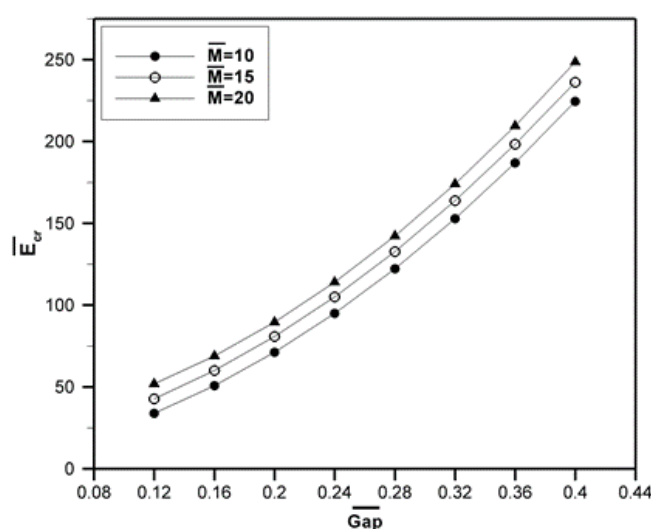


شکل ۷-۷. میدان الکتریکی بحرانی برحسب مدول یانگ لینک را نشان می‌دهد، این نمودار به ازای فواصل مختلف بین دو لینک رسانا رسم شده است. مشخصات لینک‌ها در این مدل‌سازی عبارت است از: ($\bar{X} = 10$)

۷-۶- تأثیر فاصله بین دو لینک رسانا بر میدان الکتریکی بحرانی

در ادامه تشریح عوامل تأثیرگذار بر میدان الکتریکی بحرانی، این بار اثر فاصله بین دو لینک رسانا بر میدان الکتریکی بحرانی بررسی شده است. در شکل ۷-۸ تغییرات میدان الکتریکی بحرانی برحسب فاصله بین دو لینک به ازای سه مدول ۱۰، ۱۵ و $\bar{M} = 20$ رسم شده است، همان طور که در این شکل مشاهده می شود با افزایش فاصله بین دو لینک، میدان الکتریکی بحرانی موردنیاز برای مسدود کردن جریان ورودی افزایش می یابد و این روند برای هر سه مدول یانگ مختلف مشاهده می شود.

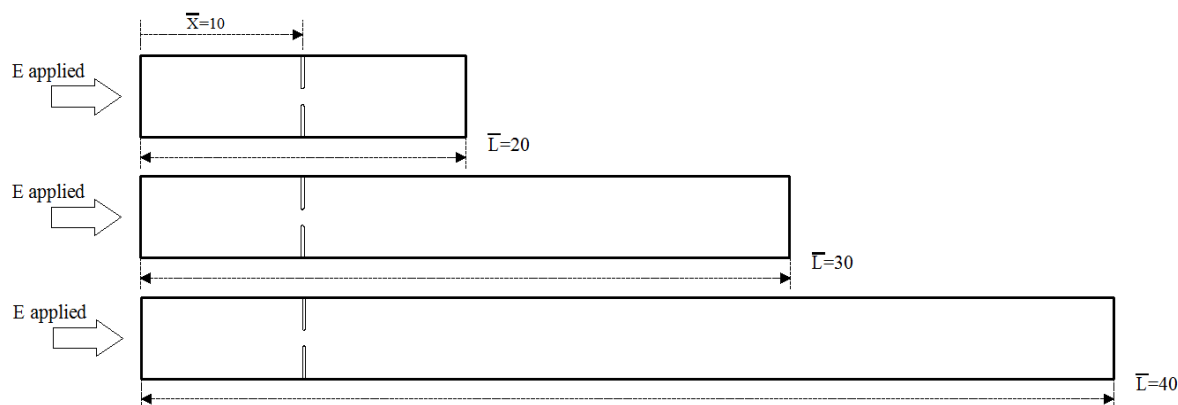
برای اینکه دلیل افزایش میدان الکتریکی بحرانی را پس از افزایش فاصله بین دو لینک متوجه شویم می بایست به اندازه گرادیان فشار مخالف در سیستم پس از افزایش فاصله بین دو لینک توجه کنیم. با افزایش فاصله بین دو لینک، طول هریک از لینک های رسانا کاهش می یابد و به دلیل آنکه زتا پتانسیل القایی روی سطح رسانا رابطه ی مستقیم با طول لینک رسانا دارد بنابراین با کاهش طول لینک رسانا، زتا پتانسیل القایی روی سطح آن نیز کاهش می یابد. این زتا پتانسیل القایی کمتر، گرادیان فشار مخالف کمتری را در سیستم ایجاد می کند. برای آنکه سیستم تبدیل به ولو شد می بایست گرادیان فشار مخالف بیشتری در سیستم ایجاد شود. این افزایش گرادیان فشار توسط اعمال میدان الکتریکی بیشتر تأمین می شود. با توجه به آنچه گفته شد می توان نتیجه گرفت که میدان الکتریکی بحرانی موردنیاز برای مسدود کردن جریان ورودی با افزایش فاصله بین دو لینک افزایش می یابد.



شکل ۷-۸. نمودار میدان الکتریکی بحرانی برحسب فاصله بین دو لینک را نشان می دهد. این نمودار به ازای مدول های یانگ مختلف لینک رسم شده اند. مشخصات لینک ها در این مدل سازی عبارت است از: ($\bar{X} = 10$).

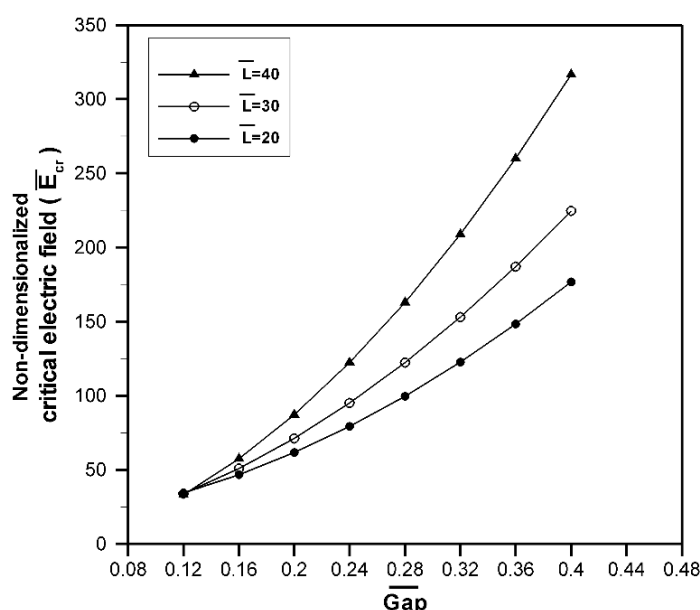
۷-۷- تأثیر طول کانال بر میدان الکتریکی بحرانی

در این بخش اثر طول کانال بر عملکرد میکرومیکسر مطالعه شده است، برای این منظور مطابق شکل ۷-۹ سه طول 20، 30 و 40 $\bar{L}$ برای کانال انتخاب شد و در هر سه کانال یادشده، لینک‌های رسانا با مدول یانگ $\bar{M} = 10$ در فاصله $\bar{X} = 10$ از ورودی کانال قرار داده شده‌اند.



شکل ۷-۹. سه میکرومیکسر مختلف را نشان می‌دهد که طول آن‌ها 20، 30 و 40 $\bar{L}$ است. در هر سه میکرومیکسر لینک‌ها در فاصله $\bar{X} = 10$ از ورودی کانال قرار گرفته‌اند.

شکل ۷-۱۰ تغییرات میدان الکتریکی بحرانی $\bar{E}_{cr}$ را برحسب فاصله بین دو لینک $\bar{Gap}$ به ازای سه طول کانال 20، 30 و 40 $\bar{L}$ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در صورتیکه فاصله بین دو لینک ثابت باشد با افزایش طول کانال، اندازه میدان الکتریکی بحرانی افزایش می‌یابد. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد اندازه میدان الکتریکی بحرانی برای این میکروولو وابسته به اندازه گرادیان فشار مخالف در سیستم می‌باشد و دو عامل روی اندازه گرادیان فشار مخالف تأثیر می‌گذارند، عامل اول طول لینک رسانا می‌باشد که در اینجا با استفاده از پارامتر $\bar{Gap}$ مطالعه شده است و عامل دوم طول کانال است. به ازای یک $\bar{Gap}$ ثابت، هرچه طول کانال افزایش یابد، اندازه گرادیان فشار مخالف در سیستم کاهش خواهد یافت (رابطه گرادیان فشار مخالف $\Delta P / \Delta L$ است، از آنجاکه اختلاف فشار بین خروجی و ناحیه پشت لینک‌ها ثابت است $\Delta P = cte$ ، با افزایش طول کانال ΔL ، گرادیان فشار مخالف کاهش می‌یابد). با کاهش اندازه گرادیان فشار مخالف می‌بایست میدان الکتریکی قوی‌تری به سیستم اعمال شود تا در نتیجه آن بتوان سیستم را در کانال‌هایی با طول زیاد تبدیل به ولو نمود.



شکل ۷-۱۰. تغییرات میدان الکتریکی بحرانی برحسب فاصله بین دو لینک به ازای کانال با طول‌های 20، 30 و $\bar{L}$ 40 را نشان می‌دهد. در این مدل‌سازی مشخصات لینک و میدان الکتریکی اعمالی عبارت‌اند از: ($\bar{X} = 10, \bar{M} = 10$)

۷-۸- محدودیت اندازه میدان الکتریکی اعمالی

محدودیت اندازه میدان الکتریکی اعمالی به سیستم، مهم‌ترین چالش پیشروی میکروولو طراحی‌شده است. بایستی توجه نمود که در میدان‌های الکتریکی قوی ($E > 200 \text{ (V/cm)}$) (به عبارت دیگر $\bar{E} > 100$) دیگر پدیده الکتروکنتیک القایی صادق نخواهد بود چرا که در این محدوده واکنش‌های الکتروشیمیایی بسیار قوی در فصل مشترک سیال و رسانا اتفاق می‌افتد که در مدل‌سازی پدیده الکتروکنتیک القایی لحاظ نشده است. بنابراین برای آنکه نتایج بدست‌آمده از این تحقیق با واقعیت‌های فیزیکی مطابقت داشته باشد می‌بایست نتایجی را ملاک قرار داد که در آن‌ها میدان الکتریکی اعمالی ($E \leq 150 \text{ (V/cm)}$) (به عبارت دیگر $\bar{E} \leq 75$) است. به این ترتیب به میزان مطلوبی از محدوده بحرانی که دیگر نتایج قابل قبول نیست دور شده‌ایم. با بررسی نتایج مشاهده می‌شود هرچه فاصله بین دو لینک بیشتر شود و یا طول کانال بیشتر شود می‌بایست به ازای میدان‌های الکتریکی قوی‌تر سیستم را تبدیل به ولو نمود و در این شرایط ممکن است میدان الکتریکی اعمالی از محدوده مجاز ($0 \leq \bar{E} \leq 150$) فراتر رود برای حل این مشکل می‌توان از چندین جفت لینک رسانا در داخل کانال استفاده کرد با این راهکار می‌توان سیستم را به ازای میدان‌های الکتریکی کمتر و در محدوده مجاز تبدیل به ولو نمود.

۷-۹- خلاصه و نتیجه گیری

در این فصل یک میکروولو و درعین حال یک میکروسوئیچ جدید ارائه شده است. این میکروولو شامل دو لینک رسانای یکسان است که به صورت متقارن روی دیواره کانال نصب شده اند. با اعمال میدان الکتریکی ثابت به سیستم، لینک ها تغییر شکل می دهند و توزیع زتا پتانسیل القایی روی سطح هر یک از لینک های رسانا غیریکنواخت می شوند و در نتیجه این توزیع زتا پتانسیل جدید، گرادیان فشار مخالفی در سیستم به وجود می آید که می تواند دبی عبوری از خروجی کانال را صفر کند و اجازه ورود جریان را به داخل کانال ندهد، در این شرایط سیستم تبدیل به ولو شده و با افزایش میدان الکتریکی اعمالی به سیستم اندازه گرادیان فشار مخالف در سیستم افزایش می یابد که در نتیجه آن جریان خالصی از خروجی به سمت ورودی کانال ایجاد می شود و طی آن سیستم مشابه یک میکروسوئیچ عمل می کند و جهت جریان را در داخل کانال عوض می کند. میکروولو ارائه شده در این فصل به دلیل طراحی ساده و مدت زمان عملکرد بسیار کوتاه آن، می تواند در بسیاری از وسایل میکروفلوئیدیک مورد استفاده قرار گیرد.

فصل هشتم:

جمع بندی

ارائه نتایج

این پایان‌نامه به صورت عددی حرکت لینک رسانای تغییر شکل‌پذیر را در حضور میدان الکتریکی یکنواخت DC مطالعه کرده است و با استفاده از ویژگی‌های حرکت لینک رسانا، کاربردهایی را در حوزه میکروفلوئیدیک معرفی نموده است که اساس عملکرد آن‌ها وابسته به نحوه حرکت لینک رسانای تغییر شکل‌پذیر است. اکنون به مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این پژوهش اشاره می‌شود.

۸-۱- ارائه نتایج

حرکت لینک رسانای تغییر شکل‌پذیر به صورت دوبعدی و در سه وضعیت افقی، عمودی و مایل شبیه‌سازی شده است. برای اولین بار برای توجیه نحوه حرکت لینک رسانا از مفهوم جدیدی به نام نقطه سکون استفاده شده، نقطه سکون مکانی است روی سطح جسم رسانا که زتا پتانسیل القایی آن صفر است بنابراین سرعت جریان سیال در این نقطه صفر می‌شود و فشار در آن به حداکثر مقدار خود می‌رسد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که موقعیت نقطه سکون روی سطح لینک رسانا تعیین‌کننده جهت حرکت لینک رسانا است. نتایج بررسی‌های عددی نشان می‌دهد که یک لینک رسانا با زاویه منفرجه در خلاف جهت میدان الکتریکی حرکت می‌کند چراکه موقعیت نقطه سکون در این حالت روی سطحی از لینک رسانا می‌باشد که پشت به میدان الکتریکی قرار دارد. اثر دیواره کانال یکی دیگر از مواردی است که در بررسی حرکت لینک رسانای افقی مطالعه شده است. نتایج به دست آمده از این مطالعه نشان می‌دهد که همواره دیواره کانال لینک رسانای افقی مجاور خود را دفع می‌نماید، اما اگر لینک رسانای افقی درست در وسط کانال قرار گیرد نیروی دافعه وارد بر آن از طرف دیواره‌های کانال برابر خواهد بود و به این ترتیب لینک رسانا بدون تغییر شکل در وسط کانال باقی می‌ماند.

مطالعه تقابل دو عمودی نکات ارزشمندی را در مورد جریان الکتروکنتیک القایی پیرامون لینک‌های رسانا آشکار می‌کند. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که اگر دو لینک رسانا روی یک دیواره کانال باشند، دو گردابه با جهت چرخش مخالف یکدیگر بین آن‌ها ایجاد می‌شود، با کم کردن فاصله لینک‌ها، ناحیه‌ای

با فشار کم بین آن‌ها ایجاد می‌شود، دلیل ایجاد این ناحیه جهت چرخش گردابه‌های بین دو لینک می‌باشد و در نتیجه آن، لینک‌ها یکدیگر را جذب می‌کنند. حال اگر هر یک از لینک‌ها روی یک دیواره کانال باشند، گردابه‌هایی با جهت چرخش یکسان بین آن‌ها ایجاد می‌شود. با کم کردن فاصله لینک‌ها در این حالت، گردابه‌ها به یکدیگر می‌پیوندند و گردابه‌ای بزرگ‌تر را ایجاد می‌کنند که مانع از عبور جریان سیال از داخل کانال می‌شود و به این ترتیب ناحیه‌ای با فشار بالا بین لینک‌ها ایجاد می‌شود که در نتیجه آن، لینک‌ها یکدیگر را دفع می‌کنند. لازم به یادآوری است که جاذبه و دافعه لینک‌ها تنها وابسته به موقعیت قرارگیری لینک‌ها روی دیواره کانال می‌باشد و در این دو حالت تغییری در جهت میدان الکتریکی اعمالی به سیستم انجام نمی‌شود.

یک میکرومیکسر جدید که تنها با استفاده از یک لینک رسانای تغییر شکل‌پذیر کار می‌کند در این تحقیق معرفی شده است. این میکرومیکسر شامل یک کانال مستقیم است که روی دیواره بالایی آن یک لینک رسانای تغییر شکل‌پذیر نصب شده است. با اعمال میدان الکتریکی متغیر با زمان به این سیستم، لینک رسانا حرکت رفت و برگشتی در داخل کانال انجام می‌دهد و مشابه یک همزن اختلاط میان دو جریان سیال را بهبود می‌دهد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که هرچه طول لینک رسانا و دامنه میدان الکتریکی اعمالی بیشتر باشد، لینک محدوده وسیع‌تری را داخل کانال جاروب می‌کند، به این ترتیب بازده اختلاط به میزان بیشتری افزایش می‌یابد. عامل مؤثر دیگر در بهبود اختلاط این میکرومیکسر، میانگین میدان الکتریکی اعمالی به آن می‌باشد. با کاهش میانگین میدان الکتریکی، دو جریان فرصت کافی برای اختلاط به دست می‌آورند و به این ترتیب بازده اختلاط افزایش می‌یابد.

روش دوم که برای بهبود اختلاط در این تحقیق معرفی شده شامل چندین لینک رسانای تغییر شکل‌پذیر می‌باشد که میدان الکتریکی ثابت به آن‌ها اعمال می‌شود. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که زاویه قرارگیری لینک‌های رسانا در داخل کانال تأثیر فراوانی بر کارایی میکرومیکسر می‌گذارد چراکه زاویه لینک‌های رسانا تعیین‌کننده میزان گرادیان فشار مخالف در سیستم می‌باشد. به عنوان نمونه لینک‌های حاده گرادیان فشار مخالف بیشتری را نسبت به لینک‌ها منفرجه ایجاد می‌کنند، از سویی دیگر هرچه گرادیان فشار مخالف در سیستم بیشتر باشد مدت‌زمان بیشتری به دو جریان سیال برای اختلاط داده می‌شود بنابراین بازده اختلاط لینک‌های حاده بیشتر از لینک‌های منفرجه خواهد بود. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که لینک رسانای عمودی گرادیان فشار مخالف بیشتری را نسبت به سایر لینک‌ها در سیستم ایجاد می‌کند، بنابراین بهترین زاویه لینک برای دستیابی به بازده اختلاط

حداکثر زاویه قائمه می‌باشد. علاوه بر زاویه لینک رسانا و تعداد آن عوامل دیگری از جمله طول لینک رسانا و اندازه میدان الکتریکی اعمالی بر عملکرد این روش اختلاط تأثیر خواهند داشت که جزئیات هر یک از این عوامل به تفسیر در فصل ششم اشاره شده است.

میکرو ولوها و میکرو سوئیچ‌ها از مهم‌ترین اجزاء دستگاه‌های میکروفلوئیدیک محسوب می‌شوند. تجهیزات طراحی شده در این زمینه دارای عیب‌های متعددی از جمله مدت‌زمان عملکرد طولانی، ناپایداری و طراحی پیچیده می‌باشند. در این پژوهش یک میکرو ولو جدید معرفی شده که در عین طراحی ساده قادر است وظیفه یک ولو و یک سوئیچ را بدون تغییر خاص در هندسه خود و یا تغییر جهت میدان الکتریکی انجام دهد. این میکرو ولو از دو لینک رسانای تغییر شکل‌پذیر ساخته شده که به صورت متقارن روی دیواره‌های یک کانال مستقیم نصب شده‌اند و به سیستم میدان الکتریکی ثابت اعمال می‌شود. با تغییر شکل لینک‌ها گرادیان فشار مخالف در سیستم به وجود می‌آید. اندازه این گرادیان فشار مخالف را می‌توان بر اساس اندازه میدان الکتریکی اعمالی تنظیم نمود. بررسی‌های عددی نشان می‌دهد که به ازای یک میدان الکتریکی مشخص اندازه گرادیان فشار مخالف در سیستم به حدی می‌رسد که قادر است دبی عبوری از خروجی کانال را صفر کند و در این شرایط سیستم مشابه ولو عمل می‌کند و میدان الکتریکی متناظر با این شرایط به نام میدان الکتریکی بحرانی نام‌گذاری می‌شود. در صورتی که به سیستم میدان الکتریکی با اندازه بیشتر از میدان الکتریکی بحرانی اعمال شود، جهت جریان در داخل سیستم تغییر می‌کند و جریانی در خلاف جهت میدان الکتریکی اعمالی در سیستم به وجود می‌آید، در این شرایط سیستم مشابه یک میکرو سوئیچ عمل می‌کند و جهت جریان را در داخل کانال تغییر می‌دهد. این میکرو ولو به دلیل طراحی ساده و مدت‌زمان عملکرد بسیار کوتاه آن (کمتر از ۱ ثانیه) قادر است در بسیاری از تجهیزات میکروفلوئیک در حوزه پزشکی و بیوشیمیایی مورد استفاده قرار گیرد.

پیوست الف

روش حل عددی

پیوست الف:

روش حل عددی

مدل ریاضی ارائه شده در این پایان نامه قادر است چندین فیزیک مرتبط با یکدیگر را شبیه سازی کند. فیزیک های استفاده شده در این پایان نامه شامل میدان الکتریکی، میدان جریان سیال، میدان توزیع غلظت و معادلات حاکم بر تغییر شکل لینک رسانا می باشند. نکته مهم در این مدل ریاضی، ثابت نبودن مرزهای لینک تغییر شکل پذیر است. از آنجاکه مرزهای لینک ثابت نیستند بنابراین برای شبیه سازی حرکت وابسته به زمان لینک می بایست از روش مش متحرک استفاده نمود. با استفاده از روش اویلری-لاگرانژی که از ایده مش متحرک استفاده می کند، قادر خواهیم بود تقابل لینک تغییر شکل پذیر و جریان سیال را شبیه سازی کنیم.

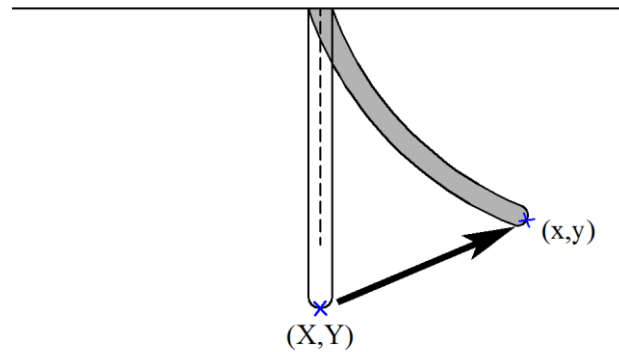
الف-۱- روش اویلری-لاگرانژی

در روش اویلری-لاگرانژی، مختصات اولیه مرز متحرک (X, Y) توسط یک تابع به مختصات جدید این مرز (x, y) نگاشت می شود. توابع نگاشت بین دو دستگاه مختصات مطابق روابط زیر می باشند.

$$x = x(X, Y, t) \quad (\text{الف-۱-۱})$$

$$y = y(X, Y, t) \quad (\text{الف-۱-۲})$$

در اینجا t زمان است و برای این مدل فرض می شود که در لحظه اولیه $t = 0$ (s) دو دستگاه مختصات بر یکدیگر منطبق می باشند. بنابراین تابع نگاشت بیان می کند که هر نقطه از مرز متحرک که در لحظه اولیه در موقعیت (X, Y) قرار گرفته، پس از مدت زمان t به موقعیت (x, y) منتقل می شود (مطابق شکل الف-۱).



شکل الف-۱. طرح ساده‌ای از نحوه نگاشت نقاط روی سطح لینک در لحظه اولیه و پس از تغییر شکل لینک.

در روش اوپلری-لاگرانژی، مدل جریان الکتروکنتیک القایی که در مختصات متحرک پیاده شده است، می‌تواند توسط یک تابع تبدیل به مدلی در مختصات ثابت منتقل شود. برای انتقال مدل می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد.

$$dx dy = |J| dX dY \quad (\text{الف-۲})$$

در اینجا J جاکوبین ماتریس انتقال است که مطابق رابطه (الف-۳) محاسبه می‌شود.

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial X} & \frac{\partial x}{\partial Y} \\ \frac{\partial y}{\partial X} & \frac{\partial y}{\partial Y} \end{pmatrix} \quad (\text{الف-۳})$$

برای سیستم لینک و سیال، حرکت مش در داخل کانال با استفاده از معادله لاپلاس محاسبه می‌شود. با استفاده از این معادله می‌توان اطمینان حاصل کرد که تغییرات مش هموار خواهد بود.

$$\nabla^2 \psi_x = 0 \quad (\text{الف-۴-۱})$$

$$\nabla^2 \psi_y = 0 \quad (\text{الف-۴-۲})$$

$$x = X + \int_0^t \psi_x dt \quad (\text{الف-۵-۱})$$

$$y = Y + \int_0^t \psi_y dt \quad (\text{الف-۵-۲})$$

در اینجا $(\psi_x, \psi_y) = \bar{\psi}$ سرعت حرکت مش در مختصات متحرک است. شرط مرزی اعمال شده برای حرکت مش به این صورت است که فرض شده در فصل مشترک لینک و سیال، سرعت حرکت مش مساوی با سرعت حرکت لینک تغییر شکل پذیر است.

نرم افزار کامسول 3.5 a مدل جریان الکتروکنتیک القایی را به همراه روش مش متحرک بکار می گیرد تا حرکت لینک تغییر شکل پذیر را شبیه سازی کند. برای این شبیه سازی علاوه بر میدان الکتریکی، میدان جریان سیال، میدان غلظت و معادلات حرکت لینک تغییر شکل پذیر، یک معادله دیفرانسیل جزئی حل می شود تا روش اویلری لاگرانژی پیاده شود. همچنین نرم افزار کامسول 3.5 a با استفاده از معادله های (الف-۴) و (الف-۵) شبکه بندی مش را در ناحیه محاسباتی به طور پیوسته به روز می کند.

- [1] S. Wall, "The history of electrokinetic phenomena," *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, vol. 15, no. 3, pp. 119–124, 2010.
- [2] F. F. Reuss, "Sur un nouvel effet de l'électricité galvanique," *Mem. Soc. Imp. Natur. Moscou*, vol. 2, pp. 327–337, 1809.
- [3] V. G. Levich, S. Technica, and others, *Physicochemical hydrodynamics*, vol. 689. Prentice-hall Englewood Cliffs, NJ, 1962.
- [4] N. I. Gamayunov, V. A. Murtsovkin, and A. S. Dukhin, "Pair interaction of particles in electric field. 1. Features of hydrodynamic interaction of polarized particles," *Colloid J. USSR (Engl. Transl.); (United States)*, vol. 48, no. 2, 1986.
- [5] N. I. Gamayunov, G. I. Mantrov, and V. A. Murtsovkin, "Investigation of the flows induced by an external electric field in the vicinity of conducting particles," *J Colloid*, vol. 54, no. 1, pp. 26–30, 1992.
- [6] I. N. Simonov and S. S. Dukhin, "Theory of electrophoresis of solid conducting particles in case of ideal polarization of a thin diffuse double-layer," *Kolloidnyi Zhurnal*, vol. 35, no. 1. MEZHDUNARODNAYA KNIGA 39 DIMITROVA UL., 113095 MOSCOW, RUSSIA, pp. 191–193, 1973.
- [7] S. S. Dukhin and B. V. Deriaguine, *Surface and Colloid Science: Electrokinetic Phenomena: Translated from the Russian by A. Mistetsky and M. Zimmerman*. Plenum Press, 1974.
- [8] V. A. Murtsovkin and G. I. Mantrov, "Transient regime of streamlining of metallic particles in the electric field," *Colloid J. Russ. Acad. Sci.*, vol. 54, no. 4, pp. 556–559, 1992.
- [9] V. A. Murtsovkin and G. I. Mantrov, "Investigation of the flows induced by an alternating electric field close to ionite particles," *Kolloidn. Zh*, vol. 54, pp. 105–109, 1992.
- [10] A. Ramos, H. Morgan, N. G. Green, and A. Castellanos, "AC electric-field-induced fluid flow in microelectrodes," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 217, no. 2, pp. 420–422, 1999.
- [11] A. Ajdari, "Pumping liquids using asymmetric electrode arrays," *Phys. Rev. E*, vol. 61, no. 1, p. R45, 2000.
- [12] N. G. Green, A. Ramos, A. Gonzalez, H. Morgan, and A. Castellanos, "Fluid flow induced by nonuniform ac electric fields in electrolytes on microelectrodes. III. Observation of streamlines and numerical simulation," *Phys. Rev. E*, vol. 66, no. 2, p. 26305, 2002.
- [13] A. B. D. Brown, C. G. Smith, and A. R. Rennie, "Pumping of water with ac electric fields applied to asymmetric pairs of microelectrodes," *Phys. Rev. E*, vol. 63, no. 1, p. 16305, 2000.
- [14] V. Studer, A. Pépin, Y. Chen, and A. Ajdari, "An integrated AC electrokinetic pump in a microfluidic loop for fast and tunable flow control," *Analyst*, vol. 129, no. 10, pp. 944–949, 2004.
- [15] J. a. Levitan, S. Devasenathipathy, V. Studer, Y. Ben, T. Thorsen, T. M. Squires, and M. Z. Bazant, "Experimental observation of induced-charge electro-osmosis

- around a metal wire in a microchannel,” *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 267, no. 1–3, pp. 122–132, Oct. 2005.
- [16] E. Yariv, “Induced-charge electrophoresis of nonspherical particles,” *Phys. Fluids*, vol. 17, no. December 2004, pp. 2004–2007, 2005.
 - [17] D. Saintillan, E. Darve, and E. S. G. Shaqfeh, “Hydrodynamic interactions in the induced-charge electrophoresis of colloidal rod dispersions,” *J. Fluid Mech.*, vol. 563, pp. 223–259, 2006.
 - [18] D. Saintillan, E. S. G. Shaqfeh, and E. Darve, “Stabilization of a suspension of sedimenting rods by induced-charge electrophoresis,” *Phys. Fluids*, vol. 18, no. 12, p. 121701, 2006.
 - [19] K. a. Rose, J. a. Meier, G. M. Dougherty, and J. G. Santiago, “Rotational electrophoresis of striped metallic microrods,” *Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys.*, vol. 75, no. 1, pp. 1–15, 2007.
 - [20] Z. Wu, Y. Gao, and D. Li, “Electrophoretic motion of ideally polarizable particles in a microchannel,” *Electrophoresis*, vol. 30, no. 5, pp. 773–781, 2009.
 - [21] Z. Wu and D. Li, “Induced-charge electrophoretic motion of ideally polarizable particles,” *Electrochim. Acta*, vol. 54, no. 15, pp. 3960–3967, Jun. 2009.
 - [22] Z. Wu and D. Li, “Micromixing using induced-charge electrokinetic flow,” *Electrochim. Acta*, vol. 53, no. 19, pp. 5827–5835, 2008.
 - [23] Z. Wu and D. Li, “Mixing and flow regulating by induced-charge electrokinetic flow in a microchannel with a pair of conducting triangle hurdles,” *Microfluid. Nanofluidics*, vol. 5, no. 1, pp. 65–76, Sep. 2008.
 - [24] W. Kim, J. C. Ryu, Y. K. Suh, and K. H. Kang, “Pumping of dielectric liquids using non-uniform-field induced electrohydrodynamic flow,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 99, no. 22, p. 224102, 2011.
 - [25] Y. Daghighi, Y. Gao, and D. Li, “3D numerical study of induced-charge electrokinetic motion of heterogeneous particle in a microchannel,” *Electrochim. Acta*, vol. 56, no. 11, pp. 4254–4262, Apr. 2011.
 - [26] Y. Daghighi, I. Sinn, R. Kopelman, and D. Li, “Experimental validation of induced-charge electrokinetic motion of electrically conducting particles,” *Electrochim. Acta*, vol. 87, pp. 270–276, Jan. 2013.
 - [27] F. Zhang and D. Li, “Induced-charge electroosmotic flow around dielectric particles in uniform electric field,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 410, pp. 102–110, Nov. 2013.
 - [28] T. Cui, J. Fang, A. Zheng, F. Jones, and A. Reppond, “Fabrication of microreactors for dehydrogenation of cyclohexane to benzene,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 71, no. 3, pp. 228–231, 2000.
 - [29] S. M. Mitrovski and R. G. Nuzzo, “An electrochemically driven poly (dimethylsiloxane) microfluidic actuator: oxygen sensing and programmable flows and pH gradients,” *Lab Chip*, vol. 5, no. 6, pp. 634–645, 2005.
 - [30] R. Schmuhl, W. Nijdam, J. Sekulic, S. R. Chowdhury, C. J. M. van Rijn, A. van den Berg, J. E. ten Elshof, and D. H. A. Blank, “Si-supported mesoporous and microporous oxide interconnects as electrophoretic gates for application in

- microfluidic devices,” *Anal. Chem.*, vol. 77, no. 1, pp. 178–184, 2005.
- [31] D. Lacoste, G. I. Menon, M. Z. Bazant, and J. F. Joanny, “Electrostatic and electrokinetic contributions to the elastic moduli of a driven membrane,” *Eur. Phys. J. E. Soft Matter*, vol. 28, no. 3, pp. 243–64, Mar. 2009.
 - [32] F. Ziebert, M. Z. Bazant, and D. Lacoste, “Effective zero-thickness model for a conductive membrane driven by an electric field,” *Phys. Rev. E*, vol. 81, no. 3, p. 031912, Mar. 2010.
 - [33] C. D. Chin, V. Linder, and S. K. Sia, “Lab-on-a-chip devices for global health: Past studies and future opportunities,” *Lab Chip*, vol. 7, no. 1, pp. 41–57, 2007.
 - [34] P. S. Dittrich and A. Manz, “Lab-on-a-chip: microfluidics in drug discovery,” *Nat. Rev. Drug Discov.*, vol. 5, no. 3, pp. 210–218, 2006.
 - [35] Z. Yang, H. Goto, M. Matsumoto, and R. Maeda, “Active micromixer for microfluidic systems using lead-zirconate-titanate (PZT)-generated ultrasonic vibration,” *Electrophoresis*, vol. 21, no. 1, pp. 116–119, 2000.
 - [36] S.-Y. Yang, J.-L. Lin, and G.-B. Lee, “A vortex-type micromixer utilizing pneumatically driven membranes,” *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 19, no. 3, p. 35020, 2009.
 - [37] K. Yasuda, “Non-destructive, non-contact handling method for biomaterials in micro-chamber by ultrasound,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 64, no. 1, pp. 128–135, 2000.
 - [38] T. J. Johnson, D. Ross, M. Gaitan, and L. E. Locascio, “Laser modification of preformed polymer microchannels: application to reduce band broadening around turns subject to electrokinetic flow,” *Anal. Chem.*, vol. 73, no. 15, pp. 3656–3661, 2001.
 - [39] D. J. Harrison, A. Manz, Z. Fan, H. Luedi, and H. M. Widmer, “Capillary electrophoresis and sample injection systems integrated on a planar glass chip,” *Anal. Chem.*, vol. 64, no. 17, pp. 1926–1932, 1992.
 - [40] S. K. W. Dertinger, D. T. Chiu, N. L. Jeon, and G. M. Whitesides, “Generation of gradients having complex shapes using microfluidic networks,” *Anal. Chem.*, vol. 73, no. 6, pp. 1240–1246, 2001.
 - [41] S. C. Jacobson, T. E. McKnight, and J. M. Ramsey, “Microfluidic devices for electrokinetically driven parallel and serial mixing,” *Anal. Chem.*, vol. 71, no. 20, pp. 4455–4459, 1999.
 - [42] S. C. Jacobson and J. M. Ramsey, “Electrokinetic focusing in microfabricated channel structures,” *Anal. Chem.*, vol. 69, no. 16, pp. 3212–3217, 1997.
 - [43] D. Erickson and D. Li, “Influence of surface heterogeneity on electrokinetically driven microfluidic mixing,” *Langmuir*, vol. 18, no. 5, pp. 1883–1892, 2002.
 - [44] W. L. W. Hau, D. W. Trau, N. J. Sucher, M. Wong, and Y. Zohar, “Surface-chemistry technology for microfluidics,” *J. micromechanics microengineering*, vol. 13, no. 2, p. 272, 2003.
 - [45] E. Biddiss, D. Erickson, and D. Li, “Heterogeneous surface charge enhanced micromixing for electrokinetic flows,” *Anal. Chem.*, vol. 76, no. 11, pp. 3208–3213, 2004.

- [46] H. Lin, B. D. Storey, M. H. Oddy, C.-H. Chen, and J. G. Santiago, "Instability of electrokinetic microchannel flows with conductivity gradients," *Phys. Fluids*, vol. 16, no. 6, pp. 1922–1935, 2004.
- [47] S. M. Shin, I. S. Kang, and Y.-K. Cho, "Mixing enhancement by using electrokinetic instability under time-periodic electric field," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 15, no. 3, p. 455, 2005.
- [48] S.-C. Wang, Y.-W. Lai, Y. Ben, and H.-C. Chang, "Microfluidic mixing by dc and ac nonlinear electrokinetic vortex flows," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 43, no. 12, pp. 2902–2911, 2004.
- [49] K. W. Oh and C. H. Ahn, "A review of microvalves," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 16, no. 5, pp. R13–R39, 2006.
- [50] S. C. Terry, J. H. Jerman, and J. B. Angell, "A gas chromatographic air analyzer fabricated on a silicon wafer," *Electron Devices, IEEE Trans.*, vol. 26, no. 12, pp. 1880–1886, 1979.
- [51] J.-W. Choi, K. W. Oh, J. H. Thomas, W. R. Heineman, H. B. Halsall, J. H. Nevin, A. J. Helmicki, H. T. Henderson, and C. H. Ahn, "An integrated microfluidic biochemical detection system for protein analysis with magnetic bead-based sampling capabilities," *Lab Chip*, vol. 2, no. 1, pp. 27–30, 2002.
- [52] X. Yang, A. Hölke, S. Jacobson, J. H. Lang, M. Schmidt, S. D. Umans, and others, "An electrostatic, on/off microvalve designed for gas fuel delivery for the MIT microengine," *Microelectromechanical Syst. J.*, vol. 13, no. 4, pp. 660–668, 2004.
- [53] L. Yobas, M. Huff, F. J. Lisy, D. M. Durand, and others, "A novel bulk micromachined electrostatic microvalve with a curved-compliant structure applicable for a pneumatic tactile display," *Microelectromechanical Syst. J.*, vol. 10, no. 2, pp. 187–196, 2001.
- [54] E.-H. Yang, C. Lee, J. Mueller, and T. George, "Leak-tight piezoelectric microvalve for high-pressure gas micropropulsion," *Microelectromechanical Syst. J.*, vol. 13, no. 5, pp. 799–807, 2004.
- [55] P. Shao, Z. Rummeler, and W. K. Schomburg, "Polymer micro piezo valve with a small dead volume," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 14, no. 2, p. 305, 2004.
- [56] M. J. Zdeblick and J. B. Angell, "A microminiature electric-to-fluidic valve," in *Transducers*, 1987, vol. 87, p. 2.
- [57] R. J. Hunter, *Zeta potential in colloid science: principles and applications*, vol. 2. Academic press, 2013.
- [58] T. M. Squires and M. Z. Bazant, "Induced-charge electro-osmosis," *J. Fluid Mech.*, vol. 509, pp. 217–252, 2004.
- [59] R. N. Palchesko, L. Zhang, Y. Sun, and A. W. Feinberg, "Development of polydimethylsiloxane substrates with tunable elastic modulus to study cell mechanobiology in muscle and nerve," *PLoS One*, vol. 7, no. 12, p. e51499, 2012.
- [60] E. Gutierrez and A. Groisman, "Measurements of elastic moduli of silicone gel substrates with a microfluidic device," *PLoS One*, vol. 6, no. 9, p. e25534, 2011.

Abstract

This dissertation studies the motion of conductive deformable link that has been affected by DC electric field and investigates numerically and represents some microfluidic applications whose performance is associated characteristics of the conductive link motion.

In this dissertation, 2D transient motion of the conductive deformable link has been investigated in horizontal, vertical and oblique positions. For the first time, the concept of stagnation point has been used in order to explain the conductive link motion. Stagnation point is a place on the conductive link where the induced zeta potential is zero, so the flow velocity at this point becomes zero and consequently the pressure will be maximum. The results of investigations show that the direction of conductive link motion depends on the position of stagnation point on the link surface. For example, it was shown that the conductive link moves in the opposite direction of the electric field with an obtuse angle, it's because that the stagnation point is located on the surface of the link which is back to the electric field. In this research, the effect of channel wall on the motion of adjacent horizontal link is investigated. The results show that the channel wall repels the adjacent horizontal link.

Another study carried out in this dissertation is about the interactions between two vertical conductive links. The results of this study show that if both of the conductive links are fixed on a same channel wall, two vortices with opposite spin direction are created between them. These vortices create a vacuum zone through which the two links attract one another. But when each link is fixed on different channel walls, the two vortices with same spin direction are created between them. These vortices join together and create a high pressure zone through which two links repel one another.

This dissertation has introduced a new micro-mixer, this micro-mixer consists of straight microchannel and one conductive deformable link. One end of the link is fixed on the upper channel wall and the other end can move freely inside the channel, by applying a time-varying DC electric field, the link starts a reciprocating motion and improves mixing by acting like a stirrer. In addition to reciprocating motion, the vortices arising from induced

charge electro-kinetic flow around the conductive link is also another factors which helps micro-mixers to improve a better mix.

Another method is presented in this research for improving the mixing of two streams which used several conductive links, but this time, constant electric field is applied to the system. The results of simulations show that the angle of conductive links plays an important role on improving the mixing of two streams, because the adverse pressure gradient in the system is affected by the angle of conductive link. By comparing the results, it can be concluded that the mixing efficiency of mixer with conductive vertical link is maximum, because the vertical conductive link creates greater adverse pressure gradient compare to the other links.

Micro-valve is another application of conductive link that is introduced in this dissertation. Structure of presented micro-valve is very simple and consists of a straight microchannel which two symmetrical conductive links is placed on its walls and constant electric field is applied to the system. The simulation demonstrated that flow regulating effect can be obtained by adjusting the electric field strength. This flow regulating effect can be used to achieve different flow rates in different direction and the closed-valve state (zero flow rate). This micro-valve suggests a simple method for flow regulating without changing the direction of electric field.

Key words: Induced-charge electrokinetic, Vortex, Deformable materials, Micro-mixer, Micro-valve.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanic Engineering

Induced-charge electrokinetic motion of conductive deformable link

Shahriar Azimi

Supervised by

Dr. Mohsen Nazari

Feburary 2016