دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

بررسی عددی انتقال حرارت جریان دوفاز گاز – ذره در رژیم لغزشی و انتقالی

رساله برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

نام دانشجو:

وحید علی‌اکبر

استاد راهنما:

دکتر مهرزاد شمس

دکتر عبدالله شادآرام

شهریورماه 1390

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

بررسی عددی انتقال حرارت جریان دوفاز گاز – ذره در رژیم لغزشی و انتقالی

رساله برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

نام دانشجو

وحید علی‌اکبر

استاد راهنما:

دکتر مهرزاد شمس

دکتر عبدالله شادآرام

شهریورماه 1390

بسم الله الرحمن الرحيم

تأییدیه‌ی هیأت داوران جلسه‌ی دفاع از پایان‌نامه/رساله

نام دانشکده: مهندسی مکانیک

نام دانشجو: وحید علی‌اکبر

عنوان پایان‌نامه یا رساله: بررسی عددی انتقال حرارت جریان دوفاز گاز – ذره در رژیم لغزشی و انتقالی

تاریخ دفاع:

رشته: مکانیک حرارت و سیالات

گرایش: تبدیل انرژی

ردیف	سمت	نام و نام خانوادگی	مرتبه دانشگاهی	دانشگاه یا مؤسسه	امضا
1	استاد راهنما	دکتر مهرزاد شمس	دانشیار	دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی	
2	استاد راهنما	دکتر عبدالله شادآرام	دانشیار	دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی	
5	استاد مدعو خارجی	دکتر سید مصطفی حسینعلی‌پور	دانشیار	دانشگاه علم و صنعت ایران	
7	استاد مدعو داخلی	دکتر محمدحسین حامدی	استاد	دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی	

تایدیه صحت و اصالت نتایج

باسمه تعالی

اینجانب وحید علی‌اکبر به شماره دانشجویی 8703464 دانشجوی رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی مقطع تحصیلی کارشناسی ارشد تأیید می‌نمایم که کلیه‌ی نتایج این پایان‌نامه/رساله حاصل کار اینجانب و بدون هرگونه دخل و تصرف است و موارد نسخه‌برداری‌شده از آثار دیگران را با ذکر کامل مشخصات منبع ذکر کرده‌ام. درصورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص دانشگاه مطابق با ضوابط و مقررات حاکم (قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان و قانون ترجمه و تکثیر کتب و نشریات و آثار صوتی، ضوابط و مقررات آموزشی، پژوهشی و انضباطی ...) با اینجانب رفتار خواهد شد و حق هرگونه اعتراض درخصوص احقاق حقوق مکتسب و تشخیص و تعیین تخلف و مجازات را از خویش سلب می‌نمایم. در ضمن، مسؤولیت هرگونه پاسخگویی به اشخاص اعم از حقیقی و حقوقی و مراجع ذی‌صلاح (اعم از اداری و قضایی) به عهده‌ی اینجانب خواهد بود و دانشگاه هیچ‌گونه مسؤولیتی در این خصوص نخواهد داشت.

نام و نام خانوادگی: وحید علی‌اکبر

امضا و تاریخ:

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

بهره‌برداری از این پایان‌نامه در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط استاد راهنما به شرح زیر تعیین می‌شود، بلامانع است:

- بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله برای همگان بلامانع است.
- بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.
- بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله تا تاریخ ..... ممنوع است.

نام استاد یا اساتید راهنما: دکتر مهرزاد شمس و عبدالله شادآرام

تاریخ:

امضا:

تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم که در تمام مراحل زندگی پشتیبان من بوده‌اند و تقدیم به همسر مهربانم که همراهی و همیاری او تسهیل کننده تمام سختی‌هاست.

تشکر و قدردانی:

در این مجال بر خود لازم می‌دانم که از استاد عزیزم آقای دکتر مهرزاد شمس بخاطر حمایت‌ها و راهنمایی-هایشان قدردانی کنم.

چکیده

با جریان‌های گازی رقیق شده معمولاً در جریان داخل هندسه‌های کوچک نظیر MEMS و در کاربردهای فشار پائین نظیر وسایل در حال پرواز در ارتفاعات بالا و یا در حال کار کردن در خلأهای زیاد مواجه می‌شویم. این جریان‌ها با توجه به میزان رقیق شدگیشان به رژیم‌های جریان متفاوتی تقسیم می‌شوند. در جریان گازهای رقیق برخوردار دو رژیم لغزشی و انتقالی از اهمیت ویژه‌ای می‌باشند. در رژیم لغزشی برهمکنش مولکولی در نزدیکی سطح اثرات خود را نشان می‌دهد که با اعمال شرایط مرزی لغزشی در معادلات ناویر-استوکس قابل حل می‌باشند؛ اما در رژیم جریان انتقالی اثرات زیاد برهمکنش مولکولی در کل جریان موجب از اعتبار انداختن معادلات ناویر-استوکس می‌شود. لذا برای حل جریان در این رژیم باید از روش‌های مولکولی استفاده شود.

با توجه به اینکه برای بررسی دقیق جریان‌های دو فاز گاز-جامد نیاز به داده‌های هیدرودینامیکی و انتقال حرارتی ذره می‌باشد در پایان نامه حاضر به تحلیل جریان بر روی کره سه‌بعدی در رژیم‌های لغزشی و انتقالی پرداخته‌ایم.

در بخش اول به جهت درک هر چه بهتر تاثیرات وابستگی دمایی خواص سیال و طول مشخصه جریان بر روی نرخ انتقال حرارت، جریان حول یک میکرو کره سه‌بعدی و غیر مقید در رژیم لغزشی شبیه‌سازی شده است. شروط مرزی لغزشی اعم از سرعت لغزشی و پرش دمایی به صورت عددی در معادلات ناویر-استوکس اعمال شده و خواص سیال از قبیل چگالی، ویسکوزیته، ضریب هدایت رسانایی و طول پویش آزاد مولکولی با دما متغیر در نظر گرفته شده است. اثرات خواص متغیر و تغییرات عدد نیودسن بر روی انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که در جریانات میکرو با نرخ انتقال حرارت بالا فرض خواص ثابت، فرضی خام و ابتدایی می‌باشد. علاوه بر این، سرعت لغزشی و پرش دمایی اثر معکوسی بر انتقال حرارت دارند: سرعت لغزشی بزرگ بر روی سطح، انتقال حرارت جابجایی را افزایش می‌دهد؛ از سوی دیگر پرش دمایی بزرگ با کاهش گرادیان دما روی سطح موجب کاهش انتقال حرارت می‌شود. در نتیجه نادیده گرفتن پرش دمایی که در خیلی از پژوهش‌های گذشته مرسوم بوده است موجب تخمین بیشتری از انتقال حرارت روی سطح می‌شود.

در بخش دوم رژیم جریان سه‌بعدی انتقالی ماورای صوت روی یک کره با استفاده از روش DSMC مورد مطالعه قرار گرفته است. از کد dsmcFoam به عنوان حلگر مسئله استفاده شده، مدل کره سخت متغیر برای برخورد بین مولکولی و مدل دیواره پخشی برای برخورد مولکول با سطح در نظر گرفته شده‌اند. بررسی گسترده و جامعی روی پارامترهای موثر برانتقال حرارت جریان در رژیم انتقالی صورت گرفته است. به عنوان مثال مشاهده شد که با افزایش عدد نیودسن نرخ انتقال حرارت کاهش یافته اما افزایش عدد ماخ انتقال حرارت بیشتری را موجب می‌گردد. در قسمت پایانی این تحقیق به بررسی تاثیر ارتفاع پرواز بر پارامترهای انتقال حرارتی پرداخته‌ایم تا تاثیر همزمان تغییرات عدد ماخ و نیودسن را در نظر بگیریم. نتایج نشان می‌دهد که در طی مسیر فرود وسایل پروازی ماورای صوت میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: دینامیک گاز رقیق، خواص متغییر، رژیم لغزشی، رژیم انتقالی، شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو

فهرست مطالب

فصل 1 مقدمه‌ای بر جریان‌های ناپیوسته 1
1-1 مقدمه 2
1-2 شبیه‌سازی جریانهای ناپیوسته 3
1-3 معرفی کلی پایان‌نامه و نوآوری‌ها 5

فصل 2 جریان دو فاز گاز- جامد در رژیم‌های رقیق لغزشی 9
2-1 مقدمه 10
2-2 مروری بر کارهای صورت گرفته 10
2-3 معادلات حاکم بر جریان لغزشی پیرامون ایروسول کروی 16
2-4 شرط مرزی لغزشی بر سطح ذره 17
2-5 نقش ضرایب تطابق 19
2-6 ارتباط اعداد بی بعد رینولدز، نیودسن و ماخ 20
2-7 خواص متغیر یا ثابت؟ 22
2-8 بررسی تئوری اثرات کوچک شدن از ابعاد ماکرو به میکرو 23
2-8-1 کدام خواص را متغیر و کدام خواص را ثابت فرض کنیم؟ 25
2-9 شبیه‌سازی عددی جریان 27
2-9-1 دامنه محاسباتی و اعمال شروط مرزی 27
2-10 فرایند حل عددی 31

فصل 3 شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو 33
3-1 مقدمه 34
3-2 تاریخچه مدلسازی جریان‌های رقیق ماورای صوت 35
3-2-1 آیرودینامیک فضاپیما 35
3-2-2 جریان حول اجسام باریک و محدب 38
3-3 مقدمه‌ای بر دینامیک گاز مولکولی 39
3-4 شبیه‌سازی دینامیک گاز مولکولی 41
3-5 معادله بولتزمن 41
3-6 روش‌های شبیه‌سازی عددی 44
3-6-1 روش‌های پیوسته مبنا 45
3-6-2 روش‌های ذره مبنا 46
3-7 تاریخچه روش DSMC 47
3-8 مروری بر خواص میکروسکوپیک و روابط حاکم در جریان‌های رقیق 49

3-8-1 گاز رقیق ساده 50
3-8-2 برخورد الاستیک دوتایی 56
3-8-3 مدل‌های برخورد مولکولی 57
3-8-3- 1 مدل کره سخت 58
3-8-3- 2 مدل کره سخت متغیر 58
3-8-3- 3- مدل نمایی معکوس 59
3-8-3- 4 مدل کره نرم متغیر(VSS) 59
3-8-4 برخورد گاز با سطح جامد 60
3-8-4-1 برخورد آیینه‌ای 60
3-8-4-2 برخورد پخشی 61
3-9 شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو 62
3-10 مراحل مختلف روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو (DSMC) 63
3-10-1 گسسته سازی ناحیه حل 63
3-10-2 شروع حل 64
3-10-3 تعیین قدم زمانی 64
3-10-4 تعیین موقعیت مولکول نمونه 65
3-10-5 تعیین مولفه‌های سرعت مولکول نمونه 65
3-10-6 حرکت مولکول‌ها در سلول 65
3-10-7 برخورد مولکول‌ها به سطح 66
3-10-8 احتمال برخورد مولکول‌ها در یک سلول 66
3-10-9 مولفه‌های سرعت دو مولکول پس از برخورد 68
3-10-10 شاخص‌گذاری مولکول‌ها 69
3-10-11 نمونه‌گیری خواص ماکروسکوپی 69
3-11 شرایط مرزی 71
3-11-1 شرایط مرزی ماورای صوت 71
3-11-2 شرط مرزی مادون صوت 71
3-11-3 شرط مرزی خلا ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
3-11-4 شرایط مرزی دیوار متحرک ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
3-12 تعداد ذرات شبیه‌سازی 73
3-13 محدودیت های روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو 81
3-14 خطای محاسباتی در روش شبیه‌سازی مستقیم مونت‌کارلو 82
3-14-1 خطاهای آماری 82
3-14-2 خطای عددی 83
3-14-3 خطای قطع 83

فصل 4 بحث و بررسی نتایج 84

4-1 جریان حول کره در رژیم لغزشی 85
4-1-1 راستی‌آزمایی روش حل 85
4-1-2 بحث و بررسی نتایج 87
4-1-3 نتیجه‌گیری 95
4-2 جریان حول کره در رژیم انتقالی 96
4-2-1 راستی‌آزمایی روش حل با استفاده از جریان مافوق صوت دو بعدی بر روی صفحه تخت 97
4-2-2 راستی‌آزمایی روش حل با استفاده از جریان ماورای صوت دو بعدی بر روی سیلندر 102
4-2-3 راستی‌آزمایی روش حل برای جریان ماورای صوت سه‌بعدی بر روی کره 105
4-2-4 بحث و بررسی نتایج 107
4-2-4-1 بررسی تاثیرات عدد ماخ 107
4-2-4-2 بررسی تاثیرات عدد نیودسن 112
4-2-4-3 بررسی تاثیر ارتفاع پرواز 119

ضمیمه 1 اعمال شرایط مرزی در رژیم لغزشی 128
أ. شرط مرزی سرعت لغزشی 128
ب. شرط مرزی پرش دمایی 130

ضمیمه 2 معرفی کد DSMCFOAM 131
أ. مقدمه 131
ب. ساختار کد dsmcFOAM 131
ج. ساختار داده ها در OpenFOAM و الگوریتم‌های اسای کد dsmcFOAM 133
د. الگوریتم پر کردن اولیه میدان حل با ذرات 136
ه. الگوریتم توزیع ذرات در سطوح مرزهای ورودی 138
و. الگوریتم ردیابی ذرات درشبکه‌های سه‌بعدی نامنظم با هندسه‌ی دلخواه 138
ز. الگوریتم اولیه‌ی ردیابی ذره در اپن فوم 139
ح. الگوریتم ردیابی اصلاح شده 141
ط. الگوریتم ردیابی ذره و شرایط مرزی 142
مراجع 143

فهرست اشکال

شکل (1-1) مدل‌های پیوسته و مولکولی برای مدل‌سازی جریان سیال 5
شکل (1-2) رژیم‌های عدد نیودسن و محدودیت‌های آن بر مدل‌سازی گاز. 7
شکل (2-1-الف) تقسیم حوزه محاسباتی پیرامون ذره کروی جهت مدلسازی بهتر پرش سرعت روی سطح کره. 27
شکل (2-1-ب) الگوی شبکه محاسباتی پیرامون ذره، نمای صفحه z-y به همراه بزرگنمایی هندسه شبکه نزدیک ذره. 28
شکل (2-1-ج) الگوی شبکه محاسباتی پیرامون ذره، نمای صفحه x-y به همراه بزرگنمایی هندسه شبکه روی سطح ذره. 28
شکل (2-2) شماتیکی از شروط مرزی اتخاذ شده در فرایند حل عددی 31
شکل (3-1) برخورد بین دو مولکول کره سخت با قطر d 52
شکل (3-2) شماتیک میدان نیرویی بین دو مولکول 53
شکل (3-3) حجم موثر جاروب شده توسط حرکت مولکول نمونه در میان مولکول‌های ساکن 54
شکل (3-4) برخورد مولکول با سطح جامد؛ الف) برخورد آینه‌ای ب) برخورد پخشی 60
شکل (3-5) شماتیک شبکه محاسباتی 64
شکل (3-6) خطوط خط چین بیان کننده مقدار $F_{num} = 10^{19}$، خطوط به همراه دایره $F_{num} = 10^{18}$، نقطه –خط چین $F_{num} = 10^{17}$ و خط توپر $F_{num} = 10^{16}$ است. [114] 80
شکل (4-1) مقایسه راه حل عددی با نتایج تجربی 86
شکل (4-2) مقایسه مدلسازی عددی لغزشی در Kn=۰/۰۱ با نتایج تجربی در رژیم پیوسته 86
شکل (4-3) حالات غیرقابل تراکم مورد مطالعه در کار حاضر شامل 58 نقطه در رژیم جریان لغزشی 87
شکل (4-4) تغییرات چگالی در میدان حل Re = 0/25، Kn = 0/05، ΔT = 600K. 88
شکل (4-5) تغییرات ویسکوزیته در میدان حل Re = 0/25، Kn = 0/05، ΔT = 600K. 88
شکل (4-6) تغییرات پویش آزاد مولکولی در میدان حل Re = 0/25، Kn = 0/05، ΔT = 600K. 89
شکل (4-7) دمای کل در میدان حل Re=0/25، Kn = /05، ΔT= 600K.(الف) خواص متغییر، (ب) خواص ثابت89
شکل (4-8) مقایسه عدد ناسلت محاسبه شده با استفاده از خواص ثابت و متغیر، ΔT =600 K 90
شکل (4-9) پروفیل دمای محاسبه شده با استفاده از: (الف) خواص متغیر برای اعداد نیودسن مختلف، Re = 0/25، ΔT =600 K. (ب) خواص ثابت و متغیر، Kn = 0/05، ΔT =200 K. (ج) خواص ثابت و متغیر، Kn = 0/05، ΔT =600 K. 92
شکل (4-10) عدد ناسلت متوسط محاسبه شده با خواص متغیر، ΔT =200 K 93
شکل (4-11) عدد ناسلت متوسط محاسبه شده با استفاده از خواص متغیر، ΔT= 200K 93
شکل (4-12) عدد ناسلت متوسط محاسبه شده با استفاده از خواص متغیر، ΔT= 200K 94
شکل (4-13) اثرات پرش دمایی و لغزشی روی نرخ انتقال حرارت 94
شکل (4-14) تعداد ذرات شبیهسازی شده در هر گام زمانی 98
شکل (4-15) کانتور عدد ماخ، ماخ ورودی 4، عدد نیودسن 0/0143[15] 99
شکل (4-16) ضریب اصطکاک محلی، ماخ ورودی 4، عدد نیودسن 0/0143 100

شکل (4-17) ضریب انتقال حرارت محلی، ماخ ورودی 4، عدد نیودسن 0/0143 100
شکل (4-18) سرعت لغزشی، ماخ ورودی 4، عدد نیودسن 0/0143 101
شکل (4-19) پرش دمایی، ماخ ورودی 4، عدد نیودسن 0/0143 101
شکل (4-20) شبکه محاسباتی حول استوانه 102
شکل (4-21) کانتور عدد ماخ، ماخ ورودی 10 و عدد نیودسن 0/01 ، الف)dsmcFoam، ب) [117] Bird. 103
شکل (4-22) نرخ انتقال حرارت از سطح استوانه، ماخ ورودی 10 و عدد نیودسن 0/01 الف) dsmcFoam، ب) Bird [115] 104
شکل (4-23) شبکه محاسباتی جریان حول کره 106
شکل (4-24) کانتورهای الف)چگالی عددی، ب)دما، ج) سرعت حول کره، ماخ ورودی 6 و عدد نیودسن 0/34 107
شکل (4-25) چگالی عددی بر روی خط سکون، عدد نیودسن 1 108
شکل (4-26) دمای کل بر روی خط سکون، عدد نیودسن 1 109
شکل (4-27) پروفیل دمای کل، عدد نیودسن 1 110
شکل (4-28) نرخ انتقال حرارت بر حسب عدد ماخ، عدد نیودسن 1 111
شکل (4-29) ماکزیمم دمای سطح بر حسب عدد ماخ، عدد نیودسن 1 112
شکل (4-30) کانتور دما حول کره، عدد نیودسن1، الف)Ma =3، ب) Ma=7، Ma = 10، Ma =12 ، Ma =15 113
شکل (4-31) چگالی عددی بر روی خط سکون، عدد ماخ 10 114
شکل (4-32) دمای کل بر روی خط سکون، عدد ماخ 10 115
شکل (4-33) پروفیل دما برای اعداد نیودسن مختلف، عدد ماخ 10 116
شکل (4-34) نرخ انتقال حرارت بر حسب عدد نیودسن، عدد ماخ 10 116
شکل (4-35) ماکزیمم دما بر روی سطح کره بر حسب عدد نیودسن، عدد ماخ 10 117
شکل (4-36) کانتور دما حول کره عدد ماخ10، الف)Kn = 0/1، ب)Kn =1، ج)Kn =3،د) Kn =5، ه)Kn =10 118
شکل (4-37) تغییرات عدد ماخ بر حسب ارتفاع پرواز 120
شکل (4-38) تغییرات عدد نیودسن بر حسب ارتفاع پرواز 120
شکل (4-39) تغییرات چگالی عددی بر روی خط سکون 121
شکل (4-40) پروفیل دمای کل بر روی خط سکون 122
شکل (4-41) پروفیل دما در ارتفاعات مختلف 123
شکل (4-42) تغییرات نرخ انتقال حرارت بر حسب ارتفاع پرواز 123
شکل (4-43) تغییرات ماکزیمم دمای سطح بر حسب ارتفاع پرواز 124
شکل (4-44) کانتور دما حول کره، الف)H = 95، ب)H =100، ج)H =104،د)H =107،ه)H =110، و)H =125 125
شکل (الف-1) اعمال شرایط مرزی لغزش 129
شکل (ب-1) دایرکتوری کد dsmcFoam [125] 133
شکل (ب-2) مقایسه شماتیک کلاس parcel (تک ذره پایین) و کلاس cloud (مجموعه ذرات بالا به علاوه شبکه عددی) 134
شکل (ب-3) ساختار یک چهاروجهی با اضلاع مثلثی (سمت چپ) و نما از بالای آن (سمت راست) 137
شکل (ب-4) یک ذره که از نقطه a به نقطه b حرکت می‌کند و دو وجه را در نقاط p و p’ قطع می‌کند و دو بار سلول آن عوض می‌شود 139

شکل (ب-5) توصیف فیزیکی λ_a ، وجه neg مقدار منفی برای λ_a و وجه pos مقداری بزرگتر از 1 برای λ_a بدست می‌دهند

فهرست جداول

جدول (2-1) فاکتورهای تصحیح لغزش برای هوا با پویش آزاد میانگین 67/3 نانومتر در فشار 101/3 کیلوپاسکال و دمای 23 درجه سانتیگراد 12
جدول (2-2) حساسیت خواص آب و هوا نسبت به دما 25
جدول (2-3) حساسیت خواص آب و هوا نسبت به فشار 25
جدول (2-4) نتایج بررسی حل مستقل از شبکه در Kn =0/05 و Re=1 30
جدول (3-1) تاریخچه توسعه DSMC 50
جدول (4-1) مشخصات جریان عبوری از روی کره 105
جدول (4-2) مشخصات هوا در ارتفاعات [92] 119

فصل ۱

مقدمه‌ای بر جریان‌های ناپیوسته

1-1 مقدمه

با جریان‌های گازی رقیق شده معمولاً در جریان داخل هندسه‌های کوچک نظیر MEMS و در کاربردهای فشار پائین نظیر وسایل در حال پرواز در ارتفاعات بالا و یا در حال کار کردن در خلأهای زیاد مواجه می‌شویم. آزمایشات اولیه در دینامیک گاز رقیق توسط نیودسن در سال 1911 [1] صورت گرفت.

اساساً دو روش برای مدل سازی میدان جریان وجود دارد:

1) در نظر گرفتن سیال به عنوان مجموعه‌ای از مولکول‌ها که به واقعیت بسیار نزدیک است.

2) در نظر گرفتن سیال به عنوان یک محیط پیوسته.

گرایش اول به دو دسته روش‌های قطعی[1] و احتمالی[2] تقسیم می‌شود. در گرایش دوم، سرعت، چگالی، فشار و غیره در هر نقطه از فضا و زمان تعریف می گردند و بقای جرم، مومنتوم و انرژی منجر به مجموعه ای از معادلات دیفرانسیلی جزئی غیر خطی (اویلر، ناویر- استوکس، برنت و...) می گردد.

برای جریان گاز رقیق نزدیک تعادل، معادلات ناویر- استوکس قابل استخراج از معادلات مولکولی بولتزمن هستند و بصورت مستقل نیز برای مایعات و گازها قابل استخراج می باشند. در حالت استخراج مستقل، تعدادی از قواعد تجربی[3] مورد نیاز است تا مجموعه معادلات بسته شود. مدل‌های عددی جهت شبیه‌سازی جریان‌های پیوسته از نظر محاسباتی و ریاضیاتی نسبت به آنچه که در مدل‌های پیچیده مولکولی دیده می‌شود به آسانی قابل اجرا می‌باشد. اساساً مدل پیوسته منجر به پیش بینی‌های نسبتاً دقیق می‌گردد؛ البته با این شرط که خواصی نظیر چگالی و سرعت توسط متوسط‌گیری روی المان‌های به اندازه کافی بزرگ سیال در مقایسه با ساختار میکروسکوپیک سیال و به اندازه کافی کوچک نسبت به پدیده‌های ماکروسکوپیک سیال قابل تعریف باشد. بدین ترتیب امکان استفاده از حساب دیفرانسیل برای تشریح آن فراهم می‌گردد. شرط مهم دیگر این است که سیال نباید خیلی دور از شرایط تعادل ترمودینامیکی قرار داشته باشد. شرط اول تقریباً همیشه ارضا می‌گردد ولی شرط دوم معمولاً اعتبار معادلات پیوسته را محدود می‌نماید.

---

[1] Deterministic
[2] Probablistic
[3] Contitutive laws

همان گونه که در بالا اشاره گردید، جهت بستن مجموعه معادلات بایستی تنش برشی و شار حرارتی به عنوان توابعی از کمیات ماکروسکوپیک نظیر سرعت، و دما بیان گردند. از قوانین تجربی مفید، فرض رابطه‌ی خطی بین تنش برشی و نرخ کرنش برشی می‌باشد، که فقط وقتی معتبر است که سیال در شرایط نزدیک به تعادل ترمودینامیکی قرار داشته باشد. علاوه بر آن، شرط مرزی سنتی عدم لغزش حتی قبل از آن که رابطه خطی مذکور صحت خود را از دست بدهد، غیر معتبر می‌شود. حالت مشابهی برای شرط عدم لغزش دما روی دیواره و صحت رابطه خطی بین شار حرارتی و گرادیان دما وجود دارد.

2-1 شبیه‌سازی جریان‌های ناپیوسته

وقتی که مسافت پویش آزاد میانگین گاز[1] افزایش می‌یابد و یا طول مشخصه جریان سیال تا یک سایز قابل مقایسه با فواصل مولکولی کاهش می‌یابد اثرات رقت[2] خودنمایی کرده و دبی جرمی‌سیال، پروفیل سرعت و دما، نرخ انتقال حرارت، تنش برشی سطحی و نیروهای هیدرودینامیکی تحت تأثیر قرار می‌گیرند. در چنین شرایطی فرض پیوستگی سیال برهم خورده و حضور تعادل ترمودینامیکی محلی سیال در معرض ابهام قرار می‌گیرد. عدد بی بعد نیودسن[3] که معادل با نسبت دو مقیاس طولی از جریان گاز است جهت درجه بندی کمی‌میزان رقیق بودن گاز و در نتیجه تعیین انواع رژیم‌های مرتبط با آن به کار برده می‌شود. این عدد را بصورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$Kn = \frac{\lambda}{L} \qquad (1\text{-}1)$$

که در آن l که مسافت پویش آزاد میانگین گاز و L طول مشخصه جریان است. اسکاف و کمبری [2] تقسیم بندی زیر را جهت تعیین انواع رژیم‌های گازی رقیق برحسب عدد نیودسن ارائه کردند. بازای ۰<Kn<0/01 فرض پیوستگی گاز برقرار بوده و سیال در تعادل ترمودینامیکی محلی به سر می‌برد. قوانین بقای ناویر- استوکس به همراه شرط مرزی عدم لغزش روی دیواره‌ها توانایی توضیح تمامی رفتارهای گاز را داراست. وقتی که عدد نیودسن بین 0/01 و 0/1 قرار می‌گیرد اثرات رقت آغاز به تاثیر گذاری می‌نماید. این محدوده به رژیم جریان لغزشی معروف است. در این رژیم فرض پیوستگی گاز هنوز پابرجاست در حالیکه

[1] Gas mean free path
[2] Rarefaction effects
[3] Knudsen