

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده فنی و مهندسی

بخش مهندسی شیمی

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی شیمی
گرایش محیط زیست

بررسی حرکت و نشست ذرات جامد درون یک فیلتر با چیدمان موانع
مربعی در یک خط و در غیر یک خط با روش شبکه بولتزمن

مؤلف :

وحیده انصاری

استاد راهنما :

دکتر عطاء الله سلطانی گوهرریزی

استاد مشاور :

دکتر سعید جعفری

مهر ماه ۱۳۹۱



این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط احراز درجه کارشناسی ارشد به

بخش : مهندسی شیمی

دانشکده : فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

دانشجو : خانم وحیده انصاری

استاد راهنما : دکتر عطاء الله سلطانی گوه‌ریزی

استاد مشاور : دکتر سعید جعفری

دور ۱ : دکتر علی محبی

دور ۲ : دکتر محمد رهنما

نماینده تحصیلات تکمیلی در جلسه دفاع : دکتر حسن هاشمی پور رفسنجانی

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده : دکتر مریم احتشام زاده

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است.

تقدیم به :

همسر عزیزم که همواره پناه خستگیها و امیدبخش زندگیم است .

پدر و مادر مهربانم که با زحمات بی شائبه و از خودگذشتگی های فراوانشان در تمامی لحظات زندگی تنها به هموار راه من اندیشیده اند و هر لحظه آفتاب مهرشان بر آستانه وجودم تابان است .

و تقدیم به

دختر عزیزتر از جانم **النا** ، که آغازین ماه های زندگیش با انجام این پژوهش همراه گردید و همواره عشق داشتنش و لبخند زیبایش مشوق من در پیمودن این راه بود.

تشکر و قدردانی :

تسبیح و تقدیر خداوند بزرگ را که در سایه الطاف بی پایان و مهربانیهای بی کرانش ، هر کار دشوار آسان می گردد.

با سپاس فراوان از اساتید گرانقدر، جناب آقای دکتر عطاء الله سلطانی گوهرریزی و جناب آقای دکتر سعید جعفری که با راهنمایی های صمیمانه خویش ، در تمامی مراحل انجام این پژوهش مرا یاری رساندند ، همچنین از جناب آقای دکتر علی محبی و جناب آقای دکتر محمد رهنما که زحمت داوری این پژوهش را متحمل گردیدند تشکر ویژه دارم .

چکیده:

در این تحقیق حرکت و نشست ذرات آئروسول درون فیلتر با موانع مربعی با چیدمانهای متفاوت در یک خط^۱ و در غیر یک خط^۲ مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف از این تحقیق، مقایسه راندمان ته نشینی ذرات در این دو آرایش و همچنین تعیین میزان اثربخشی نیروهای لیفت و بروانی بر روی حرکت ذرات در این دو آرایش می باشد. در ابتدا جریان سیال درون فیلتر با کمک روش شبکه بولتزمن حل شده و در ادامه با اضافه کردن ذرات، حرکت آنها مورد مطالعه قرار گرفته است. روش لاگرانژین برای حرکت ذرات در نظر گرفته شده و بنا به استفاده از حل یکطرفه، از اثر ذرات بر روی سیال صرفنظر شده است. حرکت 500 ذره درون فیلتر بررسی گردیده است. ذرات مورد مطالعه در محدوده ذرات زیر میکرونی بوده و جریان در محدوده جریان آرام قرار دارد. نیروهای موثر بر حرکت ذرات همچون لیفت، دراگ، گرانش و بروانی در نظر گرفته شده است. نتایج شامل ردیابی ذرات در طول فیلتر، مقایسه میزان ته نشینی کل در دو آرایش با در نظر گرفتن تمام نیروها، تاثیر نیروهای لیفت و بروانی در میزان ته نشینی ذرات در دو آرایش و بررسی میزان ته نشینی ذرات با سایز متفاوت در طول فیلتر در دو آرایش می باشد. بنا به نتایج بدست آمده، فیلتر با موانع چیده شده در غیر یک خط برای ذرات درشت (15 μm به بالا) و فیلتر با موانع چیده شده در یک خط برای ذرات ریز (15 μm به پایین) کارآمدند. نیروی بروانی بر روی ته نشینی ذرات بسیار ریز (0.01-0.1 μm) در دو آرایش موثر است. نیروی لیفت تاثیر قابل توجهی بر روی ته نشینی ذرات نداشته است اما برای ذرات بسیار ریز در غیاب نیروی لیفت، راندمان ته نشینی ذرات در هر دو آرایش بالاتر است.

کلید واژه: فیلتر با آرایش در یک خط و در غیر یک خط، روش شبکه بولتزمن، نیروی بروانی، روش لاگرانژین

¹ On Line

² Staggered

فهرست مطالب

۱	فصل اول: مقدمه.....
۲	۱-۱ مقدمه.....
۴	۲-۱ معرفی موضوع.....
۶	۳-۱ اهداف.....
۷	فصل دوم: مروری بر کارهای گذشته.....
۸	۱-۲ مقدمه.....
۸	۲-۲ پژوهشهای انجام شده در ارتباط با شبیه سازی جریان سیال در اطراف موانع.....
۱۰	۳-۲ پژوهشهای انجام شده در ارتباط با حرکت ذرات در اطراف موانع.....
۱۳	فصل سوم: روش تحقیق.....
۱۴	۱-۳ مقدمه.....
۱۴	۲-۳ معادلات شبکه بولتزمن.....
۱۷	۳-۳ الگوریتم حل معادلات شبکه بولتزمن.....
۱۸	۴-۳ شرایط مرزی.....
۱۸	۱-۴-۳ شرایط مرزی در دیواره های ساکن.....
۱۹	۲-۴-۳ شرایط مرزی در ورودی و خروجی فیلتر.....
۲۱	۵-۳ روابط حاکم بر حرکت ذرات.....
۲۴	۱-۵-۳ نحوه مدل سازی حرکت ذرات.....
۲۵	۲-۵-۳ محاسبه مکان و سرعت اولیه ذرات.....
۲۷	فصل چهارم: نتایج.....
۲۸	۱-۴ نتایج حاصل از بررسی الگوی جریان در کانال حاوی یک مانع به شکل مربع.....
۳۱	۱-۱-۴ اعتبار سنجی مدل.....
۳۳	۲-۴ نتایج حاصل از بررسی حرکت ذرات در اطراف مانع مربعی درون کانال.....
۳۳	۱-۲-۴ روابط استفاده شده برای حرکت ذرات در اطراف مانع.....
۳۴	۲-۲-۴ حالت ۱: بدون در نظر گرفتن نیروی بروانی.....
۳۶	۳-۲-۴ حالت ۲: با در نظر گرفتن نیروی بروانی.....
۳۸	۳-۴ بررسی الگوی جریان در فیلتر دارای موانع مستطیلی با آرایش در غیر یک خط.....

۴-۴ نتایج حاصل از بررسی الگوی جریان درون فیلتر با آرایشهای در یک خط و در غیر یک خط.....	۴۱
۴-۵ نتایج حاصل از بررسی حرکت ذرات درون فیلتر با آرایشهای در یک خط و در غیر یک خط.....	۴۴
۴-۵-۱ مقایسه راندمان ته نشینی ذرات درون فیلتر با آرایشهای در یک خط و در غیر یک خط.....	۴۶
۴-۵-۲ تاثیر نیروی بروانی در ته نشینی ذرات درون فیلتر با آرایشهای در یک خط و در غیر یک خط.....	۴۸
۴-۵-۳ تاثیر نیروی لیفت در ته نشینی ذرات درون فیلتر با آرایشهای در یک خط و در غیر یک خط.....	۵۱
۴-۵-۴ مقایسه راندمان تجمعی ته نشینی ذرات با اقطار متفاوت در طول فیلتر با آرایشهای در یک خط و در غیر یک خط.....	۵۳
۴-۵-۵ مقایسه راندمان ته نشینی ذرات بر روی سه مانع ردیف اول درون فیلتر با آرایشهای در یک خط و در غیر یک خط.....	۵۶
۴-۵-۶ مقایسه راندمان ته نشینی ذرات بر روی یک مانع درون کانال با فیلتر با آرایشهای در یک خط و در غیر یک خط.....	۵۸
فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات.....	۶۰
۵-۱ نتیجه گیری.....	۶۱
۵-۲ پیشنهادات.....	۶۲
پیوست.....	۶۳
تئوری روش شبکه بولترمن.....	۶۴
مراجع.....	۸۳

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ فیلتر با آرایش در یک خط..... ۴
- شکل ۲-۱ فیلتر با آرایش در غیر یک خط ۴
- شکل ۱-۳ آرایش $D2Q9$ ۱۶
- شکل ۲-۳ شرط مرزی Bounce Back در دیواره های فیلتر..... ۱۸
- شکل ۳-۳ حرکت بروانی ذرات..... ۲۲
- شکل ۴-۳ شماتیک نیروی لیفت وارد بر ذره ۲۳
- شکل ۵-۳ مکان و سرعت اولیه ذره ۲۶
- شکل ۱-۴ شماتیک هندسه مساله ۲۸
- شکل ۲-۴ خطوط جریان در اطراف مانع در $Re=30$ ۲۹
- شکل ۳-۴ بردارهای سرعت در اطراف مانع در $Re=30$ ۳۰
- شکل ۴-۴ کانتور سرعت در اطراف مانع در $Re=30$ ۳۰
- شکل ۵-۴ توزیع سرعت در راستای محور مرکزی عمودی مانع و $Re=30$ ۳۱
- شکل ۶-۴ توزیع سرعت در راستای محور مرکزی افقی مانع و $Re=30$ ۳۲
- شکل ۷-۴ عدم وابستگی نتایج به شبکه انتخابی ۳۲
- شکل ۸-۴ تغییر در راندمان ته نشینی ذرات بر روی دیواره جلویی مانع با تغییر عدد استوکس ۳۴
- شکل ۹-۴ تاثیر نیروی بروانی در ته نشینی ذرات بسیار ریز بر روی دیواره جلویی مانع..... ۳۶
- شکل ۱۰-۴ مسیر حرکت ذرات ریز در اطراف مانع در $Re=30$ و $Stk=10^{-6}$ با در نظر گرفتن نیروی بروانی ۳۷
- شکل ۱۱-۴ مسیر حرکت ذرات درشت در اطراف مانع در $Re=30$ و $Stk=0.01$ بدون در نظر گرفتن نیروی بروانی ۳۷
- شکل ۱۲-۴ شماتیک هندسه فیلتر دارای موانع مستطیلی با آرایش Staggered ۳۸
- شکل ۱۳-۴ پروفایل سرعت در محور مرکزی عمودی مانع در آرایش Staggered و $Re=60$ ۳۹
- شکل ۱۴-۴ خطوط جریان در اطراف مانع مستطیلی در $Re=60$ ۴۰
- شکل ۱۵-۴ خطوط جریان در فیلتر دارای موانع مربعی با آرایش On Line و $Re=5$ ۴۱
- شکل ۱۶-۴ خطوط جریان در فیلتر دارای موانع مربعی با آرایش Staggered و $Re=5$... ۴۱
- شکل ۱۷-۴ بردارهای سرعت در فیلتر دارای موانع مربعی با آرایش On Line و $Re=5$ ۴۲

- شکل ۴-۱۸ بردارهای سرعت در فیلتر دارای موانع مربعی با آرایش Staggered و $Re=5$.. ۴۲
- شکل ۴-۱۹ کانتور سرعت در فیلتر دارای موانع مربعی با آرایش On Line و $Re=5$ ۴۳
- شکل ۴-۲۰ کانتور سرعت در فیلتر دارای موانع مربعی با آرایش Staggered و $Re=5$ ۴۳
- شکل ۴-۲۱ مسیر حرکت ذرات درون فیلتر با آرایش On Line و $Re=5$ ۴۵
- شکل ۴-۲۲ مسیر حرکت ذرات درون فیلتر با آرایش Staggered و $Re=5$ ۴۵
- شکل ۴-۲۳ مقایسه راندمان ته نشینی ذرات در فیلتر با آرایشهای On Line و Staggered ۴۶
- شکل ۴-۲۴ تاثیر نیروی بروانی در ته نشینی ذرات بسیار ریز درون فیلتر با آرایش On Line ۴۸
- شکل ۴-۲۵ تاثیر نیروی بروانی در ته نشینی ذرات بسیار ریز درون فیلتر با آرایش Staggered ۴۹
- شکل ۴-۲۶ مسیر حرکت ذرات بسیار ریز درون فیلتر با آرایش On Line ۵۰
- شکل ۴-۲۷ مسیر حرکت ذرات بسیار ریز درون فیلتر با آرایش Staggered ۵۰
- شکل ۴-۲۸ تاثیر نیروی لیفت در ته نشینی ذرات بسیار ریز درون فیلتر با آرایش On Line ۵۱
- شکل ۴-۲۹ تاثیر نیروی لیفت در ته نشینی ذرات بسیار ریز درون فیلتر با آرایش Staggered ۵۲
- شکل ۴-۳۰ راندمان ته نشینی ذرات با اقطار متفاوت در طول فیلتر با آرایش On Line ۵۳
- شکل ۴-۳۱ راندمان ته نشینی ذرات با اقطار متفاوت در طول فیلتر با آرایش Staggered ۵۵
- شکل ۴-۳۲ مقایسه راندمان ته نشینی ذرات بر روی سه مانع درون فیلتر با آرایش On Line ۵۶
- شکل ۴-۳۳ مقایسه راندمان ته نشینی ذرات بر روی سه مانع درون فیلتر با آرایش Staggered ۵۷
- شکل ۴-۳۴ مقایسه راندمان ته نشینی بر واحد سطح مانع در کانال حاوی یک مانع با فیلتر با آرایش On Line ۵۸
- شکل ۴-۳۵ مقایسه راندمان ته نشینی بر واحد سطح مانع در کانال حاوی یک مانع با فیلتر با آرایش Staggered ۵۹
- شکل پ-۱ رشد نمایی مقالاتی که از سال ۱۹۹۲ به بعد در زمینه شبکه بولتزمن انتشار یافتند ۶۷
- شکل پ-۲ کاربرد شبکه بولتزمن در مقالات مختلف به تفکیک علوم متفاوت ۶۸
- شکل پ-۳ بردارهای مکان و سرعت ذره ۷۱
- شکل پ-۴ آرایش شبکه یک بعدی ۷۵
- شکل پ-۵ شبکه های دو بعدی بولتزمن ۷۶
- شکل پ-۶ آرایش $D2Q9$ ۷۶
- شکل پ-۷ آرایش $D3Q15$ ۷۷
- شکل پ-۸ آرایش $D3Q19$ ۷۸

شکل پ-۹ شرایط مرزی پرئودیک در ورودی و خروجی جریان لوله ۷۹

شکل پ-۱۰ شرط مرزی تقارن ۸۲

فهرست علائم

f_i	تابع توزیع
f_i^{eq}	تابع توزیع تعادلی
c_i	سرعت استاندارد در جهت i
c	سرعت جریان
Ω	جمله برخورد
F_B	نیروهای خارجی که بر میدان جریان اعمال میشوند
τ	زمان آسودگی سیال
w_i	ضرایب وزنی
c_s	سرعت صوت
ρ	دانسیته
v	ویسکوزیته سینماتیک
μ_G	ویسکوزیته دینامیک گاز
M_G	جرم مولکولی گاز
T_G	دمای گاز
V_p	حجم ذره
dp	قطر ذره
f	ضریب درآگ استوکس کانینگهام
C	فاکتور اصلاحی کانینگهام
λ_G	پویس آزاد متوسط گاز
s	نسبت دانسیته ذره به سیال
η	راندمان ته نشینی ذرات
ω	فرکانس برخورد
G_i	عدد گوسین
F_B	نیروی بروانی
F_L	نیروی لیفت
R	ثابت جهانی گازها

k ثابت بولتزمن
Stk..... عدد استوکس
Re..... عدد رینولدز
Ma..... عدد ماخ
L طول کانال
H..... عرض کانال
B طول مانع

فصل اول

مقدمه



۱-۱ مقدمه

اطلاع از نحوه حرکت ذرات و میزان اثر بخشی نیروهای عمل کننده بر آنها، برای طراحی تجهیزات مرتبط با ته نشینی ذرات از اهمیت فوق العاده ای برخوردار است. آنچه که در این میان باعث توفیق در ارائه یک تحلیل منطقی از حرکت ذرات می شود، حل دقیق میدان جریان سیال حاکم بر حرکت ذرات است.

مرسوم ترین الگوی محاسباتی مدل سازی جریان سیالات، حل معادلات ناویراستوکس است. تکنیک های حل عددی معادلات ناویر استوکس از طریق گسسته سازی، جبری سازی، خطی سازی و حل دستگاه معادلات، ابداع گردیده اند. از جمله این روشها می توان به روش های تفاضل محدود^۳ و حجم محدود^۴ اشاره کرد. هنگامیکه فرضیات اساسی استفاده شده در بدست آوردن این معادلات نقض شوند، این معادلات قادر به پاسخگویی دقیق و معتبر نخواهند بود. مطالعات نشان می دهند هنگامیکه قصد بررسی جریان سیال در مقیاس میکرو و نانو را داریم، بدلیل نزدیک شدن ابعاد هندسه مورد مطالعه به ابعاد پویش آزاد مولکولی، فرض پیوستگی سیال که یکی از فرضهای اساسی در بدست آوردن معادلات ناویراستوکس است، معتبر نخواهد بود و بنابراین بایستی بدنبال روشی جایگزین برای مدل سازی جریان سیال در این مقیاس ها بود. دیدگاه دیگری که برای مطالعه رفتار سیالات مورد استفاده قرار می گیرد دیدگاه مولکولی است. در این دیدگاه حرکت ذرات و مولکولها و نیز تصادم و برخورد آنها و رفتار در مقابل دیواره جامد مورد مطالعه قرار می گیرد. بدیهی است که تمامی خواص ماکروسکوپی نظیر فشار، سرعت، ممنتوم و چگالی به طور مستقیم نتیجه رفتارهای مولکولی است.

³ Finite Difference Method

⁴ Finite Volume Method

به طور کلی سه دیدگاه در حل عددی مسائل فیزیکی و تحلیل جریان سیال وجود دارد:

- دیدگاه میکروسکوپی

- دیدگاه مزوسکوپی

- دیدگاه ماکروسکوپی

دیدگاه میکروسکوپی حرکت منفرد مولکولها را در نظر می گیرد که در برگیرنده دیدگاه مولکولی است.

در دیدگاه ماکروسکوپی که مبنای روش های دینامیک سیالات محاسباتی است، به جای حرکت مولکول، حرکت سیال در نظر گرفته می شود. حل معادلات ناویر استوکس به کمک روش های تفاضل محدود، حجم محدود و المان محدود⁵ از همین دیدگاه پیروی می کند.

در دیدگاه مزوسکوپی که ما بین دو دیدگاه میکروسکوپی و ماکروسکوپی است رفتار مجموعه ای از ذرات به عنوان یک واحد بررسی می گردد.

برای مطالعه سیال در مقیاس مزوسکوپی از معادله بولتزمن استفاده می شود. معادله بولتزمن بر پایه تبدلات ممنتوم و انرژی بین مولکولها بنا شده است. یکی از روشهایی که برای حل معادله بولتزمن در یک فضای فیزیکی استفاده می شود روش لیتیس بولتزمن⁶ است. در این روش معادله بولتزمن و نیز محدوده حل فیزیکی به منظور حل عددی گسسته می شوند و سپس برای هر نقطه از محدوده گسسته شده معادله بولتزمن حل می گردد تا به همگرایی جواب منجر شود.

روش شبکه بولتزمن (LBM) یکی از روشهای نوین محاسباتی است که در دهه اخیر از سوی پژوهشگران مورد استقبال قرار گرفته است. مناسب بودن برای محاسبات موازی⁷، عدم نیاز به حل معادله پویزون برای محاسبه فشار، سادگی برای حل جریان های چند فازی و مسائل پیچیده ای همچون مرزهای متحرک (مانند انجماد و ذوب ..) و هندسه های پیچیده [1] از مزایای روش شبکه بولتزمن است.

⁵ Finite Element Method

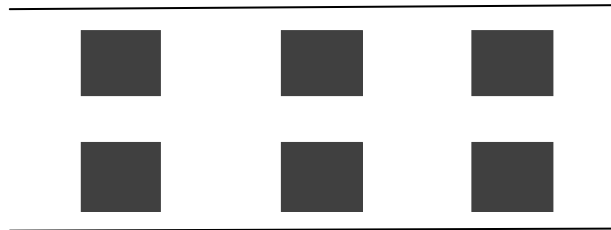
⁶ Lattice Boltzman Method

⁷ Parallel Computations

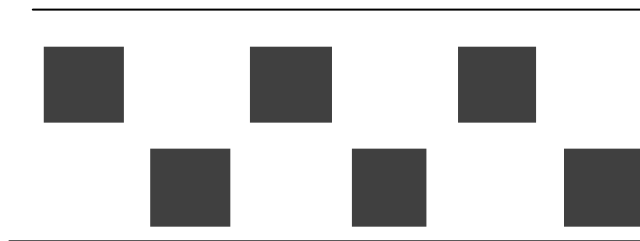
۲-۱ معرفی موضوع

در این پایان نامه حرکت ذرات در اثر جریان در داخل یک فیلتر دو بعدی با چیدمان موانع در یک خط و در غیر یک خط مورد مطالعه قرار گرفته است.

فیلتر در نظر گرفته شده دارای ابعاد $2 \times 0.5 \text{ cm}$ و موانع موجود درون فیلتر به شکل مربع و دارای ابعاد 0.1 cm می باشند.



شکل ۱-۱: فیلتر با آرایش در یک خط



شکل ۲-۱: فیلتر با آرایش در غیر یک خط

جریان مورد مطالعه غیر قابل تراکم، پایدار و آرام و عدد رینولدز در نظر گرفته شده $Re=5$ می باشد.

ابتدا جریان سیال درون فیلتر با روش شبکه بولتزمن مدل شده و سپس با اضافه کردن ذرات به بررسی رفتار آنها درون فیلتر می پردازیم. حل مورد استفاده برای حرکت ذرات، حل یکطرفه^۸ است که در این نوع حل از اثر متقابل ذرات بر روی یکدیگر و بر روی جریان صرف نظر شده است. علت استفاده از این نوع حل، به واسطه غلظت پایین ذرات در داخل فیلتر می باشد. حرکت ذرات

⁸ One-way Coupling

نیز از روش اویلرین-لاگرائزین پیروی می کند. نیروهایی چون لیفت، دراگ، گرانش و بروانی در حرکت ذرات در نظر گرفته شده است. ذرات مورد مطالعه دارای قطرهایی در رنج بین 0.01 - 100 میکرومتر می باشند. تعداد ذرات مورد مطالعه 500 ذره و تمامی ذرات به صورت همزمان در نقطه ورودی فیلتر توزیع می شوند. سیال موجود درون فیلتر، هوا با دمای 100 درجه سانتی گراد در نظر گرفته شده و ذرات از جنس دی اکسید سیلیکون می باشند که خواص فیزیکی هوا و دی اکسید سیلیکون در جدول ۱-۱ نشان داده شده است .

	دی اکسید سیلیکون	هوا
Density (Kg/m ³)	2220.0	0.946
Kinematic viscosity (m ² /s)	----	23.06 × 10 ⁻⁶

جدول ۱-۱: خواص فیزیکی هوا و دی اکسید سیلیکون

۱-۳ اهداف

اهداف مورد نظر از انجام این کار به قرار زیر است:

- ۱- بررسی رفتار ذرات ، حرکت و نشست آنها درون فیلتر با آرایش های در یک خط و در غیر یک خط و مقایسه راندمان ته نشینی ذرات در این دو آرایش
- ۲- بررسی تاثیر نیروهای لیفت و بروانی بر روی حرکت ذرات و ته نشینی آنها در دو آرایش
مراحل پژوهش به ترتیب زیر انجام گرفت:
- ۱- جریان سیال درون کانال حاوی یک مانع به شکل مربع با روش شبکه بولتزنمن و با استفاده از زبان برنامه نویسی Fortran شبیه سازی شد. سپس به منظور اعتبار سنجی این شبیه سازی، نتایج حاصل با فعالیت های علمی گذشته مورد مقایسه قرار گرفت .
- ۲- ذرات در درون کانال حاوی یک مانع به شکل مربع توزیع و سپس معادله حرکت ذرات حل گردید و نتایج حاصل مبنی بر راندمان ته نشینی ذرات با قطرهای مختلف بر روی مانع با نتایج دیگر محققین مقایسه شد.
- ۳- جریان سیال درون فیلتر دارای موانع مستطیلی با آرایش در غیر یک خط شبیه سازی و نتایج با نتایج محققین دیگر مقایسه گردید.
- ۴- جریان سیال درون فیلتر دارای موانع مربعی با آرایش های در یک خط و در غیر یک خط با استفاده از روش شبکه بولتزنمن شبیه سازی شد.
- ۵- ذرات در درون فیلتر توزیع شدند و سپس به حل معادله حرکت ذرات و مقایسه راندمان ته نشینی ذرات در دو آرایش پرداخته شد.

فصل دوم

مروری بر کارهای
گذشته

