



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی تبدیل انرژی

مدلسازی و تحلیل عددی حرکت و تقابل ذرات در حضور میدان الکتریکی

نگارنده:

مهدی محمدی

استاد راهنما:

دکتر محسن نظری

بهمن ۱۳۹۷

شماره: ۱۵۶، ۲۹۷، ۳  
تاریخ: ۱۳، ۱۱، ۹۷

بِسْمِ تَعَالَى



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه  
دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای مهدی محمدی با شماره دانشجویی ۹۵۱۶۸۰۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان مدل‌سازی و تحلیل عددی حرکت و تقابل ذرات در حضور میدان الکتریکی که در تاریخ ۱۳۹۷/۱۱/۱۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: ... عالی) <input checked="" type="checkbox"/>			
مردود <input type="checkbox"/>			
نوع تحقیق: <input checked="" type="checkbox"/> نظری <input type="checkbox"/> عملی			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استادارهنمای اول	دکتر محسن نظری	دانشیار	
۲- استادارهنمای دوم	-	-	-
۳- استاد مشاور	-	-	-
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر علی سررشته‌داری	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر محمد محسن شاه‌مردان	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر علی جباری مقدم	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد محسن شاه‌مردان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تصوه: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می‌تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).



شکر شایان ثار ایزدمنان که توفیق را رفیق را هم ساخت تا این پایان نامه را به پایان رسانم،

و به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه ایشاد و از خودگذشتگی،

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگار ان به‌ترین پشتیبان است،

به پاس قلب‌های بزرگشان که فریادس است و سرگردانی و ترس در پناحشان به شجاعت می‌گراید،

و به پاس محبت‌های بی‌دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند،

این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می‌نمایم.

پنجمین از استاد راهنمای گرامی، جناب آقای دکتر محسن نظری، به پاس راهنمایی‌ها و حمایت‌های بی‌کمران

ایشان در انجام این پایان نامه، کمال تقدیر و شکر را دارم.

## تعهدنامه

این جانب مهدی محمدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدل سازی و تحلیل عددی حرکت و تقابل ذرات در حضور میدان الکتریکی تحت راهنمایی دکتر محسن نظری متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب 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 آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

## تاریخ

### امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است. 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

هنگامی که ذرات معلق موجود در محلول الکترولیت در معرض میدان الکتریکی خارجی به یکدیگر نزدیک می‌شوند، می‌توانند میدان الکتریکی محلی را تغییر دهند و در نتیجه آن نیروهای متقابل دی‌الکتروفورسیس را بر یکدیگر القا نمایند. در تحقیق حاضر، یک مدل گذرا با فرض نازک بودن لایه دوگانه الکتریکی ایجاد و در آن میدان جریان سیال، میدان الکتریکی متناوب و حرکت ذرات به صورت هم‌زمان با استفاده از رویکرد عددی لاگرانژین-اولرین تحلیل شده است. هنگامی که تأثیر متقابل دی‌الکتروفورسیس بین ذرات بر حرکت دلخواه براونی غالب باشد، انتظار می‌رود که زنجیره‌ای از ذرات، مستقل از جهت‌گیری اولیه ذرات، در راستای میدان الکتریکی اعمالی تشکیل شود. شبیه‌سازی عددی نشان داد که تعامل دی‌الکتروفورسیس مثبت بین ذرات، همواره به جذب ذرات و تشکیل زنجیره‌ای موازی با میدان الکتریکی اعمالی متمایل می‌باشد. در ابتدای این حرکت جذبی به علت افزایش نیروی تعاملی دی‌الکتروفورسیس، ذرات معمولاً شتاب می‌گیرند، اما با نزدیک شدن به یکدیگر به علت افزایش سریع‌تر نیروی بازدارنده هیدرودینامیکی، از سرعت آن‌ها کاسته می‌شود و به حالت پایا می‌رسند. این مدل توسعه‌یافته یک ابزار چندمنظوره را برای طراحی دستگاه‌های حوزه میکروسیالات به منظور دست‌کاری سلول یا ذره بر پایه دی‌الکتروفورسیس فراهم می‌نماید. در ادامه این پایان‌نامه با توجه به مطالعه انجام شده در مورد رفتار ذرات در میدان الکتریکی، دو کاربرد میکروولو و میکرومیکسر برای اولین بار بیان شده است که بر اساس نیروی دی‌الکتروفورسیس طراحی شده‌اند. میکروولو معرفی شده در تحقیق حاضر بر اساس ایجاد میدان الکتریکی ثابت طراحی شده است. این میکروولو از یک مخزن دایروی به همراه یک کانال ورودی و دو کانال خروجی با سطح مقطع مستطیل شکل تشکیل شده است و به منظور انسداد کانال‌های خروجی از یک جسم متحرک که شامل عضوهای دایروی و ربع دایره می‌باشد، تشکیل شده است. نیروی دی‌الکتروفورسیس، نیروی محرکی است که از طرف میدان الکتریکی بر جسم متحرک وارد می‌شود و بر اثر حرکت درون سیال، نیروی بازدارنده هیدرودینامیکی نیز بر آن

اعمال می‌شود. در میکروولو توصیف‌شده بیشترین زمان پاسخ گزارش شده ۰/۲۵ ثانیه می‌باشد. بدین معنا که ۰/۲۵ ثانیه زمان نیاز دارد تا بعد از اعمال تغییرات در میدان الکتریکی، خود را از کانال خروجی شماره یک به کانال خروجی شماره دو برساند. در ادامه این تحقیق، میکرومیکسری با توجه به هندسه میکروولو طراحی شد، با این تفاوت که جسم متحرک استفاده‌شده در میکرومیکسر از یک عضو دایروی و دو ربع دایره تشکیل شده است و شباهت بین میکروولو و میکرومیکسر در نیروهای اعمالی بر جسم متحرک می‌باشد. در این پایان‌نامه میکرومیکسر به دو صورت، با و بدون در نظر گرفتن ورودی و خروجی سیال، معرفی شده است. میکرومیکسری که در آن ورودی و خروجی سیال در نظر گرفته نشده است، با توجه به فرکانس میدان الکتریکی متناوب قادر به یکنواخت ساختن غلظت سیال در کسری از ثانیه می‌باشد و در مورد نوع دیگر میکرومیکسر، بیشترین عملکرد اختلاط، ۹۷ درصد محاسبه شده است.

**کلیدواژه‌گان:** دی‌الکتروفورسیس، حرکت دی‌الکتروفورتیک ذرات، میکروولو، میکرومیکسر

## فهرست مطالب

۱ فصل اول: مقدمه	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ پیشینه تحقیق	۳
۳-۱ نوآوری	۸
۴-۱ ساختار و فصل‌بندی پایان‌نامه	۹
۲ مدل‌سازی عددی	۱۱
۱-۲ مقدمه	۱۲
۲-۲ معادلات حاکم	۱۴
۱-۲-۲ معادله حاکم بر میدان الکتریکی	۱۴
۲-۲-۲ معادله حاکم بر میدان جریان سیال	۱۵
۳-۲-۲ معادله حاکم بر حرکت جسم صلب	۱۵
۴-۲-۲ معادله حاکم بر انتقال جرم	۱۷
۳-۲ شرایط مرزی	۱۷
۱-۳-۲ میدان الکتریکی	۱۷
۲-۳-۲ میدان جریان سیال	۱۸
۳-۳-۲ انتقال جرم	۱۹
۳ معتبر سازی مدل عددی	۲۱
۱-۳ نیروی دی‌الکتروفورسیس در میدان الکتریکی ثابت	۲۲
۲-۳ نیروی دی‌الکتروفورسیس در میدان الکتریکی متناوب	۲۵



۲۹	..... حرکت دی‌الکتروفورسیک ذرات
۳۰	..... ۱-۴ دی‌الکتروفورسیس متناوب
۳۰	..... ۱-۱-۴ بیان مسئله
۳۱	..... ۲-۱-۴ شرایط مرزی
۳۱	..... ۳-۱-۴ استقلال از شبکه
۳۲	..... ۴-۱-۴ نتایج
۳۷	..... ۲-۴ دی‌الکتروفورسیس ثابت
۳۷	..... ۱-۲-۴ بیان مسئله
۳۸	..... ۲-۲-۴ شرایط مرزی
۳۸	..... ۳-۲-۴ استقلال از شبکه
۳۹	..... ۴-۲-۴ نتایج
۴۷	..... ۵ میکروولو
۴۸	..... ۱-۵ بیان مسئله
۴۹	..... ۲-۵ شرایط مرزی
۵۲	..... ۳-۵ استقلال از شبکه
۵۳	..... ۴-۵ نتایج
۵۹	..... ۶ میکرومیکسر
۶۰	..... ۱-۶ میکرومیکسر استاتیک
۶۰	..... ۱-۱-۶ بیان مسئله
۶۱	..... ۲-۱-۶ شرایط مرزی
۶۳	..... ۳-۱-۶ استقلال از شبکه

۶۴	.....	۴-۱-۶ نتایج
۷۲	.....	۲-۶ میکرومیکسر دینامیک
۷۲	.....	۱-۲-۶ بیان مسئله
۷۳	.....	۲-۲-۶ شرایط مرزی
۷۴	.....	۳-۲-۶ استقلال از شبکه
۷۵	.....	۴-۲-۶ نتایج
۸۱	.....	۷ جمع بندی و نتیجه گیری
۸۳	.....	۸ منابع و مراجع

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ هندسه مورد بررسی در تحقیق لیو و همکاران [۴۱]..... ۶
- شکل ۲-۱ هندسه مورد بررسی ای و قیان [۴۲]..... ۶
- شکل ۳-۱ شماتیک هندسه تحقیق ای و همکاران [۴۳]..... ۷
- شکل ۱-۳ شماتیک هندسه استفاده شده برای اعتبارسنجی نیروی دی الکتروفورسیس در میدان الکتریکی ثابت [۴۱]..... ۲۲
- شکل ۲-۳ اعتبارسنجی مربوط به نیروی دی الکتروفورسیس منفی که خطوط توپر نشان دهنده نتایج حاصل از کار لیو و همکاران [۴۱] و خط چین ها نشان دهنده نتایج تحقیق حاضر می باشند..... ۲۳
- شکل ۳-۳ اعتبارسنجی مربوط به سرعت بی بعد ذرات (سمت راست) و نیروی بی بعد دی الکتروفورسیس (سمت چپ) که خطوط توپر مربوط به ای و قیان [۴۲] و خط چین ها مربوط به مطالعه حاضر می باشند..... ۲۴
- شکل ۴-۳ شماتیک هندسه استفاده شده برای اعتبارسنجی نیروی دی الکتروفورسیس ضمن حرکت ذرات در میدان الکتریکی ثابت [۴۲]..... ۲۴
- شکل ۵-۳ شماتیک هندسه مورد استفاده به منظور اعتبار سنجی نیروی دی الکتروفورسیس در میدان الکتریکی متناوب ..... ۲۵
- شکل ۶-۳ اعتبار سنجی مربوط به متوسط زمانی نیروی دی الکتروفورسیس که خطوط توپر متعلق به ای و همکاران [۴۳] و خط چین ها متعلق به تحقیق حاضر می باشند..... ۲۶
- شکل ۷-۳ اعتبارسنجی مربوط به سرعت بی بعد ذره (سمت راست) و متوسط زمانی نیروی بی بعد دی الکتروفورسیس (سمت چپ) که خطوط توپر بیانگر نتایج ای و همکاران [۴۳] و نماد مربع بیانگر نتایج تحقیق حاضر می باشد..... ۲۷

- شکل ۱-۴ شماتیک هندسه بررسی نیروی دی‌الکتروفورسیس در میدان الکتریکی متناوب..... ۳۰
- شکل ۲-۴ شبکه محاسباتی با تعداد المان ۱۳۵۷۴ (الف) و استقلال از شبکه مربوط به متوسط زمانی نیروی دی‌الکتروفورسیس (ب) در میدان الکتریکی متناوب ..... ۳۲
- شکل ۳-۴ کانتور سرعت و خطوط جریان (الف) در کنار کانتور پتانسیل الکتریکی و خطوط میدان الکتریکی متناوب (ب) مربوط به حرکت دی‌الکتروفورتیک متناوب با فرکانس ۱۰۰۰ هرتز و ضخامت ۱۰۰ میکرون ..... ۳۳
- شکل ۴-۴ متوسط زمانی سرعت ذره در میدان الکتریکی متناوب به‌ازای ضخامت ۱۰۰ میکرون و فرکانس ۱۰۰۰ هرتز ..... ۳۴
- شکل ۵-۴ متوسط زمانی نیروی دی‌الکتروفورسیس در میدان الکتریکی متناوب به‌ازای فرکانس ۱۰۰۰ (الف) و ۲۰۰۰ هرتز (ب) ..... ۳۶
- شکل ۶-۴ شماتیک هندسی بررسی نیروی دی‌الکتروفورسیس در میدان الکتریکی ثابت [۴۲] ۳۷
- شکل ۷-۴ شبکه محاسباتی با تعداد المان ۲۹۰۵۰ (الف) و استقلال از شبکه مربوط به اندازه نیروی دی‌الکتروفورسیس بین ذرات (ب) در میدان الکتریکی ثابت ..... ۳۹
- شکل ۸-۴ کانتور سرعت و خطوط جریان (الف) در کنار کانتور پتانسیل الکتریکی و خطوط میدان الکتریکی ثابت (ب) مربوط به حرکت دی‌الکتروفورتیک ثابت با زاویه صفر درجه و ضخامت ۱۰۰ میکرون ..... ۴۰
- شکل ۹-۴ کانتور سرعت و خطوط جریان (الف) در کنار کانتور پتانسیل الکتریکی و خطوط میدان الکتریکی ثابت (ب) مربوط به حرکت دی‌الکتروفورتیک ثابت با زاویه صفر درجه و ضخامت ۱۰۰ میکرون ..... ۴۱
- شکل ۱۰-۴ اندازه سرعت ذره سمت چپ با ضخامت ۱۰۰ میکرون و زاویه صفر درجه خط واصل

مراکز ذرات ..... ۴۲

شکل ۴-۱۱ موقعیت مکانی مرکز ذرات به‌ازای ضخامت ۱۰۰ میکرون در بررسی حرکت

دی‌الکتروفورسیک ذرات ..... ۴۳

شکل ۴-۱۲ اندازه نیروی دی‌الکتروفورسیس به‌ازای ضخامت ۱۰۰ (الف) و ۲۰۰ میکرون (ب) ۴۴

شکل ۵-۱ شماتیک هندسه میکروولو ..... ۴۸

شکل ۵-۳ استقلال از شبکه محاسباتی نیروی دی‌الکتروفورسیس (الف) و دبی سیال عبوری از

کانال خروجی شماره ۱ (ب) مربوط به میکروولو ..... ۵۱

شکل ۵-۲ نمونه‌ای از الگو اعمال ولتاژ در برابر زمان بی‌بعد با استفاده از تابع پله هموار شده ..... ۵۱

شکل ۵-۴ شبکه محاسباتی با تعداد المان ۶۴۶۹ در بررسی عملکرد میکروولو ..... ۵۲

شکل ۵-۵ کانتور سرعت سیال به همراه خطوط میدان الکتریکی در لحظات اولیه (الف)، انسداد

کانال خروجی شماره یک (ب)، تغییر وضعیت برای انسداد کانال خروجی شماره دو (ج) و انسداد کانال

خروجی شماره دو (د) ..... ۵۴

شکل ۵-۶ پتانسیل الکتریکی الکترودهای متغیر در اطراف کانال خروجی شماره یک (الف) و کانال

خروجی شماره دو (ب) ..... ۵۵

شکل ۵-۷ دبی سیال عبوری از کانال خروجی شماره یک (الف) و شماره دو (ب) به‌ازای اعداد

رینولدز ۰/۵ (ج)، ۱ (د) و ۲ (ه) در پتانسیل‌های الکتریکی ۵ (خط چین)، ۱۰ (توپر) و ۲۰ (خط نقطه)

..... ۵۶

شکل ۵-۸ زمان پاسخ میکروولو به‌ازای پارامترهای متفاوت ..... ۵۷

شکل ۵-۹ اندازه نیروی دی‌الکتروفورسیس وارد بر ربع دایره از جسم متحرک میکروولو به‌ازای ۵

(خط چین)، ۱۰ (توپر) و ۲۰ ولت (خط نقطه) در اعداد رینولدز ۰/۵ (الف)، ۱ (ب) و ۲ (ج) ..... ۵۷

- شکل ۶-۱ شماتیک هندسه میکرومیکسر استاتیک ..... ۶۰
- شکل ۶-۲ توزیع اولیه غلظت در میکرومیکسر استاتیک ..... ۶۱
- شکل ۶-۴ استقلال از شبکه اندازه نیروی دی‌الکتروفورسیس (الف) و غلظت نقطه واقع بر محور افقی به فاصله ۹۵ میکرون از مرکز مختصات (ب) ..... ۶۳
- شکل ۶-۳ شبکه محاسباتی مربوط به میکرومیکسر استاتیک با تعداد المان ۲۰۲۰ ..... ۶۳
- شکل ۶-۵ کانتورهای غلظت (الف)، سرعت سیال به همراه جهت حرکت سیال (ب) و پتانسیل میدان الکتریکی متناوب به همراه خطوط میدان الکتریکی (ج) مربوط به میکرومیکسر استاتیک با فرکانس ۱۰۰ هرتز و پتانسیل الکتریکی ۵ ولت ..... ۶۵
- شکل ۶-۶ کانتورهای غلظت (الف)، سرعت سیال به همراه جهت حرکت سیال (ب) و پتانسیل میدان الکتریکی متناوب به همراه خطوط میدان الکتریکی (ج) مربوط به میکرومیکسر استاتیک با فرکانس ۱ هرتز و پتانسیل الکتریکی ۳۰ ولت ..... ۶۶
- شکل ۶-۷ تغییرات غلظت دو نقطه واقع بر محور مختصات میکرومیکسر استاتیک، به ترتیب از بالا به پایین در فرکانس‌های ۰/۱ (ج)، ۱ (د) و ۱۰ هرتز (ه) با پتانسیل‌های الکتریکی ۱ (الف) و ۵ ولت (ب) ..... ۶۹
- شکل ۶-۸ کانتور غلظت سیال موجود در مخزن میکرومیکسر استاتیک به‌ازای پتانسیل الکتریکی ۳۰ ولت در فرکانس‌های ۱ (الف) و ۱۰ هرتز (ب) ..... ۷۰
- شکل ۶-۹ تغییرات غلظت دو نقطه واقع بر محور مختصات میکرومیکسر استاتیک، به‌ازای پتانسیل‌های الکتریکی ۵ (الف)، ۱۰ (ب) و ۱۵ ولت (ج) در فرکانس ۱۰۰ هرتز ..... ۷۱
- شکل ۶-۱۰ شماتیک هندسه میکرومیکسر دینامیک ..... ۷۲
- شکل ۶-۱۱ توزیع غلظت ورودی و غلظت اولیه قسمت ابتدایی مخزن سیال ..... ۷۳

شکل ۶-۱۲ استقلال از شبکه اندازه نیروی دی‌الکتروفورسیس (الف) و توزیع غلظت کانال خروجی

(ب) مربوط به میکرومیکسر دینامیک ..... ۷۴

شکل ۶-۱۳ شبکه محاسباتی مربوط به میکرومیکسر دینامیک با تعداد المان ۸۲۳۲ ..... ۷۴

شکل ۶-۱۴ کانتور پتانسیل الکتریکی به همراه خطوط میدان الکتریکی مربوط به میکرومیکسر

دینامیک به‌ازای عدد رینولدز ۰/۱ با فرکانس میدان الکتریکی ۵ هرتز در پتانسیل‌های الکتریکی ۵ (الف)

و ۵۰ ولت (ب) ..... ۷۶

شکل ۶-۱۵ تغییرات عملکرد میکسینگ در خروجی میکرومیکسر دینامیک در برابر زمان به‌ازای

عدد رینولدز ۰/۱ ..... ۷۸

شکل ۶-۱۶ عملکرد اختلاط به‌ازای فرکانس ۱ (الف) و ۵ هرتز (ب) و عدد رینولدز ۰/۱ (ج) و ۱

(د) ..... ۷۹

شکل ۶-۱۷ کانتور غلظت سیال درون میکرومیکسر دینامیک به‌ازای عدد رینولدز ۰/۱ در

فرکانس‌های ۱ (الف) و ۵ هرتز (ب) ..... ۸۰

## فهرست جداول

جدول ۱-۵ موقعیت مکانی الکترودها در میکروولو ..... ۴۹

جدول ۱-۶ پتانسیل الکتریکی مربوط به الکترودهای میکرومیکسر استاتیک ..... ۶۲



## فهرست علائم

$dS$	المان روی مرز
$W$	اندازه مقطع ورودی و خروجی میکروولو و میکرومیکسر (متر)
$x_s$	بردار مکانی سطح ذره
$x_p$	بردار مکانی مرکز ذره
$n$	بردار واحد عمود بر مرز
$C_0$	بیشترین غلظت سیال ورودی (مول بر مترمکعب)
$\varphi$	پتانسیل الکتریکی (ولت)
$T_M$	تانسور تنش ماکسول
$T_H$	تانسور تنش هیدرودینامیکی
$\varepsilon$	ثابت دی‌الکتریک (فاراد بر متر)
$m$	جرم ذره (کیلوگرم)
$\rho_f$	چگالی سیال (کیلوگرم بر مترمکعب)
$T$	دوره زمانی (ثانیه)

$\theta$	زاویه بین خط واصل مراکز ذرات و راستای افقی (درجه)
$t$	زمان (ثانیه)
$\omega_p$	سرعت چرخشی ذره (متر بر ثانیه)
$U$	سرعت خطی ذره (متر بر ثانیه)
$u$	سرعت سیال (متر بر ثانیه)
$r_p$	شعاع ذره (متر)
$R$	شعاع مخزن سیال میکروولو و میکرومیکسر (متر)
$D$	ضریب انتشار (مترمربع بر ثانیه)
$f_{CM}$	ضریب کلازیوس-مستی
$Re$	عدد رینولدز
$\gamma$	عملکرد اختلاط (درصد)
$C$	غلظت (مول بر مترمکعب)
$C_\infty$	غلظت ترکیب یکنواخت (مول بر مترمکعب)
$f$	فرکانس (هرتز)

$$\omega = 2\pi f$$

فرکانس زاویه‌ای میدان الکتریکی (رادیان بر ثانیه)

$$p$$

فشار (پاسکال)

$$\sigma$$

قابلیت رسانایی مواد (زیمنس بر متر)

$$|E_f|$$

قدرت میدان الکتریکی در سیال (ولت بر متر)

$$I$$

ممان اینرسی ذره

$$F_{DEP}$$

نیروی دی‌الکتروفورسیس (نیوتن)

$$F_H$$

نیروی هیدرودینامیکی (نیوتن)

$$\mu$$

ویسکوزیته دینامیکی (پاسکال ثانیه)



## ١ فصل اول: مقدمه

## ۱-۱ مقدمه

با توجه به زبان یونانی، کلماتی که با فورسیس<sup>۱</sup> به پایان رسیده است، بر حمل وسایل دلالت دارد [۱]. اخیراً مطالعه تعاملات و مونتاژ دی‌الکتروفورتیک بین ذرات به یکی از موضوعات مورد توجه در زمینه‌های متنوع نظیر، کلوئیدی، بیولوژیکی، الکترونیکی، فوتونی، مغناطیسی و مواد زیستی تبدیل شده است [۲-۴].

دی‌الکتروفورسیس<sup>۲</sup> پدیده‌ای است که یک نیرو بر ذره دی‌الکتریک در یک میدان الکتریکی غیریکنواخت وارد می‌شود [۱-۳] و به حرکت ذرات قطبی شده تحت یک میدان الکتریکی غیریکنواخت فضایی اشاره می‌نماید که به یکی از امیدوارکننده‌ترین ابزارها برای دست‌کاری ذرات در میکرو و نانو سیالات تبدیل شده است. مونتاژ دی‌الکتروفورتیک ذرات کلوئیدی یا موجودات بیولوژیکی برای ساخت ساختارهای کاربردی میکروسکوپیک موفقیت‌آمیز بوده است و به سبب سادگی یکپارچه‌سازی مینیاتوری میدان‌های الکتریکی در میکروسیالات، دی‌الکتروفورسیس به یکی از معروف‌ترین فن‌های دست‌کاری ذرات در میکروسیالات تبدیل شده است [۵-۱۱]. یکی از جالب‌ترین کاربردها به شکل‌گیری تک ذرات کلوئیدی یا سلول‌های بیولوژیکی برای ساختارهای اساسی میکروسکوپیکی برمی‌گردد. برای مثال، میکروسیم‌های باقابلیت الکتریکی می‌توانند از شکل‌گیری نانوذرات فلزی معلق در محلول آبی ساخته شوند [۸]. بلوره‌های دوبعدی با استفاده از فن مشابه دی‌الکتروفورسیس از ذرات مجرد تشکیل می‌یابند [۶،۹،۱۲]. علاوه بر این، از این فن برای شکل‌گیری ساختارهای چندلایه سلول‌های هماتوپنتیک، به‌منظور مشابه‌سازی هماتون برای تولید سلول خونی به کار رفته است [۱۳]. مونتاژ سلول‌های زنده بیولوژیکی و میکروذرات کاربردی می‌تواند روش‌های تازه‌ای برای مهندسی بافت و حس‌گرهای زیستی ایجاد نماید [۷،۱۰]. در دست‌کاری دی‌الکتروفورتیک ذره، یک میدان الکتریکی ثابت یا متناوب یا ترکیبی از متناوب و ثابت به کار گرفته می‌شود. میدان الکتریکی اعمال‌شده ذرات را قطبی نموده که سبب نیروی

---

<sup>۱</sup> Phoresis

<sup>۲</sup> Dielectrophoresis

خالصی بر ذرات به واسطه تأثیر میدان الکتریکی بر بارهای قطبی الکتریکی می‌شود. نیروی دی‌الکتروفوریک تعامل و تشکیل مونتاژ ذره-ذره را آسان می‌نماید. نیروی دی‌الکتروفوریک نسبت به اندازه و شکل ذرات، خواص الکتریکی ذرات و سیالات و پارامترهای میدان الکتریکی از قبیل دامنه و فرکانس به شدت حساس می‌باشد [۱۴، ۱۵]. این فن در مقایسه با فن‌های متداول مونتاژ، واکنش سریع و کنترل آسان را به معرض نمایش قرار می‌دهد [۷].

## ۲-۱ پیشینه تحقیق

که و همکاران [۱۶-۲۰]، هسو و همکاران [۲۱، ۲۲]، زنگ و همکاران [۲۳] مطالعات جامعی پیرامون تقابل الکتروفورسیس بین ذرات انجام داده‌اند. سوآمیناتان و هو [۲۴] و یاریو [۲۵] این تقابل را تقابل القایی اینرسی نامیدند. با فرض نازک بودن لایه الکتریکی دوگانه، سوآمیناتان و هو [۲۴] دریافتند که جهت‌گیری پایدار یک جفت ذره هنگامی رخ خواهد داد که خط واصل بین ذرات بر میدان الکتریکی خارجی عمود باشد. علاوه بر این، یاریو [۲۵] یک حل تشابهی برای نیروی اینرسی و مسیر ذرات به دست آورد که برای فواصل بزرگ‌تر از شعاع ذرات معتبر است. همچنین پیش‌بینی می‌شود که یک جفت ذره با جهت‌گیری اولیه دلخواه تمایل به چرخش برای رسیدن به جهت‌گیری پایدار دارد. با این حال، تقابل دی‌الکتروفورسیس بین ذرات در این مطالعات نادیده گرفته شده است.

هنگامی که یک میدان الکتریکی به ذره معلق اعمال می‌شود، حضور ذرات به صورت محلی میدان الکتریکی را تغییر می‌دهد. اگر ذرات نزدیک به یکدیگر باشند، میدان الکتریکی غیریکنواخت اطراف هر ذره نسبت به مرکز آن نامتقارن می‌شود و بدین ترتیب نیروی متقابل دی‌الکتروفورسیس را بر هریک از ذرات القا می‌نماید. اگر نیروی متقابل دی‌الکتروفورسیس که از تعامل بین ذرات نشئت گرفته است جاذب باشد، ذرات تمایل به جذب یکدیگر و تشکیل زنجیره را دارند. پدیده جذب زنجیره‌ای ذرات اساس فن شکل‌گیری دی‌الکتروفورسیس می‌باشد که به صورت جامع توسط ولو و همکاران بررسی شده است [۱۰]. کاداکشام و همکاران [۲۶] پیشنهاد دادند که نیروی دی‌الکتروفورسیس وارد بر ذرات به سه مقیاس

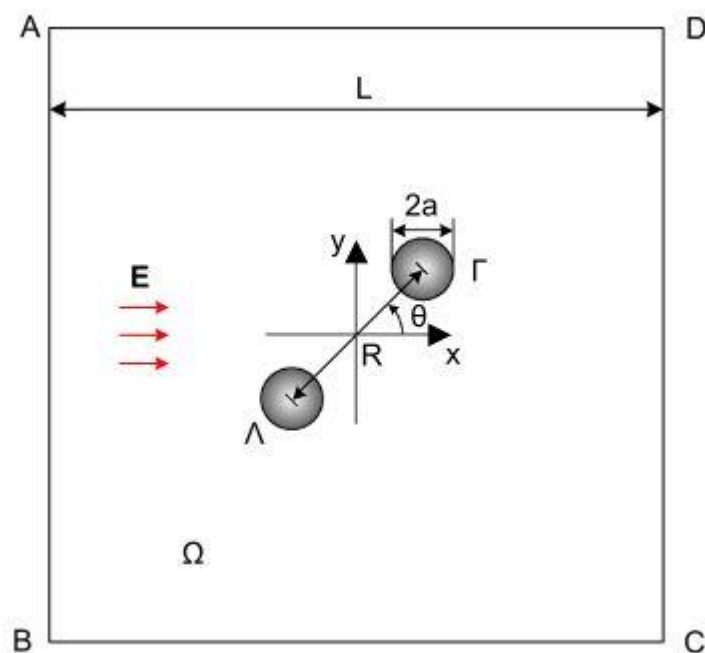
طولی وابسته می‌باشد: اندازه ذره، طول بیانگر غیریکنواختی میدان الکتریکی محلی و فاصله ذره. دومین مقیاس طولی مربوط به نیروی دی‌الکتروفورسیس برخاسته از تقابل بین میدان الکتریکی ذاتاً غیریکنواخت و ذره مفرد می‌باشد. درحالی‌که سومین مقیاس طولی در تقابل دی‌الکتروفورسیس بین ذرات مؤثر می‌باشد. اگر نیروی دی‌الکتروفورسیس برخاسته از تقابل بین ذرات بر نیروی دی‌الکتروفورسیس متقابل بین ذره و میدان الکتریکی غیریکنواخت غالب باشد، تشکیل زنجیره‌هایی در راستای میدان الکتریکی اعمالی قابل‌انتظار می‌باشد. در غیر این صورت، نیروی متقابل دی‌الکتروفورسیس بین ذرات قابل صرف‌نظر است. این گروه [۲۷-۳۰] با استفاده از روش عددی ضریب لاگرانژ به مطالعه رفتار دی‌الکتروفورسیس ذرات پرداختند. با توجه به گفته اوبری و سینق [۳۱]، هر دو نوع نیروی دی‌الکتروفورسیس بر اساس روش نقاط دوقطبی محاسبه شده‌اند که برای فواصل بین ذرات بزرگ‌تر از اندازه ذره معتبر می‌باشد. کانگ و لی [۳۲] با به‌کارگیری یک حل تشابهی از نیروی متقابل دی‌الکتروفورسیس بین ذرات، یک حل تشابهی برای مسیر ذره را به دست آوردند. کاملاً برخلاف زمانی که تقابل دی‌الکتروفورسیس بین ذرات در نظر گرفته نشده است، آنان پی بردند که یک جفت ذره با جهت‌گیری اولیه دلخواه مایل به جذب یکدیگر و هم‌ردیف شدن با میدان الکتریکی خارجی به‌عنوان جهت‌گیری پایدار می‌باشند. اشاره به این نکته الزامی می‌باشد که حل تشابهی نیروی متقابل دی‌الکتروفورسیس بین ذرات برای فواصل بین ذرات بزرگ‌تر از اندازه ذره دارای اعتبار است. بعلاوه، فرض ثابت بودن نیروی پسا استوکس وارد بر ذره به علت حضور تقابل هیدرودینامیکی بین ذرات مناسب نمی‌باشد. هوآنگ و همکاران [۳۳] یک مطالعه آزمایشگاهی در مورد تعامل دی‌الکتروفورسیس بین ذرات انجام دادند که در آن یک جفت ذرات کروی با زاویه اولیه نسبت به میدان الکتریکی اعمال‌شده، برای تشکیل زنجیره موازی با میدان الکتریکی جذب یکدیگر شدند. جانجوا و همکاران [۳۴] به هم‌ترازی و شکل‌گیری دو ذره استوانه‌ای شکل در فصل مشترک دو سیال به‌عنوان نتیجه‌ای از تعامل دی‌الکتروفورسیس بین ذرات به‌صورت تجربی پرداختند.



در کنار رشد مطالعات آزمایشگاهی پیرامون روش دی‌الکتروفورسیس، تلاش‌های بیشتری در زمینه شبیه‌سازی عددی برای به دست آوردن درک روشنی از تعامل دی‌الکتروفورسیس بین ذرات صورت گرفته است. اوبری و همکارانش [۲۷-۳۰] به‌منظور مطالعه حرکت ذره ناشی از تعامل دی‌الکتروفورسیس بین ذرات، یک مدل عددی بر اساس ضریب لاگرانژ را توسعه دادند. در مدلشان نیروی دی‌الکتروفورسیس بر اساس روش ساده‌شده دوقطبی محاسبه شده است، این روش زمانی دقت مناسبی دارد که فاصله بین ذرات نسبت به اندازه ذره بزرگ‌تر باشد [۳۱]. بعد از اینان، کانگ و لی [۳۲] از طریق تعادل نیروهای دی‌الکتروفورسیس و پسای استوکس، تعامل دی‌الکتروفورسیس بین ذرات را مورد بررسی قرار دادند. باین‌حال، جواب تقریبی برای نیروی تعاملی دی‌الکتروفورسیس بین ذرات که در مطالعه آنان به کار گرفته شده است، منحصراً زمانی که فاصله بین ذرات از اندازه ذره بزرگ‌تر باشد معتبر خواهد بود. روش تانسور تنش ماکسول به‌عنوان دقیق‌ترین رویکرد به‌منظور محاسبه نیروی دی‌الکتروفورسیس در نظر گرفته می‌شود [۳۵-۳۷]. درواقع، هوس و همکاران [۴۰] یافتند که ذرات غیر کرووی قابلیت هم‌ترازی با میدان الکتریکی به‌هنگام تشکیل زنجیره‌های جذب را دارا می‌باشند. همچنین بیان شده است که نیروی تعاملی دی‌الکتروفورسیس مثبت بین ذرات به تشکیل زنجیره‌های عمود بر میدان الکتریکی اعمالی متمایل می‌باشد [۴۱]. خوب است که اشاره شود تمامی مطالعات در مورد ذرات با اندازه محدود با روش تانسور تنش ماکسول تحت میدان‌های الکتریکی ثابت انجام شده است. باین‌حال، میدان‌های الکتریکی متناوب معمولاً در کاربردهای مونتاژ ذرات بر اساس دی‌الکتروفورسیس مرسوم می‌باشد، به‌این‌علت که دی‌الکتروفورسیس در ذرات به‌طور ذاتی باردار در میدان‌های الکتریکی متناوب می‌تواند حذف گردد. علاوه بر این، امکان تعویض بین حرکات ناشی از دی‌الکتروفورسیس مثبت و منفی با تنظیم فرکانس میدان‌های الکتریکی متناوب وجود دارد. همچنین میدان‌های الکتریکی متناوب می‌توانند الکترولیز آب را بهبود بخشند، درحالی‌که برای فن دی‌الکتروفورسیس تحت میدان‌های الکتریکی ثابت یک زیان رایج می‌باشد. لیو و همکاران [۴۲] با استفاده از روش دوقطبی تعاملات دی‌الکتروفورسیس بین ذرات را بررسی نمودند. در شکل ۱-۱،  $l$  طول ضلع و  $b$  عرض ضلع محدوده دربردارنده سیال،  $d$

فاصله مرکز تا مرکز ذرات و  $\theta$  زاویه بین خط واصل مراکز ذرات و راستای افقی می‌باشد. در این بررسی یک میدان الکتریکی  $E_0$  موازی با محور افقی مختصات تولید شده است و روی ضلع‌های بالا و پایین شرط مرزی عایق، روی ضلع چپ شرط پتانسیل الکتریکی  $\varphi_0$  و ضلع راست را متصل به زمین در نظر گرفته است. آنان نیروهای دی‌الکتروفورسیس مثبت و منفی را در میدان‌های الکتریکی ثابت و متناوب برای ذرات با اندازه‌های متفاوت و در فواصل مختلف محاسبه و با روش تانسور تنش ماکسول مقایسه نمودند.

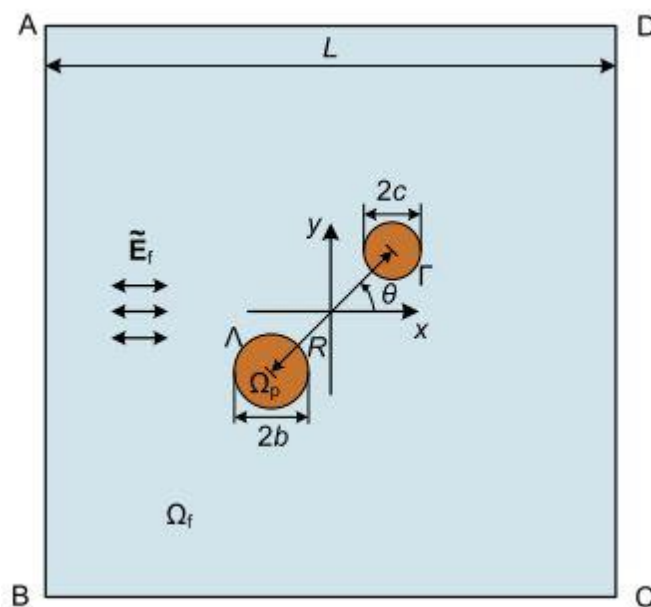
ای و قیان [۳۸] برای بررسی تغییر میدان الکتریکی به واسطه حضور ذرات از روش تانسور تنش ماکسول استفاده و حرکات تعاملی ذرات را تحت میدان الکتریکی ثابت بر اساس روش لاگرانژین-اولرین<sup>۱</sup> مطالعه نمودند. نتیجه‌گیری می‌شود که تعامل دی‌الکتروفورسیس منفی بین ذرات همواره متمایل به ایجاد زنجیره‌ای موازی با میدان الکتریکی ثابت اعمال شده می‌باشد. مدل آنان با دیگر روش‌های عددی نظیر، پروفیل هموار [۳۹]، المان مرزی [۴۰] و مرز غوطه‌ور [۴۱] تکمیل گردید که حرکات جاذب ذرات



شکل ۲-۱ هندسه مورد بررسی ای و قیان [۳۸]

<sup>۱</sup> Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE)

مجزا را به‌طور مشابه پیش‌بینی کردند. اثرات متقابل ناشی از دی‌الکتروفورسیس و هیدرودینامیک بین ذرات را به واسطه یک مدل گذرا و چند فیزیکی مورد مطالعه قرار داده‌اند که میدان جریان سیال، میدان الکتریکی ثابت و حرکت ذره با استفاده از روش لاگرانژین اولرین دلخواه به‌صورت هم‌زمان حل شده‌اند. هندسه آنان که شامل دو ذره صلب ( $\Lambda$  و  $\Gamma$ ) درون محدوده‌ای از سیال ( $\Omega$ ) می‌باشد، در شکل ۲-۱ نمایش داده شده است. در این هندسه  $L$  اندازه محدوده سیال،  $a$  شعاع ذره،  $R$  فاصله بین مراکز دو ذره و  $\theta$  زاویه بین خط واصل مراکز دو ذره با راستای افق می‌باشد. در تحقیق آنان میدان الکتریکی یکنواختی موازی و هم‌جهت با محور افقی اعمال شده است. نیروی دی‌الکتروفورسیس با انتگرال‌گیری از تانسور تنش ماکسول بر روی سطح ذره، سخت‌ترین دیدگاه برای محاسبه دی‌الکتروفورسیس [۳۵-۳۷]، به دست می‌آید. پیش از مطالعه اثرات متقابل بین ذرات و حرکات ناشی از آن، مقایسه‌ای بر اساس اندازه میان تقابل دی‌الکتروفورسیس بین ذرات و حرکت براونی انجام گرفته است. ای و همکاران [۴۳] یک مدل عددی گذرا جهت بررسی حرکات تعاملی دی‌الکتروفورسیس بین ذرات در میدان‌های الکتریکی متناوب ایجاد نمودند. هندسه بررسی‌شده آنان مشابه کار پیشین می‌باشد با این تفاوت که شعاع ذرات متفاوت در نظر گرفته شده است که در شکل ۳-۱ با  $b$  و  $c$  نمایش داده شده است. در این بررسی، روش



شکل ۳-۱ شماتیک هندسه تحقیق ای و همکاران [۴۳]

تانسور تنش ماکسول به منظور محاسبه میانگین زمانی نیروی دی‌الکتروفورسیس متناوب وارد بر هر ذره به کار گرفته شده است. میدان جریان سیال، میدان الکتریکی متناوب و حرکات ذرات با استفاده از الگوریتم حرکت شبکه لاگرانژین-اولرین به صورت هم‌زمان حل شده‌اند. ابتدا حرکات گذرای دی‌الکتروفورسیس مثبت و منفی برای تک ذره تحت میدان‌های الکتریکی متناوب ناهمگن فضایی برای نمایش ظرفیت مدل عددی شبیه‌سازی شدند. حرکات تعاملی دی‌الکتروفورسیس متناوب مربوط به یک جفت ذرات همسان و با اندازه‌های نامشابه در جهت نمایان ساختن مکانیسم فن شکل‌گیری ذرات بر اساس دی‌الکتروفورسیس متناوب مورد مطالعه قرار گرفته است.

### ۳-۱ نوآوری

در تحقیق حاضر به بررسی حرکت ذرات با حضور میدان الکتریکی پرداخته شده است. هنگامی که میدان الکتریکی اعمالی غیریکنواخت باشد، نیرویی با نام دی‌الکتروفورسیس بر ذرات وارد می‌شود که در این پایان‌نامه میدان الکتریکی غیریکنواخت به دو صورت مطالعه شده است: عدم تقارن چیدمان الکترودهای تولیدکننده میدان الکتریکی و تغییر محلی میدان الکتریکی یکنواخت با حضور دو ذره. در تحقیق حاضر به تأثیر کمی و کیفی نیروی دی‌الکتروفورسیس در میدان‌های الکتریکی ثابت و متناوب به همراه تأثیرات فرکانس و موقعیت اولیه قرارگیری ذرات توجه شده است. با توجه به نحوه حرکت ذرات، میکروولو و میکرومیکسری ارائه شد که با استفاده از نیروی دی‌الکتروفورسیس قابل کنترل می‌باشند که تاکنون از این نوع میکروولو و میکرومیکسر در مقالات دیده نشده است. ساخت آسان، عدم استفاده از هندسه‌های پیچیده و کنترل ساده و سریع می‌بایست از ویژگی‌های دستگاه‌های میکروسیالات باشد. میکروولو و میکرومیکسر ارائه شده در این تحقیق از هندسه‌های بسیار ساده‌ای برخوردار می‌باشند که فرآیند ساخت آن‌ها به راحتی قابل انجام است. استفاده از الکترودهای الکتریکی، این قابلیت را می‌دهد که به واسطه آن‌ها کنترل و برنامه‌ریزی این دو دستگاه بسیار ساده شود. مزیت دیگری که می‌توان برای این دو دستگاه بیان نمود، پاسخ سریع به تغییرات اعمالی در میدان الکتریکی است.

## ۴-۱ ساختار و فصل‌بندی پایان‌نامه

این پایان‌نامه از شش فصل با عناوین، مقدمه، مدل‌سازی عددی، معتبر سازی مدل عددی، حرکت دی‌الکتروفورتیک ذرات، میکروولو و میکرومیکسر تشکیل شده است. در فصل اول به بیان مقدمه‌ای از پدیده دی‌الکتروفورسیس و کاربردهای آن پرداخته شده است. در ادامه این فصل به بیان مختصری از کارهای انجام شده پیشین در زمینه حرکت ذرات در میدان الکتریکی پرداخته شده است.

در فصل دوم توضیحاتی در مورد نرم‌افزار استفاده‌شده در تحقیق حاضر و قابلیت آن برای مدل‌سازی تقابل بین سیال و جامد بیان شده است. در ادامه این فصل معادلات حاکم و شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه‌سازی و جفت نمودن فیزیک‌های مورد استفاده از قبیل میدان الکتریکی، جریان سیال و حرکت جسم صلب و در مواردی انتقال جرم، بیان شده‌اند.

فصل سوم مربوط به اعتبارسنجی و معتبر سازی مدل عددی انجام شده در تحقیق حاضر می‌باشد. در این فصل ابتدا به محاسبه نیروی دی‌الکتروفورسیس در میدان الکتریکی ثابت پرداخته و با مقادیر محاسبه‌شده در کارهای پیشین مقایسه شده است. در ادامه این فصل، محاسبه و مقایسه نیروی دی-الکتروفورسیس در میدان الکتریکی متناوب مورد توجه قرار گرفته است.

فصل چهارم به دو بخش تقسیم شده است که در بخش اول آن به بررسی حرکت ذره با حضور میدان الکتریکی غیریکنواخت متناوب و در بخش دوم آن به بررسی حرکت ذرات در میدان الکتریکی ثابت پرداخته شده است.

در فصل‌های پنجم و ششم، به ترتیب به تشریح و بیان نکات در نظر گرفته شده در طراحی میکروولو و میکرومیکسر، استاتیک و دینامیک، می‌پردازیم. در نهایت به بیان فهرست منابع و مراجع استفاده‌شده در تحقیق حاضر پرداخته شده است.



## ۲ مدل سازی عددی

## ۱-۲ مقدمه

در سال ۱۹۸۶، اسوانت لیت‌مارک<sup>۱</sup> که در آن زمان دانشجوی دکترا در زمینه آنالیز عددی و علوم کامپیوتری در مؤسسه سلطنتی فناوری استکهلم سوئد<sup>۲</sup> بود، به همراه دو هم‌دانشگاهی خود به نام‌های فرهاد سعیدی و سعید زهرای، که بعدها از تیم جدا شد، شروع به دریافت و انجام سفارش‌های برنامه‌نویسی نمودند. آن‌ها پس از مدتی اقدام به تأسیس شرکت، بازاریابی و فروش تولیدات خود در زمینه آنالیز عددی نمودند. عقد قرارداد با شرکت آمریکایی م‌تورکس<sup>۳</sup> (شرکت صاحب‌امتیاز متلب<sup>۴</sup>) سبب شکوفایی و توسعه شرکت آن‌ها گردید. پس از اتمام همکاری با شرکت م‌تورکس، لیت‌مارک و سعیدی تصمیم گرفتند که سود عاید از قراردادهای قبلی خود را در زمینه توسعه نرم‌افزاری به نام فم‌لب<sup>۵</sup> سرمایه‌گذاری کنند. این طرح با موفقیت روبه‌رو شد و فم‌لب توانست جایگاهی در میان سایر نرم‌افزارهای حل عددی پیدا نماید. امروزه دفتر اصلی شرکت در استکهلم سوئد واقع گردیده و در کشورهای نظیر آمریکا و هند نیز دارای نمایندگی فروش و توسعه است.

از سال ۲۰۰۵، نام فم‌لب به کامسول مولتی‌فیزیکس<sup>۶</sup> تغییر داده شد. در حال حاضر کاربرد این نرم‌افزار با سرعت چشم‌گیری در میان طرفداران فناوری‌های سطح بالا<sup>۷</sup> در حال گسترش است و دانشگاه‌های معتبری نظیر استنفورد<sup>۸</sup> و ام‌آی‌تی<sup>۹</sup> از این محصول در آزمایشگاه‌های خود استفاده می‌نمایند و بزرگ‌ترین مشتری تجاری این نرم‌افزار سازمان فضایی آمریکا<sup>۱۰</sup> می‌باشد.

نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیکس چندمنظوره می‌باشد و با استفاده از روش‌های حل عددی پیشرفته

---

<sup>۱</sup> Svante Littmarck

<sup>۲</sup> KTH

<sup>۳</sup> MathWorks

<sup>۴</sup> MATLAB

<sup>۵</sup> FEMLAB

<sup>۶</sup> COMSOL Multiphysics

<sup>۷</sup> High Tech

<sup>۸</sup> Stanford

<sup>۹</sup> MIT

<sup>۱۰</sup> NASA



اقدام به مدل‌سازی و شبیه‌سازی مسائل فیزیک محور می‌نماید. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان پدیده‌های شامل چند فیزیک و یا پدیده‌های جفت شده<sup>۱</sup> را به کمک بیش از ۳۰ ماژول موجود در این نرم‌افزار تحلیل نمود.

محیط کار نرم‌افزار کامسول به صورت یکپارچه می‌باشد و هر سه مرحله پیش‌پردازش<sup>۲</sup>، پردازش<sup>۳</sup> و پس‌پردازش<sup>۴</sup> در محیط کامسول قابل انجام است که سبب سهولت در انجام شبیه‌سازی‌های بین‌رشته‌ای می‌شود. در تحقیق حاضر نیازمند جفت نمودن چندین فیزیک شامل، میدان الکتریکی، میدان جریان سیال، حرکت جسم صلب و پدیده انتقال جرم می‌باشیم. از این‌رو در انجام این تحقیق از نرم‌افزار تجاری کامسول استفاده شده است.

از مهم‌ترین هدف‌های این پایان‌نامه تقابل بین سیال و جسم صلب می‌باشد که در آن جسم صلب می‌تواند حرکت انتقالی و یا چرخشی داشته باشد. بدین منظور مدل‌سازی عددی نیازمند افزودن قابلیت‌های ردیابی مرزهای جسم صلب می‌باشد. در نرم‌افزار کامسول از روش لاگرانژی اولرین دلخواه برای مدل‌سازی مسائلی که هندسه آن‌ها تغییر شکل می‌دهد، استفاده می‌شود. این تغییر شکل شامل حذف یا اضافه شدن ماده نمی‌باشد و به جابجایی چارچوب هندسه می‌پردازد. در این ویژگی برای به‌روزرسانی مرزهای جسم صلب از جابجایی شبکه محاسباتی استفاده می‌شود.

در نرم‌افزار کامسول، از حل‌گر وابسته به زمان به منظور یافتن پاسخ مسائل متغیر با زمان استفاده می‌شود که به این نوع مسائل، پویا یا ناپایا می‌گویند. در این حل‌گر، زمان شروع و پایان بررسی برحسب یکی از واحدهای زمانی مانند ثانیه، تعیین می‌شود و حل‌گر فاصله زمانی تعیین شده را بر اساس الگوریتم‌های موجود در نرم‌افزار طی می‌نماید که به هر یک از قدم‌های برداشته شده، گام زمانی می‌گویند.

---

<sup>۱</sup> Coupled

<sup>۲</sup> Pre-processing

<sup>۳</sup> Processing

<sup>۴</sup> Post-processing

حل گر گذرا با زمان در این نرم افزار قابلیت استفاده از روش های گام زمانی ضمنی یا روش های صریح خانواده رانج کوتا<sup>۱</sup> را دارا می باشد. از جمله روش های گام زمانی ضمنی می توان به فرمول برگشتی مشتق<sup>۲</sup> و آلفای عمومی شده<sup>۳</sup> اشاره نمود. مدل های عددی مورد بررسی در تحقیق حاضر به دلیل حرکت جسم صلب می بایست به صورت گذرا با زمان حل شوند، از این رو، در تحقیق حاضر از روش فرمول برگشتی مشتق استفاده شده است. در این نرم افزار به منظور همگرایی معادلات، خطای تمامی پارامترهای موجود از قبیل سرعت، فشار، پتانسیل الکتریکی، جابجایی و چرخش جسم صلب و غلظت، تا مقدار ۰/۰۰۱ بررسی شده است. این بررسی در هر گام زمانی انجام می پذیرد و بعد از رسیدن خطای تمامی پارامترها به مقدار تعیین شده، حل گر اقدام به بررسی گام زمانی بعدی می نماید.

## ۲-۲ معادلات حاکم

معادلات بیان شده در این قسمت برگرفته از روابط نرم افزار کامسول و مقاله ای و همکاران [۴۳] می باشد که در زیر به تشریح آن ها می پردازیم.

### ۱-۲-۲ معادله حاکم بر میدان الکتریکی

به علت فرض نازک بودن لایه دوگانه الکتریکی چگالی بار خالص تمامی محدوده محاسباتی صفر می باشد. بنابراین، توزیع پتانسیل الکتریکی درون سیال و ذرات با قانون گوس (۱-۲) بیان می شود [۴۳].

$$\nabla \cdot \left[ \sigma \nabla \varphi + \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon \nabla \varphi) \right] = 0 \quad (1-2)$$

پارامترهای بیان شده در این رابطه عبارتند از،  $\epsilon$  ثابت دی الکتریک،  $\sigma$  قابلیت رسانایی مواد و  $\varphi$  پتانسیل الکتریکی.

<sup>۱</sup> Runge-kutta

<sup>۲</sup> Backward differentiation formula (BDF)

<sup>۳</sup> Generalized- $\alpha$

## ۲-۲-۲ معادله حاکم بر میدان جریان سیال

در مطالعه حاضر عدد رینولدز<sup>۱</sup> ( $Re$ ) مربوط به جریان سیال بسیار کوچک می‌باشد، بنابراین می‌توان از اینرسی سیال صرف‌نظر نمود. در نتیجه، معادلات حاکم بر جریان سیال به وسیله معادله پیوستگی (۲-۲) و معادلات استوکس (۳-۲) بیان می‌شوند [۴۳].

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (۲-۲)$$

$$\rho_f \frac{\partial u}{\partial t} = -\nabla p + \mu \nabla^2 u \quad (۳-۲)$$

در صورتی که نتوان از اینرسی سیال صرف‌کرد، دیگر رابطه (۳-۲) برقرار نمی‌باشد و از معادلات ناویر و استوکس برای توزیع میدان جریان سیال استفاده می‌شود [۴۳].

$$\rho_f \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u \quad (۴-۲)$$

در این روابط علامت‌های بکار رفته  $u$ ،  $\rho_f$ ،  $\mu$  و  $p$  به ترتیب بیانگر بردار سرعت سیال، چگالی سیال، ویسکوزیته دینامیکی و فشار می‌باشند.

## ۳-۲-۲ معادله حاکم بر حرکت جسم صلب

در نهایت حرکت و چرخش ذره صلب، به ترتیب با استفاده از روابط (۵-۲) و (۶-۲) شبیه‌سازی شده‌اند [۴۳].

$$m \frac{dU}{dt} = F_H + F_{DEP} \quad (۵-۲)$$

$$I \frac{d\omega_p}{dt} = \int (x_s - x_p) * [(T_H + T_M) \cdot n] dS \quad (۶-۲)$$

<sup>۱</sup> Reynolds number

در این روابط  $m$  جرم،  $I$  ممان اینرسی،  $U$  سرعت خطی،  $\omega_p$  سرعت چرخشی و  $x_p$  و  $x_s$  به ترتیب بردار مکانی سطح و مرکز ذره می‌باشند. در رابطه (۵-۲)،  $F_H$  و  $F_{DEP}$  به ترتیب نشان‌دهنده نیروی هیدرودینامیکی و نیروی دی‌الکتروفورسیس می‌باشند که به ترتیب با انتگرال‌گیری از تانسور تنش هیدرودینامیکی ( $T_H$ ) و تانسور تنش ماکسول ( $T_M$ ) بر روی سطح ذره محاسبه می‌شوند [۴۳].

$$F_H = \int T_H \cdot n \, dS = \int [-pI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T)] \cdot n \, dS \quad (۷-۲)$$

$$F_{DEP} = \int T_M \cdot n \, dS = \frac{1}{4} \int \Sigma_f [(E_f E'_f + E'_f E_f) - |E_f|^2 I] \cdot n \, dS \quad (۸-۲)$$

$$E_f = -\nabla \varphi_f \quad (۹-۲)$$

در روابط اخیر،  $|E_f|$  قدرت میدان الکتریکی در سیال می‌باشد. بردار واحد عمود بر مرز و المان روی مرز به ترتیب با  $n$  و  $dS$  نمایش داده شده است.

با توجه به کارهای پیشین برای محاسبه نیروی دی‌الکتروفورسیس می‌توان از روش ساده‌تری نسبت به انتگرال‌گیری تانسور تنش ماکسول استفاده نمود. در این روش که به روش دوقطبی مشهور است، نیروی دی‌الکتروفورسیس با توجه به رابطه (۱۱-۲) محاسبه می‌شود [۴۳].

$$F_{DEP} = 0.75\pi\epsilon_f r_p^2 f_{CM} \nabla |E_{rms}|^2 \quad (۱۰-۲)$$

$$f_{CM} = \frac{\omega^2(\epsilon_p - \epsilon_f)(\epsilon_p + 2\epsilon_f) + (\sigma_p - \sigma_f)(\sigma_p + 2\sigma_f)}{\omega^2(\epsilon_p + 2\epsilon_f)^2 + (\sigma_p + 2\sigma_f)^2} \quad (۱۱-۲)$$

در رابطه (۱۰-۲)،  $r_p$  بیانگر شعاع ذره،  $f_{CM}$  بیانگر ضریب کلازیوس-مستی<sup>۱</sup>،  $\epsilon_f$  ثابت دی‌الکتریک سیال و  $|E_{rms}|$  اندازه میانگین مربع ریشه<sup>۲</sup> و در رابطه (۱۱-۲)،  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای میدان الکتریکی

<sup>۱</sup> Clausius-Mossotti factor

<sup>۲</sup> Root mean square magnitude

اعمال شده می‌باشد. در این پایان‌نامه به علت دقت بیشتر، از روش انتگرال‌گیری تانسور تنش ماکسول استفاده شده است.

### ۲-۲-۴ معادله حاکم بر انتقال جرم

در مدل‌سازی حاضر، از معادله انتقال جرم به‌منظور بررسی غلظت در محدوده حل استفاده شده است. این معادله تنها در مدل‌سازی میکرومیکسر (فصل ۶) برای بررسی عملکرد آن، کاربرد دارد. معادله انتقال جرم با میدان جریان سیال جفت<sup>۱</sup> شده است و بیان ریاضی آن در رابطه (۲-۱۲) آمده است [۴۳].

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (-D \nabla C) + u \cdot \nabla C = 0 \quad (2-12)$$

در این رابطه  $C$  غلظت،  $D$  ضریب انتشار و  $u$  سرعت سیال می‌باشد.

### ۲-۳ شرایط مرزی

در توسعه مدل‌های عددی تحقیق حاضر، از شرط‌های مرزی مشابهی استفاده شده است که در این بخش به بیان روابط ریاضی حاکم بر آن‌ها می‌پردازیم.

### ۲-۳-۱ میدان الکتریکی

یکی از شرط‌های مرزی مورد استفاده در حل معادلات الکتریکی، مشخص نمودن مقدار پتانسیل الکتریکی در یک مرز می‌باشد. این شرط مرزی دیریکله بسته به ثابت (۲-۱۳) یا متناوب (۲-۱۴) بودن میدان الکتریکی، به‌صورت یکی از دو رابطه زیر بیان می‌شود [۴۳].

$$\varphi = \varphi_0 \quad (2-13)$$

$$\varphi = \varphi_0 * \sin(\omega t) \quad (2-14)$$

---

<sup>۱</sup> Couple

دیگر شرط مرزی مورد استفاده، شرط مرزی عایق است که از نوع نیومن می باشد و بیان ریاضی آن به صورت زیر تعریف می شود [۴۳].

$$n \cdot \left( \sigma_f \nabla \varphi_f + \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_f \nabla \varphi_f) \right) = 0 \quad (15-2)$$

یکی از هدفهای تحقیق حاضر، مدل سازی تقابل الکتریکی دو ماده دی الکتریک در کنار هم است. با توجه به پیشینه تحقیق انجام شده، شروط پیوستگی پتانسیل الکتریکی (۱۶-۲) و مؤلفه عمودی جابجایی الکتریکی (۱۷-۲) در نظر گرفته شده است [۴۳].

$$\varphi_f = \varphi_p \quad (16-2)$$

$$n \cdot \left( \sigma_f \nabla \varphi_f + \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_f \nabla \varphi_f) \right) = n \cdot \left( \sigma_p \nabla \varphi_p + \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_p \nabla \varphi_p) \right) \quad (17-2)$$

### ۲-۳-۲ میدان جریان سیال

سرعت و فشار دو پارامتر اساسی برای معادلات هیدرودینامیکی می باشند که برای حل این معادلات می بایست سرعت یا فشار بر روی مرزها مشخص شود. از این رو معمولاً در ورودی کانالها شرط سرعت (۱۸-۲)، در خروجی آنها شرط فشار (۱۹-۲) و برای دیواره های صلب شرط عدم لغزش (۲۰-۲) در نظر می گیرند. شرط عدم لغزش بیانگر آن است که سرعت نسبی بین سیال و دیواره صفر می باشد [۴۳].

$$u = \frac{Re * \mu}{\rho * W} \quad (18-2)$$

$$p = p_0 \quad (19-2)$$

$$u = U_w \quad (20-2)$$

در رابطه (۱۸-۲)،  $W$  اندازه مقطع ورودی (و خروجی) میکروولو و میکرومیکسر می باشد.

یکی دیگر از هدف‌های تحقیق حاضر، مدل‌سازی تقابل سیال و جسم صلب می‌باشد که برای رسیدن به این مهم احتیاج به یک بیان ریاضی در فصل مشترک بین سیال و جسم صلب می‌باشد. از آنجایی که جسم صلب می‌تواند متحرک یا ساکن باشد، پس سرعت سیال و جسم صلب برابرند [۴۳].

$$u = U + \omega_p * (x_s - x_p) \quad (21-2)$$

### ۳-۳-۲ انتقال جرم

معادله انتقال جرم توزیع غلظت در محدوده محاسباتی را به دست می‌آورد، پس باید وضعیت غلظت در مرزهای آن کاملاً مشخص باشد. در تحقیق حاضر برای ورودی کانال‌ها از شرط غلظت (۲۲-۲)، برای دیواره‌های صلب از شرط عدم نفوذ (۲۳-۲) و برای خروجی از شرط انتقال جابجایی (۲۴-۲) استفاده شده است. همچنین، از رابطه (۲۲-۲) برای شرط اولیه نیز استفاده می‌شود [۴۳].

$$C = C_0 \quad (22-2)$$

$$-n \cdot (-D\nabla C + uC) = 0 \quad (23-2)$$

$$-n \cdot D\nabla C = 0 \quad (24-2)$$

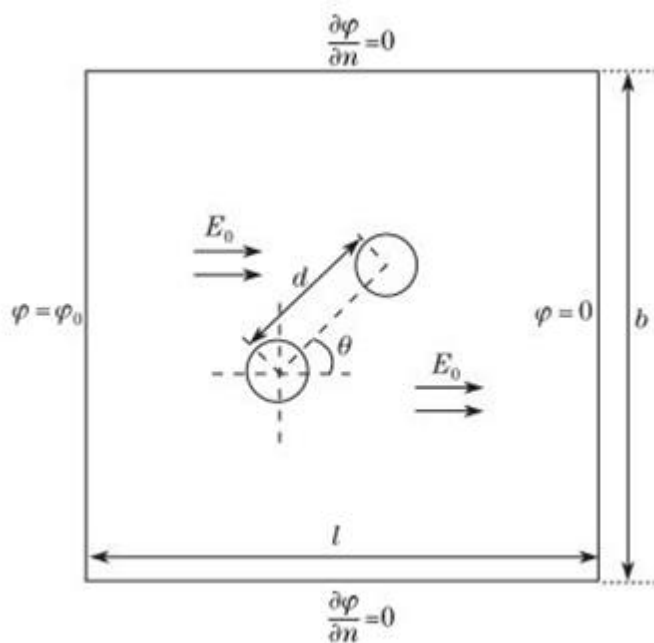




۳ معتبر سازی مدل عددی

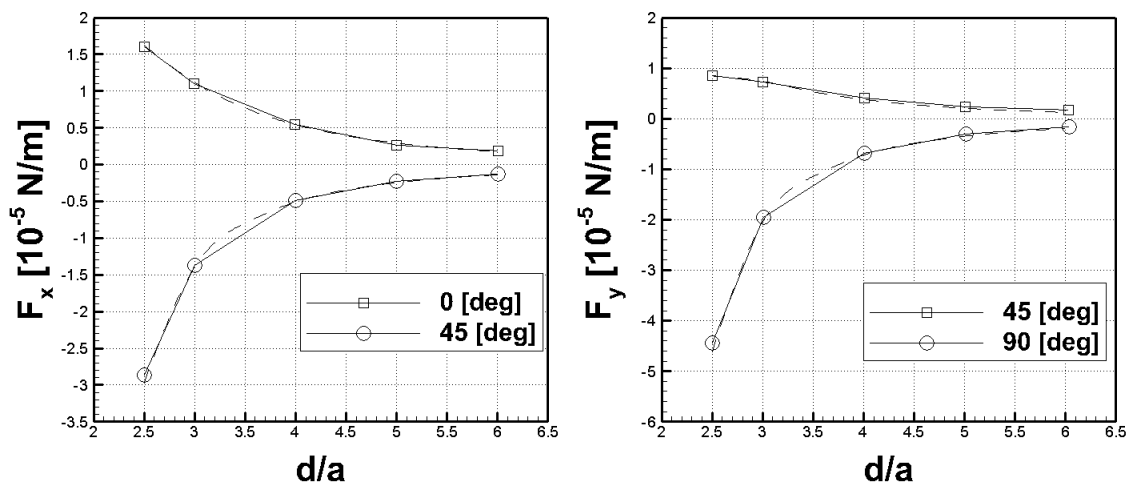
### ۱-۳ نیروی دی‌الکتروفورسیس در میدان الکتریکی ثابت

به منظور مدل‌سازی حرکت ذرات در میدان الکتریکی، ابتدا نیازمند محاسبه دقیق و درست نیروی دی‌الکتروفورسیس می‌باشیم. بدین ترتیب، ابتدا بر آن شدیم تا یک مدل عددی برای محاسبه نیروی دی‌الکتروفورسیس با فرض ساکن بودن ذرات ایجاد نماییم. با توجه به پیشینه تحقیق انجام شده در مورد نیروی دی‌الکتروفورسیس، به منظور سنجش صحت نیروی محاسبه شده در تحقیق حاضر، مدل عددی لیو و همکاران [۴۲] انتخاب شد. در شکل ۱-۳ هندسه استفاده شده به منظور اعتبارسنجی نیروی دی‌الکتروفورسیس در میدان الکتریکی ثابت نمایش داده شده است. در این شکل،  $l$  طول ضلع و  $b$  عرض ضلع محدوده دربردارنده سیال،  $d$  فاصله مرکز تا مرکز ذرات و  $\theta$  زاویه بین خط واصل مراکز ذرات و راستای افقی می‌باشد. در این بررسی یک میدان الکتریکی  $E_0$  موازی با محور افقی مختصات تولید شده است و روی ضلع‌های بالا و پایین شرط مرزی عایق، روی ضلع چپ شرط پتانسیل الکتریکی  $\varphi_0$  و ضلع راست را متصل به زمین در نظر گرفته است. آنان ابتدا تعامل دی‌الکتروفورسیس بین دو ذره یکسان و ساکن را در میدان الکتریکی ثابت با روش‌های دوقطبی و تانسور تنش ماکسول بررسی نمودند.



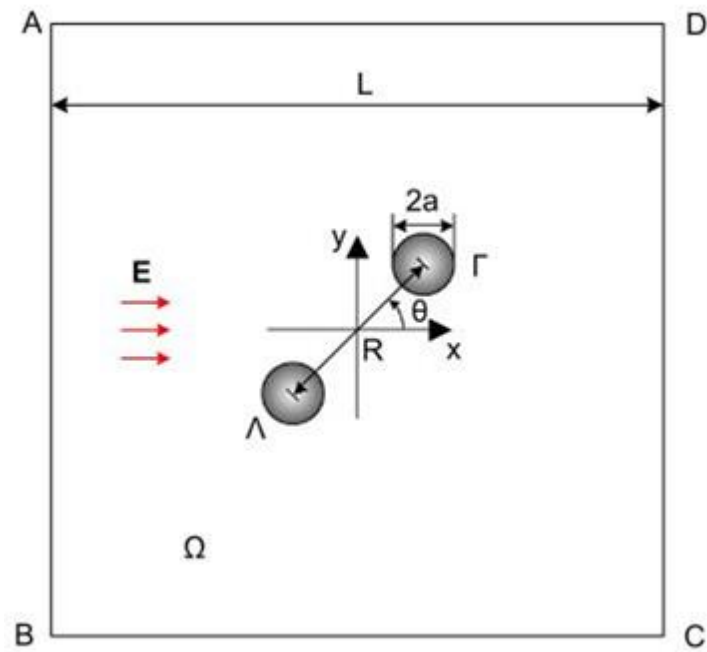
شکل ۱-۳ شماتیک هندسه استفاده شده برای اعتبارسنجی نیروی دی‌الکتروفورسیس در میدان الکتریکی ثابت [۴۲]

به علت استفاده از روش تانسور تنش ماکسول، مقادیر تحقیق حاضر با مقادیر محاسبه شده در مقاله آنان مقایسه شده است. آنان گزارش نمودند که اندازه نیروی دی‌الکتروفورسیس برای دو ذره برابر ولی در خلاف جهت می‌باشد. در شکل ۲-۳ نیروی دی‌الکتروفورسیس در دو راستای افقی و عمودی در زوایای مختلف در برابر فواصل بین ذرات ترسیم شده است. در این شکل با استفاده از شعاع ذرات که به‌عنوان طول مشخصه انتخاب شده است، فواصل بین ذرات بی‌بعد شده‌اند. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، نتایج تحقیق حاضر از صحت کامل برخوردار است.



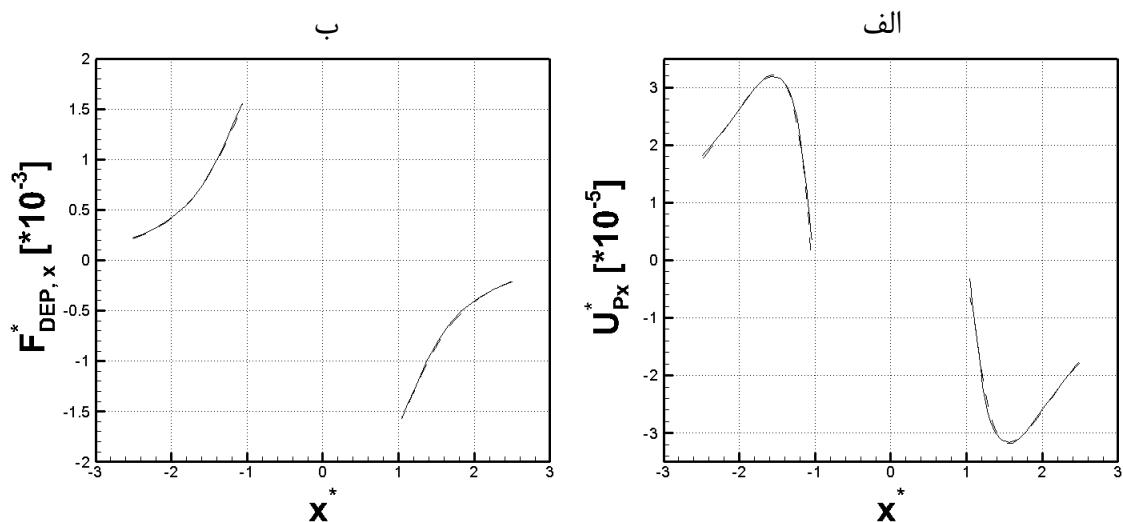
شکل ۲-۳ اعتبارسنجی مربوط به نیروی دی‌الکتروفورسیس منفی که خطوط توپر نشان‌دهنده نتایج حاصل از کار لیو و همکاران [۴۱] و خط چین‌ها نشان‌دهنده نتایج تحقیق حاضر می‌باشند.

تاکنون توانستیم نیروی دی‌الکتروفورسیس در میدان الکتریکی ثابت را با فرض ساکن بودن ذرات با موفقیت محاسبه نماییم. در مرحله بعد اقدام به محاسبه نیروی دی‌الکتروفورسیس بین ذرات متحرک در میدان الکتریکی ثابت می‌نماییم. بدین منظور از نتایج کار ای و قیان [۳۸] که حاصل از بررسی دو ذره یکسان در راستای میدان الکتریکی می‌باشد، برای مقایسه با نتایج حاصل از مطالعه حاضر استفاده می‌شود. هندسه آنان که شامل دو ذره صلب ( $\Gamma$  و  $\Lambda$ ) درون محدوده‌ای از سیال ( $\Omega$ ) می‌باشد، در شکل ۴-۳ نمایش داده شده است. در این هندسه  $L$  اندازه محدوده سیال،  $a$  شعاع ذره،  $R$  فاصله بین مراکز دو ذره و  $\theta$  زاویه بین خط واصل مراکز دو ذره با راستای افق می‌باشد. آنان یک معیار از سرعت تعریف و از آن برای بی‌بعدسازی سرعت و نیرو استفاده نمودند. البته می‌بایست خاطر نشان نمود که برای



شکل ۳-۳ شماتیک هندسه استفاده شده برای اعتبارسنجی نیروی دی-الکتروفورسیس ضمن حرکت ذرات در میدان الکتریکی ثابت [۳۸]

بی‌بعدسازی نیرو به ویسکوزیته دینامیکی نیز احتیاج می‌باشد. همچنین شعاع ذره به‌عنوان طول مشخصه به‌کار رفته است. در شکل ۳-۳، سرعت بی‌بعد ذرات و نیروی بی‌بعد دی‌الکتروفورسیس وارد بر آن‌ها در برابر موقعیت مکانی مرکز ذرات تا زمان برخورد رسم شده است. در این شکل طول مشخصه، شعاع ذره در نظر گرفته شده است. در این شکل انطباق کامل نتایج حاصل از مطالعه حاضر با نتایج حاصل از

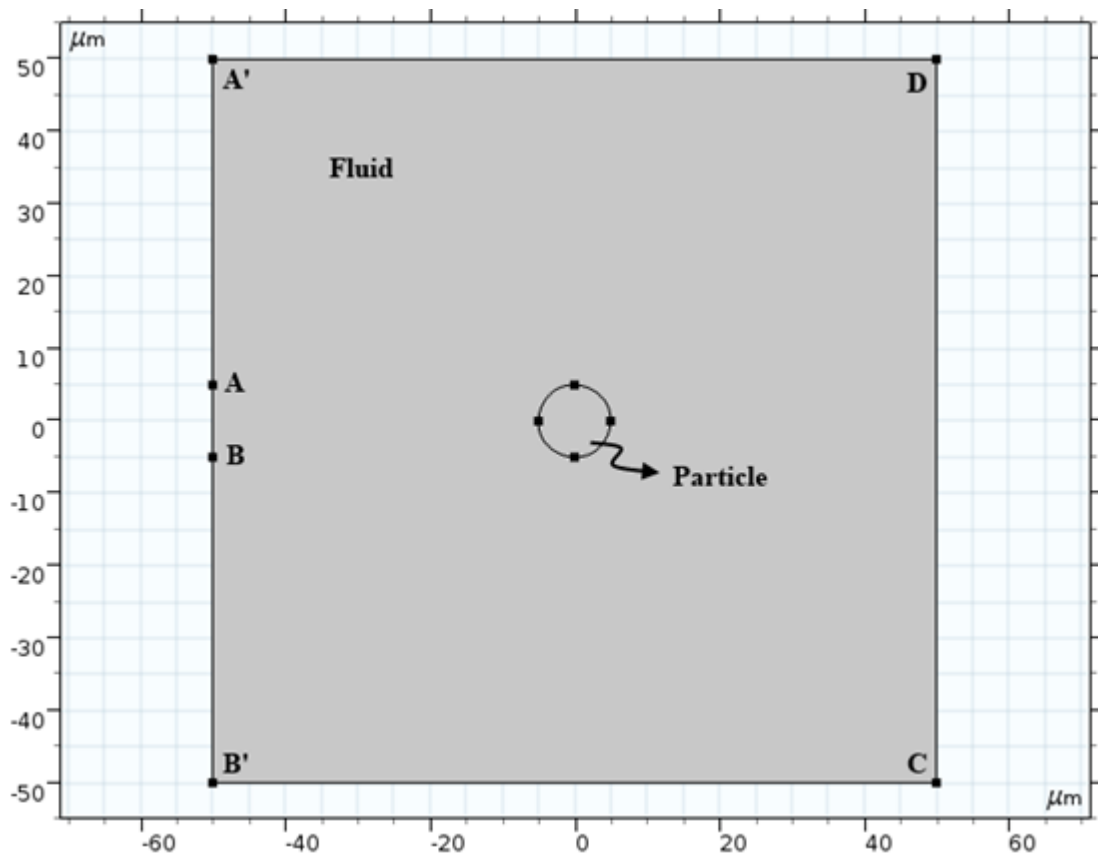


شکل ۳-۴ اعتبارسنجی مربوط به سرعت بی‌بعد ذرات (الف) و نیروی بی‌بعد دی‌الکتروفورسیس (ب) که خطوط توپر مربوط به ای و قیان [۴۲] و خطچین‌ها مربوط به مطالعه حاضر می‌باشند.

بررسی ای و قیان قابل مشاهده است. در ادامه به اعتبارسنجی نیروی دی‌الکتروفورسیس در میدان الکتریکی متناوب، مشابه با میدان الکتریکی ثابت، می‌پردازیم.

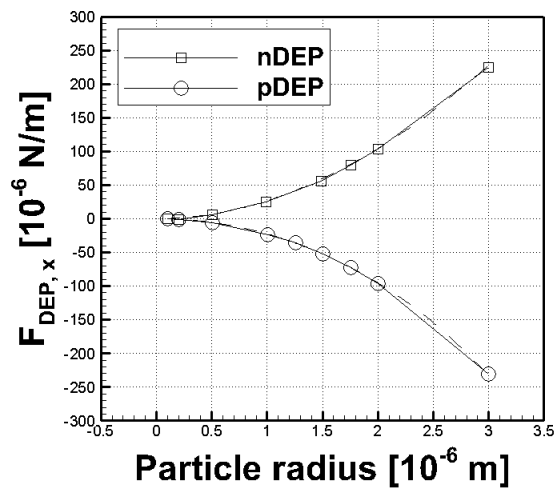
### ۲-۳ نیروی دی‌الکتروفورسیس در میدان الکتریکی متناوب

در مطالعه‌ای دیگر، ای و همکاران [۴۳] به بررسی حرکت دی‌الکتروفورسیس ذرات در میدان الکتریکی متناوب غیریکنواخت پرداختند. آنان در ابتدا تأثیر شعاع تک ذره ساکن بر نیروی دی‌الکتروفورسیس را بررسی نمودند که نتایج آن اولین گزینه برای اعتبارسنجی مدل‌سازی نیروی دی‌الکتروفورسیس در میدان الکتریکی متناوب می‌باشد. در مطالعه آنان یک میدان الکتریکی غیریکنواخت از طریق عدم تقارن چیدمان الکترودها ایجاد شده است. در شکل ۳-۵، یک الکتروده



شکل ۳-۵ شماتیک هندسه مورد استفاده به منظور اعتبار سنجی نیروی دی‌الکتروفورسیس در میدان الکتریکی متناوب

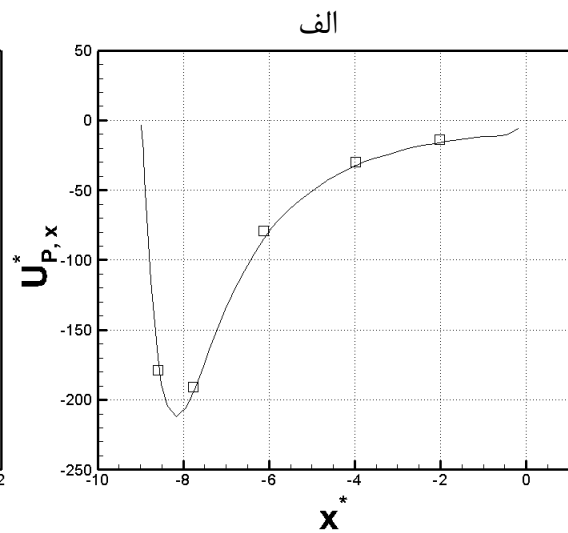
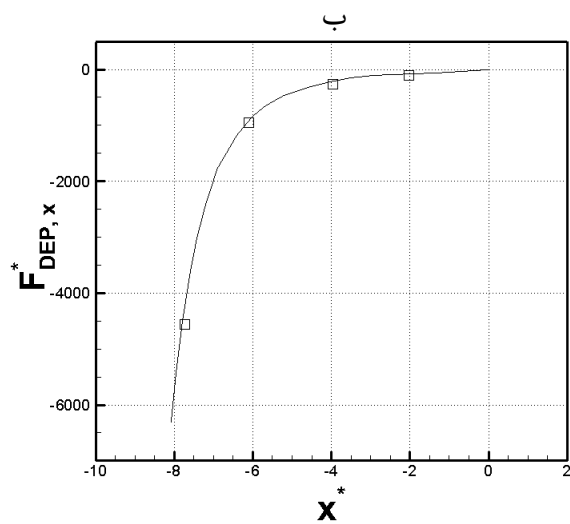
اندازه ۰/۱ طول ضلع مربع روی مرز چپ و الکتروده دیگری به اندازه طول ضلع مربع روی مرز راست قرار



شکل ۳-۶ اعتبارسنجی مربوط به متوسط زمانی نیروی دی‌الکتروفورسیس که خطوط توپر متعلق به ای و همکاران [۴۳] و خط چین‌ها متعلق به تحقیق حاضر می‌باشند.

داده شده است و سایر مرزها عایق در نظر گرفته شده است. آنان شعاع ذره را به‌عنوان طول مشخصه مدنظر قرار دادند و برای بی‌بعدسازی نیروها از معیار سرعت تعریف‌شده و ویسکوزیته دینامیکی استفاده نمودند. با توجه به شکل ۳-۶ نتایج تحقیق حاضر کاملاً با نتایج حاصل از کار آنان منطبق می‌باشد.

ای و همکاران در ادامه تحقیقشان به بررسی حرکت ذره در اثر اعمال نیروی دی‌الکتروفورسیس در میدان الکتریکی متناوب می‌پردازند. در این پایان‌نامه از نتایج به‌دست‌آمده آنان برای اعتبارسنجی سرعت ذره و متوسط زمانی نیروی دی‌الکتروفورسیس استفاده شده است. در شکل ۳-۷ سرعت بی‌بعد ذره و متوسط زمانی نیروی بی‌بعد دی‌الکتروفورسیس وارد بر آن در برابر موقعیت مکانی مرکز ذره نمایش داده شده است. در این شکل موقعیت مکانی ذره با استفاده از شعاع ذره بی‌بعد شده است. همان‌طور که در شکل نمایان است، نتایج پایان‌نامه حاضر کاملاً با نتایج حاصل از کار آنان منطبق می‌باشد.



شکل ۳-۷ اعتبارسنجی مربوط به سرعت بی بعد ذره (الف) و متوسط زمانی نیروی بی بعد دی الکتروفورسیس (ب) که خطوط توپر بیانگر نتایج ای و همکاران [۴۳] و نماد مربع بیانگر نتایج تحقیق حاضر می باشد.



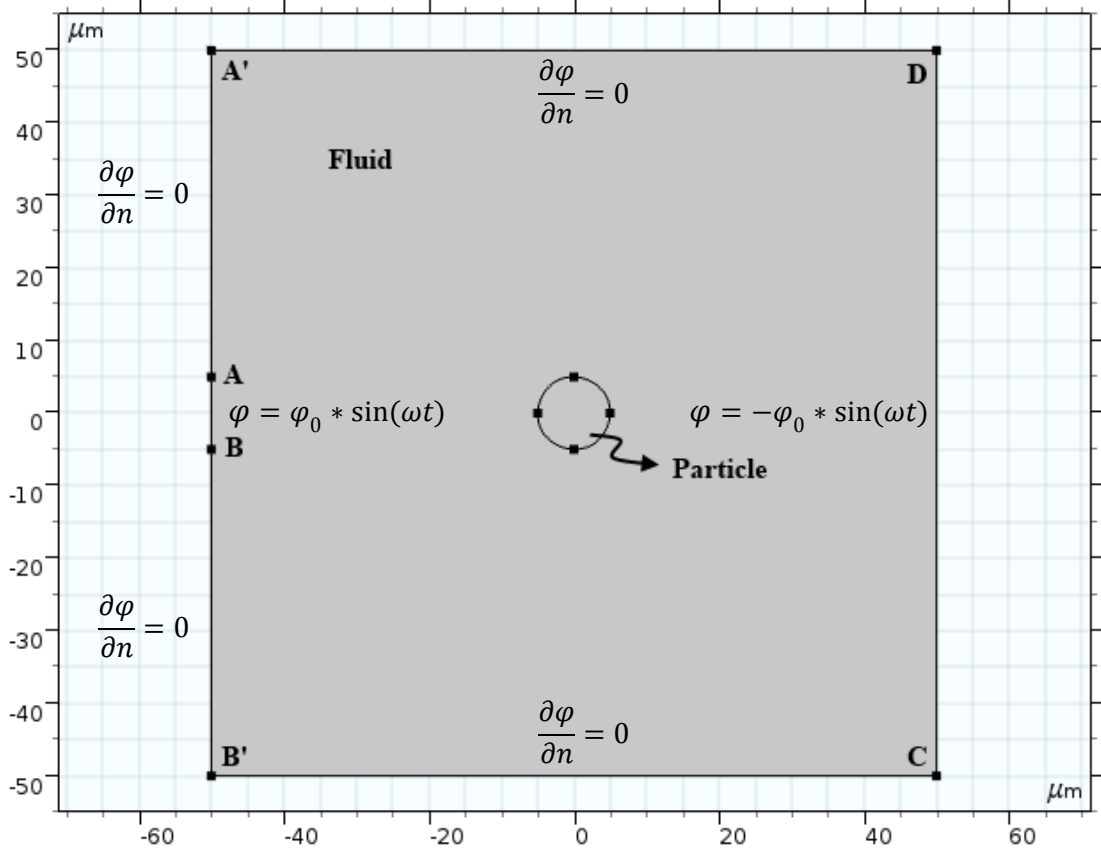


## ۴ حرکت دی‌الکتروفور تیک ذرات

## ۱-۴ دی‌الکتروفورسیس متناوب

### ۱-۱-۴ بیان مسئله

در شکل ۱-۴ ذرات معلق استوانه‌ای شکل به شعاع ۵ میکرون در سیال نیوتنی غیرقابل تراکم، درون مربعی محدود به طول ۱۰۰ میکرون مصور شده است. ضخامت‌های مورد مطالعه ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرون می‌باشند. مرکز مربع و مرکز ذره در بررسی دی‌الکتروفورسیس متناوب برهم منطبق بوده و به‌عنوان مرکز مختصات در نظر گرفته شده است. به‌منظور حذف نیروی شناوری، چگالی ذرات و سیال باهم برابر و برابر ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمربع در نظر گرفته شده است و ویسکوزیته دینامیکی سیال ۰/۰۰۱ پاسکال ثانیه قرار داده شده است. در راستای محور افقی میدان الکتریکی متناوب به‌منظور القای تعامل دی‌الکتروفورسیس بین ذره و سیال اعمال شده است. به علت خنثی بودن ذره تأثیرات ناشی از الکتروفورسیس و الکترواوموتیک نادیده گرفته می‌شود. از آنجایی که ضخامت لایه دوگانه الکتریکی برای یک صفحه باردار در یک محلول ۰/۱ مولار پتاسیم کلرید در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد تقریباً برابر یک



شکل ۱-۴ شماتیک هندسه بررسی نیروی دی‌الکتروفورسیس در میدان الکتریکی متناوب

نانومتر می‌باشد، می‌توان نیروهای ناشی از لایه دوگانه الکتریکی، واندروالسی و حرکت براونی را در تحقیق حاضر نادیده گرفت. همانند آنچه که بیان شد، یکی از روش‌های ایجاد میدان الکتریکی غیریکنواخت عدم تقارن چیدمان الکترودها می‌باشد، از این رو طول الکتروود  $AB$  در دی‌الکتروفورسیس متناوب، یک‌دهم طول مربع در نظر گرفته شده است. ثابت دی‌الکتریک نسبی سیال و ذره به ترتیب برابرند با ۸۰ و  $2/6$  و دیگر خاصیت الکتریکی سیال و ذره، قابلیت رسانایی، به ترتیب  $0.2$  و  $0.2$  زیمنس بر متر می‌باشند تا نیروی دی‌الکتروفورسیس مثبت ایجاد شود. به منظور اعمال نیروی دی‌الکتروفورسیس منفی، قابلیت رسانایی ذره  $0.0004$  زیمنس بر متر در نظر گرفته می‌شود.

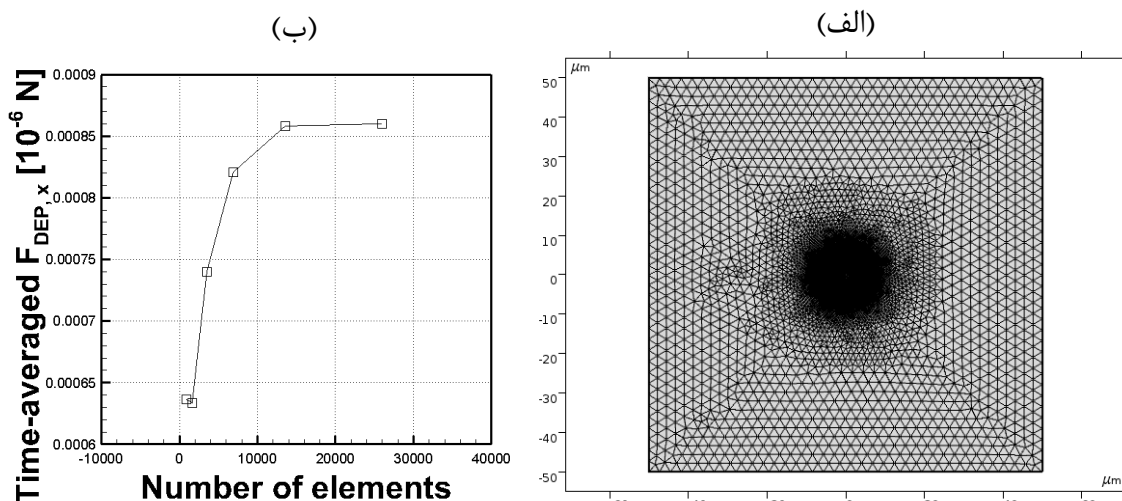
#### ۴-۱-۲ شرایط مرزی

با توجه به شکل ۴-۱ برای تولید میدان الکتریکی متناوب، بر روی ضلع‌های  $AB$  و  $CD$  به ترتیب دو پتانسیل الکتریکی که ولتاژ قله به قله آن ۲۰ ولت و فرکانس اعمالی ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ هرتز می‌باشد، قرار می‌دهیم. سایر مرزهای خارجی سیال عایق و در فصل مشترک بین سیال و جامد پتانسیل الکتریکی و مؤلفه عمودی جابجایی الکتریکی به صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شود.

در بررسی مربوط به دی‌الکتروفورسیس متناوب، مرزهای  $A'B'$  و  $CD$  دارای شرط عدم لغزش می‌باشند. بر روی مرزهای  $A'D$  و  $B'C$ ، شرط جریان عمودی با فشار صفر اعمال شده است. در فصل مشترک بین سیال و جامد، سرعت سیال با توجه به حرکت ذره صلب محاسبه می‌شود.

#### ۴-۱-۳ استقلال از شبکه

مسئله بیان شده در بخش ۴-۱، به ازای ضخامت ۱۰۰ میکرون و فرکانس ۲۰۰۰ هرتز به منظور بررسی حساسیت شبکه بر نیروی دی‌الکتروفورسیس انتخاب شده است. در شکل ۴-۲ با افزایش تعداد المان‌های شبکه محاسباتی متوسط زمانی نیروی دی‌الکتروفورسیس نیز افزایش می‌یابد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود تغییرات نیروی دی‌الکتروفورسیس با افزایش تعداد المان نسبت به تعداد المان ۱۳۵۷۴ ناچیز می‌باشد. با توجه به شکل ۴-۲ و آنچه که ای و همکاران بیان نمودند، تعداد المان ۱۳۵۷۴



شکل ۲-۴ شبکه محاسباتی با تعداد المان ۱۳۵۷۴ (الف) و استقلال از شبکه مربوط به متوسط زمانی نیروی دی‌الکتروفورسیس (ب) در میدان الکتریکی متناوب

برای بررسی نتایج در حالت‌های دیگر انتخاب می‌شود، به این علت که تغییرات نمودار به ازای این تعداد المان کمینه می‌باشد. همچنین در شکل ۲-۴ شبکه محاسباتی مورد نظر به تصویر کشیده شده است که در آن می‌توان تراکم المان‌های محاسباتی در اطراف ذره را مشاهده نمود. بر اساس معیار کیفیت اسکیننس<sup>۱</sup>، کمترین کیفیت المان‌ها ۰/۵۹ و میانگین کیفیت المان‌ها ۰/۸۹ گزارش می‌شود.

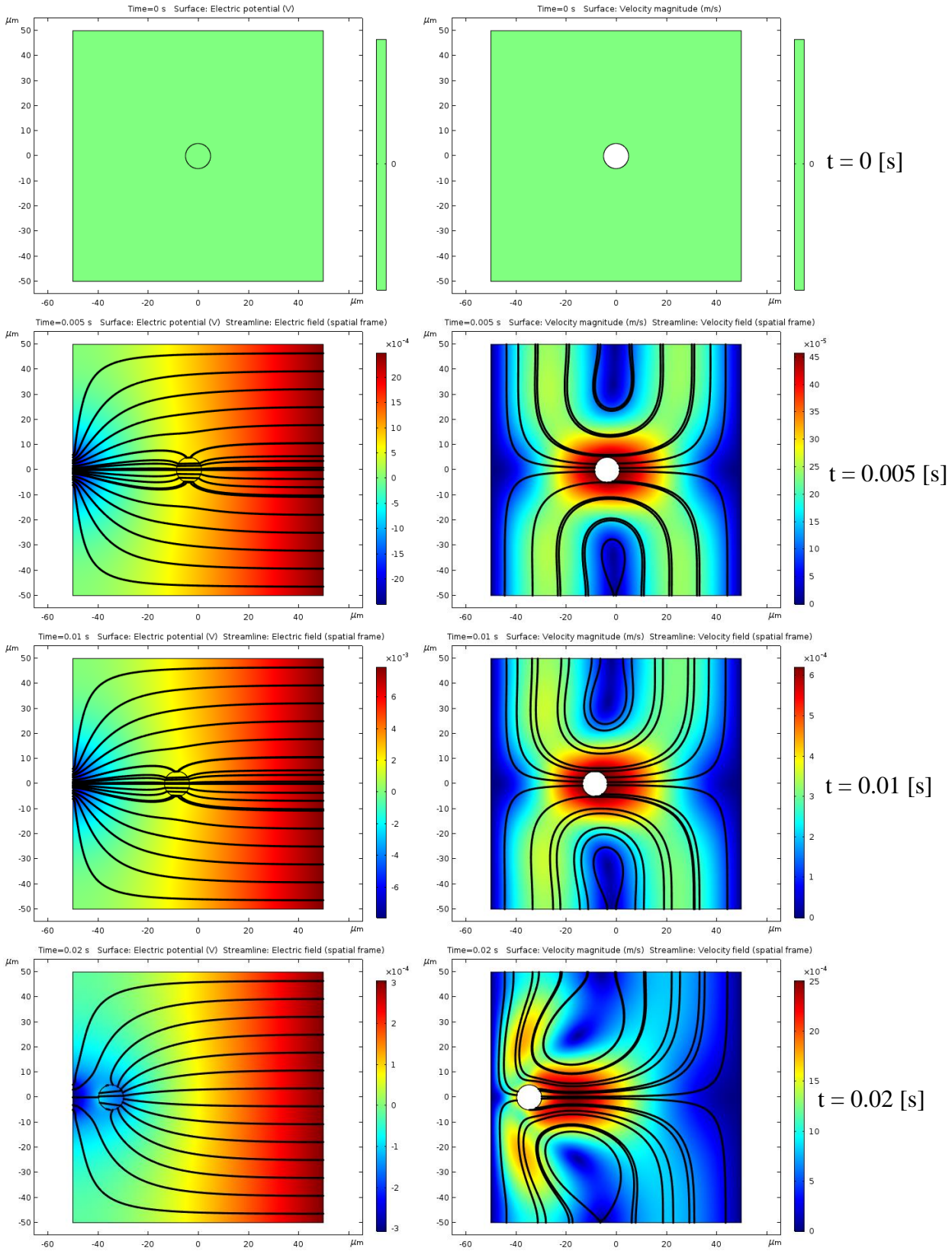
#### ۴-۱-۴ نتایج

در این بخش به بررسی نتایج حاصل از حرکت دی‌الکتروفورتیک تک ذره در میدان الکتریکی غیریکنواخت می‌پردازیم. همان‌طور که بیان شد، یکی از روش‌های ایجاد میدان الکتریکی غیریکنواخت چیدمان نامتقارن الکترودها می‌باشد، از این رو الکترودی کوچک روی ضلع چپ و الکترودی بزرگ روی ضلع راست در نظر می‌گیریم (شکل ۴-۱). با اعمال اختلاف الکتریکی بین الکترودهای چپ و راست، به علت عدم تقارن هندسی در چیدمان الکترودها، تراکمی از خطوط الکتریکی در اطراف الکترودی چپ (مرز AB در شکل ۴-۱) به وجود خواهد آمد که جزئیات مربوط به توزیع پتانسیل الکتریکی و پراکندگی خطوط میدان الکتریکی متناوب در شکل ۳-۴ قابل مشاهده است.

<sup>۱</sup> Skewness quality measure

(ب)

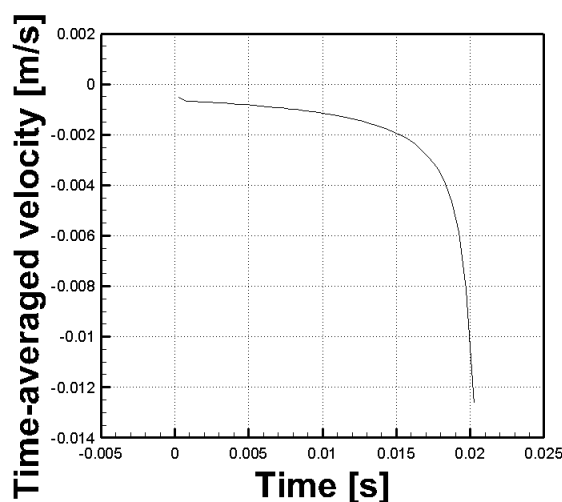
(الف)



شکل ۳-۴ کانتور سرعت و خطوط جریان (الف) در کنار کانتور پتانسیل الکتریکی و خطوط میدان الکتریکی متناوب (ب) مربوط به حرکت دی الکتروفوریتیک متناوب با فرکانس ۱۰۰۰ هرتز و ضخامت ۱۰۰ میکرون

این تراکم خطوط الکتریکی در ذراتی که قابلیت رسانایی الکتریکی آنها بیشتر از سیال می باشد، باعث القای نیروی کششی می شود و در نتیجه ذره به سمت ناحیه پرتراکم میدان الکتریکی جذب خواهد شد که به این نیروی کششی، نیروی دی الکتروفورسیس مثبت می گویند. با توجه به شکل ۴-۴، نیروی دی الکتروفورسیس اعمالی باعث حرکت شتاب دار ذره می شود و با نزدیک شدن ذره به ناحیه پرتراکم میدان الکتریکی (افزایش نیروی دی الکتروفورسیس)، اندازه سرعت ذره نیز افزایش می یابد.

با توجه به توضیحات بخش ۲-۲-۳، در محاسبه نیروی دی الکتروفورسیس پارامترهایی نظیر اندازه میدان الکتریکی و اندازه ذره تأثیرگذار می باشد و با توجه به پیشینه تحقیق انجام شده، تأثیر ضخامت در محاسبه نیروی دی الکتروفورسیس در کارهای پیشین لحاظ نشده است. بنا بر عدم مطالعه کامل پارامترهای مؤثر، در تحقیق حاضر به توسعه مدل عددی به منظور مطالعه ضخامت (بعد سوم) پرداختیم. در ادامه به بیان تأثیر تراکم خطوط میدان الکتریکی متناوب، ضخامت و فرکانس میدان الکتریکی متناوب در مقدار نیروی دی الکتروفورسیس می پردازیم.



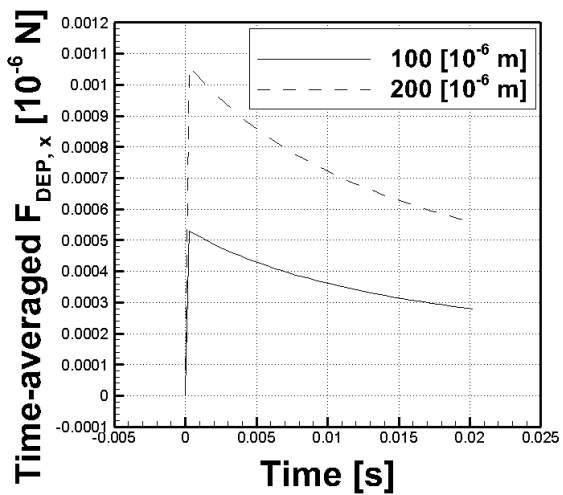
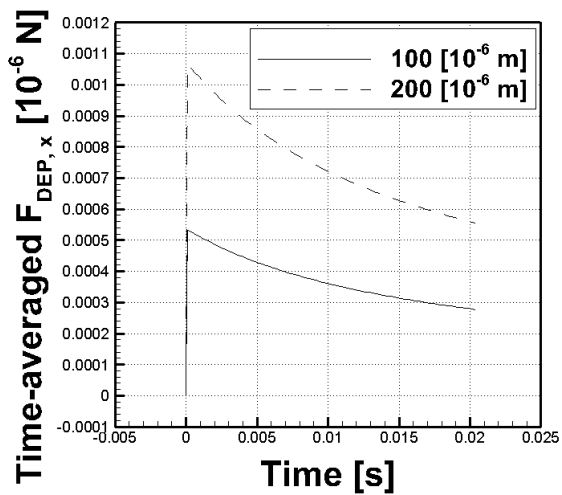
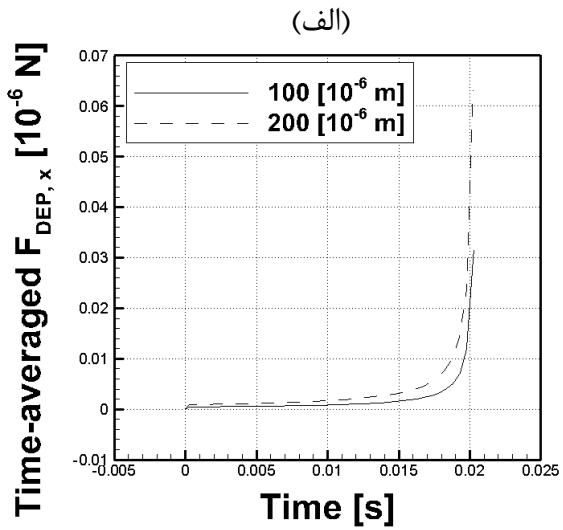
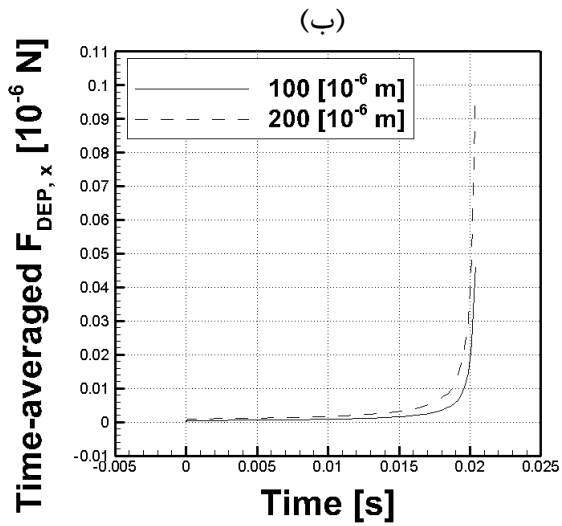
شکل ۴-۴ متوسط زمانی سرعت ذره در میدان الکتریکی متناوب به ازای ضخامت ۱۰۰ میکرون و فرکانس ۱۰۰۰ هرتز

در شکل ۴-۵ تغییرات نیروی دی الکتروفورسیس متناوب در برابر زمان رسم شده است که با در نظر گرفتن موقعیت ذره در شکل ۴-۳، درمی یابیم که تراکم خطوط الکتریکی در اندازه نیروی

دی‌الکتروفورسیس، همانند آنچه که در مطالعات پیشین بیان شده است، تأثیر چشم‌گیری دارد. هرچه ناحیه از نظر خطوط الکتریکی متراکم‌تر باشد، اندازه نیروی دی‌الکتروفورسیس متناوب نیز بیشتر خواهد شد. اندازه نیروی دی‌الکتروفورسیس به ازای ضخامت ۱۰۰ میکرون و فرکانس ۱۰۰۰ هرتز، در ناحیه متراکم میدان الکتریکی ۰/۰۳۲ میکرونیوتن محاسبه شده است.

در شکل ۴-۵ تغییرات نیروی دی‌الکتروفورسیس، مثبت و منفی، در برابر زمان در ضخامت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرون و میدان‌های الکتریکی متفاوت، فرکانس‌های ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ هرتز، ترسیم شده است. با توجه به این شکل درمی‌یابیم که ضخامت یا بعد سوم، دیگر پارامتر مؤثر در اندازه نیروی دی‌الکتروفورسیس می‌باشد. به‌طوری‌که در هر فرکانس، با افزایش ضخامت نیروی دی‌الکتروفورسیس نیز افزایش یافته است. برای مثال در فرکانس ۲۰۰۰ هرتز، بیشینه این نیرو در ضخامت ۱۰۰ میکرون در حدود ۰/۰۴۵ میکرونیوتن و در ضخامت ۲۰۰ میکرون حدوداً ۰/۰۹ میکرونیوتن می‌باشد، درحالی‌که، در مقاله ای و همکاران اندازه این نیرو به ازای طول واحد (۱ متر)، حدود ۲۷۵ میکرونیوتن گزارش شده است. بنابراین ادعا بیان شده مبنی بر تأثیرگذاری ضخامت بر مقدار نیروی دی‌الکتروفورسیس اثبات می‌شود.

فرکانس میدان الکتریکی متناوب، دیگر پارامتر بررسی شده در این پایان‌نامه می‌باشد. آنچه از شکل ۴-۵ درمی‌یابیم این است که با افزایش فرکانس میدان الکتریکی، اندازه نیروی دی‌الکتروفورسیس نیز افزایش می‌یابد. برای نمونه، در ضخامت ۱۰۰ میکرون مقدار محاسبه شده نیروی دی‌الکتروفورسیس به ازای فرکانس ۱۰۰۰ هرتز، ۰/۰۳ میکرونیوتن و به ازای فرکانس ۲۰۰۰ هرتز، ۰/۰۴۵ میکرونیوتن می‌باشد. اختلاف این دو مقدار ۰/۰۱۵ میکرونیوتن است، درحالی‌که در ضخامت ۲۰۰ میکرون، این اختلاف ۰/۰۳ میکرونیوتن محاسبه می‌شود که دو برابر اختلاف در ضخامت ۱۰۰ میکرون می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اختلاف نیروی دی‌الکتروفورسیس در فرکانس‌های متفاوت، وابسته به ضخامت نیز می‌باشد.



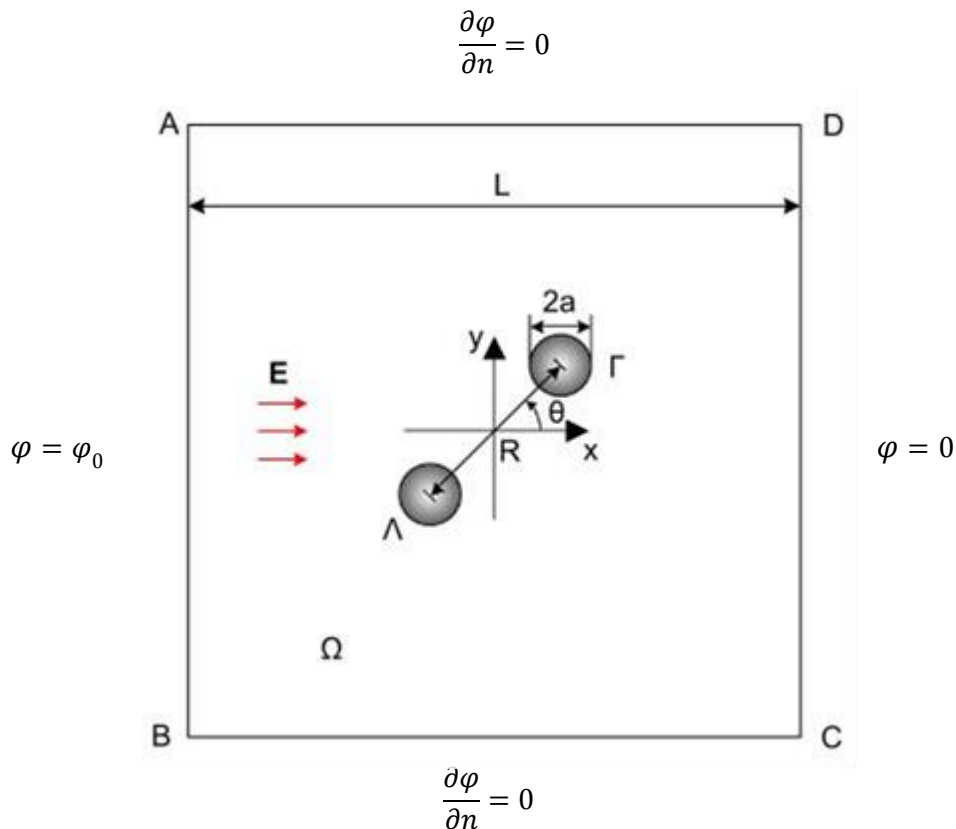
شکل ۴-۵ متوسط زمانی نیروی دی‌الکتروفورسیس در میدان الکتریکی متناوب به‌ازای فرکانس ۱۰۰۰ (الف) و ۲۰۰۰ هرتز (ب)، قابلیت رسانایی الکتریکی ذره ۰/۲ (ج) و ۰/۰۰۰۴ زیمنس بر متر (د)



## ۲-۴ دی‌الکتروفورسیس ثابت

### ۱-۲-۴ بیان مسئله

به منظور بررسی حرکت دی‌الکتروفورسیس ثابت از هندسه ای و قیام [۳۸] که شامل دو ذره صلب ( $\Lambda$  و  $\Gamma$ ) درون محدوده‌ای از سیال ( $\Omega$ ) می‌باشد، استفاده شده است (شکل ۶-۴). در این هندسه  $L$  اندازه محدوده سیال،  $a$  شعاع ذره،  $R$  فاصله بین مراکز دو ذره و  $\theta$  زاویه بین خط واصل مراکز دو ذره با راستای افق می‌باشد. در دی‌الکتروفورسیس ثابت، فاصله مرکز تا مرکز ذرات ۲۵ میکرون در نظر گرفته شده است و مرکز مختصات در وسط خط واصل مراکز دو ذره که شامل مرکز مربع نیز می‌باشد، انتخاب شده است (شکل ۴-۶). اندازه ذرات و محدوده سیال همانند دی‌الکتروفورسیس متناوب، به ترتیب ۵ و ۱۰۰ میکرون در دو ضخامت ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرون در نظر گرفته شده است. در این بررسی، زاویه خط واصل نسبت به راستای مثبت افق در زوایای صفر، ۳۰ و ۶۰ درجه مطالعه شده است. همچنین تمامی



شکل ۶-۴ شماتیک هندسی بررسی نیروی دی‌الکتروفورسیس در میدان الکتریکی ثابت [۳۸]

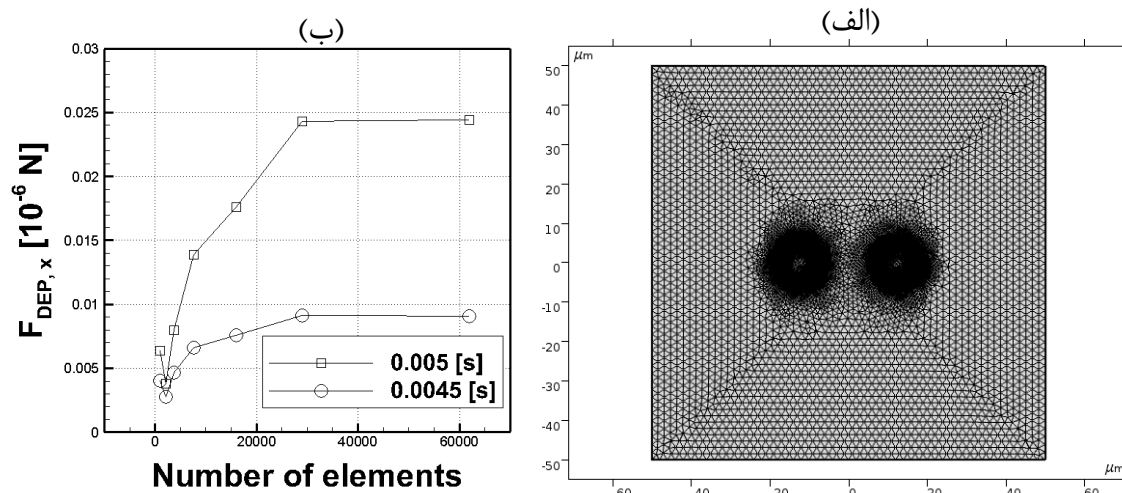
خواص الکتریکی و هیدرودینامیکی ذرات و سیال همانند بخش ۴-۱ انتخاب شده است. به منظور بررسی تقابل دی‌الکتروفورسیس بین ذرات، یک میدان الکتریکی ثابت در راستای محور افقی ایجاد شده است. در این بخش از روش دیگر تولید میدان الکتریکی غیریکنواخت استفاده شده است، یعنی تغییر محلی میدان الکتریکی با حضور ذرات در فواصل کم. تمامی فرضیات بخش ۴-۱ نیز در این بخش صادق می‌باشد، مانند عدم نظر گرفتن الکتروفورسیس، الکتروازموتیک و لایه الکتریکی دوگانه.

#### ۴-۲-۲ شرایط مرزی

برای اعمال میدان الکتریکی ثابت، یک الکتروود با پتانسیل ۲۰ ولت روی ضلع  $AB$  قرار می‌دهیم و ضلع  $CD$  را متصل به زمین در نظر می‌گیریم. سایر مرزهای خارجی سیال عایق و در فصل مشترک بین سیال و جامد پتانسیل الکتریکی و مؤلفه عمودی جابجایی الکتریکی به صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شود. مرزهای  $AB$  و  $CD$  دارای شرط عدم لغزش می‌باشند و بر روی مرزهای  $AD$  و  $BC$  شرط جریان عمودی با فشار صفر اعمال شده است. در فصل مشترک بین سیال و جامد، سرعت سیال با توجه به سرعت حرکت ذره صلب محاسبه می‌شود.

#### ۴-۲-۳ استقلال از شبکه

با در نظر گرفتن مسئله بیان شده در بخش ۴-۱-۳ به منظور بررسی نیروی دی‌الکتروفورسیس بین ذرات در میدان الکتریکی ثابت، ضخامت ۱۰۰ میکرون برای بررسی تأثیر تعداد المان محاسباتی بر این نیرو انتخاب شده است. همانند بخش ۴-۱-۳ و با توجه به نمودارهای ترسیم شده در شکل ۴-۷ با افزایش تعداد المان محاسباتی، اندازه نیروی دی‌الکتروفورسیس بین ذرات نیز افزایش یافته است. با توجه به این شکل، تغییرات دو نمودار به ازای تعداد المان‌های ۲۹۰۵۰ و ۶۱۹۲۴ بسیار ناچیز است و برای کم نمودن هزینه محاسباتی، تعداد المان ۲۹۰۵۰ انتخاب می‌شود و سایر حالت‌ها نیز با همین تعداد المان بررسی می‌شوند. در شکل ۴-۷ شبکه محاسباتی با تعداد المان ۲۹۰۵۰ نمایش داده شده است که بر اساس معیار کیفیت اسکینوس کمترین کیفیت المان‌ها ۰/۵۴ و میانگین کیفیت المان‌ها



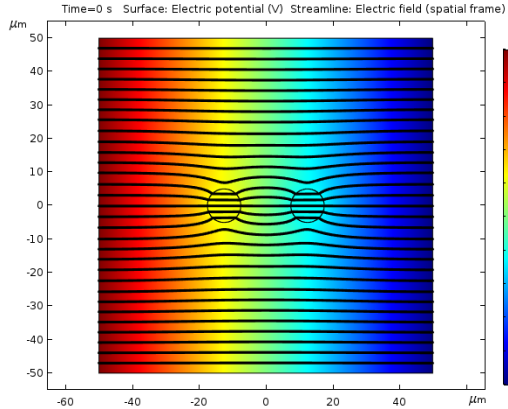
شکل ۴-۷ شبکه محاسباتی با تعداد المان ۲۹۰۵۰ (الف) و استقلال از شبکه مربوط به اندازه نیروی دی‌الکتروفورسیس بین ذرات (ب) در میدان الکتریکی ثابت

۰/۸۷۸ می‌باشد و اساس بررسی حرکت دی‌الکتروفورتیک ذرات در میدان الکتریکی ثابت قرار می‌گیرد.

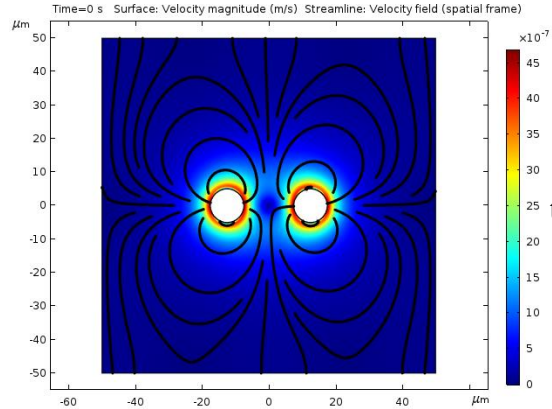
#### ۴-۲-۴ نتایج

در این بخش به بررسی نتایج حاصل از حرکت ذره تحت تأثیر نیروی دی‌الکتروفورسیس در میدان الکتریکی ثابت می‌پردازیم. حضور ذرات در میدان الکتریکی یکنواخت، روشی دیگر به‌منظور غیریکنواخت ساختن میدان الکتریکی می‌باشد. از این‌رو، دو ذره با اندازه یکسان در یک میدان الکتریکی ثابت، میدان یکنواخت، قرار می‌دهیم. همانند حرکت دی‌الکتروفورتیک متناوب ذره (بخش ۴-۱)، انتظار می‌رود در حرکت دی‌الکتروفورتیک ثابت نیز ذرات به سمت ناحیه متراکم میدان الکتریکی حرکت نمایند، چراکه میدان الکتریکی ثابت نیز حالتی از میدان الکتریکی متناوب می‌باشد که در آن فرکانس صفر شده است [۴۱]. در شکل ۴-۸ نحوه حرکت ذرات در سیال به همراه توزیع پتانسیل الکتریکی در زمان‌های صفر، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۲ ثانیه و در شکل ۴-۹ در زمان‌های ۰/۰۰۳، ۰/۰۰۴ و ۰/۰۰۵ ثانیه ترسیم شده است. با توجه به این دو شکل، میدان الکتریکی یکنواخت در اطراف ذرات دچار تغییر و به‌صورت محلی به یک میدان الکتریکی غیریکنواخت تبدیل شده است. بنابراین، بر هریک از ذرات نیروی دی‌الکتروفورسیس با اندازه یکسان ولی در خلاف جهت یکدیگر وارد می‌شود.

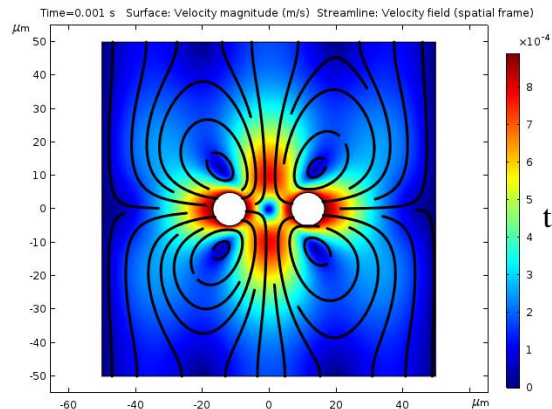
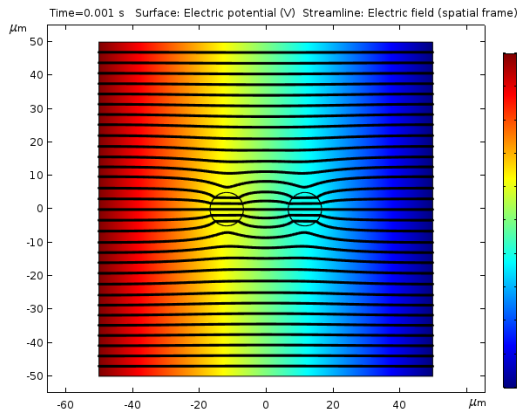
(ب)



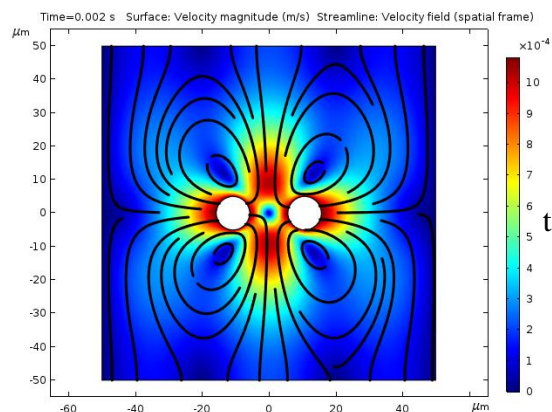
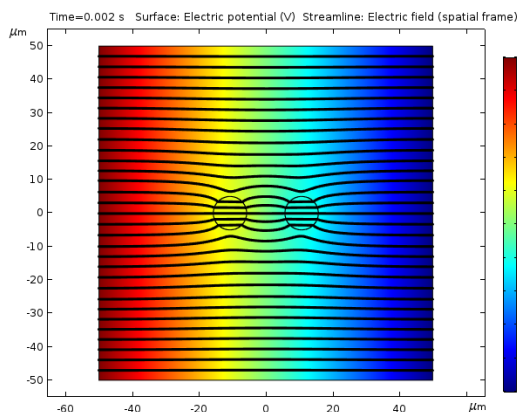
(الف)



$t = 0$  [s]

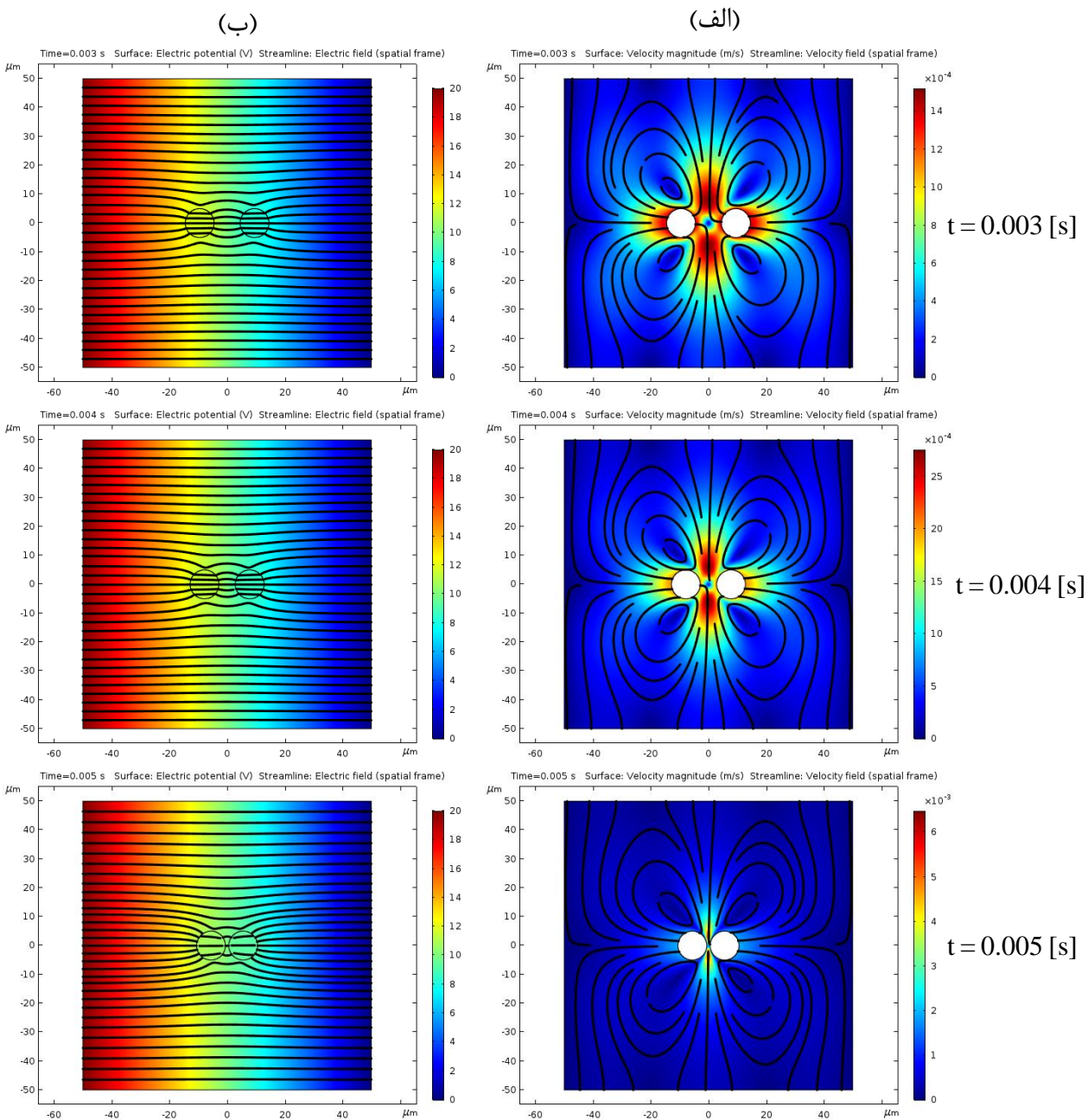


$t = 0.001$  [s]



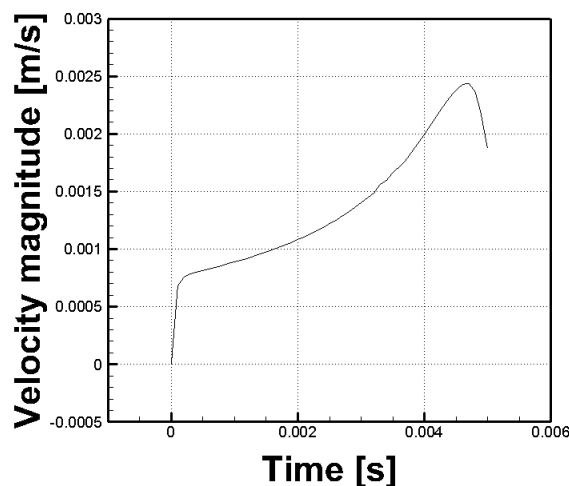
$t = 0.002$  [s]

شکل ۴-۸ کانتور سرعت و خطوط جریان (الف) در کنار کانتور پتانسیل الکتریکی و خطوط میدان الکتریکی ثابت (ب) مربوط به حرکت دی‌الکتروفوریتیک ثابت با زاویه صفر درجه و ضخامت ۱۰۰ میکرون



شکل ۴-۹ کانتور سرعت و خطوط جریان (الف) در کنار کانتور پتانسیل الکتریکی و خطوط میدان الکتریکی ثابت (ب) مربوط به حرکت دی‌الکتروفور تیک ثابت با زاویه صفر درجه و ضخامت ۱۰۰ میکرون

در نتیجه اعمال نیروی متقابل دی‌الکتروفورسیس بین ذرات، ذرات شروع به جذب یکدیگر می‌نمایند. در شکل ۴-۱۰، تغییرات سرعت ذره به ازای ضخامت ۱۰۰ میکرون و زاویه صفر درجه خط واصل مراکز دو ذره در برابر زمان نشان داده شده است. با توجه به این شکل، در لحظات اولیه اعمال نیروی دی‌الکتروفورسیس، حرکت ذره با شتاب زیادی همراه است، ولی در ادامه به علت پدیدار شدن نیروی مخالف هیدرودینامیکی، از شتاب ذره کاسته می‌شود. با وجود نیروی مخالف هیدرودینامیکی، سرعت ذرات همواره به صورت چشم‌گیری در حال افزایش است که علت آن افزایش تراکم خطوط میدان الکتریکی با نزدیک شدن ذرات به یکدیگر می‌باشد (شکل ۴-۸). با توجه به شکل ۴-۹ و نمودار تغییرات سرعت در شکل ۴-۱۰، حرکت شتاب‌دار ذرات (با شتاب مثبت) تا زمان ۰/۰۰۴۵ ثانیه ادامه دارد، ولی پس از این زمان حرکت ذرات با شتاب منفی ادامه خواهد یافت. همان‌طور که در شکل ۴-۹ قابل مشاهده است، فاصله بین ذرات در زمان ۰/۰۰۵ ثانیه بسیار ناچیز است که سبب افزایش نیروی فشاری هیدرودینامیکی می‌شود. این افزایش نیروی فشاری علت حرکت ذرات با شتاب منفی می‌باشد. شایان ذکر است که اندازه سرعت ذره سمت راست (شکل ۴-۶) کاملاً برابر با اندازه سرعت ذره سمت چپ می‌باشد و تفاوت آن‌ها در جهت حرکت ذرات می‌باشد.

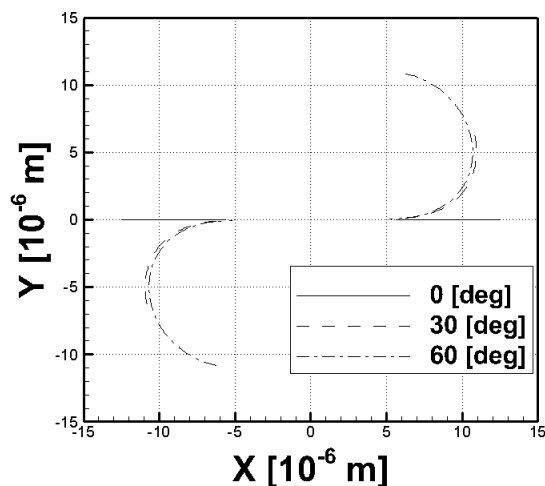


شکل ۴-۱۰ اندازه سرعت ذره سمت چپ با ضخامت ۱۰۰ میکرون و زاویه صفر درجه خط واصل مراکز ذرات

در این بررسی، قابلیت رسانایی الکتریکی ذرات بیشتر از قابلیت رسانایی الکتریکی سیال می‌باشد، به همین دلیل ذرات به سمت ناحیه متراکم میدان الکتریکی جذب می‌شوند. به نیروی جاذب متقابل بین ذرات که بر اثر غیریکنواختی میدان الکتریکی اعمال می‌شود، نیروی متقابل دی‌الکتروفورسیس مثبت گفته شد. با توجه به شکل ۴-۸ و شکل ۴-۹، نیروی جاذب دی‌الکتروفورسیس مثبت تمایل به جذب و تشکیل زنجیره‌ای از ذرات دارد. این نتیجه تنها برای زاویه صفر درجه خط واصل مراکز ذرات صادق نمی‌باشد و بر اساس آنچه که در شکل ۴-۱۱ مشاهده می‌شود، ذرات با موقعیت‌های اولیه متفاوت نیز تمایل به جذب و تشکیل زنجیره را دارند. از این رو، می‌توان نتیجه گرفت که نیروی متقابل دی‌الکتروفورسیس مثبت همواره در جهتی اعمال می‌شود که به تشکیل زنجیره‌ای از ذرات ختم می‌شود و از این قابلیت می‌توان برای کاربردهایی نظیر جداسازی ذرات و انتقال دارو استفاده نمود.

در ابتدا لازم است اشاره نماییم که مقادیر محاسبه شده اندازه نیروی دی‌الکتروفورسیس در شکل ۴-۱۲ برای هر دو ذره صادق می‌باشند، اما جهت اعمال نیرو خلاف یکدیگر است. در ادامه به بررسی تأثیر پارامترهای متفاوت بر نیروی دی‌الکتروفورسیس می‌پردازیم.

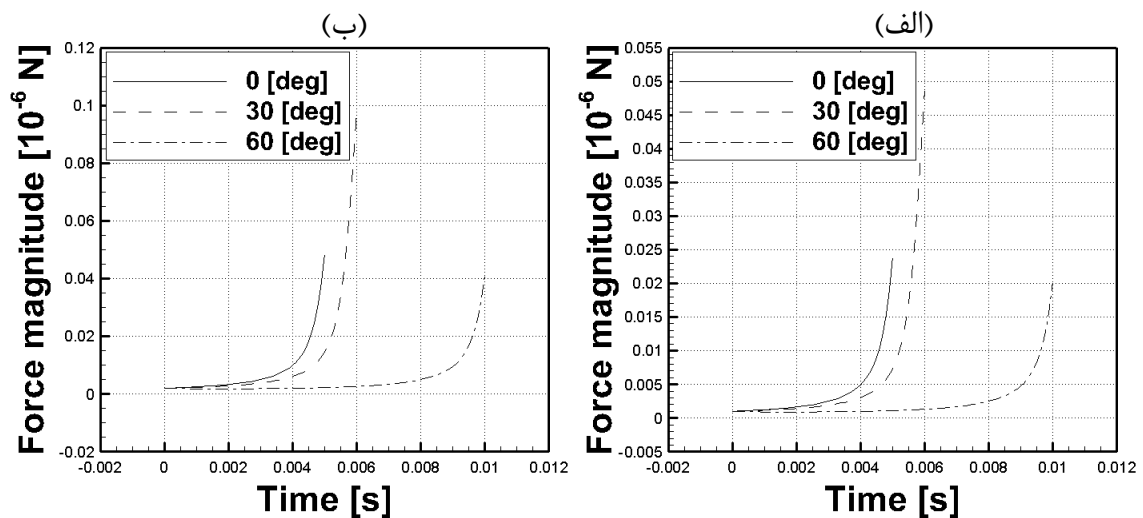
اولین و مهم‌ترین پارامتر، اندازه میدان الکتریکی ثابت می‌باشد که می‌توان برای سادگی از تراکم



شکل ۴-۱۱ موقعیت مکانی مرکز ذرات به‌ازای ضخامت ۱۰۰ میکرون در بررسی حرکت دی‌الکتروفورسیس ذرات

میدان الکتریکی استفاده نمود. شکل ۴-۱۲ بیانگر آن است که در تمامی حالت‌های بررسی شده، با غیریکنواخت‌تر شدن میدان الکتریکی که ناشی از نزدیک شدن ذرات به یکدیگر می‌باشد، اندازه نیروی دی‌الکتروفورسیس به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. برای نمونه، اندازه نیروی دی‌الکتروفورسیس در زمان رسیدن دو ذره به یکدیگر، به ازای ضخامت ۱۰۰ میکرون با زاویه صفر درجه خط واصل مراکز، به مقدار ۰/۰۲۴ میکرونیوتن می‌رسد، این در حالی است که مقدار این نیرو در لحظه شروع حرکت ۰/۰۰۱ میکرونیوتن می‌باشد.

پارامتر مؤثر دیگر، همانند بررسی نیروی دی‌الکتروفورسیس در میدان الکتریکی متناوب (۴-۱)، ضخامت می‌باشد. با توجه به شکل ۴-۱۲ و با مقایسه مقادیر دو نمودار به‌راحتی می‌توان فهمید که با افزایش ضخامت، همانند بخش ۴-۱-۴، نیروی دی‌الکتروفورسیس نیز افزایش می‌یابد. برای مثال اگر زاویه خط واصل ذرات نسبت به راستای افق ۶۰ درجه باشد، نیروی دی‌الکتروفورسیس محاسبه شده به ازای ضخامت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرون، به ترتیب ۰/۰۲ و ۰/۰۴ میکرونیوتن می‌باشد. با مقایسه سایر مقادیر در شکل ۴-۱۲، می‌توان نتیجه گرفت که با دو برابر شدن ضخامت، نیروی دی‌الکتروفورسیس نیز دو برابر خواهد شد. این بدان معناست که بین ضخامت و نیروی دی‌الکتروفورسیس یک رابطه خطی برقرار می‌باشد.



شکل ۴-۱۲ اندازه نیروی دی‌الکتروفورسیس به ازای ضخامت ۱۰۰ (الف) و ۲۰۰ میکرون (ب)



دیگر پارامتر مؤثر در مقدار نیروی دی‌الکتروفورسیس موقعیت مکانی ذرات می‌باشد، چراکه در شکل ۴-۱۲ با تغییر موقعیت اولیه ذرات، نیروی دی‌الکتروفورسیس نیز تغییر یافته است، اما این تغییر از روند مشخصی پیروی نمی‌نماید.



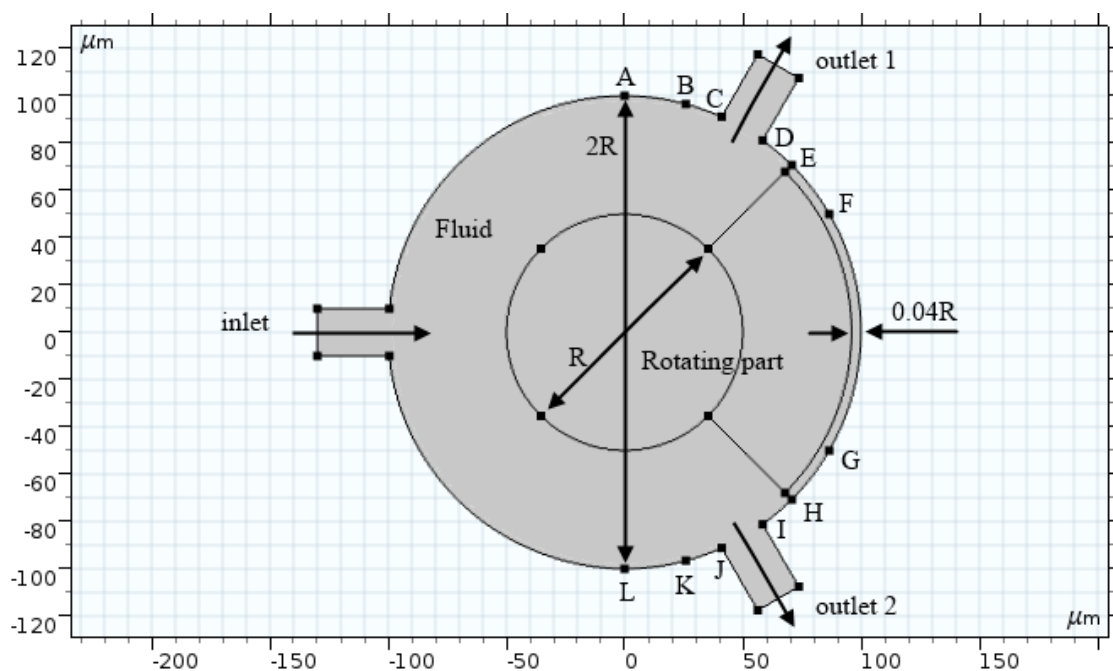
۵ میکروولو

## ۱-۵ بیان مسئله

در این فصل با توجه به درک حاصل از حرکت ذرات در فصل ۴، اقدام به طراحی یک میکروولو می‌نماییم که با استفاده از نیروی دی‌الکتروفورسیس قابل کنترل می‌باشد و در شکل ۱-۵ هندسه میکروولو نمایش داده شده است. این میکروولو از یک مخزن حاوی سیال و قسمت متحرک برای انسداد کانال‌های خروجی تشکیل شده است.

مخزن حاوی سیال دایره‌ای به شعاع  $100$  میکرون می‌باشد که سه کانال با سطح مقطع مستطیل شکل به آن متصل شده‌اند. کانال‌ها به صورت متقارن با زاویه  $120$  درجه نسبت به یکدیگر قرار گرفته‌اند. ضخامت کل میکروولو  $200$  میکرون و عرض کانال‌ها  $20$  میکرون در نظر گرفته شده است که قطر هیدرولیکی هر کانال تقریباً  $36$  میکرون محاسبه می‌شود. طول کانال به اندازه کافی بزرگ است (حدود  $40$  میکرون) تا پروفیل سرعت توسعه یافته شود.

قسمت متحرک این میکروولو از دایره‌ای به شعاع  $50$  میکرون و ربع دایره‌ای به شعاع  $96$  میکرون تشکیل شده است که مرکز آن‌ها با مرکز مخزن دایره‌ای شکل منطبق می‌باشد. این نقطه انطباق به‌عنوان



شکل ۱-۵ شماتیک هندسه میکروولو

مرکز مختصات انتخاب شده است. موقعیت مکانی الکترودها در جدول زیر آورده شده است.

جدول ۱-۵ موقعیت مکانی الکترودها در میکروولو

نقاط	زاویه (درجه)	نقاط	زاویه (درجه)
A	+۹۰	L	-۹۰
B	+۷۵	K	-۷۵
E	+۴۵	H	-۴۵
F	+۳۰	G	-۳۰

خواص هیدرودینامیکی سیال شامل چگالی و ویسکوزیته می‌باشد که به ترتیب ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۰/۰۰۱ پاسکال ثانیه در نظر گرفته شده است و خواص الکتریکی آن شامل قابلیت رسانایی الکتریکی و ثابت دی‌الکتریک نسبی است که به ترتیب ۰/۰۲ زیمنس بر متر و ۸۰ قرار داده شده است. تنها خاصیت هیدرودینامیکی قسمت متحرک چگالی است که برابر ۱۰۵۵ کیلوگرم بر مترمکعب اختیار شده است. قابلیت رسانایی الکتریکی و ثابت دی‌الکتریک نسبی این قسمت به ترتیب ۰/۲ زیمنس بر متر و ۲/۶ در نظر گرفته شده است.

## ۲-۵ شرایط مرزی

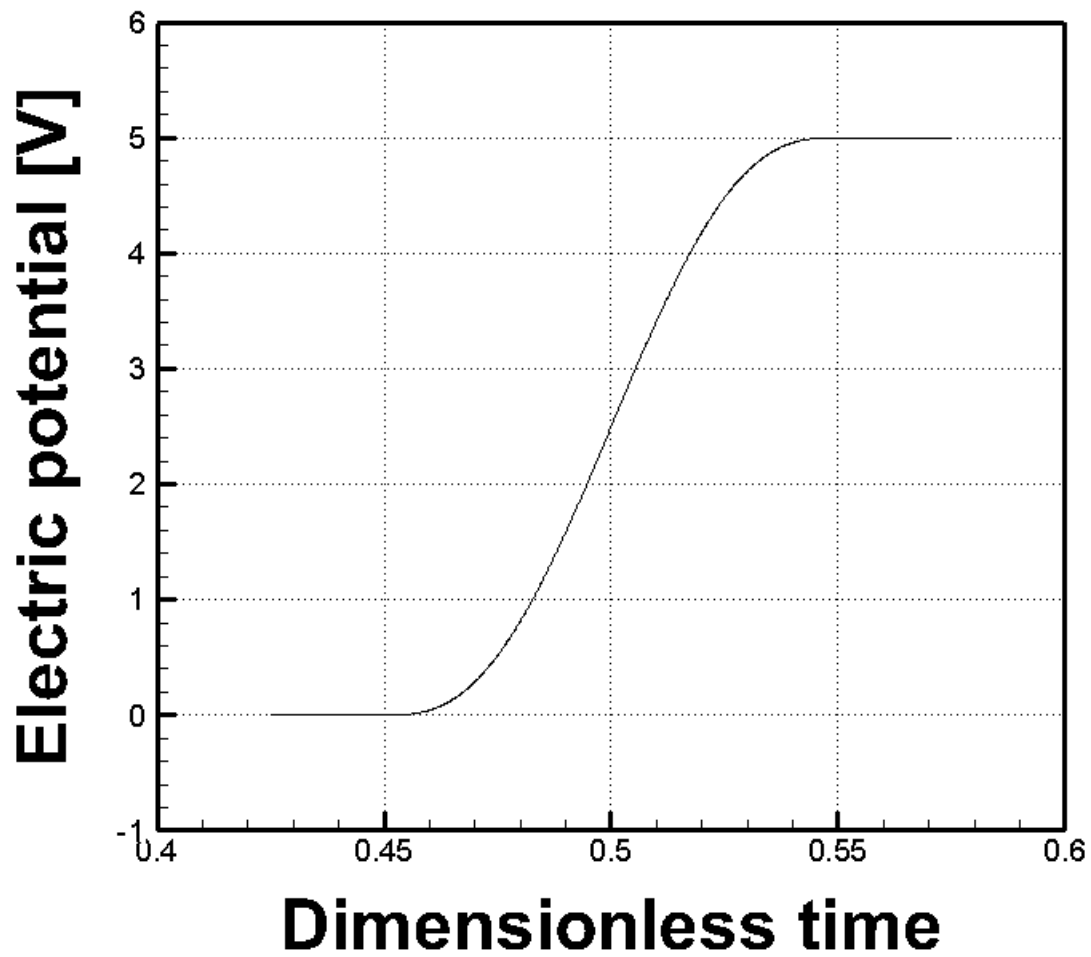
در کانال ورودی، سیال با سرعت یکنواخت که از رابطه رینولدز محاسبه شده است، وارد میکروولو می‌شود. در کانال‌های خروجی شرط فشار نسبی صفر برقرار می‌باشد و سایر مرزهای خارجی سیال دارای شرط عدم لغزش می‌باشند. در فصل مشترک بین سیال و قسمت متحرک رابطه بیان شده در بخش ۲-۳ حاکم است.

نیروهای وارد بر قسمت متحرک شامل نیروی هیدرودینامیکی سیال و نیروی دی‌الکتروفورسیس می‌باشند که در بخش ۲-۲-۳ تشریح شده است. جابجایی قسمت متحرک در راستاهای افقی و عمودی سلب شده است و تنها قابلیت چرخش حول مرکز مختصات را دارا می‌باشد (در واقع قسمت متحرک به مرکز مختصات پین<sup>۱</sup> شده است).

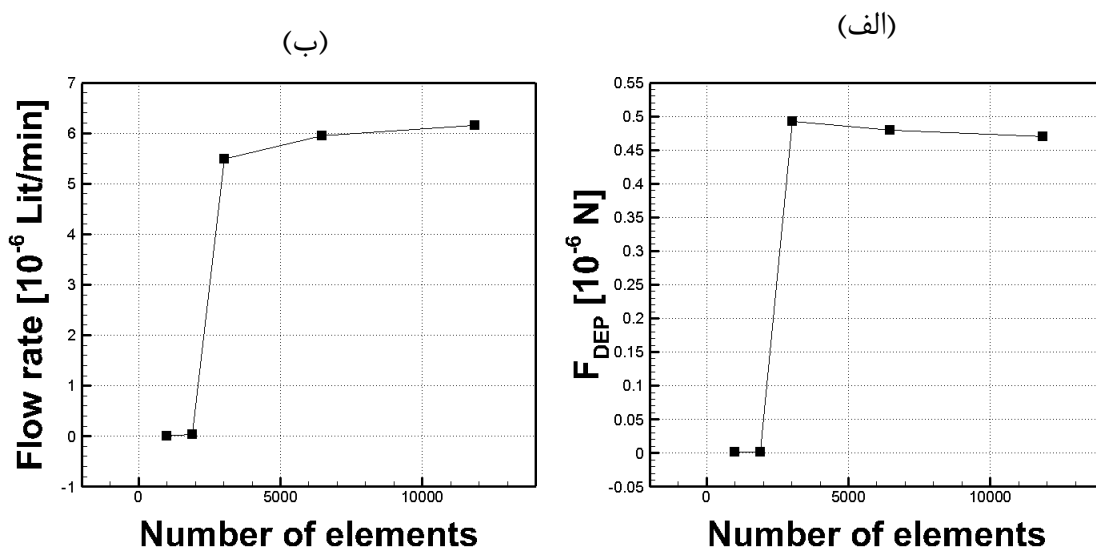
با توجه به شکل ۵-۱، برای تولید میدان الکتریکی ثابت، مرزهای  $AB$ ،  $EF$ ،  $GH$  و  $KL$  دارای پتانسیل ثابت می‌باشند که مقادیر ۵، ۱۰ و ۲۰ ولت برای مطالعه عملکرد میکروولو در نظر گرفته شده است. مرزهای  $BC$ ،  $DE$ ،  $HI$  و  $JK$  دارای پتانسیل متغیر می‌باشند، به این صورت که در زمان تعیین شده مقدار پتانسیل آن‌ها به واسطه تابع پله هموار شده تغییر می‌نماید. برای جلوگیری از ایجاد تغییرات ناگهانی از تابع پله هموار شده استفاده می‌شود. برای مثال فرض نمایید که ولتاژ الکترودهای با پتانسیل ثابت، ۵ ولت باشد. ولتاژ الکترودهای با پتانسیل متغیر با توجه به شکل ۵-۳ تغییر می‌نماید. در این شکل زمان براساس کل زمان حل (دو ثانیه) بی‌بعد شده است. در نهایت، در فصل مشترک بین سیال و جامد پتانسیل الکتریکی و مؤلفه عمودی جابجایی الکتریکی به صورت پیوسته در نظر گرفته شده است.

---

<sup>۱</sup> Pin



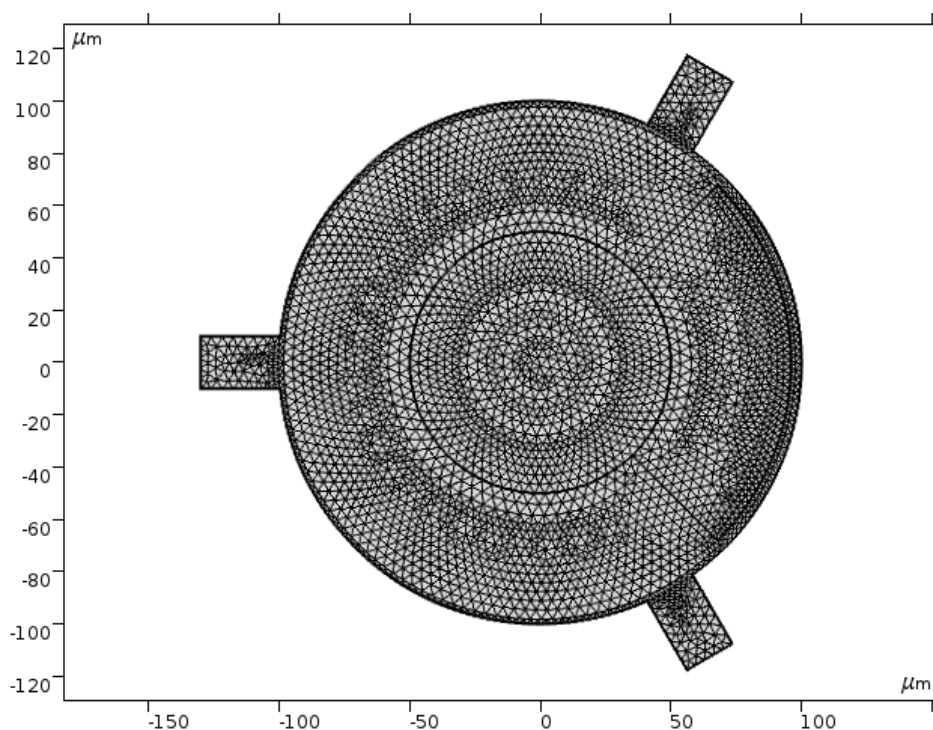
شکل ۳-۵ نمونه‌ای از الگو اعمال ولتاژ در برابر زمان بی‌بعد با استفاده از تابع پله هموار شده



شکل ۲-۵ استقلال از شبکه محاسباتی نیروی دی‌الکتروفورسیس (الف) و دبی سیال عبوری از کانال خروجی شماره ۱ (ب) مربوط به میکروولو

### ۳-۵ استقلال از شبکه

در این بخش ابتدا به بررسی تغییرات برخی از پارامترهای میکروولو در برابر تعداد المان‌های شبکه محاسباتی می‌پردازیم که اساس کار برای تحلیل سایر پارامترهای مؤثر می‌باشد. بدین منظور تغییرات نیروی دی‌الکتروفورسیس وارد بر ربع دایره و دبی سیال عبوری از کانال خروجی شماره ۱ در برابر تعداد المان‌های شبکه محاسباتی در شکل ۲-۵ ترسیم شده است. با توجه به دو نمودار، تغییرات پارامترهای مطرح‌شده به ازای تعداد المان ۶۴۶۹ کمینه می‌باشد و مبنای بررسی سایر پارامترها در تحلیل عملکرد میکروولو قرار می‌گیرد. در شکل ۴-۵ شبکه محاسباتی با تعداد المان ۶۴۶۹ ترسیم شده است که بر اساس معیار کیفیت اسکینوس کمترین کیفیت المان‌ها ۰/۵۶ و میانگین کیفیت المان‌ها ۰/۸۶۷ می‌باشد.



شکل ۴-۵ شبکه محاسباتی با تعداد المان ۶۴۶۹ در بررسی عملکرد میکروولو

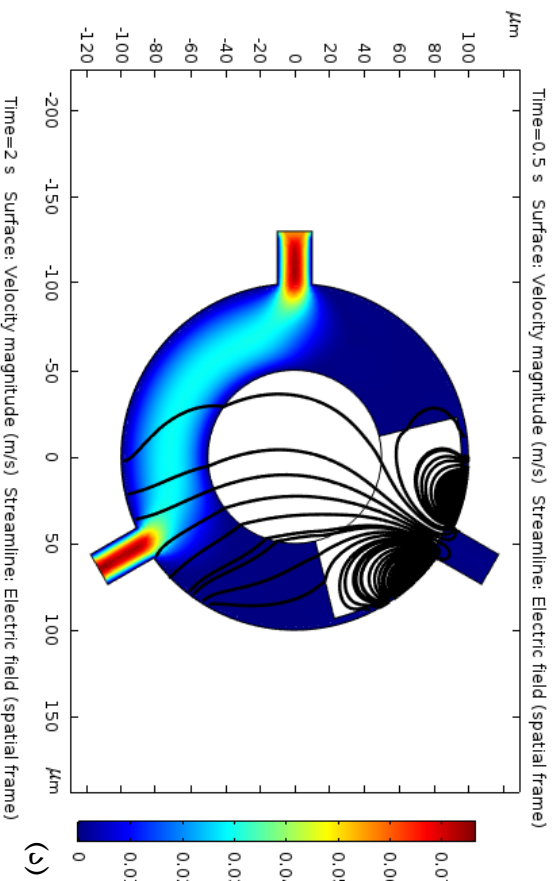


## ۴-۵ نتایج

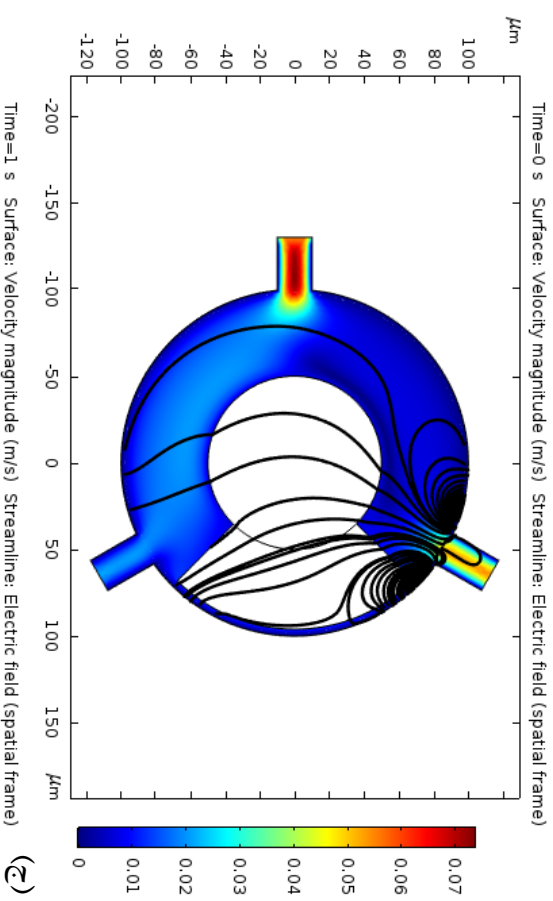
با توجه به بررسی انجام شده در بخش‌های ۴-۱-۴ و ۴-۲-۴، تراکم یا اندازه میدان الکتریکی مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار در پدیده دی‌الکتروفورسیس می‌باشد. همچنین مشاهده شد که ذره در دی‌الکتروفورسیس مثبت همواره به سمت ناحیه متراکم میدان الکتریکی حرکت می‌نماید. با توجه به این نکته، به منظور انسداد کانال‌های خروجی، در اطراف این کانال‌ها تراکمی از میدان الکتریکی ایجاد نمودیم تا با حرکت جسم متحرک و قرارگیری آن در مقابل کانال‌های خروجی، باعث بسته شدن این کانال‌ها شویم.

در این قسمت به بیان شیوه کار میکروولو طراحی شده می‌پردازیم. در ابتدای کار، جسم متحرک بین دو کانال خروجی قرار گرفته است (شکل ۵-۵، راست بالا). خوب است اشاره نماییم که در این میکروولو، قرارگیری اولیه جسم متحرک حائز اهمیت نمی‌باشد ولی به منظور کم نمودن زمان، پیشنهاد می‌شود جسم متحرک در لحظه اولیه بین دو کانال خروجی قرار گیرد. همان‌طور که بیان شد، الکترودهای واقع بر مرزهای  $AB$ ،  $EF$ ،  $GH$  و  $KL$  (شکل ۵-۱) در کل زمان بررسی میکروولو پتانسیل الکتریکی ثابت دارند که مقادیر ۵، ۱۰ و ۲۰ ولت در تحقیق حاضر بررسی شدند، اما سایر الکترودها با توجه به زمان تغییر می‌نمایند. در لحظه اول، الکترودهای قرار گرفته شده روی مرزهای  $HI$  و  $JK$  دارای پتانسیل الکتریکی مشابه با الکترودهای پتانسیل ثابت می‌باشند، در صورتی که الکترودهای مرزهای  $BC$  و  $DE$  دارای پتانسیل الکتریکی صفر ولت می‌باشند. با این کار، تراکم موردنظر برای انسداد کانال خروجی شماره یک فراهم می‌شود (شکل ۵-۵، بالا). این روند تا یک ثانیه ادامه می‌یابد تا سیال از کانال ورودی وارد و از کانال خروجی شماره دو خارج شود. در ثانیه یکم، مقادیر پتانسیل الکترودهای متغیر به منظور انسداد کانال خروجی شماره دو تغییر می‌نمایند، بدین صورت که پتانسیل الکتریکی الکترودهای واقع بر مرزهای  $BC$  و  $DE$  افزایش می‌یابد تا با پتانسیل الکتریکی الکترودهای ثابت برابر شود. در مقابل، پتانسیل الکتریکی الکترودهای واقع بر مرزهای  $HI$  و  $JK$  کاهش می‌یابد تا به مقدار صفر ولت برسند.

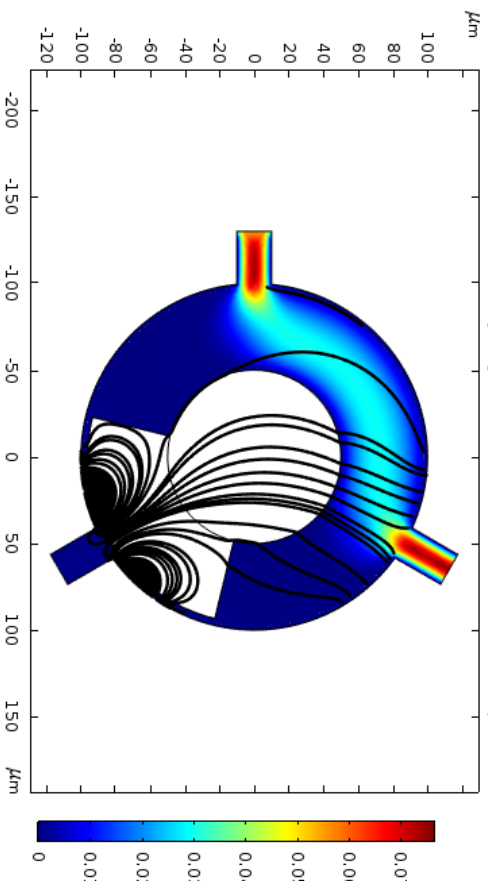
(ب)



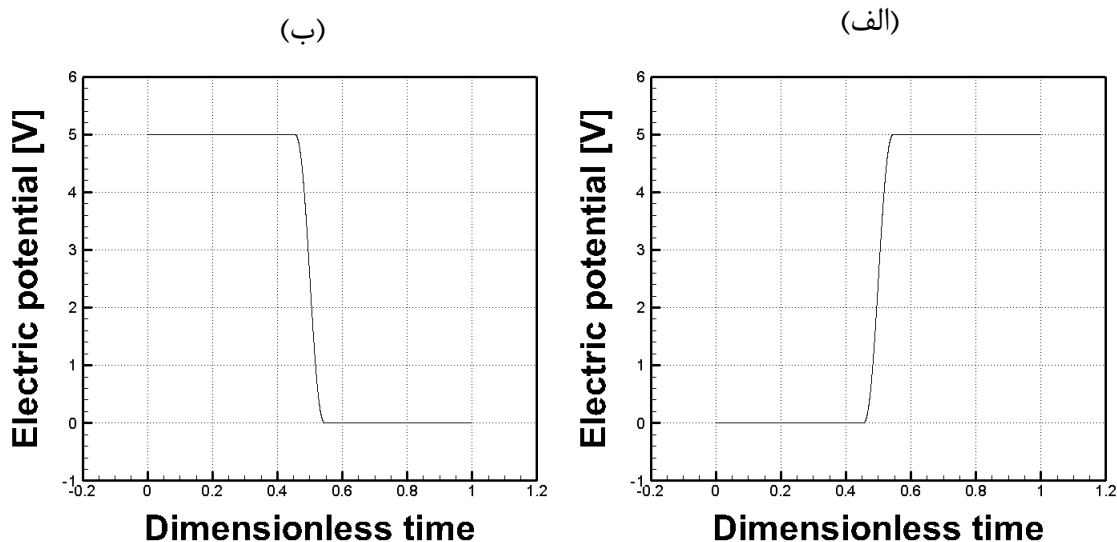
(الف)



(ج)



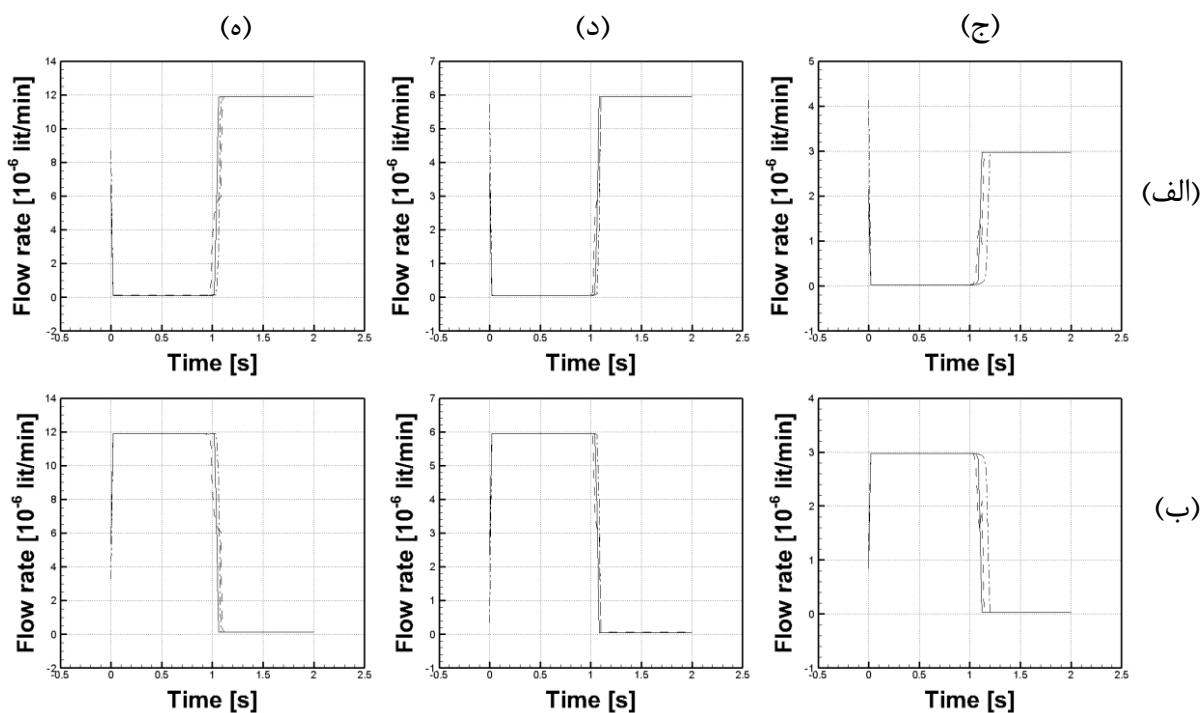
شکل ۵-۵ کانتور سرعت سیال به همراه خطوط میدان الکتریکی در لحظات اولیه (الف)، انسداد کانال خروجی شماره یک (ب)، تغییر وضعیت برای انسداد کانال خروجی شماره دو (ج) و انسداد کانال خروجی شماره دو (د)



شکل ۵-۶ پتانسیل الکتریکی الکترودهای متغیر در اطراف کانال خروجی شماره یک (الف) و کانال خروجی شماره دو (ب) در شکل ۵-۵ نحوه حرکت جسم متحرک درون مخزن میکروولو به ازای عدد رینولدز ۲ و پتانسیل الکتریکی ۲۰ ولت رسم شده است و در شکل ۵-۶ روند تغییر پتانسیل الکتریکی الکترودهای متغیر بر اساس پتانسیل ثابت ۵ ولت ترسیم شده است.

در این قسمت به بررسی عملکرد میکروولو به ازای پارامترهای متفاوت از قبیل عدد رینولدز و پتانسیل الکتریکی می‌پردازیم. در این بررسی اعداد رینولدز مورد مطالعه ۰/۵، ۱ و ۲ در نظر گرفته شده‌اند که بیانگر سرعت ورودی به میکروولو می‌باشند. به علت تقابل بین جسم متحرک و سیال، اندازه پتانسیل الکتریکی، که در اندازه نیروی دی‌الکتروفورسیس نقش دارد، از این نظر دارای اهمیت است که جسم متحرک قادر به حرکت درون باشد و بتواند با قرارگیری در مقابل کانال‌های خروجی وظیفه انسداد کانال‌ها را به‌درستی انجام دهد. بدین منظور، مقادیر ۵، ۱۰ و ۲۰ ولت برای ارزیابی عملکرد میکروولو انتخاب شده‌اند.

در شکل ۵-۷ نمودارهای مربوط به سیال عبوری از کانال‌های خروجی شماره یک و دو نمایش داده شده است که با توجه به این شکل و توضیحات بیان شده، درمی‌یابیم که میکروولو طراحی شده به‌درستی وظیفه خود را انجام داده است. به‌منظور کمی‌سازی عملکرد میکروولو، پارامتری به نام زمان



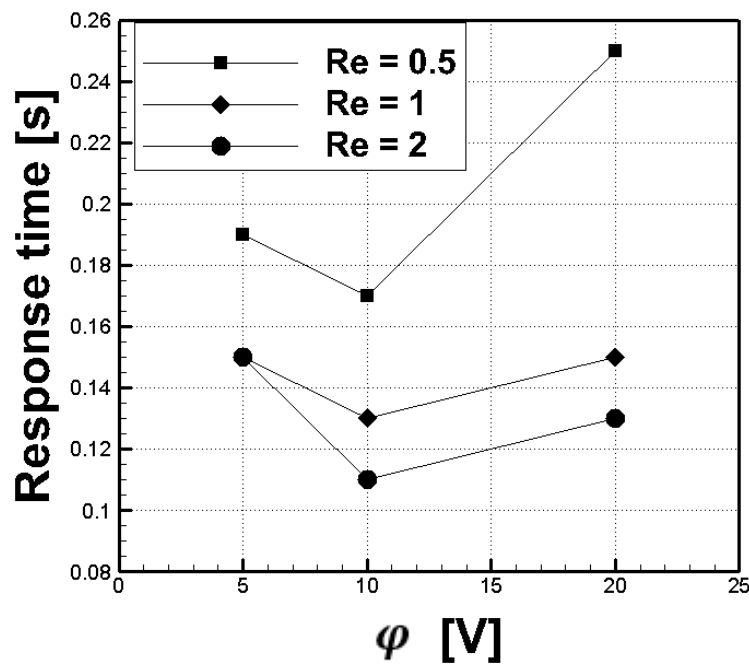
شکل ۷-۵ دبی سیال عبوری از کانال خروجی شماره یک (الف) و شماره دو (ب) به‌ازای اعداد رینولدز ۰/۵ (ج)، ۱ (د) و ۲ (ه) در پتانسیل‌های الکتریکی ۵ (خط چین)، ۱۰ (توپر) و ۲۰ (خط نقطه)

پاسخ تعریف می‌نماییم که نشان‌دهنده مدت‌زمان حرکت جسم متحرک از مقابل کانال خروجی شماره یک تا قرارگیری کامل آن در مقابل کانال خروجی شماره دو می‌باشد. با توجه به شکل ۵-۸، بیشترین زمان پاسخ، ۰/۲۵ ثانیه، متعلق به عدد رینولدز ۰/۵ و پتانسیل الکتریکی ۲۰ ولت می‌باشد.

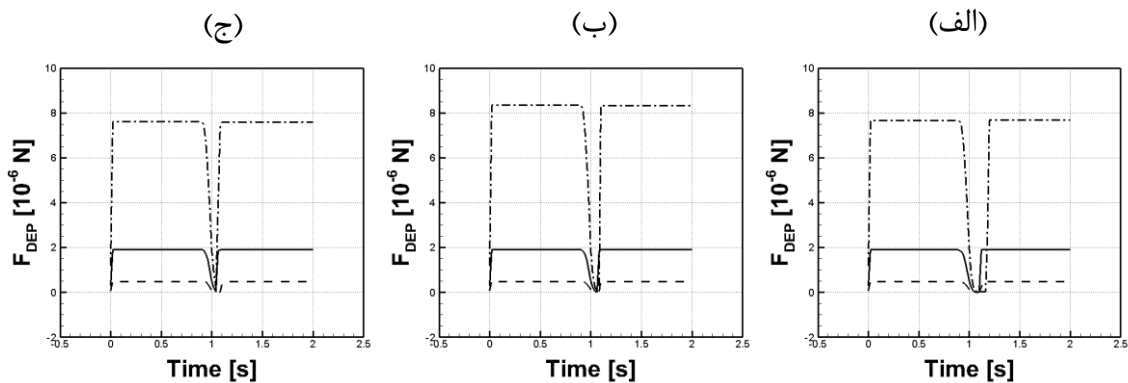
در اینجا بهتر است اشاره نماییم که میزان نشتی سیال به لقی بین ربع دایره و دیواره مخزن سیال وابسته می‌باشد. در این بررسی این میزان ۴ میکرون در نظر گرفته شده است (شکل ۵-۱) که با توجه به نمودارهای موجود در شکل ۷-۵ از نشتی قابل قبولی برخوردار است.

در ادامه این فصل به بررسی عوامل مؤثر بر نیروی دی‌الکتروفورسیس و نحوه تغییرات این نیرو در مراحل مختلف تغییر وضعیت میکروولو می‌پردازیم. در شکل ۵-۹ اندازه نیروی دی‌الکتروفورسیس اعمالی بر ربع دایره از جسم متحرک به نمایش گذاشته شده است. آنچه که در این شکل مشخص است، نیروی دی‌الکتروفورسیس با افزایش پتانسیل الکتریکی افزایش می‌یابد و همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، در تمامی اعداد رینولدز مقادیر نیروی دی‌الکتروفورسیس تغییر قابل‌ملاحظه‌ای ننموده است. در اینجا ذکر

این نکته حائز اهمیت می‌باشد که نیروی دی‌الکتروفورسیس وارد بر عضو دایروی قسمت متحرک، در برابر نیروی اعمالی متناظر بر ربع دایره ناچیز می‌باشد. نکته قابل‌برداشت دیگر از شکل ۵-۹، همانند تفاسیر بیان شده در بخش نتایج مربوط به حرکت دی‌الکتروفورتیک ذرات (فصل ۴)، تأثیر تراکم میدان الکتریکی بر اندازه نیروی دی‌الکتروفورسیس می‌باشد. بیشترین نیروی دی‌الکتروفورسیس زمانی که جسم متحرک در مقابل کانال‌های خروجی قرار گرفته است، اعمال می‌شود و تنها علت این امر توده‌ای از خطوط میدان الکتریکی است که در شکل ۵-۵ قابل مشاهده است.



شکل ۵-۸ زمان پاسخ میکروولو به‌ازای پارامترهای متفاوت



شکل ۵-۹ اندازه نیروی دی‌الکتروفورسیس وارد بر ربع دایره از جسم متحرک میکروولو به‌ازای ۵ (خط چین)، ۱۰ (توپر) و ۲۰ ولت (خط نقطه) در اعداد رینولدز ۰/۵ (الف)، ۱ (ب) و ۲ (ج)



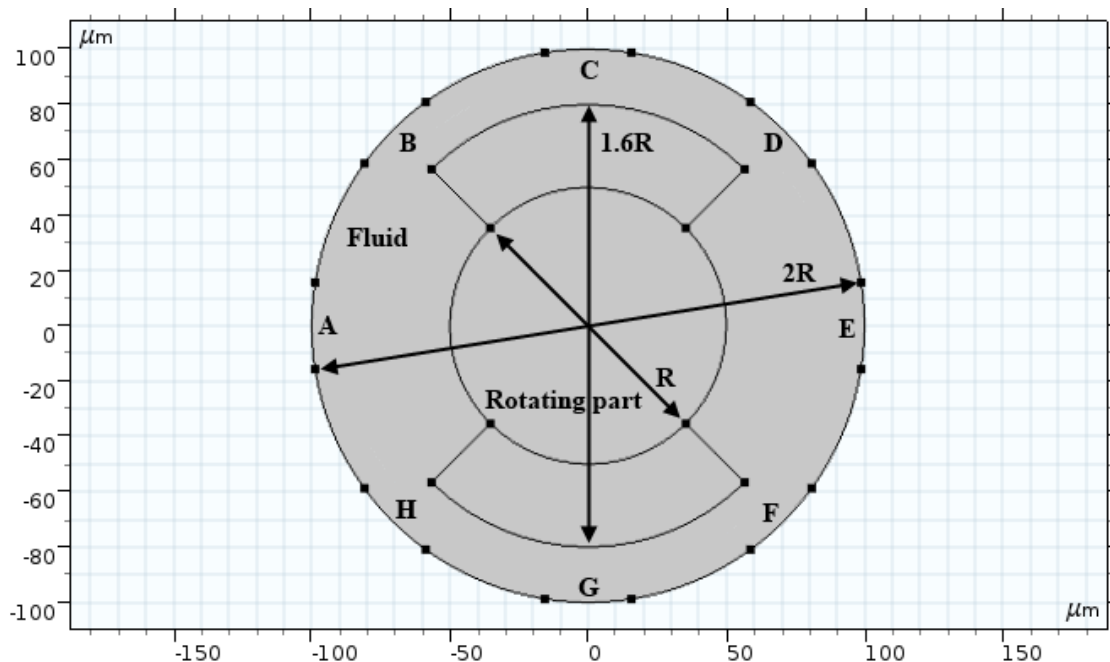
## ۶ میکرومیکسر

## ۱-۶ میکرومیکسر استاتیک

### ۱-۱-۶ بیان مسئله

میکروولو تنها ایده پرورش یافته از تحقیق حاضر نمی باشد، در این فصل به تشریح میکرومیکسر کنترل پذیر با استفاده از نیروی دی الکتروفورسیس در میدان الکتریکی متناوب می پردازیم. علت نام گذاری آن به این دلیل می باشد که درون میکسر جریان ورودی و خروجی سیال وجود ندارد.

همان طور که در شکل ۱-۶ نمایان است، مخزن میکسر متشکل از دایره ای به شعاع ۱۰۰ میکرون می باشد که ۸ عدد الکتروود روی بدنه آن قرار گرفته است. طول این الکتروودها ۰/۰۵ محیط مخزن در نظر گرفته شده است و به صورت متقارن (با زاویه ۴۵ درجه نسبت به یکدیگر) در اطراف بدنه مخزن جاگذاری شده است. در مرکز این مخزن قسمت متحرکی تعبیه شده است که قابلیت چرخش حول مرکز مختصات (مرکز مخزن) را دارد. این قسمت متحرک از دایره ای به شعاع ۵۰ میکرون و دو ربع دایره به شعاع ۸۰ میکرون طراحی شده است. ضخامت کل مجموعه ۲۰۰ میکرون در نظر گرفته شده است. چگالی، ویسکوزیته، قابلیت رسانایی الکتریکی و ثابت دی الکتریک نسبی سیال به ترتیب ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، ۰/۰۰۱ پاسکال ثانیه، ۰/۰۲ زیمنس بر متر و ۸۰ می باشند که برای مدل سازی



شکل ۱-۶ شماتیک هندسه میکرومیکسر استاتیک

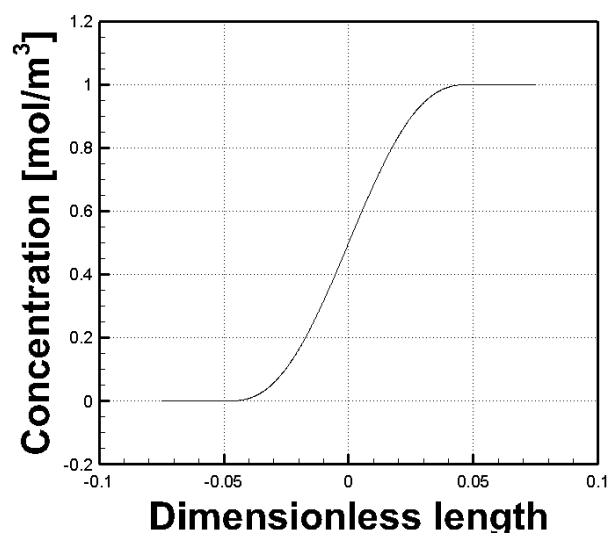


تقابل بین میدان جریان سیال و میدان الکتریکی متناوب مورد نیاز است. همچنین خواص قسمت متحرک از قبیل چگالی، قابلیت رسانایی الکتریکی و ثابت دی‌الکتریک نسبی به ترتیب ۱۰۵۵ کیلوگرم بر مترمکعب، ۰/۲ زیمنس بر متر و ۲/۶ در نظر گرفته شده است. در این فصل به منظور بررسی عملکرد میکرومیکسر از معادلات غلظت استفاده شده است که ضریب انتشار در آن ۰/۰۰۱ میلی‌مترمربع بر ثانیه می‌باشد.

### ۶-۱-۲ شرایط مرزی

همان‌طور که بیان شد، در این میکرومیکسر سیال در حالت اولیه ساکن می‌باشد و جریان سیال به داخل میکرومیکسر وارد و خارج نمی‌شود. بنابراین، تمامی مرزهای میکرومیکسر از شرط مرزی عدم لغزش برخوردار هستند و فصل مشترک بین سیال و قسمت متحرک از رابطه بیان شده در بخش ۲-۳-۲ پیروی می‌نماید.

نیروی هیدرودینامیکی سیال و نیروی دی‌الکتروفورسیس، نیروهای وارد بر قسمت متحرک می‌باشند که در بخش ۲-۲-۳ بیان شده است. جابجایی قسمت متحرک در راستاهای افقی و عمودی مقید شده و توانایی حرکت در این راستاها از آن صلب شده است و تنها قابلیت چرخش حول مرکز مختصات را دارا می‌باشد (در واقع قسمت متحرک به مرکز مختصات پین شده است).



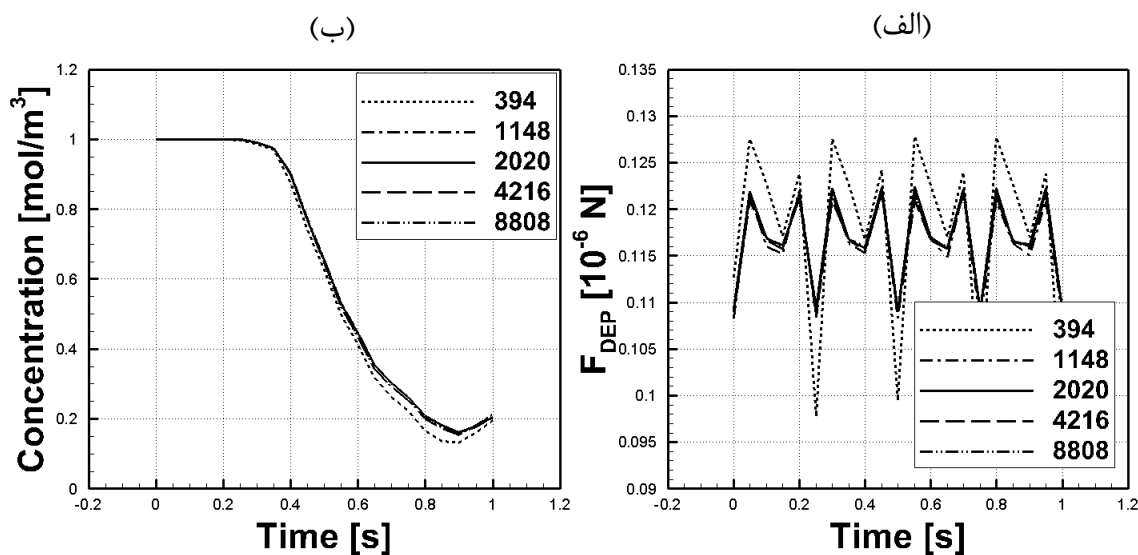
شکل ۶-۲ توزیع اولیه غلظت در میکرومیکسر استاتیک

با توجه به شکل ۱-۶ و به منظور بررسی عملکرد میکرومیکسر، توزیع اولیه غلظت به این صورت در نظر گرفته شده است که غلظت نیمه سمت راست یک مول بر مترمکعب و غلظت نیمه سمت چپ، صفر مول بر مترمکعب باشد. برای اعمال این توزیع غلظت از تابع پله هموارشده در شکل ۲-۶ استفاده شده است. در این شکل از قطر مخزن سیال برای بی‌بعدسازی ورودی تابع استفاده شده است. تمامی مرزهای خارجی میکرومیکسر و فصل مشترک بین سیال و قسمت متحرک از نوع دیوار صلب می‌باشند، بنابراین انتقال جرم در این مرزها صفر می‌باشد.

به منظور تولید میدان الکتریکی متناوب از هشت عدد الکتروود (شکل ۱-۶) استفاده شده است که پتانسیل الکتریکی هر یک از آن‌ها در بخش ۲-۳-۱ بیان شده است. سایر مرزهای خارجی مخزن سیال عایق می‌باشند که رابطه ریاضی این شرط در بخش ۲-۳-۱ است. در فصل مشترک بین سیال و جامد پتانسیل الکتریکی و مؤلفه عمودی جابجایی الکتریکی به صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱-۶ پتانسیل الکتریکی مربوط به الکتروودهای میکرومیکسر استاتیک

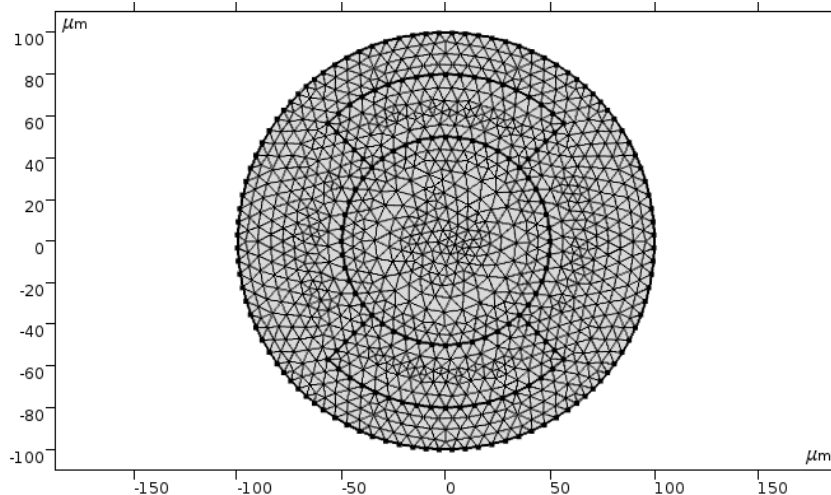
پتانسیل الکتریکی	نام الکتروود	پتانسیل الکتریکی	نام الکتروود
$\varphi * \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{4}\right)$	E	$\varphi * \sin(\omega t)$	A
$\varphi * \sin\left(\omega t + \frac{5\pi}{4}\right)$	F	$\varphi * \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right)$	B
$\varphi * \sin\left(\omega t + \frac{6\pi}{4}\right)$	G	$\varphi * \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{4}\right)$	C
$\varphi * \sin\left(\omega t + \frac{7\pi}{4}\right)$	H	$\varphi * \sin\left(\omega t + \frac{3\pi}{4}\right)$	D



شکل ۳-۶ استقلال از شبکه اندازه نیروی دی‌الکتروفورسیس (الف) و غلظت نقطه واقع بر محور افقی به فاصله ۹۵ میکرون از مرکز مختصات (ب)

### ۳-۱-۶ استقلال از شبکه

همانند کارهای قبلی، ابتدا به بررسی تغییرات برخی پارامترها نسبت به تغییر تعداد المان‌های محاسباتی می‌پردازیم. بدین منظور، نیروی دی‌الکتروفورسیس وارد بر ربع دایره از قسمت متحرک و غلظت نقطه‌ای دلخواه برای بررسی تغییرات نسبت به تعداد المان انتخاب می‌شوند. آنچه که شکل ۳-۶ نمایش می‌دهد، بیانگر این است که کمینه تغییرات مربوط به تعداد المان ۲۰۲۰ می‌باشد و با افزایش تعداد المان‌های محاسباتی تغییرات مقادیر ناچیز است. در شکل ۴-۶ شبکه محاسباتی با تعداد المان ۲۰۲۰ نمایش داده شده است و بر اساس معیار کیفیت اسکینوس، کمترین کیفیت المان‌ها ۰/۶۷ و



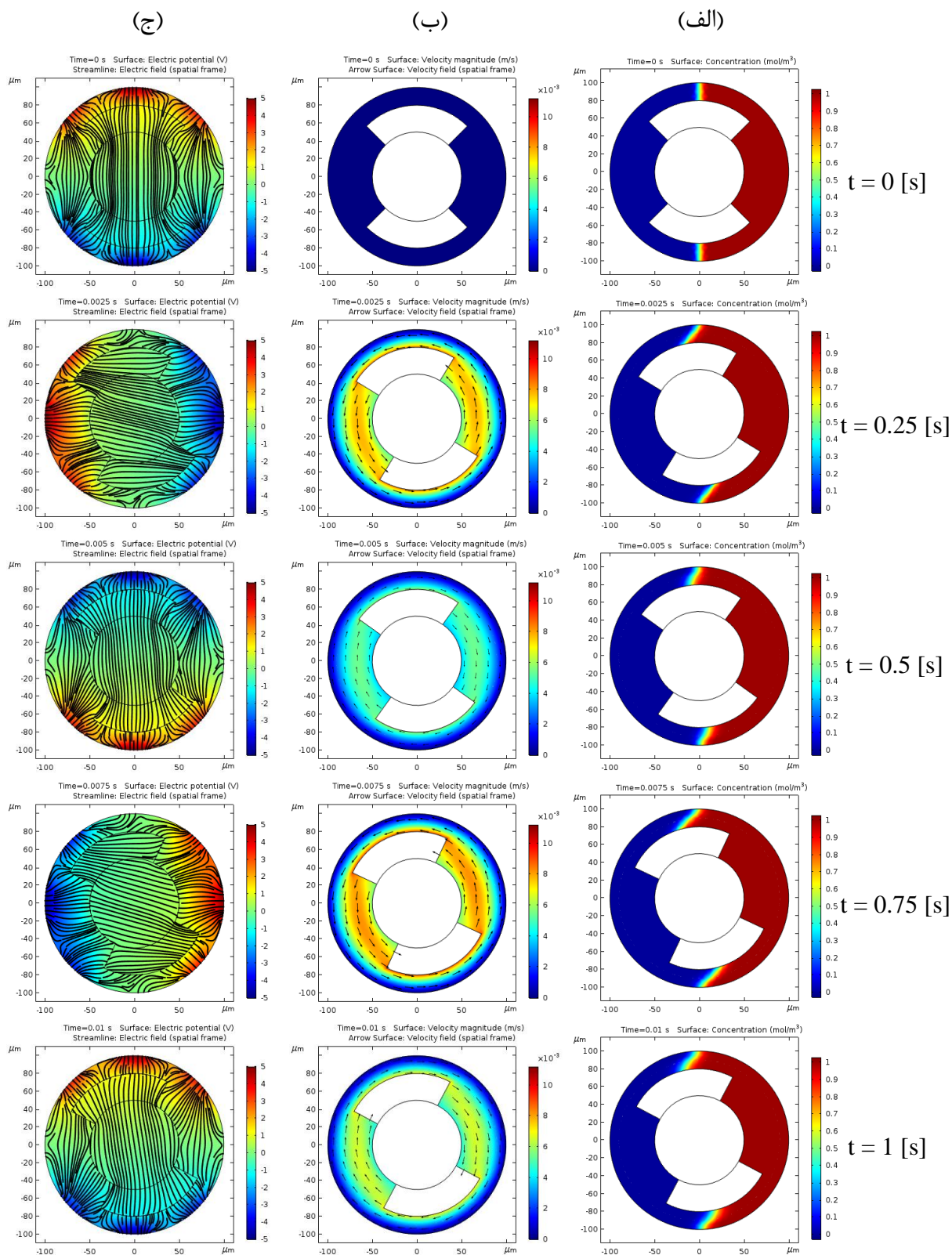
شکل ۴-۶ شبکه محاسباتی مربوط به میکرومیکسر استاتیک با تعداد المان ۲۰۲۰

میانگین کیفیت المان‌ها ۰/۸۵۸ می‌باشد. با توجه به موارد گفته‌شده، شبکه محاسباتی با تعداد المان ۲۰۲۰ برای بررسی سایر متغیرهای تأثیرگذار در عملکرد میکرومیکسر استاتیک انتخاب می‌شود.

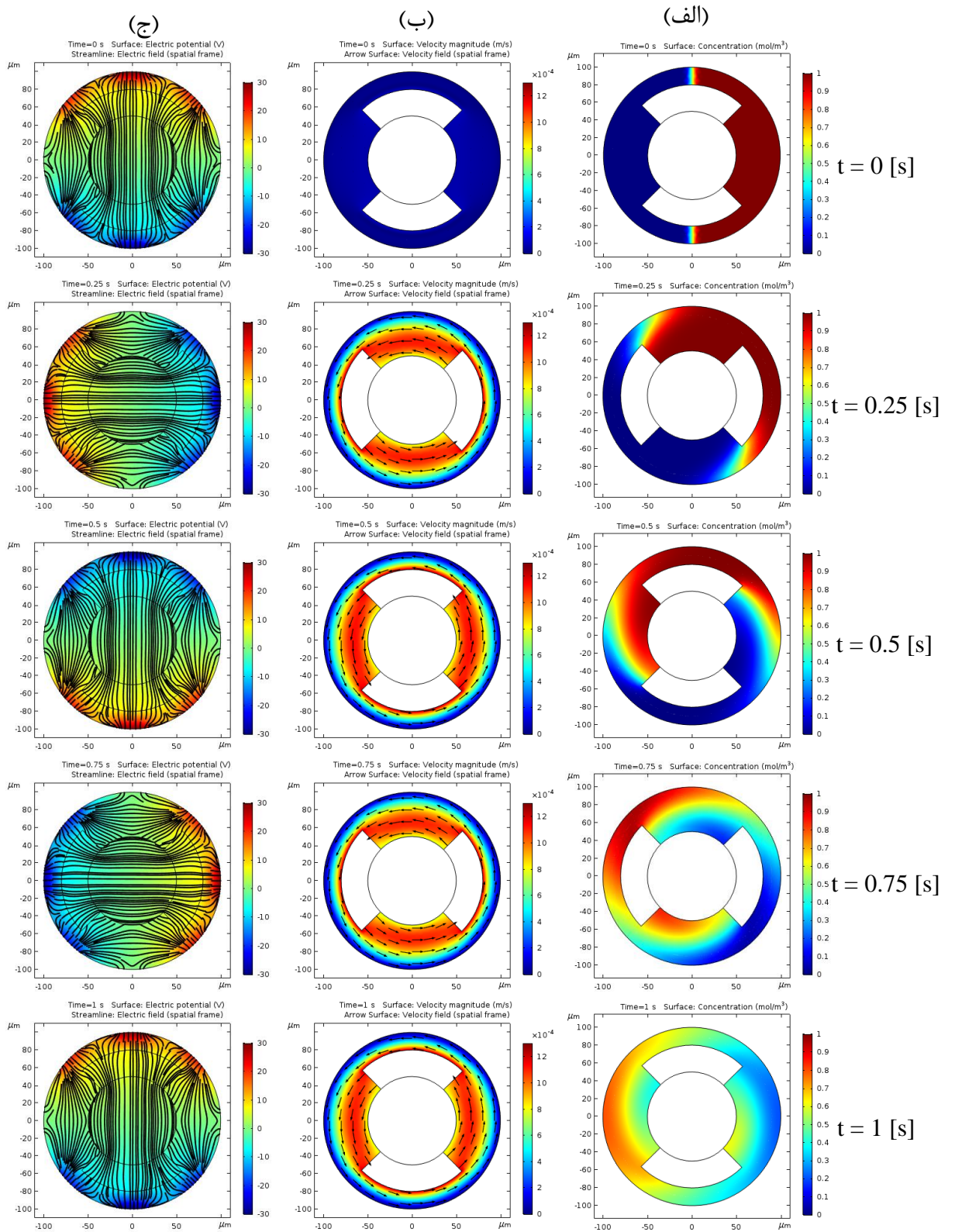
#### ۴-۱-۶ نتایج

حرکت دورانی همواره بهترین گزینه برای طراحی میکرومیکسرها بوده است که با توجه به تئوری میدان الکتریکی متناوب، به راحتی می‌توان حرکت دورانی موردنظر را ایجاد نمود. به همین علت در میکرومیکسر طراحی شده در تحقیق حاضر از میدان الکتریکی متناوب با فرکانس‌های متفاوت برای بررسی عملکرد میکسر استفاده شده است. در این بخش به بررسی تأثیر عوامل و پارامترهای مؤثر بر عملکرد میکرومیکسر استاتیک پرداخته می‌شود.

اولین موضوعی که برای میکرومیکسر پیشنهاد شده می‌توان عنوان نمود، یک حرکت چرخشی خالص می‌باشد که در آن جسم متحرک قابلیت چرخش همگام با چرخش میدان الکتریکی متناوب را داشته باشد. موقعیت مکانی جسم متحرک (بدون در نظر گرفتن فرکانس و پتانسیل میدان الکتریکی متناوب)، اولین پارامتر مؤثر بر چرخش خالص میکرومیکسر می‌باشد. بعد از مدل‌سازی و بررسی چندین موقعیت مکانی، به این نتیجه رسیدیم که چرخش خالص میکرومیکسر هنگامی اتفاق می‌افتد که موقعیت جسم متحرک در راستای بیشترین و کم‌ترین پتانسیل الکتریکی باشد (با فرض ثابت ماندن چیدمان الکترودها در شکل ۶-۱). توصیه می‌شود موقعیت مکانی اولیه جسم متحرک در راستای عمودی قرار گیرد. در واقع منظور از قرارگیری جسم متحرک در راستای عمودی این است که یکی از ربع دایره‌ها در مقابل الکترودها  $C$  و دیگری در مقابل الکترودها  $G$  قرار گرفته باشند. در شکل ۶-۵ نمونه‌ای از عدم چرخش خالص جسم متحرک در فرکانس ۱۰۰ هرتز و پتانسیل الکتریکی ۵ ولت در چهار قسمت از اولین دوره زمانی میدان الکتریکی اعمالی به همراه کانتورهای غلظت، سرعت و پتانسیل الکتریکی نمایش داده شده است. همچنین در شکل ۶-۶، تمامی موارد گفته‌شده در فرکانس ۱ هرتز و پتانسیل الکتریکی ۳۰ ولت، که نمونه‌ای از چرخش خالص می‌باشد، ترسیم شده است.



شکل ۶-۵ کانتورهای غلظت (الف)، سرعت سیال به همراه جهت حرکت سیال (ب) و پتانسیل میدان الکتریکی متناوب به همراه خطوط میدان الکتریکی (ج) مربوط به میکرومیکسر استاتیک با فرکانس ۱۰۰ هرتز و پتانسیل الکتریکی ۵ ولت



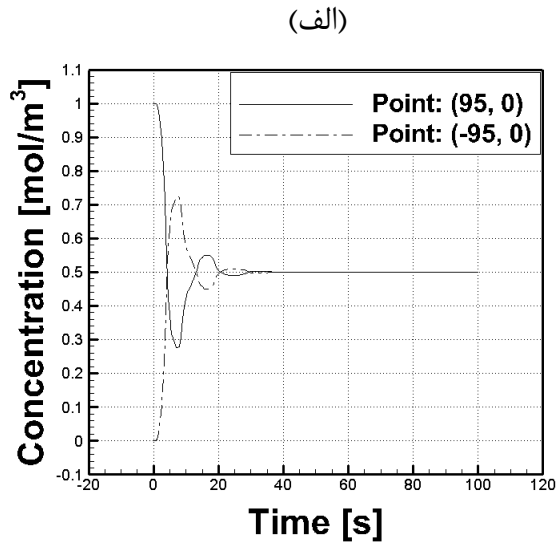
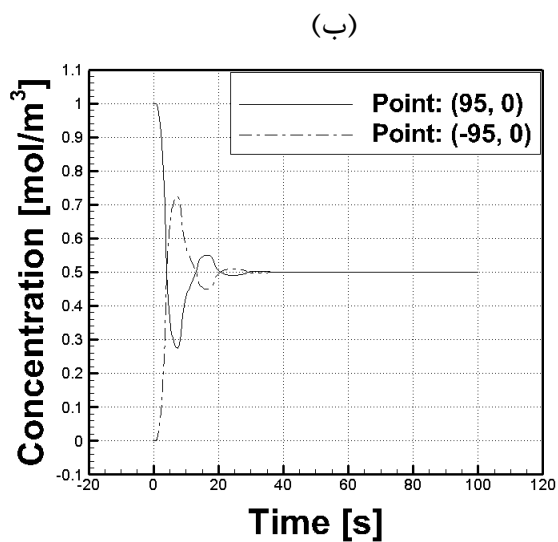
شکل ۶-۶ کانتورهای غلظت (الف)، سرعت سیال به همراه جهت حرکت سیال (ب) و پتانسیل میدان الکتریکی متناوب به همراه خطوط میدان الکتریکی (ج) مربوط به میکرومیگسر استاتیک با فرکانس ۱ هرتز و پتانسیل الکتریکی ۳۰ ولت

همان‌طور که در شکل ۵-۶ مشاهده می‌شود، با شروع چرخش میدان الکتریکی متناوب، جسم متحرک نیز به واسطه نیروی دی‌الکتروفورسیس حرکت خود را آغاز می‌نماید. اما در ادامه حرکت خود، به علت کم بودن پتانسیل الکتریکی، نتوانسته همگام با میدان الکتریکی پیشرفت و خود را در راستای بیان شده حفظ نماید، این در حالی است که در شکل ۶-۶، به علت متناسب بودن پتانسیل الکتریکی با فرکانس میدان الکتریکی متناوب، جسم متحرک همواره با میدان الکتریکی اعمالی همگام می‌باشد. بنابراین، دومین پارامتر مؤثر بر چرخش خالص جسم متحرک، پتانسیل الکتریکی اعمالی می‌باشد. در واقع همانند مطالب بیان شده در فصل ۴، اندازه میدان الکتریکی اعمالی مؤثرترین پارامتر بر اندازه نیروی دی‌الکتروفورسیس می‌باشد. نیروی دی‌الکتروفورسیس اعمالی بر جسم متحرک می‌بایست به اندازه کافی بزرگ باشد تا بتواند همگام با چرخش میدان الکتریکی متناوب، باعث چرخیدن جسم متحرک نیز شود. همچنین نیروی دی‌الکتروفورسیس وارد شده بر جسم متحرک می‌بایست بر نیروی مخالف هیدرودینامیکی سیال که در حین حرکت بر جسم متحرک وارد می‌شود، غلبه نماید. خوب است در اینجا اشاره نماییم که کم‌ترین پتانسیل الکتریکی موردنیاز برای چرخش خالص جسم متحرک با توجه به فرکانس میدان الکتریکی اعمالی تعیین می‌شود.

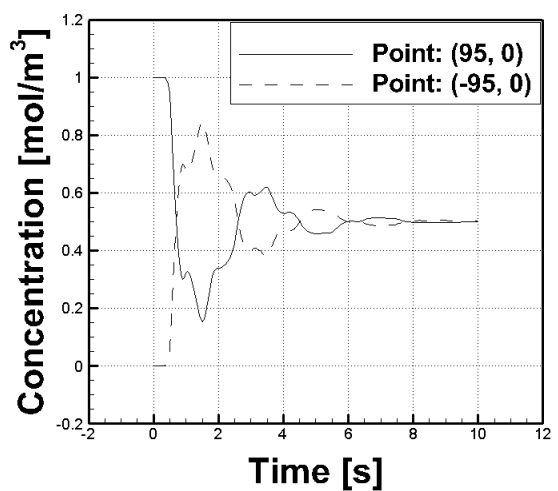
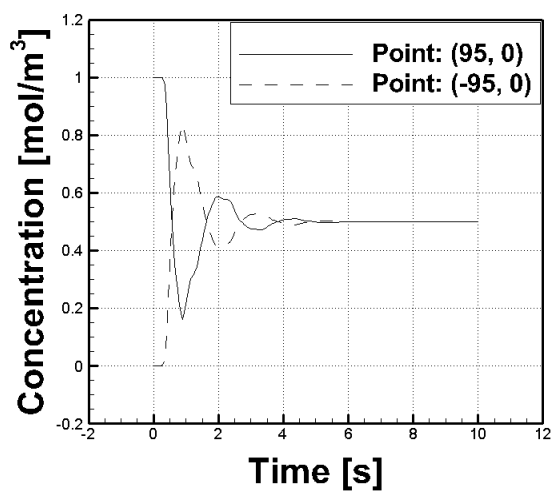
در ادامه به منظور بررسی توزیع و تغییرات غلظت سیال موجود در میکرومیکسر استاتیک، دو نقطه دلخواه درون مخزن سیال در نظر می‌گیریم و به بیان تغییرات غلظت این دو نقطه در طول زمان بررسی می‌پردازیم. این نقاط روی محور افقی و در دو طرف مرکز مختصات به فاصله ۹۵ میکرون واقع شده‌اند. با بررسی نمودارهای مربوط به دو نقطه بیان شده دریافتیم که تغییرات غلظت سیال در فرکانس ۰/۱ هرتز به ازای پتانسیل‌های ۱، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ ولت کاملاً مشابه یکدیگر می‌باشند و با توجه به شکل ۶-۷ ردیف اول، درمی‌یابیم که حداقل زمان لازم برای توزیع یکنواخت سیال ۴۰ ثانیه (چهار برابر دوره زمانی میدان الکتریکی) می‌باشد. از شکل ۶-۷ ردیف دوم درمی‌یابیم که تغییرات غلظت دو نقطه در نظر گرفته شده، در فرکانس ۱ هرتز بین پتانسیل ۱ ولت و سایر پتانسیل‌های بررسی شده،

متفاوت می‌باشد و به ازای پتانسیل‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ ولت حداقل زمان موردنیاز برای توزیع یکنواخت غلظت سیال ۶ ثانیه یا به عبارتی شش برابر دوره زمانی میدان الکتریکی اعمالی می‌باشد. این روند برای فرکانس ۱۰ هرتز نیز صادق می‌باشد، اما ۱ ثانیه (ده برابر دوره زمانی میدان الکتریکی) حداقل زمان موردنیاز برای توزیع یکنواخت غلظت سیال در این فرکانس می‌باشد. برای نمونه می‌توان در شکل ۶-۸ روند تغییر کانتور غلظت مربوط به فرکانس‌های ۱ و ۱۰ هرتز با پتانسیل الکتریکی ۳۰ ولت را مشاهده نمایید. روند تغییرات غلظت در فرکانس ۱۰۰ هرتز نیز مشابه سایر فرکانس‌ها می‌باشد، به این صورت که نمودار غلظت دو نقطه به ازای پتانسیل‌های ۱ و ۵ ولت مشابه یکدیگر می‌باشند و با توجه به شکل ۶-۵، در این دو حالت توزیع یکنواختی از غلظت سیال در محدوده زمانی مطالعه شده (ده برابر دوره زمانی) رخ نمی‌دهد. اما در پتانسیل‌های الکتریکی بیشتر از ۱۰ ولت (مخصوصاً مقادیر ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ ولت)، شرایط بهبود می‌یابد و در زمان ۰/۱ ثانیه توزیع تقریباً یکنواختی از غلظت سیال مشاهده می‌شود.

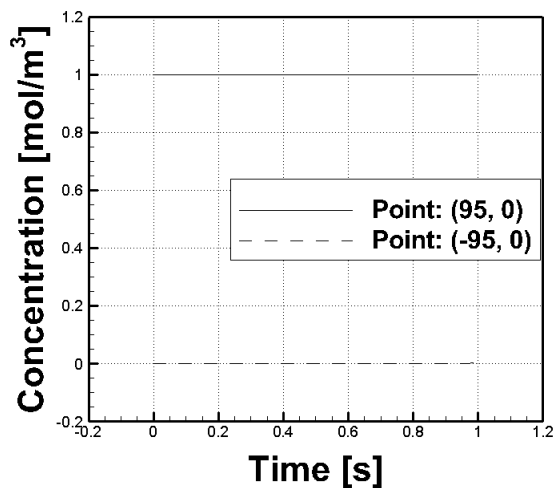
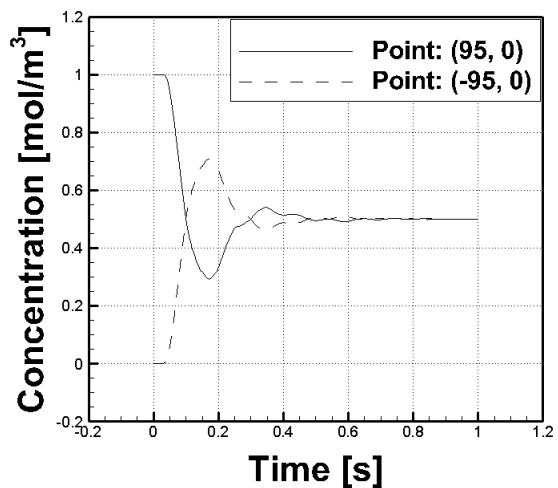




(ج)

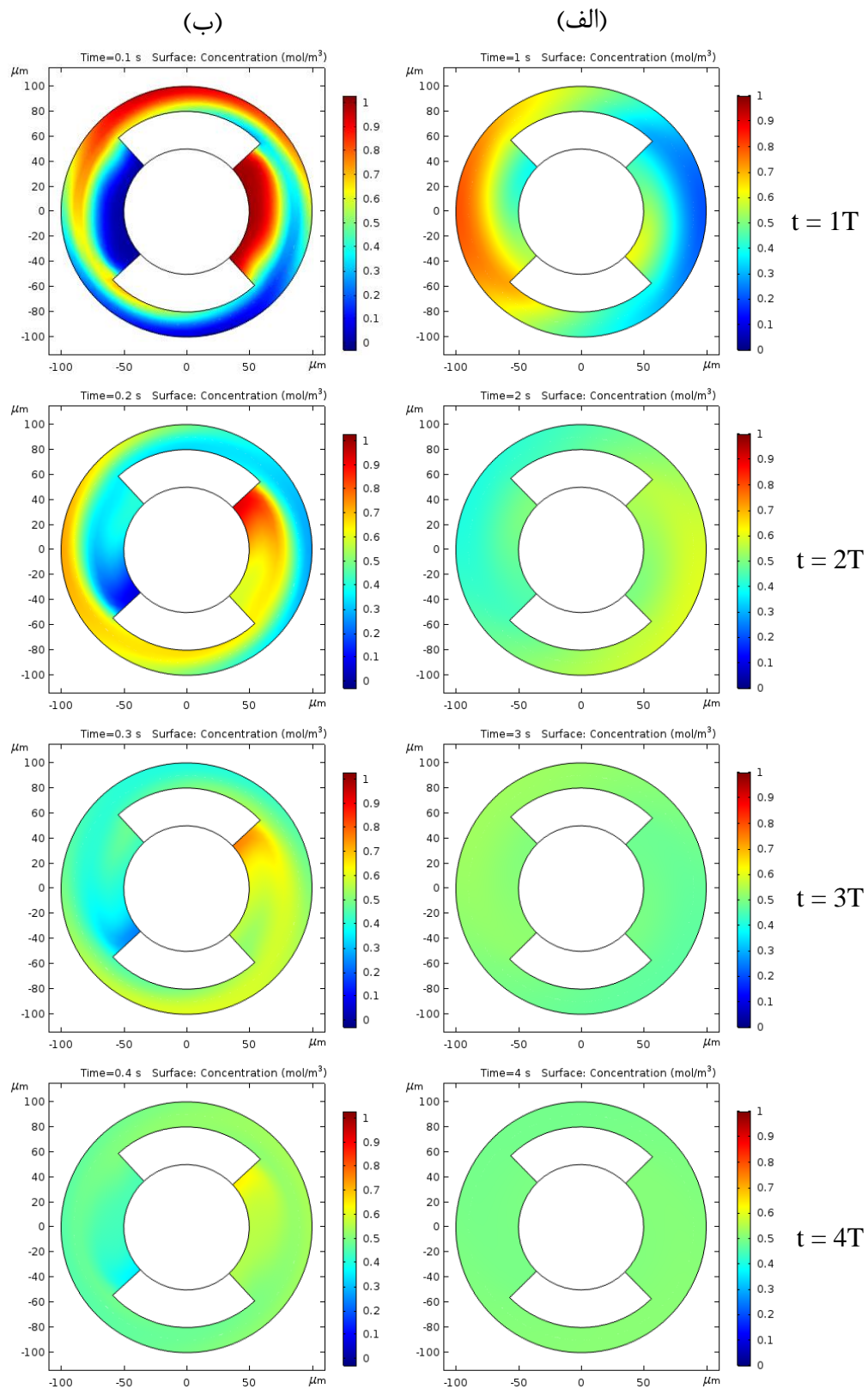


(د)

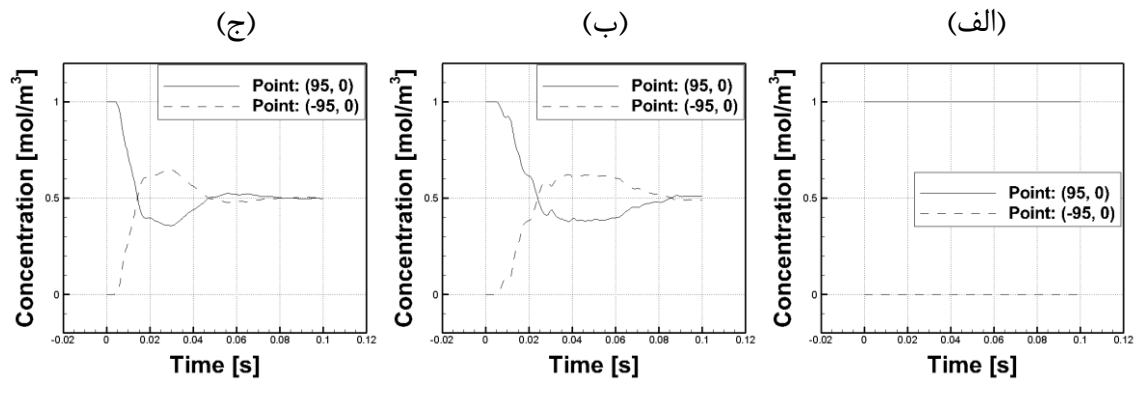


(ه)

شکل ۶-۷ تغییرات غلظت دو نقطه واقع بر محور مختصات میکرومیکسر استاتیک، به ترتیب از بالا به پایین در فرکانس های ۰/۱ (ج)، ۱ (د) و ۱۰ هرتز (ه) با پتانسیل های الکتریکی ۱ (الف) و ۵ ولت (ب)



شکل ۶-۸ کانتور غلظت سیال موجود در مخزن میکرومیکسر استاتیک به‌ازای پتانسیل الکتریکی ۳۰ ولت در فرکانس‌های ۱ (الف) و ۱۰ هرتز (ب)



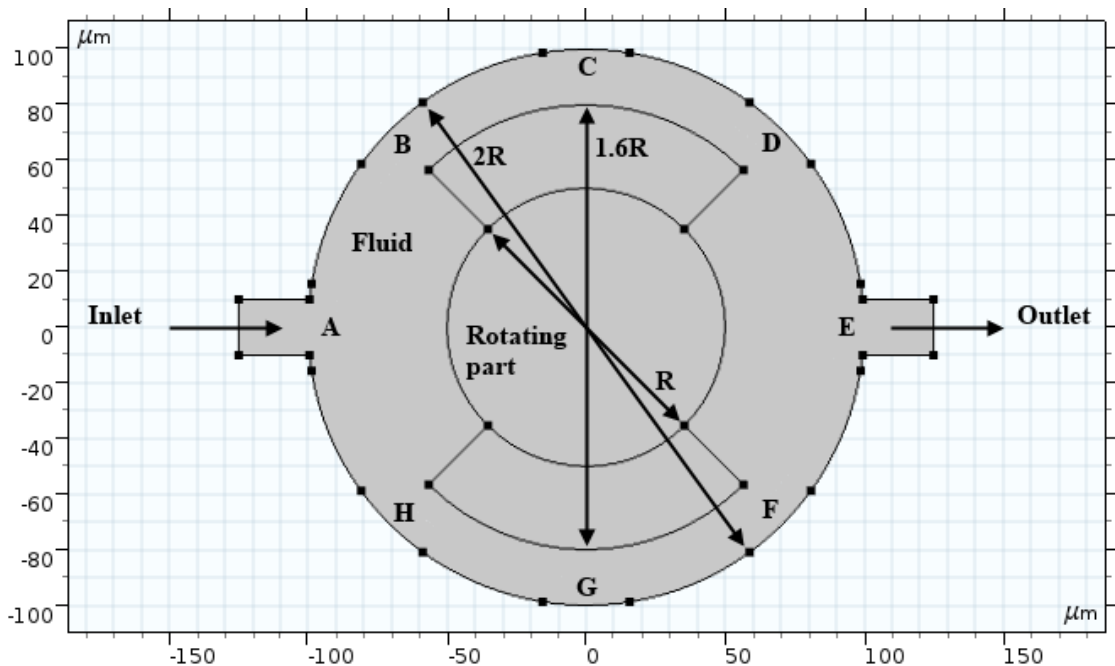
شکل ۶-۹ تغییرات غلظت دو نقطه واقع بر محور مختصات میکرومیکسر استاتیک، به‌ازای پتانسیل‌های الکتریکی ۵ (الف)، ۱۰ (ب) و ۱۵ ولت (ج) در فرکانس ۱۰۰ هرتز

## ۲-۶ میکرومیکسر دینامیک

### ۱-۲-۶ بیان مسئله

در این بخش به تکمیل ایده میکرومیکسر استاتیک و معرفی حالت دیگری از آن می‌پردازیم. در این حالت، که به آن میکرومیکسر دینامیک اطلاق می‌شود، دارای ورودی و خروجی سیال به درون مخزن میکسر می‌باشد که دو جریان سیال غلیظ و رقیق در حین عبور با یکدیگر ترکیب می‌شوند.

با توجه به شکل ۱۰-۶، تمامی اطلاعات هندسی میکرومیکسر دینامیک مشابه میکرومیکسر استاتیک می‌باشد که در بخش ۱-۱-۶ به تفصیل بیان شده است. تنها تفاوت بین میکرومیکسر استاتیک و دینامیک در کانال‌های ورودی و خروجی است. عرض این کانال‌ها ۲۰ میکرون و طول آن‌ها به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شده است تا پروفیل سرعت توسعه یافته شود (حدود ۳۰ میکرون). از آنجایی که ضخامت کل مجموعه ۲۰۰ میکرون می‌باشد، قطر هیدرولیکی کانال‌ها در حدود ۳۶ میکرون محاسبه می‌شود. دیگر تفاوت این میکسر با میکرومیکسر استاتیک، در غلظت اولیه آن می‌باشد. غلظت اولیه اکثر قسمت‌های مخزن سیال صفر مول بر مترمکعب می‌باشد.



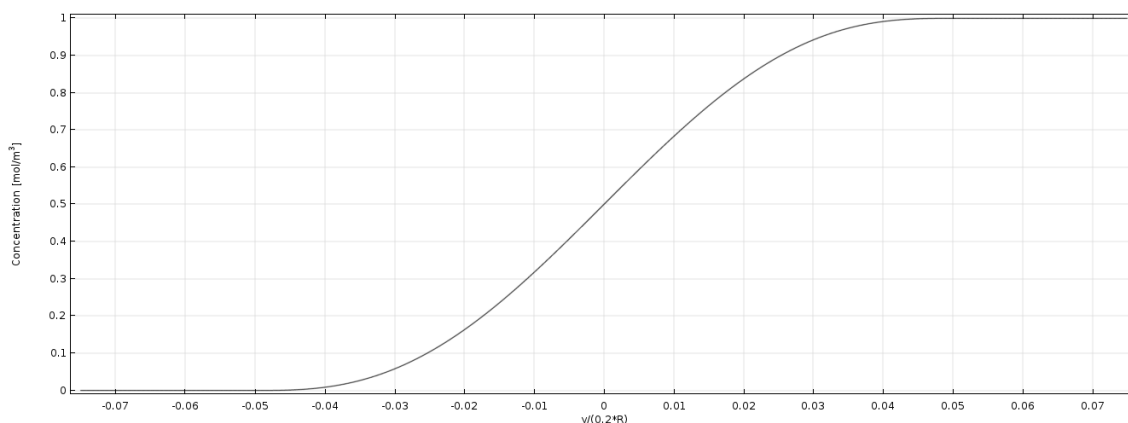
شکل ۱۰-۶ شماتیک هندسه میکرومیکسر دینامیک

چگالی، ویسکوزیته، قابلیت رسانایی الکتریکی و ثابت دی‌الکتریک نسبی سیال به ترتیب ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، ۰/۰۰۱ پاسکال ثانیه، ۰/۰۲ زیمنس بر متر و ۸۰ می‌باشند که برای مدل‌سازی تقابل بین میدان جریان سیال و میدان الکتریکی متناوب مورد نیاز است. همچنین خواص قسمت متحرک از قبیل چگالی، قابلیت رسانایی الکتریکی و ثابت دی‌الکتریک نسبی به ترتیب ۱۰۵۵ کیلوگرم بر مترمکعب، ۰/۲ زیمنس بر متر و ۲/۶ در نظر گرفته شده است. همچنین، ضریب انتشار به منظور بررسی عملکرد میکرومیکسر ۰/۰۰۱ میلی‌مترمربع بر ثانیه می‌باشد.

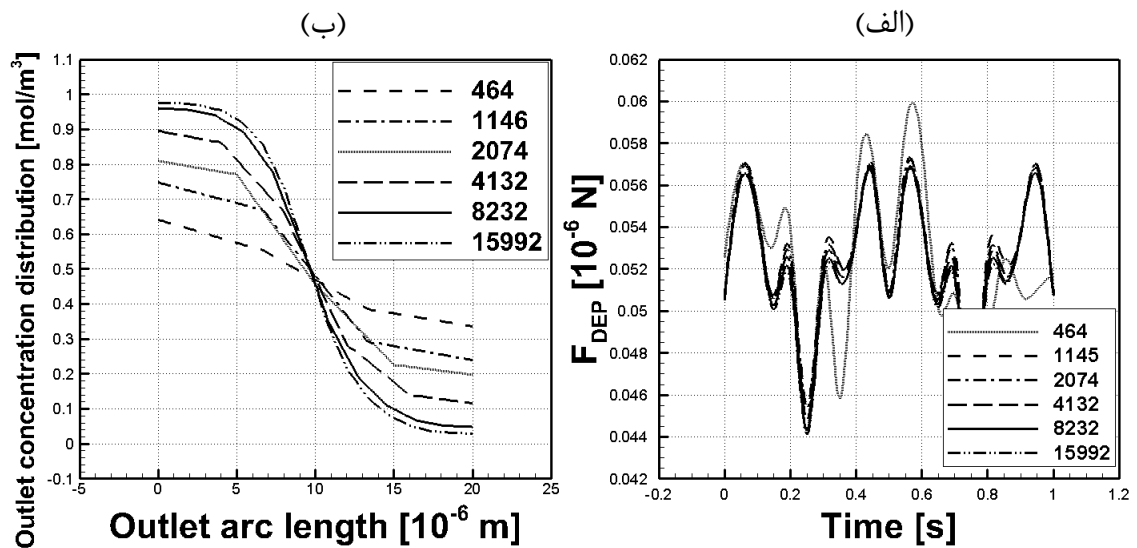
### ۲-۲-۶ شرایط مرزی

در این بخش، به علت تشابه اکثر شرایط مرزی با شرایط مرزی میکرومیکسر استاتیک، تنها به ذکر تفاوت‌های آن‌ها می‌پردازیم. سیال با سرعت یکنواخت، که از رابطه رینولدز محاسبه شده است، وارد کانال ورودی می‌شود. در کانال خروجی شرط فشار نسبی صفر برقرار می‌باشد و سایر مرزهای خارجی سیال دارای شرط عدم لغزش می‌باشند. قسمت متحرک در هر دو میکسر کاملاً مشابه می‌باشند.

همان‌طور که بیان شد، غلظت اولیه اکثر قسمت‌های مخزن سیال صفر مول بر مترمکعب می‌باشد. اما برای بررسی عملکرد میکسر، توزیع غلظت اولیه در قسمت ابتدایی مخزن سیال و غلظت ورودی کانال از تابع پله هموار شده که در شکل ۱۱-۶ به تصویر کشیده شده است، پیروی می‌نماید. پتانسیل الکتریکی مربوط به الکترودهای نمایش داده شده در شکل ۱۰-۶، مطابق جدول ۱-۶ می‌باشد.



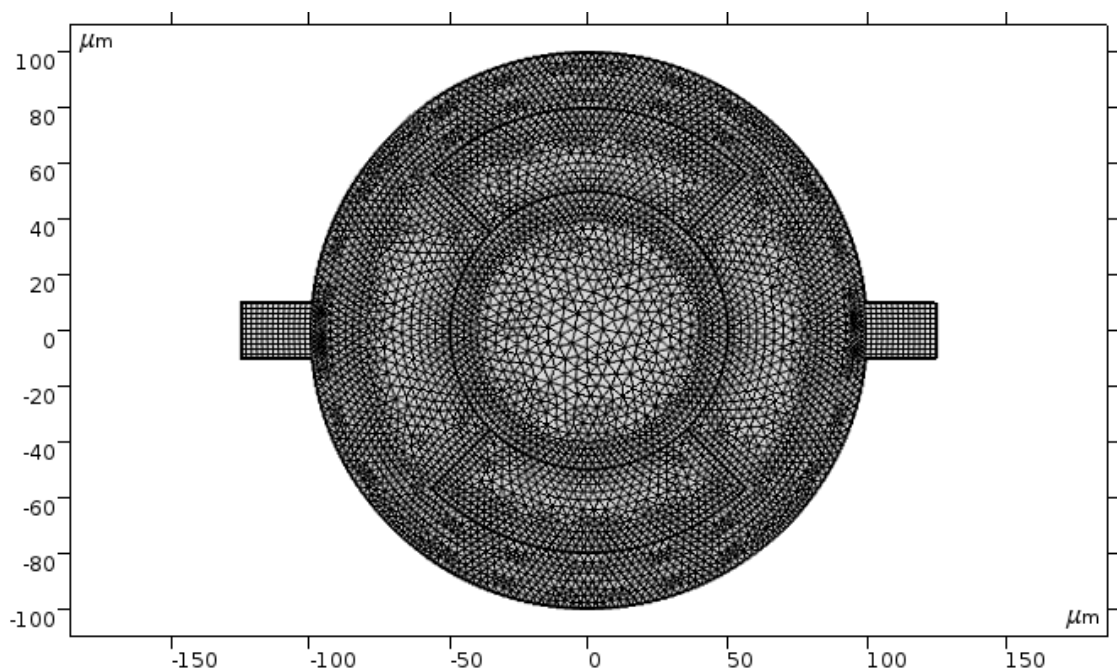
شکل ۱۱-۶ توزیع غلظت ورودی و غلظت اولیه قسمت ابتدایی مخزن سیال



شکل ۱۲-۶ استقلال از شبکه اندازه نیروی دی‌الکتروفورسیس (الف) و توزیع غلظت کانال خروجی (ب) مربوط به میکرومیکسر دینامیک

### ۳-۲-۶ استقلال از شبکه

در این بخش نیز همانند روند سابق به بررسی تغییرات نتایج در برابر افزایش تعداد المان‌های محاسباتی می‌پردازیم. در شکل ۱۲-۶، تغییرات اندازه نیروی دی‌الکتروفورسیس و توزیع غلظت در خروجی میکرومیکسر نسبت به تعداد المان‌های محاسباتی در یک دوره زمانی نمایش داده شده است.



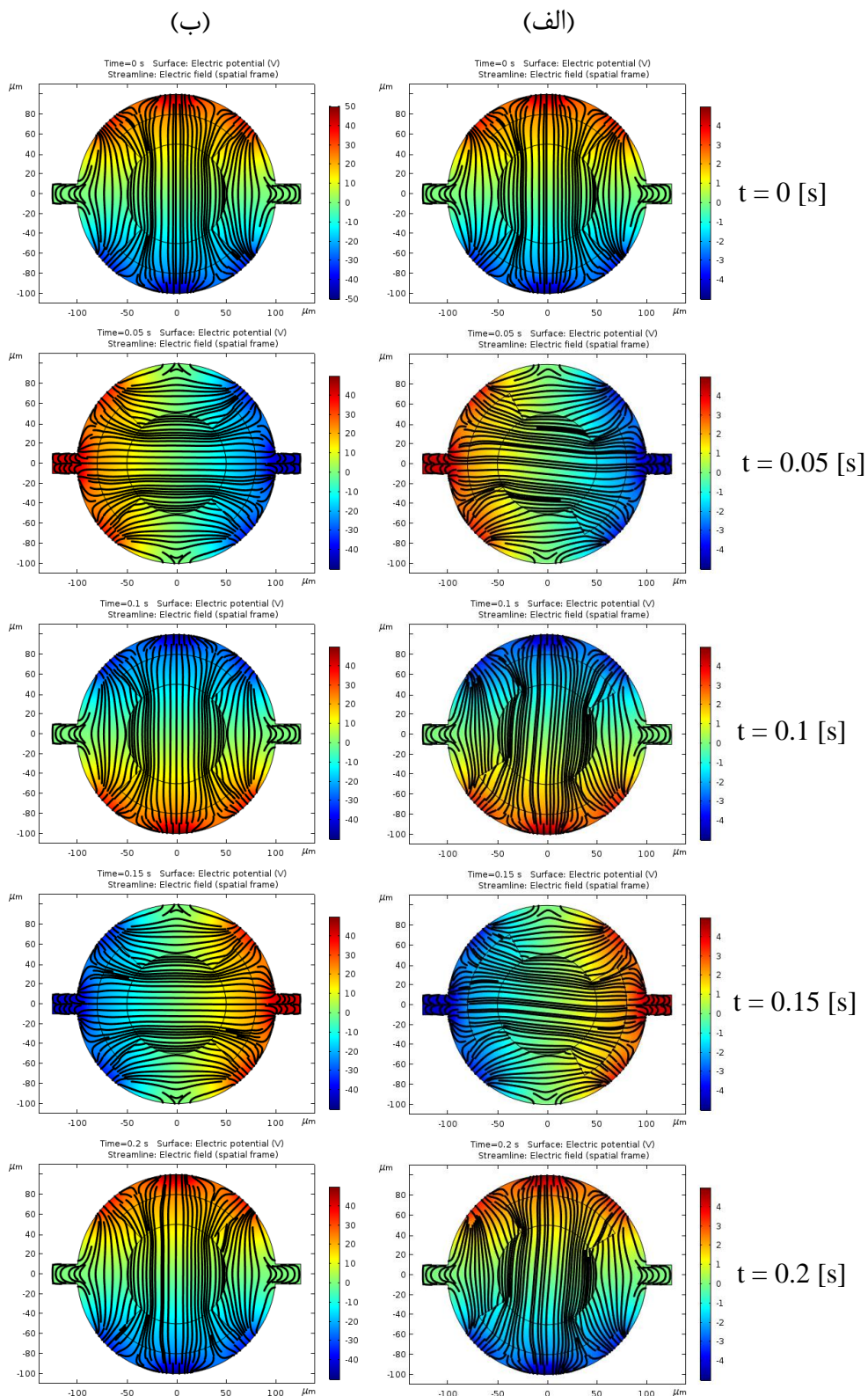
شکل ۱۳-۶ شبکه محاسباتی مربوط به میکرومیکسر دینامیک با تعداد المان ۸۲۳۲

با توجه به دو نمودار، درمی‌یابیم که تغییرات پارامترهای ذکر شده بین شبکه‌های محاسباتی با تعداد المان ۸۲۳۲ و ۱۵۹۹۲ کمینه می‌باشد. بنابراین به منظور کم نمودن هزینه محاسباتی، شبکه با تعداد المان ۸۲۳۲ برای بررسی عملکرد میکرومیکسر به ازای پارامترهای متفاوت انتخاب می‌شود که در شکل ۶-۱۳ این شبکه نمایش داده شده است. بر مبنای معیار کیفیت اسکینوس، این شبکه محاسباتی دارای کمترین کیفیت ۰/۶۴ و میانگین کیفیت ۰/۹ می‌باشد.

### ۶-۲-۴ نتایج

با توجه به مطالب بیان شده در بخش ۶-۱-۴، پارامتر چرخش خالص در مورد این میکرومیکسر صادق و حتی حیاتی‌تر نیز می‌باشد، چراکه در میکرومیکسر دینامیک جریان ورودی و خروجی سیال داریم و تأثیر نیروی مخالف هیدرودینامیکی سیال بسیار بیشتر از نیروی متناظر در میکرومیکسر استاتیک می‌باشد. با توجه به توضیحات مفصل بیان شده در بخش ۶-۱-۴، در این بخش تنها به شرح مختصری از تأثیر این پارامتر بر عملکرد میکرومیکسر می‌پردازیم.

در ابتدا به موقعیت قرارگیری جسم متحرک در حین انجام کار میکرومیکسر می‌پردازیم که در شکل ۶-۱۴ موقعیت مکانی جسم متحرک بین دو پتانسیل الکتریکی متفاوت در یک فرکانس و عدد رینولدز ثابت مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود پتانسیل الکتریکی ۵ ولت، از شدت لازم برای همگام نمودن جسم متحرک با میدان الکتریکی متناوب برخوردار نمی‌باشد و باعث ایجاد تأخیر بین حرکت جسم متحرک و میدان الکتریکی متناوب می‌شود. در مقابل، پتانسیل الکتریکی ۵۰ ولت به راحتی زمینه همگام شدن جسم متحرک با میدان الکتریکی اعمالی را فراهم نموده است، به صورتی که این جسم، با توجه به مطالب توضیح داده شده در بخش ۶-۱-۴، همواره در راستای بیشینه و کمینه مقادیر پتانسیل الکتریکی قرار گرفته است. خوب است اشاره شود که در این فرکانس و عدد رینولدز، پتانسیل الکتریکی ۵۰ ولت به نمایندگی از سایر پتانسیل‌های الکتریکی مطالعه شده (۱۰ و ۲۰ ولت)، انتخاب شده است.



شکل ۶-۱۴ کانتر پتانسیل الکتریکی به همراه خطوط میدان الکتریکی مربوط به میکرومیکسر  
 دینامیک به‌ازای عدد رینولدز  $0.1/1$  با فرکانس میدان الکتریکی ۵ هرتز در پتانسیل‌های الکتریکی  
 ۵ (الف) و ۵۰ ولت (ب)



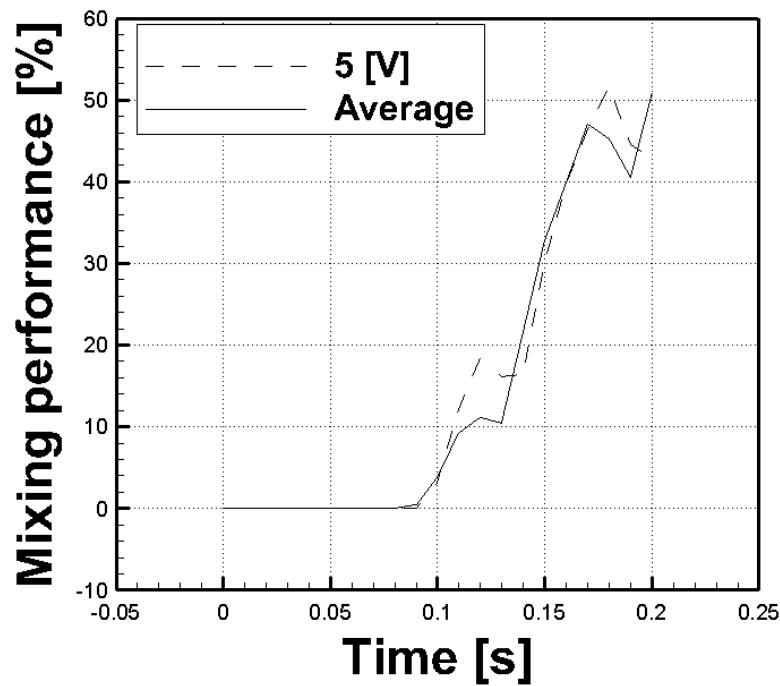
به منظور بررسی عملکرد میکرومیکسر دینامیک، با توجه به کار عظیمی و همکاران [۴۴]، می توان از پارامتر زیر استفاده نمود.

$$\gamma = \left( 1 - \frac{\int_0^W |C - C_\infty|}{\int_0^W |C_0 - C_\infty|} \right) * 100 \quad (۱-۶)$$

در این رابطه،  $\gamma$  عملکرد اختلاط<sup>۱</sup>،  $C$  پروفیل غلظت سیال در مقطع خروجی،  $C_\infty$  غلظت ترکیب یکنواخت،  $C_0$  بیشترین غلظت سیال ورودی و  $W$  اندازه مقطع خروجی می باشند. در تحقیق حاضر با توجه به شرط مرزی ورودی میکرومیکسر، غلظت ترکیب یکنواخت برابر  $0.5$  مول بر مترمکعب می باشد. همان طور که بیان شد، چرخش خالص جسم متحرک بر عملکرد اختلاط تأثیرگذار می باشد که در شکل ۶-۱۵، به ازای عدد رینولدز  $0.1$  تغییرات این پارامتر در برابر زمان رسم شده است. در این شکل به علت شباهت زیاد نمودارهای مربوط به پتانسیل های الکتریکی  $10$ ،  $20$  و  $50$  ولت، میانگینی از مقادیر آن ها گزارش شده است و با نمودار مربوط به پتانسیل الکتریکی  $5$  ولت، که در آن چرخش خالص جسم متحرک اتفاق نمی افتد (شکل ۶-۱۴)، مقایسه شده است. با توجه به شکل ۶-۱۵، علت اختلاف دو نمودار تأخیر به وجود آمده بین حرکت جسم متحرک و میدان الکتریکی متناوب می باشد.

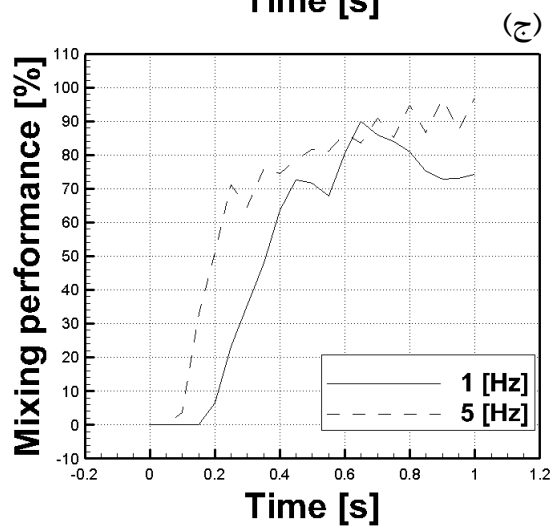
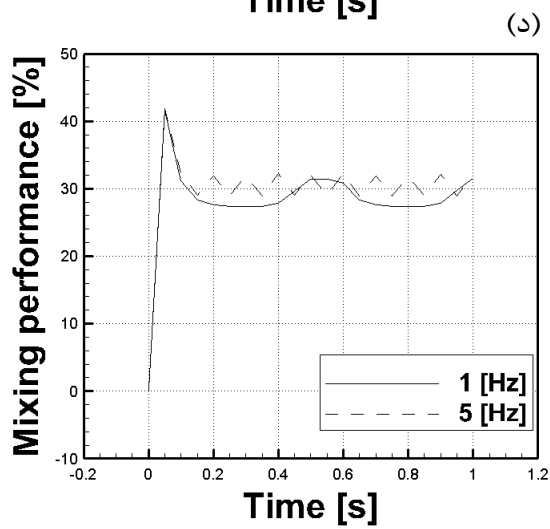
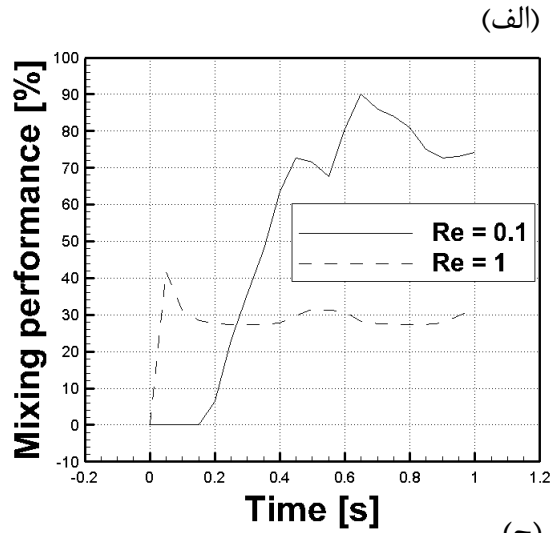
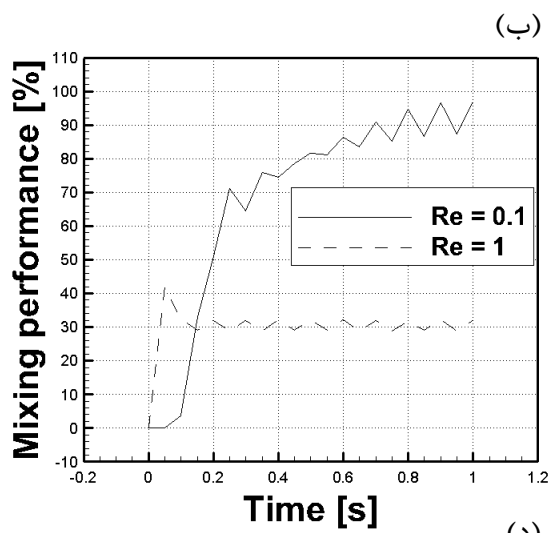
در ادامه به بررسی تأثیر پارامترهای فرکانس و عدد رینولدز بر عملکرد اختلاط می پردازیم. برای این منظور محدوده وسیعی از مقادیر مورد مطالعه قرار گرفت که در تحقیق حاضر به بیان چند نمونه از آن ها می پردازیم. انتظار داشتیم که با افزایش عدد رینولدز (افزایش سرعت ورودی) عملکرد میکرومیکسر کاهش یابد. به این علت که سرعت سیال افزایش یافته است و ممکن است حرکت دورانی جسم متحرک به اندازه کافی سریع نباشد و نتواند بر سرعت سیال غلبه نماید و باعث عدم ترکیب یکنواخت دو جریان غلیظ و رقیق شود. شکل ۶-۱۶ (ردیف بالا) در تأیید این نظر می باشد و نشان می دهد در یک فرکانس

<sup>۱</sup> Mixing performance

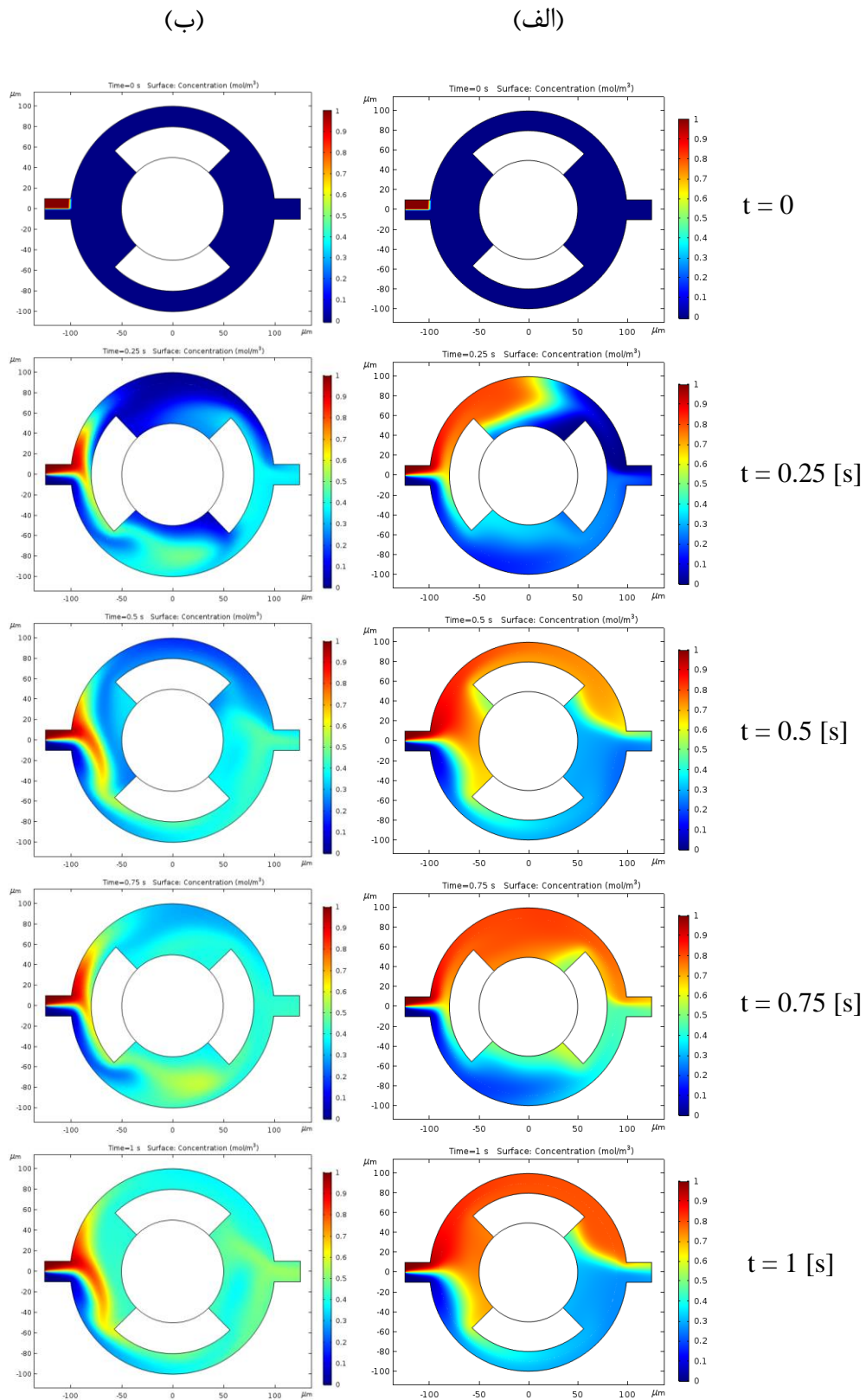


شکل ۶-۱۵ تغییرات عملکرد میکسینگ در خروجی میکرومیکسر دینامیک در برابر زمان به‌ازای عدد رینولدز ۰/۱

ثابت با افزایش سرعت سیال، عملکرد میکرومیکسر دینامیک کاهش یافته است. با توجه به شکل ۶-۱۶، پارامتر مؤثر دیگر در عملکرد اختلاط، فرکانس میدان الکتریکی متناوب می‌باشد که می‌تواند در جهت افزایش عملکرد میکرومیکسر، تأثیر مثبت گذارد. بدین صورت که با افزایش فرکانس، سرعت دورانی جسم متحرک نیز افزایش می‌یابد و قادر به ایجاد اغتشاش در مسیر عبوری سیال می‌باشد که در نتیجه آن، عملکرد اختلاط افزایش خواهد یافت. در پایان برای روشن ساختن مطالب بیان شده، کانتور غلظت سیال درون میکرومیکسر، در فرکانس‌های ۱ و ۵ هرتز با عدد رینولدز ۰/۱ در شکل ۶-۱۷ ترسیم شده است.



شکل ۶-۱۶ عملکرد اختلاط به ازای فرکانس ۱ (الف) و ۵ هرتز (ب) و عدد رینولدز ۰/۱ (ج) و ۱ (د)



شکل ۶-۱۷ کانطور غلظت سیال درون میکرومیکسر دینامیک به‌ازای عدد رینولدز ۱/۱  
در فرکانس‌های ۱ (الف) و ۵ هرتز (ب)

## ۷ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با توسعه سریع فناوری ساخت در مقیاس میکرو، دی‌الکتروفورسیس به‌عنوان یکی از مهم‌ترین فن‌های جداسازی ذرات و سلول‌ها مورداستفاده قرار گرفته است. میدان الکتریکی غیریکنواخت شدید، در مقایسه با اندازه طولی سلول به‌راحتی در ولتاژهای کم قابل‌تولید است. از آنجایی که دوقطبی شدن الکتریکی نسبی سلول به فرکانس میدان الکتریکی اعمالی وابسته است، به‌طور معمول از میدان الکتریکی متناوب برای اعمال نیروی دی‌الکتروفورسیس در اندازه و جهت‌های متفاوت استفاده می‌شود. از این‌رو مطالعات انجام‌شده پیرامون رفتار ذرات در حضور میدان الکتریکی، کمک شایانی به استفاده از این فن در کاربردهایی مانند جداسازی سلول‌ها و یا ذرات در مقیاس میکرو انجام نموده است. در تحقیق حاضر به نحوه حرکت ذرات در میدان‌های الکتریکی متناوب و ثابت پرداخته شده است. در این بررسی، ابتدا یک میدان الکتریکی غیریکنواخت متناوب که حاصل از چیدمان نامتقارن الکترودها می‌باشد، اعمال شد. مشاهده شد که ذره به سمت تجمع خطوط میدان الکتریکی جذب می‌شود. این حرکت جذبی ذره به سمت ناحیه متراکم میدان الکتریکی اولین و مهم‌ترین نتیجه حاصل از این بررسی می‌باشد. علت این حرکت جذبی را در خواص الکتریکی ذره و سیال می‌توان جستجو نمود. با توجه به ضریب کلازیوس-مستی، می‌توان نوع حرکت ذره را تشخیص داد. اگر این ضریب مثبت باشد حرکت ذره جذبی و اگر منفی باشد، حرکت آن دفعی خواهد بود. در ادامه این تحقیق، حرکات یک جفت ذره در میدان الکتریکی ثابت با موقعیت‌های اولیه متفاوت تحلیل شده است و مشاهده شد که جفت ذرات تمایل به جذب یکدیگر دارند. با بررسی خطوط میدان الکتریکی، مشخص شد که مشابه حرکت تک ذره در میدان الکتریکی متناوب، جفت ذرات به سمت ناحیه متراکم میدان الکتریکی جذب شدند. با نزدیک شدن ذرات به یکدیگر، تراکم میدان الکتریکی نیز افزایش می‌یابد و باعث تشکیل زنجیره‌ای از ذرات در راستای میدان الکتریکی اعمالی می‌شود. با توجه به زنجیره تشکیل‌شده، می‌توان از نیروی دی‌الکتروفورسیس به‌منظور به جداسازی ذرات و یا به دام انداختن آن‌ها بهره برد.

با توجه به تعامل بین ذرات و میدان الکتریکی، کنترل و جهت‌دهی به ذرات از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است، به این علت که به کمک آن می‌توان دستگاه‌های متنوعی در حوزه میکروسیالات طراحی نمود. به عنوان نمونه از میکروولو در آزمایشگاه‌های روی تراشه، برای هدایت سیال در مسیرهای متفاوت استفاده می‌شود. دیگر کاربرد موردنیاز در این حوزه میکرومیکسر می‌باشد که نیاز به یکنواخت سازی دو جریان غلیظ و رقیق را برطرف می‌نماید. در تحقیق حاضر از نیروی دی‌الکتروفورسیس به عنوان عملگر برای طراحی یک میکروولو و دو میکرومیکسر استفاده شده است. به منظور هدایت سیال میکروولوی طراحی شده است که با استفاده از میدان الکتریکی ثابت قابل کنترل است. بیشترین زمان پاسخ گزارش شده برای میکروولو، ۰/۲۵ ثانیه می‌باشد که آن را در زمره میکرو دستگاه‌های سریع قرار می‌دهد. همچنین برای یکنواخت ساختن غلظت سیال، میکرومیکسری با تحریک میدان الکتریکی متناوب طراحی شد. این میکرومیکسر در دو قالب استاتیک و دینامیک معرفی شد. در میکرومیکسر دینامیک جریان ورودی و خروجی سیال در نظر گرفته شده است که تنها تفاوت بین میکرومیکسرهای دینامیک و استاتیک می‌باشد. از جمله قابلیت‌های این دو میکرومیکسر به عملکرد آن‌ها می‌توان اشاره نمود. با توجه به فرکانس میدان الکتریکی اعمالی، میکرومیکسر استاتیک قادر به یکنواخت سازی سیال در کمتر از یک ثانیه می‌باشد. همچنین میکرومیکسر دینامیک در عرض یک ثانیه قادر به یکنواخت سازی دو جریان غلیظ و رقیق با عملکرد ۹۷ درصد می‌باشد.

## ٨ منابع و مراجع

- [1] Facts, D., 2005, *Dielectrophoresis (BOOK)*.
- [2] Xia, Y., Gates, B., Yin, Y., and Lu, Y., 2000, "Monodispersed Colloidal Spheres: Old Materials with New Applications," *Adv. Mater.*, **12**(10), pp. 693–713.
- [3] Mastrangeli, M., Abbasi, S., Varel, C., Van Hoof, C., Celis, J. P., and Böhringer, K. F., 2009, "Self-Assembly from Milli- to Nanoscales: Methods and Applications," *J. Micromechanics Microengineering*, **19**(8), p. 083001.
- [4] Li, M., Li, W. H., Zhang, J., Alici, G., and Wen, W., 2014, "A Review of Microfabrication Techniques and Dielectrophoretic Microdevices for Particle Manipulation and Separation," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, **47**(6), p. 063001.
- [5] Pethig, R., 2010, "Review Article—Dielectrophoresis: Status of the Theory, Technology, and Applications," *Biomicrofluidics*, **4**(2), p. 022811.
- [6] Gangwal, S., Cayre, O. J., and Velev, O. D., 2008, "Dielectrophoretic Assembly of Metallodielectric Janus Particles in AC Electric Fields," *Langmuir*, **24**(23), pp. 13312–13320.
- [7] Gupta, S., Alargova, R. G., Kilpatrick, P. K., and Velev, O. D., 2008, "On-Chip Electric Field Driven Assembly of Biocomposites from Live Cells and Functionalized Particles," *Soft Matter*, **4**(4), pp. 726–730.
- [8] Hermanson, K. D., Lumsdon, S. O., Williams, J. P., Kaler, E. W., and Velev, O. D., 2001, "Dielectrophoretic Assembly of Electrically Functional Microwires from Nanoparticle Suspensions," *Science (80-. )*, **294**(5544), pp. 1082–1086.
- [9] Velev, O. D., and Bhatt, K. H., 2006, "On-Chip Micromanipulation and Assembly of Colloidal Particles by Electric Fields," *Soft Matter*, **2**(9), pp. 738–750.
- [10] Velev, O. D., Gangwal, S., and Petsev, D. N., 2009, "Particle-Localized AC and DC Manipulation and Electrokinetics," *Annu. Reports Prog. Chem. - Sect. C*, **105**(0), pp. 213–246.

- [11] Juárez, J. J., and Bevan, M. A., 2009, “Interactions and Microstructures in Electric Field Mediated Colloidal Assembly,” *J. Chem. Phys.*, **131**(13), p. 134704.
- [12] Gangwal, S., Pawar, A., Kretzschmar, I., and Velev, O. D., 2010, “Programmed Assembly of Metallodielectric Patchy Particles in External AC Electric Fields,” *Soft Matter*, **6**(7), pp. 1413–1418.
- [13] Markx, G. H., Carney, L., Littlefair, M., Sebastian, A., and Buckle, A. M., 2009, “Recreating the Hematon: Microfabrication of Artificial Haematopoietic Stem Cell Microniches in Vitro Using Dielectrophoresis,” *Biomed. Microdevices*, **11**(1), pp. 143–150.
- [14] Morgan, H., and Green, N. G., 2003, “AC Electrokinetics: Colloids and Nanoparticles,” Hertfordshire, Engl. Res. Stud. Press LTD, **324**, p. 324.
- [15] Jones, T. B., and Jones, T. B., 2005, *Electromechanics of Particles*, Cambridge University Press.
- [16] Keh, H. J., and Chen, S. H., 1995, “Particle Interactions in Thermophoresis,” *Chem. Eng. Sci.*, **50**(21), pp. 3395–3407.
- [17] Keh, H. J., and Chen, S. B., 1989, “Particle Interactions in Electrophoresis. II. Motion of Two Spheres Normal to Their Line of Centers,” *J. Colloid Interface Sci.*, **130**(2), pp. 556–567.
- [18] Keh, H. J., and Yang, F. R., 1990, “Particle Interactions in Electrophoresis. III. Axisymmetric Motion of Multiple Spheres,” *J. Colloid Interface Sci.*, **139**(1), pp. 105–116.
- [19] Keh, H. J., and Chen, J. Bin, 1993, “Particle Interactions in Electrophoresis. V. Motion of Multiple Spheres with Thin but Finite Electrical Double Layers,” *J. Colloid Interface Sci.*, **158**(1), pp. 199–222.
- [20] Keh, H. J., and Yang, F. R., 1991, “Particle Interactions in Electrophoresis. IV. Motion of Arbitrary Three-Dimensional Clusters of Spheres,” *J. Colloid Interface Sci.*, **145**(2), pp. 362–389.
- [21] Hsu, J. P., Ku, M. H., and Kao, C. Y., 2005, “Electrophoresis of Two Identical



- Cylindrical Particles along the Axis of a Cylindrical Pore,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, **44**(5), pp. 1105–1111.
- [22] and, J.-P. H., and Yeh, L.-H., 2007, “Electrophoresis of Two Identical Rigid Spheres in a Charged Cylindrical Pore.”
- [23] Zeng, S., Zinchenko, A. Z., and Davis, R. H., 1999, “Electrophoretic Motion of Two Interacting Particles,” *J. Colloid Interface Sci.*, **209**(2), pp. 282–301.
- [24] Swaminathan, T. N., and Hu, H. H., 2004, “Particle Interactions in Electrophoresis Due to Inertia,” *J. Colloid Interface Sci.*, **273**(1), pp. 324–330.
- [25] Yariv, E., 2004, “Inertia-Induced Electrophoretic Interactions,” *Phys. Fluids*, **16**(4), pp. 10–14.
- [26] Kadaksham, J., Singh, P., and Aubry, N., 2005, “Dielectrophoresis Induced Clustering Regimes of Viable Yeast Cells,” *Electrophoresis*, **26**(19), pp. 3738–3744.
- [27] Kadaksham, A. T. J., Singh, P., and Aubry, N., 2004, “Dielectrophoresis of Nanoparticles,” *Electrophoresis*, **25**(21–22), pp. 3625–3632.
- [28] Kadaksham, J., Singh, P., and Aubry, N., 2004, “Dynamics of Electrorheological Suspensions Subjected to Spatially Nonuniform Electric Fields,” *J. Fluids Eng.*, **126**(2), pp. 170–179.
- [29] Kadaksham, J., Singh, P., and Aubry, N., 2006, “Manipulation of Particles Using Dielectrophoresis,” *Mech. Res. Commun.*, **33**(1), pp. 108–122.
- [30] Aubry, N., and Singh, P., 2006, “Influence of Particle-Particle Interactions and Particles Rotational Motion in Traveling Wave Dielectrophoresis,” *Electrophoresis*, **27**(3), pp. 703–715.
- [31] Aubry, N., and Singh, P., 2006, “Control of Electrostatic Particle-Particle Interactions in Dielectrophoresis,” *Europhys. Lett.*, **74**(4), pp. 623–629.
- [32] Kang, K. H., and Li, D., 2006, “Dielectric Force and Relative Motion between Two Spherical Particles in Electrophoresis,” *Langmuir*, **22**(4), pp. 1602–1608.

- [33] Hwang, H., Kim, J. J., and Park, J. K., 2008, "Experimental Investigation of Electrostatic Particle-Particle Interactions in Optoelectronic Tweezers," *J. Phys. Chem. B*, **112**(32), pp. 9903–9908.
- [34] Janjua, M., Nudurupati, S., Fischer, I., Singh, P., and Aubry, N., 2009, "Electric Field Induced Alignment and Self-Assembly of Rods on Fluid-Fluid Interfaces," *Mech. Res. Commun.*, **36**(1), pp. 55–64.
- [35] Al-Jarro, A., Paul, J., Thomas, D. W. P., Crowe, J., Sawyer, N., Rose, F. R. A., and Shakesheff, K. M., 2007, "Direct Calculation of Maxwell Stress Tensor for Accurate Trajectory Prediction during DEP for 2D and 3D Structures," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, **40**(1), pp. 71–77.
- [36] Rosales, C., and Lim, K. M., 2005, "Numerical Comparison between Maxwell Stress Method and Equivalent Multipole Approach for Calculation of the Dielectrophoretic Force in Single-Cell Traps," *Electrophoresis*, **26**(11), pp. 2057–2065.
- [37] Wang, X., Wang, X. B., and Gascoyne, P. R. C., 1997, "General Expressions for Dielectrophoretic Force and Electrorotational Torque Derived Using the Maxwell Stress Tensor Method," *J. Electrostat.*, **39**(4), pp. 277–295.
- [38] Ai, Y., and Qian, S., 2010, "DC Dielectrophoretic Particle-Particle Interactions and Their Relative Motions," *J. Colloid Interface Sci.*, **346**(2), pp. 448–454.
- [39] Kang, S., and Maniyeri, R., 2012, "Dielectrophoretic Motions of Multiple Particles and Their Analogy with the Magnetophoretic Counterparts," *J. Mech. Sci. Technol.*, **26**(11), pp. 3503–3513.
- [40] House, D. L., Luo, H., and Chang, S., 2012, "Numerical Study on Dielectrophoretic Chaining of Two Ellipsoidal Particles," *J. Colloid Interface Sci.*, **374**(1), pp. 141–149.
- [41] Hossan, M. R., Dillon, R., Roy, A. K., and Dutta, P., 2013, "Modeling and Simulation of Dielectrophoretic Particle-Particle Interactions and Assembly," *J. Colloid Interface Sci.*, **394**(1), pp. 619–629.
- [42] Liu, L., Xie, C., Chen, B., and Wu, J., 2015, "Iterative Dipole Moment Method for

Calculating Dielectrophoretic Forces of Particle-Particle Electric Field Interactions,” *Appl. Math. Mech. (English Ed.)*, **36**(11), pp. 1499–1512.

- [43] Ai, Y., Zeng, Z., and Qian, S., 2014, “Direct Numerical Simulation of AC Dielectrophoretic Particle-Particle Interactive Motions,” *J. Colloid Interface Sci.*, **417**, pp. 72–79.
- [44] Azimi, S., Nazari, M., and Daghighi, Y., 2017, “Developing a Fast and Tunable Micro-Mixer Using Induced Vortices around a Conductive Flexible Link,” *Phys. Fluids*, **29**(3).



## **Abstract**

The presence of suspended particles in an electrolyte solution could locally alter the external electric field and then exert an interactive force on each other. This force is called particle-particle dielectrophoresis force. In the present study, with the assumption of thin electrical double layer, a transient numerical model has been developed and the Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) method has been considered to solve the flow field, the electric field and the motion of the solid particle simultaneously. Whenever the Brownian motion is negligible relative to the interactive particle-particle dielectrophoretic motion, a chain of particles, regardless of their initial positions, is expected along the electric field. Numerical analysis has shown that the particle-particle dielectrophoresis interaction leads to gathering the particles together and line them up along the electric field. Due to the increase of particle-particle dielectrophoresis force, particles accelerate at first and then decelerate as a result of rise in the hydrodynamic repulsive force. Later in this study, with the consideration of the dielectrophoretic motion of particles, two novel applications has been introduced. Microvalve and micromixer are the two applications which are designed based on the conception of dielectrophoresis force. The microvalve contains a circular chamber with one inlet channel and two outlet channels. In order to block the outlet channels, a rotating body has been considered which is consists of a circular and a quadrant parts. Dielectrophoresis and hydrodynamic forces which are acting on the rotating body, are respectively the actuator of the rotating body exerted from the electric field and the repulsion exerted from the flow field. The maximum response time for the microvalve has been reported 0.25s which means, it takes 0.25s to reach and block the second outlet channel from the first one after applying the change in the electric field. The geometry of the micromixer is quite similar to the microvalve. Owing two quadrants is the only difference between them and the forces acting on the rotating parts are totally the same. In this study, the micromixer has been represented in two types – with or without the inlet and outlet channels. Based on the applied electric field frequency, the micromixer is able to homogenize the fluid concentration in less than a second with mixing performance of 97%.

**Keywords:** Dielectrophoresis, Particle dielectrophoretic motion, Microvalve, Micromixer





**Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering**

**M.Sc. Thesis in Energy Conversion Engineering**

**Simulation and numerical analysis of motion and  
interaction between particles with the presence of electric field**

By:

**Mahdi Mohammadi**

Supervisor:

**Dr. Mohsen Nazari**

January 2019