



دانشکده فنی مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی

شبیه‌سازی عددی جریان و انتقال حرارت نانوسیال حول یک سیلندر مربعی در زوایای مختلف

استاد راهنما:

دکتر محمدرضا نظری

استاد مشاور:

دکتر شهرام طالبی

پژوهش و نگارش:

فاطمه خرم نژاد

شهریورماه ۱۳۹۲



دانشگاه یزد
دانشکده فنی مهندسی
گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی

شبیه‌سازی عددی جریان و انتقال حرارت نانوسیال حول یک سیلندر مربعی در زوایای مختلف

استاد راهنما:

دکتر محمدرضا نظری

استاد مشاور:

دکتر شهرام طالبی

پژوهش و نگارش:

فاطمه خرم نژاد

شهریورماه ۱۳۹۲

تقدیم بہ او کہ

ہرچہ داریم از اوست...

••••

مشکر و قدردانی

منت خدای را عزوجل که طاعتش موجب قربت است و به شکر اندرش مزید نعمت؛ چه تنها اولایق سپاس مخصوص است؛ هم او که تمام کائنات را به علم آفرید و تمام مخلوقات را به حلم پرورش داد و حال از باب کلام "من لم یشکر المخلوق، لم یشکر الخالق" بر خود لازم می‌دانم از تلاش و زحمات تمام کسانی که در تهید و تنظیم این اثر مرایاری نموده‌اند؛ بالاخص پرو مادرم که با تمام وجود تمام زندگیشان را برای من وقف نمودند و در تمام زهدگی یار و یاورم بودند و استاد گرانقدر جناب آقای دکتر محمد رضا نظری که با سعی صدر در تمام مراحل انجام این تحقیق یاریم نمودند، صمیمانه تقدیر و تشکر به عمل آورم و همچنین از استاد مشاور خود جناب آقای دکتر شهرام طالبی که بی‌دریغ پذیرا و پاسخگوی سوالات اینجانب بودند، تشکر می‌نمایم.

چکیده

در تحقیق حاضر، تأثیر استفاده از نانوسیال به جای سیال پایه در یک جریان آزاد، بر رفتار جریان و انتقال حرارت حول سیلندر مربعی به صورت عددی و با استفاده از روش حجم محدود و الگوریتم SIMPLEC مورد مطالعه قرار گرفته است. در این تحقیق، جریان نانوسیال به عنوان یک سیال نیوتونی تراکم ناپذیر به صورت دو بعدی در محدوده اعداد رینولدز آرام ($5 \leq Re \leq 25$) برای ارزیابی چگونگی انتقال حرارت نانوسیال از سیلندر داغ بررسی شده است. با وجود اینکه نانوسیال یک مخلوط دو فازی است، ولی با فرض عدم لغزش بین سیال و نانوذرات و همچنین وجود تعادل حرارتی بین سیال و نانوذرات و با توجه به این که غلظت نانوذره پایین است، به صورت تک‌فازی در نظر گرفته شد و همانند سیالات معمولی مورد بررسی قرار گرفت.

در این مطالعه نانوسیالات آب-آلومینا و آب-اکسید مس به کار گرفته شد. از آخرین روابط به دست آمده برای هدایت حرارتی و ویسکوزیته‌ی نانوسیال که تابعی از غلظت حجمی، قطر نانوذره و دمای نانوسیال می‌باشند، استفاده شد. نتایج حاصل بهبود قابل توجهی در انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال پایه نشان داد. این بهبود در جریان‌هایی با درصد حجمی بالاتر نانوذرات آشکارتر بود، این در حالی است که قطر نانوذرات تأثیر معکوس بر انتقال حرارت تحمیل می‌کرد. قابل ذکر است که افزایش زاویه سیلندر تا ۱۵ درجه نه تنها تأثیر چندانی بر انتقال حرارت نداشت، بلکه در اعداد رینولدز بالاتر تأثیر معکوس نیز داشت، اما از زاویه‌ی ۲۰ درجه به بعد با افزایش زاویه تا ۴۵ درجه بهبود انتقال حرارت مشاهده شد، که این بهبود در ۴۵ درجه بیش‌ترین مقدار خود را داشت. در شرایط استفاده از دو سیلندر پشت سر هم به جای تک سیلندر تأثیر فاصله‌ی بین سیلندری بر انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش فاصله‌ی بین سیلندری سبب بهبود انتقال حرارت در سیلندر اول می‌گردد، که این بهبود در سیلندر دوم شدیدتر است.

فصل اوّل: مقدمه

- ۱-۱ لایه‌ی مرزی ۱
- ۲-۱ جدایی جریان ۲
- ۳-۱ گردابه‌ها ۴
- ۴-۱ انتقال حرارت از جریانبندها ۵
- ۵-۱ کاربرد جریانبندها در مهندسی ۶
- ۶-۱ نانوسیالات ۷
- ۱-۶-۱ تأثیر ذرات نانو بر انتقال حرارت ۷
- ۷-۱ معرفی نانوسیالات ۹
- ۱-۷-۱ تهیه‌ی نانوسیال ۹
- ۲-۷-۱ انواع نانوسیالات ۱۰
- ۸-۱ کاربرد نانوسیالات ۱۱
- ۹-۱ روش‌های تحلیل نانوسیالات ۱۴

فصل دوّم: بررسی و مرور تحقیقات گذشته

- ۱-۲ پیشینه‌ی تحقیق ۱۵
- ۱-۱-۲ مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی نانوسیال ۱۵
- ۲-۱-۲ مدل‌های مختلف جهت تخمین ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات ۱۹
- ۳-۱-۲ مدل‌های مختلف جهت تخمین ویسکوزیته‌ی نانوسیالات ۲۵
- ۴-۱-۲ مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی نانوسیالات در دانشگاه یزد ۲۹
- ۵-۱-۲ مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی بررسی جریان و انتقال حرارت حول سیلندر مربعی در سیالات مرسوم ۳۰

۲-۱-۶ مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی بررسی جریان و انتقال حرارت حول سیلندر
مربعی با استفاده از سیالات مرسوم در دانشگاه یزد ۳۳

۲-۱-۷ مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی جریان و انتقال حرارت نانوسیال حول
سیلندر ۳۴

۲-۲ جمع بندی و تعیین جایگاه مسأله حاضر ۳۵

فصل سوم: تعریف مسئله، جزئیات حل عددی و معادلات حاکم

۳-۱ تعریف مسئله ۳۷

۳-۲ معادلات حاکم بر جریان نانوسیال ۳۹

۳-۳ روش حل معادلات ۴۱

۳-۴ الگوریتم حل سرعت-فشار ۴۲

۳-۵ روند حل عددی ۴۲

۳-۶ شرایط مرزی ۴۴

۳-۶-۱ شرط مرزی ورودی ۴۴

۳-۶-۲ شرط مرزی خروجی ۴۴

۳-۶-۳ شرط مرزی دوردست ۴۴

۳-۶-۴ شرط مرزی عدم لغزش ۴۵

۳-۶-۵ شرط مرزی دمایی ۴۵

۳-۷ نحوه‌ی شبکه بندی ۴۵

۳-۸ حل مستقل از شبکه ۴۶

۳-۹ اعتبارسنجی ۴۹

فصل چهارم: نتایج

۴-۱ تأثیرات غلظت نانوسیال ۵۴

۴-۲ تأثیرات نوع نانوسیال ۶۱

۴-۳ تأثیرات اندازه‌ی نانوذره ۶۶

۴-۴ تأثیرات زاویه‌ی سیلندر ۷۱

۴-۵ بررسی تأثیر فاصله‌ی بین سیلندری در شرایط استفاده از دو سیلندر مربعی پشت سر هم به

جای تک سیلندر ۷۷

جمع‌بندی و پیشنهادات

۱-۵ جمع‌بندی نتایج ۸۵

۲-۵ پیشنهادات ۸۶

مراجع ۸۷

- شکل ۱-۱ نمایش شماتیک لایه‌ی مرزی در جریان سیال لزج بر روی صفحه‌ی تخت [۱]..... ۲
- شکل ۲-۱ تأثیر گرادیان فشار معکوس بر جدایی جریان [۱]..... ۴
- شکل ۳-۱ جدایی جریان از روی یک ایرفویل [۱]..... ۴
- شکل ۴-۱ عبور جریان از یک جسم گوشه‌دار [۲]..... ۵
- شکل ۱-۲ نمودار مقایسه‌ی عدد ناسلت متوسط برای اندازه متفاوت نانوذرات بر حسب عدد رینولدز [۲۵]..... ۱۶
- شکل ۲-۲ مقایسه داده‌های تجربی با مدل کو و کلینستریر [۳۲]..... ۲۱
- شکل ۳-۲ هندسه‌ی مورد بررسی توسط ترکی و همکاران [۶۱]..... ۳۱
- شکل ۴-۲ هندسه‌ی مورد بررسی توسط دیهمان و همکاران [۶۳]..... ۳۲
- شکل ۵-۲ هندسه‌ی مورد بررسی [۶۴]..... ۳۳
- شکل ۶-۲ هندسه‌ی مورد بررسی [۷۲]..... ۳۵
- شکل ۷-۲ نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات متفاوت بر حسب عدد پکلت [۷۲]..... ۳۵
- شکل ۱-۳ شماتیکی از هندسه‌ی تحت بررسی و شرایط مرزی در این تحقیق..... ۳۷
- شکل ۲-۳ الف) نحوه‌ی نامگذاری وجوه مختلف سیلندر و سیستم مختصات انتخابی ب) نمایش مؤلفه‌های سرعت و نیروهای وارد بر سیلندر..... ۳۸
- شکل ۳-۳ نمونه‌های از شبکه‌ی جابجانشده..... ۴۲
- شکل ۴-۳ الگوریتم SIMPLEC گذرا برای شبکه‌ی جابجا نشده..... ۴۳
- شکل ۵-۳ نمونه‌های از شبکه‌ی تولید شده حول سیلندر تحت زاویه..... ۴۶
- شکل ۶-۳ انواع توزیع نقاط در تولید شبکه..... ۴۶
- شکل ۷-۳ شبکه‌ی انتخاب شده..... ۴۸
- شکل ۸-۳ مقایسه‌ی نتایج..... ۵۰
- شکل ۱-۴ مقایسه‌ی عدد ناسلت موضعی حول سیلندر برای آب خالص و نانوسیال آب-اکسید مس..... ۵۴
- شکل ۲-۴ مقایسه‌ی عدد ناسلت موضعی حول سیلندر برای آب خالص و نانوسیال آب-اکسید مس..... ۵۵

- شکل ۳-۴ تغییرات عدد ناسلت متوسط حول سیلندر به ازای غلظت‌های مختلف برای نانوسیتال
 آب- اکسید مس ۵۶.....
- شکل ۴-۴ مقایسه‌ی خطوط دما ثابت برای سیتال خالص و نانوسیتال آب- اکسید مس ۵۷.....
- شکل ۵-۴ مقایسه‌ی خطوط دما ثابت برای سیتال خالص و نانوسیتال آب- اکسید مس ۵۷.....
- شکل ۶-۴ مقایسه‌ی خطوط جریان برای سیتال خالص و نانوسیتال آب- اکسید مس ۵۸.....
- شکل ۷-۴ مقایسه‌ی خطوط جریان برای سیتال خالص و نانوسیتال آب- اکسید مس ۵۸.....
- شکل ۸-۴ مقایسه‌ی ضریب درگ حول سیلندر برای نانوسیتال آب- اکسید مس ۵۹.....
- شکل ۹-۴ تغییرات ضرایب درگ فشاری و اصطکاکی حول سیلندر برای نانوسیتال آب- اکسید مس
 ۵۹.....
- شکل ۱۰-۴ تغییرات ضرایب درگ فشاری و اصطکاکی حول سیلندر نانوسیتال آب- اکسید مس ۶۰
 شکل ۱۱-۴ توزیع فشار موضعی بدون بعد حول سیلندر برای آب خالص و نانوسیتال آب- اکسید
 مس ۶۰.....
- شکل ۱۲-۴ توزیع فشار موضعی بدون بعد حول سیلندر برای آب خالص و نانوسیتال آب- اکسید
 مس ۶۱.....
- شکل ۱۳-۴ مقایسه‌ی عدد ناسلت متوسط حول سیلندر برای نانوسیتال آب- اکسید مس و
 آب- آلومینا ۶۳.....
- شکل ۱۴-۴ مقایسه‌ی ضریب درگ حول سیلندر برای نانوسیتال آب- اکسید مس و آب- آلومینا ۶۴
 شکل ۱۵-۴ تغییرات ضرایب درگ فشاری و اصطکاکی حول سیلندر برای نانوسیتال آب- اکسید
 مس ۶۴.....
- شکل ۱۶-۴ توزیع فشار بدون بعد حول سیلندر برای نانوسیتالات آب- اکسید مس و آب- آلومینا
 ۶۵.....
- شکل ۱۷-۴ مقایسه‌ی خطوط جریان برای نانوسیتالات (a) آب- اکسید مس و (b) آب- آلومینا .. ۶۵
 شکل ۱۸-۴ مقایسه‌ی عدد ناسلت متوسط حول سیلندر برای نانوسیتال آب- اکسید مس به ازای
 اندازه‌ی مختلف نانوذرات ۶۷.....
- شکل ۱۹-۴ مقایسه‌ی عدد ناسلت موضعی حول سیلندر برای اندازه‌های مختلف نانوذره ۶۷.....
- شکل ۲۰-۴ مقایسه‌ی ضرایب درگ و لیفت حول سیلندر برای نانوسیتال آب- اکسید مس برای
 اندازه‌ی مختلف نانوذرات ۶۹.....
- شکل ۲۱-۴ تغییرات ضرایب درگ فشاری و اصطکاکی حول سیلندر برای نانوسیتال آب- اکسید
 مس ۷۰.....

- شکل ۴-۲۲ توزیع فشار بدون بعد حول سیلندر برای آب خالص و نانوسیال آب-اکسید مس .. ۷۰
- شکل ۴-۲۳ مقایسه‌ی خطوط جریان برای (a) آب خالص و (b) نانوسیال آب-اکسید مس با نانوذراتی به قطر ۱۵ نانومتر .. ۷۱
- شکل ۴-۲۴ مقایسه‌ی عدد ناسلت موضعی حول سیلندر برای نانوسیال آب-اکسید مس برای زوایای مختلف سیلندر .. ۷۲
- شکل ۴-۲۵ مقایسه‌ی عدد ناسلت موضعی حول سیلندر برای نانوسیال آب-اکسید مس برای زوایای مختلف سیلندر .. ۷۲
- شکل ۴-۲۶ تغییرات عدد ناسلت متوسط حول سیلندر برای نانوسیال آب-اکسید مس براساس زاویه‌ی سیلندر .. ۷۳
- شکل ۴-۲۷ مقایسه‌ی ضرایب درگ و لیفت حول سیلندر برای نانوسیال آب-اکسید مس برای زوایای مختلف سیلندر .. ۷۴
- شکل ۴-۲۸ مقایسه‌ی خطوط جریان حول دو سیلندر برای نانوسیال آب-اکسید مس براساس زاویه‌ی سیلندر .. ۷۵
- شکل ۴-۲۹ مقایسه‌ی کانتور دما حول سیلندر برای نانوسیال آب-اکسید مس براساس زاویه‌ی سیلندر .. ۷۶
- شکل ۴-۳۰ مقایسه‌ی عدد ناسلت متوسط حول دو سیلندر برای نانوسیال آب-اکسید مس براساس فاصله‌ی بین سیلندری .. ۷۸
- شکل ۴-۳۱ مقایسه‌ی عدد ناسلت موضعی حول سیلندر اول برای نانوسیال آب-اکسید مس براساس فاصله‌ی بین سیلندری .. ۷۹
- شکل ۴-۳۲ مقایسه‌ی عدد ناسلت موضعی حول سیلندر دوم برای نانوسیال آب-اکسید مس براساس فاصله‌ی بین سیلندری .. ۸۰
- شکل ۴-۳۳ مقایسه‌ی خطوط جریان حول دو سیلندر برای نانوسیال آب-اکسید مس براساس فاصله‌ی بین سیلندری .. ۸۱
- شکل ۴-۳۴ مقایسه‌ی ضرایب درگ و لیفت حول دو سیلندر برای نانوسیال آب-اکسید مس براساس فاصله‌ی بین سیلندری .. ۸۲
- شکل ۴-۳۵ تغییرات ضرایب درگ فشاری و اصطکاکی حول سیلندر دوم برای نانوسیال آب-اکسید مس .. ۸۳
- شکل ۴-۳۶ توزیع فشار بدون بعد حول سیلندر دوم برای نانوسیال آب-اکسید مس .. ۸۳

شکل ۴-۳۷ کانتورهای دما حول دو سیلندر برای نانوسیال آب-اکسید مس براساس فاصله‌ی بین
سیلندری..... ۸۴

فهرست جداول

- جدول ۱-۳ مقادیر بی بعد مشخصه‌های هندسی مطرح شده در این تحقیق. ۳۸
- جدول ۲-۳ آزمایش حساسیت شبکه برای جریان و انتقال حرارت سیال خالص حول سیلندر
مربعی (Pr=0.7, Re=5) ۴۷
- جدول ۳-۳ آزمایش حساسیت شبکه برای جریان و انتقال حرارت نانوسیال آب-اکسید مس حول
سیلندر مربعی (Re = 25, dnp = 30nm, ϕ = 0.04) ۴۷
- جدول ۴-۳ مقایسه‌ی درصد اختلاف در نتایج پارامترهای کلی جریان ناشی از شبکه‌های مختلف
برای سیال خالص هوا و نانوسیال آب-اکسید مس حول سیلندر ۴۸
- جدول ۵-۳ مقایسه‌ی نتایج پروژه حاضر با نتایج پژوهش‌های دیگران برای جریان و انتقال حرارت
سیال خالص هوا حول سیلندر مربعی (Pr=0.7) ۴۹
- جدول ۶-۳ مقایسه‌ی درصد اختلاف در نتایج پارامترهای کلی جریان ناشی از نتایج کار حاضر با
پژوهش‌های دیگران برای جریان و انتقال حرارت سیال خالص هوا حول سیلندر مربعی (Pr=0.7)
..... ۴۹
- جدول ۱-۴ رابطه‌ی برازش منحنی [۳۹] ۵۲
- جدول ۲-۴ مشخصات فیزیکی مواد ۵۳
- جدول ۳-۴ مشخصات ترموفیزیکی نانوسیالات در جریان ورودی (T=300K) ۵۳
- جدول ۴-۴ مشخصات ترموفیزیکی سیال خالص آب (T=300K) ۵۴

فهرست نمادها

نسبت انسداد، $B=L/H$	B
ضریب درگ	C_d
ضریب لیفت	C_l
ظرفیت گرمایی ویژه، $(J/Kg\ k)$	C_p
قطر (m)	d
ضریب انتقال حرارت جابجایی، $W/m^2\ K$	h
ارتفاع دامنه‌ی محاسبات، m	H
ضریب هدایت حرارتی، $(W/m\ K)$	k
بخش استاتیک هدایت حرارتی نانوسیال مربوط به مدل کو و کلینستر (W/mK)	K_{static}
هدایت حرارتی نانوسیال مربوط به حرکت برآونی در مدل کو و کلینستر (W/mK)	$K_{Brownian}$
ضلع سیلندر، m	L
بردار نرمال بر سطح (بدون بعد)	n
عدد ناسلت، $Nu=hL/k$	Nu
فشار، Pa	p
احتمال حرکت یک ذره در مسیرهای مختلف	p
عدد پکلت، $Pe= Re \times Pr$	Pe
عدد پرائتل، $Pr= \mu c_p/k$	Pr
عدد رینولدز، $Re=\rho u_{\infty} L/\mu$	Re

شعاع (nm)	r
دما (K)	T
سرعت افقی، m/s	u
سرعت عمودی، m/s	v
سرعت برآونی نانوذرات	V_{Br}
بردار طولی، $x=x'/L$	X
فاصله‌ی سطح پشتی سیلندر از خروجی، m	X_d
فاصله‌ی سطح جلویی سیلندر از ورودی، m	X_u
بردار عرضی، $y=y'/L$	Y

نمادهای یونانی

غلظت حجمی نانوذره، %	ϕ
ثابت بولتزمن $(1.3807 \times 10^{-23} \text{ J/K})$	κ
چگالی، (Kg/m^3)	ρ
ویسکوزیته دینامیک (kg/m s)	μ
نسبت ضخامت نانولایه به شعاع نانوذرات	γ
ضخامت نانولایه (سطحی)	δ
نسبت وزنی (/.)	ω

پانویس ها

شرط ورودی	∞
-----------	----------

سيال پايه	bf
لايهى سطحى	lr
نانوذرات	np
نانوسيال	nf
ديوار	W

فصل اوّل

مقدمه

۱-۱ لایه‌ی مرزی

جدایی جریان از جمله پدیده‌های مهم در مکانیک سیالات است که عمدتاً تلاش محققین در حذف این پدیده و یا به تعویق انداختن آن در جریان‌ها، به دلیل اثرات مخرب آن است. مقدار لزجت^۱ در سیالات بسته به ساختمان داخلی آن دارای محدوده‌ی وسیعی است. این مقدار به عوامل مختلفی از جمله دمای سیال بستگی دارد. این ضریب با آنکه معمولاً دارای مقدار بسیار کوچکی است ولی بدون در نظر گرفتن آن، نمی‌توان رفتار سیال را به شکل واقعی بررسی نمود. تشکیل لایه مرزی^۲ به طور مستقیم با این ضرایب ارتباط داشته و بدون آن اصولاً تشکیل لایه‌ی مرزی به عنوان پدیده‌ای بسیار مهم در مکانیک سیالات قابل بحث نیست. در نظر گرفتن لزجت با شرط عدم لغزش^۳ روی دیوار در بررسی سیالات پیوسته^۴ بسیار متداول است. به عنوان مثال می‌توان تشکیل لایه‌ی مرزی در جریان یک سیال لزج روی یک صفحه تخت را مطرح نمود. سیال در تماس با سطح، دارای سرعت صفر می‌گردد که این همان شرط عدم لغزش است و با افزایش فاصله از سطح، سیال سرعت بیشتری داشته و در فاصله‌های دور از سطح، سیال تقریباً دارای سرعت جریان آزاد است. لایه‌ی مرزی که اولین بار توسط پранتل^۵ مطرح شد به شکل فاصله‌ای از سطح که سرعت سیال در آن محدوده کمتر از ۹۹٪ سرعت جریان آزاد است، تعریف می‌شود و در خارج از این محدوده سرعت سیال برابر با سرعت جریان آزاد فرض می‌گردد. بنابراین در لایه‌ی مرزی سرعت سیال در راستای موازی سطح، از صفر روی دیوار تا سرعت جریان آزاد در لبه‌ی لایه‌ی مرزی تغییر می‌کند که این تغییرات در نزدیک دیوار بسیار شدیدتر است و فرض می‌گردد

^۱ . Viscosity

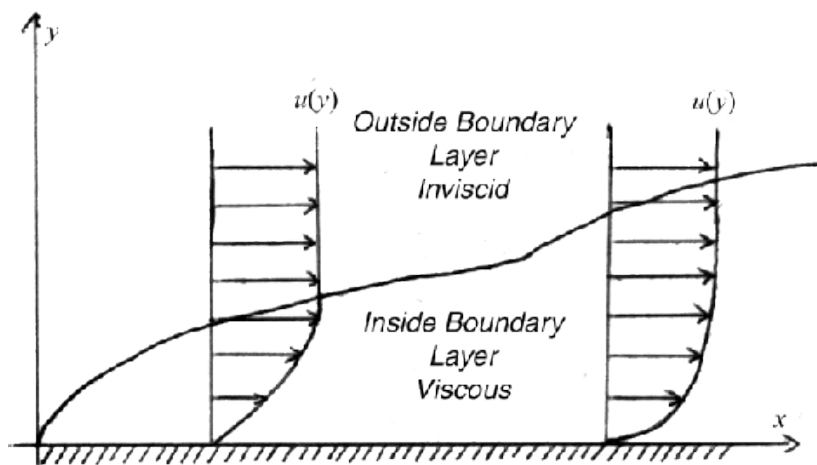
^۲ . Boundary Layer

^۳ . No Slip Condition

^۴ . Continuum Fluids

^۵ . Prandtl

سیال در خارج از لایه مرزی رفتار غیرلزج دارد. گرادیان سرعت باعث ایجاد تنش برشی می‌شود و می‌توان لایه‌ی مرزی را، ناحیه‌ای از جریان تعریف نمود که سرعت سیال تحت تأثیر تنش برشی مرز است. در شکل ۱-۱، شکل شماتیک لایه‌ی مرزی دیده می‌شود.



شکل ۱-۱ نمایش شماتیک لایه‌ی مرزی در جریان سیال لزج بر روی صفحه‌ی تخت [۱].

سیال داخل لایه‌ی مرزی علاوه بر تنش برشی، در معرض گرادیان فشار نیز قرار دارد که این گرادیان فشار توسط تئوری جریان پتانسیل برای خارج از لایه‌ی مرزی تعیین می‌شود. گرادیان فشار منفی در جهت جریان سیال را گرادیان فشار مطلوب نیز می‌نامند، زیرا در صورت کاهش فشار سیال در جهت جریان، گرادیان فشار به شکل عاملی برای افزایش مومنتوم سیال بوده و به حرکت جریان کمک می‌نماید ولی وجود گرادیان فشار مثبت باعث ایجاد نیرویی به سیال در خلاف جهت جریان می‌گردد که منجر به کاهش مومنتوم سیال می‌شود، به همین دلیل گرادیان فشار مثبت در لایه مرزی را گرادیان فشار معکوس می‌نامند.

۲-۱ جدایی جریان^۱

دو اثر بسیار مهم در جریان سیالات شامل اثرات اینرسی و لزجت است. میزان تأثیر متقابل این دو اثر با تعریف عدد بدون بعد رینولدز^۲ ارزیابی می‌گردد. این عدد به صورت نسبت نیروهای

^۱ . Flow Separation

^۲ . Reynolds Number

اینرسی به نیروهای لزجت تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{\rho U^2 L^2}{\frac{\mu U L^2}{L}} = \frac{\rho U L}{\mu} = \frac{U L}{\nu} \quad (1-1)$$

بزرگ بودن عدد رینولدز به معنی حاکم بودن اثرات اینرسی و کوچک بودن آن به معنای غالب بودن اثرات لزجت است. لازم به ذکر است که مفهوم عدد رینولدز در رابطه با مرزها که بر جریان اثر می‌گذارند، یک کمیت موضعی است. به عبارت دیگر انتخاب‌های مختلف طول مشخصه L در محاسبه عدد رینولدز، منجر به مقادیر مختلفی برای این پارامتر خواهد شد. بنابراین جریان بر روی یک جسم ممکن است محدوده وسیعی از اعداد رینولدز را شامل شود که بستگی به محلی دارد که مطالعه بر روی آن انجام می‌شود. بنابراین در بحث جریانی که از روی یک جسم عبور می‌کند، معمولاً طول مشخصه L به گونه‌ای انتخاب می‌شود که نمایانگر یک بعد کلی از جسم باشد.

اصولاً لزجت تمایل به متوقف کردن حرکت سیال دارد و در صورت نبود عاملی برای ادامه جریان، حرکت سیال به دلیل وجود لزجت به مرور کاهش پیدا کرده و نهایتاً متوقف می‌شود. عامل ادامه جریان در لایه مرزی گرادیان فشار است. همانگونه که قبلاً اشاره شد گرادیان فشار منفی در جهت جریان عامل تقویت جریان است و باعث افزایش مومنتوم سیال می‌گردد، در این حالت ضخامت لایه مرزی تمایل به کاهش دارد اما اگر فشار در جهت جریان افزایش یابد (گرادیان فشار معکوس) ضخامت لایه مرزی به سرعت افزایش می‌یابد در این حالت گرادیان فشار به شکل عاملی که با جریان مخالفت می‌کند عمل نموده و باعث کاهش مومنتوم سیال می‌گردد و به تدریج باعث متوقف شدن سیال روی مرز و حتی حرکت آن در خلاف جهت جریان می‌گردد، به این پدیده جدایی جریان می‌گویند. در نقطه جدایی جریان گرادیان سرعت برابر صفر بوده و خطّ جریان از مرز جدا می‌شود. در شکل ۱-۲ تأثیر گرادیان فشار معکوس بر جدایی جریان دیده می‌شود و در شکل ۱-۳ تصویری از جدایی جریان از روی یک ایرفویل نشان داده شده است.