







دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی تبدیل انرژی

# بررسی عددی حرکت ذرات در کانال های میکرو به کمک جریان الکتروکنتیک

نگارنده:

رسول بیانی

استاد راهنما:

دکتر محسن نظری

بهمن ۱۳۹۷

هرچند نوشته‌ای قابل تقدیم نیست ولی اگر جایی اندک برای تقدیم کردن باشد، تقدیم به یوسف زهرا (عج) که ظهورش آرزوی هر جویای علمی است.

تشکر و قدردانی:

بالاترین تشکر از خداوندی که همیشه همراه من بوده است.  
و در ادامه از تمامی افرادی که در پایان یافتن این پایان نامه نقشی داشته‌اند،  
نهایت تشکر و قدردانی را دارم به‌ویژه از خانواده‌ام که سعی بر یاری من  
داشته‌اند. همچنین از استاد راهنمای محترم، جناب آقای دکتر محسن نظری  
تشکرمی‌نمایم.

## تعهد نامه

اینجانب رسول بیانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک، گرایش تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی عددی حرکت ذرات در کانال های میکرو به کمک جریان الکتروکننتیک تحت راهنمایی آقای دکتر محسن نظری متعهد می شوم .

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

## تاریخ

### امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

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

## چکیده

این پایان‌نامه حرکت یک‌ذره صلب را که تحت تأثیر دو میدان الکتریکی ثابت DC قرار گرفته است به صورت عددی بررسی می‌کند و از نتایج آن در حوزه طبقه‌بندی ذرات و رساندن دارو استفاده می‌شود.

به دلیل وابستگی نیروی هیدرودینامیکی در جریان الکتروکنتیک و زیرمجموعه‌های آن به جریان الکتریکی و زتا پتانسیل، کنترل ذرات با استفاده از این دو پارامتر امکان‌پذیر است. در این پایان‌نامه، حرکت دوبعدی و وابسته به زمان یک‌ذره صلب در میکرو کانال مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر پارامترهای مختلفی نظیر جریان الکتریکی، قطر ذره و هندسه ذره بر مسیر حرکت آن بررسی شده است. در نهایت روشی مؤثر برای جداسازی ذرات ارائه شده است. گفتنی است روش ارائه شده در این پایان‌نامه، به دلیل وابستگی به جریان الکتریکی، در شاخه روش‌های فعال جداسازی ذرات قرار می‌گیرد. در این روش، ذرات فارغ از هندسه‌شان طبقه‌بندی می‌شوند؛ پیش‌ازاین هندسه ذرات در طبقه‌بندی آن‌ها تأثیر داشت ولی با استفاده از میکروچیپ ارائه شده در این مطالعه می‌توان ذرات با زتا پتانسیل‌های مختلف را از یکدیگر جدا کرد. گفتنی است با تغییر میدان الکتریکی اعمال شده به میکروچیپ ارائه شده، می‌توان ذرات مختلف را طبقه‌بندی کرد و نیازی به ساخت میکروچیپ جدید برای جداسازی ذرات جدید نیست. میکروچیپ مذکور دارای محفظه جمع‌آوری ذرات می‌باشد.

در دو میدان الکتریکی با مقداری ثابت، با افزایش نسبت زتا پتانسیل ذرات به دیواره کانال، مسیر حرکت تغییر کرده و در نتیجه می‌توان ذرات با نسبت زتا پتانسیل‌های بیشتر از مقدار بحرانی را وارد محفظه جمع‌آوری کرد.

در ادامه، مقدار نسبت دو جریان الکتریکی وارد بر کانال مورد بحث قرار گرفت که از نتایج آن می‌توان به عدم تأثیرگذاری این مقدار در زتا پتانسیل‌های بسیار کمتر از مقدار بحرانی اشاره کرد. هندسه و ابعاد ذره از جمله موارد مورد بررسی در این پژوهش می‌باشد. تأثیر هندسه و ابعاد ذره بر نتیجه جداسازی، بسیار ناچیز بوده و قابل صرف نظر می‌باشد.

**واژگان کلیدی:** الکتروکنتیک، گردابه، ذره صلب، جداسازی ذرات، میکروفلوئیدیک.

## فهرست مطالب

فصل ۱- مقدمه: تاریخچه الکتروکنیتیک و جداسازی ذرات .....	۱
۱-۱- پدیده الکتروکنیتیک .....	۲
۲-۱- پیشینه جداسازی ذرات .....	۳
۱-۲-۱- روش‌های منفعل .....	۴
۱-۲-۱- روش‌های فعال .....	۱۵
۳-۱- نوآوری و گام‌های ابتکاری .....	۱۹
فصل ۲- تئوری: مفاهیم الکتروکنیتیک کلاسیک و الکتروکنیتیک غیرخطی .....	۲۱
۱-۲- لایه دوگانه الکتریکی .....	۲۲
۲-۲- الکترواسماتیک و الکتروفورتیک .....	۲۳
۳-۲- الکتروکنیتیک خطی و غیر خطی .....	۲۵
۱-۳-۲- زتا پتانسیل القایی .....	۲۸
۴-۲- خلاصه و نتیجه‌گیری .....	۲۹
فصل ۳- روش حل: معادلات حاکم و شرایط مرزی .....	۳۱
۱-۳- توزیع پتانسیل الکتریکی .....	۳۳
۲-۳- توزیع سرعت سیال .....	۳۴
۳-۳- حرکت ذره .....	۳۵
۴-۳- خلاصه .....	۳۷
فصل ۴- الکتروکنیتیک: حرکت ذره صلب .....	۳۹
۱-۴- هندسه مورد بررسی .....	۴۰
۲-۴- اعتبار سنجی نتایج .....	۴۲
۳-۴- مطالعه استقلال نتایج از شبکه‌بندی .....	۴۷
۴-۴- بررسی حرکت ذره .....	۴۹
۱-۴-۴- تأثیر نسبت زتا پتانسیل $\zeta$ بر حرکت ذره .....	۵۰
۲-۴-۴- تأثیر نسبت جریان الکتریکی $E$ بر مسیر ذرات .....	۵۷
۳-۴-۴- تأثیر نسبت $X$ بر حرکت ذره .....	۵۸
۴-۴-۴- تأثیر هندسه ذره .....	۶۵
۵-۴- ارائه یک میکروچیپ .....	۶۸



فصل ۵ - جمع بندی: ..... ۷۳

۱-۵- جمع بندی نتایج..... ۷۴

۲-۵- پیشنهادهای..... ۷۵

فهرست منابع..... ۷۶

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: روش‌های جداسازی ذرات [۵]..... ۴
- شکل ۲-۱: شماتیک جریان تنگنا [۸]..... ۵
- شکل ۳-۱: روش جداسازی تنگنای اصلاح‌شده در حالت (الف) شیر خروجی ۱ نیمه بسته و (ب) شیر خروجی کاملاً باز [۱۰]..... ۶
- شکل ۴-۱: (الف) شماتیک روش جداسازی جریان تنگنا، (ب) شماتیک روش جداسازی جریان تنگنای بهبودیافته [۱۱]..... ۷
- شکل ۵-۱: (الف) جریان سیال و تبادل مومنتوم در یک جفت محفظه انبساط و انقباض در یک کانال مستقیم، (ب) مسیر ذرات در حضور تبادل مومنتوم [۱۱]..... ۸
- شکل ۶-۱: اعمال نیروهای برآ و درگ دین بر ذرات با ابعاد مختلف [۱۶]..... ۹
- شکل ۷-۱: جداسازی ذرات در یک میکرو کانال ماریپج [۱۸]..... ۱۰
- شکل ۸-۱: (الف) نمایش تأثیر نیروهای لیفت اینرسی و درگ دین بر ذرات با دو اندازه مختلف، (ب) شماتیک حرکت ذرات در کانال دارای چند بخش انبساط-انقباض [۲۰]..... ۱۱
- شکل ۹-۱: شماتیک میکرو کانال و موانع ۷ شکل مورد استفاده در پژوهش چوی [۲۲]..... ۱۲
- شکل ۱۰-۱: شماتیک جداسازی سلول‌ها بین دو مرحله چرخه سلولی به روش هیدروفورسیس [۲۳]..... ۱۳
- شکل ۱۱-۱: شماتیک یک چیپ DLD به همراه موانع آن [۲۵]..... ۱۴
- شکل ۱۲-۱: جریان سیال و پروفیل سرعت آن بین موانع [۲۶]..... ۱۴
- شکل ۱۳-۱: (الف) الی (د): مراحل مختلف جداسازی تومورهای سرطانی از خون به روش DEP تفاضلی، (ه): شماتیک یک میکروچیپ جداسازی ذرات به روش DEP تفاضلی [۳۰]..... ۱۷
- شکل ۱۴-۱: (الف) DEP منفی و (ب) DEP مثبت که بر ذره با رسانایی متفاوت اعمال می‌شود [۳۲]..... ۱۸
- شکل ۱۵-۱: جداساز چندهدفه به روش مغناطیسی [۳۶]..... ۱۹
- شکل ۱-۲: لایه دوگانه الکتریکی [38]..... ۲۳
- شکل ۲-۲: طرح ساده‌ای از (الف) جریان الکترواسماتیک، (ب) جریان الکتروفورتیک [۳۸]..... ۲۳
- شکل ۳-۲: توزیع بار القاشده و جریان الکتروکننتیک القایی پیرامون ذره رسانا [38]..... ۲۶

- شکل ۲-۴: (الف) خطوط میدان الکتریکی اولیه گذرنده از ذره رسانا (ب) جذب یون‌های با بار مخالف توسط بارهای القایی روی سطح ذره رسانا (ج) میدان الکتریکی حالت پایدار و لایه الکتریکی دوگانه پیرامون ذره رسانا [۳۸]..... ۲۷
- شکل ۲-۵: (الف) خطوط جریان الکتروکنتیک القایی پیرامون ذره رسانا با هندسه دلخواه (ب) خطوط میدان الکتریکی [۳۸]..... ۲۸
- شکل ۳-۱: میکروکانال به همراه ذره صلب و جانمایی الکترودهای جریان ثانویه ..... ۳۳
- شکل ۳-۲: شماتیکی از ناحیه داخلی و خارجی و میدان سرعت و توزیع یون در این دو ناحیه [۴۲]..... ۳۵
- شکل ۴-۱: هندسه کانال به همراه ذره و الکترودهای جای گرفته روی دیواره بالایی و پایینی کانال (جریان ثانویه)..... ۴۱
- شکل ۴-۲: نمایش الکترودهای جریان ثانویه، پارامترهای طولی وابسته به آن و محورهای مختصات ..... ۴۲
- شکل ۴-۳: هندسه پژوهش وو و لی [۴۵]..... ۴۳
- شکل ۴-۴: زتا پتانسیل القایی روی یکی از موانع مثلی حاصل از حل حاضر و حل وو..... ۴۳
- شکل ۴-۵: هندسه پژوهش فنگ ژانگ [۴۶]..... ۴۴
- شکل ۴-۶: خطوط جریان در پژوهش فنگ ژانگ [۴۶]..... ۴۴
- شکل ۴-۷: ذرات به دام افتاده در گردابه حاصل از حل حاضر و حل ژانگ..... ۴۵
- شکل ۴-۸: هندسه پژوهش دیویسون [۴۴]..... ۴۵
- شکل ۴-۹: زاویه ذره با زاویه اولیه ۶۰ درجه نسبت به افق برحسب زمان حاصل از حل حاضر و حل دیویسون..... ۴۷
- شکل ۴-۱۰: موقعیت مرکز جرم ذره با زاویه اولیه ۴۵ درجه نسبت به افق برحسب زمان حاصل از حل حاضر و حل دیویسون..... ۴۷
- شکل ۴-۱۱: (الف) شبکه‌بندی ناحیه حل (ب)، (ج) و (د) نمای نزدیکی از شبکه‌بندی در خروجی، فصل مشترک جامد و سیال و در ورودی کانال ..... ۴۸
- شکل ۴-۱۲: مقدار کل نیروی وارد شده به ذره برحسب تعداد المان‌های به کاررفته در ناحیه حل..... ۴۸
- شکل ۴-۱۳: نمایش شماتیک خطوط جریان الکتریکی..... ۵۰
- شکل ۴-۱۴: مسیر حرکت ذره به ازای مقادیر مختلف  $\zeta$  و  $E = 3.5$ ..... ۵۰
- شکل ۴-۱۵: نیروی هیدرودینامیک وارد شده به ذره با  $\zeta = 0.009$  و  $E = 3.5$  در الف)  $t = 0$  ب)  $t = 0.9$  (ج)  $t = 1.05$  د)  $t = 1.26$  ه)  $t = 1.68$ ..... ۵۲

- شکل ۱۶-۴: نیروی هیدرودینامیک واردشده به ذره با  $\zeta = 0.2$  و  $E = 3.5$  در الف)  $t = 0$  ب)  $t = 52.5$  (ج)
- ۵۳ .....  $t = 58.8$  (د)  $t = 56.7$  ،  $t = 53.76$
- شکل ۱۷-۴: خطوط جریان و حرکت ذره با  $\zeta = 0.009$  و  $E = 3.5$  در الف)  $t = 0$  ب)  $t = 0.9$  (ج)  $t = 1.05$  (د)
- ۵۴ .....  $t = 1.68$  (ه)  $t = 1.26$
- شکل ۱۸-۴: خطوط جریان و حرکت ذره با  $\zeta = 0.055$  و  $E = 3.5$  در الف)  $t = 0$  ب)  $t = 6.93$  (ج)  $t = 7.56$
- ۵۵ .....  $t = 8.57$  (د)
- شکل ۱۹-۴: خطوط جریان و حرکت ذره با  $\zeta = 0.19$  و  $E = 3.5$  در الف)  $t = 0$  ب)  $t = 52.5$  (ج)  $t = 54.6$
- ۵۶ .....  $t = 59.01$  (ه)  $t = 56.7$  (د)
- شکل ۲۰-۴: مسیر حرکت ذره با  $\zeta = 0.13$  و مقادیر مختلف  $E$
- ۵۷ .....  $E$
- شکل ۲۱-۴: مسیر حرکت ذره با  $\zeta = 0.009$  و مقادیر مختلف  $E$
- ۵۹ .....  $E$
- شکل ۲۲-۴: خطوط جریان و حرکت ذره با  $\zeta = 0.009$  ،  $E = 3.5$  و  $X = 0.8$  در الف)  $t = 0$  ب)  $t = 1.16$  (ج)
- ۶۰ .....  $t = 2.42$  (د) و  $t = 1.68$
- شکل ۲۳-۴: خطوط جریان برای الف)  $X = 0.8$  ب)  $X = 0.57$  (ج)  $X = 0$  (د)  $X = -0.29$  (ه)  $X = -0.57$  (و)
- ۶۱ .....  $X = -0.8$
- شکل ۲۴-۴: مسیر حرکت ذره با  $\zeta = 0.13$  ،  $E = 3.5$  و مقادیر مختلف  $X$
- ۶۲ .....  $X$
- شکل ۲۵-۴: خطوط جریان و حرکت ذره با  $\zeta = 0.13$  ،  $E = 3.5$  و  $X = 0.57$  در الف)  $t = 0$  ب)  $t = 19.85$  (ج)
- ۶۳ .....  $t = 25.43$  (د)  $t = 23.52$
- شکل ۲۶-۴: خطوط جریان و حرکت ذره با  $\zeta = 0.13$  ،  $E = 3.5$  و  $X = 1.15$  در الف)  $t = 0$  ب)  $t = 14.7$
- ۶۴ .....  $t = 36.75$  (د)  $t = 24.26$  (ج)
- شکل ۲۷-۴: مسیر حرکت ذره با  $\zeta = 0.009$  ،  $E = 3.5$  ،  $X = 0$
- ۶۵ .....  $X = 0$  ،  $E = 3.5$  ،  $\zeta = 0.13$
- شکل ۲۸-۴: مسیر حرکت ذره با  $\zeta = 0.13$  ،  $E = 3.5$  ،  $X = 0$
- ۶۵ .....  $X = 0$  ،  $E = 3.5$  ،  $\zeta = 0.13$
- شکل ۲۹-۴: نمایش هندسه بیضی
- ۶۶ .....  $D = 0.043$  و مقدار  $X = 0$  ،  $E = 3.5$  ،  $\zeta = 0.13$
- شکل ۳۰-۴: مسیر حرکت ذره با  $\zeta = 0.13$  ،  $E = 3.5$  ،  $X = 0$  و مقدار  $D = 0.043$
- ۶۶ .....  $D = 0.043$  و  $X = 0$  ،  $E = 3.5$  ،  $\zeta = 0.009$
- شکل ۳۱-۴: مسیر حرکت ذره با  $\zeta = 0.009$  ،  $E = 3.5$  ،  $X = 0$  و  $D = 0.043$
- ۶۷ .....  $D = 0.043$  و  $X = 0$  ،  $E = 3.5$  در  $\Gamma = 4.33$  با استوانه‌ای
- شکل ۳۲-۴: تأثیر نسبت زتا پتانسیل بر حرکت ذره استوانه‌ای با  $\Gamma = 4.33$  در  $E = 3.5$  ،  $X = 0$  و  $D = 0.043$
- ۶۷ .....  $D = 0.043$  و  $X = 0$  ،  $E = 3.5$  در  $\Gamma = 4.33$  با استوانه‌ای

شکل ۴-۳۳: تأثیر جریان الکتریکی بر حرکت ذره استوانه‌ای با  $\Gamma = 4.33$  در  $X = 0$ ،  $D = 0.043$  و  $\zeta = 0.13$ ..... ۶۸

شکل ۴-۳۴: هندسه میکروچیپ..... ۶۸

شکل ۴-۳۵: مسیر حرکت ذره صلب با چند زتا پتانسیل مختلف در  $E = 3.5$ ،  $e = 6.5$ ،  $D = 0.043$  و  $X = 0$ ..... ۷۰

شکل ۴-۳۶: مسیر حرکت ذره صلب با سه زتا پتانسیل مختلف در  $E = 3.5$ ،  $e = 9.5$ ،  $D = 0.043$  و  $X = 0$ ..... ۷۰

شکل ۴-۳۷: مسیر حرکت ذره صلب با سه زتا پتانسیل مختلف در  $E = 3.5$ ،  $e = 15$ ،  $D = 0.043$  و  $X = 0$ ..... ۷۱

## فهرست جداول

- جدول ۱-۲: فرضیات موردنیاز برای مدل‌سازی الکتروکننتیک خطی..... ۲۵
- جدول ۱-۳: فرضیات مورد استفاده در پژوهش حاضر..... ۳۲
- جدول ۱-۴: ثوابت مورد استفاده در مدل‌سازی عددی..... ۴۱
- جدول ۲-۴: پارامترهای بی‌بعد مورد استفاده..... ۴۲
- جدول ۳-۴: خواص مورد استفاده در پژوهش وو..... ۴۲
- جدول ۴-۴: خواص مورد استفاده در پژوهش فنگ ژانگ..... ۴۴
- جدول ۵-۴: خواص مورد استفاده در پژوهش دیویسون..... ۴۶
- جدول ۶-۴: ثوابت مورد استفاده در هندسه بررسی شده به منظور دستیابی به حداقل المان موردنیاز..... ۴۹
- جدول ۷-۴: ثوابت مورد استفاده در شبیه‌سازی میکروچیپ..... ۶۹

## فهرست علائم

$V$	$\zeta_{induced}$	پتانسیل القایی
$V$	$\phi$	پتانسیل الکتریکی
$m^2/V.s$	$\mu_{eo}$	تحرک الکترواسماتیک
$m^2/V.s$	$\mu_{ep}$	تحرک الکتروفورتیک
$J/K$	$K_B$	ثابت بولتزمن
-	$\epsilon_p$	ثابت دی‌الکتریک ذره
-	$\epsilon_m$	ثابت دی‌الکتریک سیال
$m$	$\Delta X$	جابه‌جایی افقی الکتروود بالایی جریان ثانویه
$kg$	$m_p$	جرم ذره
-	$\bar{E}$	جریان الکتریکی بی‌بعد ثانویه
-	$\bar{e}$	جریان الکتریکی بی‌بعد سوم
$V/m$	$E_2$	جریان الکتریکی ثانویه
$C/m^3$	$\rho_e$	چگالی بار آزاد
$kg/m^3$	$\rho$	چگالی سیال
-	$RMS$	خطای مربع میانگین
$K$	$T$	دمای محلول الکتروولیت
-	$\bar{\zeta}$	زتا پتانسیل بی‌بعد
$V$	$\zeta_p$	زتا پتانسیل ذره
$V$	$\zeta_w$	زتا پتانسیل دیواره کانال
$s$	$t$	زمان
$m/s$	$\vec{V}_p$	سرعت ذره
$rad/s$	$\vec{\omega}_p$	سرعت زاویه‌ای ذره

$m/s$	$\bar{U}$	سرعت سیال
$m$	$\kappa^{-1}$	طول دبای (ضخامت لایه الکتریکی دوگانه)
$m$	$L$	طول کانال
-	$Re$	عدد رینولدز
$m$	$W$	عرض کانال
	$n_0$	غلظت یون‌های موجود در سیال
$m$	$L_2$	فاصله الکترودهای جریان ثانویه
-	$\bar{D}$	قطر بی‌بعد ذره
$m$	$d_{particle}$	قطر ذره
$F/m$	$\varepsilon_0$	گذردهی خلأ
$Pa.s$	$\mu$	لزجت سیال
-	$\bar{X}$	مقدار جابه‌جایی بی‌بعد الکترودهای جریان ثانویه
$m/s$	$u_{fluid}$	مقدار سرعت سیال
$m$	$\vec{X}_p$	موقعیت مرکز جرم ذره
$m$	$\vec{x}_p$	موقعیت نقاط سطح ذره
-	$C$	نسبت قطبیت پذیری
$N$	$\vec{F}_E$	نیروی الکترواستاتیک
$N$	$\vec{F}_h$	نیروی کل هیدرودینامیک
$N$	$\vec{F}_{h\_in}$	نیروی هیدرودینامیک داخل لایه الکتریکی دوگانه
$N$	$\vec{F}_{h\_out}$	نیروی هیدرودینامیک خارج از لایه الکتریکی دوگانه



# فصل اول

## تاریخچه الکتروکنتیک و جداسازی

### ذرات

## تاریخچه الکتروکنیتیک و جداسازی ذرات

پدیده الکتروکنیتیک یکی از قدیمی‌ترین شاخه‌های علوم کلوئیدی محسوب می‌شود. فرانسیس هوکسبی - دستیار نیوتون- از اولین کسانی بود که به بررسی این شاخه از علم پرداخت [۱]. پدیده‌های الکتروفورسیس<sup>۱</sup>، الکترواسماسیسی<sup>۲</sup> نشات گرفته از مفهوم لایه الکتریکی دوگانه<sup>۳</sup> می‌باشند. تاریخچه پژوهش‌های مرتبط با علم الکتروکنیتیک و آشنایی با نحوه کشف پدیده‌های مرتبط با آن به درک بهتر این اصول حاکم بر این شاخه از علم کمک شایانی می‌کند. لذا در بخش حاضر، به بررسی اجمالی چگونگی کشف پدیده الکتروکنیتیک و پیشرفت‌های این شاخه از علم پرداخته و درنهایت برخی از روش‌های جداسازی ذرات معرفی می‌شود.

### ۱-۱- پدیده الکتروکنیتیک

الکساندر ولتا، در سال ۱۷۹۸ یک منبع پایدار و قابل اطمینان برای تولید الکتریسیته اختراع نمود که بعدها به نام پیل ولتا شهرت یافت. پیل ولتا شامل ورق‌های روی و نقره بود که توسط صفحات خیس شده در آب‌نمک به یکدیگر متصل شده بودند. این وسیله یک منبع قابل اعتماد برای تولید پتانسیل الکتریکی ثابت محسوب می‌شد و به‌عنوان مهم‌ترین وسیله در بسیاری از آزمایش‌های الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گرفت [۱].

پدیده الکترواسماسیسی و الکتروفورسیسی توسط فردیناند فردریچ رئوس<sup>۴</sup> [۲] در سال ۱۸۰۸ کشف شد. وی دانشمندی آلمانی بود که در مسکو به تحقیقات می‌پرداخت. رئوس ابتدا پدیده الکترواسماسیسی را در سال ۱۸۰۷ مشاهده کرد. وی مقداری خاک رس را داخل لوله U شکل قرار داد و مشاهده کرد که با اعمال جریان الکتریکی جریانی از آب از آند به سمت کاتد حرکت می‌کند. در آزمایش دوم، او مقداری ذرات شن را علاوه به لوله آزمایش مذکور افزود و مشاهده کرد که ذرات رس به سمت آند حرکت می‌کنند؛ باوجوداینکه وی تصور می‌کرد حرکت ذرات رس به دلیل نفوذ جریان

---

<sup>1</sup> Electrophoresis

<sup>2</sup> Electroosmosis

<sup>3</sup> Electric Double Layers (EDL)

<sup>4</sup> F. F. Reuss

الکترواسموسیس می‌باشد، سال‌ها بعد پژوهشگران دریافتند که این حرکت ناشی از پدیده الکتروفورسیس می‌باشد.

## ۱-۲- پیشینه جداسازی ذرات

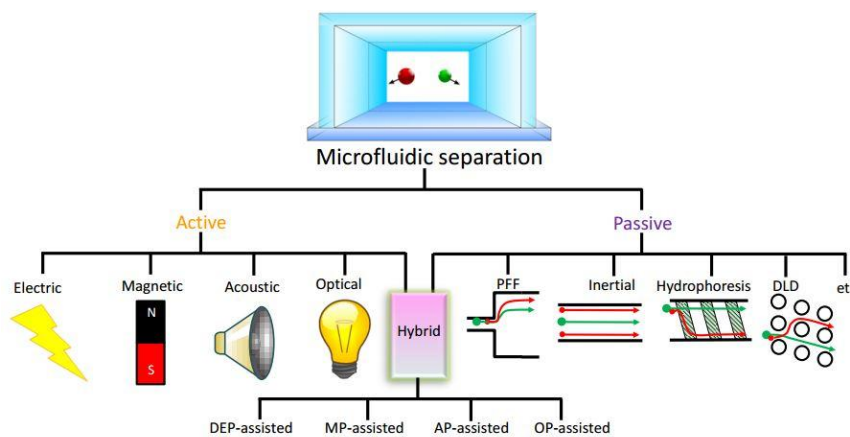
روش الکتروکنتیک شامل الکترواسموسیس، الکتروفورسیس می‌باشد، این روش‌ها نقش مهمی در انتقال و کنترل نمونه‌های بیولوژیک در ابعاد میکرو ایفا می‌کند. روش الکتروکنتیک به‌طور گسترده به‌منظور پمپاژ، بهبود اختلاط، جداسازی و مرتب‌سازی نمونه‌های بیولوژیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. الکترواسموسیس به دلیل مزایای منحصر به فرد خود از جمله کنترل ساده، امکان تغییر جهت جریان سیال، عدم استفاده از قطعه متحرک و پروفیل سرعت شبیه به یک پلاگ به‌طور گسترده به‌منظور پمپاژ سیال و نمونه‌های بیولوژیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌طور کلی جریان الکتروکنتیک سیال در داخل کانال، دارای رژیم آرام می‌باشد، چراکه سرعت جریان بسیار کم است بعلاوه طول مشخصه کانال نیز کوچک می‌باشد، بنابراین عدد رینولدز جریان الکتروکنتیک بسیار کوچک خواهد بود ( $Re \ll 1$ ).

در دهه گذشته پیشرفت‌های فراوانی در زمینه‌ی دستگاه‌های میکرو و همچنین فناوری آزمایشگاه-روی-یک-تراشه انجام شده است [۲]. این پیشرفت‌ها سبب توسعه آنالیز شیمیایی و بیوشیمیایی شده است. به‌عنوان نمونه امروزه بسیاری از تجهیزات ضروری یک آزمایشگاه واقعی روی یک تراشه کوچک جای داده شده، این تراشه قادر است وظیفه انتقال و واکنش شیمیایی بین نمونه‌های شرکت‌کننده در یک آنالیز را انجام دهد، همچنین تحلیل و بررسی فرآورده‌های یک واکنش شیمیایی از دیگر وظایف این تراشه می‌باشد. هرچند ابعاد کوچک یک تراشه آنالیز بیوشیمیایی سبب سهولت در حمل و نقل آن می‌شود و هزینه تمام شده آن را کاهش می‌دهد، اما پدیده‌های فیزیکی که در ابعاد کوچک اتفاق می‌افتد، چالش‌های جدیدی را پیش روی محققین قرار می‌دهد. کنترل و انتقال نمونه‌های بیولوژیک در ابعاد میکرو از مهم‌ترین چالش‌هایی است که محققین با آن روبه‌رو هستند.

جداسازی ذرات و سلول‌ها به‌عنوان یک ضرورت در کاربری‌های گسترده‌ی پزشکی و شیمی مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است [۳]؛ کاربردهای جداسازی ذرات در زمینه‌هایی مانند تشخیص بیماری حیاتی است. تجهیزات آزمایشگاه روی تراشه<sup>۱</sup> به دلیل سرعت و دقت بالا، فرآیند

<sup>1</sup> Lab-on-a-chip

اجرای ساده و کاهش هزینه و حجم نمونه مورد آزمایش به ابزارهای با ابعاد بزرگتر ارجحیت دارند [۴]. روش‌های جداسازی ذرات در حوزه میکروفلوئیدیک به دو حوزه فعال<sup>۱</sup> و منفعل<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی می‌شود. روش‌های فعال از میدان‌هایی نظیر الکتریکی، مغناطیسی، صوتی و نوری برای حرکت سلول‌ها استفاده می‌کنند؛ درحالی‌که روش‌های منفعل، نیروهای هیدرودینامیکی ذاتی، ساختمان کانال و موانع ساختگی را برای جداسازی ذرات بکار می‌بندند. ترکیب روش‌های مذکور به منظور استفاده از نقاط قوت هر دو روش و رفع نقاط ضعف آن مورد بررسی محققین بسیاری قرار گرفته است. شکل زیر خلاصه‌ای از این روش‌ها را به نمایش گذاشته است.



شکل ۱-۱: روش‌های جداسازی ذرات [۵]

### ۱-۲-۱- روش‌های منفعل

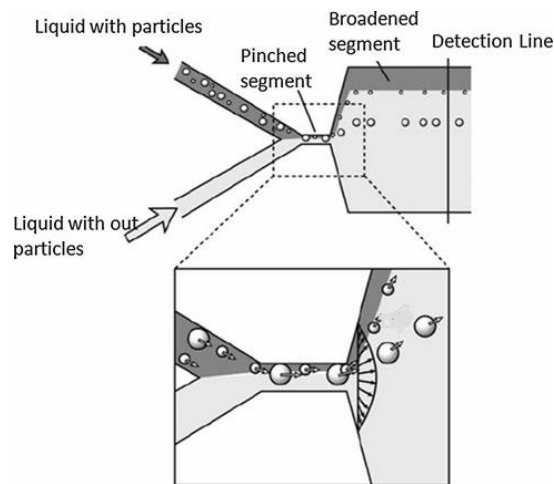
باوجود اینکه روش‌های منفعل به راحتی قابل استفاده است ولی هندسه ثابت و محدودیت ساخت کانال‌های میکرو، دامنه استفاده از آن‌ها برای نمونه‌های مختلف را با محدودیت مواجه می‌کند [۶]. جداسازی جریان تنگنا<sup>۳</sup> یک روش منفعل می‌باشد که برای طبقه‌بندی ذرات در میکرو کانال‌ها با استفاده از خصوصیات جریان آرام مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷]. دو جریان در این روش مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ یکی جریانی که حاوی ذرات مورد نظر است و دیگری جریانی بدون ذرات. همان‌طور که در شکل ۱-۲-۱ نمایش داده شده است، ذرات جریان اول توسط جریان دوم به سمت دیواره میکرو کانال هدایت می‌شوند. در ادامه ذرات تمایل دارند که توسط خط جریانی که از مرکز آن‌ها عبور می‌کند،

<sup>1</sup> Active

<sup>2</sup> Passive

<sup>3</sup> Pinched flow fractionation

هدایت شوند؛ این خط جریان برای ذرات کوچک و بزرگ متفاوت می‌باشد. ذراتی که از بخش تنگنا خارج می‌شوند، به وسیله خطوط جریان گسترده کننده بر اساس سایزشان جدا می‌شوند [۸].



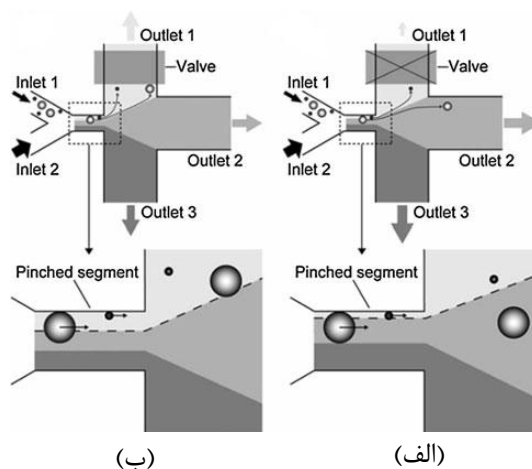
شکل ۱-۲: شماتیک جریان تنگنا [۸]

محدوده سایز ذرات طبقه‌بندی شده، به مقدار و توزیع دبی سیال در شاخه‌ها ورودی و جداسازی ذرات به شکل تنگنا و بخش ورودی تنگنا به کانال بستگی دارد. یامادا<sup>۱</sup> و همکاران در پژوهش تجربی خود دریافت که عرض تنگنا به سایز ذرات بستگی دارد [۸]. در معادله (۱-۱)  $w_0$  عرض خروجی،  $w_p$  عرض بخش تنگنا،  $Y_0$  موقعیت مرکز جرم ذره در خروجی و  $D$  قطر ذره می‌باشند. استفاده از روش جداسازی جریان تنگنا برای طبقه‌بندی قطرات بر اساس ابعادشان نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد [۹]. سای<sup>۲</sup> و همکاران در پژوهش خود یک اصلاحیه برای روش جداسازی جریان تنگنا را مورد استفاده قرار دادند. این اصلاحیه، استفاده از شیر در کانال مشترک خروجی بود. زمانی که شیر به طور کامل باز می‌باشد، موقعیت ذرات پس از تنگنا به اندازه‌ای نیست تا ذرات با سایز کمتر از میکرون را طبقه‌بندی کند؛ بنابراین همان‌گونه که در شکل ۱-۳ (ب) نمایش داده شده است ذرات بزرگ و کوچک از یک خروجی خارج می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۱-۳ (الف) نشان داده شده است، با کمی بستن شیر در خروجی ۱، دبی سیال در خروجی ۲ افزایش می‌یابد و ذرات بزرگ‌تر از خروجی ۲ خارج می‌شوند.

<sup>1</sup> Yamada

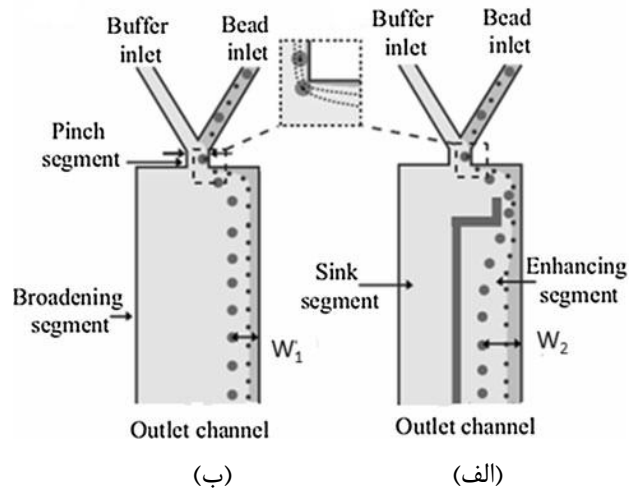
<sup>2</sup> Sai

$$Y_O = (w_p - \frac{D}{2}) \frac{w_o}{w_p} \quad (1-1)$$



شکل ۱-۳: روش جداسازی تنگنای اصلاح شده در حالت (الف) شیر خروجی ۱ نیمه بسته و (ب) شیر خروجی کاملاً باز [۱۰]

بنابراین با اصلاح دبی سیال در خروجی‌ها می‌توان ذرات موردنظر را به سمت خروجی خاصی هدایت کرد. جداسازی جریان تنگنای بهبودیافته توسط ویگ و کریستینسن مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، همان‌طور که در بنابراین با اصلاح دبی سیال در خروجی‌ها می‌توان ذرات موردنظر را به سمت خروجی خاصی هدایت کرد. جداسازی جریان تنگنای بهبودیافته توسط ویگ و کریستینسن مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، همان‌طور که در شکل ۱-۴ نشان داده شده است، یک سازه مارپیچ در بخش گسترده‌ی کانال مورد استفاده قرار گرفت. درواقع یک تنگنای دیگر با استفاده از این سازه به چیپ وارد شده است. با ورود ذرات از بخش تنگنای دوم به بخش با عرض بیشتر، فاصله بیت خطوط جریان بیشتر می‌شود که این امر سبب افزایش فاصله ذرات بزرگ‌تر از دیواره می‌گردد.



شکل ۱-۴: (الف) شماتیک روش جداسازی جریان تنگنا، (ب) شماتیک روش جداسازی جریان تنگنای بهبودیافته [۱۱]

زمانی که یک ذره در یک کانال حرکت می‌کند، دونیری برآ بر آن اثر می‌گذارند [۱۱]: نیروی ناشی از گرادیان برش<sup>۱</sup> و نیروی ناشی از تأثیر دیواره<sup>۲</sup>. نیروی ناشی از گرادیان برش در اثر پروفیل سهمی گونه سرعت در کانال می‌باشد. برای یک ذره کروی که در نزدیکی مرکز کانال می‌باشد، گرادیان سرعت بر روی نقطه‌ای روی کره که سمت دیواره است، بیش از نقطه‌ای است که روی دیواره و در امتداد مرکز کره می‌باشد [۱۲]. بنابراین کره از مرکز به سمت دیواره کانال حرکت می‌کند. نیروی ناشی از تأثیر دیواره، را می‌توان با توجه به جریان سیال اطراف ذره کروی در حضور دیواره‌ای که منجر به تشکیل ویک نامتقارن اطراف ذره می‌شود، توجیه کرد. این ویک نامتقارن سبب یک نیروی برآ شده که ذرات را از دیواره دور می‌کند [۱۳]. دونیری برآ برخلاف جهت یکدیگر عمل می‌کنند. موقعیت نهایی ذرات به نسبت بین سایز ذره و ابعاد کانال وابسته است؛ بنابراین جداسازی ذرات به این شیوه امکان‌پذیر می‌شود. سیگر<sup>۴</sup> و سیلبربرگ<sup>۵</sup> [۱۴]، اولین کسانی بود که حضور این دونیر را ذره کروی و قرارگیری ذرات در فاصله برابر ۰٫۶ شعاع کانال از مرکز آن را ثابت کردند. زمانی که ذرات در طول یک کانال با تعدادی مانع انبساطی حرکت می‌کنند، بر اساس اصل تمرکز اینرسی<sup>۶</sup> همه ذرات در کنار دیواره متمرکز می‌شوند [۱۱]. در این وسیله، متمرکز کردن ذرات بر اساس جریان گردابی که در مواع انبساطی، ایجاد می‌شود صورت می‌گیرد؛ در محفظه انبساط، نیروی برآی ناشی از تأثیر دیواره در

<sup>1</sup> Shear-gradient-induced

<sup>2</sup> Wall-effect-induced

<sup>3</sup> Wake

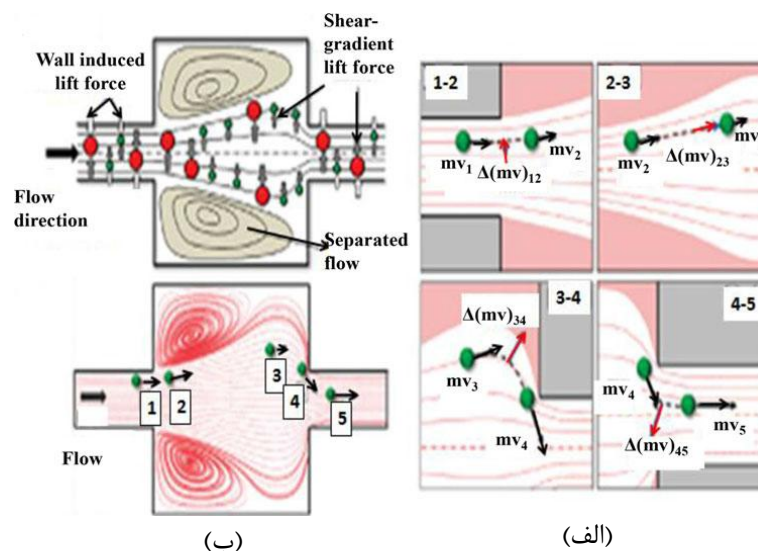
<sup>4</sup> G. Segre

<sup>5</sup> A. Silberberg

<sup>6</sup> Inertial focusing

مقایسه با نیروی ناشی از گرادیان برش به دلیل فاصله بیشتر از جریان اصلی تا دیواره‌های اطراف تضعیف می‌شود. بخش اعظم ذراتی که

از تعدادی کانال انبساط و انقباض می‌گذرند، نزدیک دیواره‌ها متمرکز می‌شوند. جداسازی اینرسی ذرات توسط نیروهای برای اینرسی و نیروی برای اینرسی القایی به دلیل تغییرات مومنتوم صورت می‌پذیرد. همان‌طور که در شکل ۱-۵ نشان داده شده است، زمانی که ذرات از یک محفظه انقباض به محفظه‌ی دیگر وارد می‌شوند، بین ذره و سیال، تبادل مومنتوم صورت می‌گیرد. در اولین مرحله بین ۱ و ۲ و ۲ و ۳، هیچ عدم تطابقی بین مسیر سیال و ذره مشاهده وجود ندارد؛ اما در ادامه و بین ناحیه ۳ و ۴ به دلیل وجود تبادل مومنتوم، مسیر ذرات با سیال متفاوت می‌شود. این عدم تطابق تحت تأثیر نیروی برای القایی به سمت دیواره می‌باشد.



شکل ۱-۵: (الف) جریان سیال و تبادل مومنتوم در یک جفت محفظه انبساط و انقباض در یک کانال مستقیم، (ب) مسیر ذرات در حضور تبادل مومنتوم [۱۱]

نیروی برای القایی برابر است با:

$$F_l = \rho_p \pi d^3 U^2 / 6 D_h \quad (2-1)$$

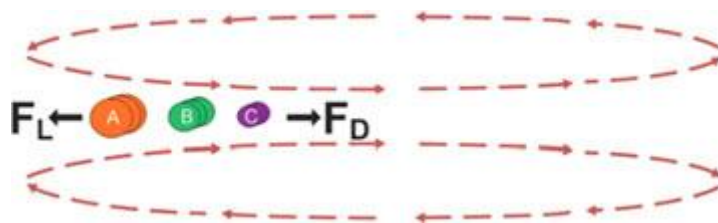
که در آن  $\rho_p$  چگالی ذره،  $d$  قطر ذره،  $U$  سرعت متوسط سیال و  $D_h$  قطر هیدرولیکی کانال می‌باشد. موقعیت تعادلی ذره از تعادل بین این نیروی برآ و نیروی درگ<sup>۱</sup> به دست می‌آید. همان‌طور

<sup>1</sup> Drag



که مشخص است این نیرو با مجذور قطر ذره و دبی سیال رابطه مستقیم دارد، بنابراین این نیرو بر ذرات بزرگ‌تر تأثیر بیشتری گذاشته و سبب جداسازی آن‌ها می‌شود.

تأثیر جریان دین<sup>۱</sup> در تغییر موقعیت تعادلی در شکل ۱-۶ نشان داده شده است. در جریان داخل میکروکانال منحنی شکل، یک جریان ثانویه به نام جریان دین ایجاد می‌گردد [۱۵]. در جریان داخل یک کانال منحنی شکل، فشار سیال در دیواره داخلی کمی بیش از دیواره خارجی است؛ بنابراین سیال در مرکز کانال تحت تأثیر این گرادیان فشار به بیرون حرکت کرده و سیال نزدیک دیواره‌های بالایی و پایینی به سمت داخل حرکت می‌کنند تا قانون بقای جرم نقض نشود. این موضوع مسبب ایجاد جریان ثانویه حاوی گردابه در مقطع کانال می‌باشد. این جریان ثانویه موقعیت تعادلی ذرات را با افزایش تأثیر نیرو برای اینرسی تغییر می‌دهد.



شکل ۱-۶: اعمال نیروهای برآ و درگ دین بر ذرات با ابعاد مختلف [۱۶]

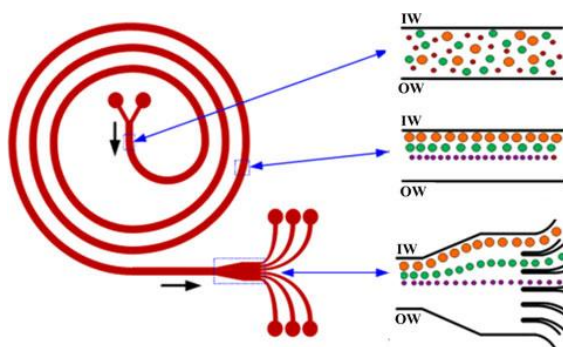
حضور نیروهای برآی اینرسی که یکی از آن‌ها تأثیر گرفته از گرادیان برشی به سمت دیواره کانال و دیگری تأثیر گرفته از دیواره و به سمت مرکز کانال می‌باشند، نیز بر موقعیت تعادلی ذرات تأثیرگذارند. جریان دین، سبب ایجاد نیروی درگی می‌شود که ذرات حاضر در دیواره بالایی و پایینی را به سمت دیواره داخل حرکت می‌دهد؛ با این حال ذرات نزدیک صفحه میانی (بین دیواره بالایی و پایینی) به بیرون هدایت می‌شوند. موقعیت تعادلی به عدد رینولدز<sup>۲</sup> و نسبت نیروی برآی اینرسی و نیروی درگ دین وابسته است [۱۷]. عدد جداسازی به این روش زمانی امکان‌پذیر است که  $R_f$  برای یک‌ذره بزرگ‌تر از ۱ و برای ذره دیگر کوچک‌تر از ۱ باشد. روابط مربوط به این عدد بدین شرح است:

<sup>1</sup> Dean flow  
<sup>2</sup> Reynolds

$$R_f = \frac{1}{\delta} (a/D_h)^3 \quad (3-1)$$

$$\delta = D_h/2r \quad (4-1)$$

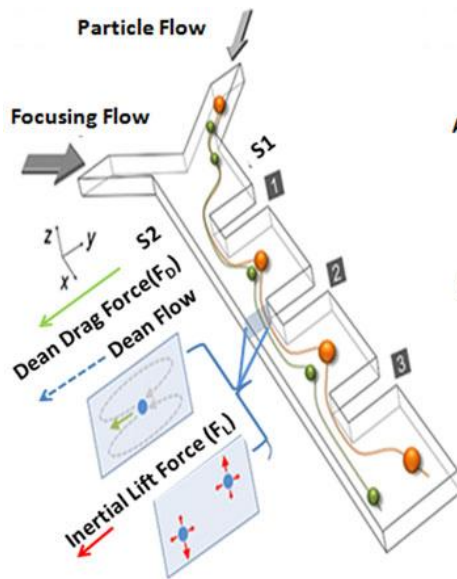
که در آن قطر هیدرولیکی کانال،  $r$  شعاع انحنای کانال و  $a$  قطر ذره می‌باشد. شکل ۷-۱ یک میکروکانال مارپیچ را برای جداسازی ذرات با قطرهای متفاوت نشان می‌دهد.



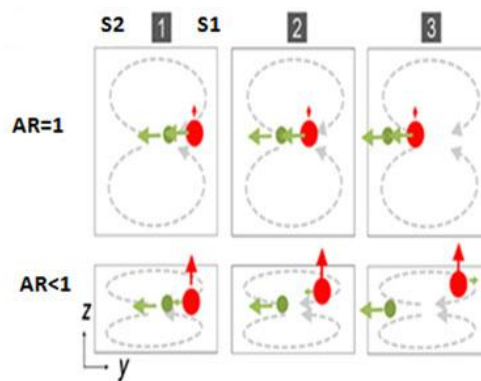
شکل ۷-۱: جداسازی ذرات در یک میکرو کانال مارپیچ [۱۸]

استفاده از نیروی درگ دین برای هدایت ذرات به سمت دیواره داخلی کانال مارپیچ توسط بهابگات<sup>۱</sup> اثبات شده است [۱۹]. جداسازی ذرات به این روش بر پایه تعادل نیرویی بین نیروی لیفت اینرسی و نیروی درگ دین می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۶-۱ (الف) نشان داده شده است، دو جریان که یکی حاوی ذرات می‌باشد و دیگری برای نزدیک کردن ذرات به سمت دیواره مورد استفاده قرار می‌گیرد، وارد کانال می‌شوند.

<sup>1</sup> Bhagat



(ب)



(الف)

شکل ۸-۱: (الف) نمایش تأثیر نیروهای لیفت اینرسی و درگ دین بر ذرات با دو اندازه مختلف، (ب) شماتیک حرکت ذرات در کانال دارای چند بخش انبساط-انقباض [۲۰]

در صورتی که نسبت طول به عرض کانال برابر یک باشد، مقدار نیروی لیفت اینرسی  $F_L$  کمتر از نیروی درگ دین  $F_{DD}$  می‌باشد. بنا بر این ذرات سبز و قرمز تحت تأثیر جریان دین قرار گرفته و به سمت دیواره  $S_2$  حرکت می‌کنند. با دقت در اگر اندازه ذره بیش از مقدار قطع بحرانی<sup>۱</sup> باشد - که توسط تعادل بین نیروی لیفت اینرسی و نیروی درگ دین به دست می‌آید - ذره مذکور به دلیل  $F_L > F_{DD}$  به سمت دیواره  $S_1$  و ذرات کوچک‌تر از مقدار قطع بحرانی همچنان به سمت دیواره  $S_2$  حرکت می‌کنند (شکل ۸-۱)

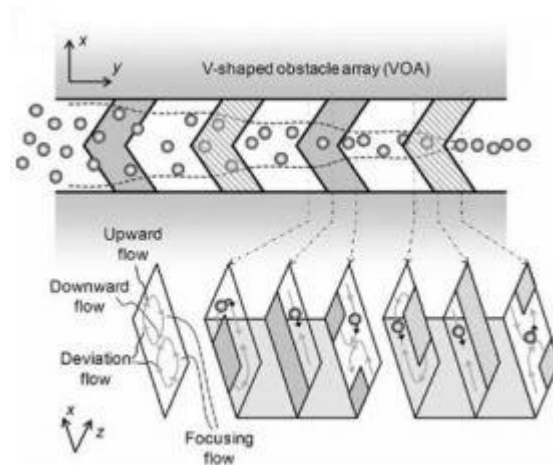
هیدروفورسیس<sup>۲</sup> به حرکت ذرات درون سیال تحت تأثیر میدان فشار ناشی از میکروسازه‌ها گویند. چوی<sup>۳</sup> و همکاران [۲۱] از این نیرو برای جداسازی میکروکره‌ها و سلول‌ها در یک میکروکانال استفاده کردند. مفهوم کلی هیدروفورسیس اولین بار برای توضیح حرکت ذره داخل تجهیزات میکروفلوئیدیک حاوی موانع در دیواره بالا و پایین کانال معرفی شد [۲۱]. جداسازی به دلیل انحراف از

<sup>1</sup> Critical cutoff value

<sup>2</sup> Hydrophoresis

<sup>3</sup> Choi

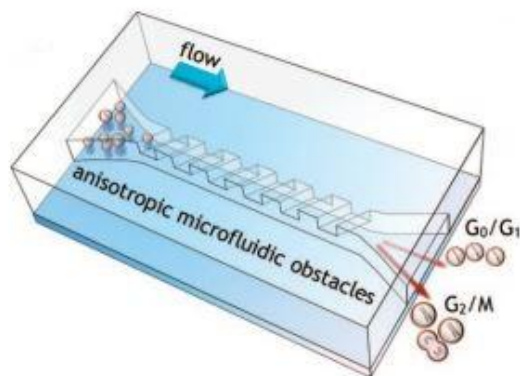
مسیر وابسته به سایز ذرات در جریان عرضی رخ می‌دهد که ناشی از گرادیان فشار عرضی می‌باشد. اخیراً چوی و همکاران [۲۲] از هیدروفورسیس برای متمرکز کردن ذرات و گلبول‌های قرمز خون در مرکز یک میکروکانال استفاده کردند. موانع V شکل جایگزین شده بر روی دیواره بالایی و پایینی در این پژوهش، گرادیان فشار ایجاد کرده و سبب تغییر مسیر ذرات می‌شود.



شکل ۹-۱: شماتیک میکروکانال و موانع V شکل مورد استفاده در پژوهش چوی [۲۲]

جریانی که از میکروسازه‌ها (مثلاً موانع موجود در میکروکانال) عبور می‌کند، سبب ایجاد جریان عرضی و تغییر الگوی جریان به شکل مارپیچ می‌گردد (شکل ۹-۱). مکانیزم‌های مختلفی برای جداسازی ذرات با استفاده از این جریان مارپیچ استفاده شده است. ذرات به داخل جریان‌های مارپیچ اطراف میکروسازه‌ها کشیده می‌شوند و توسط نیروی گرانش و استریکس<sup>۱</sup> (حرکت ذرات با ابعاد متفاوت اطراف میکروسازه‌ها) رفتار مختلفی با آن‌ها می‌شود. این میکروسازه‌ها قابلیت کنترل توزیع سلول‌ها با قطرهای متفاوت به کوچکی ۰٫۷،۳ را داخل یک میکروکانال را دارند [۲۱]. اخیراً چوی و همکاران موفق شدند تا سلول‌ها انسانی را بین  $G_0/G_1$  و  $G_2/M$  در چرخه سلولی از یکدیگر جدا کنند. چرخه سلولی شامل چهار مرحله است:  $G_1$  (حرف  $G$  به معنای رشد است)،  $S$  (سنتر DNA)،  $G_2$  و  $M$  (مرحله تقسیم سلولی) [۲۳].

<sup>1</sup> Sterics

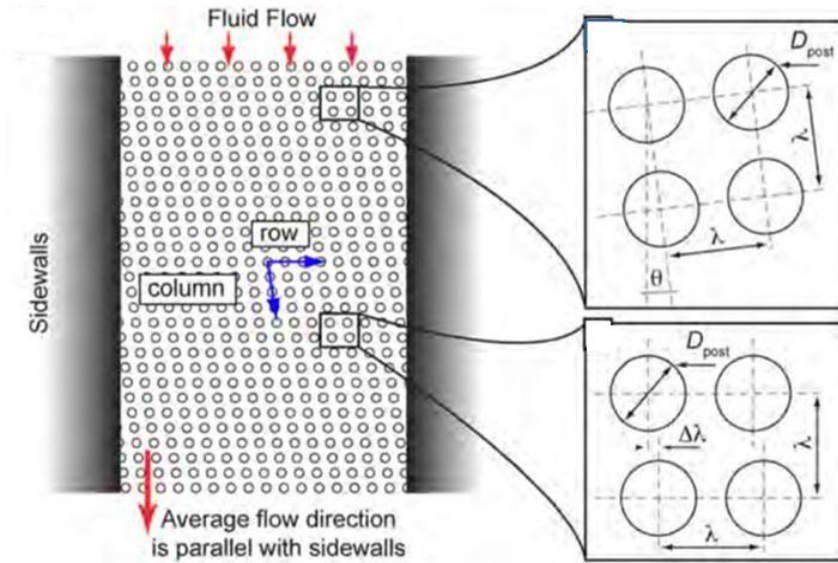


شکل ۱-۱۰: شماتیک جداسازی سلول‌ها بین دو مرحله چرخه سلولی به روش هیدروفورسیس [۲۳]

جابه‌جایی عرضی افقی تعیین‌کننده که به اختصار DLD گفته می‌شود، یک روش جداسازی پیوسته ذرات است که از تقسیم غیرمتقارن جریان سیال اطراف موانع استفاده می‌کند. جابه‌جایی عرضی افقی تعیین‌کننده<sup>۱</sup> که به اختصار DLD گفته می‌شود، یک روش جداسازی پیوسته ذرات است که از تقسیم غیرمتقارن جریان سیال اطراف موانع استفاده می‌کند [۲۴]. ذراتی که از میان تعدادی مانع بافاصله‌ای بزرگ‌تر از ابعاد ذرات عبور می‌کنند، مسیر حرکت را بر اساس ابعاد و تغییر شکل‌پذیری خود انتخاب می‌کنند. ذرات با ابعاد و تغییر شکل‌پذیری مشخص، از مسیر حرکت معادلی پیروی کرده که در نتیجه به روش جداسازی کارآمدی منجر می‌شود [۲۴]. فاصله مرکز تا مرکز دو مانع مجاور با  $\lambda$  و قطر هر مانع با  $D_{post}$  نمایش داده می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۱-۱۱ نشان داده شده، زاویه قرارگیری مجموعه این موانع با جریان سیال را زاویه تغییر مسیر<sup>۲</sup> نیز گفته و با  $\theta$  نمایش می‌دهند. دو روش برای قرارگیری موانع وجود دارد؛ در روش اول، آرایش مربعی از موانع با زاویه  $\theta$  می‌چرخد و در روش دوم آرایش لوزی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۵]. مطالعات نشان می‌دهد که تعامل بین ذره در حال حرکت و موانع، تقارن موجود در مسیر حرکت ذره را شکسته و سبب تغییر مسیر ذره می‌شود. با وجود اینکه این تغییر مسیر برای هر مانع کوچک می‌باشد اما تکرار آن در موانع متعدد، جداسازی ذرات را امکان‌پذیر می‌نماید.

<sup>1</sup> Deterministic lateral displacement

<sup>2</sup> Migration angle

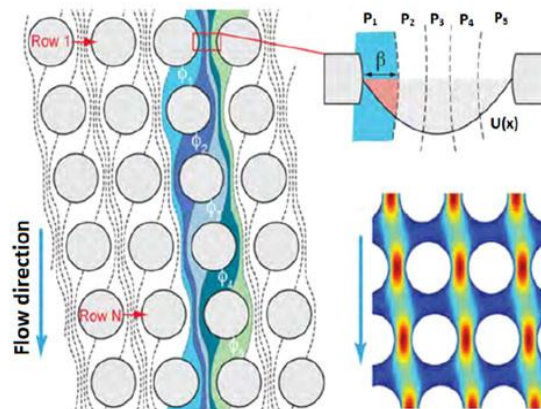


شکل ۱-۱۱: شماتیک یک چیپ DLD به همراه موانع آن [۲۵]

همان‌طور که در شکل ۱-۱۲ نشان داده شده، عرض جریان  $\beta$  نشان‌دهنده محدودیت ابعاد ذره برای جداسازی به روش DLD می‌باشد. مقدار  $\beta$  با استفاده از رابطه (۵-۱) به دست می‌آید که در آن  $N$  تعداد تکرار آرایش‌ها و  $d$  قطر موانع می‌باشد. اندازه بحرانی ذره نیز از رابطه (۶-۱) به دست می‌آید.

$$\beta = \sqrt{(N/3)(d/N)} \quad (۵-۱)$$

$$D_c = 2\beta \quad (۶-۱)$$



شکل ۱-۱۲: جریان سیال و پروفیل سرعت آن بین موانع [۲۶]

## ۱-۲-۱- روش‌های فعال

زمانی که یک ذره خنثی در جریان الکتریکی غیریکنواخت قرار می‌گیرد، ذره باردار شده و تحت تأثیر نیرویی به نام دی‌الکتروفورسیس<sup>۱</sup> قرار می‌گیرد [۲۷]. اگر جریان همگن باشد، نیروی DEP وارد شده بر ذره خنثی صفر می‌شود. DEP به صورت گسترده برای به دام انداختن، متمرکز کردن، جابه‌جایی و طبقه‌بندی ذرات موجود در سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد. رابطه‌ی زیر برای نیروی DEP گزارش شده است [۲۸]:

$$F(t) = 2\pi\epsilon_m r^3 \{ \text{Re}(f_{CM}(\omega)) \nabla E_{rms}^2 + \text{Im}(f_{CM}(\omega)) \times (E_x^2 \nabla \varphi_x + E_y^2 \nabla \varphi_y + E_z^2 \nabla \varphi_z) \} \quad (7-1)$$

در رابطه  $r$  شعاع ذره،  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای،  $E_{rms}$  مقدار ریشه متوسط مربع<sup>۲</sup> جریان الکتریکی اعمال شده،  $E_i$  و  $\varphi_i$  اندازه و فاز اجزای جریان الکتریکی در جهت محورهای اصلی می‌باشند.  $\text{Re}(f_{CM}(\omega))$  و  $\text{Im}(f_{CM}(\omega))$  بخش‌های موهومی و حقیقی فاکتور قطبی کلازیوس-موسوتی<sup>۳</sup> می‌باشند که با CM نمایش می‌دهند. رابطه (۷-۱) دارای دو بخش می‌باشد [۲۸]: بخش اول نیروی DEP تولید شده توسط قسمت حقیقی CM القایی به وسیله مومنوم قطبی ذره و  $E_{rms}^2$  می‌باشد. این بخش، سبب جذب و دفع ذره به سمت الکترودها بر اساس اینکه مقدار حقیقی CM مثبت یا منفی باشد، می‌شود. رابطه CM بدین شرح است:

$$f_{CM}(\epsilon_p^*, \epsilon_m^*, \omega) = \frac{\epsilon_p^*(\omega) - \epsilon_m^*(\omega)}{\epsilon_p^*(\omega) + 2\epsilon_m^*(\omega)} \quad (8-1)$$

در معادله (۸-۱)  $\epsilon_p^*$  و  $\epsilon_m^*$  قابلیت قطبیت پذیری<sup>۴</sup> مختلط وابسته به فرکانس ذره و سیال می‌باشند. اگر  $\epsilon_p^* > \epsilon_m^*$  مقدار CM مثبت شده و در نتیجه نیروی DEP در جهت گرادیان جریان الکتریکی خواهد بود. به این نیرو، DEP مثبت می‌گویند سبب حرکت ذرات به سمت جریان الکتریکی قوی‌تر می‌شود. اگر  $\epsilon_m^* > \epsilon_p^*$  مقدار CM منفی شده و نیروی DEP در خلاف جهت گرادیان میدان

<sup>1</sup> Dielectrophoresis

<sup>2</sup> Root-mean-square

<sup>3</sup> Clausius-Mossotti

<sup>4</sup> permittivity

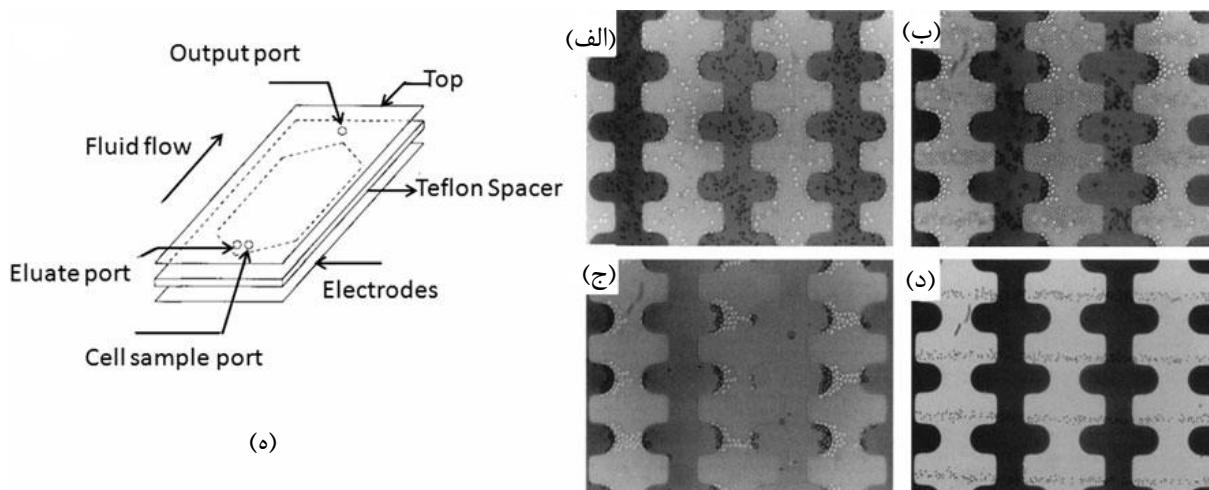
الکتریکی وارد می‌شود. به این نیرو، DEP منفی گویند و در جهت میدان الکتریکی ضعیف‌تر به ذرات وارد می‌شود.

بخش دوم معادله (۸-۱) جزء متحرک میدان می‌باشد که به بخش موهومی CM و ناهمگنی مکانی  $\Delta\varphi_i$  وابسته است. این بخش چگونگی حرکت توزیع میدان را توصیف می‌کند. با استفاده از رفتار وابسته به فرکانس خاصیت دی‌الکتریک ذره، از نیروی DEP برای جداسازی و طبقه‌بندی ذرات می‌توان استفاده نمود [۲۸]. با دقت در معادله (۸-۱) می‌توان دریافت که نیروی DEP بر اساس ابعاد و خواص ذاتی ذره متفاوت می‌باشد. در AC DEP با استفاده از فرکانس جریان الکتریکی، جداسازی ذرات مختلف دارای خواص دی‌الکتریک متفاوت قابل‌دستیابی است [۲۹]. اگر فرکانس جریان بین فرکانس دو ذره غیرمشابه باشد، یک‌ذره DEP منفی و ذره دیگر DEP مثبت را تجربه می‌کند؛ به این حالت، پیوستگی DEP تفاضلی<sup>۱</sup> گویند که به‌منظور جداسازی و طبقه‌بندی ذرات مورد استفاده قرار می‌گیرد. نمایش شماتیک محفظه جداسازی روش DEP تفاضلی در شکل ۱-۱۳-ه به نمایش درآمده است. در این روش نمونه سلولی به محفظه وارد شده و ولتاژ الکتریکی به الکترودهای DEP وارد می‌شود. در یک کار پژوهشی، نمونه خونی حاوی تومورهای سرطانی وارد چیپ می‌شود. در ابتدای پژوهش، فرکانس اعمالی 200 kHz می‌باشد که سبب فرار تعدادی از سلول‌های سرطانی می‌شود. این فرکانس به تدریج کم شده تا در نهایت با اعمال فرکانس ۲۰ کیلوهرتز به مدت ۲۰ دقیقه ۹۹٪ تومورهای سرطانی نزدیک الکترودها به دام می‌افتند.

---

<sup>1</sup> Differential DEP affinity





شکل ۱-۱۳: (الف) الی (د): مراحل مختلف جداسازی تومورهای سرطانی از خون به روش DEP تفاضلی، (ه): شماتیک یک میکروچیپ جداسازی ذرات به روش DEP تفاضلی [۳۰]

استفاده از جریان الکتریکی DC کنترل دقیق تر ذرات را به وسیله تنظیم مقدار جریان الکتروکنتیک و DEP فراهم می کند [۳۱]. در روش DC DEP دو پدیده مشاهده می شود:

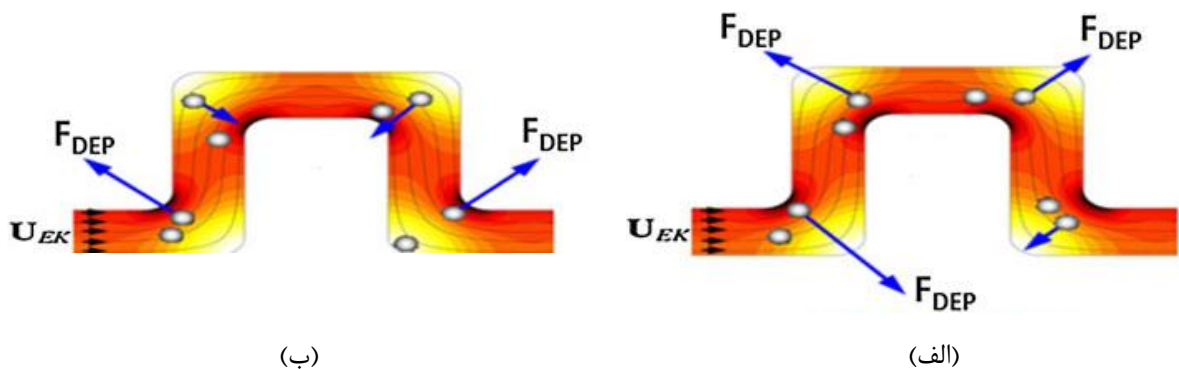
۱. جریان الکتروفوریتیک<sup>۱</sup> که در آن غلظت سیال در بخش های مختلف چیپ متفاوت است.
۲. به دام افتادن که در آن ذرات بی حرکت می شوند.

جریان، زمانی اتفاق می افتد که DEP بر انتشار<sup>۲</sup> غلبه می کند اما از جریان الکتروکنتیک ضعیف تر است و به دام افتادن زمانی اتفاق می افتد که DEP بر انتشار، جابه جایی<sup>۳</sup> و جریان الکتروکنتیک غلبه می کند. از حالت به دام افتادن می توان به منظور جداسازی ذرات استفاده کرد. همان طور که در شکل ۱۴-۱ نشان داده شده است، با تغییر هندسه چیپ های مورد بررسی می توان بدون استفاده از الکترودهای داخلی، میدان الکتریکی غیریکنواخت ایجاد کرد تا به وسیله آن حرکت ذره را کنترل کرد [۳۲]. همان طور که شکل ۱۴-۱ مشاهده می شود جریان الکتریکی در دیواره داخلی هر پیچ خوردگی بیش از جریان در دیواره خارجی آن می باشد (جریان الکتریکی کمتر با رنگ روشن تر نمایش داده شده است).

<sup>1</sup> Electrophoretic streaming

<sup>2</sup> Diffusion

<sup>3</sup> Advection



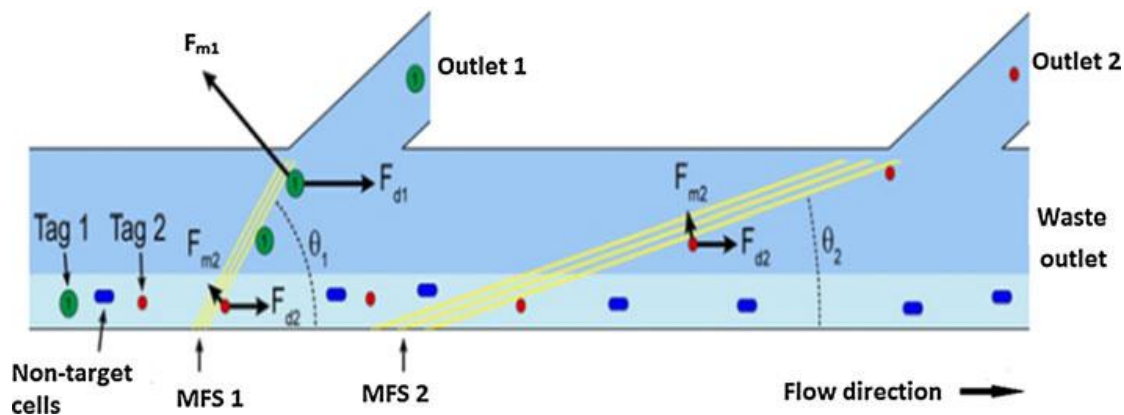
شکل ۱-۱۴: (الف) DEP منفی و (ب) DEP مثبت که بر ذره با رسانایی متفاوت اعمال می‌شود [۳۲]

زمانی که ثابت دی‌الکتریک ذره از سیال بیشتر باشد، مقدار CM منفی شده و نیروی DEP منفی می‌شود و ذره به سمت ناحیه با جریان الکتریکی کمتر حرکت می‌کند. بر اساس رابطه (۱-۸) نیروی DEP با گرادیان میدان الکتریکی متناسب است؛ بنابراین، ذره در دیواره داخلی تحت تأثیر مقدار نیروی بیشتری نسبت به ذره در دیواره خارجی قرار می‌گیرد. ذراتی که تحت تأثیر نیروی DEP منفی قرار می‌گیرند، پس از چندپیچ خوردگی به سمت مرکز کانال منحرف می‌شوند. نیروی DEP مثبت بر ذرات در دیواره داخلی اعمال می‌شود، مکانی که قدرت میدان و گرادیان جریان الکتریکی قدرتمندتر می‌باشد؛ بنابراین ذرات به حرکت خود در کنار دیواره کانال ادامه می‌دهند. این روش به منظور جداسازی ذرات با ابعاد و رسانش متفاوت مورد استفاده قرار می‌گیرد (در سیالی که مقدار رسانش الکتریکی آن بین ذرات مورد بررسی می‌باشد). این روش توسط کانال‌هایی با هندسه S شکل و با استفاده از DEP منفی مورد به اثبات رسیده است [۳۳].

روش مغناطیسی جداسازی و طبقه‌بندی ذرات مزایای مختلفی را ارائه می‌دهد از جمله: کاهش زمان طبقه‌بندی و کاهش احتمال آسیب‌دیدگی سلول‌ها. گفتنی است تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در روش مغناطیسی در مقایسه با سایر روش‌های فعال ارزان‌تر می‌باشد [۳۴]. جداسازی فلورسنس-فعال<sup>۱</sup> شده (FACS) یک روش جداسازی ذرات داخل مخلوط با راندمان پایین حدود  $10^7$  ذره در ساعت می‌باشد [۲۷]. با استفاده از این روش، زمان مورد استفاده برای جداسازی سلول‌های نادر بسیار زیاد می‌باشد [۳۵]. به عنوان روشی جایگزین و برای افزایش راندمان از میدان مغناطیسی با

<sup>1</sup> Fluorescence-activated

گرادیان بالا و برچسب‌گذاری فلورسنت<sup>۱</sup> (MACS) می‌توان استفاده کرد. شکل ۱-۱۵ یک جداساز چندهدفه را نمایش می‌دهد که پیش‌از این گزارش شده است.



شکل ۱-۱۵: جداساز چندهدفه به روش مغناطیسی [۳۶]

این وسیله به منظور جداسازی دو نوع سلول مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش MACS، جداسازی به وسیله حضور و عدم حضور مغناطیس صورت می‌گیرد؛ اما در وسیله مذکور این روش با نیروی هیدرودینامیک ترکیب شده و راندمان را نسبت به روش MACS افزایش داده است. روش جداسازی ذرات باردار در دو جریان الکتریکی و سیال در خلاف جهت یکدیگر نیز مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این روش جهت دو جریان مذکور خلاف یکدیگر می‌باشند و ذرات را بر اساس بار از یکدیگر جدا می‌کند [۳۷]. یکی از نمونه‌های این روش پژوهش جلما و همکاران می‌باشد. یک جریان متأثر از فشار و یک جریان متأثر از میدان الکتریکی در خلاف جهت یکدیگر و در یک کانال همگرا-واگرا<sup>۲</sup> اعمال می‌شوند؛ در نتیجه ذرات با بار الکتریکی خاص در بازه پایین به دام می‌افتند [۳۷].

### ۳-۱- نوآوری و گام‌های ابتکاری

تاکنون مطالعات فراوانی در حوزه طبقه‌بندی ذرات صورت گرفته است؛ اما این اولین بار است که طبقه‌بندی ذرات بر اساس مقدار زتا پتانسیل و فارغ از هندسه ذره مورد بحث قرار می‌گیرد. در مطالعات گذشته، ابعاد ذره و هندسه نقشی تعیین‌کننده در جداسازی ذرات داشتند؛ نقص این موضوع

<sup>1</sup> Fluorescent

<sup>2</sup> Converging-diverging

به‌خصوص در مورد جداسازی اجزای خون زمانی مطرح می‌شود که گلبول‌های قرمز شکلی بشقابی شکل دارند که تصویر آن در دو صفحه مختلف به شکل بیضی و دایره تبدیل می‌شود؛ بنابراین امکان جداسازی کامل گلبول‌های قرمز میسر نیست. با استفاده خواص فیزیکی این موضوع کاملاً مرتفع می‌شود. در این پژوهش از زتا پتانسیل به‌عنوان عامل اصلی جداسازی ذرات استفاده‌شده است. در نتیجه مواد فارغ از هندسه و ابعادشان و فقط بر اساس مقدار زتا پتانسیل جدا می‌شوند. از نواقص این روش می‌توان به استفاده از الکترودهای جریان ثانویه اشاره کرد که در ولتاژهای بالا، پدیده گرمایش ژول را ایجاد می‌کنند.

## فصل دوم

# مفاهیم الکتروکنٹیک کلاسیک و

## غیر خطی

## مفاهیم الکتروکنتیک کلاسیک و الکتروکنتیک غیرخطی

### ۲-۱- لایه دوگانه الکتريکی

لایه دوگانه الکتريکی توسط هلمهولتز<sup>۱</sup> در سال ۱۸۵۰ معرفی گردید. برخی از سطوح جامد پس از تماس با محلول الکترولیت، دارای بار الکتريکی سطحی می‌شود به‌عنوان مثال شیشه دارای بار مثبت و پلاستیک دارای بار منفی می‌گردد. بارهای الکتريکی سطح جامد، یون‌های با بار مخالف خود را از درون محلول الکترولیت جذب می‌نمایند و لایه‌ای از یون‌های مخالف بر روی سطح جامد تشکیل می‌گردد؛ در نتیجه توزیع یون‌های آزاد در محلول الکترولیت تغییر می‌کند. این لایه که به دلیل جاذبه الکترواستاتیک کاملاً به سطح جامد متصل شده و توانایی حرکت ندارد (شکل ۲-۱) لایه متراکم<sup>۲</sup> یا لایه استرن<sup>۳</sup> نام دارد که ضخامت آن در حدود چند انگسترم است. بافاصله گرفتن از لایه استرن، چگالی بار نیز کاهش می‌یابد. فاصله بین لایه استرن و بخش خنثی سیال را لایه دیفیوز<sup>۴</sup> می‌گویند؛ یون‌های موجود در این لایه برخلاف لایه استرن متحرک می‌باشند. مجموعه دولایه دیفیوز و استرن را، لایه دوگانه الکتريکی گویند. مرز میان این دو بخش از لایه دوگانه الکتريکی یعنی لایه استرن و لایه دیفیوز را، صفحه برش<sup>۵</sup> گویند.

همان‌طور که پیش‌از این گفته شد به دلیل حضور جاذبه الکترواستاتیک بین یون‌های مخالف و بارهای سطحی جسم جامد می‌توان فرض نمود که سرعت سیال در لایه استرن صفر بوده و حرکت سیال از صفحه برش آغاز می‌گردد. از فرض مذکور می‌توان به‌عنوان یک شرط مرزی برای محاسبه سرعت سیال بهره برد. مقدار پتانسیل الکتريکی در صفحه برش بانام زتا پتانسیل شناخته‌شده و مقدار آن در بسیاری از مدل‌های الکتروکنتیک به‌صورت تقریبی همان پتانسیل سطح جامد در نظر گرفته می‌شود [۳۸].

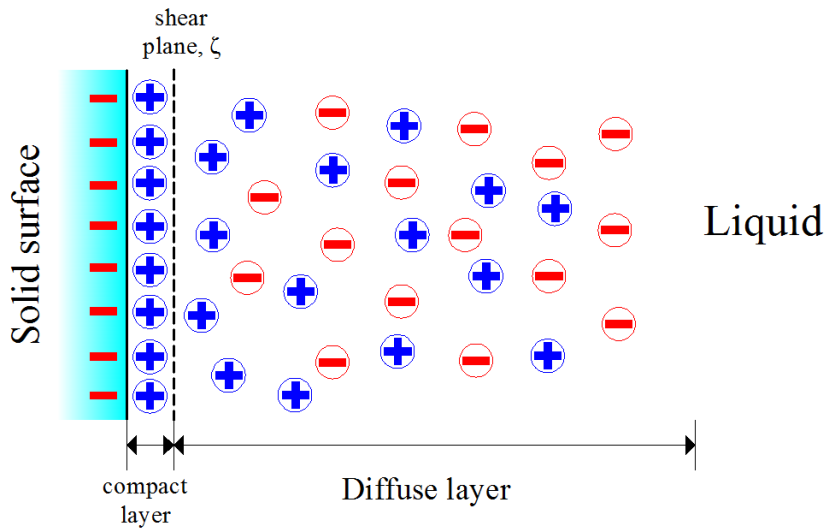
<sup>1</sup> Helmholtz

<sup>2</sup> Compact layer

<sup>3</sup> Stern layer

<sup>4</sup> Diffuse layer

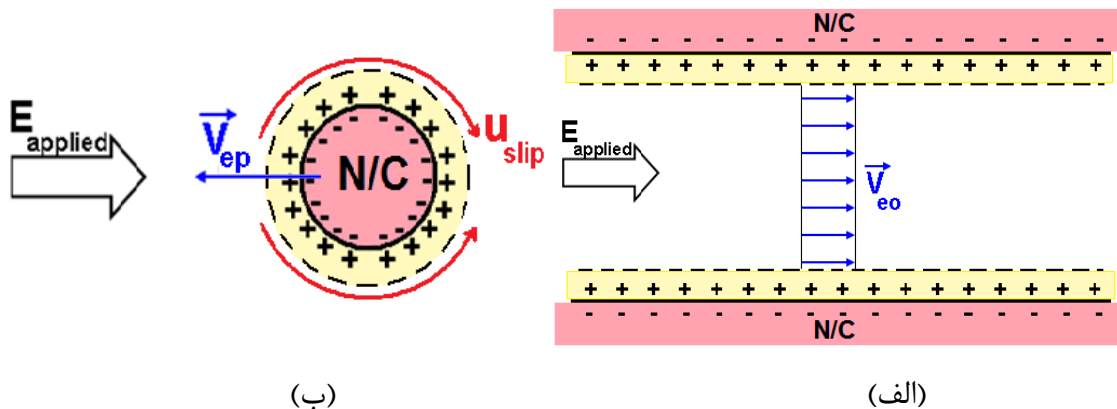
5. Shear plane



شکل ۲-۱: لایه دوگانه الکتریکی [۳۸]

## ۲-۲- الکترواسماتیک و الکتروفورتیک

شکل ۲-۲ لایه الکتریکی دوگانه تشکیل شده روی سطح جسم را نشان می‌دهد. پس از اعمال میدان الکتریکی در کانال موجود در شکل ۲-۲-الف یون‌های مجاور سطح حرکت کرده و در نتیجه اثر لزجت، این حرکت یون‌ها سبب می‌شود که مولکول‌های سیال مجاور آن‌ها نیز حرکت می‌کنند؛ لزجت سیال سبب می‌شود که حرکت یون‌ها، جریانی از سیال را داخل کانال ایجاد کند که به آن جریان الکترواسماتیک می‌گویند.



شکل ۲-۲: طرح ساده‌ای از (الف) جریان الکترواسماتیک، (ب) جریان الکتروفورتیک [۳۸]

اگر جسم مذکور ذره‌ای نارسانا باشد - و نه دیواره کانال - به دلیل وجود بار الکتریکی بر روی سطح جسم، علاوه بر نیروی اصطکاک وارده از سیال به ذره، نیروی دیگر به نام نیروی الکترواستاتیک

نیز به ذره وارد می‌گردد. نیروی اصطکاک و الکترواستاتیک در جهت مخالف یکدیگر به ذره وارد می‌شوند بنابراین سرعت نهایی ذره، در جهت برآیند این دونیرو خواهد بود [۳۸].

با فرض نازک بودن ضخامت لایه الکتریکی دوگانه می‌توان سرعت لغزشی روی دیواره نارسانای کانال را مطابق فرمول هلمهولتز - اسمولوچوسکی محاسبه نمود [۳۹].

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

همچنین سرعت الکتروفورتیک یک سطح باردار در داخل محلول الکتروولیت با توجه به رابطه

هلمهولتز - اسمولوچوسکی مطابق رابطه زیر به دست می‌آید [۳۹].

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

در این رابطه  $\mu$  لزجت سیال،  $\zeta_w$  و  $\zeta_p$  به ترتیب زتا پتانسیل روی دیواره کانال و سطح ذره

می‌باشند.  $\mu_{eo}$  و  $\mu_{ep}$  نیز بیانگر تحرک الکترواستاتیک<sup>۱</sup> و تحرک الکتروفورتیک<sup>۲</sup> می‌باشند.

- 
1. Electroosmotic mobility
  2. Electrophoretic mobility



فرضیات مورد استفاده در رابطه هلمهولتز - اسمولوچوسکی بدین شرح می‌باشند:

- ضخامت لایه الکتریکی دوگانه در مقایسه با ابعاد میکروکانال و ذره بسیار کوچک است.
- دیواره کانال و سطح ذره نارسانا بوده و این سطوح قابلیت قطبی شدن را ندارند.
- سطوح میکروکانال و ذره همگن می‌باشند.

## ۳-۲- الکتروکنتیک خطی و غیر خطی

در مبحث الکتروکنتیک کلاسیک تقابل بین میدان الکتریکی خارجی و لایه الکتریکی دوگانه روی سطح نارسانا بررسی می‌شود. لایه الکتریکی دوگانه تشکیل شده پیرامون سطح نارسانا، زتا پتانسیل ثابت و یکنواختی دارد. با دقت در روابط (۱-۲) و (۲-۲) به رابطه خطی سرعت الکترواسماتیک سیال و الکتروفورتیک ذره با میدان الکتریکی پی برده می‌شود، بنابراین به این پدیده، الکتروکنتیک خطی نیز می‌گویند.

الکتروکنتیک خطی با استفاده از فرضیات خلاصه شده در جدول (۱-۲) قادر به شبیه‌سازی برهم‌کنش بین سیال و میدان الکتریکی برای مواد نارسانا است.

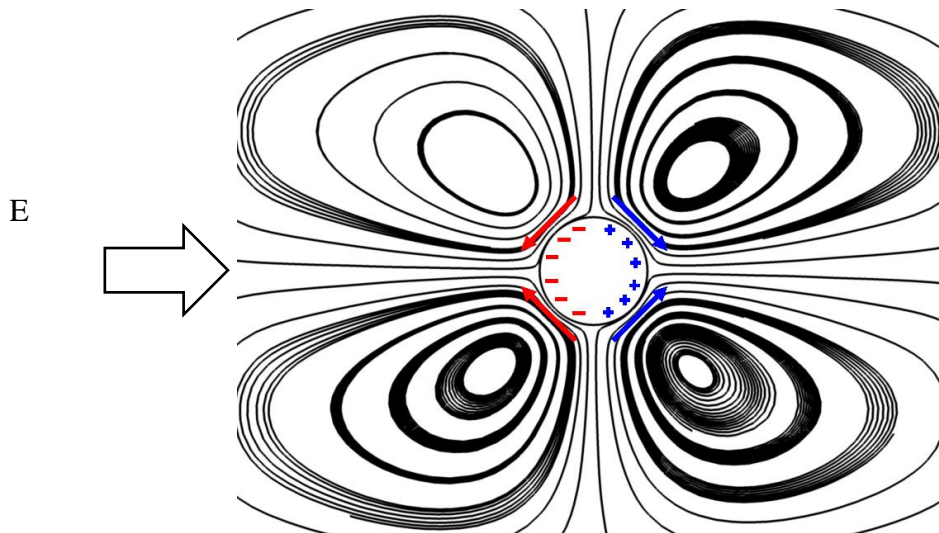
جدول ۱-۲: فرضیات مورد نیاز برای مدل‌سازی الکتروکنتیک خطی

محلول الکترولیت همگن بوده و توزیع بار نیز در آن یکنواخت و در نتیجه خنثی است.
محلول الکترولیت نامحدود است.
میدان الکتریکی اعمال شده سیستم یکنواخت می‌باشد.
لایه الکتریکی دوگانه نازک است.
بار الکتریکی روی سطوح کانال و جسم نارسانا، ثابت و یکنواخت می‌باشد.

با استفاده از این فرضیات، سرعت ذره خطی و وابسته به میدان الکتریکی است. با این حال بسیاری از مواد موجود در حوزه میکروفلوئیدیک رسانا می‌باشند و در نتیجه بار سطحی آن‌ها یکنواخت نیست؛ بنابراین الکتروکنتیک کلاسیک قادر به شبیه‌سازی همه پدیده‌های الکتروکنتیک نیست. الکتروکنتیک غیرخطی برای رفع موانع موجود در الکتروکنتیک کلاسیک ایجاد شد. بر اساس الکتروکنتیک غیرخطی، زمانی که سطح رسانا در تماس با الکترولیت قرار می‌گیرد، میدان الکتریکی به سطح جسم، بار الکتریکی القا می‌کند [۳۸]؛ در ادامه، میدان الکتریکی خارجی نسبت به لایه الکتریکی دوگانه

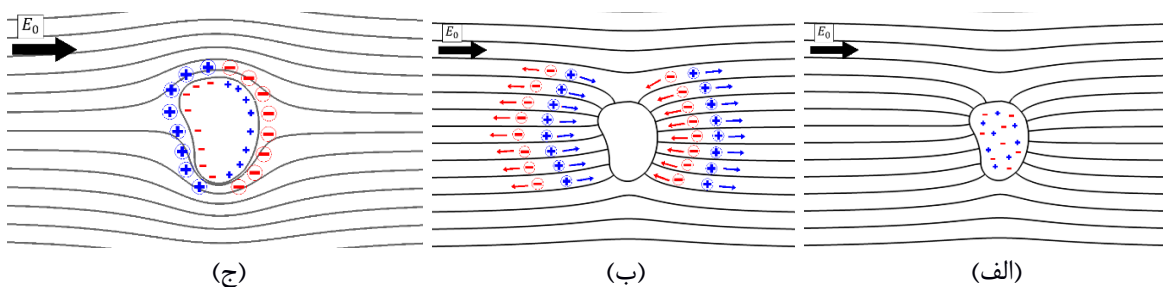
واکنش نشان داده و به دلیل اینکه زتا پتانسیل القایی و میدان الکتریکی محلی در سطح رسانا متفاوت است، سرعت لغزشی روی سطح جسم رسانا، غیرخطی خواهد بود.

علیرغم یکنواختی توزیع بار پیرامون اجسام نارسانا، توزیع بار پیرامون اجسام رسانا یکنواخت نیست. همان‌گونه که در شکل ۳-۲ نشان داده شده، در صورتی که ذره‌ای رسانا در تماس با محلول الکترولیت قرار گیرد، پیرامون سطحی از رسانا که در خلاف جهت میدان الکتریکی است، بار منفی و روی سطح دیگر، بار مثبت القا می‌گردد. یون‌های با بار مخالف و موجود در محلول الکترولیت جذب توزیع بار مذکور روی سطح رسانا می‌شوند و در اثر حرکت این یون‌ها جریان الکتروکنتیک القایی<sup>۱</sup> پیرامون یک جسم رسانا به وجود می‌آید. مشخصه اصلی جریان الکتروکنتیک القایی وجود گردابه‌هایی است که پیرامون سطح رسانا ایجاد می‌شوند [۳۸]. این گردابه‌ها در نتیجه توزیع بار غیریکنواخت پیرامون سطح رسانا ایجاد می‌شوند [۳۸]. در این بخش، نحوه القای بار الکتریکی روی سطح جسم رسانا و علت این توزیع غیریکنواخت توضیح داده می‌شود.



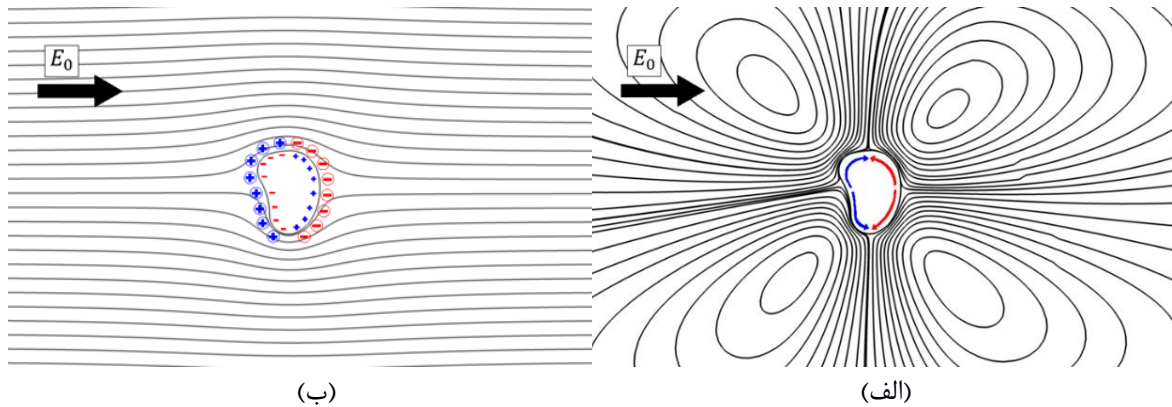
شکل ۳-۲: توزیع بار القاشده و جریان الکتروکنتیک القایی پیرامون ذره رسانا [۳۸]

با قرارگیری یک ذره رسانا خنثی درون محلول الکترولیت و پس از اعمال میدان الکتریکی، خطوط میدان الکتریکی از داخل جسم رسانا عبور کرده و بارهای داخلی جسم رسانا را به سمت سطح رسانا حرکت می‌دهند (مطابق شکل ۴-۲ الف). به بیان دیگر بارهای منفی به سمت سطحی از ذره که نزدیک به ولتاژ بیشتر می‌باشد حرکت می‌کنند، و در مقابل بارهای مثبت نیز در خلاف جهت بارهای منفی جابجا می‌شوند (مطابق شکل ۴-۲ ب). در نتیجه تغییر آرایش بارها، روی سطح جسم رسانا یک میدان الکتریکی محلی ایجاد می‌شود که مانند یک لایه محافظ از ورود میدان الکتریکی به داخل جسم رسانا جلوگیری می‌کند (مطابق شکل ۴-۲ ج) [۳۸].



شکل ۴-۲: (الف) خطوط میدان الکتریکی اولیه گذرنده از ذره رسانا (ب) جذب یون‌های با بار مخالف توسط بارهای القایی روی سطح ذره رسانا (ج) میدان الکتریکی حالت پایدار و لایه الکتریکی دوگانه پیرامون ذره رسانا [۳۸]

تشکیل لایه الکتریکی دوگانه در این حالت مشابه الکتروکنتیک کلاسیک می‌باشد با این تفاوت دو سمت ذره رسانا دارای بار الکتریکی متفاوت بوده که سبب می‌شود یون‌های جذب شده نیز در دو سمت ذره دارای علامتی متفاوت باشند (شکل ۴-۲ ج). شکل ۵-۲ خطوط میدان الکتریکی و میدان جریان سیال را پیرامون یک ذره رسانا با هندسه دلخواه در حالت پایدار نشان می‌دهد [۳۸]. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، چهار گردابه در خلاف جهت یکدیگر در دو سمت سطح ذره رسانا ایجاد می‌گردد که نشان‌دهنده وجود چهار جریان الکتروکنتیک می‌باشد. بنابراین ارتباط معناداری میان تعداد جریان‌های الکتروکنتیک القایی روی سطح جسم رسانا و تعداد گردابه‌های پیرامون آن وجود دارد (به عبارت دیگر به تعداد جریان‌های الکتروکنتیک القایی، گردابه پیرامون جسم رسانا ایجاد می‌شود) [۳۸].



شکل ۲-۵: (الف) خطوط جریان الکتروکنتیک القایی پیرامون ذره رسانا با هندسه دلخواه (ب) خطوط میدان الکتریکی [۳۸]

### ۲-۳-۱- زتا پتانسیل القایی

معادله پواسون برای محاسبه توزیع پتانسیل الکتریکی در یک ناحیه دی‌الکتریک مورد استفاده قرار

می‌گیرد:

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

که در رابطه مذکور  $\phi_e$  توزیع پتانسیل الکتریکی،  $\epsilon_0$  ثابت دی‌الکتریک خلأ،  $\epsilon$  ثابت دی‌الکتریک ناحیه حل و  $\rho_e$  چگالی بار آزاد می‌باشند. با در نظر گرفتن عدم وجود بار آزاد (مانند سیال خالص) از نظر بار الکتریکی خنثی است، در این صورت  $\rho_e \approx 0$  خواهد بود و معادله پواسون به معادله لاپلاس<sup>۴۶</sup> تبدیل می‌گردد [۳۸]:

$$\nabla^2 \phi_e = 0 \quad (۴-۲)$$

درواقع با در نظر گرفتن لایه دوگانه الکتریکی بسیار کوچک، چگالی بار در ناحیه محاسباتی صفر می‌شود [۴۰]. بنابراین توزیع پتانسیل الکتریکی در سیال به وسیله حل معادله لاپلاس به دست می‌آید. به دلیل اینکه بار القایی زیر سطح ذره رسانا علامتی مخالف با یون‌های جذب شده (از داخل الکترولیت) روی سطح ذره دارد، میدان الکتریکی القایی روی سطح مشترک رسانا - الکترولیت مقداری برابر و در جهت مخالف میدان الکتریکی خارجی خواهد داشت [۳۸]:

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

<sup>46</sup> Laplace's Equation

$$\vec{E}_{induced} = -\vec{E}_{applied} \quad (6-2)$$

به بیان دیگر، قدرت میدان الکتریکی القایی محلی با میدان الکتریکی خارجی برابر و در خلاف جهت آن می باشد. رابطه (6-2) مجدداً و به شکل زیر بازنویسی می شود:

$$\nabla \zeta_{induced} = -\nabla \phi_e \quad (7-2)$$

در این رابطه  $\zeta_{induced}$ ، زتا پتانسیل القایی روی سطح ذره رسانا و  $\phi_e$  پتانسیل الکتریکی است که توسط رابطه (7-2) به دست می آید. انتگرال بار القایی روی سطح رسانا باید برابر با صفر باشد زیرا سطح رسانا در ابتدا بی بار فرض شده بود [38]. بنابراین زتا پتانسیل القایی برابر است با:

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

در این رابطه  $S$  سطح رسانا است. زتا پتانسیل القایی با استفاده از رابطه (8-2) برابر است با:

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

در این رابطه  $\phi_c$ ، مقدار ثابتی برای سطح رسانا در معرض جریان الکتریکی است. با جایگذاری رابطه (9-2) در رابطه (8-2) مقدار  $\phi_c$  به صورت زیر محاسبه می گردد:

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

اگر لایه الکتریکی دوگانه نازک فرض شود می توان از رابطه سرعت لغزشی هلمهولتز-اسمولوچوسکی برای محاسبه سرعت سیال روی سطح رسانا استفاده کرد. بنابراین:

$$\vec{U}_i = -\frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta_{induced}}{\mu} \vec{E}_{applied} \quad (11-2)$$

دانستن توزیع زتا پتانسیل القایی کلید اصلی محاسبه سرعت الکترواسماتیک القایی پیرامون سطح رسانا است؛ ذکر این نکته حائز اهمیت است که زتا پتانسیل القایی وابسته به قدرت میدان الکتریکی محلی است.

#### ۴-۲- خلاصه و نتیجه گیری

زتا پتانسیل و لایه الکتریکی دوگانه که از مفاهیم اولیه الکتروکنتیک می باشد، مورد بررسی قرار گرفت. سپس دو حوزه اصلی الکتروکنتیک یعنی الکتروکنتیک خطی و غیرخطی و معادلات آنها

معرفی شدند. در الکتروکنتیک خطی، اجسام نارسانا بررسی می‌شوند که دارای توزیع بار یکنواخت بوده و در مقابل، الکتروکنتیک غیرخطی، اجسام رسانی را مورد بررسی قرار می‌دهد که دارای توزیع بار غیریکنواخت هستند. تفاوت در نوع توزیع بار روی سطح جسم در این دو حوزه سبب تفاوت توزیع سرعت الکترواسماتیک روی سطح جسم می‌شود. گردابه‌های پیرامون جسم رسانی به دلیل تغییر جهت سرعت که ناشی از توزیع بار غیریکنواخت می‌باشد، ایجاد می‌شوند.

## فصل سوم

# معادلات حاکم و شرایط مرزی

### فصل ۳- روش حل:

## معادلات حاکم و شرایط مرزی

معادلات حاکم بر فیزیک مسئله در فصل حاضر مورد بررسی قرار می‌گیرد. دو جریان الکتریکی با قدرت های متفاوت در کانال برقرار شده است. معادلات حاکم بر سرعت سیال، پتانسیل الکتریکی و تقابل ذره و سیال باید به صورت کوپل شده حل گردند تا حرکت ذره مدل سازی شود. با توجه به آنچه در فصل های گذشته عنوان شد، فهرستی از فرضیات مورد استفاده برای مدلسازی حرکت ذره صلب در جدول ۱-۳ خلاصه شده است.

جدول ۱-۳: فرضیات مورد استفاده در پژوهش حاضر

یکنواختی توزیع یون ها در خارج از لایه الکتریکی دوگانه و صفر بودن چگالی بار محلی و در نتیجه استفاده از معادله لاپلاس برای شبیه سازی توزیع پتانسیل الکتریکی.
میدان الکتریکی مورد استفاده DC می باشد.
پروسه باردارشدن ذره بسیار سریع (حدود $10^{-4}$ s) اتفاق می افتد و می توان از آن صرف نظر کرد.
ذره دارای خاصیت قطبی شوندگی یکنواخت است.
سیال مورد استفاده نیوتونی و غیر قابل تراکم می باشد.
استفاده از رابطه هلمهولتز-اسمولوچوسکی برای محاسبه سرعت سیال روی سطح ذره و دیواره کانال.
پس از تشکیل لایه دوگانه الکتریکی، دیگر بار روی سطح ذره القا نمی شود.
طول دبای ( $\kappa^{-1}$ ) در مقایسه با ابعاد ذره و کانال ناچیز است.

طول دبای  $\kappa^{-1}$  بیانگر ضخامت لایه الکتریکی دوگانه است و مطابق رابطه (۱-۳) محاسبه می شود [۳۸].

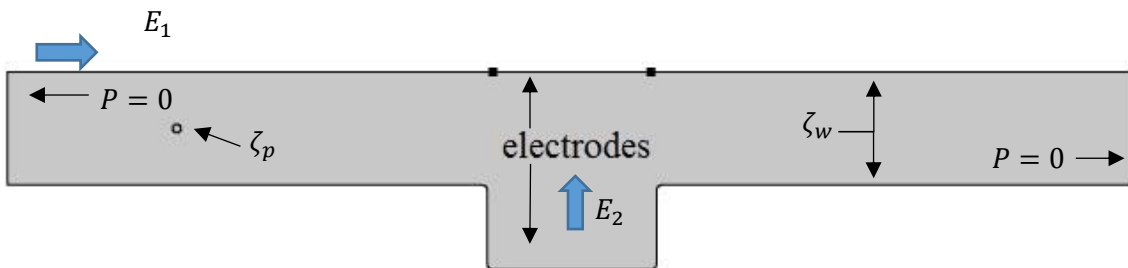
$$\kappa^{-1} = \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0 K_B T}{2 n_0 (Ze)^2}} \quad (1-3)$$

در رابطه (۱-۳)،  $T$  دمای محلول الکترولیت،  $K_B$  ثابت بولتزمن،  $Z$  مقدار والانس یون های محلول،  $\epsilon$  ثابت دی الکتریک نسبی سیال و  $n_0$  غلظت یون های موجود در محلول می باشد. طول دبای وابسته فقط وابسته به خصوصیات سیال بوده و سطح جامدی تأثیری در مقدار آن ندارد (به عنوان مثال، طول



دبای برای محلول KCL با غلظت  $10^{-3} M$  برابر با  $9.6 \text{ nm}$  و برای آب خالص با غلظت یون  $10^{-2} M$  برابر با  $3 \text{ nm}$  می باشد.)

شکل ۱-۳ هندسه مورد بررسی در این پایان نامه را نشان می دهد. یک میدان الکتریکی بین ورودی و خروجی و میدان دیگر قائم بر این میدان اعمال شده و سیال موجود در کانال را تحت تأثیر قرار می دهد. الکترودهای جریان ثانویه برای ایجاد میدان الکتریکی و باهدف تأثیرگذاری بر مسیر حرکت ذرات در میان کانال قرار داده شده است.



شکل ۱-۳: میکروکانال به همراه ذره صلب و جانمایی الکترودهای جریان ثانویه

### ۱-۳- توزیع پتانسیل الکتریکی

توزیع پتانسیل الکتریکی در ناحیه حل با استفاده از معادله پواسون به دست آید.

$$\nabla^2 \phi_e = \frac{\rho_e}{\epsilon_0 \epsilon} \quad (2-3)$$

$\phi_e$  پتانسیل الکتریکی،  $\rho_e$  چگالی بار آزاد محلول و  $\epsilon_0$  و  $\epsilon$  به ترتیب گذردهی خلأ و ثابت دی الکتریک می باشند. ثابت دی الکتریک خاصیتی از ماده است که مشخص می کند به ازای یک واحد ولتاژ اعمال شده چه مقدار انرژی الکتروستاتیکی در واحد حجم ماده ذخیره می شود. چگالی بار خالص محلول صفر و محلول از نظر بار الکتریکی خنثی فرض شده است، بنابراین  $\rho_e \approx 0$  خواهد بود و معادله پواسون تبدیل به معادله لاپلاس می شود.

$$\nabla^2 \phi_e = 0 \quad (3-3)$$

بنابراین توزیع پتانسیل الکتریکی را می توان از طریق حل معادله لاپلاس به دست آورد. شرایط

مرزی مفروض برای پتانسیل الکتریکی بدین شرح است:

$$\vec{n} \cdot \vec{\nabla} \phi = 0 \quad \text{روی دیواره کانال و ذره} \quad (4-3)$$

$$\phi = \phi_0 \quad \text{روی ورودی کانال و الکتروود پایینی} \quad (5-3)$$

$$\phi = 0$$

روی ورودی کانال و الکتروود بالایی

$$(۶-۳)$$

$\vec{n}$  بردار یکه نرمال سطح می باشد که به سمت سیال اشاره می کند.

### ۳-۲- توزیع سرعت سیال

همان طور که پیش از این گفته شد، سیال تراکم ناپذیر و نیوتونی در داخل کانال جریان دارد؛ بنابراین معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس به شکل زیر مطرح می شوند:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{U} = 0 \quad (۷-۳)$$

$$\rho \left[ \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{U} \cdot \vec{\nabla} \vec{U} \right] = -\vec{\nabla} p + \mu \nabla^2 \vec{U} + \vec{F} \quad (۸-۳)$$

در این روابط  $\mu$ ،  $\rho$ ،  $\vec{U}$ ،  $\vec{\nabla} p$  به ترتیب لزجت، چگالی، سرعت سیال و گرادیان فشار می باشند.  $\vec{F}$  نیروی حجمی است که تنها نیروی حجمی فرض شده، نیروی الکتریکی است. از طرفی فقط دیواره کانال و دیواره ذره دارای چگالی بار الکتریکی است بنابراین می توان شرط مرزی سرعت لغزشی الکترواسماتیک را جایگزین نیروی حجمی کرد. به دلیل کوچک بودن ضخامت لایه الکتریکی دوگانه در مقایسه با ابعاد کانال و قطر ذره، از جزئیات جریان سیال داخل این لایه نازک می توان صرف نظر کرد. به این ترتیب معادله (۸-۳) به فرم زیر درمی آید:

$$\rho \left[ \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{U} \cdot \vec{\nabla} \vec{U} \right] = -\vec{\nabla} p + \mu \nabla^2 \vec{U} \quad (۹-۳)$$

سرعت ورودی میانگین جریان سیال به میکروکانال مورد بررسی برابر  $\bar{V} = 7.78 \times 10^{-5} \text{ m/s}$

می باشد، بنابراین با توجه به اینکه قطر کانال  $W = 20 \times 10^{-6} \mu\text{m}$  می باشد، برای عدد

رینولدز کانال خواهیم داشت: (۱۰-۳)

$$Re_{mc} = \frac{\rho \bar{V} W}{\mu} = 1.73 \times 10^{-3}$$

برای عدد رینولدز ذره، با توجه به اینکه قطر ذره  $d = 1.5 \times 10^{-6} \mu\text{m}$  می باشد، خواهیم داشت:

$$Re_p = \frac{\rho \bar{V} d}{\mu} = 1.3 \times 10^{-4} \quad (۱۱-۳)$$

بنابراین به دلیل کوچک بودن عدد رینولدز ( $Re \ll 1$ ) می توان از اثرات اینرسی صرف نظر کرد و

عبارت  $\vec{U} \cdot \vec{\nabla} \vec{U}$  را از رابطه ۳-۹ حذف کرد.

شرایط مرزی برای محاسبه توزیع سرعت سیال بدین شرح است:

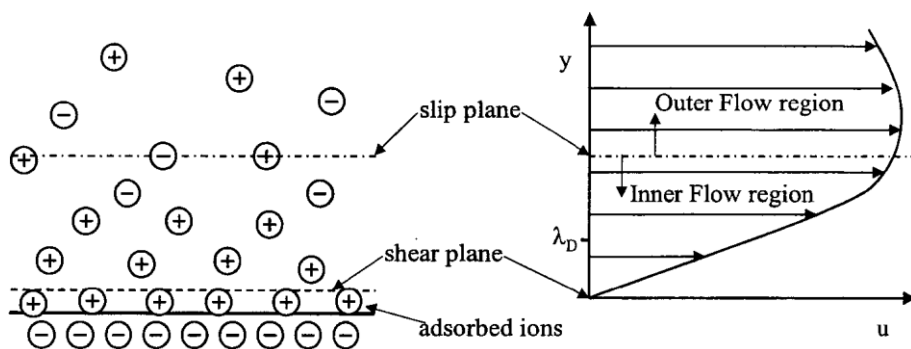
$$P = 0 \quad \text{در ورودی و خروجی کانال} \quad (۱۲-۳)$$

$$\vec{U}_W = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon \zeta_W}{\mu} \vec{E} \quad \text{روی دیواره میکرو کانال} \quad (۱۳-۳)$$

$$\vec{U}_N = \vec{V}_P + \vec{\omega}_P \times (\vec{x}_p - \vec{X}_p) - \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \zeta_p}{\mu} \vec{E} \quad \text{روی سطح ذره} \quad (۱۴-۳)$$

برای محاسبه توزیع سرعت فرض شده که جریان سیال تنها به واسطه پدیده الکتروکنتیک ایجاد می‌شود و گرادیان فشار دیگری در طول کانال وجود ندارد. میدان الکتریکی محلی با استفاده از رابطه  $\vec{E} = -\nabla\phi_e$  محاسبه می‌گردد.  $\zeta_p$  و  $\zeta_W$  به ترتیب زتا پتانسیل روی دیواره نارسانای کانال و روی ذره نارسانا می‌باشند.  $\vec{V}_P$  نیز سرعت انتقالی ذره می‌باشد.

سیال اطراف دیواره و ذره دارای زتا پتانسیل از دو بخش تشکیل شده است؛ بخش داخلی که به‌عنوان لایه دوگانه الکتریکی تعریف می‌شود و در مجاورت سطح ذره یا دیواره و بخش خارجی که شامل سایر بخش‌های باقی‌مانده از سیال و خارج از لایه مذکور می‌شود [۴۱]. با استفاده از فرض لایه دوگانه الکتریکی نازک می‌توان بخش داخلی را با استفاده از سرعت الکترواستاتیک با بخش خارجی مرتبط کرد و آن را جایگزین تقابل جریان سیال و جریان الکتریکی در این لایه کرد [۴۲].



شکل ۳-۲: شماتیکی از ناحیه داخلی و خارجی و میدان سرعت و توزیع یون در این دو ناحیه [۴۲]

### ۳-۳- حرکت ذره

حرکت ذره تحت تأثیر دو عامل است. عامل اول نیروی الکترواستاتیک ( $\vec{F}_E$ ) است، عامل دوم نیروی هیدرودینامیک ( $\vec{F}_h$ ) است که در نتیجه عبور جریان سیال از روی سطح ذره ایجاد می‌شود؛ بنابراین نیروی خالص وارد شده به ذره را می‌توان به صورت زیر بیان کرد.

$$\vec{F}_{total} = \vec{F}_E + \vec{F}_h \quad (۱۵-۳)$$

در این رابطه  $\vec{F}_E$  و  $\vec{F}_h$  به ترتیب نیروی الکترواستاتیک و نیروی هیدرودینامیک وارد بر ذره می-باشند. نیروی هیدرودینامیک از دو بخش تشکیل شده است:

$$\vec{F}_h = \vec{F}_{h\_out} + \vec{F}_{h\_in} \quad (۱۶-۳)$$

که در این رابطه  $\vec{F}_{h\_out}$  بیانگر نیروی هیدرودینامیکی وارد بر ذره و توسط سیال، خارج از لایه الکتریکی دوگانه (ناحیه خارجی) و  $\vec{F}_{h\_in}$  نیروی هیدرودینامیکی وارد بر ذره داخل لایه مذکور می-باشند. در این پژوهش لایه الکتریکی دوگانه بسیار نازک فرض شده است؛ با توجه به این فرض، جریان سیال داخل لایه الکتریکی دوگانه در نظر گرفته نخواهد شد و تأثیر آن، با سرعت الکترواستاتیک جایگزین می-شود. نیروی الکترواستاتیک وارد بر ذره  $\vec{F}_E$  با نیروی هیدرودینامیکی داخل لایه الکتریکی دوگانه (ناحیه داخلی)  $\vec{F}_{h\_in}$  برابر و در جهت مخالف می-باشد [۴۳]. به بیان دیگر، میدان الکتریکی، به ذره و یون‌های اطراف آن در لایه الکتریکی دوگانه نیروی الکترواستاتیک اعمال می-کند؛ از طرفی، به دلیل اینکه نیروی الکترواستاتیک و هیدرودینامیک داخل لایه الکتریکی دوگانه در مجاورت ذره، مقداری برابر دارند ولی در خلاف جهت یکدیگر می-باشند [۴۴]، نیروی کل اعمالی به ذره نیروی هیدرودینامیکی ناشی از جریان سیال در خارج از لایه الکتریکی دوگانه می-باشد که از سرعت الکترواستاتیک نشأت گرفته است [۴۰]. بنابراین:

(۱۷-۳)

$$\vec{F}_h = \vec{F}_E + \vec{F}_{h\_out} + \vec{F}_{h\_in} \quad ; \quad |\vec{F}_E| = -|\vec{F}_{h\_in}| \quad (۱۸-۳)$$

$$\vec{F}_{total} = \vec{G} + \vec{F}_{h\_out} = \vec{G} - \oint_{\Gamma} \sigma_p \cdot \vec{n} dS = (\rho - \rho_p) g \nabla_p - \oint_{\Gamma} \sigma_p \cdot \vec{n} dS$$

که در آن  $g$  شتاب گرانش،  $\nabla_p$  حجم ذره،  $\rho_p$  چگالی ذره می-باشند. برای ساده‌سازی در این پژوهش، چگالی ذره و سیال باهم برابر در نظر گرفته شده است.

$$\vec{T}_{total} = - \oint_{\Gamma} (\vec{x}_p - X_p) \times \sigma_p \cdot \vec{n} dS \quad (۱۹-۳)$$

$\vec{X}_p$  مرکز جرم ذره و  $\vec{x}_p$  مختصات نقاط بر روی سطح ذره است. تانسور تنش که در روابط (۱۴-۳)

و (۱۵-۳) با  $\sigma_p$  نشان داده شده، با استفاده از رابطه زیر محاسبه می-شود:

$$\sigma_P = -p\bar{I} + \mu [(\bar{\nabla}\bar{U}) + (\bar{\nabla}\bar{U})^T] \quad (20-3)$$

در رابطه ۲۰-۳،  $\bar{I}$  ماتریس همانی است و معادله حاکم بر حرکت ذره، بر اساس قانون دوم نیوتون به شکل زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد:

$$m_P \frac{d\bar{V}_P}{dt} = \bar{F}_{total} \quad (21-3)$$

$$J_P \frac{d\bar{\omega}_P}{dt} = \bar{\Gamma} \quad (22-3)$$

در این روابط،  $m_P$  جرم ذره،  $\bar{V}_P$  سرعت انتقالی ذره و  $\bar{\omega}_P$  سرعت زاویه‌ای می‌باشند.  $\bar{V}_P$  با توجه به بردار جابجایی  $\bar{X}_P$  این نقطه به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\frac{d\bar{X}_P}{dt} = \bar{V}_P \quad (23-3)$$

شرایط اولیه برای حرکت ذره و سرعت سیال بدین شرح است:

$$\bar{V}_P|_{t=0} = 0 \quad , \quad \bar{\omega}|_{t=0} = 0 \quad , \quad \bar{U}|_{t=0} = 0 \quad (24-3)$$

### ۳-۴- خلاصه

معادلات حاکم، شرایط اولیه و شرایط مرزی مورد نیاز برای حرکت ذره صلب مورد بررسی قرار گرفت. مدل ریاضی حاصل شده به وسیله این روابط توانایی شبیه‌سازی تقابل ذره و سیال را دارد که به کمک یک روش عددی محاسبه پتانسیل الکتریکی، سرعت سیال و سرعت ذره داخل میکرو کانال میسر می‌شود.

نتایج حاصل شده از شبیه‌سازی مذکور در فصل بعد ارائه شده و تأثیر عواملی نظیر قدرت میدان الکتریکی DC، نحوه قرارگیری الکترودهای جریان، سایز ذرات، زتا پتانسیل ذرات و زتا پتانسیل دیواره کانال مورد بررسی قرار گرفته است.



# فصل چهارم

## حرکت ذره صلب

## فصل ۴- الکتروکنتیک:

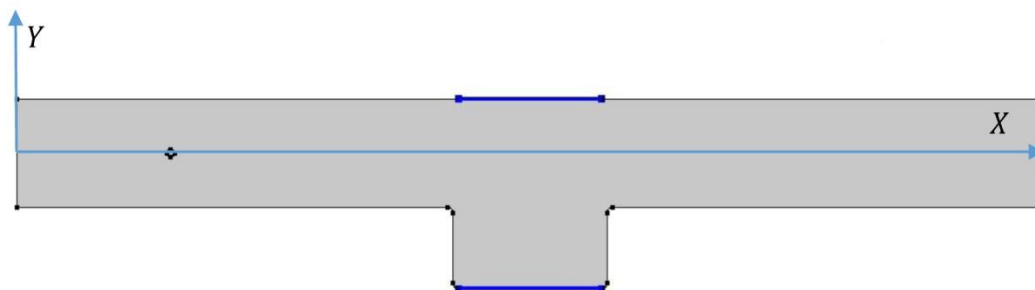
### حرکت ذره صلب

فصل دوم پدیده الکتروکنتیک به صورت اجمالی معرفی شد. در فصل سوم مدل ریاضی مورد نیاز برای حل پژوهش مورد نظر ارائه شد. یکی از مهم ترین مراحل شبیه سازی عددی، صحت سنجی روش ارائه شده می باشد که در این فصل مورد بررسی قرار می گیرد؛ سپس نتایج حاصل شده از شبیه سازی ارائه می شوند. در نتایج مذکور، علاوه بر توزیع پتانسیل ذره، اثر پارامترهای دیگری از جمله میدان الکتریکی اولیه و ثانویه، نحوه قرارگیری الکترودهای میدان ثانویه و زتا پتانسیل ذره بر چگونگی طبقه بندی ذرات بررسی می شود.

#### ۴-۱- هندسه مورد بررسی

ذره ای صلب داخل میکرو کانال شبیه سازی شد. شکل ناحیه حل را به همراه الکترودهای جریان ثانویه و ذره مورد بررسی نشان می دهد. کانال دوبعدی دارای طول ۲۰۰ میکرومتر و عرض ۲۰ میکرومتر می باشد، در وسط این کانال دو الکتروده (در شکل بارنگ آبی مشخص شده اند) برای میدان الکتریکی ثانویه و باهدف تأثیرگذاری بر مسیر حرکت ذرات قرار داده شده اند؛ انتظار می رود تأثیر این میدان بر ذرات با زتا پتانسیل های مختلف با یکدیگر متفاوت باشد. همچنین دو الکتروده در ابتدا و انتهای کانال قرار داده شده که میدان الکتریکی ثابت DC را از چپ به راست در داخل کانال ایجاد می کنند و سبب ایجاد جریان الکترواسماتیک می شوند. دو انتهای کانال به دو منبع بزرگ از محلول الکترولیت متصل است، به این ترتیب هیچ گونه گرادیان فشار خارجی به سیستم اعمال نمی شود و جریان سیال در داخل کانال تنها به واسطه جریان الکترواسماتیک ناشی از زتا پتانسیل ثابت روی دیواره کانال به وجود می آید.





شکل ۴-۱: هندسه کانال به همراه ذره و الکترودهای جای گرفته روی دیواره بالایی و پایینی کانال (جریان ثانویه)

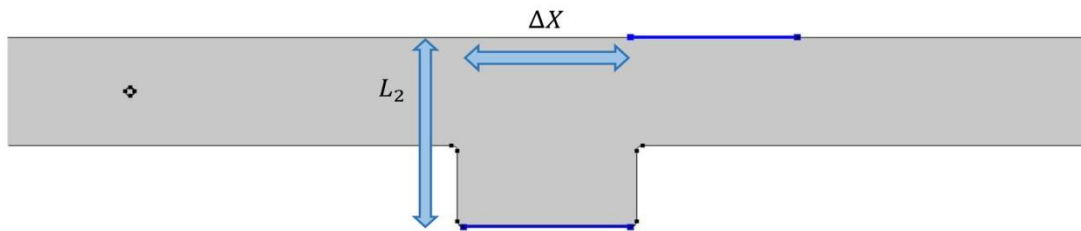
خصوصیات فیزیکی محلول الکترولیت و ثوابت بکار رفته در این مدل سازی در جدول ۴-۱ بیان شده است. نرم افزار تجاری کامسول 5.3a برای حل مدل ریاضی مورد استفاده قرار گرفته است. روش مورد استفاده در این نرم افزار، مش متحرک ALE می باشد که توانایی شبیه سازی تقابل ذره و سیال را دارا می باشد.

جدول ۴-۱: ثوابت مورد استفاده در مدل سازی عددی

80	ثابت دی الکتریک سیال و ذره، $\epsilon$
$8.854 \times 10^{-12}$	گذردهی خلأ، $\epsilon_0$ ( $C/V.m$ )
$0.9 \times 10^{-3}$	لزجت سیال، $\mu$ ( $kg/m.s$ )
998	چگالی سیال و ذره، $\rho$ ( $kg/m^3$ )
-110	زتا پتانسیل روی دیواره نارسانای کانال، $\zeta_w$ (mV)
20	عرض کانال، $W$ ( $\mu m$ )
200	طول کانال، $L$ ( $\mu m$ )
35	فاصله دو الکتروود جریان الکتریکی ثانویه، $L_2$ ( $\mu m$ )

پارامترهای بی بعد جدول ۴-۲ به منظور ارائه نتایج گزارش شده اند. مقصود از  $\zeta_w$ ، زتا پتانسیل روی دیواره کانال، مقصود از  $\zeta_p$  زتا پتانسیل ذره،  $E_2$  مقدار جریان الکتریکی ثانویه،  $E_1$  مقدار جریان الکتریکی در دو سمت کانال،  $d_{particle}$  قطر ذره،  $\Delta X$  فاصله افقی الکترودهای جریان ثانویه (در شکل ۴-۲ نمایش داده شده است)،  $L_2$  فاصله عمودی دو الکتروود و  $U_{ep}$  سرعت الکتروفورتیک ذره در جریان الکتریکی  $E_1$ ، مقصود از  $U_{eo}$  سرعت الکتراسماتیک سیال در اثر جریان الکتریکی  $E_1$  و در ابتدای کانال می باشند. پارامترهای  $\bar{t}$  و  $\bar{U}$  با الهام از پژوهش "حرکت وابسته به زمان ذرات استوانه ای در زانوی

۹۰ درجه " نوشته دیویسون<sup>۱</sup> و همکاران [۴۴] برای بی بعد سازی زمان و سرعت سیال مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۲-۴: نمایش الکترودهای جریان ثانویه، پارامترهای طولی وابسته به آن و محورهای مختصات

جدول ۲-۴: پارامترهای بی بعد مورد استفاده

$\bar{U} = \frac{U_{fluid}}{U_{eo}}$	$\bar{t} = \left(\frac{2U_{ep}}{d_{particle}}\right)t$	$\bar{E} = \frac{E_2}{E_1}$	$\bar{\zeta} = \frac{\zeta_p}{\zeta_w}$	$\bar{X} = \frac{\Delta X}{L_2}$	$\bar{D} = \frac{d_{particle}}{L_2}$
--------------------------------------	--	-----------------------------	---	----------------------------------	--------------------------------------

#### ۲-۴- اعتبار سنجی نتایج

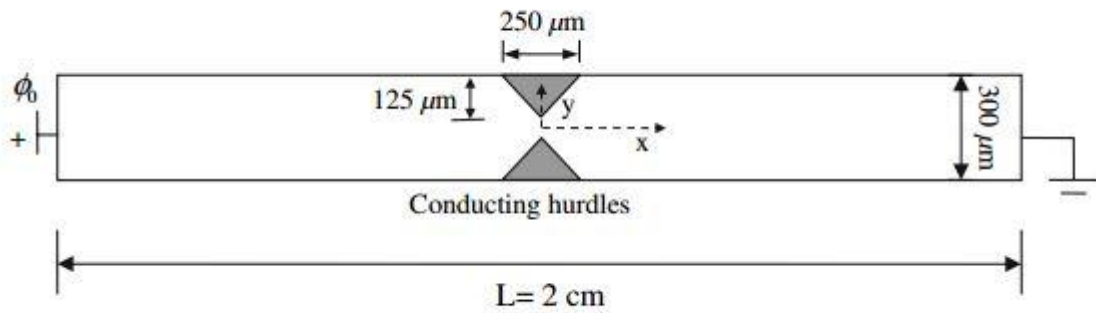
پژوهش وو<sup>۲</sup> [۴۵] به منظور اعتبارسنجی جریان الکتروکنتیک القایی مورد استفاده قرار گرفت. در پژوهش مذکور، جریان الکتروکنتیک القایی پیرامون موانع مثلثی بررسی شده است. هندسه مورد استفاده در پژوهش مذکور در شکل ۳-۴ نمایش داده شده است. دو جریان سیال وارد کانال شده و اختلاط این دو جریان مورد بررسی قرار می گیرد. موانع مثلثی مورد استفاده رسانا می باشد و یک جریان الکتریکی بین ورودی و خروجی کانال اعمال می گردد. گردابه های ایجاد شده در مجاورت موانع مثلثی که ناشی از زتا پتانسیل القایی می باشند، سبب بهبود اختلاط جریان سیال های ورودی می شوند. خواص مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۳-۴ خلاصه شده است:

جدول ۳-۴: خواص مورد استفاده در پژوهش وو

0.001	لزجت سیال، $\mu(kg/m.s)$
998	چگالی سیال، $\rho(kg/m^3)$
$5.9 \times 10^{-4}$	قابلیت حرکت الکترواسماتیک در دیواره نارسای کانال، $(cm^2/V)$
300	عرض کانال، $W(\mu m)$
$2 \times 10^4$	طول کانال، $L(\mu m)$
100	جریان الکتریکی $E(V/cm)$

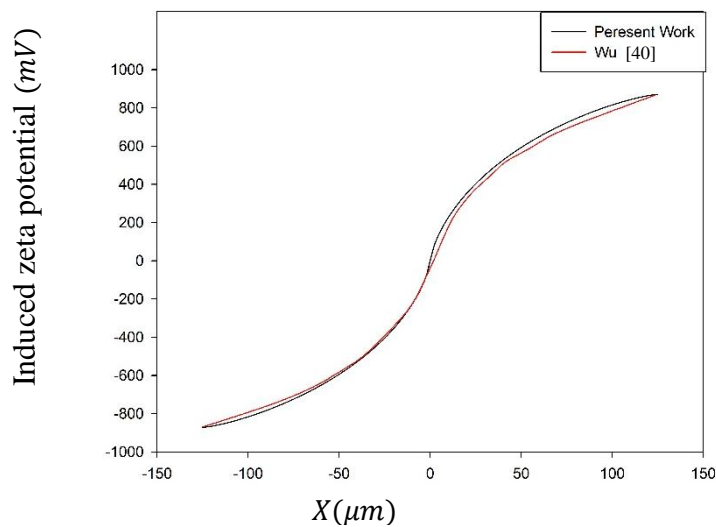
<sup>1</sup> Davison

<sup>2</sup> Wu



شکل ۳-۴: هندسه پژوهش وو ولی [۴۵]

شکل ۳-۴ نمودار زتا پتانسیل القایی روی سطح مثلثی را نشان می‌دهد. مختصات طولی موانع مثلثی در  $X = -125 (\mu m)$  آغاز و در  $X = +125 (\mu m)$  پایان می‌یابد. مقدار خطای RMS برای این دو نمودار برابر با ۱,۸٪ می‌باشد.



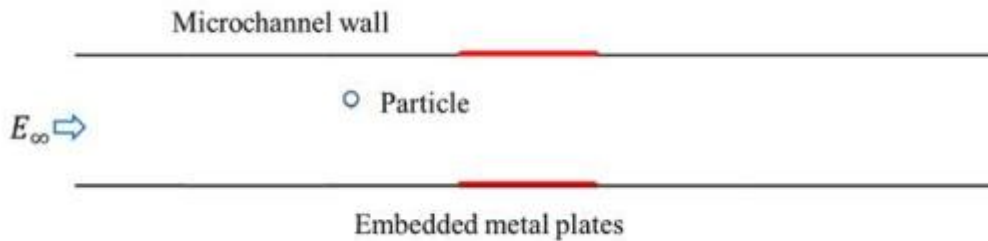
شکل ۴-۴: زتا پتانسیل القایی روی یکی از موانع مثلثی حاصل از حل حاضر و حل وو

در ادامه، پژوهش فنگ ژانگ [۴۶] برای طبقه‌بندی ذرات بر اساس قابلیت قطبیت پذیری موردبررسی قرار گرفت. در این مقاله ضریبی به نام نسبت قطبیت پذیری نسبی برای ذرات موجود در سیالات به شکل زیر معرفی می‌شود:

$$C = \frac{\epsilon_p}{\epsilon_p + 2\epsilon_m} \quad (۱-۴)$$

$\epsilon_p$  ثابت دی‌الکتریک ذره و  $\epsilon_m$  ثابت دی‌الکتریک سیال اطراف ذره می‌باشد. این خاصیت، تأثیر جریان الکتروکنتیک القایی بر ذرات دی‌الکتریک را بررسی می‌کند. مقدار به معنای  $C = 0$  کاملاً عایق و

مقدار  $C = 1$  به معنای هادی جریان الکتریکی می‌باشد. هندسه مورد بررسی در پژوهش مذکور در شکل ۴-۵ نشان داده شده است و خواص مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

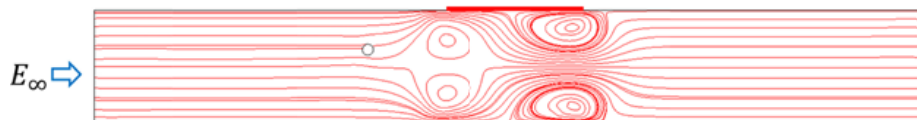


شکل ۴-۵: هندسه پژوهش فنگ ژانگ [۴۶]

جدول ۴-۴: خواص مورد استفاده در پژوهش فنگ ژانگ

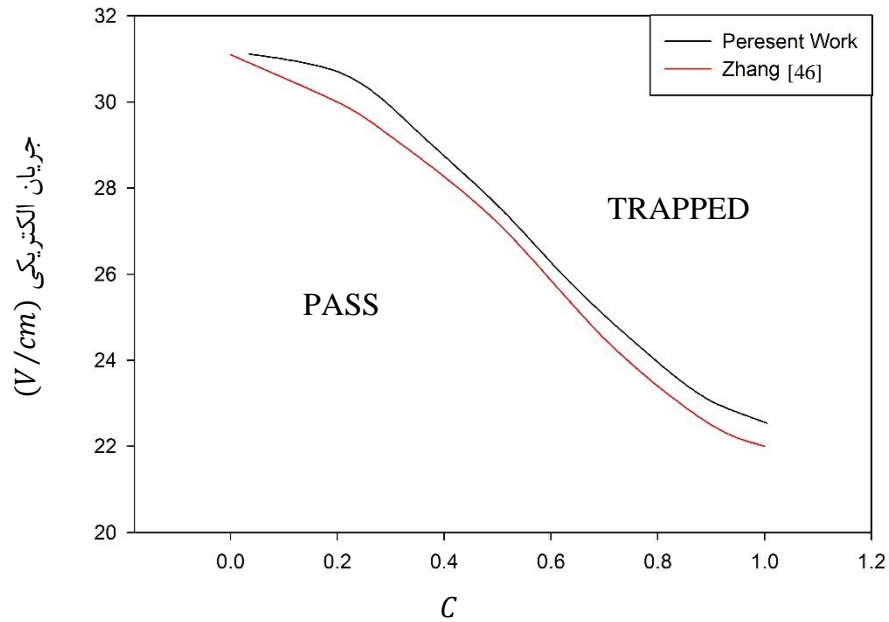
80	ثابت دی الکتریک سیال، $\epsilon_m$
$8.854 \times 10^{-12}$	گذردهی خلاء، $\epsilon_0$ ( $C/V.m$ )
$0.9 \times 10^{-3}$	لزجت سیال، $\mu$ ( $kg/m.s$ )
998	چگالی سیال، $\rho$ ( $kg/m^3$ )
-30	زتا پتانسیل دیواره، $\zeta$ ( $mV$ )
100	عرض کانال، $W$ ( $\mu m$ )
750	طول کانال، $L$ ( $\mu m$ )
10	قطر ذره $d$ ( $\mu m$ )
150	طول صفحات هادی موجود در دیواره $L_2$ ( $\mu m$ )

یک میدان الکتریکی در راستای کانال اعمال می‌شود و دو صفحه هادی جریان الکتریکی در دیواره‌های کانال قرار داده شده است که سبب ایجاد جریان الکتروکنتیک القایی می‌شود. گردابه‌هایی ناشی از میدان الکتریکی و صفحات هادی ذرات را بر اساس ضریب قطبیت پذیری جدا می‌کنند. در حقیقت ذرات بر اساس مقدار  $C$  از این گردابه عبور کرده و یا در آن گرفتار می‌شوند.



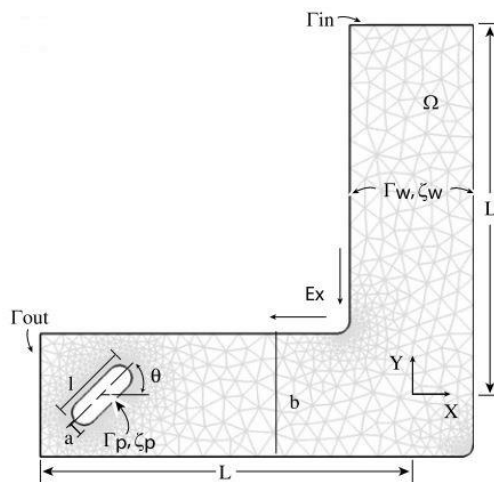
شکل ۴-۶: خطوط جریان در پژوهش فنگ ژانگ [۴۶]

در شکل ۷-۴، منحنی جداسازی ذرات بر اساس مقدار  $C$  و میدان الکتریکی ارائه شده است که محدوده فوقانی این منحنی، در گردابه، به دام می‌افتند و محدوده تحتانی از آن عبور می‌کنند. مقدار خطای RMS برای این نمودار برابر با ۲،۱۰٪ می‌باشد.



شکل ۷-۴: ذرات به دام افتاده در گردابه حاصل از حل حاضر و حل ژانگ

دیویسون<sup>۱</sup> [۴۴] طی پژوهشی حرکت یک ذره غیر کرووی داخل کانال  $L$  شکل را بررسی کرده است. هندسه این مطالعه بدین شرح است



شکل ۸-۴: هندسه پژوهش دیویسون [۴۴]

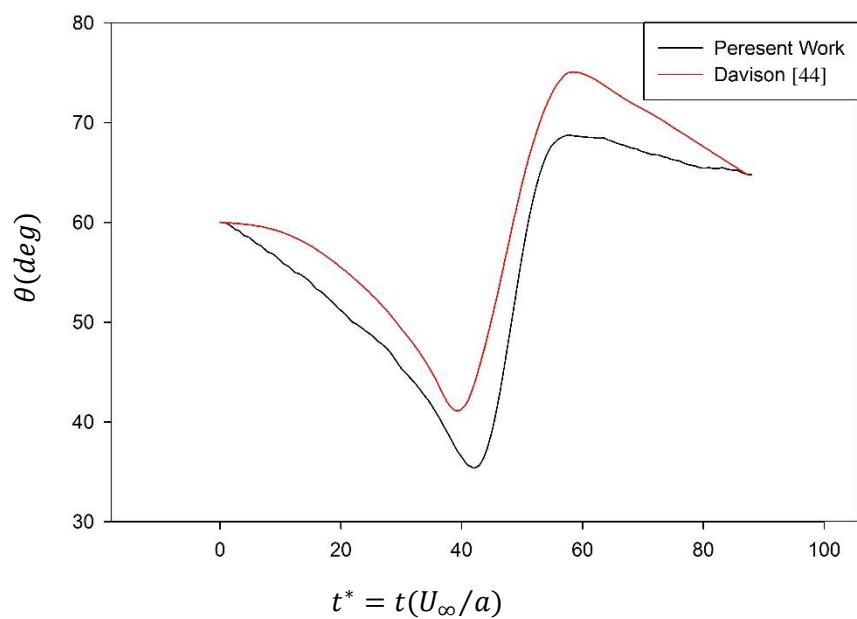
<sup>1</sup> Davison

ذره مورد بررسی دی الکتریک و جریان الکتریکی مورد استفاده، DC می باشد. دیواره کانال و ذره دارای زتا پتانسیل ثابت می باشند که نسبت بزرگی زتا پتانسیل دیواره به ذره برای مقدار ۰,۳۷۵ و ۰,۷۵ مورد مطالعه قرار گرفته است. مقادیر ثابت مورد استفاده در این شبیه سازی در جدول ۴-۵ خلاصه شده اند:

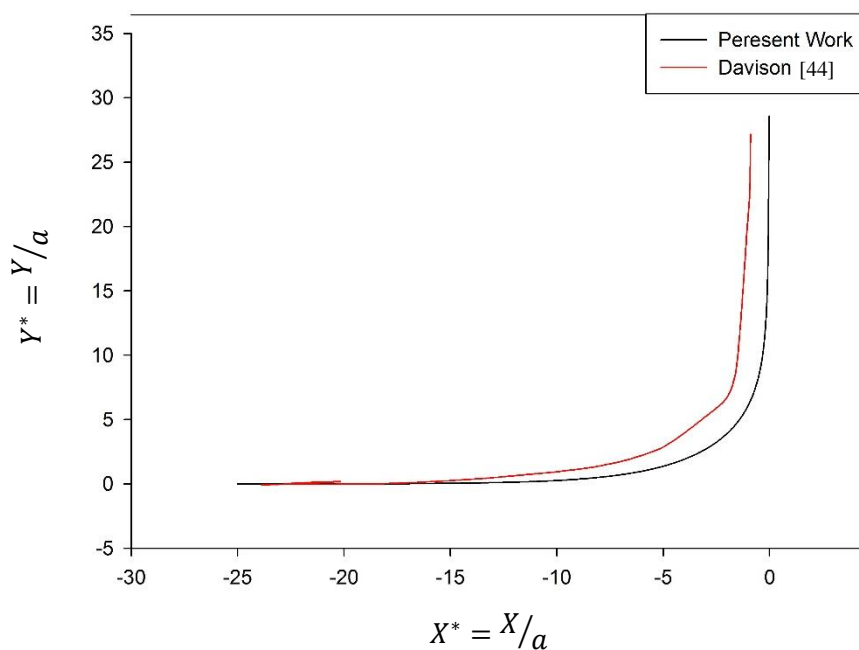
جدول ۴-۵: خواص مورد استفاده در پژوهش دیویسون

80	ثابت دی الکتریک سیال $\epsilon_m$
$8.854 \times 10^{-12}$	گذردهی خلأ $\epsilon_0$ ( $C/V.m$ )
$0.9 \times 10^{-3}$	لزجت سیال $\mu$ ( $kg/m.s$ )
998	چگالی سیال $\rho$ ( $kg/m^3$ )
0.375	نسبت بزرگی زتا پتانسیل دیواره کانال به ذره $\gamma$
40	میدان الکتریکی $E$ ( $V/cm$ )
37.5	زتا پتانسیل دیواره $\zeta$ ( $mV$ )
15	عرض کانال $b$ ( $\mu m$ )
37.5	طول کانال $L$ ( $\mu m$ )
1.5	شعاع ذره $a$ ( $\mu m$ )
6	نسبت ابعاد ذره $l/a$

حرکت ذره با زاویه اولیه ۶۰ نسبت زتا پتانسیل ۰,۳۷۵ را نشان می دهد که نمودار شکل ۴-۹ برای زاویه ذره با زاویه اولیه ۶۰ درجه و موقعیت مکانی مرکز ذره با زاویه اولیه ۴۵ درجه نسبت به افق در زمان های مختلف به دست آمده است. مقدار خطای RMS برای نمودار تغییر زاویه برابر با ۱۵,۴٪ و برای نمودار موقعیت مکانی برابر با ۸,۳٪ می باشد.



شکل ۴-۹: زاویه ذره با زاویه اولیه ۶۰ درجه نسبت به افق برحسب زمان حاصل از حل حاضر و حل دیویسون

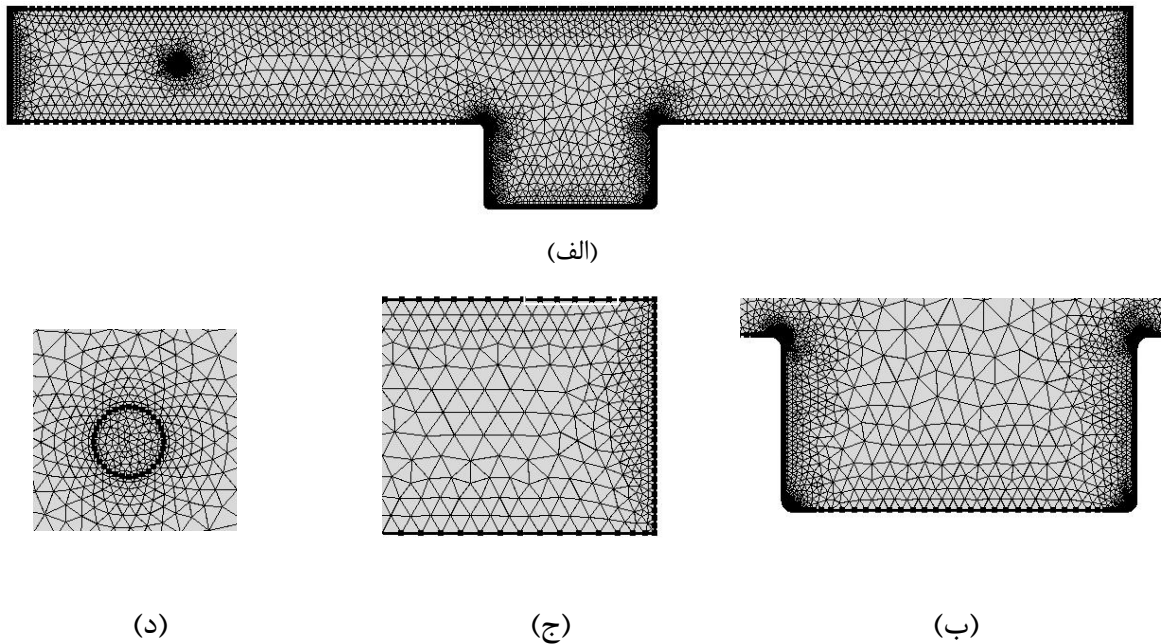


شکل ۴-۱۰: موقعیت مرکز جرم ذره با زاویه اولیه ۴۵ درجه نسبت به افق برحسب زمان حاصل از حل حاضر و حل دیویسون

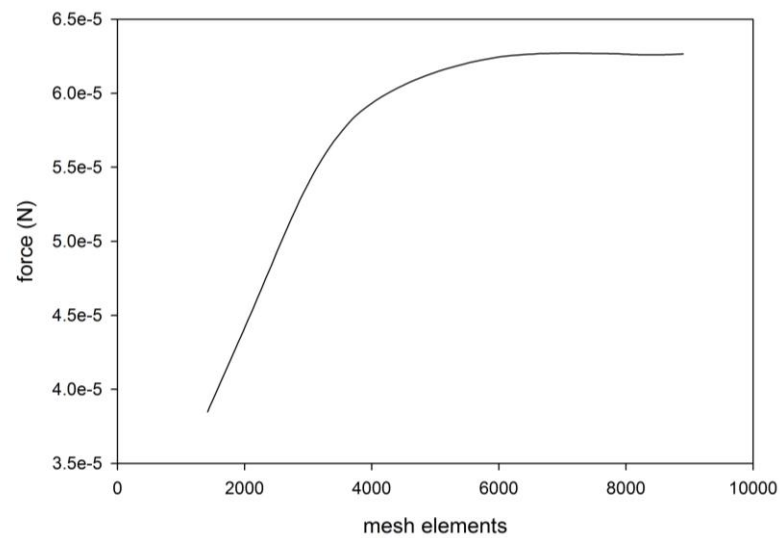
### ۳-۴- مطالعه استقلال نتایج از شبکه‌بندی

مش بی‌سازمان به دلیل وجود مرزهای منحنی و تأثیر آن بر نتایج حاصله، در مدل‌سازی این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۴-۱۱ نمایی از این شبکه‌بندی را نشان می‌دهد. ورودی

کانال، فصل مشترک جامد و سیال، خروجی کانال و محل جمع‌آوری ذرات به دلیل اهمیت و اثرگذاری بر نتایج، به‌دقت بیشتری در حل نیاز دارند و به همین دلیل از شبکه‌بندی ریزتری در این نواحی استفاده شده است.



شکل ۴-۱۱: (الف) شبکه‌بندی ناحیه حل (ب)، (ج) و (د) نمای نزدیکی از شبکه‌بندی در خروجی، فصل مشترک جامد و سیال و در ورودی کانال



شکل ۴-۱۲: مقدار کل نیروی واردشده به ذره برحسب تعداد المان‌های به‌کاررفته در ناحیه حل



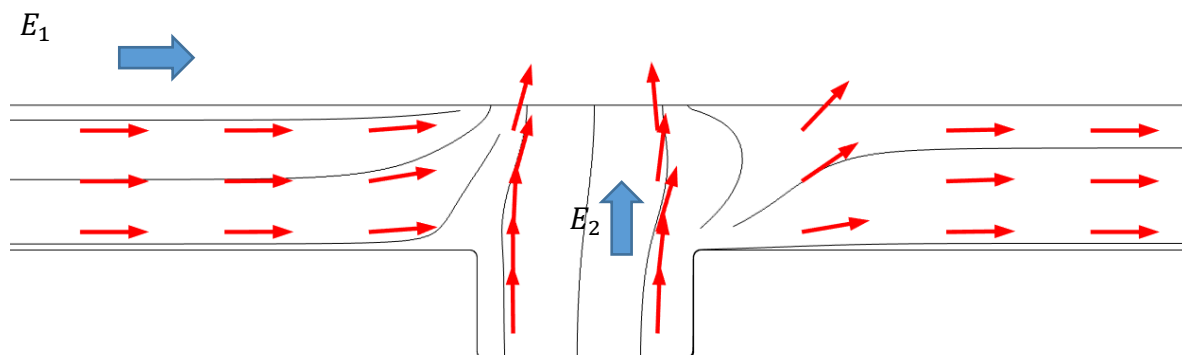
شکل ۴-۱۲ مقدار کل نیروی وارد بر ذره را برحسب تعداد کل المان‌های به‌کاررفته در ناحیه محاسباتی نشان می‌دهد. ثوابت بکار رفته برای دستیابی به این نمودار در جدول ۴-۶ خلاصه شده‌اند. با دقت در شکل ۴-۱۲ می‌توان دریافت که در صورت استفاده از ۶۰۱۶ المان مثلی بی‌سازمان علاوه بر استقلال نتایج از شبکه‌بندی ناحیه حل، میزان حجم محاسبات رایانه‌ای موردنیاز نیز به حداقل می‌رسد.

جدول ۴-۶: ثوابت مورد استفاده در هندسه بررسی شده به منظور دستیابی به حداقل المان موردنیاز

80	ثابت دی‌الکتریک سیال و ذره، $\epsilon$
$8.854 \times 10^{-12}$	گذردهی خلأ، $\epsilon_0 (C/V.m)$
$0.9 \times 10^{-3}$	لزجت سیال، $\mu (kg/m.s)$
998	چگالی سیال و ذره، $\rho (kg/m^3)$
-110	زتا پتانسیل روی دیواره نارسانای کانال، $\zeta_w (mV)$
20	عرض کانال، $W (\mu m)$
200	طول کانال، $L (\mu m)$
35	فاصله دو الکتروود جریان الکتریکی ثانویه، $L_2 (\mu m)$
-20	زتا پتانسیل روی دیواره نارسانای ذره، $\zeta_p (mV)$
1.5	قطر ذره $d (\mu m)$
10	جریان الکتریکی اولیه $E_1 (V/cm)$
35	جریان الکتریکی ثانویه $E_2 (V/cm)$

#### ۴-۴- بررسی حرکت ذره

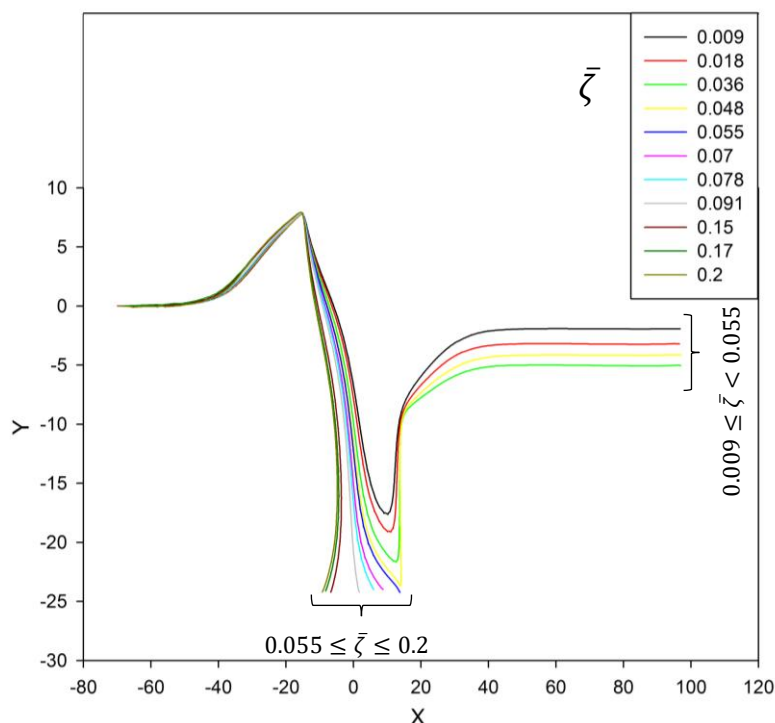
با اعمال میدان الکتریکی جریان الکتروکنتیک در داخل کانال به وجود می‌آید، این جریان ناشی از زتا پتانسیل ثابت روی دیواره نارسانای کانال است. ذره صلب، تحت تأثیر نیروی هیدرودینامیک ناشی از جریان سیال از موقعیت اولیه خود شروع به حرکت می‌کند و در جهت میدان الکتریکی حرکت خود را ادامه می‌دهد. زمانی که ذره به میدان الکتریکی ثانویه (الکترودهای قرارگرفته میان کانال) می‌رسد، بر اساس زتا پتانسیل دیواره خود رفتارهای متفاوتی نشان می‌دهد. خطوط جریان الکتریکی در شکل ۴-۱۳ نمایش داده شده است.



شکل ۴-۱۳: نمایش شماتیک خطوط جریان الکتریکی

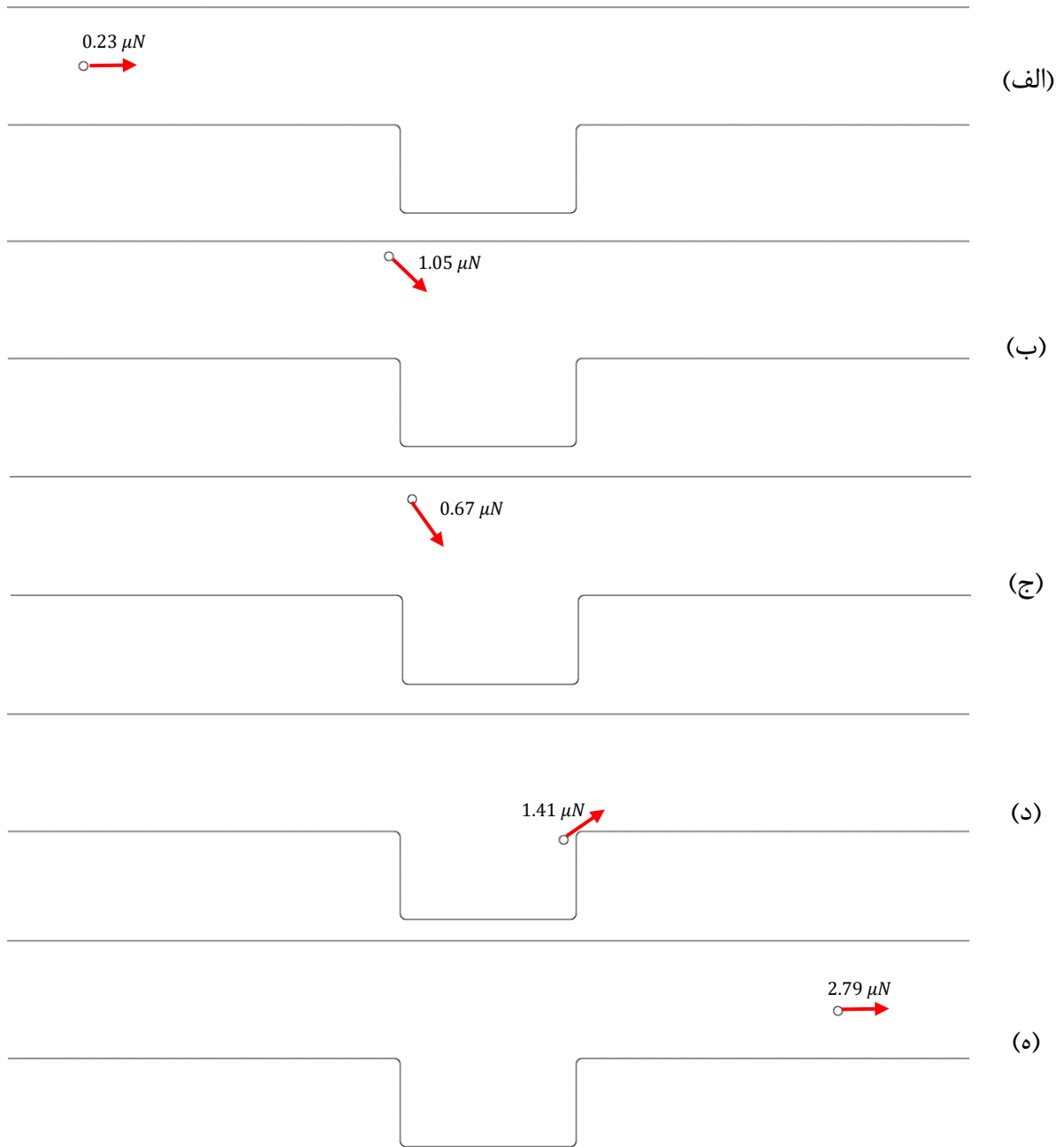
#### ۴-۴-۱- تأثیر نسبت زتا پتانسیل $\bar{\zeta}$ بر حرکت ذره

حرکت ذره برای مقادیر مختلف  $\bar{\zeta} = \frac{\zeta_p}{\zeta_w}$  (نسبت زتا پتانسیل ذره به دیواره) مورد بررسی قرار گرفت. به دلیل وجود دو میدان الکتریکی مختلف در طول کانال، با ثابت بودن نسبت  $\bar{\zeta}$  و وابستگی این سرعت الکترواسماتیک به میدان الکتریکی و زتا پتانسیل، مقدار این سرعت در طی حرکت مسیر ذره تغییر کرده و در نتیجه نیروی هیدرودینامیکی وارد به ذره تغییر می کند. در واقع با دقت در معادله ۲-۱۱ می توان دریافت که با افزایش مقدار زتا پتانسیل، اندازه سرعت الکترواسماتیک نیز افزایش می یابد. نتایج حرکت ذره برای زتا پتانسیل های مختلف در شکل زیر مورد بحث قرار گرفته است.

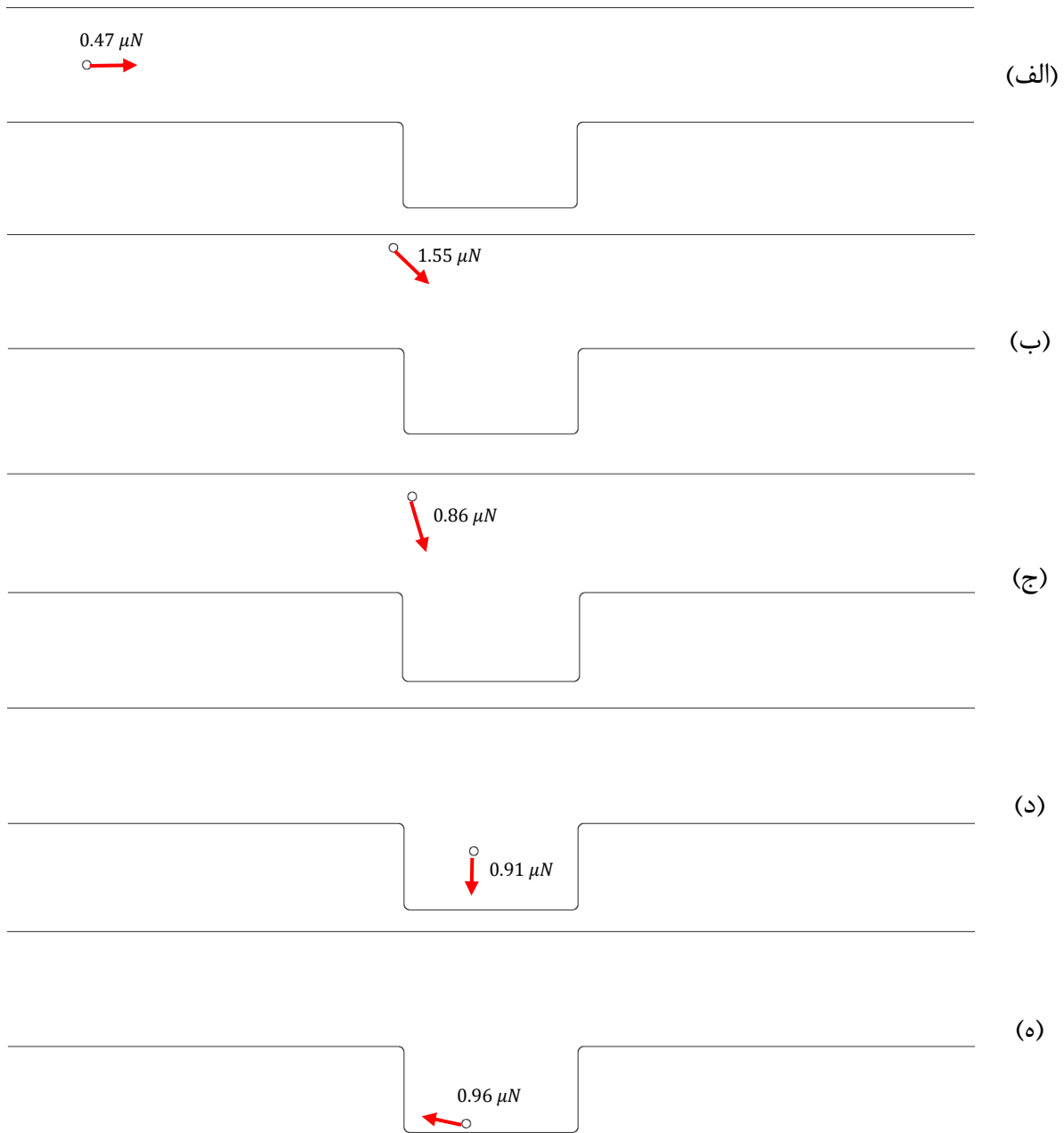


شکل ۴-۱۴: مسیر حرکت ذره به ازای مقادیر مختلف  $\bar{\zeta}$  و  $\bar{E} = 3.5$

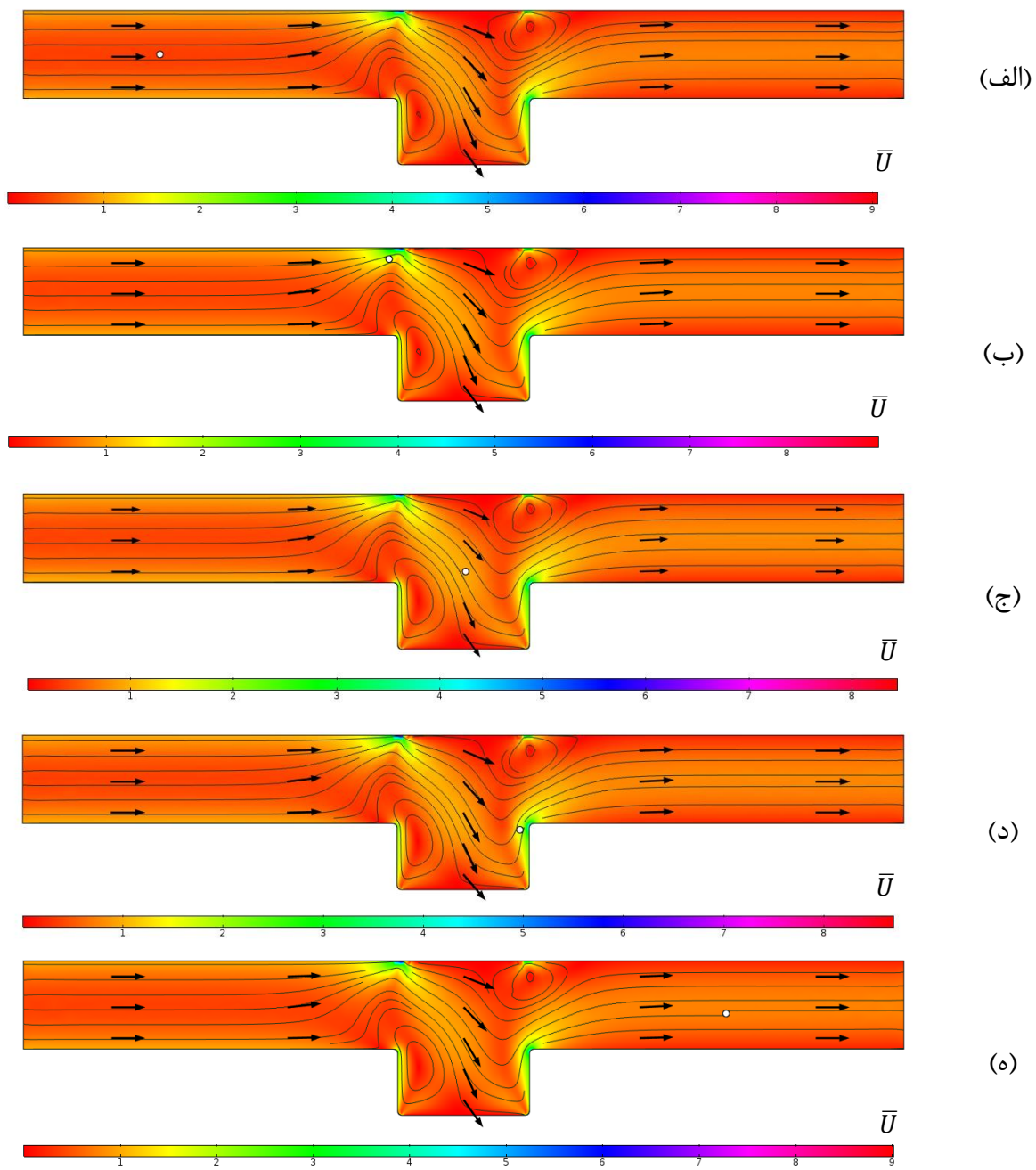
با دقت در تصویر ذرات با  $\bar{\gamma}$  کمتر از  $0,055$  از محفظه جمع‌آوری عبور کرده و از کانال خارج می‌شوند؛ ذرات با  $\bar{\gamma}$  بزرگ‌تر از  $0,055$  در کف این محفظه ته‌نشین می‌شوند. در واقع مقدار  $\bar{\gamma}$  بحرانی برابر با  $0,55$  می‌باشد. شکل ۴-۱۵ و شکل ۴-۱۶ به ترتیب مقدار و جهت نیروی هیدرودینامیکی وارد بر ذره با  $\bar{\gamma}$  برابر  $0,009$  و ذره با  $\bar{\gamma}$  برابر  $0,2$  را نشان می‌دهد که ذره اول از کانال خارج شده و ذره دوم در محفظه قرار می‌گیرد. نکته قابل توجه زمانی که است ذره وارد بخش جریان الکتریکی ثانویه می‌شود. در این ناحیه مقدار نیروی وارد بر ذره با  $\bar{\gamma}$  برابر  $0,2$  بیش از ذره با  $\bar{\gamma}$  برابر  $0,009$  و مقدار آن حدود  $1,5$  برابر ذره دوم می‌باشد. در عین حال جهت نیروی وارد بر ذره با نسبت زتا پتانسیل برابر  $0,2$  به سمت مرکز محفظه ولی نیروی وارد بر ذره با نسبت زتا پتانسیل  $0,009$  به سمت گوشه سمت راست محفظه می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش نسبت زتا پتانسیل، نیروی هیدرودینامیک وارد بر ذره نیز افزایش می‌یابد. این موضوع به خصوص در بخش محفظه جمع‌آوری که شامل الکترودهای جریان ثانویه می‌باشد از اهمیت بالایی برخوردار است.



شکل ۴-۱۵: نیروی هیدرودینامیک وارد شده به ذره با  $\bar{\zeta} = 0.009$  و  $\bar{E} = 3.5$  در الف)  $\bar{t} = 0$ ، ب)  $\bar{t} = 0.9$ ، ج)  $\bar{t} = 1.05$ ، د)  $\bar{t} = 1.26$ ، ه)  $\bar{t} = 1.68$



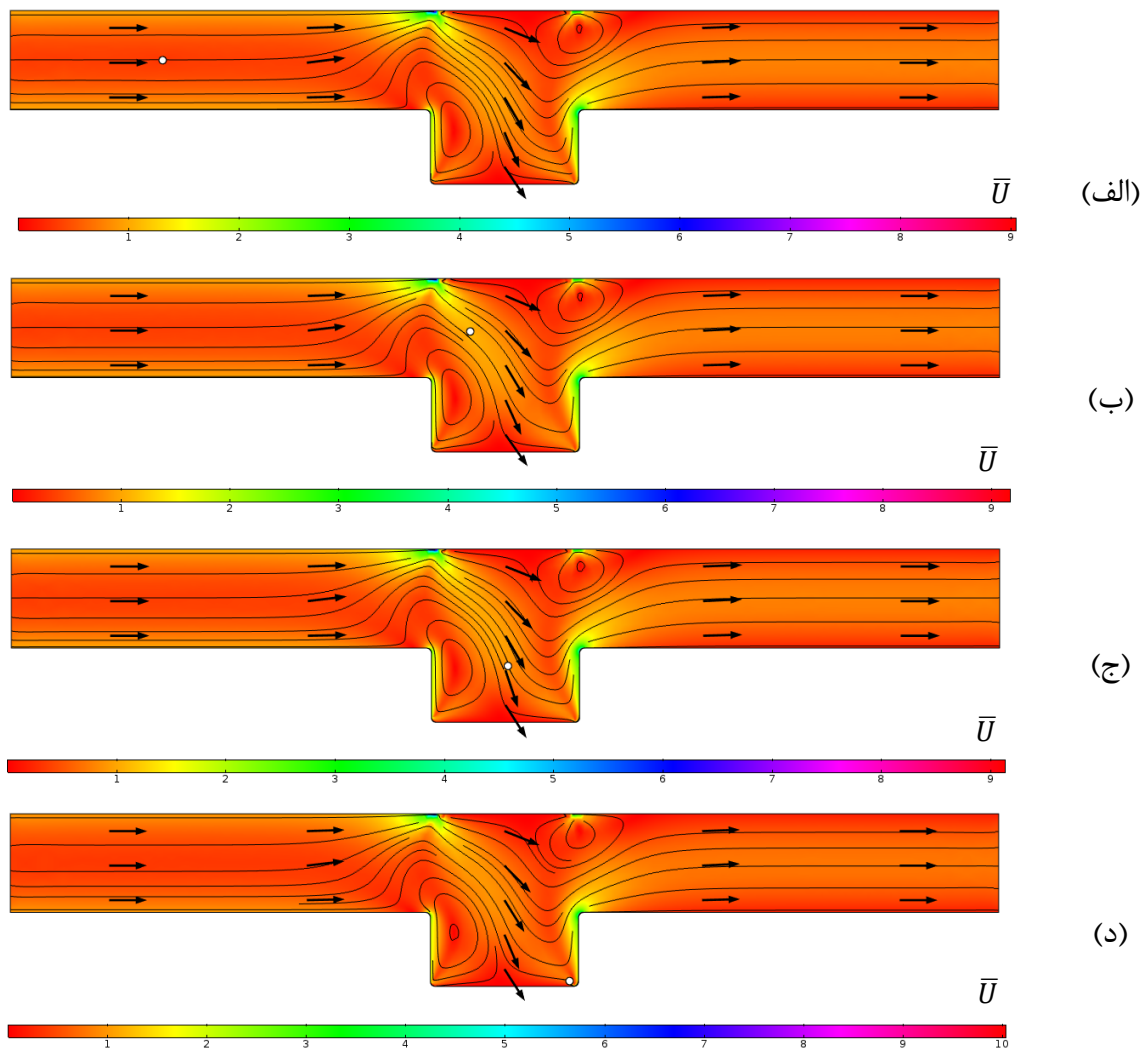
شکل ۴-۱۶: نیروی هیدرودینامیک واردشده به ذره با  $\bar{\zeta} = 0.2$  و  $\bar{E} = 3.5$  در الف)  $\bar{t} = 0$  ب)  $\bar{t} = 52.5$  ج)  $\bar{t} = 53.76$  د)  $\bar{t} = 56.7$  ه)  $\bar{t} = 58.8$



شکل ۴-۱۷: خطوط جریان و حرکت ذره با  $\bar{\zeta} = 0.009$  و  $\bar{E} = 3.5$  در الف)  $\bar{t} = 0$  ب)  $\bar{t} = 0.9$  ج)  $\bar{t} = 1.05$  د)  $\bar{t} = 1.26$  ه)  $\bar{t} = 1.68$

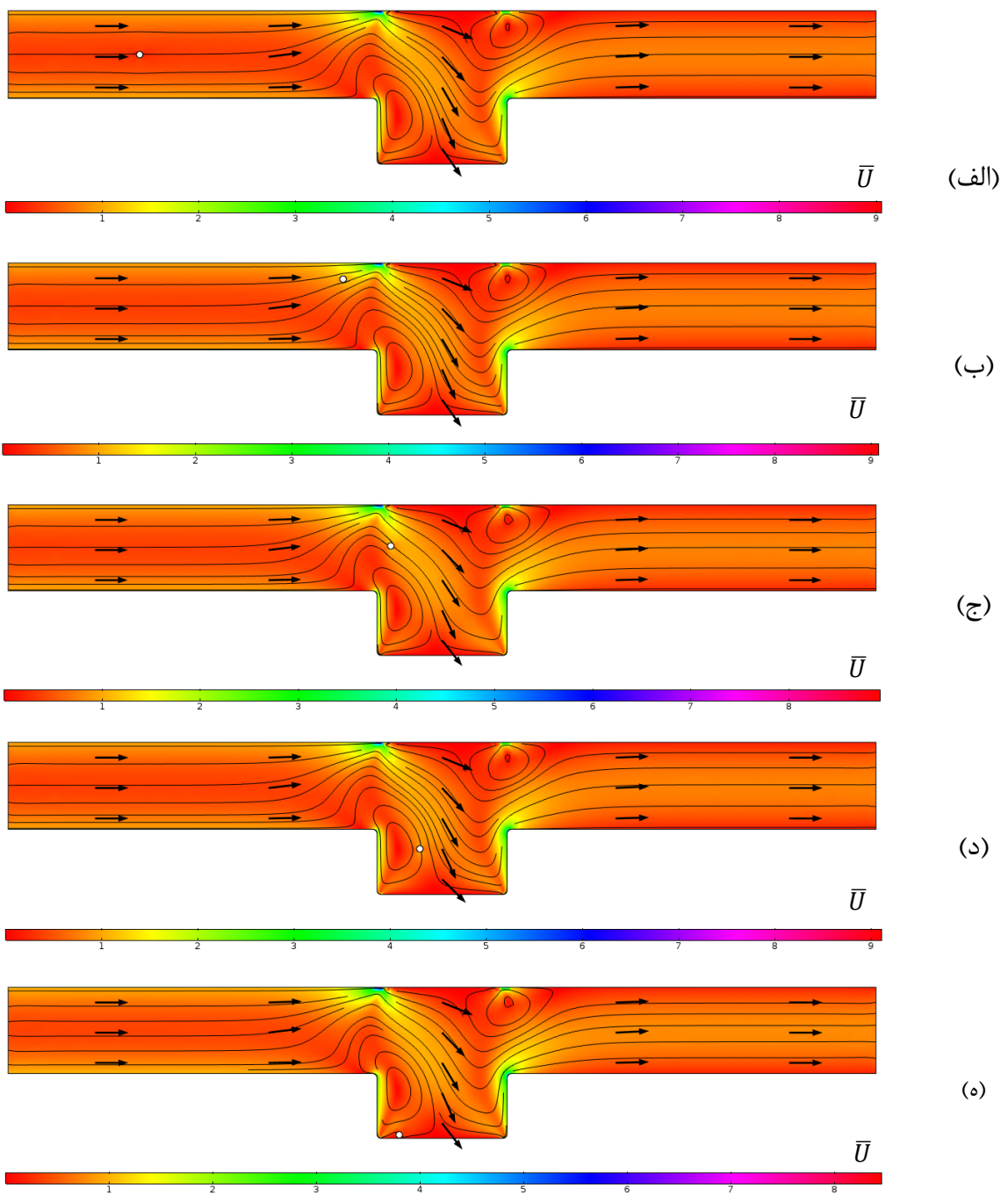
برای ذرات ته‌نشین شده دو حالت رخ می‌دهد:

۱. ذرات با  $\bar{\zeta}$  کوچک‌تر از ۰,۱۵ در نیمه راست محفظه جمع‌آوری ته‌نشین می‌شوند.



شکل ۴-۱۸: خطوط جریان و حرکت ذره با  $\bar{\zeta} = 0.055$  و  $\bar{E} = 3.5$  در (الف)  $\bar{E} = 0$  (ب)  $\bar{E} = 6.93$ .  
 (ج)  $\bar{E} = 7.56$  (د)  $\bar{E} = 8.57$

۲. ذرات با  $\bar{\zeta}$  بزرگ‌تر از ۰,۱۵ وارد گردابه محفظه شده و در نیمه چپ محفظه قرار می‌گیرند.



شکل ۴-۱۹: خطوط جریان و حرکت ذره با  $\bar{\zeta} = 0.19$  و  $\bar{E} = 3.5$  در (الف)  $\bar{t} = 0$ ، (ب)  $\bar{t} = 52.5$ ، (ج)  $\bar{t} = 54.6$ ، (د)  $\bar{t} = 56.7$ ، (هـ)  $\bar{t} = 59.01$

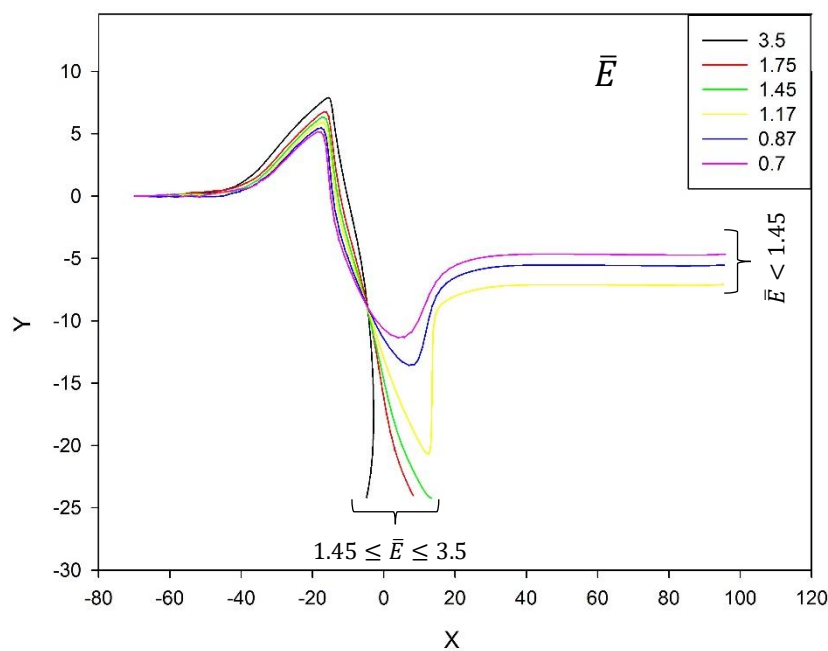
گفتنی است با دقت در شکل ۴-۱۷ الی شکل ۴-۱۹ حضور دو گردابه در بخش جریان الکتریکی ثانویه نمایان می‌شود؛ با دقت در معادله ۲-۱۳ وابستگی سرعت الکترواسماتیک به میدان الکتریکی و زتا پتانسیل مورد توجه قرار می‌گیرد. شکل خطوط جریان الکتریکی را نشان می‌دهد که در این ناحیه



مقدار جریان الکتریکی و جهت آن به دلیل برهمکنش دو جریان الکتریکی وارد بر کانال میکرو متغیر بوده که این موضوع بر جریان الکترواسماتیک تأثیر گذاشته و سبب تغییر نسبت سرعت در جهت  $x$  و  $y$  می‌شود که نتیجه آن ایجاد گردابه در این بخش می‌باشد.

#### ۴-۴-۲- تأثیر نسبت جریان الکتریکی $\bar{E}$ بر مسیر ذرات

حرکت ذره برای مقادیر مختلف جریان الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته است؛ گفتنی است با دقت در معادله ۲-۱۱ می‌توان دریافت که با افزایش مقدار جریان الکتریکی، اندازه سرعت الکترواسماتیک نیز افزایش یافته و تأثیر نیروی هیدرودینامیکی بیشتر می‌گردد که سبب انحراف ذرات از مسیر می‌شود. در تمام حالات زیر، مقدار  $\bar{\gamma}$  برابر با ۰٫۱۳ در نظر گرفته شده است که پیش‌ازاین و بر اساس شکل ۴-۱۴ وارد محفظه قرار گرفته بود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با کاهش مقدار نسبت جریان الکتریکی، این ذره از کانال خارج می‌شود زیرا نیروی هیدرودینامیکی وارد بر آن به تدریج کاهش یافته و مشابه آنچه در بخش ۴-۴-۱ گفته شد، جهت نیروی هیدرودینامیکی وارد بر ذره در ابتدای ورود به ناحیه جریان الکتریکی ثانویه از مرکز محفظه به گوشه سمت راست تغییر می‌کند. علاوه بر این مقدار نیروی هیدرودینامیکی نیز با کاهش جریان الکتریکی کاهش می‌یابد. شکل ۴-۲۰ برای مقادیر مختلف  $\bar{E}$  به دست آمده است.



شکل ۴-۲۰: مسیر حرکت ذره با  $\bar{\gamma} = 0.13$  و مقادیر مختلف  $\bar{E}$

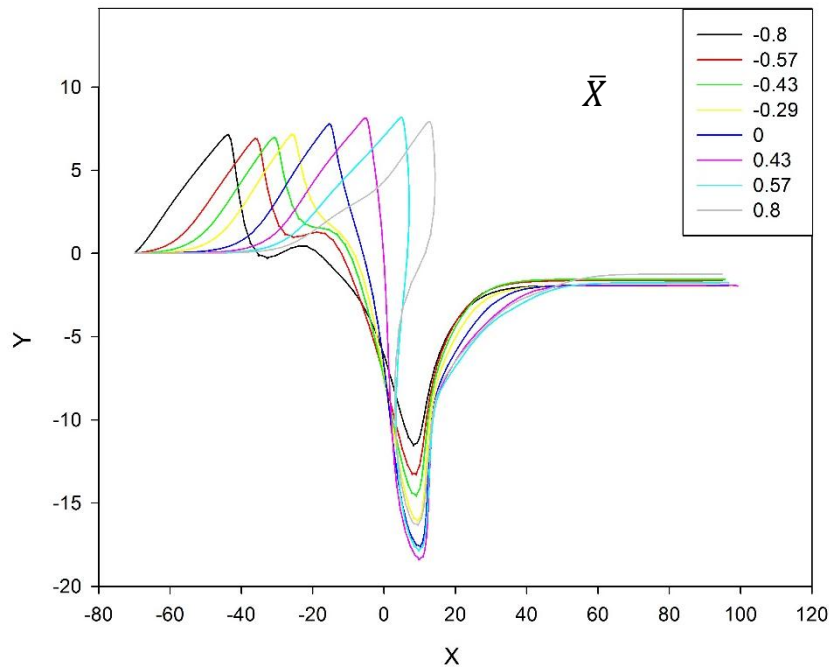
مشابه حالت قبل سه ناحیه برای جمع‌آوری ذرات پدید می‌آید:

۱. خروجی کانال: در  $\bar{E}$  کمتر از ۱,۴۵ ذرات از کانال خارج می‌شوند.
۲. سمت راست محفظه جمع‌آوری: در صورتی که  $1.45 \leq \bar{E} < 3$ ، ذرات در سمت راست محفظه جمع‌آوری، ته‌نشین می‌شوند.
۳. سمت چپ محفظه جمع‌آوری: در صورتی که مقدار  $\bar{E}$  بیش از ۳ باشد، ذرات وارد گردابه شده و در سمت چپ محفظه جمع‌آوری، قرار می‌گیرند.

#### ۴-۳- تأثیر نسبت $\bar{X}$ بر حرکت ذره

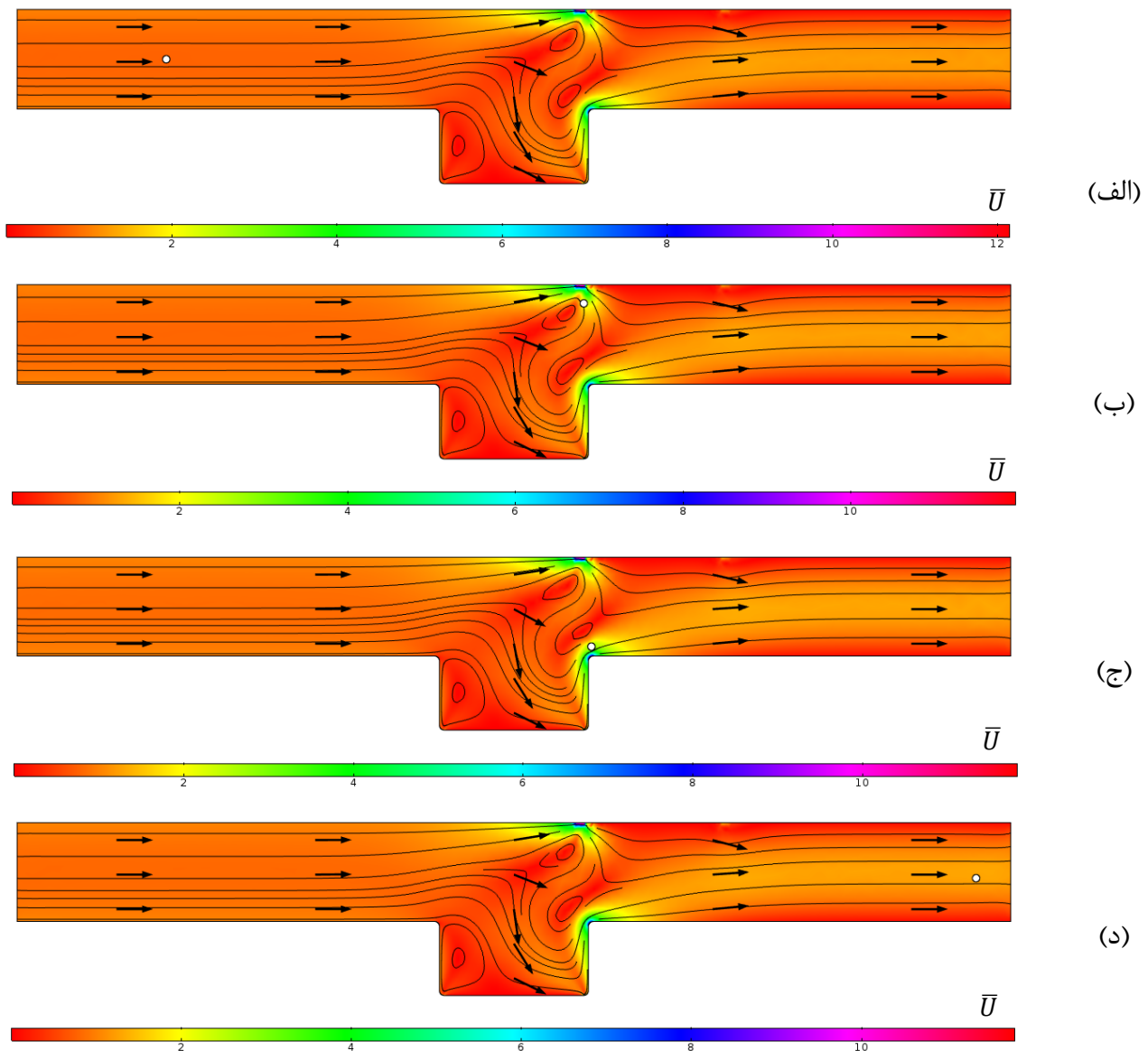
پس از بررسی تأثیر عواملی که به‌طور مستقیم در معادله سرعت الکترواسماتیک و در نتیجه آن در مسیر حرکت ذره دخیل هستند، قصد داریم تأثیر عواملی که به شکل غیرمستقیم و از طریق تحت تأثیر قرار دادن مواردی همچون خطوط جریان سیال بر مسیر حرکت ذره تأثیرگذار هستند را بررسی کنیم. در این بخش تأثیر جابه‌جایی افقی یکی از الکترودهای جریان  $E_2$  (الکتروود بالایی) بر مسیر حرکت ذرات مورد بررسی قرار گرفته است.

اگر مقدار  $\bar{X}$  برابر با ۰,۰۰۹ و مقدار  $\bar{E}$  برابر با ۳,۵ باشد، نتایج زیر برای مقادیر مختلف  $\bar{X}$  حاصل شده است.



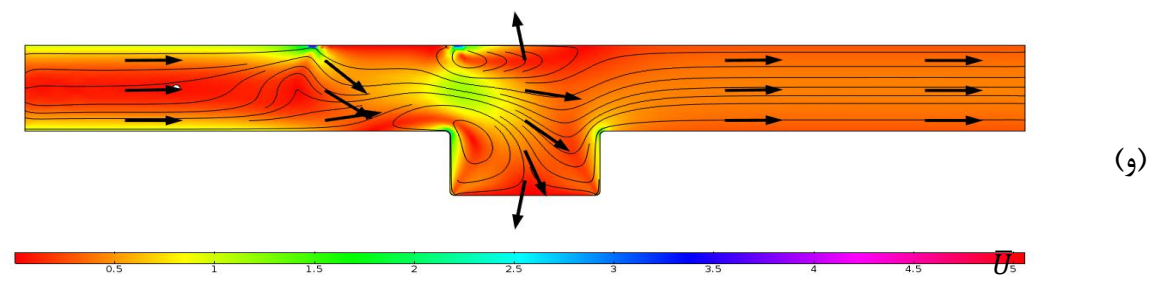
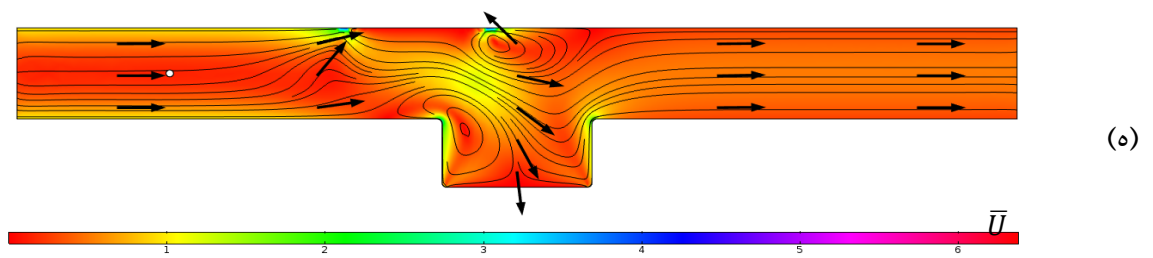
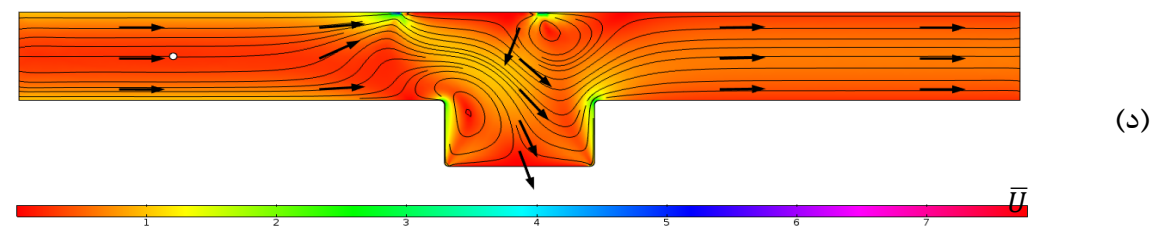
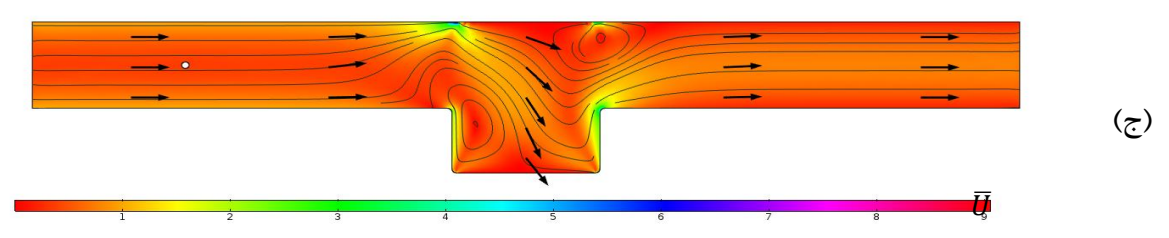
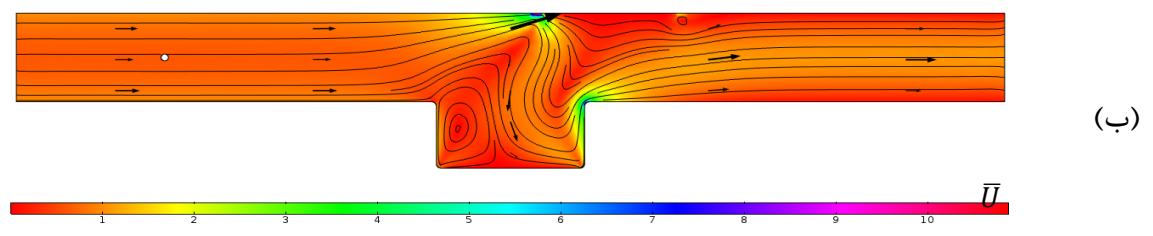
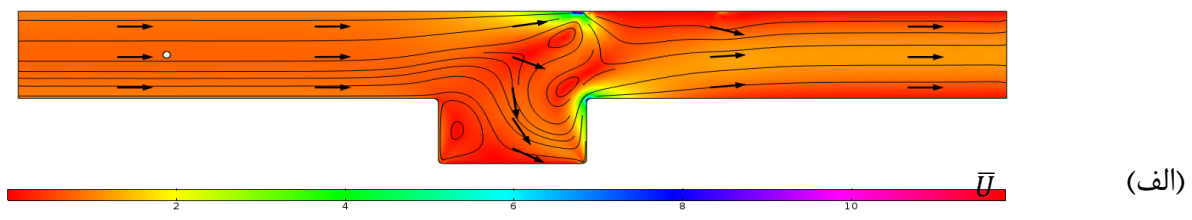
شکل ۴-۲۱: مسیر حرکت ذره با  $\bar{\zeta} = 0.009$  و مقادیر مختلف  $\bar{E}$

همان‌طور که از نمودار فوق مشخص است، جابه‌جایی الکترون بر مسیر حرکت ذرات با  $\bar{\zeta}$  برابر  $0,009$  تأثیر گذاشته ولی بر محل خروج ذره تأثیر ندارد. در واقع مقدار زتا پتانسیل به اندازه‌ای پایین است که تغییر الگوی جریان الکتریکی و پتانسیل الکتریکی و در نتیجه آن تغییر مقدار نیروی هیدرودینامیکی وارد بر ذره در نتیجه نهایی جداسازی اثرگذار نبوده، اما در عین حال بر مسیر حرکت ذره تأثیرگذار است. گفتنی است در این حالت خطوط جریان و گردابه‌ها تغییر می‌کنند که ناشی از تغییر توزیع پتانسیل الکتریکی و جریان الکتریکی در طول کانال و در نتیجه آن تغییر سرعت الکترواستاتیک می‌باشد. نحوه قرارگیری الکتروادهای جریان دوم و کیفیت خطوط جریان در زمان‌های مختلف و طی حرکت ذره به شکل زیر می‌باشند :



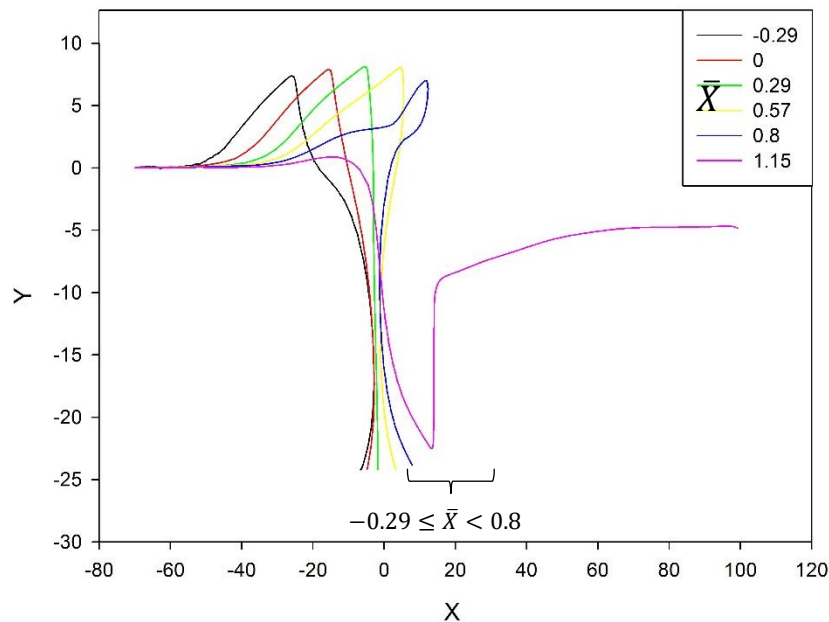
شکل ۴-۲۲: خطوط جریان و حرکت ذره با  $\bar{\zeta} = 0.009$ ،  $\bar{E} = 3.5$  و  $\bar{X} = 0.8$  در (الف)  $\bar{t} = 0$ ، (ب)  $\bar{t} = 1.16$ ، (ج)  $\bar{t} = 1.68$  و (د)  $\bar{t} = 2.42$

نمودارهای شکل ۴-۲۳ نشان‌دهنده تفاوت کیفی خطوط جریان سیال برای مقادیر مختلف  $\bar{X}$  می‌باشند. با دقت در این نمودارها، می‌توان دریافت که گردابه بالایی در مجاورت الکتروود جریان ثانویه در جهت حرکت الکتروود، جابه‌جا می‌شود. با جابه‌جایی الکتروود بالایی، خطوط جریان الکتریکی در کانال تغییر کرده و در نتیجه آن سرعت الکترواسماتیک که وابسته به مقدار و جهت جریان الکتریکی می‌باشد، دچار تغییر شده و در نهایت خطوط جریان سیال تغییر می‌کند.



شکل ۴-۲۳: خطوط جریان برای (الف)  $\bar{X} = 0.8$  (ب)  $\bar{X} = 0.57$  (ج)  $\bar{X} = 0$  (د)  $\bar{X} = -0.29$  (ه)  $\bar{X} = -0.8$  (و)  $\bar{X} = -0.57$

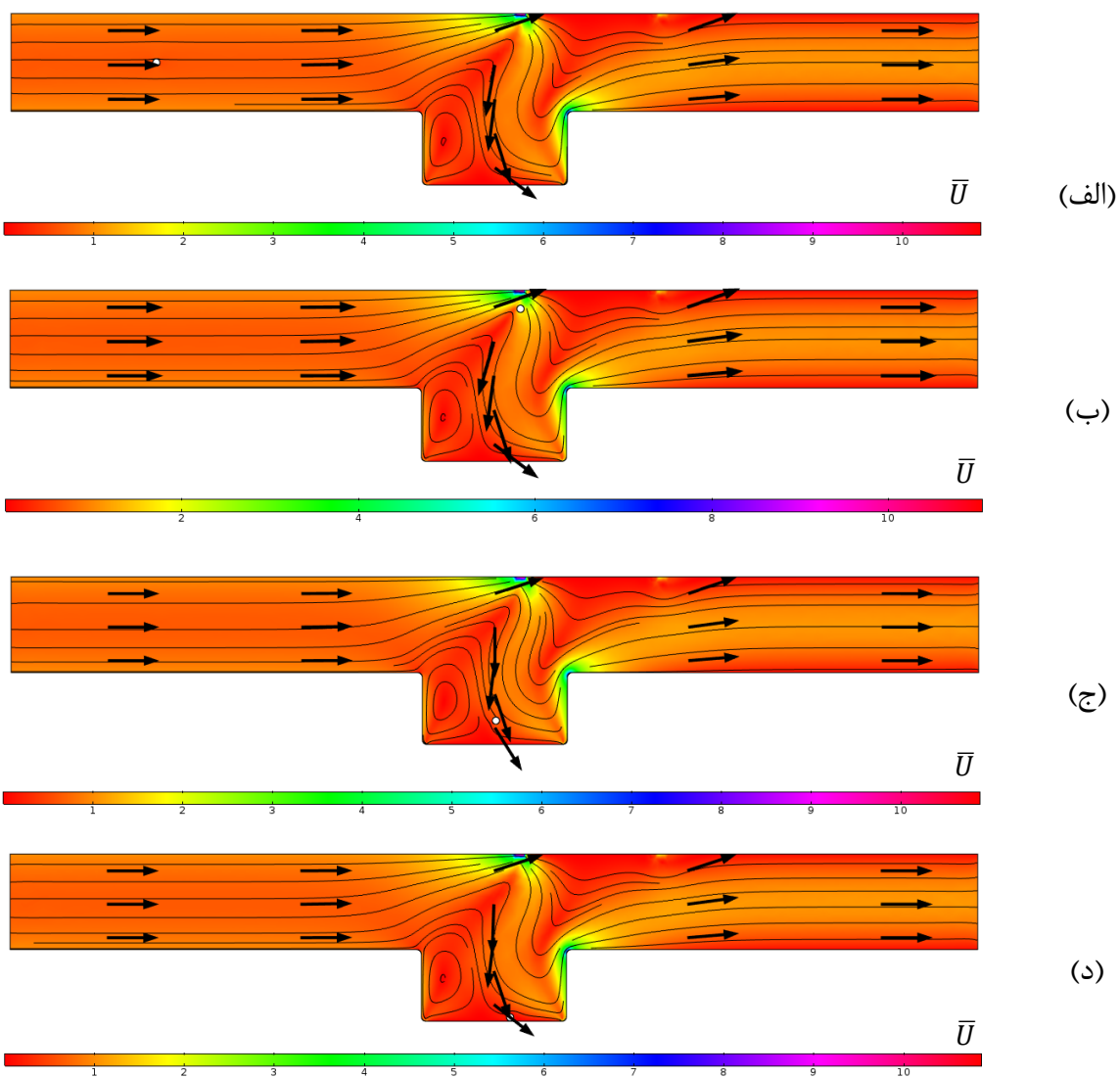
اگر مقدار  $\bar{\zeta}$  تغییر کرده و به مقدار ۰,۱۳ افزایش یابد، نتایج حاصله متفاوت خواهد بود؛ برخلاف حالت قبلی که مقدار  $\bar{\zeta}$  برابر با ۰,۰۰۹ بود، مقدار زتا پتانسیل ذره در این حالت به اندازه‌ای است که با جابه‌جایی الکتروود و در نتیجه آن تغییر الگوی جریان و توزیع پتانسیل الکتریکی علاوه بر مسیر حرکت ذره، بر نتیجه نهایی جداسازی ذرات تأثیر می‌گذارد.



شکل ۴-۲۴: مسیر حرکت ذره با  $\bar{\zeta} = 0.13$ ،  $\bar{E} = 3.5$  و مقادیر مختلف  $\bar{X}$

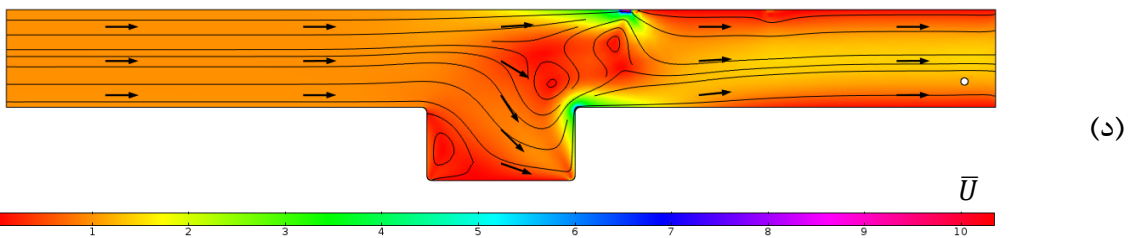
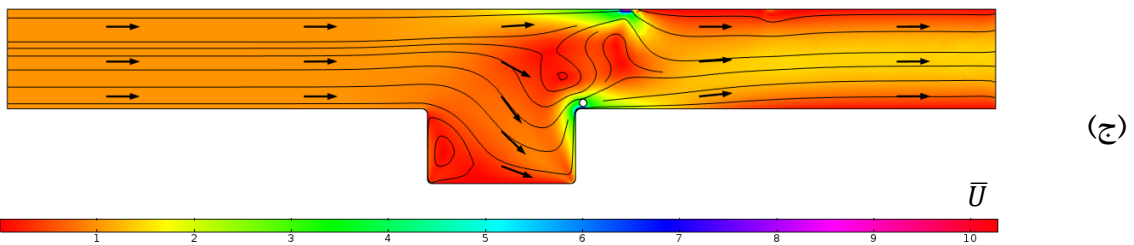
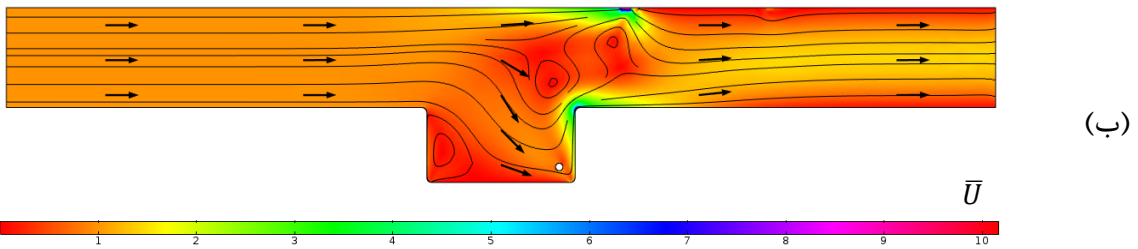
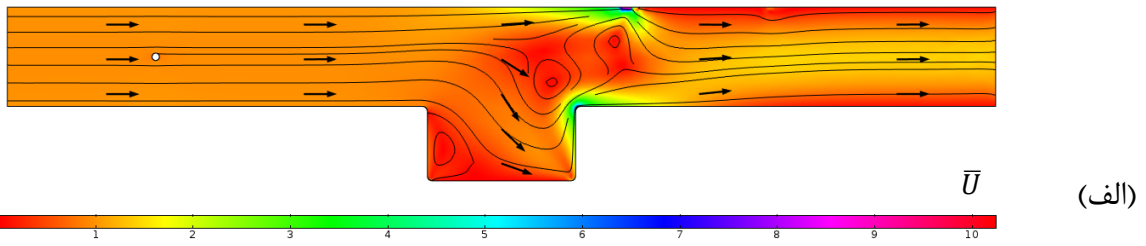
در این حالت با جابه‌جایی الکتروود بالایی به سمت راست، محل خروج ذره نیز تغییر می‌کند:

۱. برای مقادیر  $\bar{X} \leq -0.29$  تأثیری در محل خروج ذره مشاهده نمی‌شود
۲. برای مقادیر  $-0.29 < \bar{X} \leq 1$  محل خروج ذره به سمت راست محفظه جمع‌آوری ذرات متمایل می‌شود.



شکل ۴-۲۵: خطوط جریان و حرکت ذره با  $\bar{\zeta} = 0.13$  و  $\bar{E} = 3.5$  و  $\bar{X} = 0.57$  در (الف)  $\bar{t} = 0$  (ب)  $\bar{t} = 19.85$  (ج)  $\bar{t} = 23.52$  (د)  $\bar{t} = 25.43$

۳. برای مقادیر  $1 < \bar{X}$  ذره از محفظه جمع‌آوری گریخته و از سمت راست کانال خارج می‌شود.



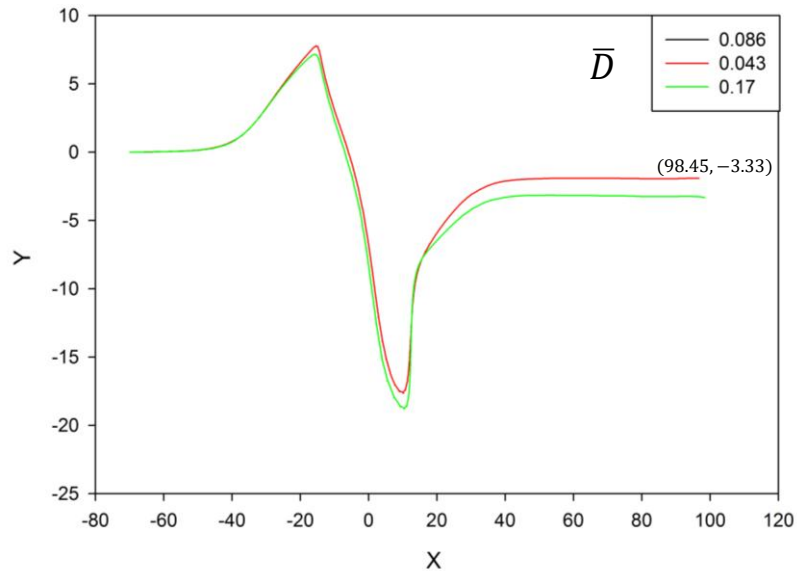
شکل ۴-۲۶: خطوط جریان و حرکت ذره با  $\bar{\zeta} = 0.13$  و  $\bar{E} = 3.5$  و  $\bar{X} = 1.15$  در (الف)  $t = 0$ ، (ب)  $\bar{t} = 14.7$ ، (ج)  $\bar{t} = 24.26$ ، (د)  $\bar{t} = 36.75$

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مقدار زتا پتانسیل ذره، جابه‌جایی الکترودها و تغییر خطوط جریان سیال نیز تأثیر بیشتری بر مسیر ذره و در نهایت محل خروج ذرات خواهد داشت؛ زیرا همان‌طور که در ۴-۴-۱ بررسی شد، با افزایش نسبت زتا پتانسیل، نیروی هیدرودینامیکی نیز افزایش می‌یابد؛ بنابراین افزایش میدان الکتریکی که یکی از عوامل تأثیرگذار در سرعت الکترواسماتیک و در نتیجه آن، نیروی هیدرودینامیکی است، بر مسیر ذرات با نسبت زتا پتانسیل بزرگتر از  $0.055$  بیش از ذرات با نسبت زتا پتانسیل کمتر از این مقدار است.



#### ۴-۴-۴- تأثیر هندسه ذره

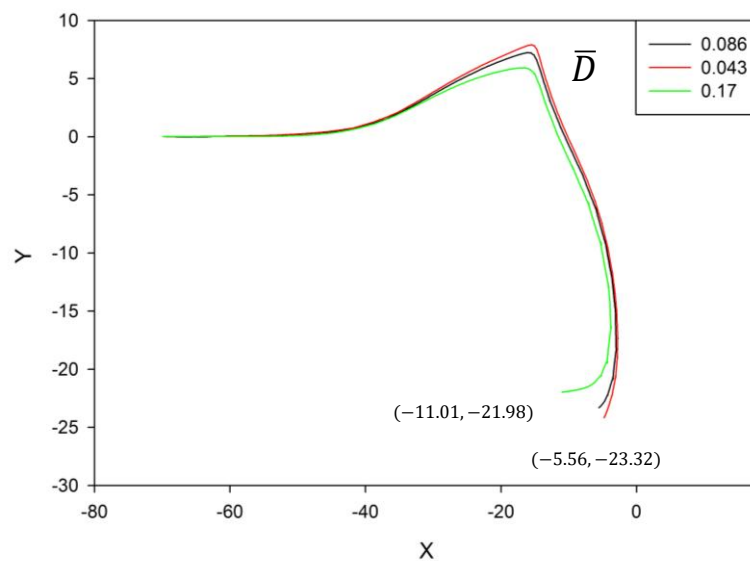
در این بخش، ابتدا قطر ذره و تأثیر آن بر مسیر حرکت، مورد بررسی قرار گرفته است. در تمام حالات،  $\bar{E} = 3.5$  و  $\bar{X} = 0$  هست. برای حالتی که  $\bar{\zeta} = 0.009$  داریم:



شکل ۴-۲۷: مسیر حرکت ذره با  $\bar{\zeta} = 0.009$ ،  $\bar{E} = 3.5$ ،  $\bar{X} = 0$

مختصات آخرین محل حضور ذرات یکی از مقادیر  $\bar{D}$  یعنی  $0.043$  در شکل ۴-۲۷ و

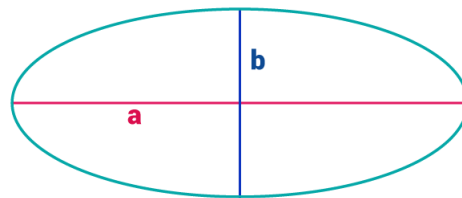
شکل ۴-۲۸ نمایش داده شده است. برای حالتی که  $\bar{\zeta} = 0.13$  داریم:



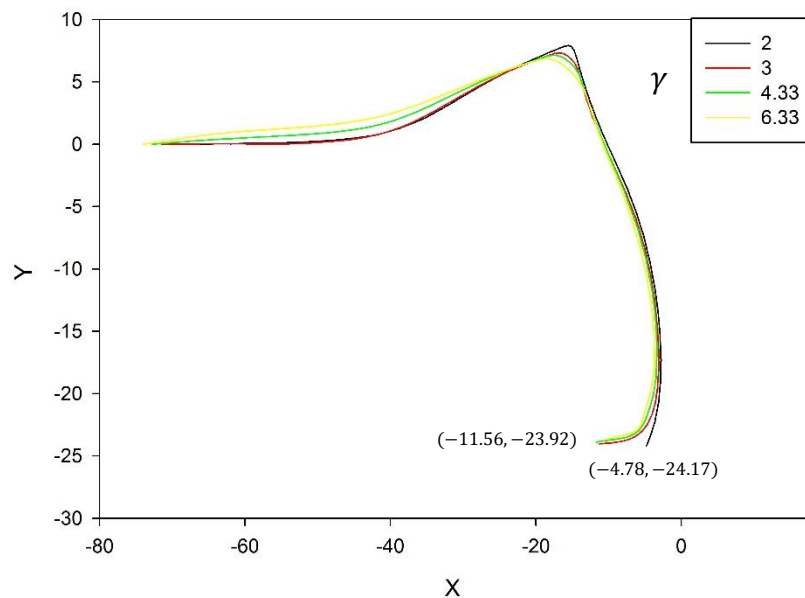
شکل ۴-۲۸: مسیر حرکت ذره با  $\bar{\zeta} = 0.13$ ،  $\bar{E} = 3.5$ ،  $\bar{X} = 0$

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش  $\bar{\zeta}$  تغییر قطر تأثیر محسوسی بر مسیر حرکت ذره ندارد. در ادامه تأثیر شکل ذره بر مسیر آن بررسی می‌شود. چند ذره‌ی استوانه‌ای شکل در کنار ذره‌ی کروی شکل با زتا پتانسیل‌های یکسان مورد بررسی قرار گرفتند که نتیجه آن در شکل‌های شکل ۳۰-۴ و شکل ۳۱-۴ خلاصه شده است. مقدار  $\gamma$  برابر است با نسبت دو قطر بیضی و به صورت زیر تعریف می‌شود:

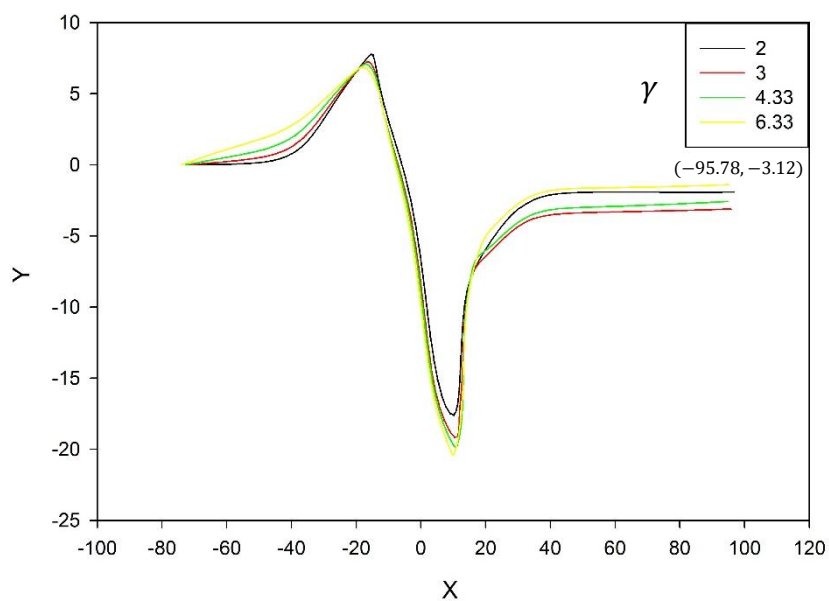
$$\gamma = \frac{a}{b} \quad (۲-۴)$$



شکل ۲۹-۴: نمایش هندسه بیضی

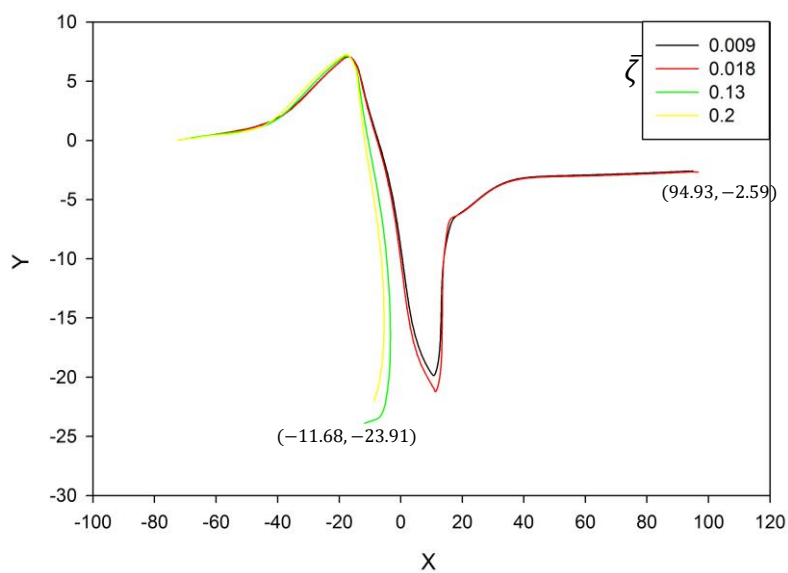


شکل ۳۰-۴: مسیر حرکت ذره با  $\bar{\zeta} = 0.13$ ,  $\bar{E} = 3.5$ ,  $\bar{X} = 0$  و مقدار  $\bar{D} = 0.043$

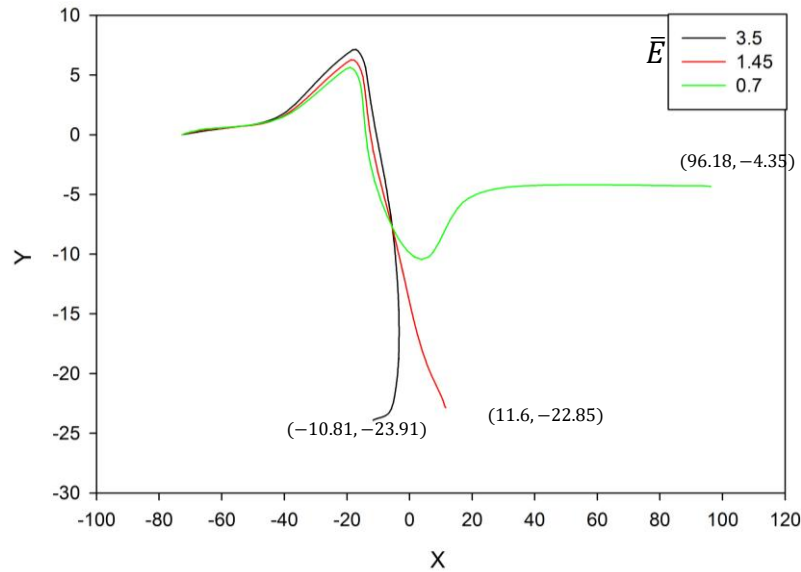


شکل ۳۱-۴: مسیر حرکت ذره با  $\bar{\zeta} = 0.009$ ،  $\bar{E} = 3.5$ ،  $\bar{X} = 0$  و  $\bar{D} = 0.043$

شکل ۳۲-۴ تأثیر زتا پتانسیل و شکل ۳۳-۴ تأثیر جریان الکتریکی بر مسیر حرکت ذره استوانه‌ای را نشان می‌دهند.



شکل ۳۲-۴: تأثیر نسبت زتا پتانسیل بر حرکت ذره استوانه‌ای با  $\gamma = 4.33$  در  $\bar{E} = 3.5$ ،  $\bar{X} = 0$  و  $\bar{D} = 0.043$

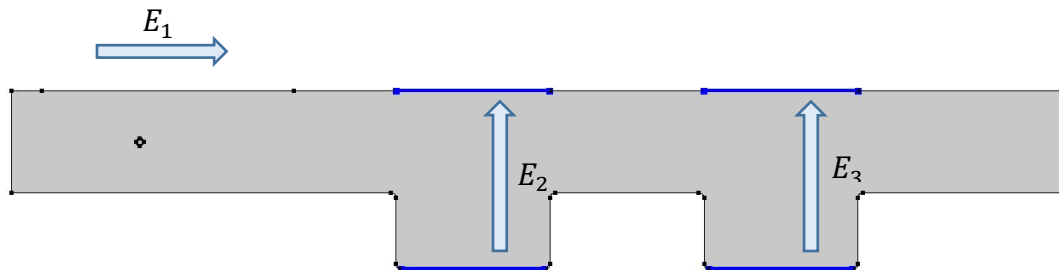


شکل ۴-۳۳: تأثیر جریان الکتریکی بر حرکت ذره استوانه‌ای با  $\gamma = 4.33$  در  $\bar{X} = 0$ ،  $\bar{D} = 0.043$  و  $\bar{\zeta} = 0.13$

بنابراین هندسه ذرات تأثیری در نتیجه جداسازی ذرات ندارد. این موضوع در بحث جداسازی ذرات، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در واقع با استفاده از این روش ذرات فقط با خواص ذاتی و نه بر اساس هندسه از یکدیگر جدا می‌شوند. این مسئله تا حدودی قابل پیش‌بینی بود؛ زیرا سرعت الکترواستاتیک به زتا پتانسیل و جریان الکتریکی و خواص سیال وابسته است و این موضوع بر روی نیروی هیدرودینامیک وارد بر ذره اثر می‌گذارد.

#### ۴-۵- ارائه یک میکروچیپ

با افزودن چند جریان الکتریکی دیگر، می‌توان جداسازی را برای ذرات متنوع‌تری اعمال کرد.



شکل ۴-۳۴: هندسه میکروچیپ

شکل ۴-۳۴ الکترودهای جریان‌های الکتریکی وارد بر میکروچیپ را نشان می‌دهند. جریان الکتریکی اول بین ورودی و خروجی کانال جریان‌های الکتریکی در میانه کانال و بافاصله  $80\mu m$  از یکدیگر اعمال می‌شوند. ثوابت مورد استفاده در این میکروچیپ بدین شرح است:

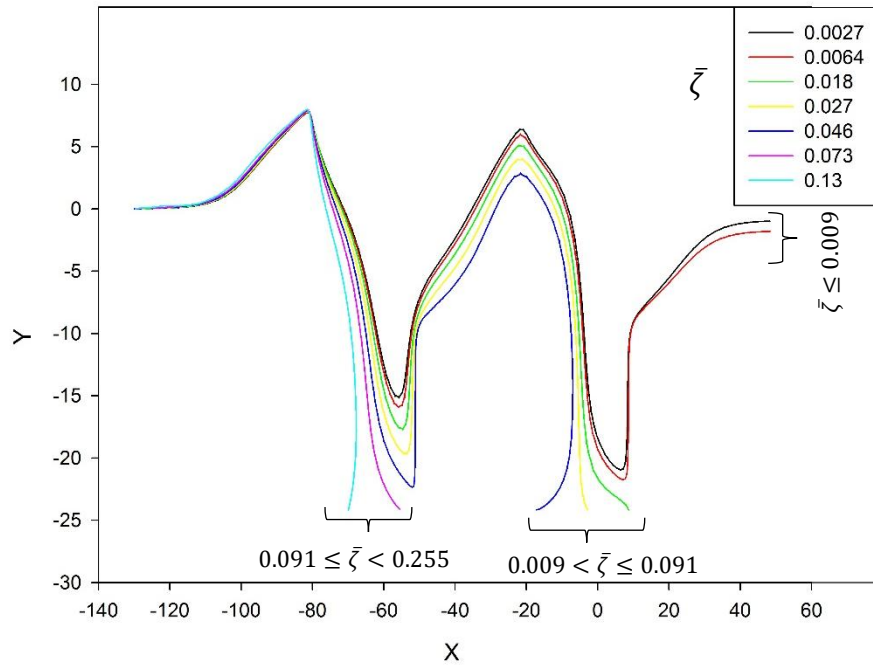
جدول ۴-۷: ثوابت مورد استفاده در شبیه‌سازی میکروچیپ

80	ثابت دی‌الکتریک سیال و ذره، $\epsilon$
$8.854 \times 10^{-12}$	گذردهی خلأ، $\epsilon_0 (C/V.m)$
$0.9 \times 10^{-3}$	لزجت سیال، $\mu (kg/m.s)$
998	چگالی سیال و ذره، $\rho (kg/m^3)$
-110	زتا پتانسیل روی دیواره نارسانای کانال، $\zeta_w (mV)$
20	عرض کانال، $W (\mu m)$
205	طول کانال، $L (\mu m)$
35	فاصله دو الکترودهای جریان الکتریکی دوم و سوم، $L_2 (\mu m)$

با افزودن جریان الکتریکی سوم، عدد بی‌بعد جدیدی نیز برای بررسی نتایج شبیه‌سازی اضافه می‌گردد که به شکل زیر تعریف می‌شود:

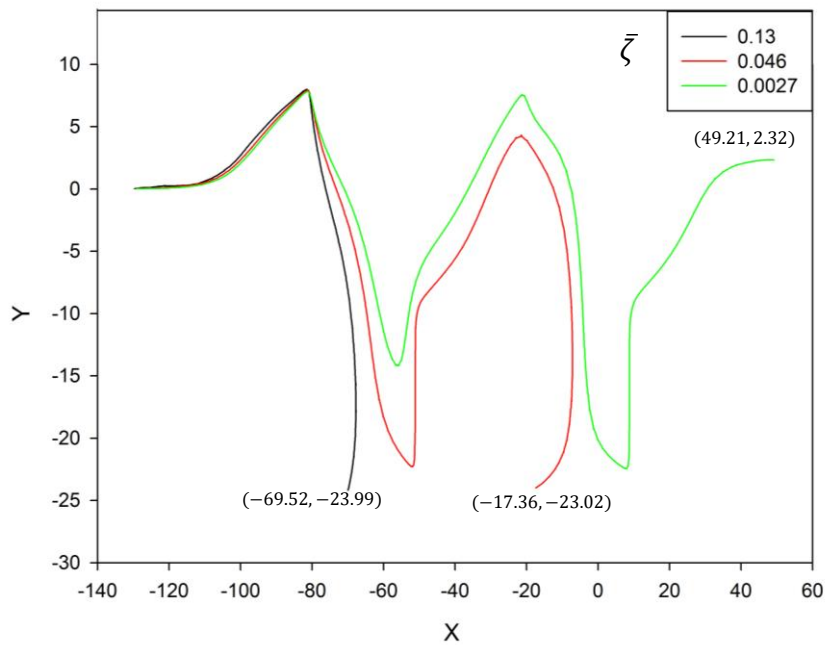
$$\bar{e} = \frac{E_3}{E_1} \quad (۳-۴)$$

شکل ۴-۳۵ مسیر حرکت ذره صلب با نسبت زتا پتانسیل‌های مختلف را نشان می‌دهد:

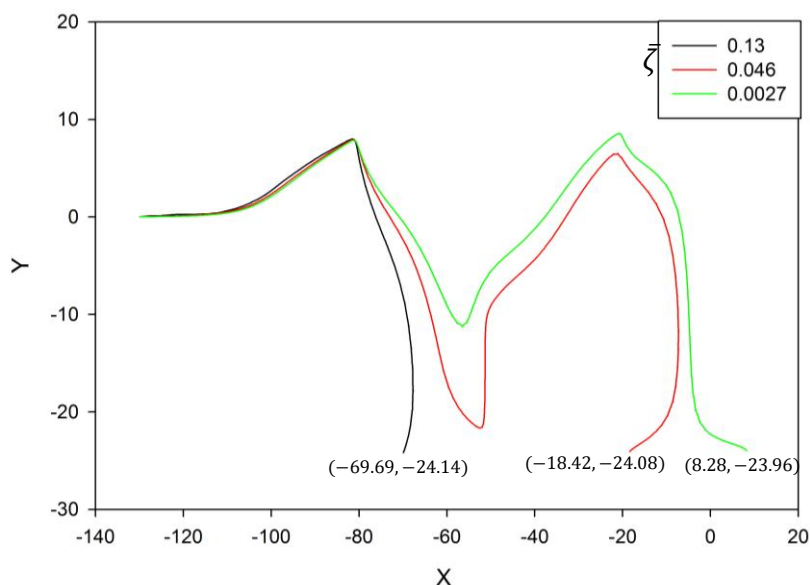


شکل ۴-۳۵: مسیر حرکت ذره صلب با چند زتا پتانسیل مختلف در  $\bar{E} = 3.5$ ,  $\bar{e} = 6.5$ ,  $\bar{D} = 0.043$  و  $\bar{X} = 0$

در ادامه با تغییر جریان الکتریکی سوم و در نتیجه تغییر  $\bar{e}$ ، مسیر حرکت ذرات را بررسی می‌کنیم:



شکل ۴-۳۶: مسیر حرکت ذره صلب با سه زتا پتانسیل مختلف در  $\bar{E} = 3.5$ ,  $\bar{e} = 9.5$ ,  $\bar{D} = 0.043$  و  $\bar{X} = 0$



شکل ۴-۳۷: مسیر حرکت ذره صلب با سه زتا پتانسیل مختلف در  $\bar{E} = 3.5$ ،  $\bar{e} = 15$ ،  $\bar{D} = 0.043$  و  $\bar{X} = 0$

با مقایسه شکل ۴-۳۵ تا شکل ۴-۳۷ می‌توان دریافت که افزایش مقدار جریان الکتریکی سوم تأثیری بر نتیجه جداسازی ذرات با نسبت زتا پتانسیل ۰,۱۳ و ۰,۰۴۶ نخواهد داشت؛ اما ذره با نسبت زتا پتانسیل ۰,۰۰۲۷ را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این نتیجه قابل پیش‌بینی بود؛ زیرا ذره با زتا پتانسیل ۰,۱۳ تحت تأثیر میدان الکتریکی اول قرار گرفته و در محفظه جمع‌آوری اول قرار می‌گیرد، ذره دوم نیز تحت تأثیر میدان الکتریکی دوم در محفظه جمع‌آوری قرار می‌گیرد و همان‌طور که در بخش ۴-۲ عنوان شد، افزایش میدان برای ذره‌ای که تحت تأثیر میدان الکتریکی در محفظه جمع‌آوری قرار می‌گیرد، تأثیری بر نتیجه جداسازی نخواهد داشت چراکه این افزایش نیروی وارد بر ذره در جهت  $Y$  را افزایش داده و ذره را با سرعت بیشتری به سمت محفظه جمع‌آوری هدایت می‌کند؛ اما ذره با زتا پتانسیل ۰,۰۰۲۷ در شکل ۴-۳۵ از کانال خارج می‌شود حال آنکه در شکل ۴-۳۷ وارد محفظه جمع‌آوری می‌شود.

گفتنی است با افزودن الکترودهای دیگر و در نتیجه جریان‌های الکتریکی بیشتر می‌توان ذرات با زتا پتانسیل‌های متنوع‌تری را از یکدیگر جدا کرد.





## فصل پنجم

# جمع‌بندی و ارائه نتایج

## ارائه نتایج و پیشنهادات

### ۵-۱- جمع بندی نتایج

حرکت ذره صلب تحت تأثیر دو یا چند میدان الکتریکی مورد بررسی قرار گرفت و کاربردهایی برای استفاده در حوزه میکروفلوئیدیک معرفی گردید. در ادامه به برخی از نتایج به دست آمده در این پژوهش اشاره می‌شود. ذره صلب با زتا پتانسیل ثابت به یک میکرو کانال حاوی سیال الکترولیت که در معرض جریان الکتریکی DC قرار دارد، وارد می‌شود؛ دیواره‌های این میکرو کانال نیز دارای زتا پتانسیل ثابت می‌باشند. پس از شکل‌گیری لایه الکتریکی دوگانه در اطراف ذره، تنها نیرویی که به ذره اعمال می‌شود، نیروی هیدرودینامیکی است. حرکت ذره در ابتدای حرکت یکنواخت بوده ولی به محض حضور در میدان الکتریکی دوم، به دلیل وابستگی سرعت الکترواستاتیک دیواره ذره به میدان الکتریکی، نیروی هیدرودینامیکی وارد بر آن تغییر می‌کند. مقدار تغییر این نیرو برای ذره‌ها با زتا پتانسیل‌های مختلف، متفاوت می‌باشد. تفاوت مقدار نیروی وارده سبب تفاوت مسیر حرکتی ذرات بر اساس مقدار زتا پتانسیل می‌شود؛ در نتیجه با تغییر زتا پتانسیل می‌توان مسیرهای مختلفی را برای ذرات پیش‌بینی کرد و ذرات را بر این اساس طبقه‌بندی کرد.

در این پژوهش، دو ناحیه کلی برای حضور ذرات پیش‌بینی شد:

۱. خروجی کانال: ذرات با نسبت زتا پتانسیل کمتر از مقدار بحرانی، کانال خارج می‌شوند.
۲. در مجاورت الکتروود جریان ثانویه: ذرات با نسبت زتا پتانسیل بیش از مقدار بحرانی در مجاورت الکتروودهای جریان ثانویه قرار می‌گیرند؛ که بر اساس جهت میدان الکتریکی و مقدار زتا پتانسیل، حضور ذرات ممکن است در مجاورت الکتروود قطب منفی و یا مثبت جریان DC باشد.

گفتنی است با افزودن جریان‌های الکتریکی جدید به میکرو کانال، می‌توان ذرات متنوع‌تری را از یکدیگر جدا کرد. در ادامه یک نمونه از این میکروچیپ‌ها برای جداسازی سه نوع ذره ارائه گردید.

همچنین تأثیر جابه‌جایی الکترودها نسبت به هم و در راستای افقی مورد مطالعه قرار گرفت، که مشاهده گردید این جابه‌جایی بر ذرات با نسبت زتا پتانسیل کمتر از مقدار بحرانی تأثیر ندارد؛ اما برای ذرات با نسبت زتا پتانسیل بیش از مقدار بحرانی تأثیرگذار می‌باشد.

از نتایج بارز این پژوهش بررسی تأثیر هندسه بر مسیر حرکت ذره می‌باشد. مشاهده گردید که نه تنها هندسه ذره تأثیری بر نتیجه جداسازی نداشته، بلکه بر مسیر حرکت ذره نیز بی‌تأثیر می‌باشد.

## ۵-۲- پیشنهادها

- بررسی مسیر حرکت و جداسازی ذرات در جریان الکتریکی AC
- تلفیق روش بررسی شده در این پژوهش با سایر روش‌های جداسازی اعم از فعال و منفعل به منظور کاهش تفاوت زتا پتانسیل ذرات جداسازی شده
- بررسی حرکت ذرات هادی جریان الکتریکی در میکروچیپ ارائه شده و استفاده از زتا پتانسیل القایی روی دیواره ذرات
- قرارگیری دو صفحه هادی جریان الکتریکی در کنار الکترودهای ثانویه و بررسی حرکت ذرات با زتا پتانسیل ثابت

- [1] S. Wall, “The history of electrokinetic phenomena,” *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, vol. 15, no. 3, pp. 119–124, Jun. 2010.
- [2] F. F. Reuss, “Sur un nouvel effet de l’electricite galvanique,” *Mem. Soc. Imp. Natur. Moscou*, vol. 2, pp. 327–337, 1809.
- [3] C. Thomas *et al.*, “Charge-based separation of particles and cells with similar sizes via the wall-induced electrical lift,” *Electrophoresis*, vol. 38, no. 2, pp. 320–326, Jan. 2017.
- [4] A. A. S. Bhagat, H. Bow, H. W. Hou, S. J. Tan, J. Han, and C. T. Lim, “Microfluidics for cell separation,” *Med. Biol. Eng. Comput.*, vol. 48, no. 10, pp. 999–1014, Oct. 2010.
- [5] S. Yan, J. Zhang, D. Yuan, and W. Li, “Hybrid microfluidics combined with active and passive approaches for continuous cell separation,” *Electrophoresis*, vol. 38, no. 2, pp. 238–249, Jan. 2017.
- [6] S. Yan *et al.*, “An integrated dielectrophoresis-active hydrophoretic microchip for continuous particle filtration and separation,” *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 25, no. 8, p. 084010, Aug. 2015.
- [7] J. Oakey, J. Allely, and D. W. M. Marr, “Laminar-Flow-Based Separations at the Microscale,” *Biotechnol. Prog.*, vol. 18, no. 6, pp. 1439–1442, Dec. 2002.
- [8] † Masumi Yamada, † and Megumi Nakashima, and ‡ Minoru Seki\*, “Pinched Flow Fractionation: Continuous Size Separation of Particles Utilizing a Laminar Flow Profile in a Pinched Microchannel,” 2004.
- [9] † Hirosuke Maenaka, ‡ Masumi Yamada, † and Masahiro Yasuda, and †,§ Minoru Seki\*, “Continuous and Size-Dependent Sorting of Emulsion Droplets Using Hydrodynamics in Pinched

- Microchannels,” 2008.
- [10] Y. Sai, M. Yamada, M. Yasuda, and M. Seki, “Continuous separation of particles using a microfluidic device equipped with flow rate control valves,” *J. Chromatogr. A*, vol. 1127, no. 1–2, pp. 214–220, Sep. 2006.
- [11] J.-S. Park and H.-I. Jung, “Multiorifice Flow Fractionation: Continuous Size-Based Separation of Microspheres Using a Series of Contraction/Expansion Microchannels,” *Anal. Chem.*, vol. 81, no. 20, pp. 8280–8288, Oct. 2009.
- [12] E. S. ASMOLOV, “The inertial lift on a spherical particle in a plane Poiseuille flow at large channel Reynolds number,” *J. Fluid Mech.*, vol. 381, p. S0022112098003474, Feb. 1999.
- [13] L. ZENG, S. BALACHANDAR, and P. FISCHER, “Wall-induced forces on a rigid sphere at finite Reynolds number,” *J. Fluid Mech.*, vol. 536, pp. 1–25, Jul. 2005.
- [14] G. SEGRÉ and A. SILBERBERG, “Radial Particle Displacements in Poiseuille Flow of Suspensions,” *Nature*, vol. 189, no. 4760, pp. 209–210, Jan. 1961.
- [15] D. H. Yoon, J. B. Ha, Y. K. Bahk, T. Arakawa, S. Shoji, and J. S. Go, “Size-selective separation of micro beads by utilizing secondary flow in a curved rectangular microchannel,” *Lab Chip*, vol. 9, no. 1, pp. 87–90, Jan. 2009.
- [16] Dino Di Carlo, Jon F. Edd, Daniel Irimia, and Ronald G. Tompkins, and M. Toner\*, “Equilibrium Separation and Filtration of Particles Using Differential Inertial Focusing,” 2008.
- [17] A. Russom, A. K. Gupta, S. Nagrath, D. Di Carlo, J. F. Edd, and M. Toner, “Differential inertial focusing of particles in curved low-aspect-ratio microchannels,” *New J. Phys.*, vol. 11, no. 7, p. 075025,

Jul. 2009.

- [18] S. S. Kuntaegowdanahalli, A. A. S. Bhagat, G. Kumar, and I. Papautsky, "Inertial microfluidics for continuous particle separation in spiral microchannels," *Lab Chip*, vol. 9, no. 20, p. 2973, Oct. 2009.
- [19] A. A. S. Bhagat, S. S. Kuntaegowdanahalli, and I. Papautsky, "Continuous particle separation in spiral microchannels using dean flows and differential migration," *Lab Chip*, vol. 8, no. 11, p. 1906, Nov. 2008.
- [20] M. G. Lee, S. Choi, and J.-K. Park, "Inertial separation in a contraction–expansion array microchannel," *J. Chromatogr. A*, vol. 1218, no. 27, pp. 4138–4143, Jul. 2011.
- [21] S. Choi and J.-K. Park, "Continuous hydrophoretic separation and sizing of microparticles using slanted obstacles in a microchannel," *Lab Chip*, vol. 7, no. 7, p. 890, Jun. 2007.
- [22] S. C. and and J.-K. Park\*, "Sheathless Hydrophoretic Particle Focusing in a Microchannel with Exponentially Increasing Obstacle Arrays," 2008.
- [23] S. Choi, S. Song, C. Choi, and J.-K. Park, "Microfluidic Self-Sorting of Mammalian Cells to Achieve Cell Cycle Synchrony by Hydrophoresis," *Anal. Chem.*, vol. 81, no. 5, pp. 1964–1968, Mar. 2009.
- [24] J. C. S. Lotien Richard Huang, Edward C. Cox, Robert H. Austin, "Continuous Particle Separation Through Deterministic Lateral Displacement," *Science (80-. )*, vol. 304, no. 5673, pp. 987–990, May 2004.
- [25] B. R. Long, M. Heller, J. P. Beech, H. Linke, H. Bruus, and J. O. Tegenfeldt, "Multidirectional sorting modes in deterministic lateral displacement devices," *Phys. Rev. E*, vol. 78, no. 4, p. 046304, Oct.

2008.

- [26] J. Beech, “Microfluidics Separation and Analysis of Biological Particles,” Lund University, 2011.
- [27] P. Sajeesh and A. K. Sen, “Particle separation and sorting in microfluidic devices: a review,” *Microfluid. Nanofluidics*, vol. 17, no. 1, pp. 1–52, Jul. 2014.
- [28] P. R. C. Gascoyne and J. Vykoukal, “Particle separation by dielectrophoresis,” *Electrophoresis*, vol. 23, no. 13, p. 1973, Jul. 2002.
- [29] F. F. Becker, X. B. Wang, Y. Huang, R. Pethig, J. Vykoukal, and P. R. Gascoyne, “Separation of human breast cancer cells from blood by differential dielectric affinity,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 92, no. 3, pp. 860–4, Jan. 1995.
- [30] P. R. C. Gascoyne, Xiao-Bo Wang, Ying Huang, and F. F. Becker, “Dielectrophoretic separation of cancer cells from blood,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 33, no. 3, pp. 670–678, 1997.
- [31] E. B. C. and and A. K. Singh, “Dielectrophoresis in Microchips Containing Arrays of Insulating Posts: Theoretical and Experimental Results,” 2003.
- [32] C. Church, J. Zhu, J. Nieto, G. Keten, E. Ibarra, and X. Xuan, “Continuous particle separation in a serpentine microchannel via negative and positive dielectrophoretic focusing,” *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 20, no. 6, p. 065011, Jun. 2010.
- [33] M. Li, S. Li, W. Cao, W. Li, W. Wen, and G. Alici, “Continuous particle focusing in a waved microchannel using negative dc dielectrophoresis,” *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 22, no. 9, p. 095001, Sep. 2012.
- [34] M. Kersaudy-Kerhoas, R. Dhariwal, M. P. Y. Desmulliez, and L.

- Jouvet, “Hydrodynamic blood plasma separation in microfluidic channels,” *Microfluid. Nanofluidics*, vol. 8, no. 1, pp. 105–114, Jan. 2010.
- [35] S. Miltenyi, W. Müller, W. Weichel, and A. Radbruch, “High gradient magnetic cell separation with MACS,” *Cytometry*, vol. 11, no. 2, pp. 231–238, Jan. 1990.
- [36] J. D. Adams, U. Kim, and H. T. Soh, “Multitarget magnetic activated cell sorter,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 105, no. 47, pp. 18165–70, Nov. 2008.
- [37] L. C. Jellema, T. Mey, S. Koster, and E. Verpoorte, “Charge-based particle separation in microfluidic devices using combined hydrodynamic and electrokinetic effects,” *Lab Chip*, vol. 9, no. 13, p. 1914, Jul. 2009.
- [38] Y. Daghighi, “Induced-Charge Electrokinetic Motion of a Heterogeneous Particle and Its Corresponding Applications,” University of Waterloo, 2013.
- [39] R. J. Hunter, *Zeta potential in colloid science: principles and applications*, vol. 2. Academic press, 2013.
- [40] Y. Ai, S. W. Joo, Y. Jiang, X. Xuan, and S. Qian, “Transient electrophoretic motion of a charged particle through a converging-diverging microchannel: Effect of direct current-dielectrophoretic force,” *Electrophoresis*, vol. 30, no. 14, pp. 2499–2506, Jul. 2009.
- [41] H. J. Keh and J. L. Anderson, “Boundary effects on electrophoretic motion of colloidal spheres,” *J. Fluid Mech.*, vol. 153, no. 1, p. 417, Apr. 1985.
- [42] J. G. Santiago, “Electroosmotic Flows in Microchannels with Finite Inertial and Pressure Forces,” 2001.
- [43] C. Ye and D. Li, “3-D transient electrophoretic motion of a spherical



- particle in a T-shaped rectangular microchannel,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 272, no. 2, pp. 480–488, Apr. 2004.
- [44] S. M. Davison and K. V. Sharp, “Transient simulations of the electrophoretic motion of a cylindrical particle through a 90° corner,” *Microfluid. Nanofluidics*, vol. 4, no. 5, pp. 409–418, May 2008.
- [45] Z. Wu and D. Li, “Micromixing using induced-charge electrokinetic flow,” *Electrochim. Acta*, vol. 53, no. 19, pp. 5827–5835, 2008.
- [46] F. Zhang and D. Li, “A novel particle separation method based on induced-charge electro-osmotic flow and polarizability of dielectric particles,” *Electrophoresis*, vol. 35, no. 20, pp. 2922–2929, Oct. 2014.

## Abstract

This thesis investigates numerically the motion of a rigid particle, which is affected by two constant DC electric fields, and uses its results in particle sorting and drug delivery scope.

Because of the dependence of the hydrodynamic force in the electrokinetics and its subcategories

to the electric current and the Zeta potential, particle control is possible by using these two parameters.

In this thesis, the two-dimensional and time-dependent motion of a rigid particle in a microchannel has been studied. The effects of different parameters such as electric current, particle diameter and particle geometry on the path of motion have been investigated. Finally, an effective way of particle separation is introduced. The introduced method in this thesis, due to its dependence on electric current, is in the branch of active methods of particle separation. In this method, the particles are classified regardless of their geometry; Previously the particle separation was influenced by their geometry, but by using the microchip which is presented in this study, particles can be separated from each other by different Zeta potentials. It should be noted that by changing the electric field applied to the microchip, different particles could be classified and there is no need to make a new microchip for the separation of new particles. The microchip has a particle collecting chamber.

In two constant electric fields, the path of particle motion changes with the increase of the particle to the channel wall Zeta potential ratio, and therefore particles with higher Zeta potential ratio than the critical value can be collected into the chamber.

In the following, the ratio of the two electrical currents is discussed, the results of which can be said to have no effect on the Zeta potential ratio much less than the critical value.

Geometry and particle dimensions are among the subjects studied in this study. It is found that, the effect of geometry and particle size on the result of separation is negligible and can not be ignored.

**Keywords:** Electrokinetic, Vortex, Rigid Solid, Particle Separation, Microfluidic



**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering**

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

**Numerical Investigation of Moving Particles in  
Microchannels by Electrokinetic Flow**

By

**Rasool Bayani**

Supervisor

**Dr. Mohsen Nazari**

January 2019