بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی

بخش مهندسی مکانیک

پایان‌نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

شبیه‌سازی جریان سیال در یاتاقانهای ژورنال میکرو با استفاده از روش شبکه بولتزمن

استاد راهنما:

دکتر محمد رهنما

استاد مشاور:

دکتر مهران عامری

مؤلف:

مهرداد نیک‌آئین

شهریورماه ۱۳۹۰

این پایان‌نامه به عنوان یکی از شرایط درجه کارشناسی ارشد به

بخش مهندسی مکانیک

دانشکده فنی مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

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

دانشجو : مهرداد نیک‌آئین

استاد راهنما : آقای دکتر محمد رهنما

استاد مشاور : آقای دکتر مهران عامری

داور ۱ : آقای دکتر مظفرعلی مهرابیان

داور۲ : آقای دکتر سید عبدالرضا گنجعلیخان نسب

نماینده‌ی تحصیلات تکمیلی در جلسه دفاع: آقای دکتر حجت اله رنجبر

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده : آقای دکتر حجت اله رنجبر

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

تشکر و قدردانی :

خدای بزرگ را شاکرم که در مدت تحصیل همواره یاری دهنده من بوده و به من صبر و شکیبایی در برابر مشکلات و ناملایمات عنایت فرمود. پاک‌ترین و صادقانه‌ترین سپاس و قدردانی خود را از پدر و مادر فداکارم دارم که دعای خیرشان همواره، همراه و پشتیبان من بوده و دریای بیکران مهر خویش را بی‌دریغ بر من ارزانی داشتند. از همسرم از صمیم قلب تشکر می‌نمایم که جملات از تشکر صبر او قاصرند.

برترین سپاس‌ها را تقدیم اساتید ارجمندم جناب آقای دکتر محمد رهنما و جناب آقای دکتر سعید جعفری می‌نمایم که در انجام این پایان‌نامه صمیمانه مرا یاری فرمودند.از تمامی اساتید محترم بخش مهندسی مکانیک دانشگاه شهید باهنر کرمان کمال تشکر را دارم.

مهرداد نیک آئین

شهریورماه ۹۰

تقدیم به :

همسر عزیز و مهربانم.

چکیده

هدف از این پایان‌نامه توسعه یک برنامه کامپیوتری برای جریان گاز با ابعاد میکرو، بین دو استوانه هم‌مرکز، توسط روش شبکه بولتزمن می‌باشد. به منظور مدل کردن اندرکنش بین گاز و دیواره جامد از یک شرط مرزی محلی، برگرفته شده ازتئوری جنبشی گازها استفاده شده است. شبیه‌سازیهای عددی به گونه‌ای انجام شده‌اند که بتوانیم توزیع سرعت مماسی را تحت شرایط مختلف جریان مورد بررسی قرار دهیم.

از روش ترکیبی پخش مولکولی و کمانه کردن در جریان میکرو، و از روش کمانه کردن در جریان ماکرو، برای اعمال شرط مرزی روی دیوار انحنادار استفاده شده است. برنامه کامپیوتری اولیه جریان بین دو استوانه هم‌مرکز میکرو را شبیه‌سازی می‌کرد. نتایج برای دو استوانه هم‌مرکز با ابعاد میکرو بررسی و با نتایج دیگر کارهای انجام شده توسط روش شبکه بولتزمن مقایسه گردیدند و صحت برنامه تایید شد. سپس با توسعه برنامه مذکور و تولید شرط مرزی سرعت لغزشی مرتبه دوم، به یک شبیه‌سازی عددی جهت مشاهده رفتار یاتاقانهای ژورنال میکرو در محدوده رژیم لغزشی پرداختیم و نتائج حاصل از توزیع فشار به دست آمده با نتائج روش باهم‌گذاری طیفی (Spectral Collocation)، مقایسه گردیدند و توافق بسیار خوبی به دست آمد. در پایان این مرحله مشخص شد که شرط مرزی جریان لغزشی، پایداری نقاط تعادلی این یاتاقانها را افزایش می‌دهد و شرط مرزی بسیار مناسبی است. در نهایت تمامی مراحل بالا در بعد ماکرو نیز شبیه‌سازی شدند.

کلمات کلیدی : جریانهای میکرو، روش شبکه بولتزمن، جریان میکرو کوئت استوانه ای، یاتاقان ژورنال با سیال روان کننده گازی در ابعاد میکرو و ماکرو

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
تشکر و قدردانی	د
تقدیم به	ه
چکیده	و
فهرست مطالب	ز
فهرست شکل ها و نمودارها	ک
فهرست جدول‌ها	س
فصل یک: مقدمه	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۱-۲ مروری بر کارهای انجام شده	۵
فصل دو: روش شبکه بولتزمن	۱۰
۲-۱ مدل کردن سیالات	۱۱
۲-۲ منشاء روش شبکه بولتزمن: ماشین شبکه گاز	۱۸
۲-۲-۱ معادله بولتزمن	۲۱
۲-۳ تبدیل واحدهای شبکه به واحدهای SI	۲۲

فصل سه: روش عددی شبکه بولتزمن در جریانهای ماکرو ۲۴

۳-۱ تئوری رینولدز در روانکاری هیدرودینامیکی ۲۵

۳-۱-۱ تعادل نیروها ۲۶

۳-۱-۲ سرعت جریان ۲۸

۳-۱-۳ معادله پیوستگی ۲۸

۳-۱-۴ به دست آوردن معادله رینولدز ۲۹

۳-۱-۵ یاتاقانهای ژورنال با طول بینهایت ۳۰

۳-۲ روش شبکه بولتزمن ۳۰

۳-۲-۱ اپراتور برخورد و تک زمان آرامش (SRT) ۳۱

۳-۲-۲ شرط مرزی کمانه کردن برای روش شبکه بولتزمن در جریان کوئت استوانه‌ای در مقیاس ماکرو ۳۴

۳-۳ الگوریتم حل در روش شبکه بولتزمن ۳۵

فصل چهار: روش عددی شبکه بولتزمن در جریانهای میکرو ۳۷

۴-۱ روش شبکه بولتزمن ۳۸

۴-۱-۱ اپراتور برخورد و زمان آرامش چندگانه (MRT) ۳۹

۴-۱-۲ شرط مرزی ترکیبی پخش مولکولی و کمانه کردن برای روش شبکه بولتزمن در جریان میکرو کوئت استوانه‌ای ۴۱

فصل پنج: ارائه نتائج و بحث ۴۵

۵-۱ شبیه‌سازی جریان کوئت استوانه‌ای در مقیاس ماکرو (دو استوانه هم‌مرکز)..... ۴۶

۵-۱-۱ نمایه توزیع فشار در جریان کوئت استوانه‌ای با ابعاد ماکرو..... ۴۶

۵-۲ شبیه‌سازی یاتاقانهای ژورنال گازی با ابعاد ماکرو در اعداد رینولدز و نسبتهای خروج از مرکز مختلف..... ۴۷

۵-۲-۱ نمایه توزیع فشار در یاتاقانهای ژورنال گازی با ابعاد ماکرو در عدد رینولدز ۳۸ و نسبتهای خروج از مرکز مختلف..... ۴۹

۵-۳ شبیه‌سازی جریان میکرو کوئت استوانه‌ای (دو استوانه هم‌مرکز)..... ۴۹

۵-۳-۱ نمایه توزیع سرعت در جریان میکروکوئت استوانه‌ای..... ۵۳

۵-۳-۲ نمایه توزیع فشار در جریان میکروکوئت استوانه‌ای..... ۵۴

۵-۴ شبیه‌سازی یاتاقانهای ژورنال گازی خروج از مرکز با ابعاد میکرو با شرط مرزی سرعت لغزشی مرتبه دوم..... ۵۵

۵-۴-۱ مقایسه توزیع‌های فشار در یاتاقانهای ژورنال گازی خروج از مرکز با ابعاد میکرو در اعداد نودسن مختلف بین روشهای Spectral Collocation و MRT-LBM..... ۵۵

۵-۴-۲ نمایه‌های توزیع فشار در میکرو یاتاقانهای ژورنال گازی خروج از مرکز با نسبت خروج از مرکز ۰/۳ در اعداد نودسن مختلف..... ۵۵

۵-۴-۳ نمایه‌های توزیع سرعت در یاتاقانهای ژورنال گازی با نسبت خروج از مرکز ۰/۳ در اعداد

نودسن مختلف..... ۵۸
۵-۴-۴ نمایه‌های توزیع فشار در میکرو یاتاقانهای ژورنال گازی درعدد نودسن ۰/۰۵ با نسبت‌های
خروج از مرکز مختلف..... ۶۱
۵-۴-۵ نمایه‌های توزیع سرعت در میکرو یاتاقانهای ژورنال گازی درعدد نودسن ۰/۰۵ با نسبت‌های
خروج از مرکز مختلف..... ۶۱
فصل شش: نتیجه گیری..... ۶۶
۶-۱ نتیجه گیری..... ۶۷
۶-۲ ارائه پیشنهاد برای تحقیقات آتی..... ۷۰
فصل هفت: منابع و مآخذ..... ۷۱
چکیده انگلیسی..... ۷۵

فهرست شکل‌ها و نمودارها

عنوان شکل‌ها و نمودارها صفحه

شکل (۲-۱)-تقسیم بندی مدلهای سیال ۱۱

شکل (۲-۲)-رژیم های مختلف سیال بر حسب عدد نودسن ۱۴

شکل (۲-۳)-جایگاه روش شبکه بولتزمن ۱۸

شکل (۲-۴)-شبکه های دو بعدی مرسوم برای روش LGA ۱۹

شکل (۳-۱)-فیلم سیال بین دو سطح جامد ۲۵

شکل (۳-۲)-یک المان کوچک از سیال ۲۶

شکل (۳-۳)- شبکه D_2Q_9: جهات شبکه و بردارهای سرعت شبکه ۳۳

شکل (۳-۴)-شرط مرزی کمانه کردن ۳۵

شکل (۴-۱)- تقریب یک مرزی منحنی. دایره پرشده: گره مرزی که توسط حداقل یک گره دیواره جامد احاطه شده است، دایره خالی: گره جامد که توسط حداقل یک گره سیال احاطه شده است،. مربع پرشده: نقطه میانی اتصال بین یک گره سیال و یک گره جامد. خط جامد: مرز فیزیکی، خط‌چین: شبه مرز(مرز زیگ-زاگ) ۴۲

شکل (۴-۲)- مرز زیگ‌زاگ جهت شبیه‌سازی انحنای سطح استوانه‌های داخلی و خارجی ۴۲

شکل (۵-۱)- نمایه توزیع فشار در جریان کوئت استوانه‌ای (دو استوانه هم مرکز) در عدد

رینولدز ۳۸..... ۴۶

شکل (۵-۲)- نمایه توزیع فشار در جریان کوئت استوانه‌ای (دو استوانه هم مرکز) در عدد

رینولدز ۷۷..... ۴۷

شکل (۵-۳)- نمایه توزیع فشار در جریان کوئت استوانه‌ای (دو استوانه هم مرکز) در عدد

رینولدز ۱۱۵..... ۴۷

شکل (۵-۴)-مقایسه توزیع فشار در یک یاتاقان ژورنال همراه با پدیده کاویتاسیون، بین

روشهای LBM، FEM و حل تحلیلی معادله رینولدز..... ۴۸

شکل (۵-۵)- نمایه توزیع فشار در یاتاقانهای ژورنال گازی با نسبت خروج از مرکز ۰/۱..... ۵۰

شکل (۵-۶)- نمایه توزیع فشار در یاتاقانهای ژورنال گازی با نسبت خروج از مرکز ۰/۳..... ۵۰

شکل (۵-۷)- نمایه توزیع فشار در یاتاقانهای ژورنال گازی با نسبت خروج از مرکز ۰/۵..... ۵۱

شکل (۵-۸)- نمایه توزیع فشار در یاتاقانهای ژورنال گازی با نسبت خروج از مرکز ۰/۸..... ۵۱

شکل (۵-۹)- دامنه محاسباتی و آرایش شبکه..... ۵۲

شکل (۵-۱۰)- سرعت‌های مماسی جریان کوئت استوانه‌ای با اندازه‌های مختلف شبکه ($a = ۱۰\lambda$) ۵۳

شکل (۵-۱۱)- نمایه توزیع سرعت در جریان میکروکوئت استوانه‌ای (دو استوانه هم مرکز)..... ۵۴

شکل (۵-۱۲)- نمایه توزیع فشار در جریان میکروکوئت استوانه‌ای (دو استوانه هم مرکز)..... ۵۴

شکل (۵-۱۳)- توزیع فشار در یاتاقانهای ژورنال گازی با نودسن ۰/۰۰۱..... ۵۶

شکل (۵-۱۴)- توزیع فشار در یاتاقانهای ژورنال گازی با نودسن ۰/۰۵..... ۵۶

شکل (۵-۱۵)- توزیع فشار در یاتاقانهای ژورنال گازی با نودسن ۰/۱..... ۵۷

شکل (۵-۱۶)- مقایسه توزیع‌های فشار در یاتاقانهای ژورنال گازی با اعداد نودسن مختلف بین روشهای Spectral Collocation و MRT-LBM..... ۵۷

شکل (۵-۱۷)- نمایه توزیع فشار در یاتاقانهای ژورنال گازی با نسبت خروج از مرکز ثابت و نودسن ۰/۰۰۱..... ۵۸

شکل (۵-۱۸)- نمایه توزیع فشار در یاتاقانهای ژورنال گازی با نسبت خروج از مرکز ثابت و نودسن ۰/۰۵..... ۵۹

شکل (۵-۱۹)- نمایه توزیع فشار در یاتاقانهای ژورنال گازی با نسبت خروج از مرکز ثابت و نودسن ۰/۱..... ۵۹

شکل (۵-۲۰)- نمایه توزیع سرعت در یاتاقانهای ژورنال گازی با نسبت خروج از مرکز ثابت و نودسن ۰/۰۰۱..... ۶۰

شکل (۵-۲۱)- نمایه توزیع سرعت در یاتاقانهای ژورنال گازی با نسبت خروج از مرکز ثابت و نودسن ۰/۰۵..... ۶۰

شکل (۵-۲۲)- نمایه توزیع سرعت در یاتاقانهای ژورنال گازی با نسبت خروج از مرکز ثابت و نودسن ۰/۱..... ۶۰

شکل (۵-۲۳)- نمایه توزیع فشار در یاتاقانهای ژورنال گازی درعدد نودسن ۰/۰۵ با نسبت‌های خروج از مرکز ۰/۱..... ۶۱

شکل (۵-۲۴)- نمایه توزیع فشار در یاتاقانهای ژورنال گازی درعدد نودسن ۰/۰۵ با نسبت‌های خروج از مرکز ۰/۳ ..... ۶۲

شکل (۵-۲۵)- نمایه توزیع فشار در یاتاقانهای ژورنال گازی درعدد نودسن ۰/۰۵ با نسبت‌های خروج از مرکز ۰/۵ ..... ۶۲

شکل (۵-۲۶)- نمایه توزیع فشار در یاتاقانهای ژورنال گازی درعدد نودسن ۰/۰۵ با نسبت‌های خروج از مرکز ۰/۸ ..... ۶۳

شکل (۵-۲۷)- نمایه توزیع سرعت در یاتاقانهای ژورنال گازی درعدد نودسن ۰/۰۵ با نسبت‌های خروج از مرکز ۰/۱ ..... ۶۳

شکل (۵-۲۸)- نمایه توزیع سرعت در یاتاقانهای ژورنال گازی درعدد نودسن ۰/۰۵ با نسبت‌های خروج از مرکز ۰/۳ ..... ۶۴

شکل (۵-۲۹)- نمایه توزیع سرعت در یاتاقانهای ژورنال گازی درعدد نودسن ۰/۰۵ با نسبت‌های خروج از مرکز ۰/۵ ..... ۶۴

شکل (۵-۳۰)- نمایه توزیع سرعت در یاتاقانهای ژورنال گازی درعدد نودسن ۰/۰۵ با نسبت‌های خروج از مرکز ۰/۸ ..... ۶۵

فهرست جدول‌ها

عنوان **جدول‌ها** صفحه

جدول (۲-۱)-تبدیل واحدهای شبکه به واحدهای SI..... ۲۳

فصل اول
مقدمه

۱-۱ مقدمه

فرآیندهای ساخت ماشین‌های با ابعاد کوچک، درسالهای اخیر به شدت گسترش پیدا کرده‌اند، این وسایل کوچک اغلب به عنوان حسگرهایی برای فشار، دما، دبی جرمی، سرعت، صدا و به عنوان شتاب‌سنجهایی برای حرکت عمودی و افقی و همچنین یک عضو ساده از موتور گرمایی میکرونی و پمپ گرمایی میکرونی به کار می‌روند.

سیستم‌های میکروالکترومکانیک (MEMS) به وسایلی که دارای طول مشخصه‌ای کمتر از mm ۱ و بیش از μm ۱ دارند اطلاق می‌شود که شامل اجزای مکانیکی و الکتریکی می‌باشند.

پیشرفت‌های زیادی که در زمینه ساخت و به کارگیری ماشینهای با سیستم‌های میکرو الکترمکانیک صورت گرفته است، با پیشرفتهایی که در زمینه فهم فیزیکی از رفتار و عملکرد وسایل میکرونی هماهنگ نبوده است. لذا فراهم آوردن زمینه‌ای برای فهم این رفتارها جهت ساخت، بهینه کردن و به کارگیری این ابزارها ضروری به نظر می‌رسد.

جریان سیال در وسایل کوچک رفتار متفاوتی با رفتار سیال درهندسه‌های ماکرو دارد. عملکرد اجزای پایه وسایل الکترومکانیکی از قبیل کانالها، نازلها، شیرها و یاتاقانها و توربوماشینها را به راحتی نمی‌توان از مدلهای مرسوم جریان نظیر معادلات ناویر-استوکس با شرط مرزی عدم لغزش روی دیوارها استفاده کرد که برای حل جریان سیال در هندسه‌های با ابعاد بزرگتر به کار می‌رود. این مسئله زمانی بحث برانگیز است که نتایج حاصل از کارهای تجربی در وسایل میکرونی با نتایج تئوری حاصل از روشهای مرسوم مقایسه شود که برای حل جریان سیال استفاده می‌شوند. گرادیان فشار در یک میکروکانال طویل مشاهده می‌شود، که ثابت نیست، دبی جرمی که در یک میکروکانال اندازه‌گیری می‌شود از مقدار دبی که توسط معادلات مرسوم برای مدلهای پیوستار سیال پیش‌بینی می‌شود، بیشتر است. باری که یک میکروبیرینگ تحمل می‌کند و مقدار جریان الکتریکی مورد نیاز برای حرکت میکروموتور زیادتر می‌باشد.

با توجه به مطالب ذکر شده در بالا می‌توان دریافت با توجه به مشکل بودن، فراهم آوردن امکانات آزمایشگاهی و هزینه‌بر بودن آنها دستیابی به روشهایی جهت تحلیل جریان در هندسه‌های با ابعاد میکرو ضروری به نظر می‌رسد.

یکی از سوالاتی که برای بررسی جریان سیال درهندسه‌های با ابعاد میکرو مطرح می‌شود، مدل مورد استفاده جهت تحلیل است و این که چه شرایط مرزی باید به کاربرد. آشکار است که اثرات سطح در این وسایل غالب می‌شوند. نسبت سطح به حجم برای یک ابزار با طول مشخصه m ۱ برابر با m^{-1} ۱ است. درحالیکه این

نسبت برای یک ابزار با بعد ۱ μm برابر با $۱۰^{۶}\ m^{-1}$ است.این افزایش یک میلیونی در هندسه‌های با ابعاد میکرو تاثیر به سزایی درانتقال جرم، ممنتوم و انرژی دارد. همچنین باتوجه به بعد مشخصه کوچک این وسایل برقراری شرایط پیوستار برای سیال در این ابزارها سوال برانگیز است واثراتی نظیر جریان لغزشی، تراکم-پذیری، پخش ویسکوز، رقیق بودن، نیروهای بین مولکولی و اثرات غیر مرسوم دیگری مورد توجه قرار می-گیرند که در حل عددی مسائل سیالاتی درهندسه‌های با ابعاد ماکرو منظور نمی‌شوند.

جریان کوئت استوانه‌ای بین دو استوانه هم‌مرکز یک مسئله کلاسیک دینامیک سیال می‌باشد. مطالعات روشهای تحلیلی و عددی اخیر نشان داده‌اند، چنانچه پدیده لغزش سرعت در سطوح استوانه رخ دهد، جریان بین دو استوانه می‌تواند یک سری رفتارهای غیرحسی و مبهم داشته باشد.

به عنوان مثال هنگامیکه استوانه داخلی با سرعت ثابت می‌چرخد و استوانه بیرونی ثابت نگه داشته شود، پدیده برگشت سرعت ممکن است رخ دهد. یعنی با فاصله گرفتن از سطح استوانه داخلی، سرعت مماسی افزایش می‌یابد. در رابطه با این پدیده، ماکسول [۱] حدوداً یک قرن پیش نظریه داده بود. به وضوح مشخص شده است که لغزش سرعت در جریانهای با ابعاد میکرو یک امر حتمی است و در نتیجه پدیده برگشت سرعت ممکن است تحت شرائط خاصی در جریان استوانه‌ای با ابعاد میکرو رخ دهد. برای مطالعه لغزش سرعت از روشهای مختلفی استفاده شده است.

اولین روش حل معادلات ناویر-استوکس می‌باشد. در گذشته جهت مدل کردن صحیح لغزش سرعت در جریانهای با دیواره انحنادار تعدادی شرط مرزی لغزشی پیشنهاد و به کار برده شده‌اند.

روش دوم مطالعه پدیده لغزش سرعت در جریان کوئت استوانه‌ای بر پایه حل معادلات شبکه بولتزمن (LBM) است.

روش سوم برای مطالعه پدیده لغزش سرعت شبیه‌سازی‌های مستقیم روش مونت‌کارلو (DSMC) می‌باشد. در واقع این پدیده مبهم پس از آنکه توسط روش مونت‌کارلو شبیه‌سازی شد مورد اهمیت قرار گرفت.

روش چهارم برای مشاهده پدیده لغزش و به دنبال آن برگشت سرعت، روش دینامیک مولکولی (MD) است [۳،۲]. بر خلاف روشهای مونت‌کارلو و شبکه بولتزمن که دارای حل مستقیم‌اند و در آنها شرط مرزی به ضریب سازگاری وابسته می‌باشد، در شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی هیچ شرط مرزی‌ای برای سرعت به کار نمی‌رود. در این روش لغزش بر روی سطح وابسته به طول اندرکنش جامد-سیال می‌باشد.

هر چهار روش بیان شده در بالا در دینامیک سیالات روشهای استانداردی می‌باشند و هر کدام دارای یک سری از محدودیتها هستند. معادلات ناویر-استوکس در جریانهای نزدیک به ناحیه پایستار محدودیت دارند،

روشهای مونت‌کارلو و دینامیک مولکولی اغلب دارای محدودیت هزینه محاسباتی بالا می‌باشند، همچنین روش حل مستقیم شبکه بولتزمن که جهت گسسته‌سازی معادلاتش از روند اختلاف محدود استفاده کرده باشد، محدود به جریانهای ساده است.

در کار حاضر هدف توسعه یک برنامه کامپیوتری برای شبیه‌سازی جریان در یاتاقانهای ژورنال با ابعاد میکرو است. یاتاقانهای با روان‌کننده گازی در ماشین‌آلات چرخان با سرعت بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند و دلیل این امر مزیتهای آنها می‌باشد که عبارتند از: اصطکاک پایین، محدودیتهای دمایی کم و تعمیرات و نگهداری آنها.

علاقه روزافزون به سیستم‌های میکرو الکترومکانیک (MEMS) و پایداری عملکرد آنها در سرعتهای بالا از جمله دلائل مهم شدن این نوع از یاتاقانها است. اصولاً در جریانهای گاز در فضاهای کوچک اثر لغزش بسیار مهم می‌باشد و در نتیجه تصحیحات لازم بر روی معادله رینولدز می‌بایست اعمال گردند. اثر رقت گاز نیز توسط عدد نودسن مشخص می‌شود. استفاده از محدوده وسیعی از عدد نودسن در میکرو یاتاقانهای ژورنال گازی امکان پذیر است، اما اغلب رژیم لغزشی جریان با محدوده نودسن ۰/۱ > Kn > ۰/۰۰۱ مورد توجه است. در این یاتاقانها نسبت خروج از مرکز بین ۰/۵ تا ۰/۹ تغییر می‌کند و عدد نودسن محلی در کمترین ضخامت فیلم سیال بین ۰/۰۱۱ تا ۰/۰۵۳ می‌باشد [۴]، که در محدوده جریان لغزشی قرار گرفته است.

با توجه به مطالعات و تحقیقات گذشته، پیش‌بینی و تحلیل عملکرد میکرو یاتاقانهای ژورنال گازی تحت اثر لغزش مراتب بالاتر جهت استفاده در ماشین‌آلات چرخنده با ابعاد میکرو، امری ضروری است. برای دستیابی به درکی عمیق از خصوصیات و پایداری میکرو یاتاقانها در MEMS، در تحقیق حاضر از شرط مرزی لغزش مرتبه دوم استفاده کرده‌ایم و در نهایت توزیع فشار را در محدوده جریان لغزشی به دست آوردیم.

لازم است ذکر شود که تمامی شبیه‌سازیها برای هندسه‌های دوبعدی انجام شده است. مراحل پایان‌نامه به شکل زیر انجام شد:

۱- ابتدا شرط مرزی ترکیبی پخش مولکولی و کمانه کردن با تقریب انحنای سطح به شکل زیگ‌زاگ در روش شبکه بولتزمن شبیه‌سازی شد.
۲- در مرحله دوم جهت از بین بردن خطاهای عددی حاصل از شرط مرزی اعمال شده، به اعمال اپراتور برخورد مدل چند زمان آرامش در جریان میکرو پرداختیم.

۳- جریان برای دو استوانه هم‌مرکز (جریان کوئت استوانه‌ای)با مدل چند زمان آرامش و شرط مرزی ترکیبی پخش مولکولی و کمانه کردن، به منظور بررسی صحت عملکرد برنامه کامپیوتری شبیه-سازی شد.
۴- در مرحله بعد به شبیه‌سازی یاتاقانهای ژورنال گازی با ابعاد میکرو با شرط مرزی سرعت لغزشی مرتبه دوم پرداختیم و در نهایت توزیع فشار و سرعت در این یاتاقانها را در محدوده جریان لغزشی به دست آوردیم.
۵- در مرحله آخر تمامی شبیه‌سازیهای مذکور را در مقیاس ماکرو انجام دادیم.

۱-۲ مروری برکارهای انجام شده

از آنجایی که هدف کار حاضر شبیه‌سازی جریان کوئت استوانه‌ای با ابعاد میکرو با استفاده از روش شبکه بولتزمن است در ادامه به مرورکارهای آزمایشگاهی و عددی انجام شده دراین زمینه پرداخته می‌شود.

– اینزل، پنزر و لیو (EPL) [۶،۵] یک شرط مرزی لغزشی کلی که اثر انحنای سطح نیز در آن لحاظ شده است را پیشنهاد کردند. آنها با استفاده از این شرط مرزی و حل معادلات ناویر–استوکس برای جریان، توانستند لغزش سرعت را مدل کنند. این شرط مرزی برای جریان‌های در محدوده پیوستار بر روی دیواره‌های زبر مناسب بود.

– تیبس و همکاران [۷] شرط مرزی اینزل و همکارانش را به ضرائب سازگاری دیوار مرتبط ساختند و بنابراین توانستند این شرط مرزی اصلاح شده را برای جریان‌های با گاز رقیق مورد استفاده قرار دهند.

– لاکربای و همکاران (LREB) [۸] به بازبینی مجدد شرط مرزی کلاسیک ماکسول پرداختند و نتیجه گرفتند که سرعت لغزش می‌بایست در رابطه با تنش برشی کل باشد. در این تحقیق تنش برشی در دیواره مورد محاسبه قرار می‌گرفت.

– سان و همکاران [۱۰،۹] به کمک شرط مرزی لاکربای و همکاران توانستند یک مدل تحلیلی برای جریان کوئت استوانه‌ای هم‌دما برای گازهای رقیق ارائه دهند. آنها به این نتیجه رسیدند که پدیده برگشت سرعت تنها به ضریب سازگاری استوانه بیرونی وابسته است.

– امرسون و همکاران [۱۱] نیز شرط مرزی سان و همکاران را بر روی جریان کوئت ارتعاشی اعمال کردند و پدیده لغزش و برگشت سرعت را مشاهده کردند.