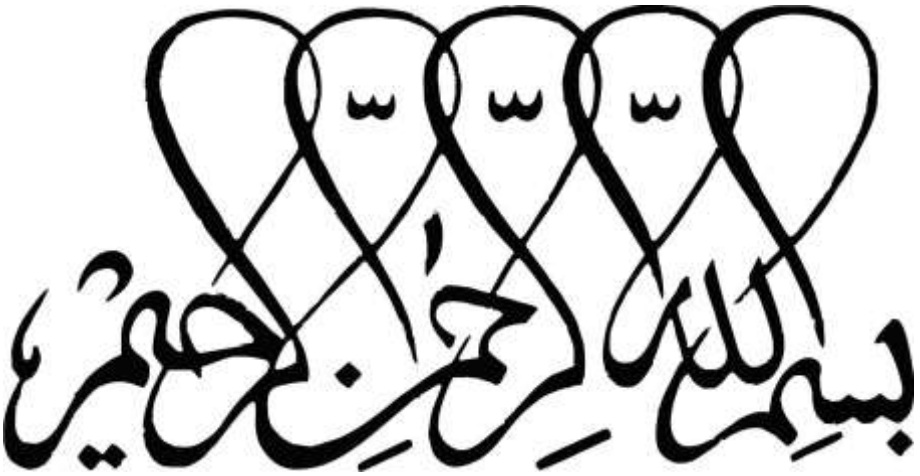
بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک گرایش تبدیل‌انرژی

بررسی هیدرودینامیک و انتقال‌حرارت سیال گازی در میکروکانال

استاد راهنما:
دکتر افراسیاب رئیسی

استاد مشاور:
دکتر بهزاد قاسمی

پژوهشگر:
رامیار مازوجی

مهر ماه ۱۳۹۱

دانشکده فنی و مهندسی

پایان‌نامه‌ی آقای **رامیار مازوجی** جهت اخذ درجه کارشناسی‌ارشد رشته مهندسی مکانیک تبدیل انرژی با عنوان « **بررسی هیدرودینامیک و انتقال‌حرارت سیال گازی در میکروکانال»** در تاریخ ۱۳۹۱/۷/۱۸ با حضور هیئت داوران زیر بررسی و با نمره ..... مورد تصویب نهایی قرار گرفت.

۱. استاد راهنمای پایان‌نامه	**دکتر افراسیاب رئیسی**	**با مرتبه علمی استادیار**	**امضاء**
۲. استاد مشاور پایان‌نامه	**دکتر بهزاد قاسمی**	**با مرتبه علمی دانشیار**	**امضاء**
۳. استاد داور داخلی گروه	**دکتر علیرضا شاطری**	**با مرتبه علمی استادیار**	**امضاء**
۴. استاد داور داخلی گروه	**دکتر مسعود ضیائی‌راد**	**با مرتبه علمی استادیار**	**امضاء**

دکتر بهزاد قاسمی

مدیر تحصیلات تکمیلی دانشکده فنی و مهندسی

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع
این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه شهرکرد است.

تشکر و قدردانی

همتم بدرقه راه کن ای طایر قدس

که دراز است ره مقصد و من نوسفرم

اکنون که مراحل انجام این پایان‌نامه به اتمام رسیده است، بر خود لازم می‌دانم که از معلمان بزرگ زندگیم پدر و مادر عزیزم، قدردانی به‌عمل آورم.

هم‌چنین از کمک‌های استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر رئیسی و راهنمایی‌های ارزنده‌ی جناب آقای دکتر قاسمی بی‌نهایت سپاسگزارم.

از برادر و خواهر عزیزم که همواره مایه دلگرمی بنده بوده‌اند و یکایک دوستانی که در راستای انجام این پروژه راهنما و یاری‌گر اینجانب بوده‌اند، سپاسگزارم.

هواخواه توأم جانا و می‌دانم که می‌دانی که هم نادیده می‌بینی و هم ننوشته می‌خوانی

رامیار مازوجی

پاییز ۱۳۹۱

به پاس تعبیر عظیم واژه‌ی ازخودگذشتگی...

به پاس عاطفه‌ی سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان...

و به پاس محبت‌های بی‌دریغشان...

این مجموعه را به **مادر مهربان** و **پدر عزیزم** تقدیم می‌کنم.

چکیده

جریان گازی در ابعاد میکرو به‌صورت گسترده در ابزارهای میکروالکترمکانیکال (MEMS) کاربرد دارد. در این پروژه هیدرودینامیک و انتقال حرارت جریان هوا درون یک میکروکانال، با دیواره‌ی عایق و دمای یکنواخت در مرزها مورد بررسی قرار گرفته‌است. جریان به‌صورت یکنواخت وارد میکروکانال می‌شود و لغزش سرعت و پرش دمایی با توجه به رژیم لغزشیِ جریان در دیواره‌ها حاکم است. طول میکروکانال به اندازه‌ی کافی بلند می‌باشد که در انتها شرط توسعه‌یافتگی هیدرودینامیکی و دمایی برقرار است. معادلات حاکم به روش حجم کنترل و با استفاده از الگوریتم سیمپل حل شده‌است. اثرات اتلاف لزجت، پرش دمایی، هدایت محوری، رقت و خزش بر جریان و انتقال حرارت به‌صورت توأم بررسی شده‌است.

لغزش سرعت در دیواره‌ها منجر به مسطح شدن پروفیل توزیع سرعت در مقاطع میکروکانال شده‌است. نتایج در حوزه‌ی انتقال حرارت بیانگر وابستگی کامل عدد ناسلت به اتلاف لزجت، رقت، هدایت محوری و پرش دمایی در مرزها بوده و با مقادیر آن در کانال‌های با ابعاد معمول متفاوت است. اتلاف لزجت به‌صورت چشم‌گیری عدد ناسلت را با پرش مواجه ساخته‌است. مقدار پرش ناسلت توسعه‌یافته نسبت به حالت بدون اتلاف لزجت، مستقل از عدد برینکمن بوده ولی محل وقوع پرش در میکروکانال، تابع عدد برینکمن می‌باشد. هم‌چنین افزایش رقت در دو جهت انتقال حرارت را تحت تأثیر قرار داده به‌صورتی‌که پرش دمایی، گرادیان دما و درنتیجه انتقال حرارت را کاهش می‌دهد. در حالی‌که سرعت لغزشی بالاتر، انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. از دیگر نتایج این‌که خزش حرارتی در نادسن‌های بالا بر روی سرعت لغزشی مؤثر بوده و در نادسن‌های پایین در رژیم لغزشی و در هندسه‌ی صفحات موازی قابل چشم‌پوشی است.

کلمات کلیدی: میکروکانال، لغزش سرعت، پرش دمایی، هدایت محوری، رقت، اتلاف لزجت، خزش، عدد ناسلت، عدد برینکمن

فهرست مطالب

عنوان فصل شماره صفحه

فصل اول - کلیات ۱۸

۱-۱ پیش‌گفتار ۱۸

۱-۲ جریان گاز در میکروکانال‌ها ۱۹

۱-۲-۱ ابعاد میکروسکوپی ۱۹

۱-۲-۲ فرض پیوستگی و تعادل ترمودینامیکی ۲۰

۱-۲-۳ رقت و عدد نادسن ۲۳

۱-۲-۴ رژیم جریان گازی در میکروکانال‌ها ۲۵

۱-۲-۵ اثرات دیواره و شرایط مرزی لغزشی ۲۶

۱-۲-۶ ضرائب تطابق ۲۹

۱-۲-۷ جریان گذرا و جریان مولکول‌های آزاد ۳۰

۱-۳ حل تحلیلی جریان لغزشی آرام کاملاً توسعه‌یافته بین صفحات موازی ۳۰

۱-۴ مروری بر تحقیقات گذشته ۳۳

۱-۵ جایگاه پروژه حاضر ۳۸

۱-۶ ساختار پایان‌نامه ۳۹

فصل دوم- بیان مسأله و فرمول‌بندی ۴۰

۲-۱ بیان مسأله ۴۰

۲-۲ معادلات حاکم بر جریان ۴۱

۲-۳ بی‌بعد کردن معادلات ۴۲

۲-۴ شرایط مرزی و بی‌بعدسازی آن ۴۳
۲-۴-۱ لغزش سرعت ۴۳
۲-۴-۲ پرش دمایی ۴۴
۲-۴-۳ توسعه‌یافتگی هیدرودینامیکی و دمایی ۴۴
۲-۴-۳-۱ توسعه‌یافتگی هیدرودینامیکی ۴۴
۲-۴-۳-۲ توسعه‌یافتگی دمایی ۴۵
۲-۴-۴ شرط مرزی در مرکز میکروکانال ۴۵
۲-۵ نحوه محاسبه‌ی انتقال حرارت ۴۵

فصل سوم - روش حل عددی ۴۷
۳-۱ گسسته سازی معادلات ۴۷
۳-۲ معادله عمومی ۴۸
۳-۳ جبری‌کردن معادله عمومی ۴۹
۳-۴ جبری کردن جمله‌های چشمه و گرادیان فشار ۵۰
۳-۵ شکل کلی معادله‌های جبری ۵۱
۳-۶ استفاده از شبکه تحویل یافته یا جابجا شده ۵۱
۳-۶-۱ جبری کردن معادله u ۵۲
۳-۶-۲ جبری کردن معادله v ۵۵
۳-۶-۳ معادله تصحیح فشار ۵۷
۳-۶-۴ جبری کردن معادله انرژی ۶۰
۳-۷ شرایط مرزی دیوار ۶۲
۳-۸ ضریب رهایی ۶۵

۳-۹ الگوریتم حل ۶۵

فصل چهارم - ارائه و بررسی نتایج ۶۷

۴-۱ کلیات ۶۷

۴-۲ انتخاب شبکه حل و صحت‌سنجی کد نوشته شده ۶۷

۴-۳ هیدرودینامیک جریان هوا در میکروکانال ۶۹

۴-۳-۱ سرعت محوری ۷۰

۴-۳-۲ سرعت عرضی ۷۱

۴-۳-۳ اثر ترم خزش حرارتی ۷۲

۴-۳-۴ خطوط جریان ۷۳

۴-۴ بررسی میدان دما و انتقال حرارت ۷۴

۴-۴-۱ بررسی توسعه‌یافتگی ۷۴

۴-۴-۲ خطوط هم‌دما ۷۵

۴-۴-۳ پرش دمایی ۷۹

۴-۴-۴ دمای خط مرکزی ۸۱

۴-۴-۵ دمای میانگین ۸۲

۴-۴-۶ اثر اتلاف لزجت بر روی ناسلت محلی در برینکمن مثبت ۸۲

۴-۴-۷ اثر اتلاف لزجت بر روی ناسلت محلی در برینکمن منفی ۸۳

۴-۴-۸ مطالعه‌ی اثرات لزجت روی انتقال حرارت در رقت‌های مختلف ۸۵

۴-۴-۹ بررسی عدد ناسلت توسعه‌یافته ۸۶

۴-۴-۱۰ دمای میانگین در ناحیه‌ی عایق و ناحیه‌ی با دمای یکنواخت دیواره ۸۸

۴-۵ نتیجه‌گیری ۹۱

۴-۶ پیشنهاد برای کارهای آینده ۹۲

پیوست الف ۸۵

پیوست ب ۸۶

منابع و مآخذ ۸۹

فهرست شکل‌ها

عنوان شکل شماره صفحه

شکل۱-۱ محدودیت‌های تقریبی اعمال شده جهت مدل کردن جریان پیوسته گازی میکرو[۳] ۲۳

شکل ۱-۲ رژیم‌های جریان گاز بر اساس عدد نادسن ۲۴

شکل ۱-۳ محدوده کاری سیستم‌های میکرو معمول [۴] ۲۵

شکل ۱-۴ رژیم‌ها و مدل‌های مختلف جریان گازی مورد استفاده برحسب عدد نادسن و شرایط مرزی ۲۶

شکل۱-۵ فرضیه ماکسول(a) انعکاس کاملاً آینه‌ای (b)کسر $1-\sigma$ از مولکول‌ها[۸] ۲۷

شکل۱-۶ جریان بین صفحات موازی ۳۰

شکل ۲-۱ دامنه فیزیکی و محاسباتی ۴۰

شکل۳-۱ حجم کنترل جابجا شده u و مولفه‌های سرعت همسایه آن ۵۲

شکل۳-۲ حجم کنترل جابجاشده v و مؤلفه‌های سرعت همسایه آن ۵۵

شکل ۳-۳ حجم کنترل معادله تصحیح فشار ۵۷

شکل۳-۴ حجم کنترل معادله انرژی ۶۰

شکل۳-۵ سلول سرعت u در مرز دیوار ۶۳

شکل۳-۶ سلول سرعت v در مرز دیوار ۶۳

شکل۳-۷ توزیع سرعت در دیواره ۶۴

شکل۴-۱ عدد ناسلت توسعه‌یافته بر حسب تعداد نقاط شبکه ۶۸

شکل۴-۲ پروفیل سرعت توسعه‌یافته در اعداد نادسن مختلف (برنامه‌ی حاضر(خطوط)، و مرجع[۱] (نشانه‌ها)) ۶۹

شکل۴-۳ پروفیل سرعت محوری در مقاطع مختلف $Pe=5.0$, $\Pr=0.7$, $Br=0.0$ ۷۰

شکل۴-۴ پروفیل سرعت عرضی در مقاطع مختلف $Pe=5.0$, $\Pr=0.7$, $Br=0.0$ ۷۲

شکل۴-۵ سرعت لغزشی در دیواره بر حسب طول میکروکانال با احتساب اثر خزش حرارتی ۷۳

شکل ۴-۶ خطوط جریان در پکله‌های مختلف $Kn = 0.1$, $Br = 0.0$ ۷۴

شکل ۴-۷ خطوط جریان در رقت‌های مختلف $Pe = 20$, $Br = 0.0$ ۷۴

شکل ۴-۸ خطوط هم‌دما در حالت بدون اتلاف لزجت و $Kn = 0.04$ و $\kappa = 1.667$ در پکله‌های مختلف ۷۶

شکل ۴-۹ خطوط هم‌دما در حالت $Br = -0.01$ و $Kn = 0.04$ و $\kappa = 1.667$ در پکله‌های مختلف. ۷۷

شکل ۴-۱۰ خطوط هم‌دما در حالت $Br = +0.01$ و $Kn = 0.04$ و $\kappa = 1.667$ در پکله‌های مختلف. ۷۸

شکل ۴-۱۱ دمای سیال در دیواره با اعمال شرط مرزی پرش دمایی در رقت‌های مختلف ۷۹

شکل ۴-۱۲ دمای سیال در دیواره با اعمال شرط مرزی پرش دمایی در پکله‌های مختلف ۸۰

شکل ۴-۱۳ دمای سیال در دیواره با اعمال شرط مرزی پرش دمایی در کاپاهای مختلف ۸۰

شکل ۴-۱۴ دمای خط مرکزی میکروکانال در رقت‌های مختلف ۸۱

شکل ۴-۱۵ دمای میانگین برحسب طول میکروکانال در پکله‌های مختلف (بدون اتلاف لزجت و با اتلاف لزجت) ۸۱

شکل۴-۱۶ عدد ناسلت محلی برحسب طول بی‌بعد ξ در برینکمن‌های مثبت و کاپاهای مختلف ۸۲

شکل ۴-۱۷ عدد ناسلت محلی برحسب طول بی‌بعد ξ در برینکمن‌های مثبت و رقت‌های مختلف ۸۳

شکل ۴-۱۸ عدد ناسلت محلی برحسب طول بی‌بعد ξ در برینکمن‌های منفی و کاپاهای مختلف ۸۴

شکل ۴-۱۹ عدد ناسلت محلی برحسب طول بی‌بعد ξ در برینکمن‌های منفی و رقت‌های مختلف ۸۴

شکل ۴-۲۰ عدد ناسلت محلی برحسب طول بی‌بعد ξ با احتساب اتلاف لزجت در رقت‌های مختلف ۸۵

شکل ۴-۲۱ عدد ناسلت محلی برحسب طول بی‌بعد ξ با احتساب و بدون اتلاف لزجت در رقت‌های مختلف ۸۶

شکل ۴-۲۲ عدد ناسلت توسعه‌یافته برحسب عدد نادسن با احتساب اتلاف لزجت و بدون اتلاف لزجت ۸۷

شکل ۴-۲۳ دمای میانگین سیال برحسب طول میکروکانال درنادسن‌های مختلف ۸۹

شکل ۴-۲۴ دمای میانگین سیال برحسب طول برینکمن‌های مثبت و منفی در پکله‌های مختلف ۸۹

شکل ۴-۲۵ دمای میانگین سیال در ناحیه‌ی عایق میکروکانال با حضور اتلاف لزجت در پکله‌های مختلف ۹۰

شکل ۴-۲۶ دمای میانگین سیال در ناحیه‌ی عایق و دماثابتِ میکروکانال با حضور اتلاف لزجت ۹۰

فهرست جدول‌ها

عنوان جدول شماره صفحه

جدول ۱-۱ قطر متوسط برخورد مولکولی برای گازهای مختلف[۱] ۲۰

جدول ۱-۲ مسیر آزاد میانگین، سرعت برخورد،لزجت دینامیکی در مدل‌های مختلف برخورد IPL [۳] ۲۲

جدول ۳-۱ عبارت‌های مربوط به معادلات جریان آرام ۴۹

جدول ۴-۱ اعداد ناسلت توسعه‌یافته در مرجع[۳۳] و برنامه‌ی حاضر ۶۹

جدول ۴-۲ اعداد ناسلت توسعه‌یافته در $Br = 0.01$ و $Kn = 0.04$ در طول‌های مختلف ۷۵

جدول ۴-۳ اعداد ناسلت توسعه‌یافته بدون احتساب اتلاف لزجت در پکله و اعداد نادسن مختلف ۸۷

جدول ۴-۴ اعداد ناسلت توسعه‌یافته با احتساب اتلاف لزجت در پکله و اعداد نادسن مختلف ۸۸

فهرست علائم

نمادها

a	سرعت صوت
Br	عدد برینکمن $Br = \left(\mu u_m^2 / k''(T_i - T_w)\right)$
C_f	ضریب اصطکاک
c_p	گرمای ویژه
D	قطر میکروکانال با مقطع دایروی
D_H	قطر هیدرولیکی
H	فاصله‌ی صفحات موازی
K	ضریب هدایت حرارتی
Kn	عدد بی‌بعد نادسن $Kn = \left(\lambda / D\right)$
L	طول میکروکانال
Ma	عدد بی‌بعد ماخ $Ma = \left(u/a\right)$
Nu	عدد ناسلت $Nu = hD_h / k$
P	فشار
Pe	عدد پکله $Pe = \mathrm{Re}.\mathrm{Pr}$
Pr	عدد پرانتل $Pr = \left(\mu c_P / k\right)$
R	ثابت جهانی گازها
Re	عدد رینولدز $Re = \left(\rho u_m R / \mu\right)$
S	جمله چشمه
T	دما
u	سرعت محوری
v	سرعت عرضی
x	جهت محوری میکروکانال
y	جهت عرضی میکروکانال

علائم یونانی

β	ضریب لغزشی
γ	نسبت حرارتی ویژه
Δx^*	فواصل بی بعد شبکه در راستای محوری
Δy^*	فواصل بی بعد شبکه در راستای عرضی
δ	فاصله متوسط بین مولکولی
φ	متغییر وابسته بی بعد

κ	معیار پرش دمایی روی مرز
λ	طول مسیر آزاد میانگین
μ	لزجت دینامیکی سیال
ρ	چگالی
σ	ضریب سازگاری مومنتوم
σ_T	ضریب سازگاری دما
τ	تنش برشی $\tau = \mu\left(\partial u/\partial r\right)_w$
ς	فاصله‌ی پرش
ξ	متغییر بی‌بعد طولی $\xi = x^* / Re.Pr$
ρ	چگالی سیال

بالانویس

$*$	بی بعد سازی شده
$\bar{*}$	تعریف جدید u, v, P
$'$	متغیر تصحیح
$''$	نشانگر متغییر در ناحیه‌ی بعد از عایق
$\bar{}$	متوسط

زیرنویس

cent.	خط مرکزی
i	ورودی
m	میانگین
Max	بیشینه
n	راستای عمود
s	خواص سیال در مجاورت سطح
slip	پارامتر لغزش‌یافته در مجاورت سطح
Sv	حجم نمونه
T	راستای مماسی
w	دیواره

فصل اول

کلیات

۱-۱ پیش‌گفتار

در سال‌های اخیر نیازهای تحقیقاتی و استفاده‌های تجاری از وسایل مکانیکی با ابعاد میکرو و نانو رواج بسیار زیادی یافته‌است. کانال‌ها از مهم‌ترین بخش‌های این سیستم‌ها هستند که به‌منظور انتقال سیال با اهداف مختلف مانند انتقال حرارت، جابجایی و سوخت‌رسانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. کانال‌هایی با این ابعاد در سیستم‌های میکروالکترومکانیکال (MEMS) (میکروپمپ‌ها، میکروریفریجیتورها، سینک‌های حرارتی میکروکانال و ابزارهای بیومکانیکال) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. هم‌چنین اهمیت بررسی سیستم‌های مشابهِ جریان در میکروکانال‌ها از جمله جریان در مویرگ‌ها و دیگر بافت‌های حیاتیِ با ابعاد میکرو باعث شده‌است تا این زمینه به یکی از زمینه‌های پرطرفدار تبدیل شود. یکی دیگر از مواردی که باعث شده‌است جریان گاز در میکروکانال‌ها مورد مطالعه‌ی زیادی قرار گیرد وجود تشابه نسبی بین جریان در ابعاد میکرو و جریان‌های کم‌فشار در صنایع هوافضا می‌باشد.

به‌واسطه‌ی این گسترش سریع، نیاز به تدوین مهندسیِ این نوع وسایل، به‌شدت رو به افزایش است. زیرا رفتار سیال در ابعاد میکرونی و پایین‌تر از آن، دارای تفاوت‌های فراوانی با آن‌چه که در ابعاد متداول با آن مواجه هستیم، می‌باشد. ازجمله‌ی این تفاوت‌ها که برای نخستین بار در کارهای تجربی نشان داده‌شد، گذار از جریان آرام به مغشوش در میکروکانال‌ها می‌باشد که در رینولدزهای پایین‌تر از حد انتظار رخ می‌دهد. هم‌چنین رابطه‌ی بین ضریب اصطکاک و عدد رینولدز با ابعاد معمول تفاوت اساسی دارد. این تفاوت‌ها در مورد عدد ناسلت نیز دیده‌می‌شود. مطالعات اولیه‌ی آزمایشگاهی نشان دادند که جریان سیال و انتقال حرارت در میکروکانال‌ها با

تئوری‌های معمول که براساس فرضیه‌ی پیوستگی به‌دست آمده‌اند، قابل توصیف نیستند. در کانال‌های با ابعاد ماکرو سرعت و دمای سیال روی سطح جامد، برابر با سرعت و دمای دیواره می‌باشد، اما این شرایط برای جریان گازهای رقیق در میکروکانال‌ها برقرار نیست. در جریان گاز در میکروکانال‌ها، سیال بر روی دیواره‌ی کانال با یک سرعت مماسی محدود می‌لغزد. هم‌چنین بین دمای سیال و دیواره نیز یک پرش دمایی وجود دارد.

با وجود شرایط ذکرشده، محققان به این نتیجه رسیده‌اند که هر چند فرضیات پیوستگی به‌علت اثرات رقت برقرار نیست، اما معادلات ناویراستوکس با مقداری اصلاحات در محدوده‌ی جریان لغزشی قابل استفاده است. برخلاف ماکروکانال‌ها که رژیم جریان گاز به اثرات سرعت و لزجت (عدد رینولدز) و قابلیت تراکم‌پذیری ربط داده می‌شود، در میکروکانال‌ها مهم‌ترین پارامتر، رقت می‌باشد که با عدد نادسن کمیت‌گذاری و رژیم جریان نیز به این خاصیت ارجاع داده می‌شود.

دو روش برای مدل‌کردن میدان جریان و انتقال حرارت وجود دارد. مدل نخست که به مدل مولکولی شناخته می‌شود بدین صورت عمل می‌کند که مجموعه‌ای از مولکول‌های مجزا در نظر گرفته‌می‌شود و با استفاده از آمار و احتمالات به بررسی و پیش‌بینی رفتار سیال پرداخته می‌شود. در روش دوم که روش مدل‌سازی پیوسته نام دارد، سیال به‌عنوان یک محیط پیوسته و قابل تقسیم به بی‌نهایت فرض می‌شود. در این روش فشار، چگالی، سرعت و ... در هر نقطه از فضا و زمان تعریف می‌شود و قانون بقای جرم، مومنتوم و انرژی در قالب معادلات دیفرانسیل غیرخطی ارائه می‌شوند که با حل این معادلات پیش‌بینی رفتار سیال صورت می‌گیرد.

۱-۲ جریان گاز در میکروکانال‌ها

۱-۲-۱ ابعاد میکروسکوپی

یکی از مواردی که باعث می‌شود پیش‌بینی رفتار سیال در وسایل با سایز میکرو، اهمیت پیدا کند، این است که فرض جریان پیوسته و به‌کارگیری آن در حل معادلات ناویراستوکس، صحیح نمی‌باشد. زیرا مسیر آزاد میانگین مولکولی سیال در مقایسه با مشخصات ابعادی سیستم غیرقابل اغماض است. در این حالت مولکول‌های مجزای گاز، اثرات رقت و غیرپیوسته بودن جریان، شرایط انتقال مومنتوم را تحت تأثیر قرار می‌دهد و علاوه بر پارامترهای نرخ حجمی جریان، پروفیل‌های سرعت و تنش برشیِ دیواره‌ی مرزی و انتقال حرارت در جریان سیال گازی، طول ورودی هیدرودینامیکی نیز از غیرپیوسته بودن جریان تأثیر می‌پذیرد.

برای مدل‌کردن جریان گاز در ابعاد میکرو چند پارامتر که از جنس طول می‌باشند، حائز اهمیتند. این پارامترها عبارتند از قطر برخورد مولکولی (σ)، فاصله متوسط مولکولی(δ) و مسیر آزاد میانگین(λ). مسیر آزاد میانگین مولکولی متوسط فاصله‌ی طی شده توسط مولکول بین دو برخورد متوالی می‌باشد. این پارامتر به‌صورت معادله (۱-۱) تعریف می‌شود[۱]:

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi p \sigma^2} \qquad (۱-۱)$$

که در آن k ثابت بولتزمن و برابر با $1.380662\times10^{-23}(\frac{J}{K})$ می‌باشد. در دما و فشار استاندارد محیط (SATP) که به‌صورت $T=298.15k^{0}$ و $P=10^{+5}N/m^{2}$ تعریف می‌شود، خواهیم داشت:

$$\lambda=\frac{9.265\times10^{-27}}{\sigma^{2}} \qquad (۲-۱)$$

برای هوا که سیال گازی مورد بررسی در این پروژه می‌باشد، قطر برخورد مولکول‌ها برابر $3.66\times10^{-10}m$ است که مسیر آزاد میانگین مولکولی برابر با $6.92\times10^{-8}m$ را می‌دهد، یعنی $69.2nm$ (نانومتر). در جدول (۱-۱) قطر متوسط برخورد مولکولی برای گازهای مختلف رایج در صنعت آورده شده‌است.

جدول ۱-۱ قطر متوسط برخورد مولکولی برای گازهای مختلف[۱]

گاز	$\sigma(m)$
Air	3.66×10^{-10}
Ar	3.58×10^{-10}
CO_2	4.53×10^{-10}
H_2	2.71×10^{-10}
He	2.15×10^{-10}
Kr	4.08×10^{-10}
N_2	3.70×10^{-10}
NH_3	4.32×10^{-10}
Ne	2.54×10^{-10}
O_2	3.55×10^{-10}
Xe	4.78×10^{-10}

۱-۲-۲ فرض پیوستگی و تعادل ترمودینامیکی

در مکانیک سیالات کلاسیک فرض می‌شود که همه‌ی کمیت‌های ماکروسکوپیک به‌طور پیوسته از نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر تغییر می‌کنند. این فرض از آن جهت که نقاط ناپیوستگی را در نظر نمی‌گیرد و از اثر کمیت‌های میکروسکوپی روی یک حجم کنترل مشخص متوسط‌گیری می‌کند، مسائل را بسیار ساده می‌کند. به‌عنوان مثال برای جریان گاز درون یک کانال که سرعت ماکروسکوپیک آن، در رنج صفر تا یک متر بر ثانیه و به موازات محور کانال می‌باشد، سرعت مولکول‌های آن از مرتبه $1km/s$ و به لحاظ راستا و جهت نیز کاملاً نامنظم می‌باشند. بدیهی است که بررسی مسأله در حالت اول بسیار ساده‌تر است. سایر کمیت‌های مکانیکی و ترمودینامیکی نیز دارای وضعیتی مشابه می‌باشند.