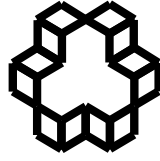


باسمه تعالی



تاسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

رساله دکتری

حل جریان حرارتی سیال خواص متغیر تراکم‌پذیر فوق بحرانی

با استفاده از روش LB

مصطفی ورمزیار

استاد راهنما : دکتر مجید بازارگان

زمستان ۱۳۹۱

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم،

حسین و

همسر عزیزم



تاسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تأییدیه هیأت داوران

شماره:

تاریخ:

هیأت داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از رساله تهیه شده تحت عنوان
حل جریان حرارتی سیال خواص متغیر تراکم پذیر فوق بحرانی با استفاده از روش LB
توسط آقای مصطفی ورمزیار صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه دکترا با رتبه
عالی رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی در تاریخ ۱۳۹۱/۱۱/۳۰ مورد تأیید قرار می دهند.

امضاء	جناب آقای دکتر مجید بازارگان	۱- استاد راهنما
امضاء	جناب آقای دکتر مسعود دربندی	۲- استاد ممتحن داخلی
امضاء	جناب آقای دکتر محمدرضا شاه نظری	۳- استاد ممتحن داخلی
امضاء	جناب آقای دکتر محمود اشرفی زاده	۴- استاد ممتحن خارجی
امضاء	جناب آقای دکتر مسعود دربندی	۵- استاد ممتحن خارجی
امضاء	جناب آقای دکتر امیر حسین شامخی	۶- نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده



تاسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

اظهارنامه دانشجو

شماره:

تاریخ:

اینجانب **مصطفی ورمزبار** دانشجوی دکتری رشته **مهندسی مکانیک** گرایش **تبدیل انرژی** دانشکده **مهندسی مکانیک** دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در پایان‌نامه با عنوان:

حل جریان حرارتی سیال متغیر تراکم‌پذیر فوق بحرانی

با استفاده از روش LB

با راهنمایی استاد محترم جناب آقای **دکتر مجید بازارگان**، توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده در این پایان‌نامه مورد تأیید می‌باشد، و در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. به علاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان‌نامه تا کنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را به طور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو:

تاریخ:



تاسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

شماره:
تاریخ:

حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می باشد. هرگونه کپی برداری بصورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می باشد.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مراجع مجاز نمی باشد.

صمیمانه مراتب تشکر و سپاس‌گزاری خود را نسبت به استاد جلیل القدر،
دکتر مجید بازارگان ابراز می‌دارم، که در همه حال راهنمایم بودند.
یاد و خاطر استاد شهید، دکتر مسعود علی‌محمدی را گرامی می‌دارم، اینجانب
توفیق شاگردی ایشان را در درس مکانیک آماری داشتم.

چکیده

در این پژوهش، توسعه روش شبکه بولتزمن به منظور شبیه‌سازی پدیده اثر پیستونی که اصلی‌ترین مکانیزم انتقال حرارت سیال فوق بحرانی در محیط میکرو گرانش می‌باشد مورد توجه قرار گرفته است. تغییر ضریب پخش در روش شبکه بولتزمن حرارتی با اضافه شدن یک ترم به تابع توزیع تعادلی مدل‌سازی گردیده است. این مدل در مساله‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که روش پیشنهادی، قابلیت مدل‌سازی مسایل به شدت غیر خطی را نیز دارد. از طرف دیگر با استفاده از آنالیز چاپمن انسکوگ خطای روش پیشنهادی، شناسایی شده است. بخشی از خطا که ارتباطی به تغییر خواص نداشت، با پیشنهاد ترم اصلاح و استفاده از ترم‌های مرتبه بالا در آنالیز چاپمن انسکوگ حذف گردید. به علاوه نشان داده شد ترم اضافه شده، که نماینده قسمت متغیر ضریب پخش حرارتی است، خطایی از مرتبه دوم عدد نودسن ایجاد می‌کند و قابل صرف‌نظر می‌باشد. همچنین معین گردید که مدل پیشنهادی، دارای خطایی از مرتبه دوم نسبت به زمان است.

در ادامه، آنالیز چاپمن انسکوگ در فضای برداری توصیف شده، جهت استخراج معادلات ناویراستوکس به کار گرفته شده است. به علاوه نشان داده می‌شود که نیروی بین مولکولی، تنها تحت فرمولاسیونی خاص و با اضافه شدن جمله اصلاحی به معادله سرعت ماکروسکوپی و تعادلی، قابل تبدیل به معادلات ناویراستوکس تراکم‌پذیر می‌باشد. جهت محاسبه نیروی بین مولکولی، از رابطه حاکم بر سیال واندروالس استفاده شد. در کنار مدل تراکم‌پذیر شبکه بولتزمن، روش اعمال شرط مرزی در حضور نیروی بین مولکولی مورد بررسی قرار گرفت و روشن گردید که مدل‌های موجود، توانایی شبیه‌سازی پرش نیرو نزدیک دیواره را ندارند. پس، بر پایه یکی از مدل‌ها شرط مرزی منطبق با شبکه بولتزمن تراکم‌پذیر با نیروی واندروالس توسعه داده شد. نشان داده شد که این شرط مرزی دقت بسیار بالایی در شبیه‌سازی مسایل نیرو محور دارد و دقت مرتبه دوم نسبت به مکان را دارا می‌باشد.

مدل توسعه یافته شبکه بولتزمن حرارتی به همراه مدل شبکه بولتزمن تراکم‌پذیر جهت شبیه‌سازی انتقال حرارت جریان سیال فوق بحرانی به کار گرفته شده است. برای شبیه‌سازی جریان جابجایی آزاد درون حفره از فیلتراسیون آکوستیکی استفاده می‌گردد. پدیده اثر پیستونی با در نظر گرفتن مدل نیروی بین

مولکولی واندورالس شبیه‌سازی گردید. نتایج حاکی از آن است که طرح‌های گوناگون شبیه‌سازی نیرو، خطاهای متفاوتی را در شبیه‌سازی جریان تراکم‌پذیر فوق بحرانی دارند.

کلید واژه: معادله بولتزمن، شبکه بولتزمن حرارتی، ضریب پخش متغیر، آنالیز چاپمن انسکوگ، مدل تراکم‌پذیر شبکه بولتزمن، اسکیم شبیه‌سازی نیرو، جریان جابجایی آزاد، پدیده اثر پیستونی

۱- مقدمه.....	۱
۱-۱- دیدگاه ذره‌ای.....	۳
۲-۱- جریان سیال فوق بحرانی.....	۶
۱-۲-۱- القای حرارتی و حرکت امواج آکوستیک در سیال.....	۸
۲-۲-۱- گزیده‌ای از پژوهش‌های پیشین در زمینه پدیده اثر بیستونی.....	۹
۳-۱- هدف از این پژوهش.....	۱۳
۲- معادله بولتزمن.....	۱۶
۱-۲- مقدمه.....	۱۶
۲-۲- معادله بولتزمن از دیدگاه بنیادین.....	۱۷
۳-۲- روش‌های حل معادله بولتزمن.....	۲۱
۴-۲- روش دینامیک مولکولی.....	۲۵
۵-۲- روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو.....	۲۶
۶-۲- روش شبکه خودکار گاز.....	۲۷
۷-۲- روش شبکه بولتزمن.....	۳۰
۳- آنالیز چاپمن انسکوگ.....	۳۶
۱-۳- مقدمه.....	۳۶
۲-۳- معادلات تقارن شبکه.....	۳۷
۳-۳- بسط چندزمانه.....	۳۹
۴-۳- قوانین بقا.....	۴۱
۱-۴-۳- بالانس ممان صفرم.....	۴۲
۲-۴-۳- بالانس ممان اول.....	۴۳
۵-۳- معادله پخش-جابجایی: با استفاده از بسط چاپمن انسکوگ.....	۴۷
۶-۳- جریان سیال تراکم‌پذیر با فرض ماخ پایین.....	۵۰
۴- توسعه شبکه بولتزمن حرارتی با ضریب پخش متغیر.....	۵۷

۵۷.....	مقدمه.....	۱-۴
۵۸.....	مدل شبکه بولتزمن حرارتی با ضریب پخش متغیر.....	۲-۴
۶۰.....	۱-۲-۴- آنالیز خطای مدل حاضر.....	۲-۴
۶۲.....	اسکیم زمان آرامش چندگانه.....	۳-۴
۶۴.....	نتایج.....	۴-۴
۶۵.....	۱-۴-۴- هدایت یک بعدی و دو بعدی پایا و گذرا.....	۴-۴
۷۲.....	۲-۴-۴- مرتبه خطای مدل حاضر.....	۴-۴
۷۳.....	۳-۴-۴- مساله هدایت در حضور تشعشع حجمی.....	۴-۴
۷۵.....	۴-۴-۴- جابجایی رایلی بنارد.....	۴-۴
۷۸.....	۵-۴-۴- جابجایی آزاد درون حفره با منبع حرارتی.....	۴-۴
۸۲.....	۵- مدل تراکم‌پذیر شبکه بولتزمن، پدیده اثر پیستونی.....	۴-۴
۸۲.....	مقدمه.....	۱-۵
۸۳.....	نیروی حجمی در مدل شبکه بولتزمن.....	۲-۵
۸۵.....	شرط مرزی مدل حاضر.....	۳-۵
۸۷.....	مدل تراکم‌پذیر سیال فوق بحرانی.....	۴-۵
۸۸.....	نتایج.....	۵-۵
۸۸.....	۱-۵-۵- جریان پویزلی.....	۵-۵
۹۰.....	۲-۵-۵- جریان رایلی بنارد.....	۵-۵
۹۳.....	۳-۵-۵- جریان جابجایی آزاد سیال فوق بحرانی درون حفره.....	۵-۵
۱۰۰.....	۴-۵-۵- شبیه‌سازی پدیده اثر پیستونی.....	۵-۵
۱۰۵.....	۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادها.....	۵-۵
۱۰۶.....	جمع بندی.....	۱-۶
۱۰۹.....	پیشنهادها.....	۲-۶

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ رفتار یک ماده خالص برای فشارهای زیر بحرانی، بحرانی و فوق بحرانی ۶
- شکل ۲-۱ شماتیکی از سلول آزمایشگاهی گنون [۲۰] ۱۱
- شکل ۳-۱ رشد لایه حرارتی نزدیک هیتز در سیال فوق بحرانی اندکی پس از گرمایش [۲۵] ۱۲
- شکل ۱-۲ سیلندر در نظر گرفته شده برای محاسبه احتمال برخورد [۲۹] ۱۸
- شکل ۲-۲ نمونه‌های از حالت ۳ ذره در قبل و بعد از برخورد [۲۸] ۲۹
- شکل ۳-۲ شماتیک سرعت‌ها و فاصله نقاط در مدل D2Q9 ۳۴
- شکل ۱-۴ پروفیل دما به عنوان تابعی از مکان بی بعد برای $\alpha_0 = 0.02$ ۶۶
- شکل ۲-۴ مقایسه بین نتایج عددی حاضر و حل دقیق برای پارامتر بدون بعد θ بر اساس η به عنوان پارامتر مستقل تحت شرایط $\alpha_0 = 0.002$ و $\gamma = 0, 20, 40$ ۶۷
- شکل ۳-۴ خطای نسبی بر اساس زمان برای مساله هدایت یک بعدی با $\alpha_0 = 0.002$ و مقادیر مختلف γ ۶۸
- شکل ۴-۴ کانتور دما در یک مربع با $\alpha_0 = 0.002$ ، محاسبه شده با روش شبکه بولتزمن. دمای بدون بعد در کل میدان در لحظه $t=0$ s مقدار صفر دارد و ناگهان دیوارهای چپ، پایین و راست به مقدار یک در همین زمان ارتقا مییابد. شکلهای a-e به ترتیب نشان دهنده زمان و وابستگی به دماهای متفاوت میباشند: ۶۹
- شکل ۵-۴ توزیع دما در نیمه اول خط افقی گذرنده از وسط مربع، محاسبه شده با مدل حاضر و حل ضمنی حجم محدود، برای حالات: (a) $t=1, 2, 3$ s, $\gamma=50$, (b) $t=1$ s, $\gamma=0, 25, 50$ ۷۰
- شکل ۶-۴ خطای نسبی مدل استاندارد و مدل اصلاح شده روش شبکه بولتزمن برای مساله یک بعدی تحت شرایط $\omega = \pi/5$, $\gamma=0.08$, $u_{\max} = 1.0$ ۷۳
- شکل ۷-۴ مقایسه نتایج پروفیل دمای (T/Tl) مدل حاضر و نتایج میشر و همکاران [۵۷] بر روی خط مرکزی میدان برای نسبت ابعاد مختلف و ثوابت $\omega=0.5$ و $N=0.01$ ۷۵
- شکل ۸-۴ خطوط دما ثابت تحت شرایط پایا برای $Ra=1000\ 000$ با فرض تغییر ضریب پخش با دما (خطوط پیوسته: با ترم اصلاحی، خط چین: بدون ترم اصلاحی) ۷۷
- شکل ۹-۴ محاسبات برای شبکه 61×61 و عدد رایلی $1.0^5 \times 1/8$ و عدد پراوتل 0.71 (a) میدان دما، (b) مقایسه نتایج دما و سرعت با نتایج باراکوس و همکاران [۵۸] ۷۹
- شکل ۱۰-۴ خطوط جریان برای عدد گراشف 20000 و پراوتل 0.732 برای حالات زیر: ۸۰

- شکل ۴-۱۱ خطوط دما ثابت برای گرافش ۲۰۰۰۰ و عدد پرانتل ۰/۷۳۲ برای حالات زیر: ۸۱
- شکل ۵-۱ مدل شبکه D2Q9 بر روی مرز پایین ۸۶
- شکل ۵-۲ خطای ناشی از مدل شبکه بولتزمن در جریان پویزلی و مقایسه با مرجع [۶۳] ۹۰
- شکل ۵-۳ خطوط دما ثابت دوبعدی تحت شرایط پایا برای رنج وسیعی عدد رایلی ۹۲
- شکل ۵-۴ عدد نوسلت محاسبه شده بر اساس اعداد رایلی مختلف ۹۳
- شکل ۵-۵ شماتیکی از هندسه و شرایط مرزی ۹۴
- شکل ۵-۶ خطوط جریان درون حفره پر شده با سیال فوق بحرانی تحت شرایط $\Delta T_h, Ra_c=10^5, T_0-T_c=1 K$ ۹۹
- (a) نتایج منتشر شده توسط آکاری و راسپو [۲۶] (b) نتایج مدل حاضر ۹۹
- شکل ۵-۷ توزیع دما $\left(\frac{T-T_0}{\Delta T_h}\right)$ درون حفره پر شده با سیال فوق بحرانی تحت شرایط $T_0-T_c=1 K$ ۱۰۰
- $\Delta T_h=1 mK, Ra_c=10^5$ (a) نتایج منتشر شده توسط آکاری و راسپو [۲۶] (b) نتایج مدل حاضر ۱۰۰
- شکل ۵-۸ مقایسه نتایج بین اسکیم یک، دو و سه شبیه‌ساز نیرو برای شبیه‌سازی نیروی بین مولکولی در شبکه 20×100 و در گام زمانی ۵۰۰ ۱۰۱
- شکل ۵-۹ مقایسه میان نتایج شبیه‌سازی حاضر و روش مک کورمک به کار گرفته شده در مرجع [۱۰] با در نظر گرفتن ۱۰۰۰ نقطه و در گام زمانی ۴۰۰۰۰ ۱۰۲
- شکل ۵-۱۰ سکانس‌های مختلف از حرکت موج و اثرات آن بر توزیع دما در قیاس با هدایت خالص ۱۰۳
- شکل ۵-۱۱ توزیع دمای محاسبه شده بر اساس دماهای اولیه مختلف (E) ۱۰۴

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲ شرایط سیال تحت مقادیر مختلف نودسن ۲۲
- جدول ۲-۲ مدل‌های مختلف روش دینامیک مولکولی ۲۵
- جدول ۱-۴ خطای نسبی محاسبه شده در زمان‌ها و مقادیر مختلف γ ۷۱
- جدول ۲-۴ مقایسه عدد نوسلت محاسبه شده بدون و با ترم اصلاحی ۷۶
- جدول ۱-۵ مقایسه عدد نوسلت محاسبه شده با استفاده از مدل حاضر و رابطه تجربی ۹۱
- جدول ۲-۵ عدد نوسلت محاسبه شده با مدل حاضر و گزارش شده در مراجع ۹۸

۱- مقدمه

روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی معمول بر پایه گسسته‌سازی مستقیم معادلات ناویراستوکس و انرژی می‌باشند. این در حالی است که روش‌های جنبشی در دینامیک سیالات محاسباتی مستخرج از معادله بولتزمن هستند. خصوصیات روش‌های جنبشی منجر شده است که اخیراً این روش‌ها مورد استقبال قرار گرفته‌اند. از جمله این خصوصیات آن است که با دیدگاه میکروسکوپی می‌توان مسایل دینامیک سیالات را مورد بررسی قرار داد. این موضوع کمک می‌کند تا مسایلی که حل آن‌ها با استفاده از روش‌های ماکروسکوپی، شبیه به معادلات ناویراستوکس، دشوار است، تشریح شوند. در واقع خصوصیت معادله بولتزمن آن است که بین هیدرودینامیک و فیزیک میکروسکوپی آن‌ها ارتباط برقرار می‌کند. به همین دلیل این روش‌ها، شیوه‌های مسوسکوپی^۱ نامیده می‌شوند، چرا که میان قوانین بقای ماکروسکوپی و

^۱mesoscopic

دینامیک میکروسکوپی مرتبط با آن، عمل می‌کنند. به علاوه آن‌که معادله بولتزمن یک معادله انتگرال دیفرانسیلی مرتبه اول با ترم جابجایی خطی است، در حالی‌که معادله ناویر استوکس یک معادله مرتبه دوم با ترم جابجایی غیر خطی است. قسمت غیر خطی معادله بولتزمن مربوط به ترم برخورد آن است که آن هم به صورت محلی است. این مساله منجر به مزیت‌های عددی برای حل معادله بولتزمن خواهد شد.

به لحاظ تاریخی روش استاندارد شبکه بولتزمن تکامل یافته روش شبکه خودکار گاز می‌باشد. توضیحات مربوط به روش شبکه خودکار گاز در فصول بعدی ارائه می‌گردد. روش‌های مذکور از دیدگاه ذره‌ای در توصیفات خود کمک می‌گیرند. در ادامه مقدمه‌ای بر دیدگاه ذره‌ای خواهیم داشت. سپس پدیده اثر پیستونی به عنوان پدیده مورد سوال جهت توسعه روش شبکه بولتزمن معرفی و تاریخچه آن بررسی می‌شود. نهایتاً هدف از این پژوهش ارائه خواهد گردید.

عالم ماده از ذرات بنیادی شکل یافته است. از دیدگاه بشر ذرات بنیادی یعنی ذرات غیر قابل تجزیه که هیچیک از آنها نمی‌توانند به اجزای کوچک‌تر شکسته شوند. این ذرات توسط نیروهای گرانشی، الکترومغناطیسی و هسته‌ای پیوند یافته‌اند و بر اساس جرم در حال سکونشان به باریون‌ها (ذرات سنگین)، لپتون‌ها (ذرات سبک) و مزون‌ها (ذرات میان وزن) طبقه‌بندی می‌شوند.^۱ جرم ذرات بنیادی بسیار کوچک است. از این رو آنها را می‌توان تا سرعت بالایی رساند، مانند فوتون‌ها که بدون جرم می‌باشند و بالاترین سرعت ممکن (سرعت نور) را دارا هستند. سبک‌ترین ذره با جرم غیر صفر الکترون است (با جرمی در حدود $m_e = 9 \times 10^{-28} \text{ gr}$) که اغلب به عنوان واحدی برای سنجش جرم سایر ذرات به کار می‌رود. این ذرات، جهانی را شکل داده‌اند که ابعاد آن حداقل از مرتبه ده میلیارد سال نوری تخمین زده شده است. بزرگی عالم ماده چنان است که در مقابلش اجرام بسیار بزرگ‌تر از ذرات بنیادی را نیز می‌توان ذره نامید. در واقع مفهوم ذره یک مفهوم قیاسی است و به تنهایی معنا ندارد و همواره در کنار یک بزرگ نسبی تعریف می‌شود. به عنوان مثال، اتم می‌تواند در مقابل ابعاد کره زمین یک ذره تعریف شود. این در حالی است که ابعاد کره زمین نیز در مقابل جهان هستی بسیار کوچک است و می‌تواند به عنوان یک ذره تلقی شود.

^۱ در سال ۱۹۶۳ میلادی، موری گل‌مان (Murray Gell-Mann) نظریه‌ای ارائه کرد مبنی بر آن‌که ذراتی مانند پروتون و نوترون، از ذرات کوچکتری تشکیل شده‌اند که بارشان مضربی از ثلث بار الکترون است. موفقیت‌های این نظریه، جایزه نوبل را برای گل‌مان به ارمغان آورد. امروزه مدل استاندارد ذرات، انواع مختلف ذرات بنیادی و واکنش‌های بین آنها را به‌خوبی تفسیر می‌کند. طبق این مدل، مواد اطراف ما از دو گروه اصلی تشکیل شده‌اند: لپتون‌ها و هادرون‌ها. در حال حاضر شش لپتون شناخته شده است که به همراه پاد ذرات آنها دوازده عدد می‌شود. شش لپتون عبارتند از: الکترون، میون، تاو، نوترینوی الکترون، نوترینوی میون و نوترینوی تاو. به نظری‌رسد لپتون‌ها از چیز دیگری تشکیل نشده باشند. اما هادرون‌ها، انواع ذراتی هستند که از کوارک‌ها تشکیل شده‌اند. طبق مدل استاندارد، شش کوارک داریم که همراه با پادکوارک‌ها، دوازده ذره بنیادی دیگر را تشکیل می‌دهند. این کوارک‌ها به ترتیب اکتشاف عبارتند از: بالا (up)، پایین (down)، شگفت (Strange)، افسون (charm)، ته (bottom) و سر (top).

هر آنچه در عالم ماده اتفاق می‌افتد نتیجه قوانینی است که رفتار این ذرات را مدیریت می‌کند. قوانین فیزیک نیز جزیی از این قوانین هستند. سوالی که می‌توان در این جا مطرح کرد آن است که قانون یا قوانین بنیادی کدامند؟ آیا همه قوانینی که معرفی می‌شوند جزء قوانین بنیادی می‌باشند؟ به عنوان مثال بخشی از یک سیال متحرک را در نظر بگیرید. مهندسين برای محاسبه سرعت میانگین و دمای ماکروسکوپی نقطه‌ای (یا حجم بسیار کوچکی) از این سیال، به استفاده از دو دسته معادلات ناویراستوکس (که نتیجه قانون دوم نیوتن است) و انرژی نیازمند هستند. از طرف دیگر می‌دانیم که اتم‌های سیال، براساس قانون دوم نیوتن (جاذبه و دافعه بین ذرات) حرکت می‌کنند و آنچه در واقعیت مشاهده می‌شود نتیجه تنها یک قانون (همان قانون دوم نیوتن) می‌باشد. مثال‌هایی از این دست در میان قوانین کشف شده توسط بشر وجود دارد که به نوعی استقلال آن‌ها را زیر سوال می‌برد. در واقع بشر برای هر پدیده، معادله-ای خاص آن دسته از پدیده‌ها را حل می‌کند، در حالی که این معادلات، همگی می‌توانند تفسیرهای متفاوتی از یک قانون باشند. شاید یکی از اشکالاتی که منجر به بروز چنین تعددی در قوانین فیزیک (و یا مهندسی) شده است به کار نگرفتن دیدگاه ذره‌ای در استخراج آن‌ها است. دیدگاه‌های متداول در مهندسی اغلب دیدگاه‌های ذره‌ای نیستند و سعی دارند که دنیای پیوسته‌ای را ترسیم نمایند. دیدگاه ذره‌ای در فیزیک، پس از کشف ذرات تشکیل دهنده طبیعت قوت بیشتری یافت. تاریخچه این دیدگاه در سیالات، به سالیان قبل برمی‌گردد که در ادامه به آن اشاره خواهد شد.

در زمینه مکانیک سیالات، کلود لوئیس ناویر^۱ در سال ۱۸۲۲ میلادی معادلات ناویراستوکس را برای سیال لزج ارایه کرد [۱]. این معادله براساس دیدگاه محیط پیوسته نوشته شده است. سال‌هاست که از این معادلات برای شبیه‌سازی حرکت سیال استفاده می‌شود. چندین سال بعد از ناویر، برخی از دانشمندان از جمله لودویگ بولتزمن^۲ نگاه متفاوتی به جهان ماده از جمله حرکت سیال ارایه کردند. او در تحقیقات فیزیک آماری پیش‌گام بود و در بسط نظریه‌ی اتمی گازها سهمی بزرگ داشت و آن را به صورت کمی

¹Claude-Louis Navier (1785 –1836)

²Ludwig Boltzmann (1844 –1906)

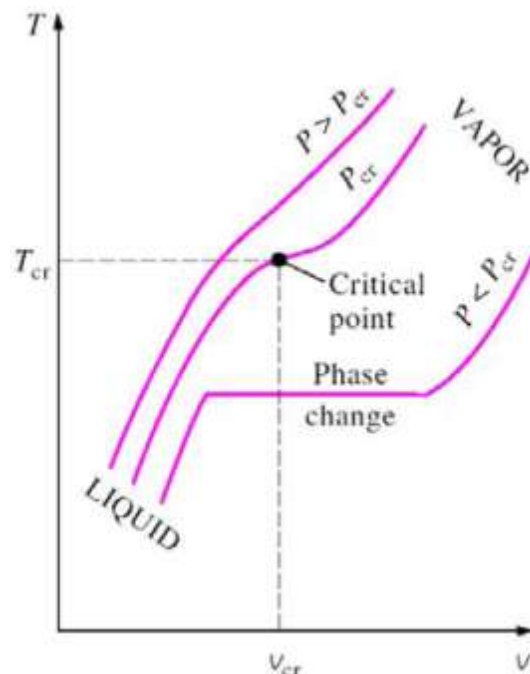
درآورد. تحقیقات او در ۱۸۷۲ میلادی منجر به ارایه معادله‌ای شد که توانایی توصیف رفتار ذرات سیال را به صورت آماری داشت. معادله بولتزمن، احتمال حضور ذرات را در مکان و زمان بررسی می‌کند. این معادله، دیدگاه میکروسکوپی دارد و امروزه روش‌های مشتق شده از آن نه تنها در محیط‌های پیوسته و غیر پیوسته و چندفاز، بلکه در مسائل کوانتوم [۲] نیز به عنوان روش‌هایی کارآمد مطرح می‌باشند. از جمله روش‌های حل معادله بولتزمن، می‌توان به روش شبکه بولتزمن اشاره نمود. این روش‌ها توانسته‌اند راه-گشای مشکلاتی در بررسی پدیده‌های پیچیده باشند.

سیال فوق بحرانی به عنوان یکی از پیچیده‌ترین سیالات خواص متغیر در انتقال حرارت مطرح است. پدیده‌هایی که در انتقال حرارت این نوع سیالات مشاهده شده است از جمله موارد نادر می‌باشد. از آن جمله می‌توان به پدیده اثر پیستونی که منجر به افزایش انتقال حرارت می‌شود اشاره نمود. این رساله با هدف ارایه مدل مسوکویی جهت شبیه‌سازی انتقال حرارت سیال فوق بحرانی تعریف شده است.

۲-۱- جریان سیال فوق بحرانی

یکی از پیچیده‌ترین سیالات خواص متغیر که تغییرات خواص آن به شدت تابع فشار و دما است، سیال فوق بحرانی می‌باشد. این تغییرات به حدی است که شاید بتوان سایر سیالات با خواص متغیر را حالت ساده شده‌ای از وضعیت سیال در نزدیکی نقطه بحرانی دانست. برای درک بهتر سیال فوق بحرانی نمودار T-V (دما-حجم) مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

همان‌طور که در شکل ۱-۱ ملاحظه می‌کنید با افزایش فشار، خط فشار ثابتی پدیدار می‌شود (مثلاً $P = 7.39 \text{ MPa}$ برای CO_2) که با افزایش دما، اثری از فرآیند تبخیر در آن نیست. در این حالت به جای تغییر فاز یک نقطه عطف ایجاد می‌شود. شیب منحنی اشباع در این نقطه برابر صفر است. این نقطه، نقطه بحرانی نام دارد. برای هر فشار فوق بحرانی یک درجه حرارت نزدیک به دمای بحرانی وجود دارد که تغییرات خواص سیال، در آن درجه حرارت حداکثر است، به این دما، دمای شبه بحرانی گفته می‌شود. منظور از سیال فوق بحرانی، سیال در فشار بالای نقطه بحرانی و دمای نقطه شبه بحرانی (نزدیک به نقطه بحرانی) است.



شکل ۱-۱ رفتار یک ماده خالص برای فشارهای زیر بحرانی، بحرانی و فوق بحرانی