

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

گروه تبدیل انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد

تحلیل عددی حرکت و جداسازی ذرات در یک میکروکانال با حضور میدان مغناطیسی

نگارنده:

مصطفی اسحاقی

اساتید راهنما:

دکتر محمد محسن شاه مردان

دکتر محسن نظری

استاد مشاور:

دکتر یاسمن دقیقی

تیر ۱۳۹۸

هر چند نوشته‌ای قابل تقدیم نیست ولی اگر جایی اندک برای تقدیم کردن باشد، این پایان نامه
را تقدیم می‌کنم به مهربانترین، همراهان زندگیم، خانواده عزیزم که حضورشان، همیشه گرامی‌بخش روح
من بوده است.

تشکر و قدردانی:

خداوند سبحان را سپاسگذارم که به بنده توفیق انجام و اتمام پژوهش حاضر را عنایت فرمود.
بر خود واجب می‌دانم از اساتید راهنمای بزرگوارم جناب آقای دکتر محمد محسن شاه‌مردان و دکتر
محسن نظری به پاس زحمات بی‌شائبه‌شان در طی انجام این تحقیق سپاسگزاری نمایم. و در پایان از
تمامی عزیزانی که در طول انجام این پروژه مرایاری کرده‌اند کمال تشکر و قدردانی را ابراز می‌نمایم.

تعهدنامه

این جانب **مصطفی اسحاقی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی مکانیک** گرایش **تبدیل انرژی** دانشکده **مهندسی مکانیک** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **تحلیل عددی حرکت و جداسازی ذرات در یک میکرو کانال با حضور میدان مغناطیسی تحت راهنمایی دکتر محمد محسن شاه مردان - دکتر محسن نظری** متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است و مقالات مستخرج بانام "دانشگاه صنعتی شاهرود" و یا "Shahrood University of Technology" به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (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 افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

در فرآیند جداسازی، با اعمال نیروی مغناطیسی به ذرات، ذرات با توجه به حساسیت مغناطیسی و اندازه‌ای که دارند می‌توانند جدا یا منحرف شوند. در این پایان‌نامه به بررسی حرکت ذرات غیرمغناطیسی در جریان فروسیال از طریق یک میکروکانال مستطیلی با حضور یک آهنربا دائمی پرداخته می‌شود. برای تجزیه و تحلیل و کنترل رفتار جریان ذرات در میکروکانال، یک حل عددی برای دستیابی به مسیرهای ذرات تحت اثر میدان مغناطیسی و میدان جریان سیال ارائه شده است. توزیع نیروی مغناطیسی وارد بر ذرات و مسیر حرکت آنها ابتدا توسط نتایج تحلیلی و تجربی تأیید شد و سپس دو هندسه از آهنربا برای افزایش کارایی جداسازی با بهینه‌سازی میدان مغناطیسی ارائه شده است. در این پژوهش، حرکت دوبعدی و وابسته به زمان ذرات در میکروکانال T شکل به ازای سه مدل از آهنربا با مساحت‌های برابر اما با تغییر در شکل هندسی و با وجود لایه نشانی نیکل در مجاورت میکروکانال بررسی شده است. در مدل اول، یک آهنربا دائمی مستطیل شکل، در مدل دوم، دو آهنربای همسان با اندازه مساحت برابر مدل اول و در مدل سوم دو آهنربا (با مشخصات مدل دوم) و یک لایه نیکل با ضخامت 100 میکرومتر در مجاورت میکروکانال قرار دارند. در قسمت خروجی میکروکانال دو منیفولد خروجی در نظر گرفته می‌شود که به سمت‌های بالا و پایین است. نتایج نشان می‌دهد که بازده جداسازی با وجود لایه نشانی نیکل در مجاورت آهنربا به گونه‌ای است که ذرات با اندازه 5 میکرومتر با بازدهی 100% به سمت خروجی بالا هدایت می‌شوند. برای هر مدل، دو سایز (مقدار) بحرانی (ترشهولد) از ذرات ارائه شده است که مجموعه ذرات کوچکتر از مقدار بحرانی اول از خروجی پایین میکروکانال و ذرات بزرگتر از مقدار بحرانی دوم از خروجی دیگر میکروکانال با بازدهی 100% جداسازی می‌شوند. در مدل اول مقدار بحرانی از قطر ذرات برای خروجی بالا و پایین میکروکانال به ترتیب ۷ و ۰/۳۵ میکرومتر، در مدل دوم ۶ و ۰/۳ میکرومتر و در مدل سوم ۴/۵ و ۰/۲ میکرومتر است.

کلید واژگان: میکروکانال، جداسازی، مگنتوفورسیس، میکروذرات

فهرست مطالب

۱- فصل اول: مقدمه و کلیات تحقیق.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۱-۲- آهنربای الکتریکی و دائمی.....	۲
۱-۳- میکروکانالها.....	۴
۱-۴- تقسیم‌بندی مواد از نظر رفتار مغناطیسی.....	۵
۱-۴-۱- مواد دیامغناطیس.....	۶
۱-۴-۲- مواد پارامغناطیسی.....	۷
۱-۴-۳- مواد فرو مغناطیسی.....	۸
۱-۴-۴- مواد آنتی فرو مغناطیسی.....	۸
۱-۴-۵- مواد فری مغناطیسی.....	۹
۱-۵- فرو سیالها و محلولهای بافری.....	۱۰
۱-۵-۱- فرو سیالها.....	۱۰
۱-۶- محلولهای بافری.....	۱۱
۱-۷- اهداف تحقیق و روش انجام تحقیق.....	۱۲
۱-۸- ساختار پایان نامه.....	۱۳
۲- فصل دوم: مروری بر مطالعات پیشین.....	۱۵
۲-۱- مقدمه.....	۱۶
۲-۲- دسته بندی روشهای جداسازی ذرات در مقیاس میکرو.....	۱۶
۲-۳- روشهای غیر فعال.....	۱۸
۲-۳-۱- فشار سیال.....	۱۹
۲-۳-۲- اینرسی.....	۲۰
۲-۳-۳- جابهجایی جانبی.....	۲۱
۲-۴- روشهای فعال.....	۲۲

۲۲	۱-۴-۲- روش دی الکتروفورسیس
۲۲	۲-۴-۲- روش مگنتوفورسیس
۲۴	۳-۴-۲- روش های اپتیکی
۲۵	۴-۴-۲- روش های صوتی
۲۶	۵-۲- پیشینه تحقیق مربوط به روش مگنتوفورسیس برای جداسازی و به دام انداختن ذرات
۲۹	2-6- نوآوری و توصیف مسئله
۳۱	۳- فصل سوم: معادلات حاکم و شرایط مرزی
۳۲	۱-۳- مقدمه
۳۲	۲-۳- مدل مسیر ذرات
۳۳	۳-۳- نیروی مغناطیسی
۳۶	۴-۳- نیروی پسای هیدرودینامیک
۳۷	۵-۳- میدان مغناطیسی
۳۸	۶-۳- میدان جریان سیال
۴۱	۴- فصل چهارم: ارزیابی و تحلیل نتایج
۴۲	۱-۴- مقدمه
۴۲	۲-۴- اعتبارسنجی
۴۸	۳-۴- هندسه های مختلف آهنربا و نحوه قرار گرفتن آنها
۵۲	۴-۴- استقلال نتایج از تعداد شبکه محاسباتی
۵۵	۵-۴- بررسی میدان مغناطیسی و نیروی مغناطیسی
۵۷	۱-۵-۴- فاصله بین آهنرباها
۵۸	۲-۵-۴- نیروی مغناطیسی
۶۰	۶-۴- رفتار جداسازی و مسیر ذرات با سایزهای مختلف
۶۶	۷-۴- بررسی تاثیرات فاصله آهنربا تا دیواره میکروکانال
۶۹	۸-۴- بازده جداسازی
۷۰	۹-۴- بررسی تاثیر سرعت جریان بر بازده جداسازی

۵- فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها ۷۲

۵-۱- نتیجه گیری ۷۳

۶-

.....مراجع

..... ۷۴

فهرست جدول؛

جدول ۴-۱ پارامترهای سیستم مورد استفاده در شبیه سازی های عددی ۴۵

جدول ۴-۲ پارامترهای هندسی سه مدل آهنربا ۴۹

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ الف آهنرباهای دائمی. ب آهنرباهای الکتریکی [۳]..... ۴
- شکل ۲-۱ انواع میکرو کانال‌ها [۶]..... ۵
- شکل ۳-۱ مواد دیامغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی..... ۷
- شکل ۴-۱ مواد پارامغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی..... ۷
- شکل ۵-۱ مواد فرو مغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی..... ۸
- شکل ۶-۱ مواد آنتی فرو مغناطیس در حضور میدان مغناطیسی..... ۹
- شکل ۷-۱ مواد فری مغناطیس در حضور میدان مغناطیسی..... ۹
- شکل ۱-۲ دیاگرام روش‌های جداسازی و مرتب کردن میکرو ذرات در میکرو کانال‌ها [۲۱]..... ۱۸
- شکل ۲-۲ شماتیکی از جداسازی با روش PFF [۲۳]..... ۱۹
- شکل ۳-۲ تصویر شما تیک از میکرو کانال برای جدایی ذرات در جریان با روش اینرسی است [۲۵]..... ۲۰
- شکل ۴-۲ مرتب‌سازی سلول با روش جابه‌جایی جانبی [۲۳]..... ۲۱
- شکل ۵-۲ هندسه دوبعدی از دستگاه مدل شده در روش دی الکتروفورسیس و شماتیکی از مسیر ذرات [۲۷]..... ۲۲
- شکل ۶-۲ شماتیک نشان‌دهنده مکانیزم جداسازی ذرات غیر مغناطیسی در یک جریان فرو سیال است [۳۱]..... ۲۳
- شکل ۷-۲ مرتب‌سازی سلول با نیروی نوری [۲۳]..... ۲۵
- شکل ۸-۲ تصویر شماتیکی از مکانیسم جداسازی صوتی نشان‌دهنده سلول‌هایی است که از طرف دیوار به مرکز کانال انتقال می‌یابند به علت نیروهای صوتی محوری که در هنگام ورود سلول‌ها به منطقه امواج آکوستیک به سلول‌ها وارد می‌شوند [۳۵]..... ۲۶
- شکل ۱-۳ شماتیکی از کره ایی با شعاع R [۵۶]..... ۳۳
- شکل ۲-۳ شماتیکی از هندسه و هوای اطرف که خطوط با رنگ آبی شرط مرزی عایق مغناطیسی است..... ۳۸
- شکل ۳-۳ شماتیکی از میکروکانال و شرایط مرزی اعمال شده بر روی آن..... ۳۹
- شکل ۱-۴ شماتیکی از سیستم آهنربا و کانال باهمان مختصات و ابعاد در مقاله لیتائو لیانگ و همکاران [۵۳]..... ۴۴
- شکل ۲-۴ مقایسه میدان مغناطیسی و نیروی به‌دست‌آمده توسط روش‌های عددی و تحلیلی است. الف سه مؤلفه میدان مغناطیسی تولیدشده توسط آهنربای دائمی در امتداد خط مرکزی میکرو کانال. ب سه مؤلفه نیروی مغناطیسی وارد بر ذرات غیر مغناطیسی در امتداد خط مرکزی میکرو کانال..... ۴۷
- شکل ۳-۴ نمایش خط مرکزی میکروکانال در دو سطح xy و yz ۴۸
- شکل ۴-۴ سه مدل آهنربای مغناطیسی دائمی. الف آهنربای مدل اول. ب آهنربای مدل دوم. ج آهنربای مدل سوم..... ۴۹
- شکل ۵-۴ شماتیکی از میکروکانال و آهنرباها. الف شماتیکی از فاصله محیط اطراف از مرکز. ب میکروکانال و آهنربای مدل اول. ج میکروکانال و آهنربای مدل دوم. د میکروکانال و آهنربای مدل سوم..... ۵۲

شکل ۴-۶ تجزیه و تحلیل استقلال شبکه به ازای سرعت کل ورودی ثابت و برابر ۲۲ میلیمتر بر ثانیه نشان داده شده است. ۵۴

شکل ۴-۷ توزیع چگالی شار میدان مغناطیسی در کانال. چگالی شار باقیمانده در آهنرباها ۱,۳۲ تسلا و همچنین فاصله بین میکرو کانال و آهنربا ثابت و برابر ۱,۳۳ میلی متر است. الف مدل اول. ب مدل دوم. ج مدل سوم. ۵۶

شکل ۴-۸ نیروی مغناطیسی F_y وارد بر ذرات در حال حرکت در جهت x به ازای فاصله های مختلف بین آهنرباها. در همه حالت ها فاصله آهنربا تا کانال ثابت و برابر ۱۳۳۰ میکرومتر است. ۵۸

شکل ۴-۹ نیروی مغناطیسی F_y وارد بر ذرات در سه مدل شبیه سازی. فاصله آهنرباها تا کانال ثابت و برابر ۱۳۳۰ میکرومتر، نفوذپذیری مغناطیسی نسبی ذرات ۰,۹۸ و سرعت هر یک از ورودی ها ۱۱ mm/s است. ۵۹

شکل ۴-۱۰ مسیر ذرات ۲ و ۵ میکرومتر در سه مدل. سرعت جریان ثابت و برابر ۱۱ میلیمتر بر ثانیه در دو ورودی و فاصله بین آهنربا و میکروکانال ثابت و برابر ۱۳۳۰ میکرومتر است. ۶۰

شکل ۴-۱۱ مسیر ذرات در طول کانال مدل دوم. الف ناحیه ورودی A کانال که ذرات به صورت رندم وارد میشوند. ب قسمت برخورد دو جریان سیال و ورود به شاخه اصلی. ج مرکز شاخه اصلی. د ناحیه نزدیک به خروجیها. ح ناحیه خروجی ذرات. ۶۳

شکل ۴-۱۲ مسیرهای ذرات پلیاستایرن در کانال میکروسیال با قطرهای مختلف از ۰,۲ تا ۷ میکرومتر است. a و b خروجی ۲ تنها خروجی ذرات میباشد. از c تا h ذرات از هر دو خروجی خارج میشوند. i و j، خروجی ۱ تنها خروجی ذرات است. شماتیک فرضی کانال در شکل a نشان داده شده است. ۶۴

شکل ۴-۱۳ دو آستانه قطر ذرات در مدل های مختلف. فاصله بین آهنرباها و میکروکانال ثابت و برابر ۱۳۳۳ میکرومتر است. سرعت جریان در هر ورودی ثابت و برابر ۱۱ میلی متر بر ثانیه است. ۶۵

شکل ۴-۱۴ تاثیر فاصله آهنربا تا میکروکانال که نفوذپذیری مغناطیسی نسبی ذرات ۰,۹۸ و سرعت هر یک از ورودیها ۱۱ mm/s است. الف نیروی مغناطیسی وارد بر ذره ۵ میکرومتر. ب مسیر ذره برای سه مدل. ۶۷

شکل ۴-۱۵ مسیر ذرات غیرمغناطیسی ۲ و ۵ میکرومتر با سرعت جریان ورودی ۱۱ میلیمتر بر ثانیه در قسمتی از کانال که نیروی مغناطیسی ماکزیمم است. الف مدل اول. ب مدل دوم. ج مدل سوم. ۶۸

شکل ۴-۱۶ تجزیه و تحلیل نیرو وارد بر یک ذره در میکروکانال. ۶۹

شکل ۴-۱۷ بازده جداسازی دو ذره ۲ و ۵ میکرومتر در هر خروجی. تعداد کل ذرات وارد شده در هر فاصله زمانی

۳۸ و نسبت سرعت جریان ورودیها $\frac{U_B}{U_A} = 1$ میباشد. ۷۰

شکل ۴-۱۸ بازده جداسازی دو ذره ۲ و ۵ میکرومتر در هر خروجی. تعداد کل ذرات وارد شده در هر فاصله زمانی

۴۰ و نسبت سرعت جریان ورودیها $\frac{U_B}{U_A} = 1.5$ میباشد. ۷۱

فهرست علائم

علائم لاتین

$B(T)$	چگالی شار مغناطیسی
$B_r(T)$	چگالی شار مغناطیسی باقیمانده
$F(N)$	نیروهای خارجی
$F_m(N)$	نیروی مغناطیسی
$F_d(N)$	نیروی پسای هیدرودینامیکی
$H(A/m)$	شدت میدان مغناطیسی
$H_{r1}(A/m)$	شدت میدان مغناطیسی در سیال

$H_{r2}(A/m)$	شدت میدان مغناطیسی در ذره کروی
$J(V.m)$	چگالی جریان الکتریکی
K	تابع کلازیوس-موسوتی
$m_p(kg)$	جرم ذرات
$M(A/m)$	قطبش مغناطیسی
m_{eff}	دوقطبی مغناطیسی لحظه‌ای
$P(pa)$	فشار سیال
$r_p(\mu m)$	شعاع ذرات
$u_f(mm/s)$	سرعت سیال
$u_p(mm/s)$	سرعت ذرات
$V_m(A)$	پتانسیل مغناطیسی اسکالر

علائم یونانی

θ	زاویه بین محور z و شعاع کره
$\mu_0(N/A^2)$	نفوذپذیری مغناطیسی خلا
$\mu_1(N/A^2)$	نفوذپذیری مغناطیسی سیال
$\mu_2(N/A^2)$	نفوذپذیری مغناطیسی ذره
μ_r	نفوذپذیری مغناطیسی نسبی
$\mu(pa.s)$	ویسکوزیته سیال
$\Psi(A)$	پتانسیل مغناطیسی اسکالر

۱- فصل اول: مقدمه و کلیات تحقیق

۱-۱- مقدمه

از زمانی که پدیده مغناطیس شناخته شد و انسان از آن استفاده نمود، قرن‌ها می‌گذرد. اولین ماده مغناطیسی که مورد استفاده قرار گرفت مگنتیت بود که به‌طور طبیعی دارای خاصیت مغناطیسی است. در یک تعریف کلی، اگر دو جسم با توجه به جهت‌گیری نسبی همدیگر را دفع یا جذب کنند، آهنربا نامیده می‌شوند. اجسام دیگری هم وجود دارند که همواره جذب آهنربا می‌شوند، اما هیچ‌گاه دفع نمی‌شوند. این اجسام، مواد مغناطیسی نامیده می‌شوند. با این تعریف ملاحظه می‌گردد که بیشتر اجسام غیر مغناطیسی هستند.

امروزه مواد مغناطیسی کاربرد بسیار زیادی پیدا کرده‌اند؛ اما از آنجاکه بیشتر در داخل تجهیزات مورد استفاده قرار می‌گیرند، وسعت کاربرد آن‌ها به چشم نمی‌آید. هسته ترانسفورماتورها، بسیاری از قطعات و تجهیزات کامپیوترها نظیر دیسک‌های نرم، سخت و فشرده، برخی قطعات اتومبیل نظیر استارت، حس‌گر پمپ‌های سوخت الکتریکی، تجهیزات پزشکی، رادیوها، نوارها، دوربین‌های عکاسی، بسیاری از تجهیزات موتوری و... همگی نیازمند مواد مغناطیسی هستند. حتی کاربرد Si در صنعت آهنربا بیشتر از مصرف آن در صنعت نیمه‌هادی‌ها هست [۱].

با توجه به توسعه فناوری‌های تولید انواع آهنربا و همچنین ابداع ترکیبات جدید مواد مغناطیسی، آینده بسیار روشنی در انتظار صنعت آهنرباست و سرمایه‌گذاری قابل‌توجهی در این زمینه در سراسر جهان صورت می‌گیرد.

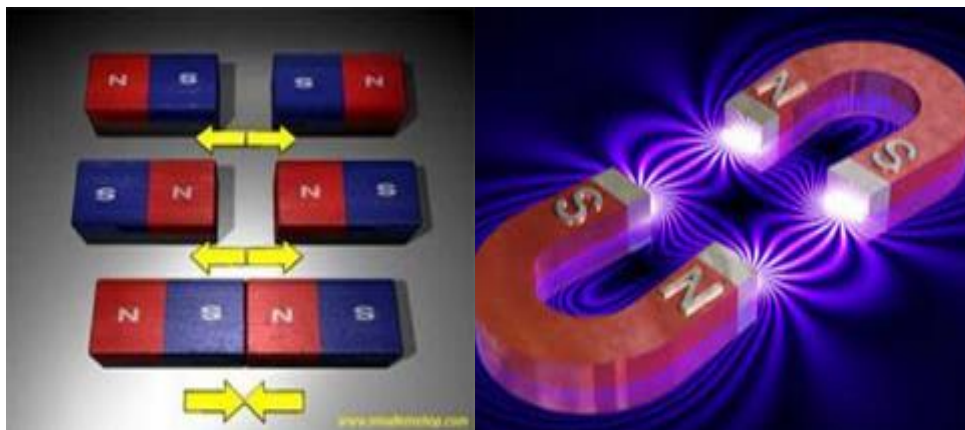
۱-۲- آهنربای الکتریکی و دائمی

آهنرباها به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: «آهنرباهای الکتریکی» که برای ایجاد میدان مغناطیسی به جریان الکتریکی خارجی نیاز دارند و «آهنرباهای دائمی» که برای ایجاد میدان مغناطیسی به توان خارجی نیاز ندارند. منظور از آهنربا در اینجا آهنربای دائمی است. آهنربای دائمی قطعه‌ای از فولاد سخت و یا دیگر مواد مغناطیسی که تحت اثر میدان‌های شدید، مغناطیس شده و این اثر را برای

مدت طولانی در خود حفظ می‌کنند. اثر آهنربایی اولین بار، روی قطعه‌هایی از سنگ معدن آهن، به نام آهنربای طبیعی یا معدنی در طبیعت مشاهده شد و دیدند که قطعات آهن را به خود جذب می‌کند [۲].

یک میدان مغناطیسی می‌تواند به راحتی توسط آهنرباهای دائمی یا جریان الکتریکی تولید شود، زیرا این یکی از طبیعی‌ترین و فراوان‌ترین منابع طبیعی است. به طور کلی، آهنربای نئودیمیم (NdFeB) مغناطیس باقیمانده ۱,۴-۱ Mr را فراهم می‌کند که Mr مقدار مغناطیسی است که یک ماده فرو مغناطیسی می‌تواند به تنهایی تولید کند. از طرف دیگر، میدان مغناطیسی ناشی از جریان الکتریکی، به مقدار جریان الکتریکی وابسته است.

آهنربای دائمی را می‌توان در انواع وسیعی از محصولات یافت که بر زندگی روزمره ما اثر می‌گذارد. نمونه‌هایی از این شامل پخش‌کننده‌های صوتی و تصویری، تجهیزات مخابراتی، رایانه‌های شخصی، چاپگرها، دستگاه‌های کپی، اتومبیل، لوازم خانگی، ابزار قدرت، دستگاه‌های ذخیره‌سازی داده‌ها و دستگاه‌های پزشکی است. مدل‌های مختلف از آهنرباهای دائمی و الکتریکی در شکل ۱-۱ آورده شده است [۳].



الف



ب

شکل ۱-۱ الف آهنرباهای دائمی. ب آهنرباهای الکتریکی [۳].

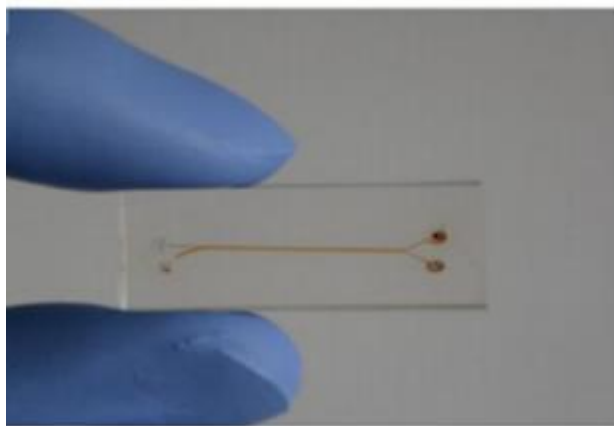
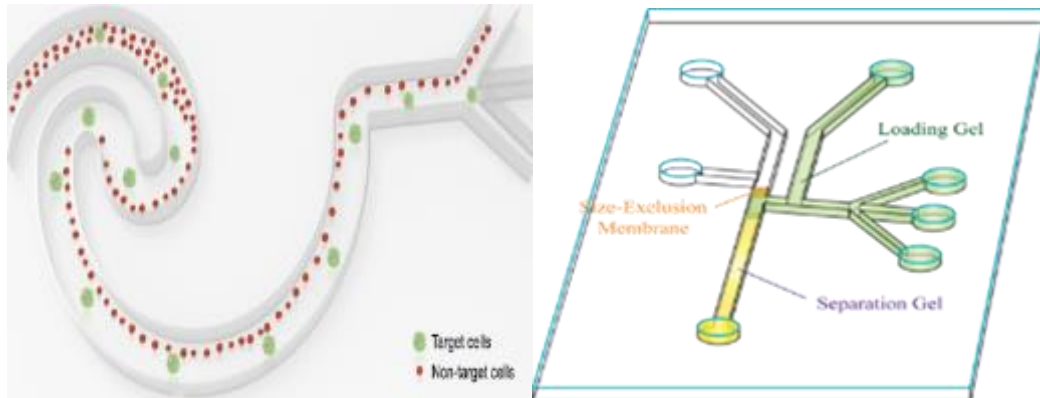
۱-۳- میکروکانال‌ها

در سال‌های اخیر نیازهای تحقیقاتی و استفاده‌های تجاری از وسایل مکانیکی میکرو و نانو رواج بسیار زیادی یافته است. کانال‌ها از مهم‌ترین بخش‌های این سیستم‌ها هستند که به منظور انتقال سیال با اهداف مختلف مانند انتقال حرارت، سوخت رسانی، جریان خون در مویرگ‌ها و دیگر بافت‌های حیاتی بدن، باعث شده است تا میکروکانال به یکی از زمینه‌های پرطرفدار تبدیل شود. مفهوم میکروکانال برای اولین بار توسط تاکمن^۱ و پییز^۲ پیشنهاد شد [۴]. آنها یک روش موثر برای طراحی میکروکانال‌ها در جریان آرام و کاملاً توسعه یافته را پیشنهاد کردند. میکروکانال در میکرو فناوری یک کانال با قطر هیدرولیکی زیر ۱ میلی‌متر است [۵]. میکروکانال‌ها در کنترل مایع (میکروسیال‌ها) و انتقال حرارت (مبدل حرارتی میکرو) استفاده می‌شود. اعداد رینولدزی که با آن‌ها سروکار داریم بسیار کوچک هستند (اغلب از مرتبه ۱ یا کمتر) و بنابراین در دسته جریان‌های آرام طبقه‌بندی می‌شوند. اکثر روش‌های دینامیک سیالاتی محاسباتی (CFD) برای مطالعه جریان سیال بر پایه معادلات ناویر

¹ Tuckerman

² Pease

استوکس یا اولر هستند. میکرو کانال‌های مختلف در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۲ انواع میکرو کانال‌ها [۶].

۴-۱- تقسیم‌بندی مواد از نظر رفتار مغناطیسی

برای درک چگونگی کار آهنربا باید با خواص مغناطیسی مواد آشنا شویم. در اینجا به این موضوع می‌پردازیم. رفتار مغناطیسی مواد را می‌توان با توجه به ساختار اتم توصیف کرد. می‌دانیم که حرکت بار الکتریکی، میدان مغناطیسی ایجاد می‌کند. الکترون کوچک‌ترین واحد بار مغناطیسی است و حرکت آن درون اتم باعث ایجاد میدان مغناطیسی می‌شود. الکترون در اطراف هسته اتم دو نوع حرکت دارد:

الف- چرخش الکترون به دور خود که آن را اسپین الکترون می‌نامند.

ب- گردش الکترون به دور هسته که آن را حرکت اوربیتالی می‌نامند.

این حرکت‌ها هر دو باعث ایجاد گشتاور مغناطیسی می‌شوند. اگر گشتاور مغناطیسی تمام الکترون‌ها هم‌جهت بود، تمام مواد مغناطیسی می‌شدند؛ ولی در عمل چنین نیست. برای این امر دو دلیل وجود دارد:

الف -در مورد اسپین الکترون‌ها، طبق اصل طرد پاولی، دو الکترون با اسپین‌های مشابه نمی‌توانند در یک اوربیتال قرار بگیرند؛ یعنی گشتاورهای مغناطیسی دو الکترون در یک اوربیتال باید مخالف هم باشند (یکی به سمت بالا و دیگری به سمت پایین) و به همین دلیل گشتاورهای مغناطیسی یکدیگر را خنثی می‌کنند.

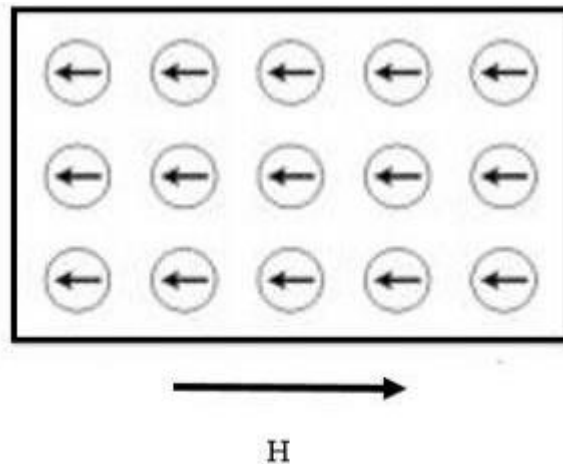
ب- در مورد حرکت اوربیتالی الکترون‌ها، در یک‌لایه الکترونی که کاملاً از الکترون‌ها پر شده گشتاورهای مغناطیسی یکدیگر را خنثی می‌کنند. اکثر عنصرها لایه‌های الکترونی پر شده دارند و بنابراین برآیند گشتاورهای مغناطیسی اتم‌های آن‌ها صفر است.

اما در عنصرهایی که لایه‌های الکترونی پر نشده دارند، مانند بعضی عنصرهای فلزهای واسطه یا سری‌های لانتانیدها و اکتینیدها، برآیند گشتاور مغناطیسی صفر نیست؛ بنابراین هر اتم این عنصرها یک گشتاور مغناطیسی دائمی ایجاد می‌کند و مانند یک دوقطبی مغناطیسی رفتار می‌کند. وقتی عنصر یا ماده مرکبی در معرض میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، نتیجه نهایی به چگونگی واکنش دوقطبی‌های مغناطیسی به میدان اعمال‌شده بستگی دارد. بر این اساس می‌توان مواد را به پنج دسته تقسیم کرد:

۱-۴-۱- مواد دیامغناطیس

هنگامی که این مواد در یک میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند، الکترون‌ها به‌گونه‌ای جهت‌گیری می‌کنند که جهت گشتاور مغناطیسی‌شان مخالف جهت میدان خارجی می‌شود که در شکل ۱-۳ نشان

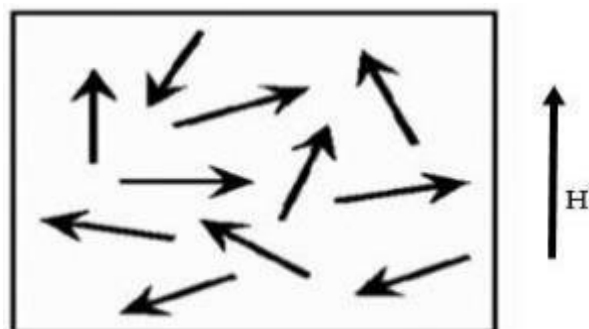
داده شده است. مواد دیامغناطیسی توسط هر دو قطب آهنربا دفع می‌شوند. موادی مانند مس، نقره، طلا، سیلیسیم و آلومینا (Al_2O_3) جزء مواد دیامغناطیسی هستند.



شکل ۳-۱ مواد دیامغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی.

۱-۴-۲- مواد پارامغناطیسی

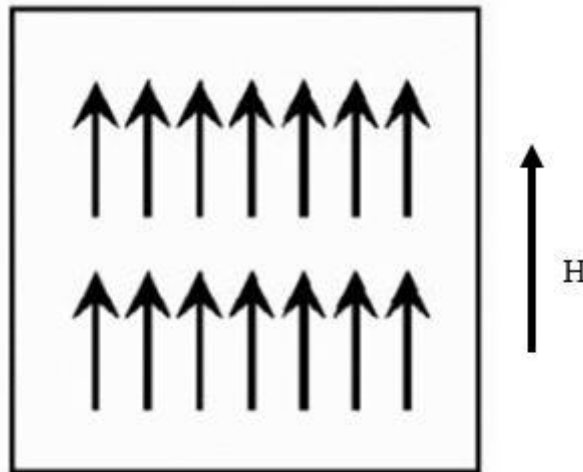
این ویژگی در موادی یافت می‌شود که الکترون‌های جفت نشده دارند. با اعمال یک میدان مغناطیسی خارجی به این مواد، گشتاور مغناطیسی الکترون‌های جفت نشده با میدان همسو شده و آن را تقویت می‌کنند که در شکل ۴-۱ نشان داده شده است، در نتیجه این مواد جذب میدان مغناطیسی می‌شوند. البته برای همسو کردن تمام دو قطبی‌ها به میدان‌های خیلی بزرگی نیاز است و با حذف میدان خارجی، میدان القاشده در مواد پارامغناطیس نیز از بین می‌رود. آلومینیم، تیتانیم و برخی آلیاژهای مس نمونه‌هایی از مواد پارامغناطیسی هستند [۷].



شکل ۴-۱ مواد پارامغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی.

۱-۴-۳- مواد فرو مغناطیسی

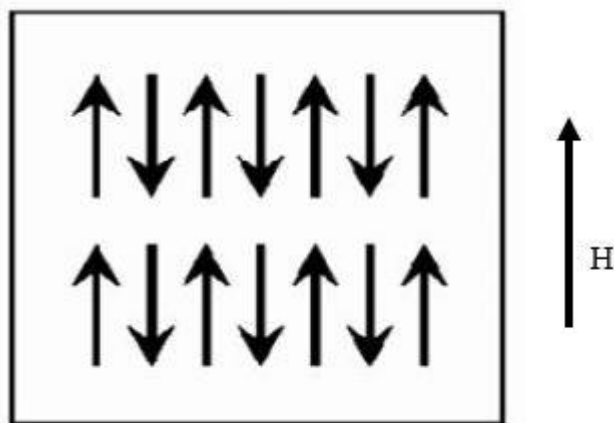
در این مواد گشتاورهای مغناطیسی تمایل دارند باهم همسو شوند؛ با قرار گرفتن در یک میدان مغناطیسی خارجی، گشتاورها با میدان خارجی همسو می‌شوند و میدان را تقویت می‌کنند که در شکل ۵-۱ نشان داده شده است. پس از حذف میدان خارجی نیز گشتاورهای مغناطیسی جهت خود را حفظ کرده و ماده به آهنربای دائمی تبدیل می‌شود. سه عنصر آهن، نیکل و کبالت و برخی ترکیبات آن‌ها فرو مغناطیسی هستند [۸].



شکل ۵-۱ مواد فرو مغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی.

۱-۴-۴- مواد آنتی فرو مغناطیسی

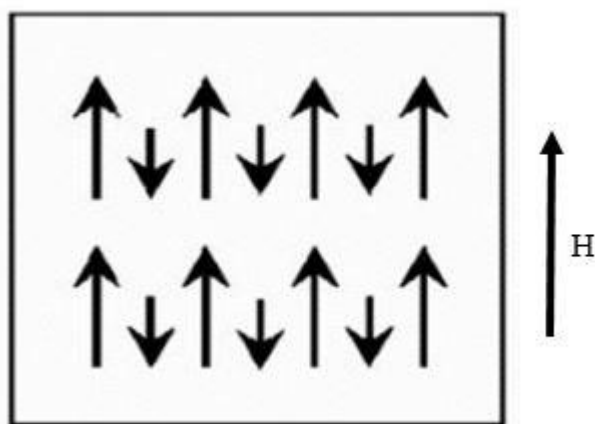
در این مواد، جهت‌گیری گشتاورهای مغناطیسی اتم‌های مجاور هم به گونه‌ای است که یکدیگر را خنثی می‌کنند و مغناطش خالص ماده صفر می‌شود. هنگامی که این مواد در میدان مغناطیس قرار می‌گیرند، گشتاورهای همسو با میدان کمی تقویت می‌شوند و ماده خاصیت مغناطیسی ضعیفی از خود نشان می‌دهد. موادی مانند منگنز، کروم و منگنز اکسید (MnO) از این دسته هستند. شکل ۶-۱ مواد آنتی فرومغناطیس در حضور آهنربا را نشان می‌دهد [۹].



شکل ۶-۱ مواد آنتی فرو مغناطیس در حضور میدان مغناطیسی.

۱-۴-۵- مواد فری مغناطیسی

در این مواد نیز جهت‌گیری گشتاورهای مغناطیسی اتم‌های مجاور در خلاف جهت یکدیگر است اما چون اندازه آن‌ها برابر نیست، تمام گشتاورها خنثی نمی‌شوند. این گشتاورها با قرار گرفتن در یک میدان خارجی باهم همسو می‌شوند و میدان را تقویت می‌کنند. فری مغناطیس‌ها پس از حذف میدان خارجی نیز خاصیت مغناطیسی خود را حفظ می‌کنند و تبدیل به آهنربای دائمی می‌شوند. کانی مگنتیت اکسید آهن (Fe_3O_4) نمونه‌ای از این مواد است. شکل ۷-۱ مواد فری مغناطیس را در حضور آهنربا نشان می‌دهد [۱۰].



شکل ۷-۱ مواد فری مغناطیس در حضور میدان مغناطیسی.

۱-۵- فرو سیال ها و محلول های بافری

۱-۵-۱- فرو سیال ها

فروسیال یا فروفلوئید محلول مغناطیسی است که در حضور یک میدان مغناطیسی به شدت مغناطیسی می شود.

فرو سیال مخلوطی کلئیدی، متشکل از ذرات فرو مغناطیسی در ابعاد نانو یا ذرات فرو مغناطیسی به صورت معلق در یک مایع حامل (معمولاً یک حلال آلی یا آب) است. هر ذره کوچک کاملاً پوشیده از سورفاکتانت است تا مانع لخته شدن مایع شود. زمانی که این مایع در میدان مغناطیسی قوی قرار می گیرد، ذرات فرو مغناطیسی لخته های بزرگی را تشکیل می دهند و به این صورت می توان ذرات فرو مغناطیسی بزرگ را از مخلوط کلئیدی همگن جدا کرد. جاذبه مغناطیسی بین نانو ذرات به اندازه ای ضعیف است که نیروی واندروالسی سورفاکتانت برای جلوگیری از توده ای شدن یا لخته شدن کفایت می کند.

فرو سیال معمولاً زمانی که در یک میدان مغناطیسی خارجی قرار نگرفته است، خاصیت مغناطیسی خود را حفظ نمی کند و به همین دلیل در هنگام طبقه بندی، به جای گروه فرو مغناطیس ها در گروه ابر پارامغناطیس ها قرار می گیرند [۱۱]. تفاوت بین فرو سیال ها و مایعات مغناطیسی یا همان مایع های MR^1 اندازه ذرات آن ها است [۱۱].

ذرات موجود در فرو سیال ها عمدتاً ذرات نانو هستند که با حرکت براونی در مایع معلق می باشند و به طور کلی در شرایط معمولی ته نشین نمی شوند. در حالی که ذرات تشکیل دهنده مایعات مغناطیسی MR عمدتاً در مقیاس میکرومتر هستند که برای معلق ماندن با حرکت براونی بسیار سنگین اند و به مرور زمان به دلیل تفاوت چگالی ذاتی بین ذرات تشکیل دهنده و سیال حامل، ته نشین می شوند.

¹Magnetorheological fluid

از این رو فرو سیالات و مایعات مغناطیسی کاربردهای متفاوتی دارند.

- در ساخت برخی ابزارهای الکترونیکی: در ساخت دیسک سخت کاربرد دارند.
- در مهندسی مکانیک: فرو سیال ها خاصیت کاهش اصطکاک دارند و در شرایط خاصی می توانند به عنوان روان کننده استفاده شوند. همچنین ویژگی های انتقال حرارت آن ها هنگام قرارگیری در شرایط خاص حائز اهمیت است.
- در پزشکی: در تشخیص بیماری های نظیر سرطان با استفاده از ام آر آی کاربرد دارد.
- در ساخت سیل های مکانیکی با سیال های مغناطیسی و همچنین در ساخت کوپلینگ های انعطاف پذیر نیز کاربرد دارند.

۱-۶- محلول های بافری

محلول بافر یک محلول شیمیایی است که از یک اسید ضعیف و نمک آن یا یک باز ضعیف و نمک آن ساخته می شود. محلول های بافر توانایی حفظ PH محلول را حتی در صورت افزودن اندکی باز یا اسید دارند. خون یک نمونه مهم از این نوع محلول ها است. محلول های بافر کاربردهای زیادی دارند از جمله برای حفظ PH برای عملکرد صحیح آنزیم ها در بسیاری از موجودات زنده ضروری هستند. بسیاری از آنزیم ها تنها در شرایط دقیقی کار می کنند؛ اگر PH در محدوده بسیار کمی تغییر کند عملکرد آنزیم ها کند و یا متوقف می شود و دچار تغییر ماهیت می شوند. در بسیاری از موارد تغییر ماهیت می تواند به طور ثابت فعالیت کاتالیزوری را از کار بی اندازد.

از لحاظ کاری و صنعتی محلول های بافر در فرآیند تخمیر و در تعیین شرایط مناسب برای رنگ های موجود در رنگ آمیزی پارچه بکار می روند. بافرها همچنین در تجزیه و تحلیل های شیمیایی و کالبراسیون PH سنج ها بکار می روند. از بزرگ ترین نمونه زیستی (بیولوژیکی) استفاده از آن ها می توان به تحقیق هایی اشاره کرد که در آن مواد در بافر ساخته می شوند؛ مخصوصاً بافر فسفات نمکی (PBS) که در $PH=7.4$

مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۲].

۷-۱- اهداف تحقیق و روش انجام تحقیق

دستگاه‌های میکروفلوئیدیک در زمینه‌ی نانوفناوری در الکترونیک و پزشکی بسیار مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از جمله کاربردهای عمده‌ی آن‌ها عبارتند از تشخیص بیماری‌ها، ژن درمانی، درمان سرطان بصورت ارسال دارو به داخل تومور و همچنین حرارت درمانی. همچنین استفاده از میدان مغناطیسی برای جداسازی نانو یا میکرو ذرات مغناطیسی روشی مفید و رو به پیشرفت می‌باشد. در این پژوهش از میکروذرات مغناطیسی با اندازه‌های مختلف استفاده شده است. میکروذرات در اثر اعمال میدان مغناطیسی (تولید شده توسط آهنربای دائمی) در میکروکانال حاوی سیال، حرکت کرده و نهایتاً در یک محل، متوقف شده و یا از یکدیگر جداسازی می‌شوند. هدف از انجام این تحقیق، ارائه یک ساختار جداساز مبتنی بر روش مگنتوفورسیس منفی برای جداسازی ذرات پلی‌استایرن با اندازه‌های مختلف در فرو سیال می‌باشد. هدف اصلی این شبیه سازی تعیین شرایطی برای دستیابی به بالاترین بازده جداسازی مغناطیسی است. از آن‌جا که پس از جداسازی و یا به دام انداختن ذرات، نمونه‌های جدا شده یا به دام افتاده به صورت خاص مورد بررسی و یا شمارش قرار می‌گیرند؛ از این‌رو سالم ماندن یافته‌ها پس از جداسازی و از دست ندادن ماهیت خود، از مهم ترین مسائلی است که ضرورت استفاده از مگنتوفورسیس را بیان می‌کند.

برای انجام این تحقیق دو روش وجود دارد:

۱- روش آزمایشگاهی

۲- روش عددی

که در انجام این تحقیق از نرم افزار کامسول استفاده شده است. ابعاد و شکل هندسی مناسب و بهینه که بتواند ذرات را با بازده بالایی جداسازی نماید، بدست آمده است.

۸-۱- ساختار پایان نامه

این پایان نامه از پنج فصل کلی تشکیل شده است در فصل اول مقدمه‌ای از پیدایش مغناطیس و کاربردهای آنها بیان گردید. در فصل دوم تحقیقاتی که در این زمینه انجام شد مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل سوم روابط و مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق عنوان شده است. فصل چهارم مدل‌های پیشنهادی مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج آن تجزیه و تحلیل شده است؛ و در نهایت نتیجه گیری و پیشنهادها برای کارای آینده آمده است.

۲- فصل دوم: مروری بر مطالعات پیشین

۲-۱- مقدمه

با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد ذرات، روش‌های مختلفی برای جداسازی و مرتب‌سازی سریع-ودقیق میکروذرات ایجاد شده است. پیشرفت‌های حاصله در میکروسیال‌ها، تکنولوژی‌های مرتب‌سازی را قادر می‌سازد که جداسازی با مقیاس کوچک برای دستکاری و بررسی ذرات و سلول‌ها انجام شود.

سیستم‌های مرتب‌سازی میکروسیال نیاز به نمونه با حجم کمتری دارند که همین امر موجب کاهش هزینه‌ها و زمان تجزیه و تحلیل می‌شود. علاوه بر این، ابعاد کوچک‌تر دستگاه‌ها امکان همگام‌سازی چندین روش را برای رسیدن به خلوص و بازدهی بیشتر مهیا می‌کند.

در حالت کلی روش‌های بکار رفته در جداسازی میکروذرات به سه دسته‌ی فعال^۱، غیرفعال^۲ و ترکیبی از دو روش اول و دوم تقسیم می‌شوند. در روش‌های غیرفعال جداسازی برحسب میدان جریان، ساختار کانال و تاثیرات ذرات بر یکدیگر انجام می‌شود و به میدان‌های خارجی نیاز ندارد. از سوی دیگر، در روش‌های فعال از میدان‌های خارجی در اشکال مختلف برای جداسازی بهتر استفاده می‌شود. در ادامه به بررسی کارها در این زمینه با جزییات بیش‌تری پرداخته خواهد شد.

۲-۲- دسته بندی روش‌های جداسازی ذرات در مقیاس میکرو

در این قسمت ابتدا به صورت نمونه‌وار، به تکنیک‌هایی که در جداسازی ذرات مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ اشاره می‌شود و در ادامه نیز به صورت مختصر به شرح آن‌ها پرداخته خواهد شد.

توانایی مرتب کردن سلول‌های متمایز بر اساس خواص فیزیکی آنها یک ابزار مهم در طیف گسترده-ای از برنامه‌های کاربردی از جمله خدمات بهداشتی، تحقیقاتی و کاربردهای صنعتی است. بیماری‌های متعددی خواص فیزیکی سلول را تغییر می‌دهند و بنابراین مرتب‌سازی سلول‌ها در مراقبت‌های بهداشتی بسیار مهم است. [۱۳، ۱۴]. به عنوان مثال، گلبول‌های قرمز سالم به اندازه کافی قابل انعطاف هستند

¹ active

² passive

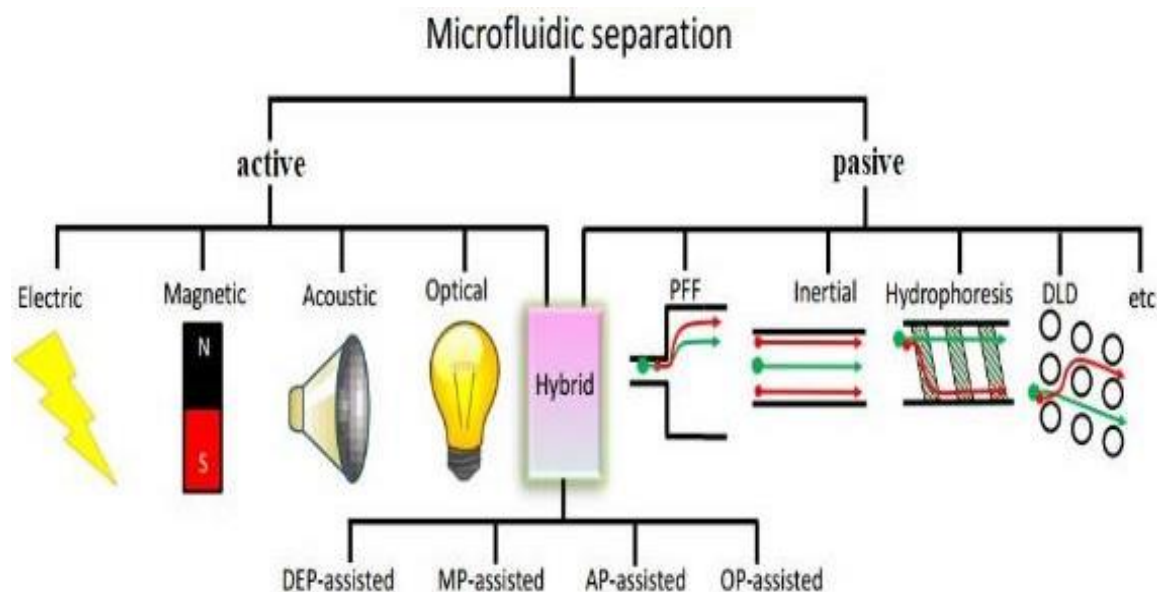
که می‌توانند به راحتی در رگ‌های خونی جریان پیدا کنند. گلبول‌های آلوده به انگل مالاریا تا ۵۰ برابر سفت و سخت می‌شوند و قادر به عبور از مویرگ‌ها نیستند، که باعث مسدود شدن مویرگ‌ها می‌شوند. [۱۵].

جداسازی و مرتب‌سازی ذرات با اندازه میکرون، سلول‌ها، قطرات، انگل‌ها و موجودات بیولوژیکی بر اساس اندازه، شکل پذیری و خواص ذاتی آنها ارائه شده است که در تولیدات صنعتی، نظیر مواد غذایی و محصولات شیمیایی و بیولوژیکی به‌وفور مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۶].

جداسازی ذرات برای طیف گسترده‌ای از برنامه‌های کاربردی، از جمله سنتز شیمیایی، فرآوری مواد معدنی و تجزیه و تحلیل بیولوژیکی مورد نیاز است. [۱۶، ۱۷]. به عنوان مثال، در صنایع غذایی، فعالیت باکتری‌های مضر با دقت مورد بررسی قرار می‌گیرد و با کمک تکنیک‌های جداسازی از ورود آنها جلوگیری می‌شود. [۱۸]. در بخش درمانی، می‌توان از تکنیک‌های جداسازی برای جدا کردن سلول‌های زنده از سلول‌های مرده، سلول‌های سرطانی از سلول‌های طبیعی و سلول‌های آلوده به مالاریا از سلول‌های سالم استفاده کرد. [۱۹]. علاوه بر این، مرتب‌سازی ذرات^۱ با استفاده از ویژگی ساختاری میکرو کانال‌ها و یا سرعت میکرو سیال امکان‌پذیر است. از سوی دیگر، بسیاری از جداسازی‌ها با استفاده از یک میدان خارجی انجام می‌شود که با اثرگذاری این میدان بر ذرات و یا سیال و یا هردو، جداسازی را میسر می‌سازد؛ که از این‌دست می‌توان به میدان‌های مغناطیسی، الکتریکی، نوری و صوتی اشاره کرد [۲۰].

در این قسمت، روش‌های مختلف جداسازی که به دودسته‌ی فعال و غیرفعال، تقسیم می‌شوند؛ بررسی خواهد شد. این تقسیم‌بندی‌ها به‌طور کامل در شکل ۲-۱ نشان داده شده است.

^۱Particle sorting



شکل ۱-۲ دیگرام روش‌های جداسازی و مرتب کردن میکرو ذرات در میکرو کانال‌ها [۲۱].

روش‌های مرتب‌سازی فعال شامل یک میدان خارجی برای مرتب‌سازی ذرات است و در روش‌های مرتب‌سازی غیرفعال از تاثیر ذرات بر یکدیگر، ساختار میکرو کانال و میدان جریان برای جداسازی استفاده می‌کنند. [۲۲].

مزیت روش‌های غیرفعال بر فعال، بی‌نیازی آن‌ها از میدان خارجی است؛ ولی روش‌های فعال، بازده جداسازی بالاتری دارند. بنابراین، روش‌های جداسازی غیرفعال می‌تواند در جایی که فراهم کردن انرژی ورودی مشکل و یا هزینه بر است مورد استفاده قرار گیرد، در حالیکه روش‌های جداسازی فعال می‌توانند در جایی که نیاز به بازدهی جداسازی ذرات بالا باشد مورد استفاده قرار گیرد. در روش‌های ترکیبی نیز روش‌های غیرفعال به همراه میدان‌های خارجی عملکرد میکرو سیستم را بهبود می‌بخشند.

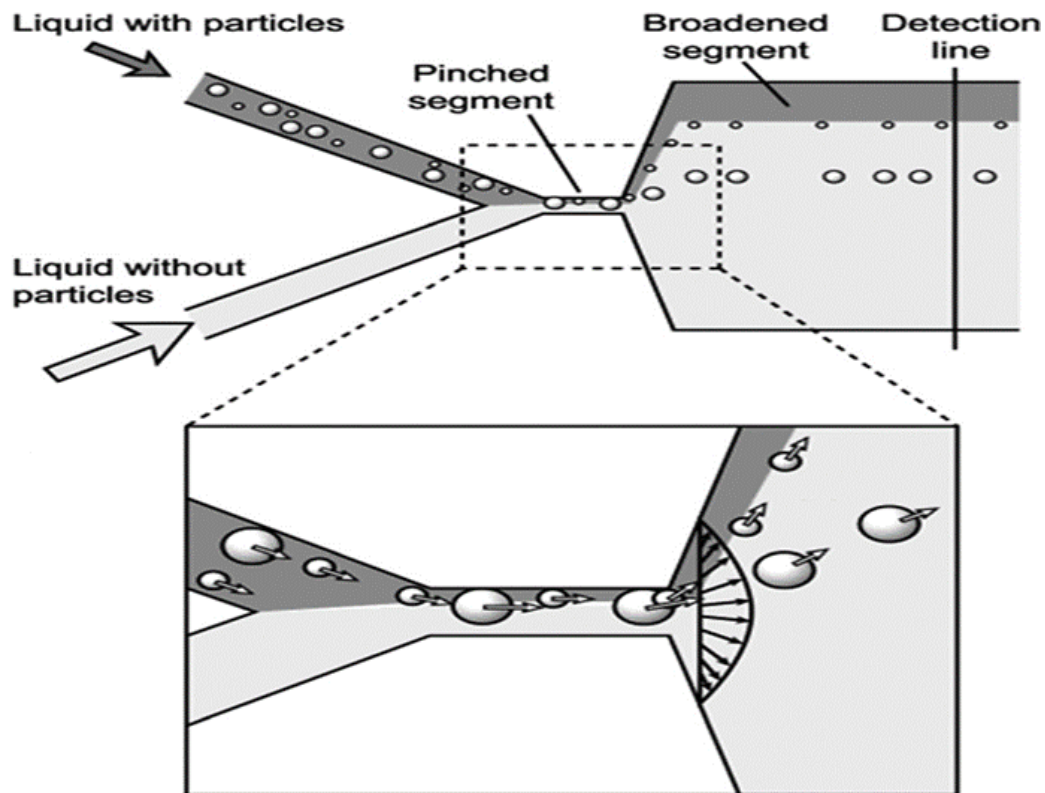
۲-۳- روش‌های غیر فعال

همان‌طور که گفته شد در این دسته از روش‌ها، جداسازی می‌تواند با استفاده از مشخصات فیزیکی ذرات، برهم‌کنش بین آن‌ها، چگونگی حرکت میکرو سیال، ساختار کانال، اندازه‌ی ذرات، اینرسی آن‌ها در حین حرکت انجام شود. در ادامه جزئیات بیشتری از این دست جداسازی‌ها ارائه می‌شود.

۲-۳-۱- فشار سیال

متمرکز کردن فشار سیال^۱ (PFF) یک روش مرتب سازی غیر فعال است که برای مرتب سازی ذرات براساس اندازه آن‌ها با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی جریان سیال در یک میکرو کانال مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۳].

سیال حاوی ذراتی، توسط یک سیال بدون ذره همانطور که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است؛ متمرکز می‌شود.



شکل ۲-۲ شماتیکی از جداسازی با روش PFF [۲۳].

میکرو کانال شامل یک قسمت متمرکزکننده^۲ است که ذرات، با کنترل کردن نرخ سرعت سیال در ورودی‌ها، به سمت یکی از دیوارهای جانبی هدایت می‌شوند. در روش PFF فرض می‌شود که سیال

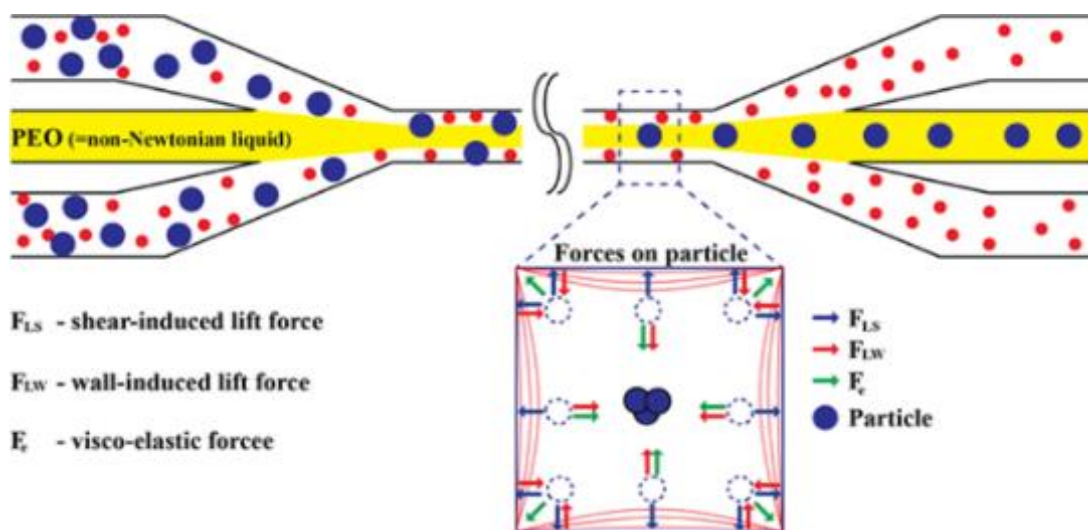
^۱ Pinched Flow Fractionation

^۲ Pinched segment

تراکم ناپذیر است و همچنین ذرات، جریان سیال را آشفته نکنند و یا با دیواره‌های کانال تماس نداشته باشند. اگر عرض قسمت متمرکز کننده زیاد باشد؛ باعث کاهش سرعت سیال می‌شود؛ که همین امر بازده جداسازی را کاهش می‌دهد؛ عرض قسمت متمرکز کننده به اندازه ذرات در جریان بستگی دارد [۲۴].

۲-۳-۲- اینرسی

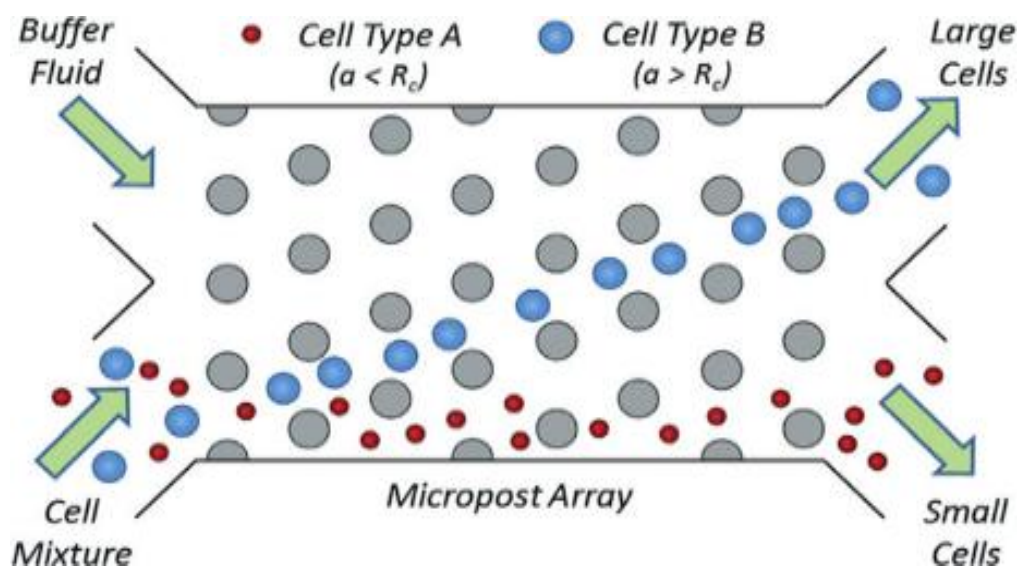
هنگامی که یک ذره در طول یک میکروکانال مستقیم حرکت می‌کند، دو نیروی اینرسی به روی آن اثر می‌گذارد. [۲۵]. نیروی برا ناشی از شکاف سیال و نیروی برا ناشی از اثر دیواره میکروکانال. نیروی شکاف دهنده ناشی از سهموی وار بودن سرعت سیال در میکروکانال است. برای یک ذره کروی نزدیک به خط مرکزی کانال، تغییرات سرعت در ناحیه دیوار ذره در مقایسه با خط مرکزی بالاتر است. بنابراین، ذرات کروی از مرکز به سمت دیواره‌های میکرو کانال حرکت می‌کنند. در شکل ۲-۳ میکرو ذره در عرض کانال نشان داده شده است.



شکل ۲-۳ تصویر شما تیک از میکرو کانال برای جدایی ذرات در جریان با روش اینرسی است [۲۵].
نیروی برا ناشی از اثر دیوار را می‌توان با در نظر گرفتن میدان جریان در اطراف یک ذره کروی توضیح داد که وقتی ذره در نزدیکی دیوار قرار می‌گیرد میدان جریان اطراف ذره تقارن خود را از دست می‌دهد در نتیجه ذره از دیوار دور می‌شود. این دو نیروی برا در خلاف جهت هم عمل می‌کنند. [۲۳].

۲-۳-۳- جابه‌جایی جانبی

جابه‌جایی جانبی (DLD^1) یک روش جداسازی پیوسته است که باعث دو شاخه شدن نامتقارن جریان در اطراف موانع می‌شود. [۲۳]. این موانع بصورت سه‌بعدی در میکرو کانال به‌گونه‌ای قرار داده می‌شود که فاصله بین آن‌ها از اندازه میکرو ذرات بزرگ‌تر باشد میکرو ذرات بسته به سایز و انعطاف‌پذیری در بین موانع حرکت و مسیر خود را انتخاب می‌کنند. میکرو ذرات با اندازه‌های یکسان مسیرهای مشابهی دارند و همین امر اساس این روش در جداسازی میکرو ذرات است. در شکل ۲-۴ موانع به‌صورت آرایه‌های سیلندری شکل در کانال قرار داده شده‌اند.



شکل ۲-۴ مرتب‌سازی سلول با روش جابه‌جایی جانبی [۲۳].

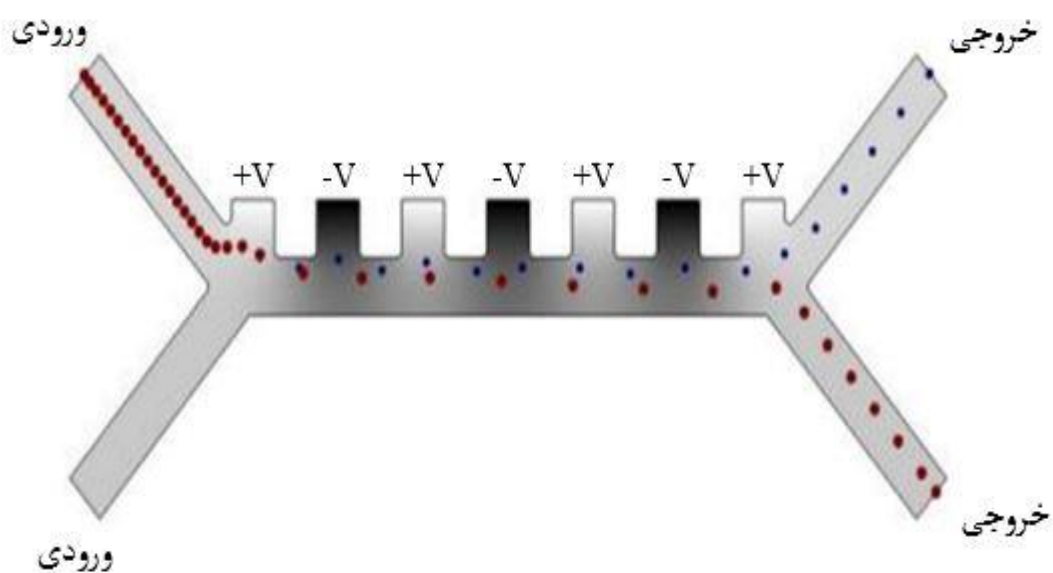
حرکت این ذرات در بین این موانع باعث می‌شود که ذرات تقارن حرکتی خود را از دست داده و به سمت یکی از دیواره‌های میکروکانال منحرف شوند. برخورد میکرو ذره با موانع پیش رویش باعث جابه‌جایی قابل توجهی می‌شود [۲۶].

¹ Deterministic Lateral Displacement

۲-۴- روش‌های فعال

۲-۴-۱- روش دی‌الکتروفورسیس

اگر یک ذره خنثی در یک میدان الکتریکی غیریکنواخت قرار داده شود، ذره قطبی شده و نیروی دی‌الکتروفورسیس^۱ (DEP) به آن وارد می‌شود. اگر میدان همگن باشد، نیروی DEP بر روی ذرات خنثی صفر است. از این روش به طور گسترده در متمرکز کردن، جداسازی، تجزیه و تحلیل شیمیایی و بیولوژیکی ذرات که در یک مایع معلق هستند استفاده می‌شود. پتانسیل‌های الکتریکی مثبت و منفی در بالای کانال قرار داده شده است. شکل ۲-۵ شماتیکی از میکروکانال و مسیر ذرات را نشان داده است [۲۷].



شکل ۲-۵ هندسه دوبعدی از دستگاه مدل شده در روش دی‌الکتروفورسیس و شماتیکی از مسیر ذرات [۲۷].

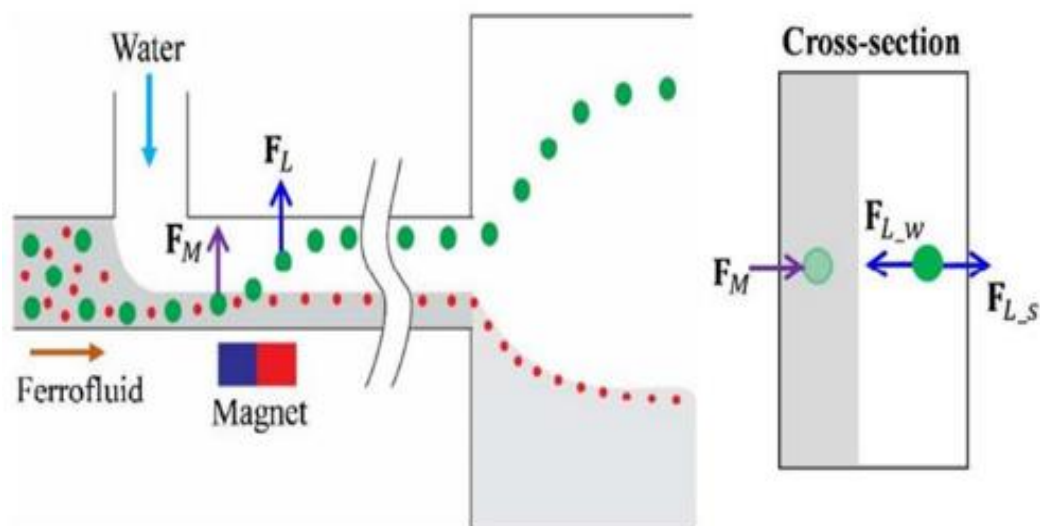
۲-۴-۲- روش مگنتوفورسیس

روش‌های جداسازی که بر اساس خواص ذاتی سلول‌ها می‌باشند باعث آسیب رساندن به سلول‌ها می‌شوند مانند فشاری که به غشاء سلول‌ها در فیلتراسیون وارد می‌شود و یا گرمای تولید شده در روش الکتروفورسیس و مواردی از این دست در روش‌های دیگر می‌توان اشاره کرد. استفاده از روش جداسازی

¹ Dielectrophoresis

مگنتوفورسیس^۱ دارای چندین مزیت از جمله هزینه پایین، آسیب نرساندن به سلول و زمان کمتر برای جداسازی است. [۲۸]. بررسی روش‌های مرتب سازی مغناطیسی توسط چن و همکاران و پمه و همکاران گزارش شده است. [۲۹، ۳۰].

روش کلی کار در این متد جداسازی قرار دادن آهنرباهایی در طول کانال هست که توسط آن‌ها میکرو ذرات از لحاظ مغناطیسی قطبیده شده، به آهنرباها جذب و یا دفع می‌شوند. شکل ۲-۶ نمونه‌ای از جداسازی با استفاده از آهنربای دائمی است.



شکل ۲-۶ شماتیک نشان‌دهنده مکانیزم جداسازی ذرات غیر مغناطیسی در یک جریان فرو سیال است [۳۱].

اساس این نوع جداسازی به خواص ذاتی میکرو ذرات و میکرو سیال بستگی دارد به نحوی که در مخلوطی از میکرو ذرات، ذراتی که از خود خواص مغناطیسی بیشتری نشان می‌دهند نسبت به ذرات دیگر بیشتر جذب آهنربا می‌شوند.

¹ Magnetophoresis

سلول‌های فعال فلورسانس^۱ (FACS) یک روش مرتب‌سازی و جداسازی ذرات از یک مخلوط است، اما بازده آن تنها ۱۰۷ ذره در ساعت است. با این روش، زمان صرف شده برای جداسازی سلول‌های نادر بسیار زیاد است [۳۲]. به عنوان یک روش دیگر جداسازی سلول، میدان مغناطیسی بالا^۲ (HGM) همراه با برچسب فلورسنت می‌تواند برای ایجاد بازده جداسازی بیشتر مورد استفاده قرار گیرد. این سیستم جداسازی مغناطیسی نامیده می‌شود که در آن برچسب‌های فلورسنت و مغناطیسی به سلول‌ها داده می‌شود [۳۳].

آهنرباهایی که در استفاده از این روش بکار گرفته می‌شوند به دودسته آهنرباهای دائم و الکتریکی تقسیم می‌شوند [۲].

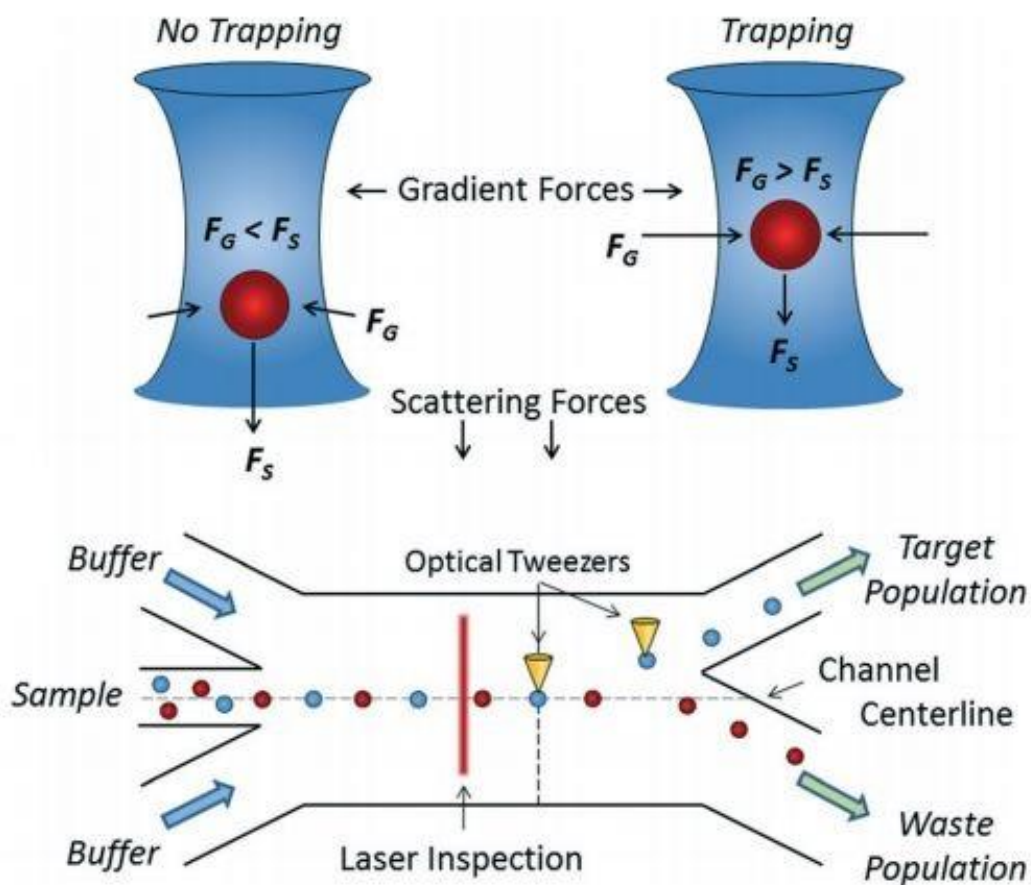
۲-۴-۳- روش‌های اپتیکی

هنگامی که اشعه لیزر به یک میکرو ذره برخورد می‌کند، میکرو ذره باعث پخش شدن اشعه نوری شده و باعث تغییراتی در اندازه حرکت فوتون‌های موجود در اشعه لیزر می‌شود. این تغییر اندازه حرکت فوتون‌ها باعث ایجاد نیرو خواهد شد. در حالت کلی چگالی اشعه با توجه به روابط گاوس، در مرکز اشعه بیشترین مقدار را دارد و با حرکت به سوی خارج مرکز، از این مقدار کم می‌شود.

زمانی که یک پرتو نور به وسیله ذره پراکنده می‌شود و نسبت ضریب شکست ذره به محیط کمتر از یک است، تعادل چگالی سیستم به گونه‌ای تغییر می‌کند که نیروی ایجاد شده ناشی از تغییرات اندازه حرکت فوتون‌ها، ذرات را آن گونه که در شکل ۲-۷ نشان داده شده منحرف می‌کند [۲۳]. با تنظیم طول موج لیزر، قدرت و هندسه، این روش می‌تواند برای جدا کردن و مرتب کردن اشیاء در اندازه‌های کوچک از ۱۰۰ نانومتر تا نزدیک به ۱۰۰ میکرومتر استفاده شود [۳۴].

¹ Fluorescence-activated cell sorting

² high-gradient magnetic



شکل ۲-۷ مرتب سازی سلول با نیروی نوری [۲۳].

۲-۴-۴- روش های صوتی

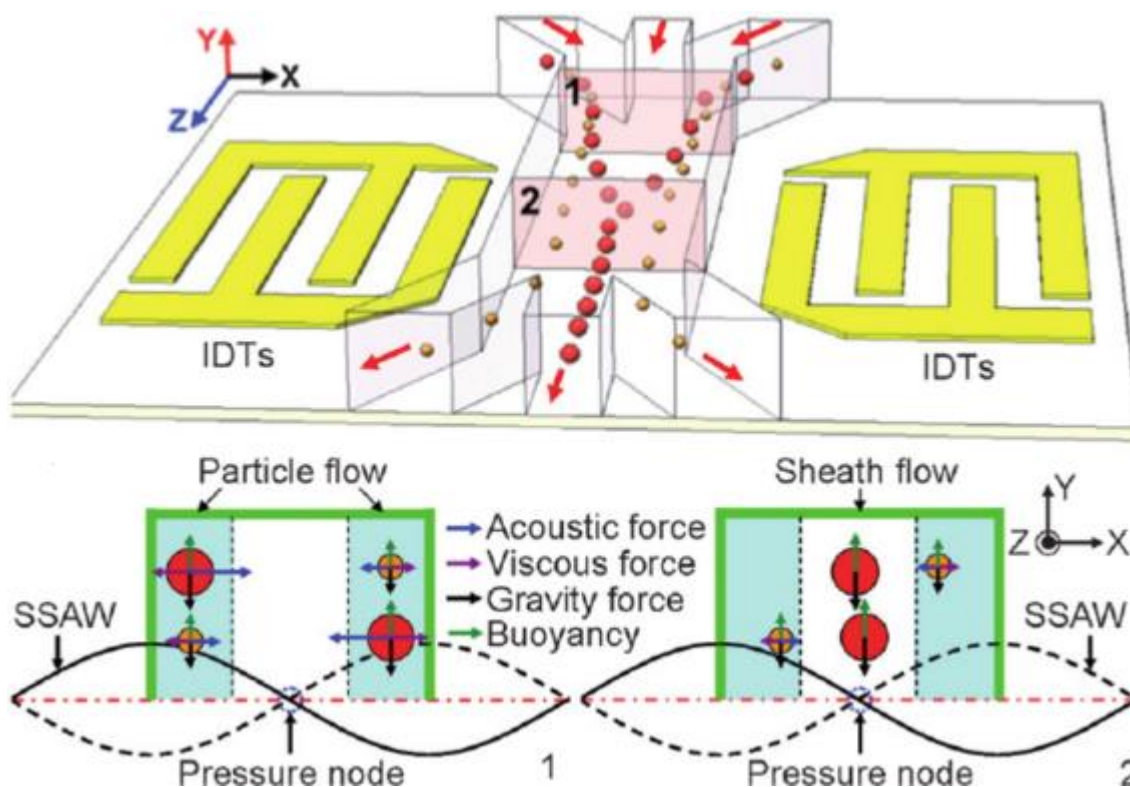
هنگامی که یک ذره در یک میدان صوتی قرار می گیرد، نیروی آکوستیک بر روی ذره وارد می شود. علامت نیرو با عامل کنتراست^۱ (CF) تعیین می شود. اگر CF مثبت باشد، به این معنی است که حرکت ذرات به سمت گره فشار است، در حالی که CF منفی جنبش ذرات را به انتهای آن نشان می دهد. دو منبع موج^۲ IDT در دو طرف دیواره میکروکانال قرار دارد که یک طرف دیوار به عنوان فرستنده اولتراسونیک^۳ و طرف دیگر دیوار برگشت دهنده امواج عمل می کند که این امر باعث تداخل امواج در کانال شده و نقاط و گره های با بیشترین و کمترین فشار در عرض کانال ایجاد می کند. انحراف ذرات با

¹ contrast factor

² interdigitated transducer

³ultrasonic

استفاده از امواج آکوستیک^۱، آکوستوفورسیس^۲ نامیده می‌شود که می‌تواند برای مرتب‌سازی ذرات بر- اساس اندازه مورد استفاده قرار گیرد. شکل ۸-۲ شماتیکی از سیستم جداسازی ذره با استفاده از میدان آکوستیک را نشان داده است [۳۵].



شکل ۸-۲ تصویر شماتیکی از مکانیسم جداسازی صوتی نشان‌دهنده سلول‌هایی است که از طرف دیوار به مرکز کانال انتقال می‌یابند به علت نیروهای صوتی محوری که در هنگام ورود سلول‌ها به منطقه امواج آکوستیک به سلول‌ها وارد می‌شوند [۳۵].

۵-۲- پیشینه تحقیق مربوط به روش مگنتوفورسیس برای جداسازی و به دام انداختن ذرات دستگاه‌های میکروسیال به طور گسترده برای کاربردهای مکانیکی، الکتریکی، بیولوژیکی و پزشکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۳۶]. دستکاری میکرو ذرات و سلول‌ها در دستگاه‌های میکروسیال برای استفاده‌های مختلف در حوزه‌های مهندسی و پزشکی مورد نیاز است [۳۷].

¹standing acoustic waves

² acoustophoresis

به‌طورمعمول، برای ایجاد نیروهای فیزیکی برای جداسازی ذرات [۳۸]، می‌توان از میدان‌های مختلف خارجی از جمله میدان‌های الکتریکی، مغناطیسی، نوری و آکوستیک استفاده کرد که به‌عنوان روش جداسازی فعال طبقه‌بندی می‌شوند. در مقایسه با روش‌های جداسازی غیرفعال، روش‌های فعال، می‌توانند در هندسه‌های ساده مورد استفاده قرار گیرند و عملکرد جداسازی بهتری دارند. علاوه بر این در روش‌های جداسازی فعال، برای جداسازی و مرتب‌سازی ذرات از رسانایی الکتریکی و حساسیت مغناطیسی ذرات استفاده می‌شود [۲۱].

در میان این روش‌ها، جداسازی با استفاده از میدان مغناطیسی با توجه به ساختار ساده، عدم تولید حرارت القائی و همچنین به دلیل اینکه از PH محلول و غلظت یونی مستقل است، مورد توجه بیشتری قرار گرفته است [۳۹، ۴۰].

این فناوری می‌تواند به‌عنوان روش‌های مگنتوفورسیس مثبت و منفی طبقه‌بندی شود. برای جداسازی به کمک مگنتوفورسیس مثبت [۴۱، ۴۲]، نیروهای جاذبه مغناطیسی بین ذرات و منبع میدان مغناطیسی در امتداد گرادیان میدان مغناطیسی تولید می‌شوند. در روش‌های مغناطیسی عمدتاً ذرات غیرمغناطیسی را به کمک مواد مغناطیسی برچسب‌دار می‌کنند و به همین دلیل این روش به‌عنوان یک روش بر اساس برچسب شناخته می‌شود. در صورتیکه از برچسب مغناطیسی برای ذرات استفاده نشود، فناوری مگنتوفورسیس منفی برای جدا کردن اهداف غیرمغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته است [۴۲، ۴۳]. در این موارد، سیال باید مغناطیسی باشد.

پمه و همکاران با استفاده از نیروی مغناطیسی، به دام انداختن، جداسازی و مخلوط‌کردن ذرات در سیستم‌های میکرو را بررسی کرده‌اند [۴۴]. هدف از این بررسی معرفی و بحث در مورد توسعه‌های مختلف در زمینه مغناطیس و میکروسیال‌ها است. هانسن و همکاران طراحی و ساخت یک دستگاه جداساز مغناطیسی که از یک میدان مغناطیسی خارجی ۵۰ میلی تسلا استفاده شده است را ارائه داده‌اند [۴۵]. این دستگاه ذرات مغناطیسی فلوئورسنت ۱ میکرومتر را از یک مخلوط با حجم ۷٫۵ میکرولیتر

بطور کامل جدا می‌کند. پمه و ویلهلم استفاده از مگنتوفورسیس مثبت برای مرتب سازی مداوم سلول - های سرطانی تخمدان را گزارش کردند [۴۶]. آنها نانوذرات مغناطیسی را برای برچسب کردن سلولها استفاده کرده و اثربخشی جدایش سلول را برحسب اندازه سلول و میزان جریان گزارش کردند. چانگ و همکاران استفاده از تیغه‌های مغناطیسی برای جداکردن میکروذرات مغناطیسی با تکنیک مگنتوفورسیس مثبت در میکروسیالات را گزارش کرده‌اند [۴۷]. آنها با یک سرعت جریان نسبتاً کم، توانسته‌اند میزان جدایش را به 81 درصد برسانند. گلسینس و همکاران یک ماده کامپوزیتی مغناطیسی را برای به دام انداختن و جداسازی ذرات پارامغناطیس با تکنیک مگنتوفورسیس مثبت گزارش داده - اند [۴۸]. این کامپوزیت زمانی که بین دو آهنربای دائمی قرار می‌گیرد، شیب شدیدی در میدان مغناطیسی ایجاد می‌کند در نتیجه نیروی بیشتری به ذرات اعمال می‌شود. زو و همکاران با استفاده از فروسیال EMG 408 جداسازی مخلوطی از ذرات با خواص مغناطیسی مختلف را با تکنیک‌های مگنتوفورسیس مثبت و منفی گزارش کرده‌اند [۴۹]. آنها طراحی، مدلسازی، ساخت دستگاه جداسازی را برای جدا کردن ذرات مغناطیسی و غیر مغناطیسی، و نیز ذرات با خاصیت مغناطیسی مختلف بررسی کرده‌اند. کیم و همکاران جداسازی گلبول‌های قرمز آلوده به مالاریا از خون را با روش مگنتوفورسیس مثبت مورد بررسی قرار داده‌اند [۵۰]. پارامترهای طراحی مانند ارتفاع کانال، طول کانال و سرعت جریان برای به دست آوردن حداکثر بازده بهینه سازی شده است. وو و همکاران جداسازی گلبول‌های قرمزخون آلوده به مالاریا را در یک سیستم دو بعدی با استفاده از رویکرد اویلری لاگرانژی با روش مگنتوفورسیس مثبت بررسی کرده‌اند [۵۱]. پلاسمای خون به عنوان یک مایع نیوتنی در نظر گرفته شده است و با استفاده از یک باریکه با ارتفاع 50 میکرومتر و یک پخش کننده طولی ۲ میلیمتری بازده کلی جداسازی بهبود یافته است. کیم و همکاران یک دستگاه میکروسیال برای جداسازی سلول‌ها معرفی کرده‌اند که می‌تواند سلول‌های تومور را از یک مخلوط ناهمگن (مانند خون) با استفاده از میدان مغناطیسی جدا کند. علاوه بر این، دستگاه میکروسیال، سلولهای تومور را به ظروف استاندارد برای تجزیه و تحلیل انتقال می‌دهد و از آنجایی که سلول‌های تومور عموماً بزرگتر از سلول‌های طبیعی خون هستند، دستگاه

می‌تواند سلول‌های تومور را از داخل سلول‌های طبیعی شناسایی کند. تجزیه و تحلیل نشان داد که بازده جداسازی این سلول‌ها ۸۲,۴ درصد بوده است [52]. لیانگ و همکاران حرکت ذرات در یک میکروکانال مستطیلی T شکل را مورد بررسی قرار داده‌اند [53]. ذرات غیرمغناطیسی پلی‌استایرن با قطر های ۲,۲ ، ۵ و ۱۰ میکرومتر در فروسیال EMG 408 معلق هستند که با استفاده از آهنربای دائمی نتودیمیم آهن بور منحرف می‌شوند. تاثیر موقعیت ذرات نسبت به آهنربا، اندازه ذرات، سرعت جریان فروسیال و غلظت، بر روی انحراف ذرات به صورت سه بعدی بررسی شده است. ژانگ و همکاران با جایگزین کردن یک محیط غیرمغناطیسی با فروسیال، جداسازی ذرات مغناطیسی و غیرمغناطیسی در میکروکانال T شکل (که عرض شاخه اصلی آن ۴۰۰ میکرومتر است) را به طور قابل توجهی افزایش داده‌اند [۴۳]. برای نشان‌دادن و مقایسه جداسازی، ذرات مغناطیسی ۲,۸۵ میکرومتر با ذرات غیرمغناطیسی پلی‌استایرن ۱۰ میکرومتر مخلوط شده و در دو محیط آب دیونیزه خالص و فروسیال EMG 408 قرار می‌گیرند.

فناوری جداسازی مغناطیسی نیز می‌تواند به انواع گسسته و پیوسته برای فرآیندهای جداسازی طبقه‌بندی شود [۵۴]. اصل اساسی مگنتوفورسیس منفی این است که نیروهای دفع مغناطیسی می‌توانند از اختلاف حساسیت مغناطیسی بین ذرات غیر مغناطیسی و مایعات مغناطیسی تولید شوند.

۲-۶- نوآوری و توصیف مسئله

در مگنتوفورسیس مثبت معمولاً اهداف غیرمغناطیسی را به کمک ذرات مغناطیسی برچسب‌گذاری می‌کنند که به‌عنوان یک روش براساس برچسب شناخته می‌شود. برای تحقق بخشیدن به جداسازی بدون برچسب‌گذاری، فناوری مگنتوفورسیس منفی برای جدا کردن اهداف غیرمغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته است.

در این تحقیق، یک روش عددی دوبعدی برای بررسی رفتار انتقال و جداسازی میکروذرات در جریان میکروکانال T شکل توسعه داده شده است. در بخش‌های زیر، توزیع نیروی مغناطیسی و مسیر

ذرات حاصل از مدل عددی با نتایج تحلیلی و تجربی در کار لیتائو لیانگ و همکاران [۵۵] اعتبارسنجی شد و سپس، در این پایان‌نامه، سه مدل آهنربا برای جداسازی مجموعه ذرات مورد بررسی قرار گرفته است که مدل اول شامل یک آهنربای مستطیلی شکل می‌باشد. در مدل دوم آهنربای مدل اول به دو آهنربای همسان تقسیم شده و در فاصله‌ی مشخصی از یکدیگر قرار گرفته‌اند. در مدل سوم آهنرباها همان آهنرباهای مدل دوم هستند که با آلیاژ نیکل لایه نشانی شده‌اند و به صورت نوآورانه‌ای به بازدهی جدایش کمک می‌کند. برای اولین بار، برای هر مدل از مگنت پیشنهادی، دو سایز (مقدار) بحرانی (ترشهولد) از ذرات ارائه شده است که مجموعه ذرات کوچکتر از مقدار بحرانی اول از خروجی پایین میکروکانال و مجموعه ذرات بزرگتر از مقدار بحرانی دوم، از خروجی دیگر میکروکانال با بازدهی ۱۰۰٪ جداسازی می‌شوند.

۳- فصل سوم: معادلات حاکم و شرایط مرزی

۳-۱- مقدمه

حرکت ذرات در یک سیستم جداسازی مغناطیسی در واقع تحت تأثیر نیروهای مختلف مانند نیروی مغناطیسی F_m تولیدشده توسط گرادیان میدان مغناطیسی، نیروی کشش هیدرودینامیکی F_d توسط مایع روی ذرات، نیروی حرارتی جنبشی به وجود آمده توسط حرکت برونی، نیروی گرانشی، نیروی درونی و مغناطیسی دوقطبی است.

جداسازی مغناطیسی میکروسیال یک زیرمجموعه از میکرومگنتوفلوئیدیک ها است، زمینه تحقیقاتی که شامل تعامل بین مغناطیس و جریان سیال در محدوده میکرو است. این بخش بر روی نیروهای کلیدی تمرکز می کند که می توانند مسیر عبور ذرات را طی گذر از دستگاه میکروفلوئیدیک تحت تأثیر قرار دهند. مسیر یک ذره مغناطیسی در یک جریان آرام از طریق یک میکروکانال توسط تعادل بسیاری از نیروها تعیین می شود. برای ذرات کمتر از چند میلی متر با غلظت ذرات کم در یک مایع، نیروی مغناطیسی و نیروی کشش سیال دونیرو غالب در مقایسه با نیروهای دیگر است.

۳-۲- مدل مسیر ذرات

این مدل برای تحلیل مسیر ذره با استفاده از معادله نیوتن مورد استفاده قرار می گیرد:

$$m_{mp} \frac{d\vec{u}_p}{dt} = \vec{F}_m + \vec{F}_d \quad (۳-۱)$$

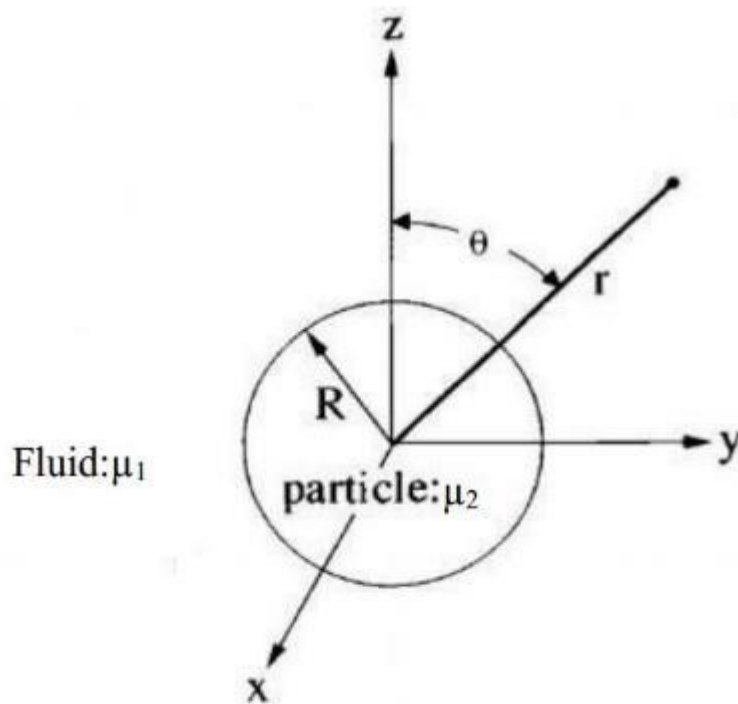
که m_{mp} و u_p به ترتیب جرم و سرعت ذره است. شرط مرزی عدم لغزش برای کلیه دیواره های میکروکانال استفاده می شود، با فرض اینکه ذرات در هنگام رسیدن به دیوار متوقف ($u_p=0$) شوند.

حال با توجه به معادله (۳-۱) برای بدست آوردن مسیر ذرات چند پارامتر مورد نیاز است، مانند نیروی مغناطیسی، نیروی پسای هیدرودینامیک و سرعت ذرات؛ بنابراین، دونیروی F_m و F_d به طور عمده به شرح زیر تجزیه و تحلیل می شوند.

۳-۳- نیروی مغناطیسی

ذرات مغناطیسی یک نیروی را در یک میدان مغناطیسی غیریکنواخت تجربه می‌کنند. این پدیده که مگنتوفورسیس^۱ (MAP) نامیده می‌شود، در فرآیندهای صنعتی و تجاری مختلف برای جداسازی و جذب جامدات معلق در مایعات مورد بهره‌برداری قرار گرفته است.

تصور کنید یک کره همگن با شعاع R و قطبش خالص مغناطیسی M_2 در یک مایع با نفوذپذیری μ_1 معلق است و تحت تأثیر مغناطیس یکنواخت H_0 قرار می‌گیرد. راه حل کلی برای پتانسیل مغناطیسی اسکالر ψ_1 و ψ_2 در خارج و درون کره به شکل زیر بیان می‌شود [۵۶].



شکل ۳-۱ شماتیکی از کره ایی با شعاع R [۵۶].

$$\Psi_1(r, \theta) = -H_0 r \cos \theta + \frac{x \cos \theta}{r^2}, \quad r > R \quad (2-3)$$

¹Magnetophoresis

$$\Psi_2(r, \theta) = -Yr \cos \theta \quad , \quad r < R \quad (3-3)$$

که ثابت‌های X و Y با دو شرط مرزی در سطح ذره تعیین می‌شود. اولاً پتانسیل مغناطیسی باید در مرز بین ذره و مایع برابر باشد.

$$\Psi_1(r=R, \theta) = \Psi_2(r=R, \theta) \quad (4-3)$$

دوم، تراکم شار مغناطیسی باید در سطح مشترک مایع و ذره برابر باشد. وقتی ذره در یک میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد گشتاور اتم‌های ذره با میدان مغناطیسی همسو شده و باعث تقویت میدان می‌شود در نتیجه با توجه به چگالی شار مغناطیسی ذره و سیال $B_1 = B_2$ داریم.

$$\mu_1 H_{r1} = \mu_0 (H_{r2} + M_{r2}) \quad , \quad r = R \quad (5-3)$$

که $H_{r1} = -\partial \Psi_1 / \partial r$ و $H_{r2} = -\partial \Psi_2 / \partial r$ به ترتیب شدت میدان مغناطیسی نرمال در سیال و کره است. با استفاده از معادلات (۲-۳) و (۳-۳)، ضرایب X و Y می‌تواند تعیین شود.

$$X = \frac{\mu_0 - \mu_1}{\mu_0 + 2\mu_1} R^3 H_0 + \frac{\mu_0 R^3 M_2}{\mu_0 + 2\mu_1} \quad (6-3)$$

$$Y = \frac{3\mu_1}{\mu_0 + 2\mu_1} H_0 - \frac{\mu_0}{\mu_0 + 2\mu_1} \quad (7-3)$$

توجه کنید که Y بزرگ‌ترین میدان مغناطیسی یکنواخت H_2 درون کره است. ما می‌توانیم مؤلفه دوقطبی مغناطیسی مؤثر m_{eff} را با مقایسه مقادیر دوقطبی در معادله (۲-۳) تعیین کنیم [۵۶].

$$\Psi_{dipole} = \frac{m_{eff} \cos \theta}{4\pi r^2} \quad (8-3)$$

در نتیجه دوقطبی مغناطیسی به شکل زیر حاصل می‌شود.

$$\vec{m}_{eff} = 4\pi X = 4\pi R^3 \left[\frac{\mu_0 - \mu_1}{\mu_0 + 2\mu_1} \vec{H}_0 + \frac{\mu_0}{\mu_0 + 2\mu_1} \vec{M}_2 \right] \quad (9-3)$$

برای یک ذره مغناطیسی شعاع R و نفوذپذیری μ_2 ، داریم:

$$\vec{M}_2 = \chi_2 \vec{H}_2 \quad (10-3)$$

که $\chi_2 = \mu_2 / \mu_0 - 1$ حساسیت ذره است. با جای گذاری معادله (10-3) در معادله (9-3) دوقطبی مغناطیسی موثر بر اساس میدان مغناطیسی کل بدست می‌آید. دوقطبی مغناطیسی لحظه‌ای موثر یک شکل بسیار شبیه به دوقطبی لحظه‌ای موثر کره دی‌الکتریک می‌گیرد [56].

$$\vec{m}_{eff} = 4\pi R^3 K(\mu_2, \mu_1) \vec{H} \quad (11-3)$$

$$K(\mu_2, \mu_1) = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + 2\mu_1} \quad (12-3)$$

که K تابع کلازیوس-موسوتی¹ است. نیروی مغناطیسی که توسط یک میدان مغناطیسی غیریکنواخت روی دوقطبی مغناطیسی اعمال می‌شود به صورت زیر بیان می‌شود.

$$F_{dipole} = \mu_1 \vec{m}_{eff} \cdot \nabla \vec{H}_0 \quad (13-3)$$

با ترکیب نیروی F_{dipole} و m_{eff} نیروی مغناطیسی وارد بر ذره کروی که در یک میدان مغناطیسی غیریکنواخت قرار دارد به صورت زیر حاصل می‌شود:

¹ Clausius-Mossotti

$$\vec{F}_{MAP} = 2\pi \mu_1 R^3 K(\mu_2, \mu_1) \nabla \vec{H}_0^2 \quad (14-3)$$

(۱) F_{MAP} متناسب با حجم ذره است

(۲) F_{MAP} متناسب با نفوذپذیری μ_1 است

(۳) نیروی مغناطیسی در امتداد گرادیان ولتاژ مغناطیسی هدایت می‌شود.

(۴) نیروی مغناطیسی بستگی به مقدار و علامت تابع K دارد.

با توجه به توضیحات بالا در میدان مغناطیسی، جذب کردن یا دفع کردن ذرات بستگی به ضرایب نفوذپذیری مغناطیسی μ_1 و μ_2 دارد.

مگنتوفورسیس مثبت: $K > 0$ (یا $\mu_2 < \mu_1$). ذرات به ماکزیمم شدت میدان مغناطیسی جذب شده و از مینیمم‌ها دفع می‌شوند.

مگنتوفورسیس منفی: $K < 0$ (یا $\mu_2 > \mu_1$). ذرات به مینیمم شدت میدان مغناطیسی جذب شده و از ماکزیمم دفع می‌شوند.

۳-۴- نیروی پسای هیدرودینامیک

نیروی پسای هیدرودینامیک بر روی ذرات در میکروکانال‌ها به علت حرکت نسبی بین ذرات و سیال اطراف به وجود می‌آید. برای محاسبه نیروی پسا، عبارت زیر استفاده می‌شود [۵۷]:

$$\vec{F}_d = -6\pi \mu r_p (\vec{u}_p - \vec{u}_f) \quad (15-3)$$

که μ ویسکوزیته سیال اطراف ذرات، r_p شعاع ذرات، u_p و u_f به ترتیب بردارهای سرعت ذرات و سیال است.

با توجه به معادلات فوق، برای محاسبه نیروهایی که بر روی ذرات تأثیر می‌گذارند چند پارامتر

مورد نیاز است، مانند قدرت میدان مغناطیسی، شیب میدان و سرعت سیال. برای به دست آوردن این پارامترها، میدان مغناطیسی و میدان جریان سیال مورد بحث قرار گرفته است.

۳-۵- میدان مغناطیسی

این مدل برای ارزیابی توزیع میدان مغناطیسی در میکروکانال استفاده می‌شود. در یک ناحیه میدان مغناطیسی با استفاده از قانون ماکسول - آمپر توصیف شده است [۵۷].

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (3-17)$$

H قدرت میدان مغناطیسی بر حسب A/m است. پتانسیل مغناطیسی اسکالر، V_m را به صورت زیر می‌توان تعریف کرد. که واحد آن A است.

$$\vec{H} = \mu_0 \vec{B} = \mu_0 \nabla \times \vec{V}_m \quad (3-18)$$

از طرفی رابطه چگالی شار مغناطیسی به صورت زیر هست.

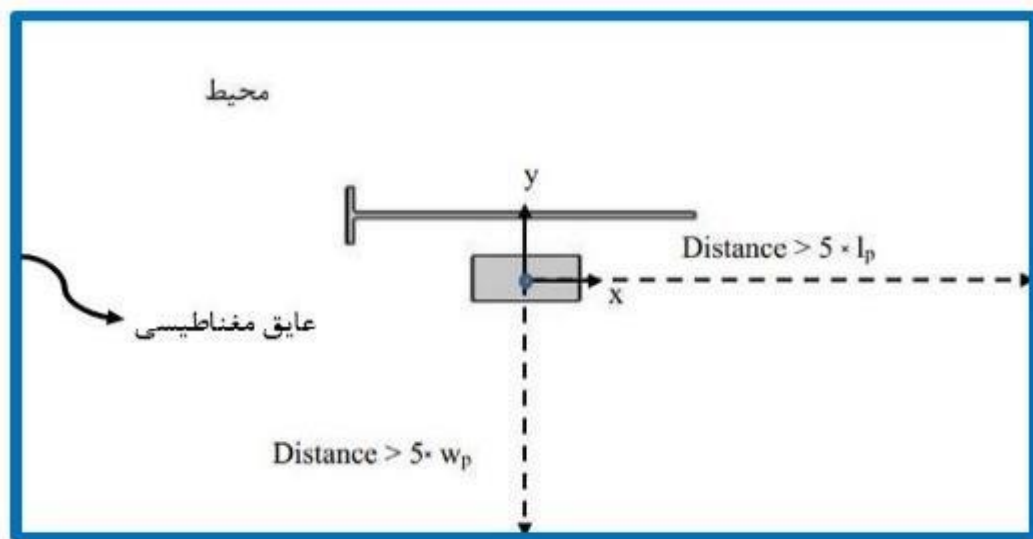
$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} + \vec{B}_r \quad (3-19)$$

در نهایت معادله (۳-۱۷) به فرم زیر درمی‌آید.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \left(\nabla \times \vec{V}_m - \vec{B}_r \right) \right) = \vec{J} \quad (3-20)$$

که μ_r نفوذپذیری نسبی مواد ($\mu_r = 1$) است و فرض شده که در تمام شبیه‌سازی ثابت است، J چگالی جریان الکتریکی است که به دلیل اینکه از آهنربای دائمی استفاده می‌شود برابر صفر می‌باشد و B_r چگالی شار باقیمانده از مواد که در کانال و هوای اطراف برای شبیه‌سازی صفر است. مدل مگنتواستاتیک در سه دامنه، آهنربای دائمی، کانال میکروسیال و هوای اطراف محاسبه می‌شود. شرایط

مرزی عایق مغناطیسی (خطوط با رنگ آبی) در طول مرز سیستم اعمال می‌شود در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.



شکل ۲-۳ شماتیکی از هندسه و هوای اطراف که خطوط با رنگ آبی شرط مرزی عایق مغناطیسی است.

۳-۶- میدان جریان سیال

در این مدل برای به دست آوردن توزیع سرعت جریان سیال از معادلات پیوستگی و ناویر استوکس استفاده می‌شود. فرض شده است سیال تراکم ناپذیر و نیوتنی در داخل کانال جریان دارد [۵۷].

$$\rho \nabla \cdot \dot{u}_f = 0 \quad (۲۱-۳)$$

$$\rho \left((\dot{u}_f^r \cdot \nabla) \dot{u}_f^r \right) = \nabla \cdot \sigma + F \quad (۲۲-۳)$$

که σ تانسور تنش، u_f سرعت سیال، ρ و μ چگالی و ویسکوزیته دینامیکی سیال و F به‌طور کلی نشان‌دهنده نیروهای خارجی دیگر (مانند نیروی جاذبه) است. در این معادلات تانسور تنش به شکل زیر نمایش داده می‌شود:

- $\sigma = -pI + \tau$ که آن را می‌توان به دو بخش فشار منفی در واحد ماتریکسی تانسور و تانسور لزجت مثبت تقسیم کرد.

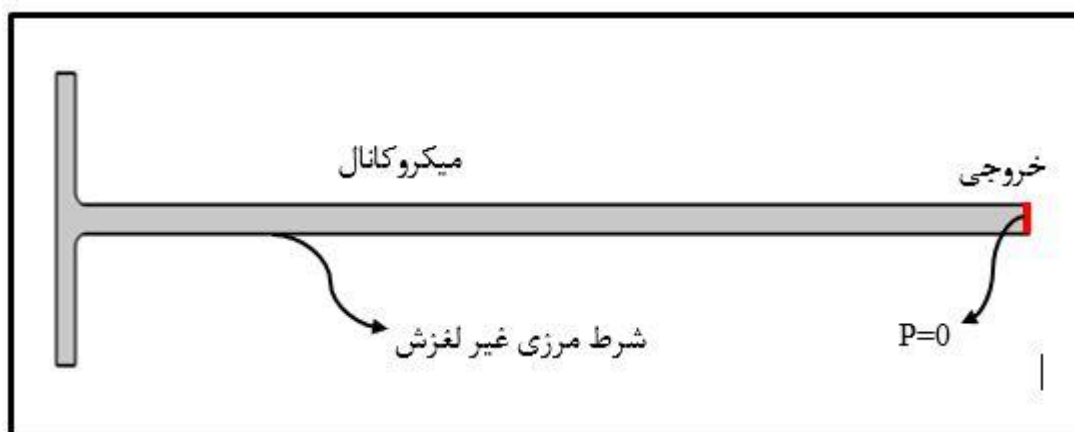
- در سیالات تراکم ناپذیر تانسور لزجت برابر است با $\tau = 2\mu\varepsilon$

- مشخصات تانسور کرنشی برابر است با $\varepsilon = \frac{1}{2}(\nabla u_f + (\nabla u_f)^T)$

از آنجا که جریان سیال به زمان وابسته نیست ترم زمان در سمت چپ معادله ناویر استوکس حذف می‌شود لازم به ذکر است که نیروی مغناطیسی روی سیال نادیده گرفته می‌شود، زیرا غلظت نانو ذرات داخل سوسپانسیون کم است و همچنین به دلیل نداشتن نیروی خارجی دیگر (مانند نیروی جاذبه) نیروی F صفر است. به این ترتیب معادله (۳-۲۲) به فرم زیر حاصل می‌شود.

$$\rho(\vec{u}_f \cdot \nabla) \vec{u}_f = \nabla \cdot \left[-pI + \mu(\nabla u_f + (\nabla u_f)^T) \right] \quad (3-23)$$

مدل جریان آرام فقط در میکروکانال شکل T محاسبه می‌شود. شرایط مرزی غیرلغزش ($u_f = 0$) برای همه دیوارهای میکروکانال و فشار $P = 0$ (رنگ قرمز) در خروجی کانال برای نشان دادن جریان آزاد استفاده می‌شود؛ در شکل ۳-۳ نشان داده شده است.



شکل ۳-۳ شماتیکی از میکروکانال و شرایط مرزی اعمال شده بر روی آن.

۴- فصل چهارم: ارزیابی و تحلیل نتایج

پیش‌تر خلاصه‌وار اشاره شد که تئوری مگنتوفورسیس مبنی بر به دام انداختن میکرو ذرات یا جداسازی ذرات با استفاده از نیروی مغناطیسی هست که برای استفاده از این روش یا باید از خواص مغناطیسی ذاتی میکرو ذرات استفاده کرد و یا اینکه ذرات هدف را با استفاده از برچسب‌های مغناطیسی و یا هر شکل دیگری نسبت به نیروی مغناطیسی تأثیرپذیر ساخت. برای تولید میدان مغناطیسی در داخل کانال نیز می‌توان از آهنرباهای الکتریکی و یا آهنرباهای دائم که خود به دودسته نرم و سخت تقسیم می‌شوند، استفاده کرد. روش کار نیز بدین‌صورت است که در مسیر حرکت سیال در میکروکانال آهنرباهایی قرار داده می‌شود تا بتواند ذرات هدف را به دام انداخته و یا به خروجی‌های موردنظر منحرف سازد. در ادامه با جزئیات بیشتری به بررسی مسائل گفته‌شده خواهیم پرداخت.

۴-۲- اعتبارسنجی

همان‌طور که می‌دانیم برای آغاز یک روش و بررسی دقت آن از اعتبارسنجی استفاده می‌شود. محاسبه دقیق میدان مغناطیسی و نیروی مغناطیسی اولین پیش‌نیاز پیش‌بینی رفتار جریان ذرات در میکروکانال تحت یک میدان مغناطیسی است. برای اعتبارسنجی دو پارامتر بالا که توسط مدل عددی در این پژوهش محاسبه شده است، نتایج عددی با نتایج نظری و تجربی به‌دست‌آمده در مقاله لیتائو لیانگ و همکاران [۵۳] مقایسه شده است. جایی که رفتار انتقال ذرات غیرمغناطیسی در مایعات مغناطیسی تحت تأثیر یک آهنربا دائمی در یک مدل سه‌بعدی مورد مطالعه قرار گرفت. هندسه مدل در شکل ۴-۱ مشابه هندسه در مقاله لیتائو لیانگ و همکاران [۵۳] در شبیه‌سازی استفاده شده است؛ و مقادیر پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی در جدول ۴-۱ آورده شده است. در کار آن‌ها سه مؤلفه نیروی مغناطیسی با استفاده از یک بیان تحلیلی توزیع میدان مغناطیسی $H(x,y,z)$ تولید شده توسط یک آهنربای دائمی مستطیلی به‌دست‌آمده است [۵۳].

$$H_x = \frac{M_s}{4\pi} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-1)^{i+j} \times \ln \left\{ \frac{(y-y_1) + \left[(x-x_i)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_j)^2 \right]^{1/2}}{(y-y_2) + \left[(x-x_i)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_j)^2 \right]^{1/2}} \right\} \quad (1-4)$$

$$H_y = \frac{M_s}{4\pi} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 (-1)^{i+j+k} \times \tan^{-1} \left\{ \frac{(x-x_i)(y-y_j)}{(z-z_k) \left[(x-x_i)^2 + (y-y_j)^2 + (z-z_k)^2 \right]^{1/2}} \right\} \quad (2-4)$$

$$H_z = \frac{M_s}{4\pi} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-1)^{i+j} \times \ln \left\{ \frac{(x-x_1) + \left[(x-x_1)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_j)^2 \right]^{1/2}}{(x-x_2) + \left[(x-x_2)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_j)^2 \right]^{1/2}} \right\} \quad (3-4)$$

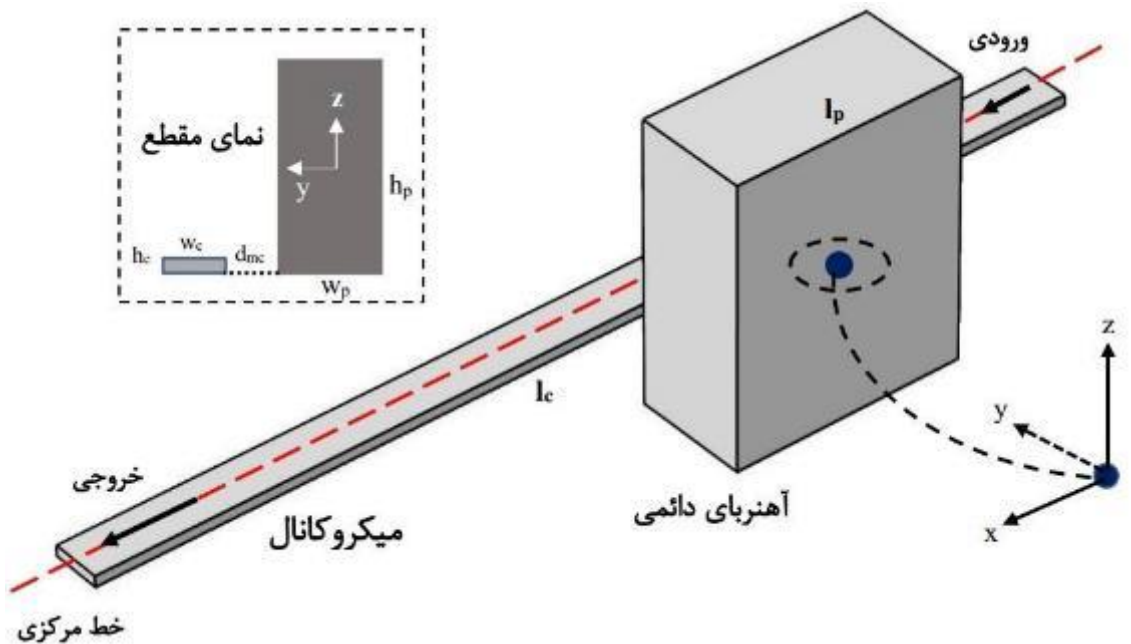
که Ms مگنتیت باقیمانده از آهنربای دائمی در جهت مثبت y است. طبق معادله (1-4)، (2-4) و (3-4)، میدان مغناطیسی در تمام جهات می‌تواند توسط اولین مشتق از میدان مغناطیسی به دست آید؛ و سپس، نیروهای مغناطیسی بر روی ذرات بر اساس معادلات زیر محاسبه می‌شوند.

$$\vec{F} = -\mu_0 V_p \left(\vec{M}_f \cdot \nabla \right) \vec{H} \quad (4-4)$$

مقدار M_f برای یک مایع مغناطیسی رقیق شده در میدان مغناطیسی را می‌توان با استفاده از تابع لانگوین توصیف کرد.

$$M_f = \phi M_d \left[\coth \left(\frac{\mu_0 V_d M_d H}{k_B T} \right) - \frac{k_B T}{\mu_0 V_d M_d H} \right] \quad (5-4)$$

که ϕ مقدار کسر نانو ذرات مغناطیسی، V_d حجم نانو ذرات مغناطیسی است، M_d مغناطش این نانو ذرات، k_B ثابت بولتزمن و T دما است.



شکل ۴-۱ شماتیکی از سیستم آهنربا و کانال با همان مختصات و ابعاد در مقاله لیتائو لیانگ و همکاران [۵۳].

شکل ۴-۱ شامل یک میکروکانال سه بعدی با یک ورودی و یک خروجی می باشد که آهنربا در فاصله ۱۳۳۰ میکرومتر از آن واقع شده است. بطوریکه مرکز مختصات در مرکز آهنربا تعیین شده است و مقادیر پارامترهای مورد استفاده در شبیه سازی عددی در جدول ۴-۱ آورده شده است.

جدول ۴-۱ پارامترهای سیستم مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های عددی

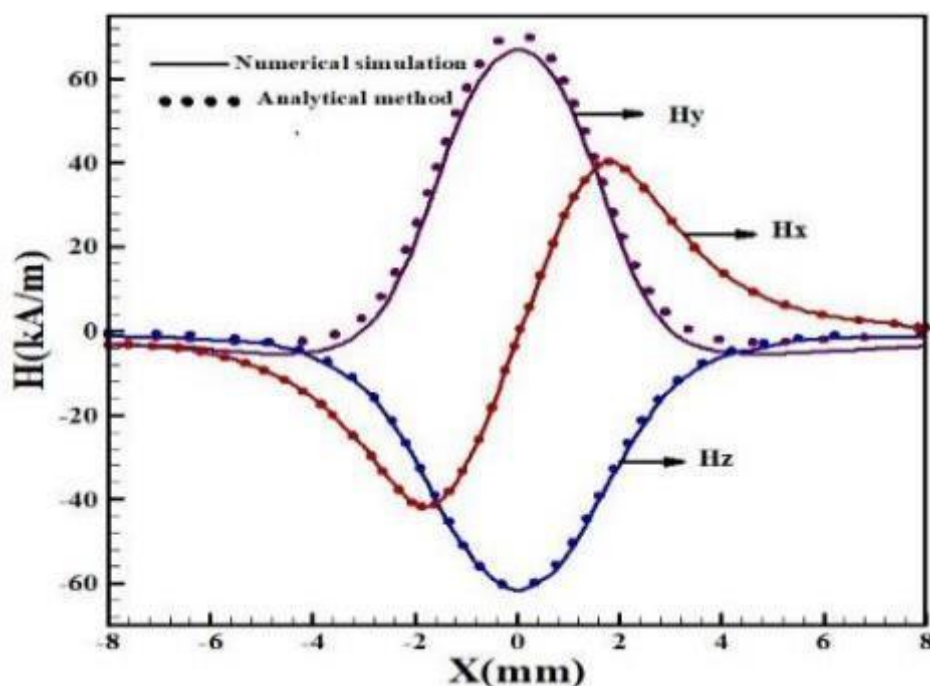
شماره	عنوان	نماد	توصیف	مقدار
۱	ذرات غیر مغناطیسی پلی استایرن	d_p	قطر ذرات	0.2-10 μm
		ρ	چگالی ذرات	1050 kg/m^3
		μ_r	نفوذپذیری مغناطیسی نسبی	0.98
۲	فرو سیال EMG 408	d	قطر نانو ذرات مغناطیسی	10 nm
		Φ	کسر حجمی نانو ذرات مغناطیسی	0.6%
		M_d	مغناطش نانو ذرات مغناطیسی	$4.379 \times 10^5 \text{ A/m}$
		η	ویسکوزیته دینامیکی	1.2 mPa s
		u_{AB}	کل سرعت دو ورودی	22 mm/s
۳	آهنربای دائمی نئودیمیم آهن بور	M_s	مغناطش باقیمانده آهنربا	$1.05 \times 10^6 \text{ A/m}$
		l_p	طول آهنربا	3.176 mm
		h_p	ارتفاع آهنربا	3.176 mm
		w_p	عرض آهنربا	1.588 mm
۴	میکرو کانال T شکل	l_c	طول کانال	10 mm
		h_c	ارتفاع کانال	70 μm
		w_c	عرض کانال	200 μm
		r_c	شعاع قسمت T کانال	100 μm
		w_T	عرض جانبی قسمت T	2 mm

1.33 mm	فاصله بین آهنربا و لبه کانال	d_{mc}	فاصله نسبی	۵
---------	------------------------------	----------	------------	---

نتایج محاسبه شده از میدان‌های مغناطیسی و نیروها در امتداد خط مرکزی کانال (شکل ۴-۳) با استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی در شکل ۴-۲ نشان داده شده است. با استفاده از خطای جذر میانگین مربع‌ها^۱ (RSME) خطای بدست آمده ۳ درصد است که توافق عالی بین دو روش را نشان می‌دهد. نحوه محاسبه‌ی خطای RSME به‌صورت زیر می‌باشد.

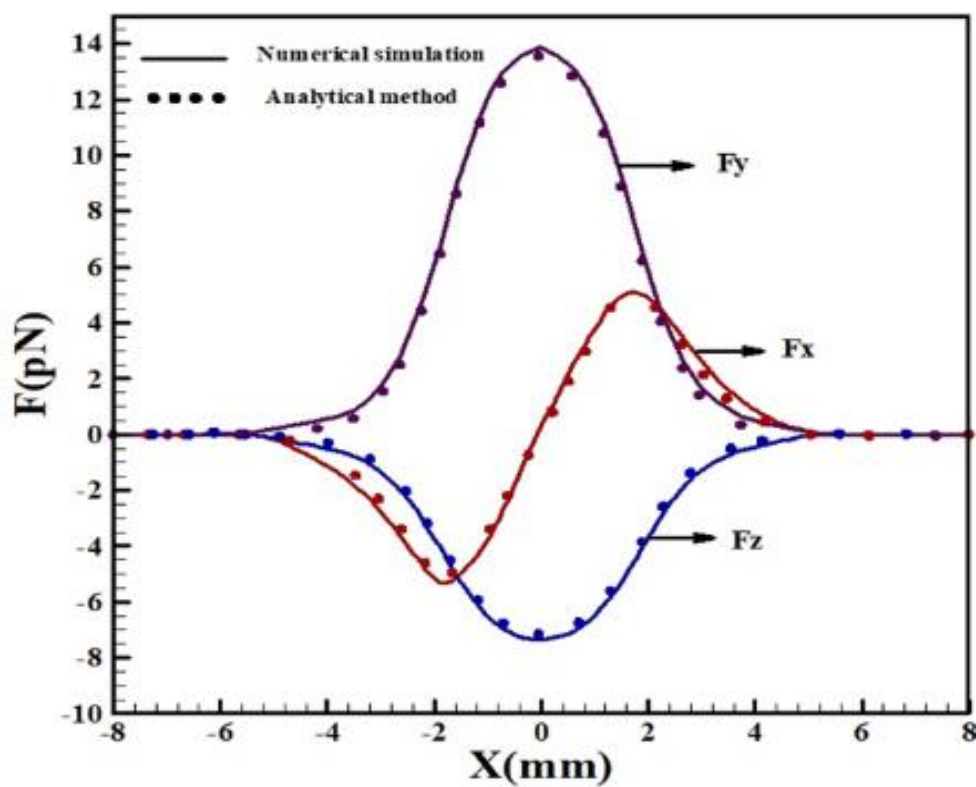
$$RSME = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_i - O_i)^2} \quad (4-6)$$

که Q مقادیر نتایج تحلیلی و O مقادیر بدست آمده از شبیه سازی عددی و N هم تعداد مقادیر است.



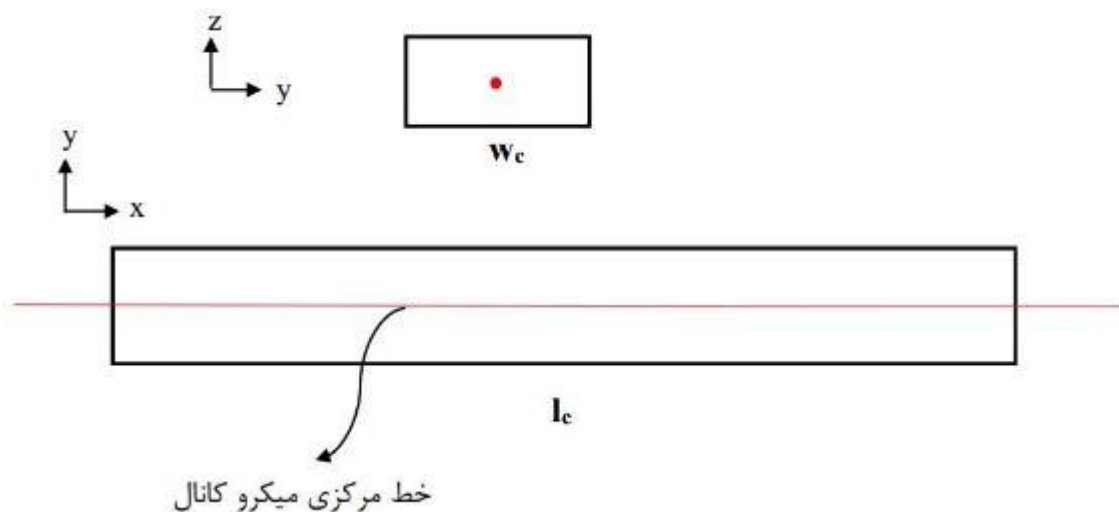
¹root-mean-square error

الف



ب

شکل ۴-۲ مقایسه میدان مغناطیسی و نیروی به دست آمده توسط روش‌های عددی و تحلیلی است. الف سه مؤلفه میدان مغناطیسی تولیدشده توسط آهنربای دائمی در امتداد خط مرکزی میکرو کانال. ب سه مؤلفه نیروی مغناطیسی وارد بر ذرات غیر مغناطیسی در امتداد خط مرکزی میکرو کانال.



شکل ۳-۴ نمایش خط مرکزی میکروکانال در دو سطح XY و YZ.

۳-۴- هندسه‌های مختلف آهنربا و نحوه قرار گرفتن آن‌ها نسبت به کانال

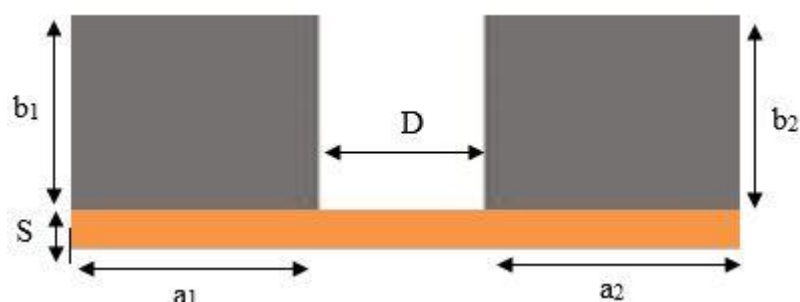
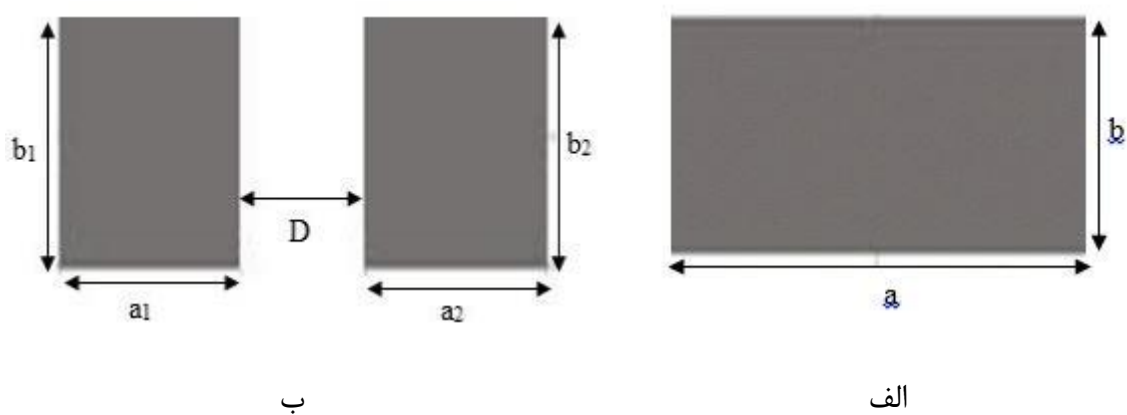
در مقایسه با مختصات و ابعاد سیستم در شکل ۴-۱، باید چندین تفاوت را ذکر کرد:

۱- یک میکروکانال T شکل دوبعدی با دو ورودی برای پمپاژ جریان مایع و ذرات به کانال استفاده می‌شود. ورودی A برای فروسیال EMG 408 حاوی ذرات پلی‌استایرن و ورودی B برای مایع بافر است. سرعت در هر یک از ورودی‌های A و B، ۱۱ میلی‌متر بر ثانیه می‌باشد؛ به دلیل اینکه هر چقدر سرعت جریان کم می‌شود نیروی پسای هیدرودینامیک کم شده در نتیجه ذرات از کانال خارج نمی‌شوند.

۲- با توجه به شکل ۴-۲ ب می‌توان دید که نیروهای مغناطیسی بر روی ذرات درحالی که مقدار محور x بزرگ‌تر از ۵ میلی‌متر است می‌توانند نادیده گرفته شوند و در نتیجه، طول بخش راست کانال به اندازه ۱۰ میلی‌متر در شبیه‌سازی تنظیم می‌شود.

۳- در قسمت خروجی میکروکانال دو منیفولد خروجی در نظر می‌گیریم به اینصورت که از خط مرکزی میکروکانال به بالا را خروجی بالا (یا خروجی ۱) و از خط مرکزی میکروکانال به پایین را خروجی پایین (یا خروجی ۲) در نظر می‌گیریم.

۴-سه مدل آهنربای استفاده شده در این شبیه‌سازی به صورت زیر می‌باشد شکل ۴-۴.



ج

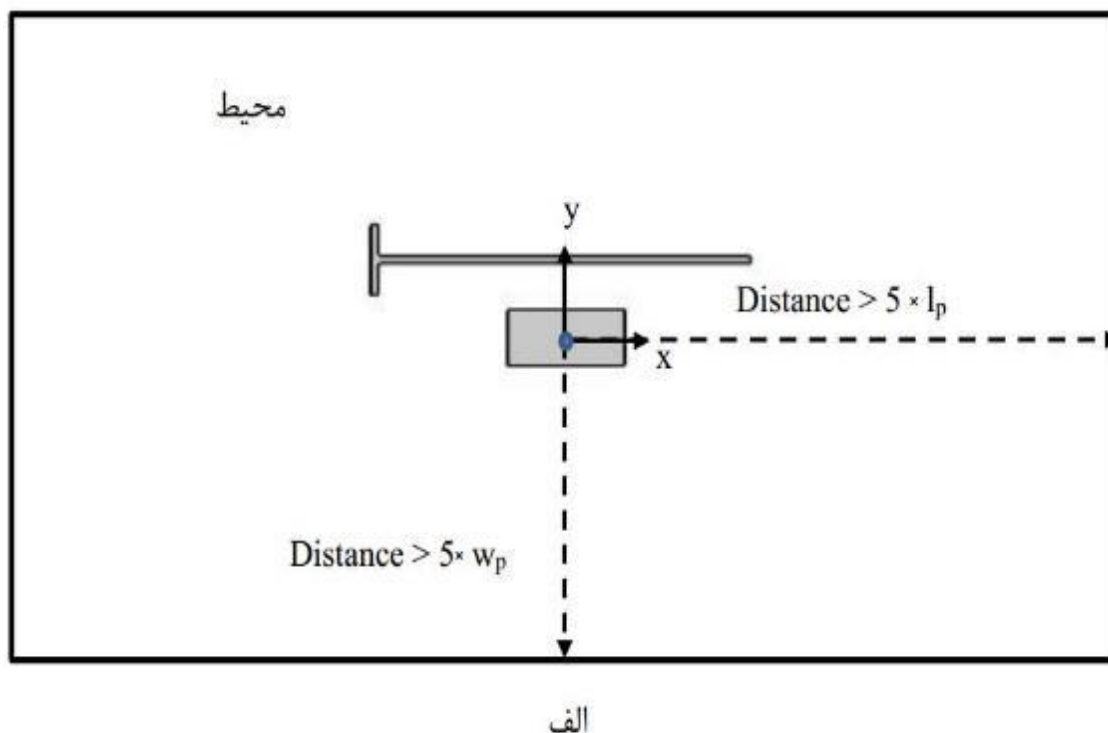
شکل ۴-۴ سه مدل آهنربای مغناطیسی دائمی. الف آهنربای مدل اول. ب آهنربای مدل دوم. ج آهنربای مدل سوم

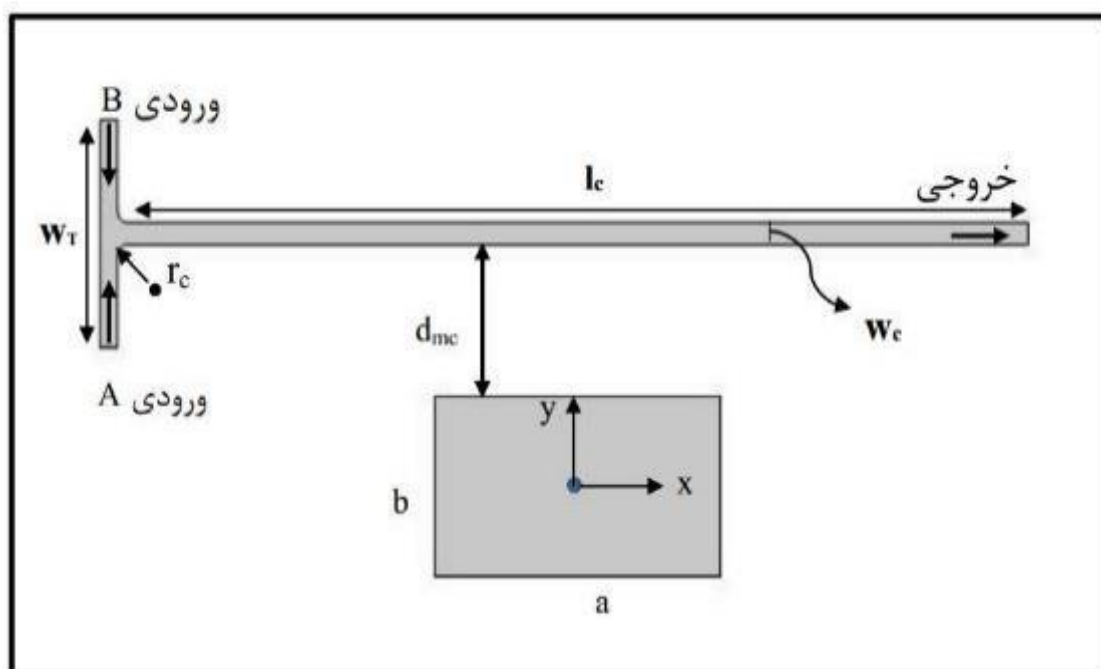
جدول ۲-۴ پارامترهای هندسی سه مدل آهنربا

شماره	عنوان	نماد	توصیف	مقدار
۱	مدل اول (Model 1 یا M1)	a	طول آهنربا	3176 μm
		b	عرض آهنربا	1588 μm
۲	مدل دوم (Model 2 یا M2)	$a_1 = a_2$	طول دو آهنربا	2200 μm
		$b_1 = b_2$	عرض دو آهنربا	1146 μm
		D	فاصله بین دو آهنربا	800 μm

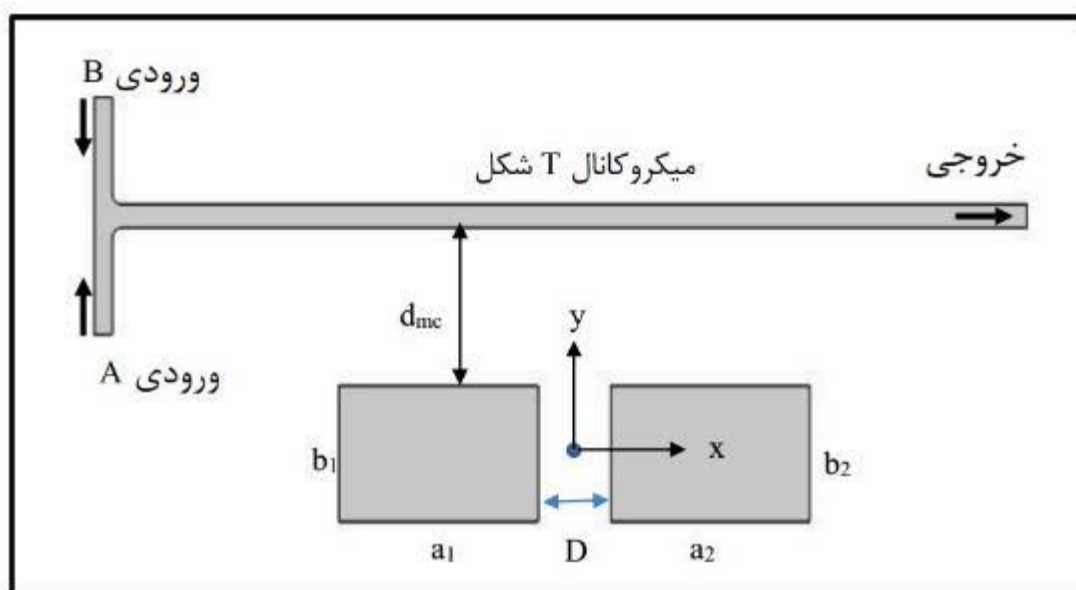
2200 μm	طول دو آهنربا	$a_1 = a_2$	مدل سوم یا Model 2 + Ni (M2+Ni)	۳
1146 μm	عرض دو آهنربا	$b_1 = b_2$		
800 μm	فاصله بین دو آهنربا	D		
100 μm	ضخامت لایه نیکل	S		

با توجه به آنچه تاکنون گفته شده است شکل ۴-۵ شماتیک سیستم‌های آهنربا - میکروکانال مورد استفاده در این مطالعه برای تجزیه و تحلیل مسیر ذرات را نشان می‌دهد. پارامترهای اصلی فیزیکی و هندسی مورد استفاده در شبیه‌سازی در جدول ۴-۱ و جدول ۴-۲ خلاصه شده است. همان‌طور که شکل ۴-۵ الف را مشاهده می‌کنید؛ سیستم میکروکانال - آهنربا همان مدل لتائو لیانگ [۵۳] اما به صورت دوبعدی است. ابعاد میکروکانال‌ها در سه مدل ثابت است و فقط ساختار آهنرباها تغییر می‌کند.

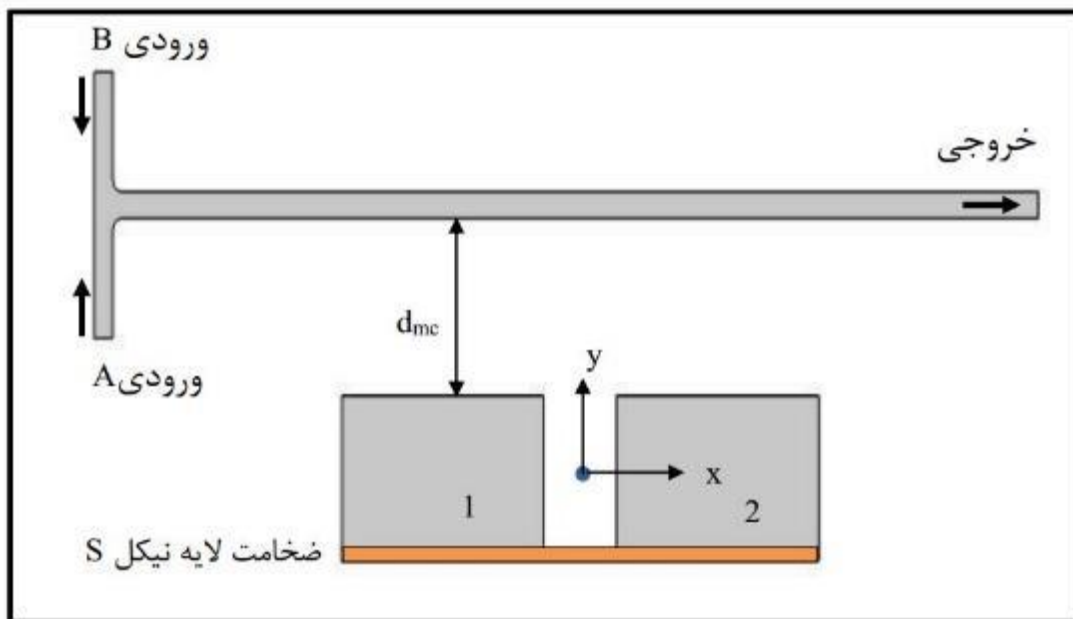




ب



ج



د

شکل ۴-۵ شماتیکی از میکروکانال و آهنرباها. الف شماتیکی از فاصله محیط اطراف از مرکز. ب میکروکانال و آهنربای مدل اول. ج میکروکانال و آهنربای مدل دوم. د میکروکانال و آهنربای مدل سوم.

۴-۴- استقلال نتایج از تعداد شبکه محاسباتی

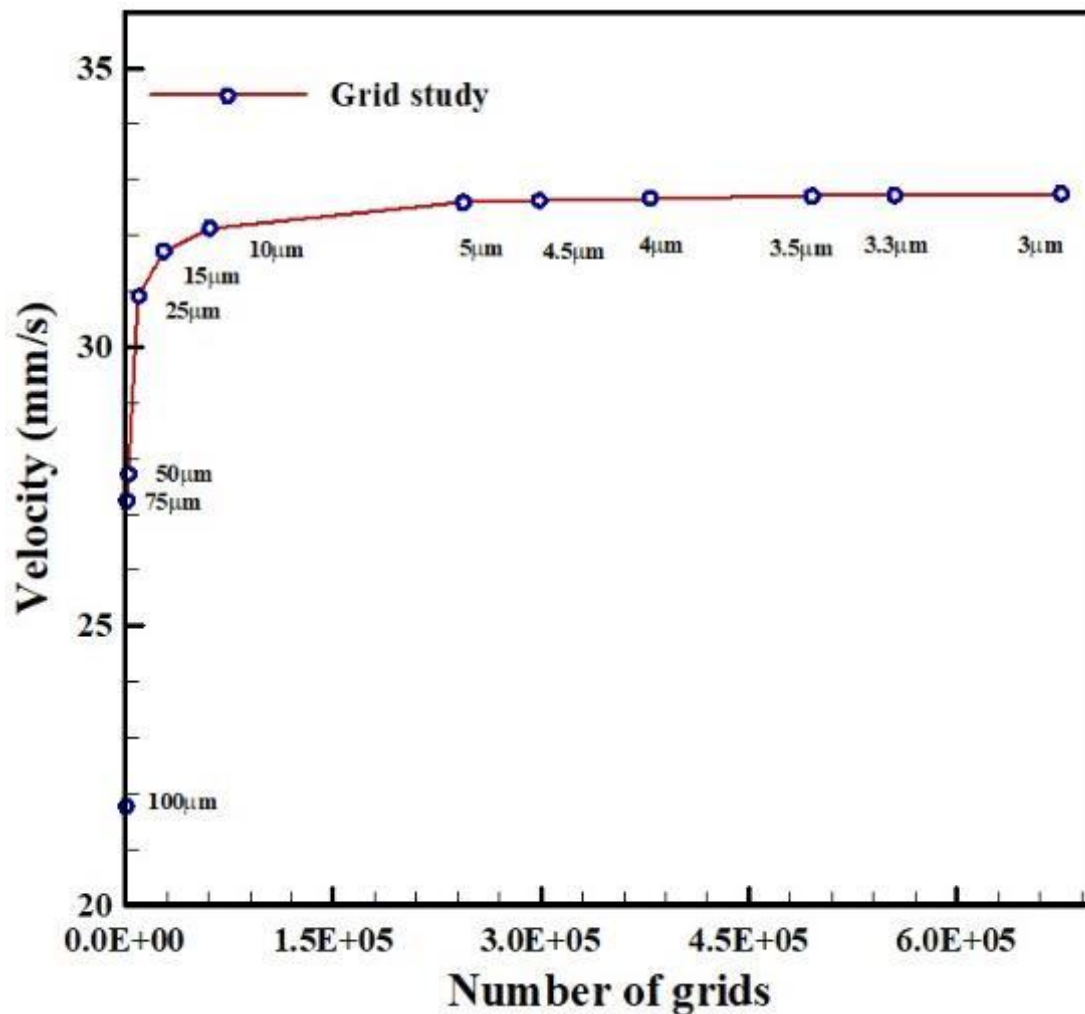
روش‌های عددی بر مبنای گسسته سازی فضایی میدان حل توسعه یافته است. این بدین مفهوم است که بجای بررسی و تحلیل یک فضای پیوسته که شامل بی‌نهایت نقطه است، ترجیح داده می‌شود تا با تنها تعدادی از آن نقاط به‌عنوان نماینده آن فضا طرف شد و معادلات حاکم را برای آن‌ها حل نمود. این مهم یکی از موارد ضروری برای هرگونه تحلیل عددی با استفاده از روش‌های مرسوم از قبیل المان محدود و یا حجم محدود بوده است.

در منطق روش حجم محدود که روش اصلی گسسته سازی معادلات حاکم بر دینامیک سیال هست (از قبیل بقای جرم، بقای مومنتوم خطی و زاویه‌ای، بقای انرژی و ...)، بر روی هرکدام از حجم کنترل‌هایی که در اثر تولید شبکه به وجود می‌آید، انتگرال‌گیری انجام شده و معادلات دیفرانسیل حاکم تبدیل به دستگاه معادلات جبری خواهند شد. به همین دلیل تولید شبکه مناسب (چه از نظر کمیت و چه کیفیت) یکی از اولین اقدامات برای انجام تحلیل عددی صحیح هست.

در فرآیند تولید شبکه، هندسه موردبررسی (فضای پیوسته) تبدیل به المان‌هایی با اشکال متنوع می‌شود (فضای گسسته) که حل معادلات عملاً بر روی این المان‌ها انجام می‌گیرد.

ازجمله اقدامات انجام پروژه‌های دینامیک سیالات محاسباتی در رشته مکانیک و سایر رشته‌های مهندسی بررسی استقلال از شبکه است که بایستی برای هرگونه کد یا شبیه‌سازی عددی بررسی شود. استقلال از شبکه به بیان ساده عبارت است از بررسی تعداد شبکه دامنه حل و نمایش عدم وابستگی نتایج به این شبکه است. به عبارتی بایستی برای دامنه حل با تعداد شبکه‌های مختلف حل عددی صورت گیرد و نشان داده شود که این حل برای تمام شبکه‌ها جوابی یکسان و نزدیک دارد و حل موردنظر به تعداد شبکه وابستگی ندارد.

در این پژوهش به دلیل دو بعدی بودن از مش بی‌سازمان برای شبکه بندی ناحیه حل استفاده شده است. مش بی‌سازمان این اجازه را می‌دهد تا اثر مرزهای دارای انحنا به خوبی در نظر گرفته شود. از آنجا که بیشتر نتایج ارائه شده در این تحقیق روی میکروکانال گزارش شده است بنابراین با ریز کردن در این ناحیه تلاش شد تا دقت نتایج گزارش شده افزایش یابد.

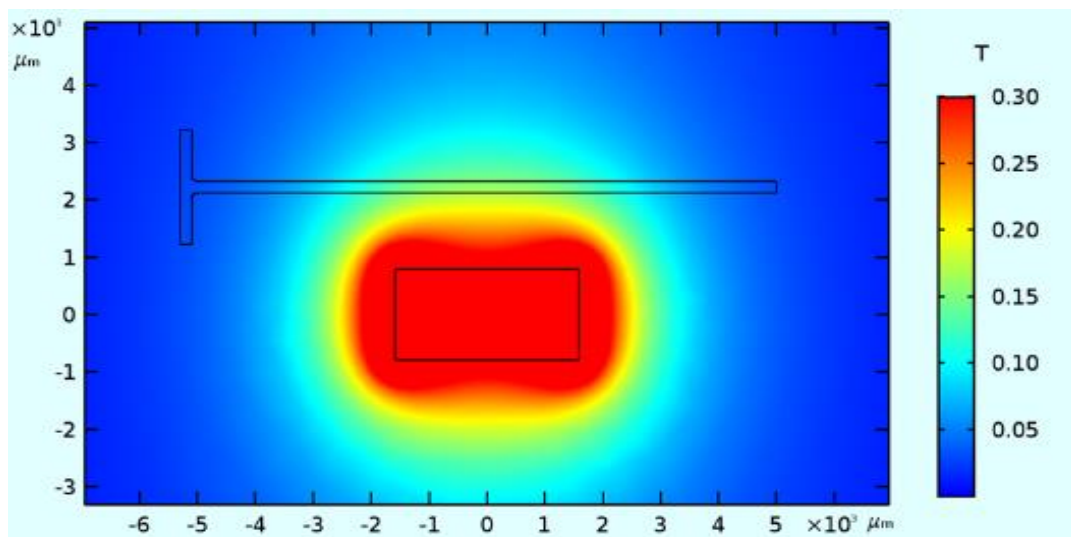


شکل ۴-۶ تجزیه و تحلیل استقلال شبکه به ازای سرعت کل ورودی ثابت و برابر ۲۲ میلی متر بر ثانیه نشان داده شده است.

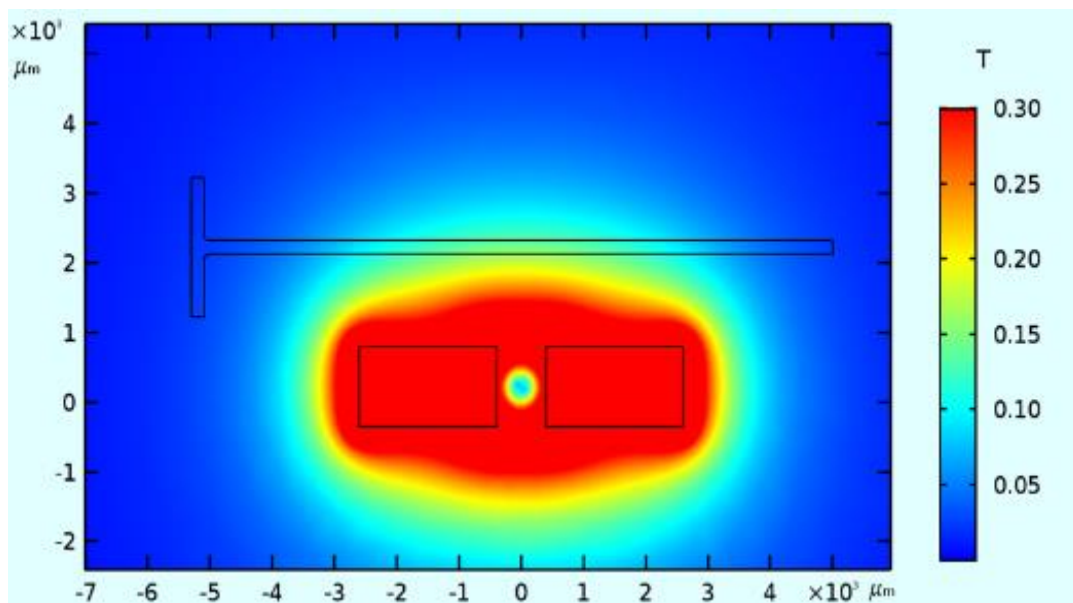
با بررسی متغیر سرعت جریان سیال (u_y) در یک نقطه ($x=0$, $y=2224 \mu m$) از مرکز کانال، وضعیت استقلال از شبکه انجام شده است. مشاهده می شود که با افزایش تعداد شبکه، سرعت جریان سیال با دقت بهتری به دست می آید. با توجه به شکل ۴-۶ سرعت سیال به ازای تعداد شبکه رسم شده است که هر چه اندازه المان های شبکه کوچک تر شود تأثیر کمی بر نتیجه عددی دارد بنابراین در صورت استفاده از اندازه المان ۴ میکرومتر و ۳۷۸۸۳۸ المان مثلی بی سازمان، ضمن آنکه کمترین حجم محاسبات رایانه ای را خواهیم داشت، بلکه در کنار این مزیت، نتایج بدست آمده از محاسبات عددی نیز مستقل از شبکه بندی ناحیه حل خواهد بود.

۴-۵- بررسی میدان مغناطیسی و نیروی مغناطیسی

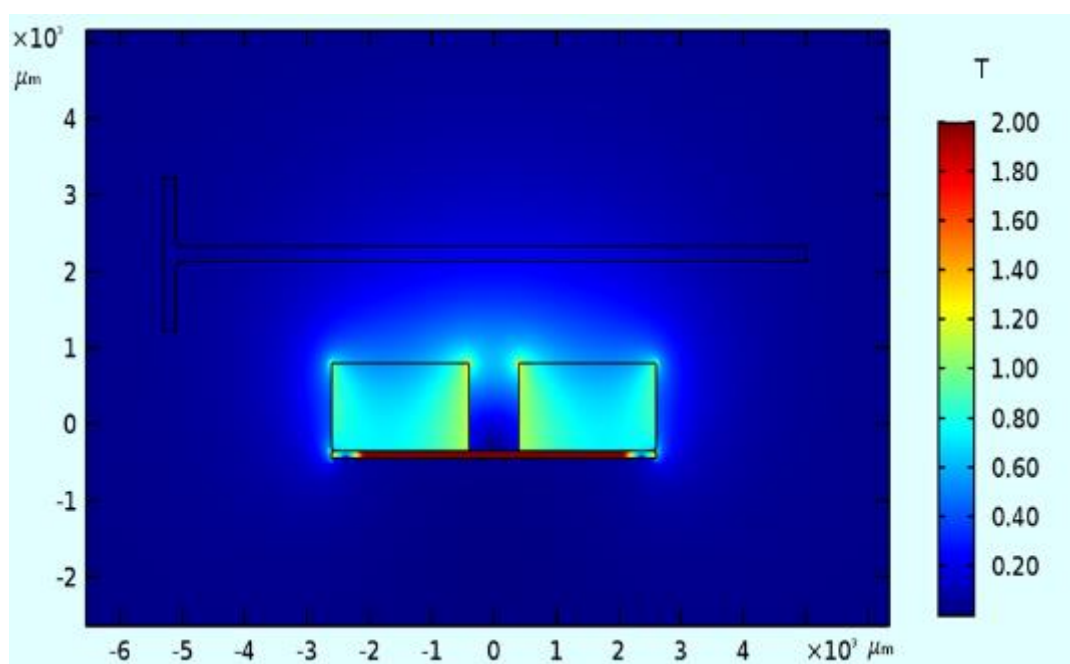
در اینجا به بررسی این موضوع پرداخته می‌شود که آیا هندسه‌های مختلف آهنرباها می‌توانند میدان‌های متفاوت و به تبع آن نیروهای مختلفی در کانال ایجاد کرده و در بالا بردن بازدهی جداسازی مؤثر باشند یا نه؟ که این امر با استفاده از شبیه‌سازی‌های انجام شده در این بخش مورد بررسی قرار گرفته است. در این بخش ابتدا توزیع میدان مغناطیسی در سه ناحیه آهنربا، میکرو کانال و هوای اطراف مورد بررسی قرار گرفت. فاصله بین آهنرباها و لبه کانال ثابت و برابر ۱,۳۳ میلی‌متر، چگالی شار باقیمانده در آهنرباها ۱,۳۲ تسلا و مرزهای محیط عایق مغناطیسی است.



الف



ب.



ج

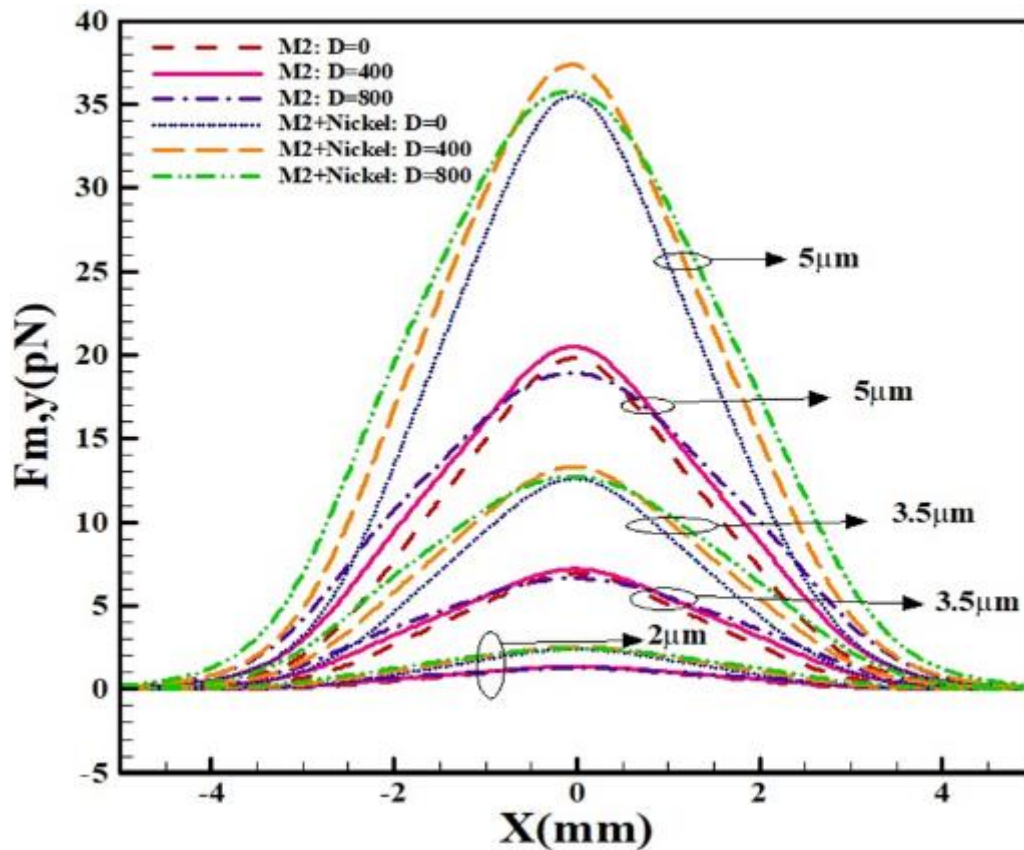
شکل ۴-۷ توزیع چگالی شار میدان مغناطیسی در کانال. چگالی شار باقیمانده در آهنرباها ۱,۳۲ تسلا و همچنین فاصله بین میکرو کانال و آهنربا ثابت و برابر ۱,۳۳ میلی متر است. الف مدل اول. ب مدل دوم. ج مدل سوم.

در مدل دوم، آهنربای مدل اول را با همان خصوصیات مغناطیسی و مساحت به دو آهنربا با طول و عرض یکسان تقسیم و در فاصله معینی (D) قرار داده شده‌اند. آهنرباهای مدل سوم همان آهنرباهای مدل دوم است با این تفاوت که آهنرباها با آلیاژ نیکل به ضخامت ۱۰۰ میکرومتر لایه نشانی شده‌اند. چگونگی تعیین اندازه‌های هندسی ($a_1=a_2=2200$ و $D=800$ میکرومتر) مناسب آهنرباها که نمودارهای چگالی شار مغناطیسی با توجه به آنها بدست آمده است در بخش بعدی مورد بررسی قرار گرفته می‌شود. همان‌طور که در شکل ۷-۴ نشان داده شده است هرچقدر از آهنربا دور شویم چگالی شار میدان مغناطیسی (B) کاهش می‌یابد تا جایی که به صفر می‌رسد. توزیع چگالی شار مغناطیسی در میکروکانال‌های شکل ۷-۴ به ترتیب، ۰،۱۳ - ۰،۱۶، ۰،۱۴ - ۰،۱۹ و ۰،۲ - ۰،۴ تسلا است که در مدل سوم چگالی شار تقریباً دو برابر می‌شود.

۴-۵-۱- فاصله بین آهنرباها

موضوعی که در این بخش بدان پرداخته خواهد شد؛ چگونگی تعیین اندازه‌های طول، عرض و فاصله بین آهنرباها برای مدل دوم و مدل سوم است. هدف تعیین اندازه‌ی هندسی مناسب آهنرباها برای تولید شدت میدان مغناطیسی بالاتر که بیشترین تأثیر را بر میکرو ذرات بگذارد به شرط اینکه طول و عرض آهنربا طوری تغییر کند که مجموع مساحت آهنرباها در مدل دوم و سوم با مساحت آهنربا در مدل اول برابر باشد و همچنین در هر سه مدل فاصله آهنربا و کانال ثابت است. برای تعیین اندازه‌های بهینه سه پارامتر طول ($a_1=a_2$)، فاصله بین آهنرباها و نیروی مغناطیسی F_{my} را در نظر می‌گیریم به ازای طول و فاصله‌های مختلف آهنرباها توزیع میدان مغناطیسی متفاوتی حاصل می‌شود که باعث نیروی مغناطیسی F_{my} متفاوت روی ذرات می‌شود. حال مقدار مساحت زیر نمودار نیروی مغناطیسی را محاسبه کرده که با دو پارامتر دیگر طول و فاصله تشکیل یک رویه را می‌دهند در نتیجه مقدار ماکزیمم این رویه مقدار بهینه طول و فاصله آهنرباها می‌باشد که مقدار آنها به ترتیب ۲۲۰۰ و ۸۰۰ میکرومتر می‌شود. در همه این حالات فاصله آهنربا تا کانال ثابت و برابر ۱۳۳۰ میکرومتر است. شکل ۸-۴ به ازای طول

ثابت آهنرباها ($a_1=a_2= 2200 \mu\text{m}$) رسم شده است که نیروی مغناطیسی وارد بر ذرات ۲، ۳،۵ و ۵ میکرومتر را برای فاصله‌های مختلف نشان می‌دهد.

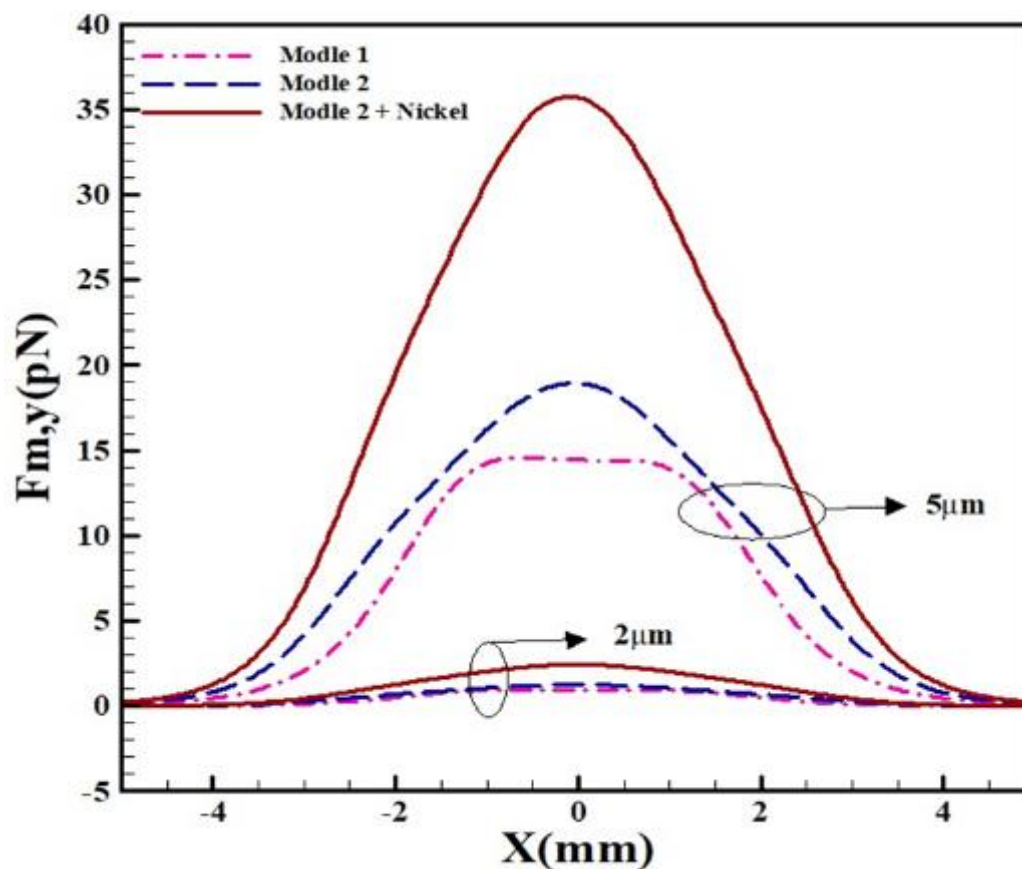


شکل ۴-۸ نیروی مغناطیسی F_y وارد بر ذرات در حال حرکت در جهت x به ازای فاصله‌های مختلف بین آهنرباها. در همه حالت‌ها فاصله آهنربا تا کانال ثابت و برابر ۱۳۳۰ میکرومتر است.

۴-۵-۲- نیروی مغناطیسی

توزیع نیروی مغناطیسی مؤلفه $F_{m,y}$ ، بر روی ذرات غیرمغناطیسی ۲ و ۵ میکرومتر در امتداد خط مرکزی کانال در شکل ۴-۹ نشان داده شده است. برای بدست آوردن نیروی مغناطیسی، فاصله آهنرباها و طول آنها در مدل دوم و سوم به ترتیب ۸۰۰ و ۲۲۰۰ میکرومتر است. نیروی مغناطیسی وقتی که ذرات به مرکز آهنربا (یعنی $x=0$) نزدیک می‌شوند به شدت زیاد می‌شود. مدل دوم در مقایسه با مدل اول به دلیل تغییر در هندسه آهنربا توزیع میدان مغناطیسی تغییر خواهد کرد و همین امر سبب

افزایش نیرو می‌شود از همین استدلال می‌توان برای افزایش نیرو در مدل سوم در مقایسه با مدل‌های اول و دوم استفاده کرد. همانطوری که در شکل ۴-۹ نشان داده شده است با اضافه کردن لایه‌ای از آلیاژ نیکل به آهنربا که نفوذپذیری مغناطیسی نسبی آن ۶۰۰ می‌باشد نیروی مغناطیسی تقریباً دو برابر شده یعنی ۵۰ درصد نیرو افزایش پیدا کرده است. نتیجه نهایی این نیروها دفع شدن ذرات به دورترین نقطه از مرکز آهنربا است.

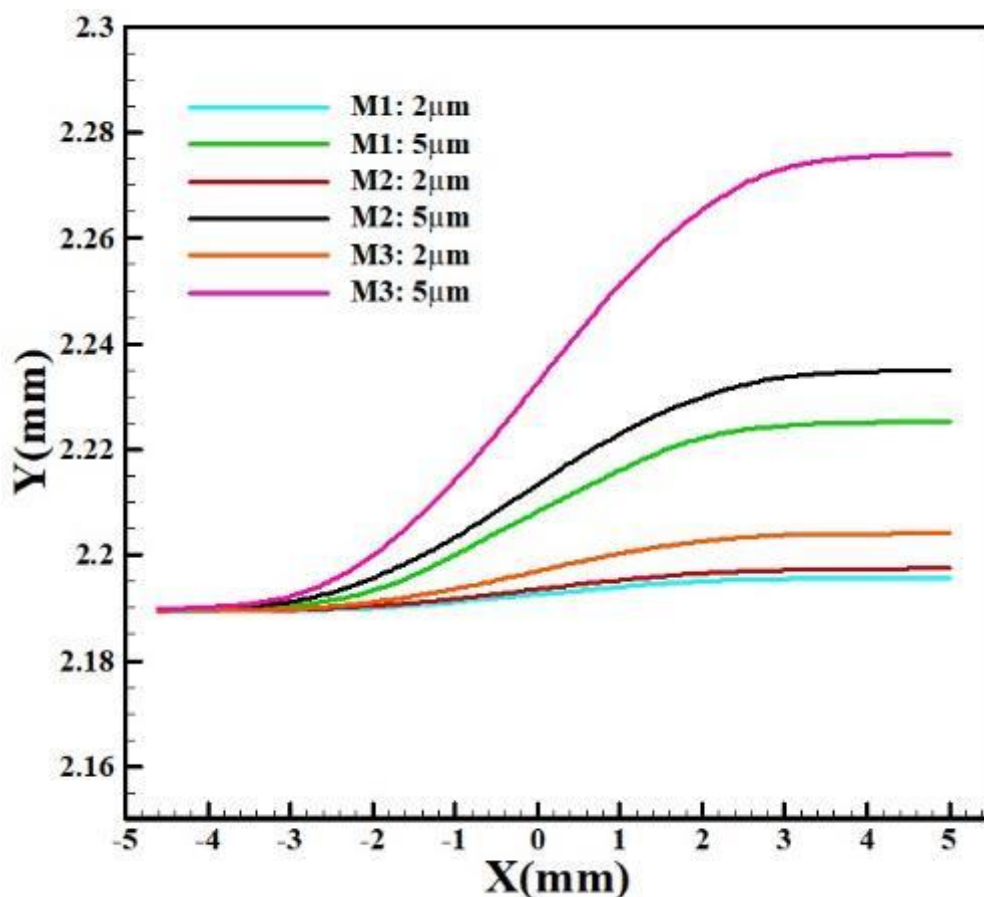


شکل ۴-۹ نیروی مغناطیسی F_y وارد بر ذرات در سه مدل شبیه‌سازی. فاصله آهنرباها تا کانال ثابت و برابر ۱۳۳۰ میکرومتر، نفوذپذیری مغناطیسی نسبی ذرات ۰٫۹۸ و سرعت هر یک از ورودی‌ها ۱۱ mm/s است.

۴-۶- رفتار جداسازی و مسیر ذرات با سایزهای مختلف

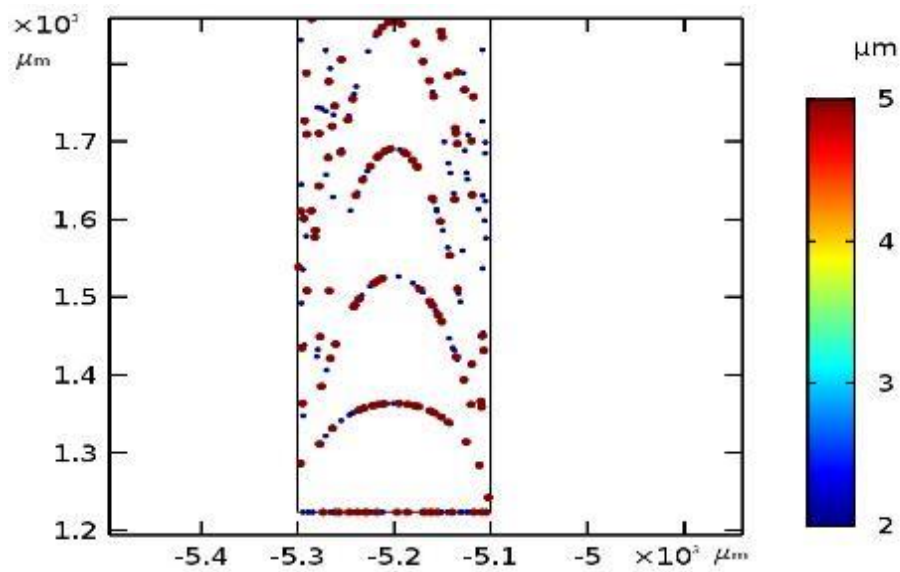
در این بخش، شبیه‌سازی‌ها با اندازه‌های مختلف (۰,۲-۷) میکرو ذرات پلی‌استایرن انجام شد تا مسیرهای ذرات را در دستگاه‌های میکروسیال مشاهده کنند. میزان انحراف ذرات به تعادل بین نیروی مغناطیسی و نیروی پسای هیدرودینامیکی بستگی دارد.

شکل ۴-۱۰ مسیرهای میکرو ذرات پلی‌استایرن را در میکروکانال برای سه مدل نشان می‌دهد. ذرات غیرمغناطیسی با اندازه‌ی ۲ و ۵ میکرومتر از آهنربا دور می‌شوند و از خروجی ۱ یا ۲ خارج می‌شوند. نتایج تمام این شبیه‌سازی‌ها با سرعت جریان ثابت و برابر ۱۱ میلی‌متر بر ثانیه در دو ورودی و فاصله بین آهنربا و میکروکانال ثابت و برابر ۱۳۳۰ میکرومتر به دست آمد.

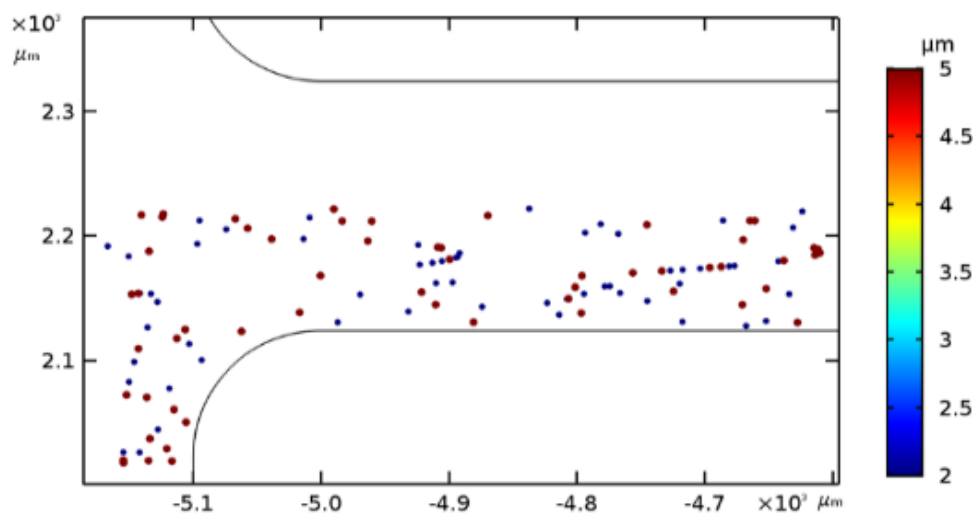


شکل ۴-۱۰ مسیر ذرات ۲ و ۵ میکرومتر در سه مدل . سرعت جریان ثابت و برابر ۱۱ میلی‌متر بر ثانیه در دو ورودی و فاصله بین آهنربا و میکروکانال ثابت و برابر ۱۳۳۰ میکرومتر است.

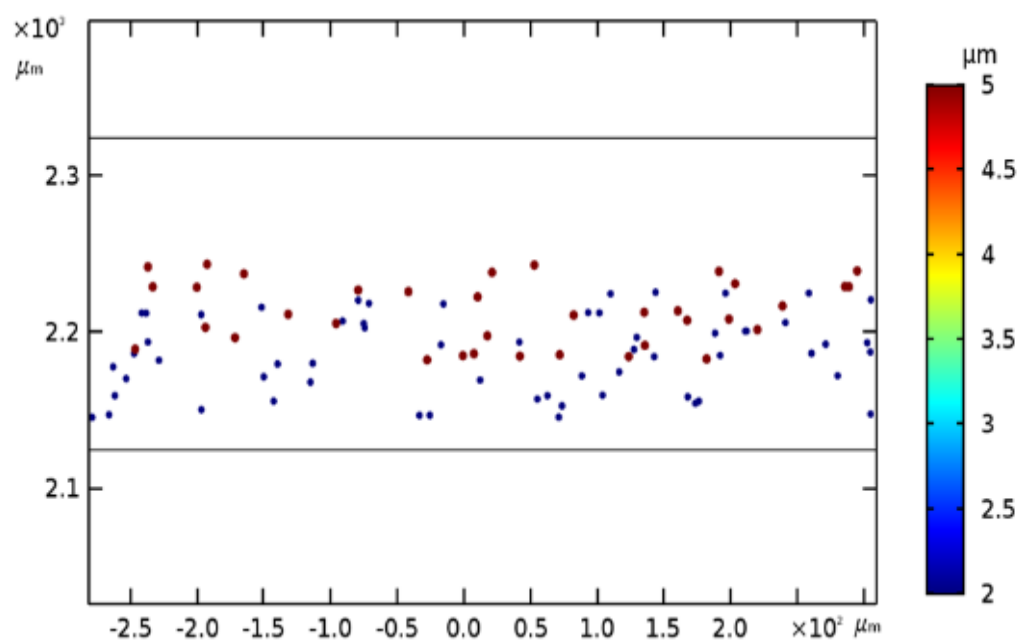
توزیع ذرات غیرمغناطیسی در ورودی A برای ۳۸ ذره ۲ و ۵ میکرومتر در شکل ۴-۱۱ الف نشان داده شده است که ذرات ۲ و ۵ میکرومتر با فاصله زمانی ۰,۰۱ ثانیه با هم وارد کانال می‌شوند. در قسمت خروجی دو منیفولد در نظر می‌گیریم که به سمت‌های بالا و پایین هستند می‌توان انحراف ذرات را تحت اثر نیروی مغناطیسی در طول کانال را در شکل ۴-۱۱ مشاهده کرد؛ شکل به ازای مدل دوم رسم شده است.



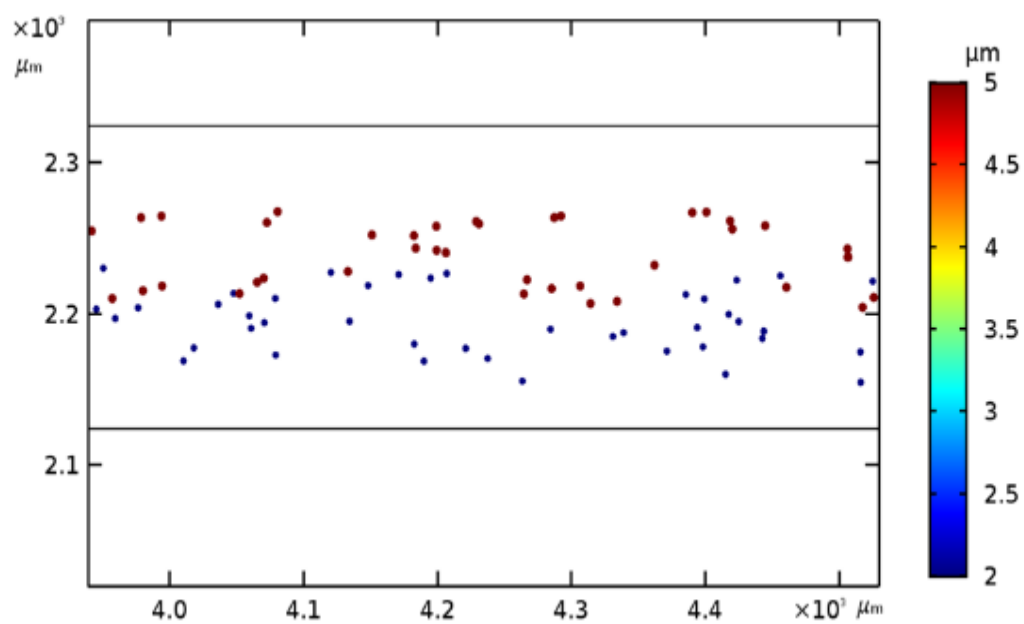
الف ($t=0.05$ s)



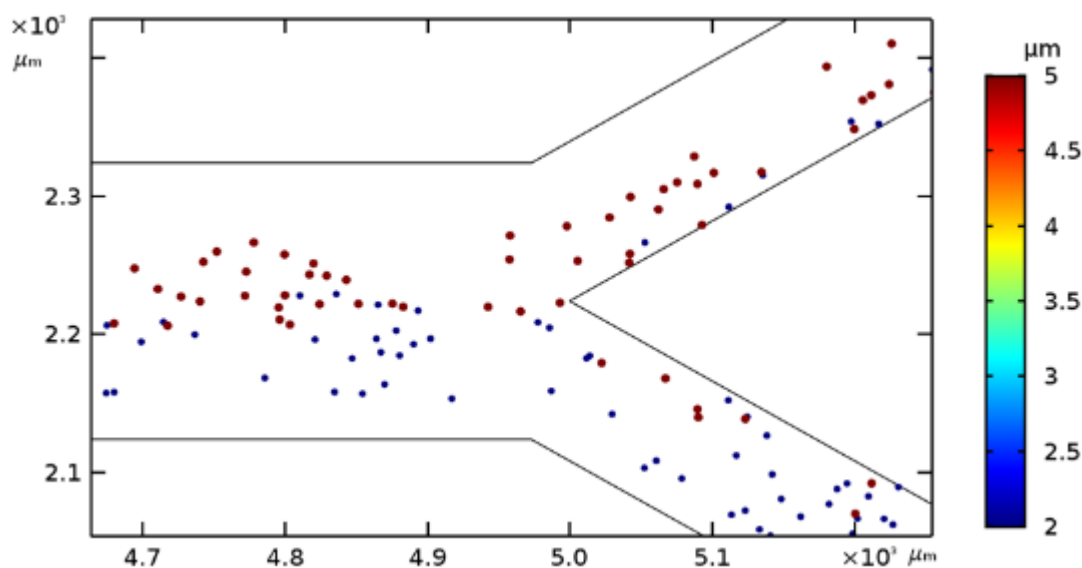
ب ($t=0.5$ s)



($t=1\text{s}$) $\mathcal{C}$



($t=2\text{s}$) $\mathcal{D}$

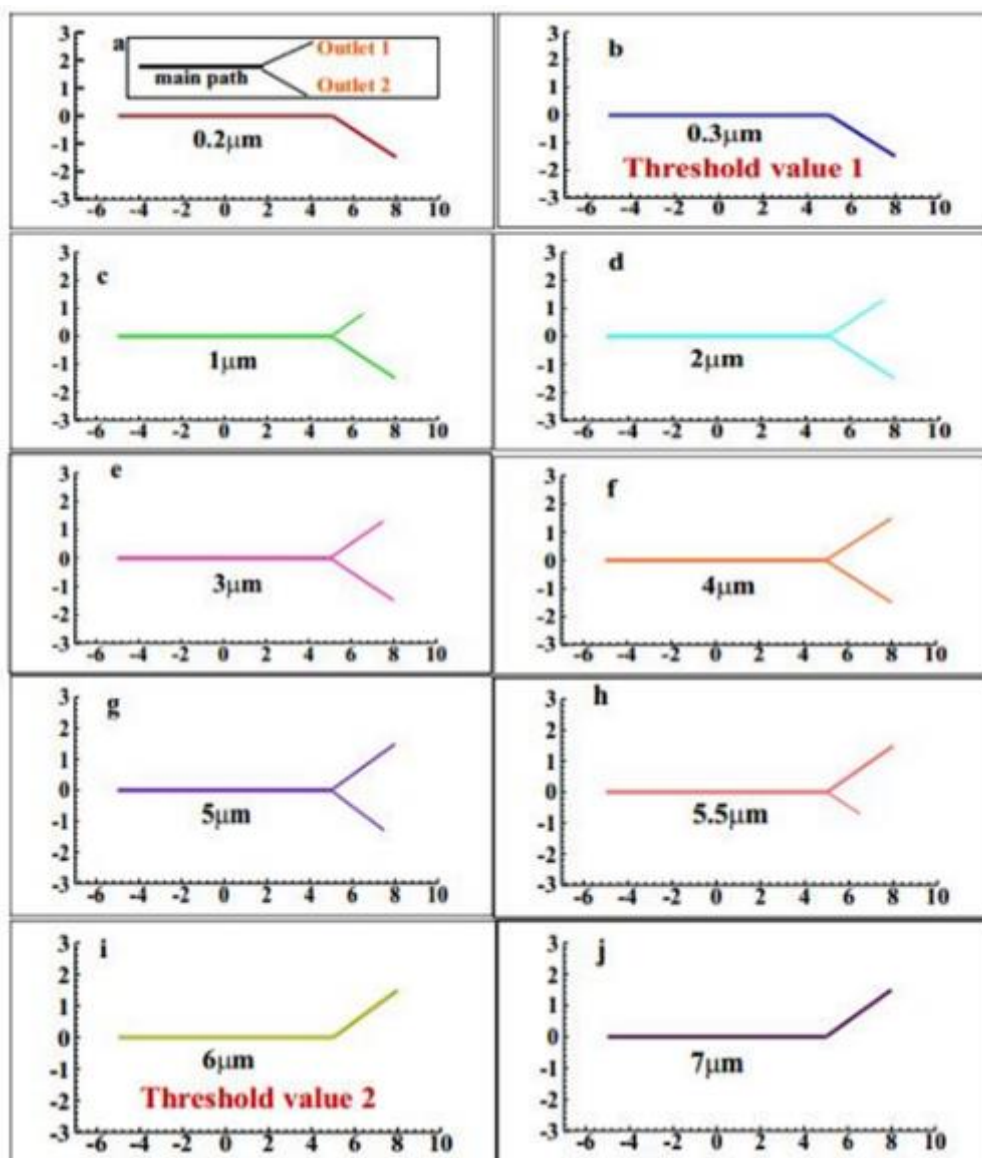


ح (t=5s)

شکل ۴-۱۱ مسیر ذرات در طول کانال مدل دوم. الف ناحیه ورودی A کانال که ذرات به صورت رندم وارد می شوند. ب قسمت برخورد دو جریان سیال و ورود به شاخه اصلی. ج مرکز شاخه اصلی. د ناحیه نزدیک به خروجی ها. ح ناحیه خروجی ذرات.

شکل ۴-۱۲ نتایج شبیه سازی های در مدل دوم را نشان می دهد که فاصله بین آهنربا و میکروکانال ۱,۳۳ میلی متر تنظیم شده است. همان طور که در این مسیرها نشان داده شده، انحرافات برای اندازه های مختلف ذرات از ۰,۲ تا ۷ میکرومتر متفاوت بودند.

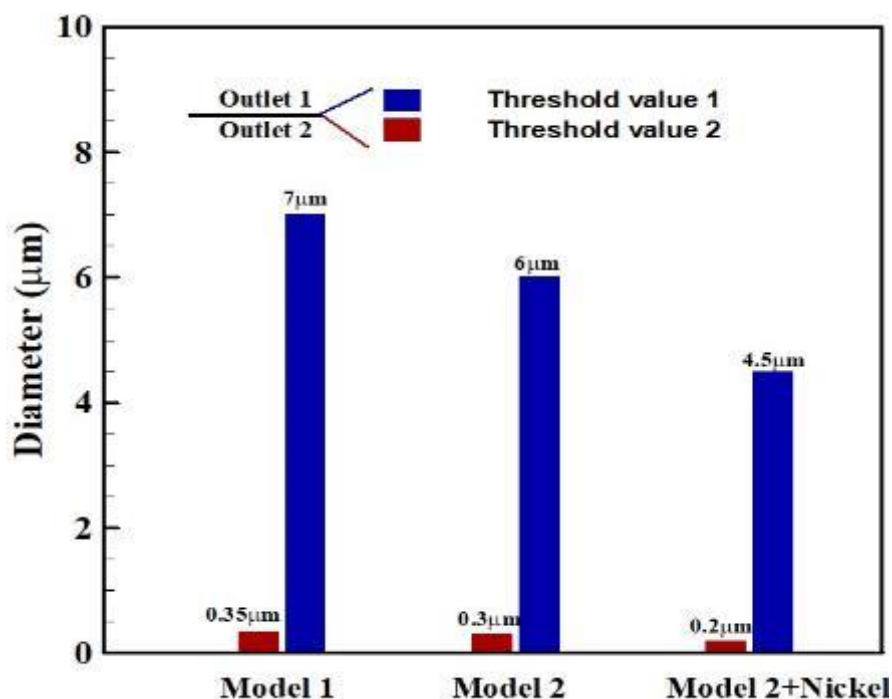
شکل ۴-۱۲ برای تجزیه و تحلیل مسیرهای ذرات به سه قسمت تقسیم می شود. شکل ۴-۱۲ قسمت a و b نشان می دهد تمام ذراتی که قطر آنها کمتر از ۰,۳ میکرومتر است، به خروجی ۲ جذب می شوند. علاوه بر این، نشان داده شده است ذراتی که قطر آنها بین ۱ تا ۵,۵ میکرومتر است از هر دو خروجی ۱ و ۲ خارج می شوند. در مقایسه شکل ۴-۱۲ قسمت c و d، با افزایش قطر ذرات، ذرات بیشتر در خروجی ۱ جریان دارند. گذشته از این، در شکل ۴-۱۲ قسمت i و j نشان داده شده که وقتی قطر ذرات بیشتر از ۶ میکرومتر است؛ خروجی ۱ تنها خروجی این میکروذرات می باشد. طرح توجیهی دستگاه در شکل ۴-۱۲ a نشان داده شده است. به عنوان یک نتیجه، در مدل دوم قطرهای ۶ و ۰,۳ میکرومتر دو آستانه از قطر ذرات برای خروجی های ۱ و ۲ در مرتب سازی ذرات است.



شکل ۴-۱۲ مسیرهای ذرات پلی‌استایرن در کانال میکروسیال با قطرهای مختلف از ۰٫۲ تا ۷ میکرومتر است. a و b خروجی ۱ تنها خروجی ذرات می‌باشد. از c تا h ذرات از هر دو خروجی خارج می‌شوند. i و j، خروجی ۲ تنها خروجی ذرات است. شماتیک فرضی کانال در شکل a نشان داده شده است.

برای هر مدل، دو سایز بحرانی (ترشهولد) از ذرات ارائه شده است که مجموعه ذرات کوچکتر از مقدار بحرانی اول از خروجی پایین میکروکانال و ذرات بزرگتر از مقدار بحرانی دوم از خروجی دیگر میکروکانال با بازدهی 100% جداسازی می‌شوند. شکل ۴-۱۲ نشان می‌دهد که دو مقدار ۰٫۳ و 6 میکرومتر به ترتیب مقدار بحرانی اول و دوم در مدل دوم می‌باشند که به این مقادیر بحرانی مقدار

آستانه قطر ذرات می‌گویند. در اینجا ما مفهوم آستانه‌ها را برای نشان دادن رابطه بین قطر ذرات و خروجی‌های کانال مربوطه معرفی کردیم. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی نشان‌دهنده آستانه قطر ذرات در مدل‌های مختلف آهنربا شکل ۴-۱۳ است.

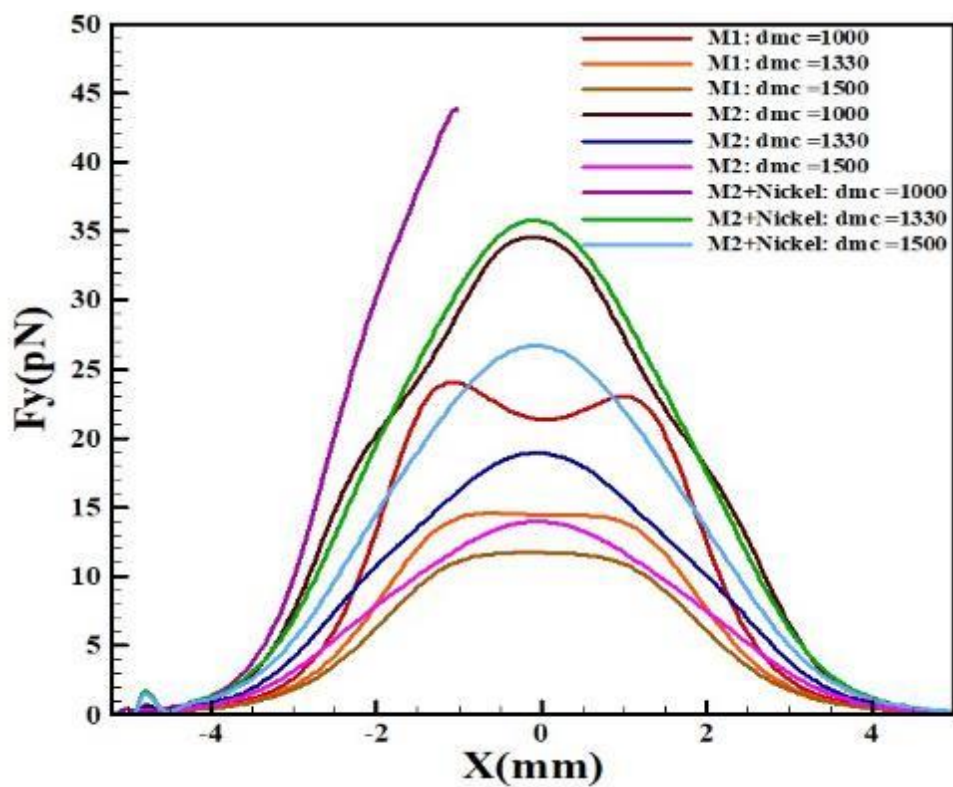


شکل ۴-۱۳ دو آستانه قطر ذرات در مدل‌های مختلف. فاصله بین آهنرباها و میکروکانال ثابت و برابر ۱۳۳۳ میکرومتر است. سرعت جریان در هر ورودی ثابت و برابر ۱۱ میلی‌متر بر ثانیه است.

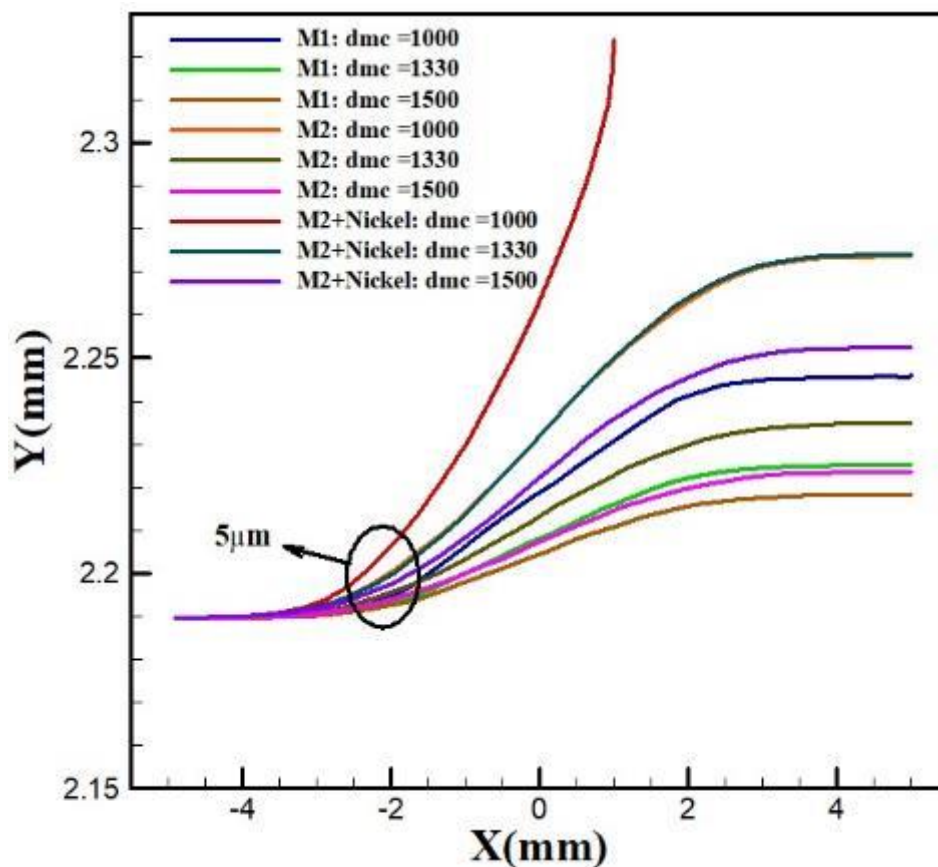
برای تعیین مقدار آستانه فاصله بین آهنربا و میکروکانال ثابت و برابر ۱۳۳۰ میکرومتر و همچنین سرعت جریان هر ورودی ۱۱ میلی‌متر بر ثانیه تنظیم شده است. با توجه به اینکه در مدل‌های ارائه شده قدرت میدان مغناطیسی متفاوت است؛ در نتیجه آستانه قطر ذرات برای مدل‌ها متفاوت می‌باشد. که مقدار آستانه قطر ذرات برای خروجی ۱ و ۲ در مدل‌های اول، دوم و سوم به ترتیب ۷، ۳۵، ۰، ۶، ۳، ۰ و ۴، ۵، ۰ به دست آمده است.

۷-۴- بررسی تاثیرات فاصله آهنربا تا دیواره میکروکانال

در این بخش تاثیرات فاصله بین آهنربا و میکروکانال (d_{mc}) بر بازده جداسازی و تعیین فاصله مناسب برای خارج شدن ذرات از میکروکانال مورد بررسی قرار می‌گیرد. سرعت جریان ورودی‌ها ۱۱ میلی‌متر بر ثانیه می‌باشد. نیروی مغناطیسی F_y وارد بر ذرات ۵ میکرومتر در موقعیت‌های مختلف آهنربا در شکل ۴-۱۴ الف نشان داده شده است.



الف

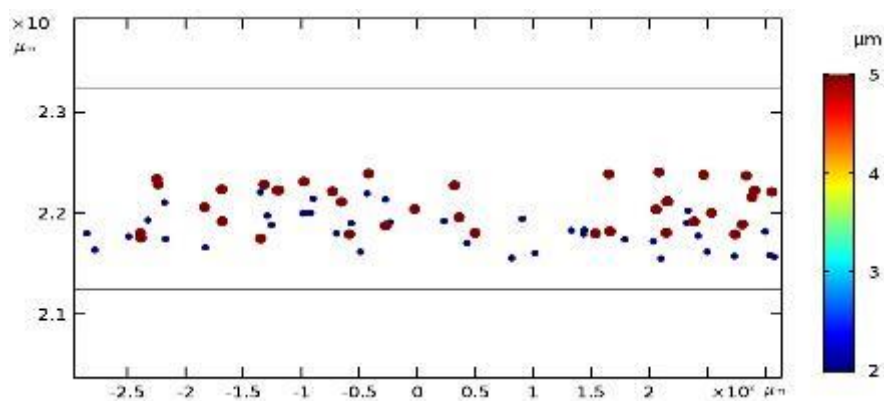


ب

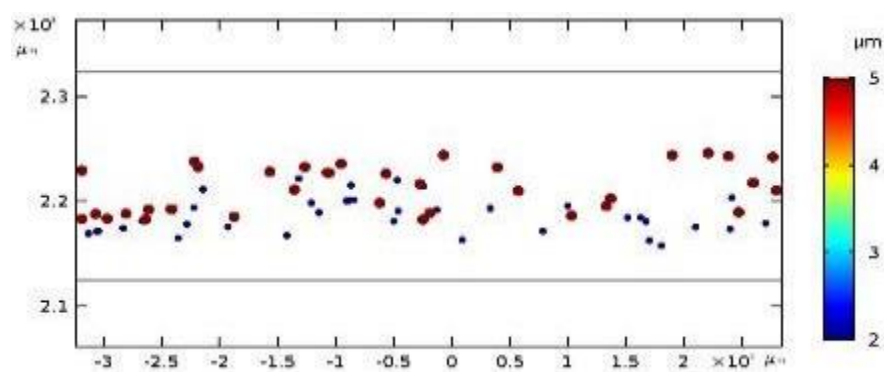
شکل ۴-۱۴ تاثیر فاصله آهنربا تا میکروکانال که نفوذپذیری مغناطیسی نسبی ذرات ۰٫۹۸ و سرعت هر یک از ورودی ها ۱۱ mm/s است. الف نیروی مغناطیسی وارد بر ذره ۵ میکرومتر. ب مسیر ذره برای سه مدل.

همانطور که مشاهده می کنید با نزدیک شدن آهنربا به میکروکانال قدرت میدان مغناطیسی افزایش می یابد در نتیجه نیروی وارد بر ذره زیاد می شود. شکل ۴-۱۴ ب مسیر ذره را در طول کانال نشان می دهد که وقتی فاصله بین آهنربا و میکروکانال از یه حدی کمتر باشد نیروی مغناطیسی افزایش می یابد در نتیجه مانع خارج شدن ذرات از خروجی می شود. نمودار رنگ قرمز در شکل ۴-۱۴ ب نشان می دهد که ذره به دیواره میکروکانال چسبیده و خارج نشده است.

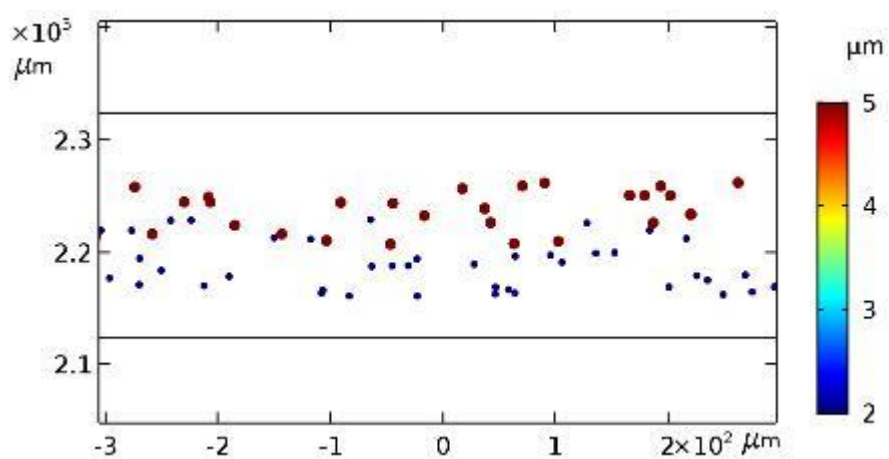
توزیع ذرات غیرمغناطیسی در قسمتی از میکروکانال که نیروی مغناطیسی ماکزیمم است؛ برای ذرات ۲ و ۵ میکرومتر در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است که ذرات ۲ و ۵ میکرومتر با فاصله زمانی ۰٫۰۱ ثانیه با هم وارد کانال می شوند. سرعت جریان در ورودی ها ۱۱ میلی متر بر ثانیه و فاصله آهنربا تا دیواره میکروکانال ۱۳۳۰ میکرومتر می باشد.



الف



ب



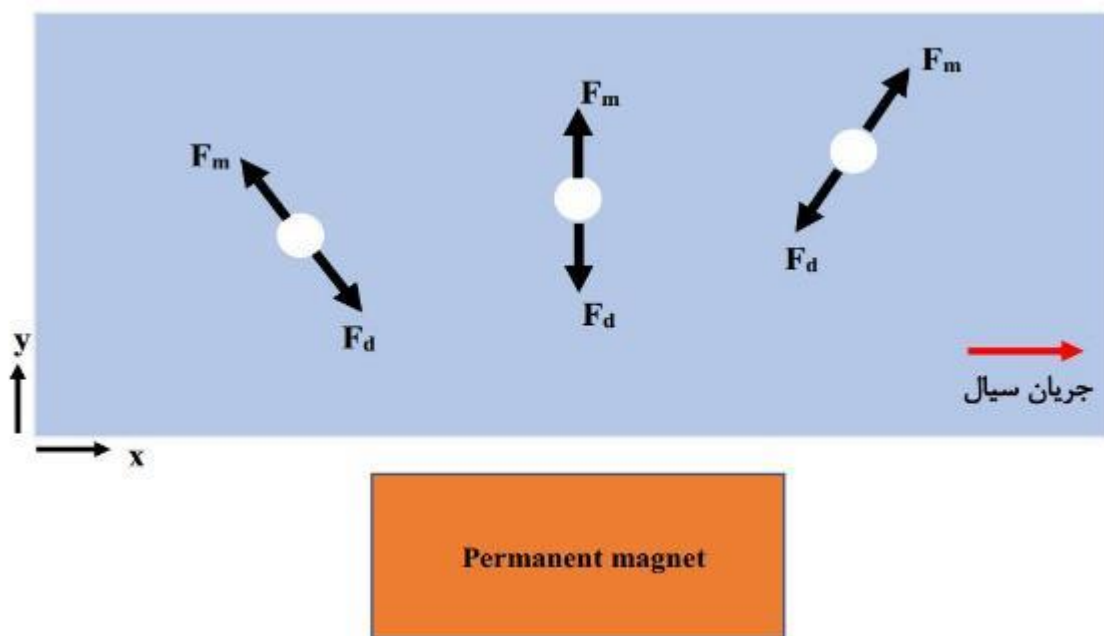
ج

شکل ۴-۱۵ مسیر ذرات غیرمغناطیسی ۲ و ۵ میکرومتر با سرعت جریان ورودی ۱۱ میلی‌متر بر ثانیه در قسمتی از کانال که نیروی مغناطیسی ماکزیمم است. الف مدل اول. ب مدل دوم. ج مدل سوم.

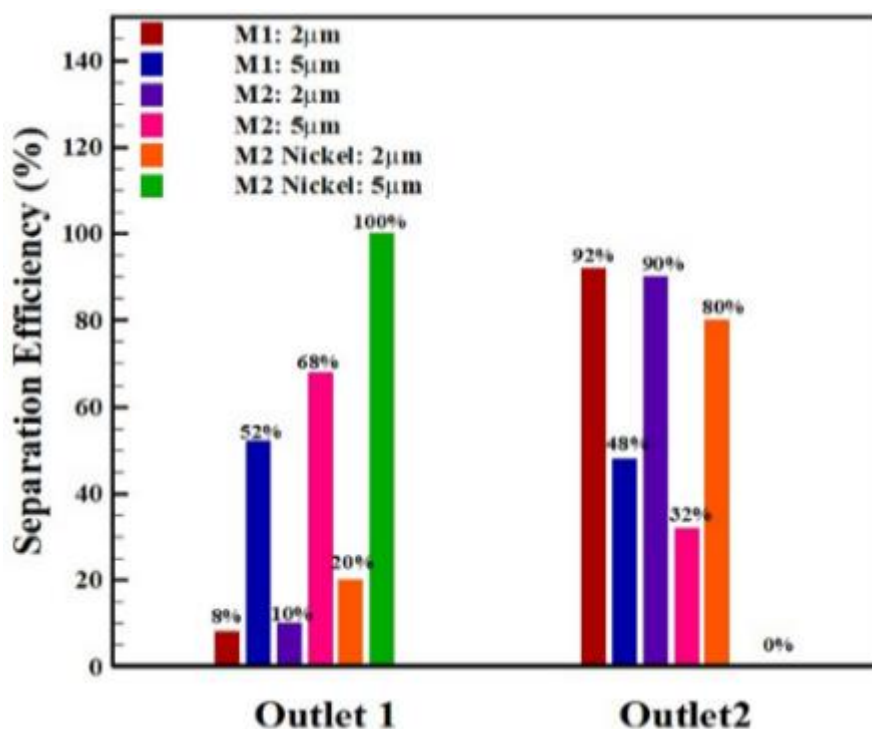
۸-۴- بازده جداسازی

عملکرد یک جداساز مغناطیسی توسط تعامل بین نیروها تعیین می‌شود که در این تحقیق نیروهای وارد بر ذرات شامل نیروی پسای هیدرودینامیک و نیروی مغناطیسی است که در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است. یک شرط ضروری برای جداسازی موفقیت‌آمیز مغناطیسی این است که نیروی مغناطیسی که بر ذرات وارد می‌شود باید بیشتر از مجموع نیروهای رقیب باشد. نیروی مغناطیسی غالب در جداکننده مغناطیسی است و از آنجا که این نیرو متناسب با قدرت میدان مغناطیسی است، اغلب ادعا می‌شود که با افزایش میدان مغناطیسی عملکرد جداکننده مغناطیسی بهبود می‌یابد. هدف اصلی این شبیه سازی تعیین شرایطی برای دستیابی به بالاترین بازده جداسازی مغناطیسی است. ذرات با قطرهای ۲ و ۵ میکرومتر بصورت رندم با تعداد ۳۸ ذره وارد شده است و همچنین سرعت جریان ورودی‌ها ۱۱ میلی‌متر بر ثانیه تنظیم شده است. بازده عبارتست از نسبت سلول‌های هدف در خروجی به سلول‌های هدف در نمونه اولیه و طبق تعریف داریم:

$$\text{Yield} = \frac{\text{Target cells (output)}}{\text{Target cells (input)}} \quad (4-6)$$



شکل ۴-۱۶ تجزیه و تحلیل نیرو وارد بر یک ذره در میکروکانال .



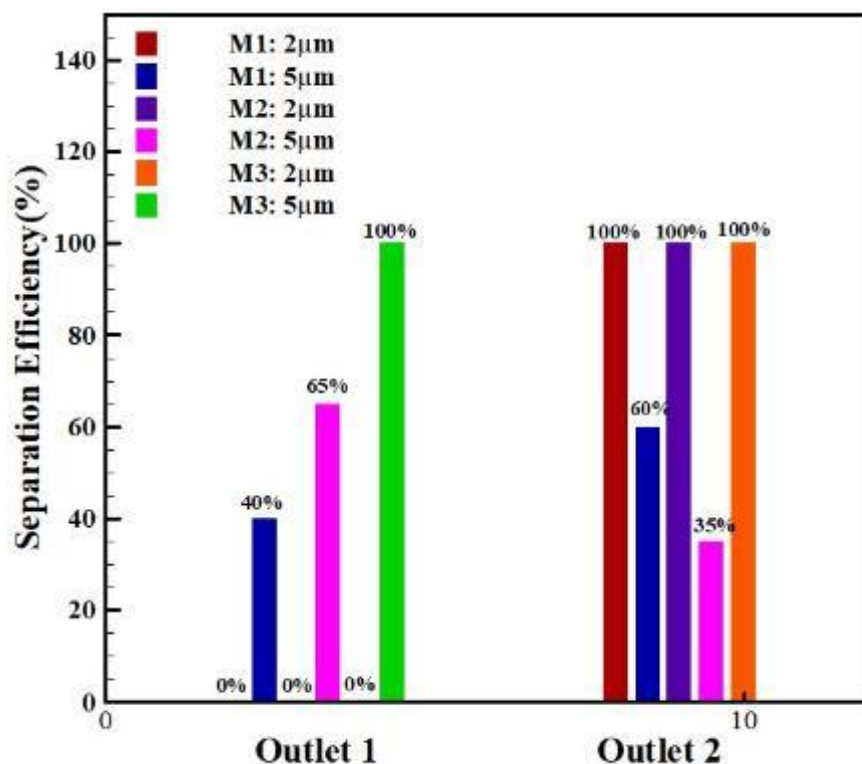
شکل ۴-۱۷ بازده جداسازی دو ذره ۲ و ۵ میکرومتر در هر خروجی. تعداد کل ذرات وارد شده در هر فاصله زمانی ۳۸

و نسبت سرعت جریان ورودی‌ها $\frac{U_B}{U_A} = 1$ می‌باشد.

حال با توجه به شکل ۴-۹ مشاهده می‌شود که نیروی مغناطیسی وارد بر ذرات در مدل سوم نسبت به دو مدل دیگر بیشتر است در نتیجه ذرات انحراف بیشتری پیدا کرده و بازده جداسازی بیشتر می‌شود؛ تا جایی که در مدل سوم ذرات ۵ میکرومتر ۱۰۰ درصد جذب خروجی ۱ می‌شوند. بازده جداسازی برای سه مدل شبیه‌سازی شده در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است.

۴-۹- بررسی تاثیر سرعت جریان بر بازده جداسازی

با افزایش نسبت سرعت جریان، سطح همپوشانی ذرات ۲ میکرومتر و ذرات ۵ میکرومتر به تدریج کاهش می‌یابد و دو نوع ذرات می‌توانند به طور کامل از هم جدا شوند. بنابراین، یک راه خوب برای بهبود کارایی جداسازی کنترل سرعت جریان ورودی در یک میکروکانال T شکل می‌باشد.



شکل ۴-۱۸ بازده جداسازی دو ذره ۲ و ۵ میکرومتر در هر خروجی. تعداد کل ذرات وارد شده در هر فاصله زمانی ۴۰

و نسبت سرعت جریان ورودی‌ها $\frac{u_B}{u_A} = 1.5$ می‌باشد.

حال با توجه به شکل ۴-۱۸ مشاهده می‌شود که بازده جداسازی با افزایش نسبت سرعت جریان

($\frac{u_B}{u_A} = 1.5$) افزایش یافته تا جایی که در مدل سوم ذرات ۲ و ۵ میکرومتر بطور ۱۰۰٪ از هم جدا شده‌اند.

۵- فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتیجه‌گیری

یک مدل عددی برای تحلیل رفتار جداسازی ذرات غیرمغناطیسی در مایعات مغناطیسی تحت یک گرادیان میدان مغناطیسی پیشنهاد شد. پارامترهای تأثیرگذار در رفتار حرکت ذرات و بازده جداسازی مورد بحث قرار گرفت. نتیجه‌های زیر می‌تواند به دست آید:

- روش عددی پیشنهادی می‌تواند به سرعت توزیع میدان و نیروی مغناطیسی، جریان سیال و انتقال و تفکیک ذرات در دستگاه‌های مقیاس میکرو را پیش‌بینی کند که یک ابزار کارآمد برای طراحی و بهینه‌سازی میکرو سیستم‌های مگنتوفورسیس با پارامترهای ساختاری پیچیده میکروکانال‌ها و آهن‌ربا فراهم می‌کند.

- بهینه‌سازی مدل‌ها با استفاده از تغییر در ساختار هندسی آهن‌رباها مورد بررسی قرار گرفت و همین امر باعث بهبود در بازده جداسازی ذرات شد.

- نشان داده شده است که ذرات غیرمغناطیسی ۲ میکرومتر و ۵ میکرومتر در فروسیال می‌توانند به طور کامل با فاصله نسبتاً بزرگ جدا شوند؛ که با لایه نشانی کردن آهن‌ربا (با یک طرح نوآورانه) ذرات ۵ میکرومتر ۱۰۰٪ جذب خروجی ۱ می‌شوند.

- برای هر مدل مگنت، دو سایز (مقدار) بحرانی (ترشهولد) از ذرات برای اولین بار ارائه شده است که مجموعه ذرات کوچکتر از مقدار بحرانی اول از خروجی پایین میکروکانال و مجموعه ذرات بزرگتر از مقدار بحرانی دوم، از خروجی دیگر میکروکانال با بازدهی ۱۰۰٪ جداسازی می‌شوند. در مدل اول، مقدار آستانه برای خروجی ۱ و ۲ به ترتیب ۷ و ۰,۳۵ میکرومتر، در مدل دوم ۶ و ۰,۳ میکرومتر و در مدل سوم ۴,۵ و ۰,۲ میکرومتر است.

٦- مراجع

- [١] E. P. Furlani, Permanent magnet and electromechanical devices: materials, analysis, and applications. Academic press, 2001.
- [٢] H. Maenaka, M. Yamada, M. Yasuda, and M. J. L. Seki, "Continuous and size-dependent sorting of emulsion droplets using hydrodynamics in pinched microchannels," vol. 24, no. 8, pp. 4405-4410, 2008.
- [٣] B. R. Long, M. Heller, J. P. Beech, H. Linke, H. Bruus, and J. O. J. P. R. E. Tegenfeldt, "Multidirectional sorting modes in deterministic lateral displacement devices," vol. 78, no. 4, p. 046304, 2008.
- [٤] D. B. Tuckerman and R. F. W. J. I. E. d. l. Pease, "High-performance heat sinking for VLSI," vol. 2, no. 5, pp. 126-129, 1981.
- [٥] S. Kandlikar, S. Garimella, D. Li, S. Colin, and M. R. King, *Heat transfer and fluid flow in minichannels and microchannels*. elsevier, 2005.
- [٦] J. Wu, Q. Yan, S. Xuan, X. J. M. Gong, and Nanofluidics, "Size-selective separation of magnetic nanospheres in a microfluidic channel," vol. 21, no. 3, p. 47, 2017.
- [٧] C. A. Ballhausen and H. B. Gray, *Molecular orbital theory: an introductory lecture note and reprint volume*. WA Benjamin, Inc., 1965.
- [٨] S. Chikazumi and C. D. Graham, *Physics of Ferromagnetism 2e*. Oxford University Press on Demand, 2009.
- [٩] D. S. Mathew and R.-S. J. C. e. j. Juang, "An overview of the structure and magnetism of spinel ferrite nanoparticles and their synthesis in microemulsions," vol. 129, no. 1-3, pp. 51-65, 2007.
- [١٠] E. Murad and J. Cashion, *Mössbauer spectroscopy of environmental materials and their industrial utilization*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [١١] T. Albrecht, C. Bühner, M. Fähnle, K. Maier, D. Platzek, and J. J. A. P. A. Reske, "First observation of ferromagnetism and ferromagnetic domains in a liquid metal," vol. 65 ,no. 2, pp. 215-220, 1997.
- [١٢] A. Kandegedara and D. B. J. A. C. Rorabacher, "Noncomplexing tertiary amines as "better" buffers covering the range of pH 3– 11. Temperature dependence of their acid dissociation constants," vol. 71, no. 15, pp. 3140-31.١٩٩٩ ,٤٤

- [١٣] S. Suresh *et al.*, "Connections between single-cell biomechanics and human disease states: gastrointestinal cancer and malaria," vol. 1, no. 1, pp. 15-30, 2005.
- [١٤] A. Vaziri and A. J. N. m. Gopinath, "Cell and biomolecular mechanics in silico," vol. 7, no. 1, p. 15, 2008.
- [١٥] H. A. Cranston, C. W. Boylan, G. L. Carroll, S. P. Suter, I. Gluzman, and D. J. S. Krogstad, "Plasmodium falciparum maturation abolishes physiologic red cell deformability," vol. 223, no. 4634, pp. 400-403. ١٩٨٩ ,
- [١٦] A. Manz *et al.*, "Planar chips technology for miniaturization and integration of separation techniques into monitoring systems: capillary electrophoresis on a chip," vol. 593, no. 1-2, pp. 253-258, 1992.
- [١٧] D. R. Reyes, D. Iossifidis, P.-A. Auroux, and A. J. A. c. Manz, "Micro total analysis systems. 1. Introduction, theory, and technology," vol. 74, no. 12, pp. 2623-2636, 2002.
- [١٨] R. Quek, D. V. Le, and K.-H. J. P. R. E. Chiam, "Separation of deformable particles in deterministic lateral displacement devices," vol. 83, no. 5, p. 056301, 2011.
- [١٩] M. Alshareef *et al.*, "Separation of tumor cells with dielectrophoresis-based microfluidic chip," vol. 7, no. 1, p. 011803, 2013.
- [٢٠] C. Liu, L. Lagae, and G. J. A. p. l. Borghs" , "Manipulation of magnetic particles on chip by magnetophoretic actuation and dielectrophoretic levitation," vol. 90, no. 18, p. 184109, 2007.
- [٢١] S. Yan, J. Zhang, D. Yuan, and W. J. E. Li, "Hybrid microfluidics combined with active and passive approaches for continuous cell separation," vol. 38, no. 2, pp. 238-249, 2017.
- [٢٢] G. Doddabasavana, K. PadmaPriya, and K. J. W. J. S. T. Nagabhushana, "A review of recent advances in separation and detection of whole blood components," vol. 2, no. 5, pp. 05.٢٠١٢ , ٠٩-
- [٢٣] C. W. Shields IV, C. D. Reyes, and G. P. J. L. o. a. C. López, "Microfluidic cell sorting: a review of the advances in the separation of cells from debulking to rare cell isolation," vol. 15, no. 5, pp. 1230-1249, 2015.
- [٢٤] M. Yamada and M. J. L. o. a. C. Seki, "Hydrodynamic filtration for on-chip particle concentration and classification utilizing microfluidics," vol. 5, no. 11, pp. 1233-1239, 2005.

- [٢٥] M. A. Faridi, H. Ramachandraiah, I. Banerjee, S. Ardabili, S. Zelenin, and A. J. J. o. n. Russom, "Elasto-inertial microfluidics for bacteria separation from whole blood for sepsis diagnostics," vol. 15, no. 1, p. 3, 2017.
- [٢٦] M. Balvin, E. Sohn, T. Iracki, G. Drazer, and J. J. P. r. l. Frechette, "Directional locking and the role of irreversible interactions in deterministic hydrodynamics separations in microfluidic devices," vol. 103, no. 7, p. 078301, 2009.
- [٢٧] N. Piacentini, G. Mernier, R. Tornay, and P. J. B. Renaud, "Separation of platelets from other blood cells in continuous-flow by dielectrophoresis field-flow-fractionation," vol. 5, no. 3, p. 034122, 2011.
- [٢٨] C. R, Z. T, and M. L, "Three-dimensional and analytical modeling of microfluidic particle transport in magnetic fluids.," 2014.
- [٢٩] X. Chen, D. Cui, C. Liu, H. Li, and J. J. A. c. a. Chen, "Continuous flow microfluidic device for cell separation, cell lysis and DNA purification," vol. 584, no. 2, pp. 237-243, 2007.
- [٣٠] N. J. L. o. a. C. Pamme, "Continuous flow separations in microfluidic devices," vol. 7, no. 12, pp. 1644-1659, 2007.
- [٣١] Q. Chen, D. Li, J. Lin, M. Wang, and X. J. A. c. Xuan, "Simultaneous Separation and Washing of Nonmagnetic Particles in an Inertial Ferrofluid/Water Coflow," vol. 89, no. 12, pp. 6915-6920, 2017.
- [٣٢] S. Miltenyi, W. Müller, W. Weichel, and A. J. C. T. J. o. t. I. S. f. A. C. Radbruch, "High gradient magnetic cell separation with MACS," vol. 11, no. 2, pp. 231-238, 1990.
- [٣٣] J. D. Adams, U. Kim, and H. T. J. P. o. t. N. A. o. S. Soh, "Multitarget magnetic activated cell sorter," vol. 105, no. 47, pp. 18165-18170, 2008.
- [٣٤] D. J. P. T. o. t. R. S. A. M. McGloin, Physical and E. Sciences, "Optical tweezers: 20 years on," vol. 364, no. 1849, pp. 3521-3537, 2006.
- [٣٥] J. Shi, H. Huang, Z. Stratton, Y. Huang, and T. J. J. L. o. a. C. Huang, "Continuous particle separation in a microfluidic channel via standing surface acoustic waves (SSAW)," vol. 9, no. 23, pp. 3354-3359, 2009.
- [٣٦] J. P. Lafleur, A. Jönsson, S. Senkbeil, J. P. J. B. Kutter, and Bioelectronics, "Recent advances in lab-on-a-chip for biosensing applications," vol. 76, pp. 213-233, 2016.
- [٣٧] F. Alnaimat, S. Dagher, B. Mathew, A. Hilal- Alnqbi, and S. J. T. C. R. Khashan, "Microfluidics Based Magnetophoresis: A Review," 2018.

- [٣٨] E. Furlani and K. J. P. r. E. Ng, "Analytical model of magnetic nanoparticle transport and capture in the microvasculature," vol. 73, no. 6, p. 061919, 2006.
- [٣٩] R.-J. Yang, H.-H. Hou, Y.-N. Wang, L.-M. J. S. Fu, and A. B. Chemical, "Micro-magnetofluidics in microfluidic systems: A review," vol. 224, pp. 1-15, 2016.
- [٤٠] M. A. Gijs, F. Lacharme, and U. J. C. r. Lehmann, "Microfluidic applications of magnetic particles for biological analysis and catalysis," vol. 110, no. 3, pp. 1518-1563, 200. ٩
- [٤١] Q. Ramadan, V. Samper, D. Poenar, and C. J. B. m. Yu, "Magnetic-based microfluidic platform for biomolecular separation," vol. 8, no. 2, pp. 151-158, 2006.
- [٤٢] R. Zhou, C. J. M. Wang, and Nanofluidics, "Microfluidic separation of magnetic particles with soft magnetic microstructures," vol. 20, no. 3, p. 48, 2016.
- [٤٣] L. Liang, C. Zhang, and X. J. A. P. L. Xuan, "Enhanced separation of magnetic and diamagnetic particles in a dilute ferrofluid," vol. 102, no. 23, p. 234101, 2013.
- [٤٤] N. J. L. o. a. C. Pamme, "Magnetism and microfluidics," vol. 6, no. 1, pp. 24-38, 2006.
- [٤٥] K. Smistrup, T. Lund-Olesen, M. F. Hansen, and P. T. J. J. o. A. P. Tang, "Microfluidic magnetic separator using an array of soft magnetic elements," vol. 99 ,no. 8, p. 08P102, 2006.
- [٤٦] N. Pamme and C. J. L. o. a. C. Wilhelm, "Continuous sorting of magnetic cells via on-chip free-flow magnetophoresis," vol. 6, no. 8, pp. 974-980, 2006.
- [٤٧] Y.-C. Chung, P.-W. Chen, C.-M. Fu, J.-M. J. J. o. M. Wu, and M .Materials, "Particles sorting in micro-channel system utilizing magnetic tweezers and optical tweezers," vol. 333, pp. 87-92, 2013.
- [٤٨] R. Gelszinnis, M. Faivre, J. Degouttes, N. Terrier, R. Ferrigno, and A. Deman, "Magnetophoretic manipulation in microsystem using i-pdms microstructures," in *17th international conference on miniaturized systems for chemistry and life sciences*, 2013, pp. 146-148.
- [٤٩] T. Zhu, R. Cheng, Y. Liu, J. He, L. J. M. Mao, and nanofluidics, "Combining positive and negative magnetophoreses to separate particles of different magnetic properties," vol. 17, no. 6, pp. 973-982, 2014.
- [٥٠] J. Kim, C.-N. J. J. o. M. S. Kim, and Technology, "Evaluation of optimization algorithms for the design of a magnetic cell separator for malaria-infected blood," vol. 29, no. 11, pp. 4833-4839, 2015.

- [٥١] W.-T. Wu *et al.*, "Design of microfluidic channels for magnetic separation of malaria-infected red blood cells," vol. 20, no. 2, p. 41, 2016.
- [٥٢] J. Kim, H. Cho, S.-I. Han, and K.-H. J. A. c. Han, "Single-cell isolation of circulating tumor cells from whole blood by lateral magnetophoretic microseparation and microfluidic dispensing," vol. 88, no. 9, pp. 4857-4863, 2016.
- [٥٣] L. Liang, J. Zhu, and X. J. B. Xuan, "Three-dimensional diamagnetic particle deflection in ferrofluid microchannel flows," vol. 5, no. 3, p. 034110, 2011.
- [٥٤] X. Wu, H. Wu, Y. J. M. Hu, and nanofluidics, "Enhancement of separation efficiency on continuous magnetophoresis by utilizing L/T-shaped microchannels," vol. 11, no. 1, pp. 11-24, 2011.
- [٥٥] Q. Ramadan, M. A. J. M. Gijs, and nanofluidics, "Microfluidic applications of functionalized magnetic particles for environmental analysis: focus on waterborne pathogen detection," vol. 13, no. 4, pp. 529-542.٢٠١٢ ,
- [٥٦] T. B. Jones and T. B. Jones, *Electromechanics of particles*. Cambridge University Press, 2005.
- [٥٧] X. Han, Y. Feng, Q. Cao, L. J. M. Li, and Nanofluidics, "Three-dimensional analysis and enhancement of continuous magnetic separation of particles in microfluidics," vol. 18, no. 5-6, pp. 1209-1220, 2015.

Abstract

In the separation process by applying magnetic force, the particles can be separated and diverted depending on the magnetic susceptibility and size. In this paper, a numerical solution was presented to analyze and control the motion of particles in a rectangular microchannel to obtain particle trajectories due to the effect of magnetic field and fluid flow. By applying a permanent magnet, two-dimensional and time-dependent movement of non-magnetic particles in a ferrofluid flow inside the T-shape microchannel is investigated. The distribution of the magnetic force on the particles and their trajectories were first confirmed by analytical and empirical results, and then three models were presented to increase the separation efficiency by optimizing the magnetic field. To compare the separation efficiency, the models with different geometries with a nickel layer (in the third model) were proposed. Non-magnetic particles of polystyrene with the diameter of 0.2 to 7 μm and EMG 408 as the ferrofluid have been used in this method. The upper area of the central line of the microchannel is considered as the outlet 1 and the area below the central line as outlet 2. The results show that the separation efficiency in the third model is more than the first and second models. For each of the proposed models, two threshold values of particle size were reported; so that all particles with the size greater than the first threshold value are exited only from the first outlet and all particles with a smaller size than the second threshold value are only exited from the second outlet. The threshold values for the first and second outlets were obtained respectively 7 and 0.35 μm in the first model, 6 and 0.3 μm in the second model and 4.5 and 0.2 μm in the third model.

Keywords

microchannel, separation, magnetophoresis, microparticles



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering
M.Sc. Thesis in Energy Conversion Engineering

Numerical analysis of motion and separation of particles in a microchannel with the presence of a magnetic field

By:

Mostafa Eshaghi

Supervisor(s):

Dr. Mohammad Mohsen Shahmardan,

Dr. Mohsen Nazari

Advisor:

Dr. Yasaman Daghighi

July 2019