دانشکده مهندسی مکانیک

پایان‌نامه

برای دریافت درجه دکتری در رشته مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی

روش حجم محدود – لتیس بولتزمن
در تحلیل جریان نانوسیال تراکم ناپذیر با انتقال گرما

اساتید راهنما:

دکتر سید اسماعیل رضوی دکتر احمد فرزدی

اساتید مشاور:

دکتر محمدعلی جعفری‌زاده دکتر مسعود دربندی

پژوهشگر:

جلال قاسمی

دی ماه ۱۳۸۸

بسم الله الرحمن الرحيم

نام خانوادگی: قاسمی **نام:** جلال

عنوان پایان‌نامه: روش حجم محدود – لتیس بولتزمن در تحلیل جریان نانوسیال تراکم ناپذیر با انتقال گرما

اساتید راهنما: دکتر سید اسماعیل رضوی، دکتر احمد فرزدی

اساتید مشاور: دکتر محمدعلی جعفری‌زاده، دکتر مسعود دربندی

مقطع تحصیلی: دکترا **رشته:** مهندسی مکانیک **گرایش:** تبدیل انرژی **دانشگاه:** تبریز

دانشکده: فنی و مهندسی مکانیک **تاریخ فارغ التحصیلی: دی ماه** ۸۸ **تعداد صفحه:** ۱۳٤

واژه‌های کلیدی: روش حجم محدود- لتیس بولتزمن، نانوسیال، جریان تراکم ناپذیر، مدل BGK، نیروهای بین ذره‌ها

چکیده:

هدف از این تحقیق توسعه روش لتیس-بولتزمن برای تحلیل جریان و انتقال گرما در نانوسیال تراکم‌ناپذیر بوده است. لتیس D_2Q_9 برای گسسته سازی معادلات استفاده شده و برای جمله برخورد در معادله بولتزمن مدل BGK به کار رفته است. در حل عددی معادلات توزیع جریان و انرژی بولتزمن، روش حجم محدود مرکز سلول با شبکه دلخواه استفاده گردید. با ارایه ایده جدید فاکتورهای محاسبه شار و انرژی به همراه گسسته‌سازی جمله زمانی معادله بولتزمن با رانگ-کوتای مرتبه پنج اصلاح شده، دقت و همگرایی این روش به شکل چشمگیری بهبود پیدا کرد. همچنین با استفاده از ایده جدید قرار دادن لتیس مجازی در ضلع منطبق بر مرز هر سلول، روش Bounce-back با دقت خوبی قابل استفاده در مرز دیواره برای شبکه مورد نظر گردید. برای حل میدان دما از روش تابع توزیع دوگانه(DDF) استفاده گردید که پایداری عددی بهتری نسبت به دیگر روشها دارد. برای اعمال شرایط مرزی گرما از روش تجزیه تابع توزیع انرژی به بخش تعادلی و بخش غیر تعادلی استفاده گردید که سازگاری خوبی با روش حجم محدود در شبکه انتخاب شده دارد. به علت کارایی روش لتیس-بولتزمن در تحلیل نانوسیالها و امکان اعمال نیروهای داخلی بین ذره‌ها و اثر برخوردهای داخلی ذرات در معادلات جریان و انرژی بولتزمن، از آن برای تحلیل جریان و انتقال گرمای نانوسیال آب-اکسید مس استفاده گردید. عوامل شناخته شده در بهبود خواص انتقال گرمایی نانوسیال‌ها، نظیر شناوری و جاذبه، اصطکاک، براونی و پتانسیل‌های جاذبه و دافعه DLVO از روش ترکیبی استفاده شده است. برای ارزیابی نتایج به دست آمده، جریان داخل کانال دوبعدی، جریان اطراف استوانه و جریان و انتقال گرما در پله وارون با و بدون مانع استوانه‌ای و انتقال گرما برای نانوسیال آب-اکسید مس در کانال دوبعدی تحلیل گردیده و در هر کدام از مطالعات موردی نتایج با نتایج تجربی و عددی دیگر محققان مقایسه شده است.

تقدیم به

همه‌ی اعضای خانواده‌ام

همه‌ی اعضای خانواده‌ام

و

آنهایی که زندگی را برای دیگران می‌خواهند...

آنهایی که زندگی را برای دیگران می‌خواهند...

تشکر و قدردانی

سپاس از آن خداوندی است که از سپاس هر سپاسگزاری بی‌نیاز است ولی آن را روشی برای اعتراف به مقام لاهوتی و صمدی و ربانیت خود مقرر ساخته، و وسیله افزایش رحمت و جاده جستجوی احسان خود نموده است. حقیقت اعتراف به نیکی انعامش را در درون لفظ نهان ساخته و خود سپاس گویی‌اش نعمت دیگری است که آن را فراهم نموده است و اعتراف به زبان را جایگزین هر گونه سپاسی پذیرفته است. سپاس خدای را که از خطا و گناهم، حلم و بردباری کرد چنانکه گویی گناهی از من سر نزده است. پس خدای من پیشم محبوب ترین موجود است به حمد و ستایش من، او سزاوارتر از همه عالم است.

خداوندا

تنها تو می‌دانی که این طومار می‌تواند پایان خیلی چیزها باشد. جز شور و شوق آموختن و عشق به آنهایی که اوج افتخاراتمان وام‌دار عشق و فداکاری آنان است. و من در اینجا با زبانی به عشق آنان گویا شده مراتب سپاس و قدردانی خویش را از همه آن عزیزان اعلام می‌دارم. سپاسگزارم از تمامی اعضای خانواده عزیزم که همواره مرا در راه تحصیل و کسب دانش با تمام وجود یاری و موجبات پیشرفت مرا فراهم نمودند. از راهنماییهای ارزنده و قدم به قدم آقای دکتر سید اسماعیل رضوی که الگوی علمی و اخلاقی اینجانب هستند، تشکر و قدرانی دارم. از آقای دکتر احمد فرزدی که در راه انجام این پروژه، همواره مرا یاری نمودند، کمال تشکر را دارم. بر خود لازم می‌دانم از زحمات سازنده جناب آقای دکتر محمدعلی جعفری‌زاده و جناب آقای دکتر مسعود دربندی اساتید محترم مشاور پایان نامه که در تمامی مراحل انجام این پروژه با ایده‌ها، نظرات و حمایت‌های بی‌دریغ‌شان مرا یاری نمودند سپاسگزاری نمایم.

از تمامی مسئولین و کارکنان محترم دانشکده مهندسی مکانیک و دیگر اساتید و دانشجویان در دانشکده‌های فیزیک، شیمی و ریاضی دانشگاه تبریز، دانشکده داروسازی دانشگاه علوم پزشکی تبریز، مرکز علوم پایه و تحصیلات تکمیلی زنجان و دیگر کسانی که سبب حل بسیاری از مشکلات در راه انجام این پایان‌نامه شدند، قدردانی می‌نمایم.

جلال قاسمی

دی ماه ۸۸

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه و پیشینه پژوهش

مقدمه ۲
۱-۱- روش دینامیک مولکولی..... ۲
۱-۲- روش‌های مبنا-ذره‌ای ۳
۱-۳- روشهای مزوسکوپیکی ۳

فصل دوم: مبانی نظری روش لتیس-بولتزمن و روش حجم-محدود لتیس-بولتزمن

مقدمه ۱۰
۲-۱- روش LGA..... ۱۰
۲-۲- معادله بولتزمن ۱۱
۲-۳- گسسته سازی معادله بولتزمن ۱۳
۲-۳-۱- گسسته سازی معادله بولتزمن بدون اعمال جمله نیرو..... ۱۳
۲-۳-۱-۱- گسسته سازی تابع توزیع تعادلی ۱۵
۲-۳-۲- گسسته سازی معادله بولتزمن با اعمال جمله نیرو ۱۶
۲-۳-۲-۱- نیرو به شکل تابع پتانسیل تعریف شدنی باشد..... ۱۷
۲-۳-۲-۲- محاسبه تابع توزیع تعادلی با سرعت اصلاح شده ۱۸
۲-۳-۲-۳-افزودن جمله اضافی با تقریب BGK..... ۱۹
۲-۳-۲-۴- روش ترکیبی ۱۹
۲-۳-۲-۵- هم ارزی معادله بولتزمن و معادلات ناویر-استوکس با اعمال جمله نیرو ۲۰
۲-۴- انتقال گرما در روش لتیس بولتزمن..... ۲۱
۲-۴-۱- روش چند سرعتی..... ۲۱
۲-۴-۲- روش اسکالر غیر فعال ۲۲
۲-۴-۳-روش تابع توزیع دوگانه..... ۲۲
۲-۵- روش حجم محدود-لتیس بولتزمن..... ۲۶
۲-۵-۱- فاکتورهای محاسبه شار بر مبنای فشار ۲۹

عنوان **صفحه**

۲-۶- شرایط مرزی در روش لتیس-بولتزمن ۳۳
۲-۶-۱- شرایط مرزی جریان ۳۳
۲-۶-۲- شرایط مرزی تناوبی ۳۳
۲-۶-۳- شرایط مرزی ورودی و خروجی ۳۴
۲-۶-۴- شرایط مرزی دیواره ۳۶
۲-۶-۵- شرایط مرزی گرمایی ۴۱
۲-۶-۵-۱- شرایط مرزی گرمایی دیواره با دمای ثابت و شار گرمایی ثابت ۴۲
۲-۷- شرایط مرزی در FV-LBM ۴۴

فصل سوم: نانوسیالها

۳-۱- رسانایی در نانوسیالها ۴۷
۳-۳- عوامل اصلی شناخته شده در بهبود انتقال گرما در نانوسیالها ۵۰
۳-۳-۱- حرکت‌های براونی و نیروی براونی ۵۰
۳-۳-۲- تابع پتانسیل برخوردی و نیروهای بین ذرهای ۵۳
۳-۳-۲-۱- نیروهای ناشی از برخوردهای مستقیم ذره‌ها ۵۳
۳-۳-۲-۲- نیروهای الکترواستاتیکی و واندروالسی، نظریه DLVO ۵۳
۳-۳-۲-۳- برآیند نیروهای شناوری و گرانشی ۵۸

فصل چهارم: نتایج عددی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات

مقدمه ۶۰
۴-۱- جریان بین دو صفحه موازی ۶۰
۴-۲- جریان اطراف استوانه در داخل کانال ۶۴
۴-۲-۱- تاثیر فاکتورهای محاسبه شار بر مبنای فشار ۶۶
۴-۲-۲- جریان پایای اطراف استوانه ۶۶
۴-۲-۳- جریان ناپایای اطراف استوانه ۷۱
۴-۳- جریان در پله وارون با و بدون مانع استوانه‌ای ۷۶

عنوان **صفحه**

۴-۳-۱- تحلیل جریان مساله ۷۷
۴-۴- انتقال گرما در پله وارون با و بدون مانع استوانهای ۸۶
۴-۴-۱- تاثیر فاکتورهای محاسبه شار گرمایی بر مبنای دما ۸۷
۴-۵-جریان و انتقال گرما در نانوسیالها ۹۳
۴-۵-۱- رسانش در نانوسیالها ۹۳
۴-۵-۲- همرفتی در نانوسیالها ۹۶
۴-۶- نتیجه‌گیری ۱۰۰
۴-۷- پیشنهادات ۱۰۲

مراجع

مراجع ۱۰۴

پیوست(الف)

الف-۱- معادله بولتزمن ۱۱۵
الف-۲- گسسته سازی تابع توزیع تعادلی بر روی لتیس D_2Q_9 ..... ۱۱۸
الف-۳- هم ارزی معادله بولتزمن با معادلات ناویر-استوکس با اعمال جمله نیرو ۱۲۱

پیوست(ب)

ب-۱-ضریب رسانایی موثر نانوسیالها ۱۲۶

چکیده انگلیسی

چکیده انگلیسی ۱۳۴

فهرست شکل‌ها

عنوان شکل **صفحه**

فصل اول

شکل(۱-۱): دیدگاه مزوسکوپیکی در روشهای عددی..... ۴

فصل دوم

شکل(۲-۱): لتیس های رایج دو بعدی در روش لتیس-بولتزمن.....۱۴
شکل(۲-۲): شبکه مرکز-سلول برای گسسته سازی معادله بولتزمن به روش حجم محدود ۲۷
شکل(۲-۳): تغییرات ضرایب و بر حسب تغییرات فشار سلول پایین‌دست.....۳۱
شکل (۲-۴): شرط مرزی تناوبی در روش لتیس-بولتزمن..... ۳۴
شکل (۲-۵): لتیس‌های مرزی برای شبکه مربعی..... ۳۵
شکل (۲-۶): مفهوم ساده بازگشت به عقب ذرات در دیواره.....۳۶
شکل (۲-۷):لایه اضافی در روش برونیابی.....۳۸
شکل (۲-۸): مرز دیواره منحنی.....۳۹
شکل (۲-۹): نمایش پارامترهای لازم برای بیان شرط دیوار خمیده.....۴۰
شکل (۲-۱۰): سلولهای مرز، (a) ورودی، (b) خروجی، (c) دیواره جامد.....۴۵

فصل سوم

شکل(۳-۱): برخی نتایج تجربی رسانایی مؤثر نانوسیالها نسبت به سیال پایه.....۴۸
شکل(۳-۲): نتایج تجربی برای نانوسیال Al_2O_3 .....۴۹
شکل(۳-۳). حرکت نامنظم ذره‌ها ریز در سیال ساکن.....۵۰
شکل(۳-۴) : نیروی جاذبه واندروالسی در طبیعت.....۵۵
شکل(۳-۵): پتانسیل کل DLVO..... ...۵۶
شکل(۳-۶): تاثیر (a) پتانسیل سطحی ψ_s، (b) طول پرش Debaye بر پتانسیل کل DLVO ۵۷

فهرست شکل‌ها

عنوان شکل **صفحه**

فصل چهارم

شکل(۴-۱): هندسه، شبکه‌بندی و نوع شرایط مرزی در جریان بین دو صفحه موازی ۶۱

شکل(۴-۲): نتایج تجربی تغییرات پروفیل سرعت جریان بین دو صفحه موازی با ورودی یکنواخت..... .... ۶۱

شکل(۴-۳): بردار سرعت جریان بین دو صفحه تخت با استفاده از FV-LBM.....۶۲

شکل(۴-۴): جریان بین دو صفحه موازی در حالت توسعه یافته، Re=100 و سرعت یکنواخت ورودی ۱/...۶۳

شکل(۴-۵): سرعت در کانال در x=0.016, 0.033, 0.066, 0.1083, 0.245 ، Re=100 .....۶۳

شکل(۴-۶): تغییرات سرعت در طول خط مرکزی کانال تا ناحیه توسعه یافتگی ۶۴

شکل(۴-۷): دامنه محاسباتی و شرایط مرزی در جریان استوانه در داخل کانال.....۶۵

شکل(۴-۸): تاثیر ضرایب تصحیح محاسبه شار در دقت و همگرایی ۶۷

شکل(۴-۹): نسبت s/d بر حسب Re ۶۸

شکل(۴-۱۰): بخشی از شبکه محاسباتی..... ۶۸

شکل(۴-۱۱): خطوط جریان و جریانهای چرخشی پشت استوانه..... .... ۶۹

شکل(۴-۱۲): تغییرات نسبت s/d بر حسب رینولدز..... ۷۰

شکل(۴-۱۳): خطوط هم تراز مولفه افقی سرعت برای Re=۴۰ .....۷۱

شکل(۴-۱۴): خطوط هم تراز مولفه عمودی سرعت برای Re=۴۰ .....۷۲

شکل(۴-۱۵): خطوط هم تراز فشار در اطراف استوانه برای Re=۴۰.....۷۲

شکل(۲-۱۶): خطوط هم تراز ورتیسیته برای Re=۴۰.....۷۲

شکل(۴-۱۷): تغییرات شکل جریان اطراف استوانه در حالت ناپایا..... ۷۳

شکل(۴-۱۸): تشکیل گردابه‌ها در پشت استوانه، Re=۱۵۰.....۷۴

شکل(۴-۱۹): نمودار همگرایی در حالت جریان ناپایدار و نوسانات تشکیل گردابه‌ها ۷۵

شکل(۴-۲۰): ضریب پسا برای Re=۱۰۰.....۷۵

شکل(۴-۲۱) هندسه و ابعاد پارامتری پله وارون با مانع استوانه‌ای ۷۶

شکل(۴-۲۲): بردار سرعت در پله وارون، ER= ۳.....۷۸

شکل(۴-۲۳): خطوط جریان، ER= ۳.....۷۹

فهرست شکل‌ها

عنوان شکل **صفحه**

شکل(۴-۲۴): طول بی‌بعد شده جریان برگشتی بر حسب رینولدز، ER=3 .....۷۹

شکل(۴-۲۵): تغییرات منحنی سرعت افقی در مقاطع مختلف پله وارون، Re=۷۳ .....۸۰

شکل(۴-۲۶):جریان برگشتی ثانویه در دیواره بالایی برای ER=۳ و Re=۳۵۰ .....۸۰

شکل(۴-۲۷): طول بی‌بعد شده جریان برگشتی اولیه بر حسب رینولدز، ER=2 .....۸۱

شکل(۴-۲۸):بردار سرعت در مقاطع مختلف،ER=۲.....۸۲

شکل(۴-۲۹): خطوط جریان ،۲ =ER ۸۵

شکل(۴-۳۰): خطوط جریان(سمت چپ) و بردار سرعت(سمت راست) در پله وارون با مانع ، ۲ =ER،..... ۸۵

شکل(۴-۳۱): مقایسه خطوط جریان در پله وارون با مانع استوانه‌ای، ۱۷۰ =Re،..... ۸۵

شکل(۴-۳۲) تاثیر ضرایب تصحیح محاسبه شار انرژی(دما) در دقت و همگرائی عددی دما..... ۸۹

شکل(۴-۳۳): تغییرات عدد ناسلت در دیواره پایین دست پله وارون، حالت الف۲ =ER، ۰/۷۰=Pr ۸۹

شکل(۴-۳۴): تاثیر عدد پرانتل در ناسلت، حالت الف، ۲ =ER، ۱۰۰ =Re ۸۹

شکل(۴-۳۵): تغییرات عدد ناسلت در دیواره پایین دست پله وارون، حالت ب۳ =ER، ۱/۰=Pr ۹۰

شکل(۴-۳۶): تغییرات ناسلت محلی بر حسب x/L_1 در حالت ب، ۳ =ER، ۰/۷=Pr ۹۱

شکل(۴-۳۷): تغییرات عدد ناسلت در دیواره پایین دست پله وارون با مانع استوانه‌ای..... ۹۲

شکل(۴-۳۸): تاثیر دما و کسر حجمی نانوذره‌ها در طول پرشDebye ۹۴

شکل(۴-۳۹): تغییرات k_{eff}/k_{bf} بر حسب تغییرات دما برای نانوذره اکسید مس، $a = 12.1nm$ ۹۵

شکل(۴-۴۰): تغییرات k_{eff}/k_{bf} بر حسب درصد حجمی نانوذره‌ها برای نانوذره اکسید مس.....۹۵

شکل(۴-۴۱): بردار نیروهای وارد بر نانوذره‌ها از طرف سیال پایه..... ۹۷

شکل(۴-۴۲): تغییرات عدد ناسلت در طول کانال دوبعدی،۷۳ =Re ۹۹

شکل(۴-۴۳): تغییرات عدد ناسلت متوس در دیواره پایین کانال دوبعدی.....۹۹

پیوست(ب)

شکل(ب-۱) سیستم مختصات برای N ذره کروی در حجم V ۱۲۶

فهرست جدول‌ها

عنوان جدول **صفحه**

جدول(۴-۱): نتایج استقلال از شبکه بودن نسبت برای Re= ۳۰ ..... ۶۸

جدول(۴-۲): ضریب پسا و نسبت s/d در جریان اطراف استوانه..... ۷۰

جدول(۴-۳): ضریب پسا و نسبت s/d در جریان اطراف استوانه..... ۷۲

جدول(۴-۴): مقایسه ضریب پسا و عدد Strouhal برای Re=۱۰۰ ..... ۷۶

جدول(۴-۵):طول جدایش جریان L_1 در پله وارون با و بدون مانع استوانه‌ای، Re=۵۰ ..... ۷۷

جدول(۴-۶): طول بی‌بعد L_2/h، L_2/h و L_3/h در پله وارون بدون مانع استوانه‌ای،=ER..... ۸۴

فصل اول

مقدمه و پیشینه پژوهش

مقدمه

در حالت کلی برای تحلیل عددی جریان سیال سه نگرش میکروسکوپیک، مزوسکوپیک[۱] و ماکروسکوپیک وجود دارد. در سال‌های اخیر، روش لتیس- بولتزمن[۲](LBM) که یک روش مزوسکوپیکی است، به عنوان یک طرح عددی مطلوب برای شبیه‌سازی جریان‌های سیال و مدل‌سازی فیزیک سیالات، توسعه یافته است. این روش به ویژه برای مدل‌سازی شرایط مرزی پیچیده، جریان‌های چندفازی و چند جزیی و جریان‌های آشفته مناسب است [۱،۲]. برخلاف طرح‌های عددی مرسوم که بر پایه گسسته‌سازی معادلات پایستاری ماکروسکوپی می‌باشد، روش لتیس- بولتزمن بر پایه مدل‌های میکروسکوپی و نظریه جنبشی ذرات و تحلیل آماری آنها بنا گردیده است. روش‌های عددی متعارف در دینامیک سیالات محاسباتی در محدوده عدد نادسن[۳] کم کارایی داشته و با بیشتر شدن آن، روش‌های دینامیک مولکولی[۴] ، ذره-مبنا[۵] ، لتیس-گاز خودکار[۶] و روش لتیس-بولتزمن مناسب است[۳].

۱-۱- روش دینامیک مولکولی

در این روش حرکت و برخورد تک تک ذرات بررسی می‌گردد و اغلب در علم مواد و زیست شناسی و به ویژه برای شناخت ساختار، دینامیک و ترمودینامیک سلول‌های زیستی به کار می‌رود. در

---

[1] - Mesoscopic
2- Lattice Boltzmann Method
3 - Knudsen number
4 - Molecular Dynamics(MD)
[5] - Particle-based methods
[6] - Lattice Gas Automata

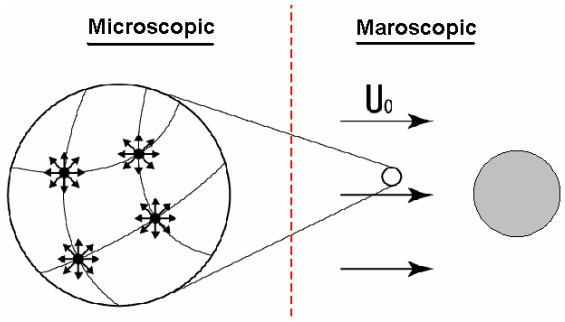
هر مرحله زمانی مکان و سرعت تمامی ذرات طبق قانون دوم نیوتن تعیین می شود[۴]. این روش برای مسایل کاربردی در مقیاس مهندسی غیر ممکن بوده و یا مقرون به صرفه نیست.

۱-۲- روش‌های ذره-مبنا

از روش‌های کارآمد برای شبیه‌سازی جریان با عدد نادسن بالا بوده و از مشهورترین آن روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو (DSMC) است که اولین بار توسط Bird در سال ۱۹۹۴ ابداع گردید[۵]. در این روش حرکت و برخورد مجموعه ذرات به جای تک تک آنها به شکل تصادفی بررسی و در نهایت مقادیر ماکروسکوپیک به روشهای آماری تعیین می‌گردد. به همین دلیل نیازی به تک تک مولکول‌ها در میدان حل نیست. در محاسبات واقعی با این روش، سیال گاز با تعداد زیادی ذره شبیه‌سازی می‌شود. به طوری که تمام خواص ماکروسکوپی جریان با تحلیل‌های آماری به دست می‌آیند. چون در این روش تعداد ذراتی که در میدان حل توزیع می‌شوند به تعداد مولکول‌ها وابسته است، حجم عملیات در این روش نیز چشمگیر بوده و کمتر مورد توجه در حل مسایل مهندسی است. در حالت توسعه یافته این روش، ناحیه محاسباتی مشابه روش‌های معمول عددی شبکه بندی شده ولی فاصله نقاط شبکه متناسب با طول پویش آزاد سیال تعیین می‌گردد[۶].

۱-۳- روشهای مزوسکوپیکی

روش‌های مزوسکوپیک بر اساس نظریه جنبشی ذرات و مکانیک آماری بوده و مطالعه جریان سیال و انتقال گرما در آن بر پایه نظریه‌های میکروسکوپیکی صورت می‌گیرد. مطابق شکل(۱-۲)، دیدگاه مزوسکوپیک میان دو دیدگاه میکروسکوپیک و ماکروسکوپیک قرار دارد و پلی میان این دو دیدگاه است.



شکل(۱-۲): دیدگاه مزوسکوپیکی در روشهای عددی

در این روش به جای یک ذره منفرد از سیال، مجموعه‌ای از ذره‌ها به عنوان یک ذره در نظر گرفته می‌شود. این ذره‌ها می‌توانند در هر جهتی حرکت کنند طوری که معادله حرکت آنها (برخورد و ارتباطشان) آماری بوده و با معادلات توزیع بیان می‌گردد[۷]. مقادیر ماکروسکوپیک با میانگین‌گیری۱ آماری از مشخصه‌های حرکت و برخوردهای ذرات منفرد به دست می‌آید و با روش‌های ریاضی می‌توان از معادلات حاصل به معادلات ناویر-استوکس رسید.گسسته سازی معادلات ناویر-استوکس و حل عددی آن با روشهای متداول عددی اعم از اختلاف محدود، المان محدود، حجم محدود یک روش بالا به پایین۲ بوده اما تحلیل سیال بر اساس روشهای مزوسکوپیک یک روش پایین به بالا۳ است.

از مهمترین ویژگی‌های روش لتیس-بولتزمن امکان اعمال نیروها و اثر برخوردهای داخلی ذره‌ها و همچنین داشتن الگوریتم ساده حل و امکان پردازش موازی آن است. Von Numann در سال ۱۹۴۰ با ارایه ایده ماشین سلولی[۴]، آغازگر راهی بود که منجر به پیدایش مدل‌های اولیه LGA گردید. یک ماشین سلولی سیستمی است که از اجزای کوچکتر (سلول‌ها) تشکیل شده است. حالت این سیستم با مشخص شدن حالت سلول‌ها تعیین گردیده و با الگوریتم‌های ساده، موضعی و تکرار شونده حالت جدید سلول‌ها معین می‌شود. روش LGA اولین بار توسط Hardy و همکاران[۸] ارایه شد. در این روش ذرات مقید به حرکت در راستاهای معینی می‌باشند. با توجه به این قید، تحول سیستم و قانون

1- Ensemble averaged
2- Top-down approach
3- Down-top approach
3 - Cellular Automata

دینامیکی حاکم بر ذرات سیستم مانند یک تابع گسسته بیان می‌گردد. در این روش حضور و یا عدم حضور یک ذره در شبکه با عدد یک و صفر تعیین گردیده و حالت بعدی ذره بسته به قواعد به کار رفته در آن(جمله برخورد) تعیین می‌شود. آنها با این روش نشان دادند که می‌توان یک مدل گسسته کامل برای شبیه‌سازی سیالات در یک شبکه مربعی را ارائه داد. اما به دلیل غیر ایزوتروپ بودن آن سازگاری مناسبی با معادلات ناویر-استوکس نداشت. Frisch و همکاران[۹] از شبکه شش ضلعی و تقارن موجود در آن توانستند معادلات ناویر-استوکس دو بعدی را برای سیال تراکم ناپذیر استخراج نمایند. مدل سه بعدی FHP نیز توسط d'Humieres و همکاران[۱۰] ارائه گردید. از مزایای مهم این روش سادگی برنامه نویسی و امکان حل موازی در آن است[۱۱،۱۲]. از طرفی این روش در ذات نوسانی بوده و در گستره مشخصی می‌توان برای حل مسایل در مقیاس کاربردی از آن استفاده کرد. برای رفع این مشکل، روش LBM ارائه گردیده که از نظر تاریخی شکل تکامل یافته روش LGA است. در این روش از یک تابع توزیع برای احتمال حضور ذرات در یک نقطه از شبکه استفاده می‌شود. این روش اولین بار توسط McNamara و Zanetti [۱۳]معرفی گردید که جمله برخورد در آن همانند روش LGA بوده و توزیع Fermi-Dirac برای تابع توزیع تعادلی به کار رفته بود. Higuera و همکارش[۱۴] با فرض دور نبودن تابع توزیع ذرات، از تابع توزیع تعادلی، توانستند عملگر برخورد بولتزمن را خطی سازی کنند. Chen و همکاران[۱۵] و Qian و همکاران[۱۶] از مفهوم اپراتور خطی شده بولتزمن و زمان رهایش[1] با تقریب BGK[2][۱۷] برای جمله برخورد استفاده نموده و گام‌های اساسی را برای گسسته سازی معادله بولتزمن برداشتند. روش لتیس-بولتزمن با تقریب BGK برای جمله برخورد به روش LBGK معروف است. Chen و همکاران[۱۸] توانایی روش لتیس-بولتزمن را برای شبیه‌سازی جریان سیال تک جزیی، جریان سیال دو جزیی، جریان سیال با شرایط مرزی

[1] - Relaxation time
[2] - Bhatnagar , Gross and Krook

پیچیده و جریان آشفته بررسی نمودند. Huo و همکاران[۱۹] با روش لتیس-بولتزمن جریان داخل حفره را در گستره وسیعی از اعداد رینولدز شبیه‌سازی نمودند. Chen و همکاران[۲۰] به بررسی کلی اعمال شرایط مرزی با به کارگیری لتیس‌های یکنواخت و منظم در این روش پرداختند. فرمول‌بندی و گسسته‌سازی معادلات در روش لتیس-بولتزمن استاندارد بر روی شبکه منظم مربعی توسعه زیادی یافته است که برای هندسه‌های پیچیده و مرزهای منحنی مناسب نبوده و از دقت پایینی برخوردار است. در سال‌های اخیر تحقیقاتی در زمینه امکان استفاده از شبکه های غیر منظم در روش لتیس-بولتزمن به کمک روش اختلاف محدود، المان محدود و حجم محدود انجام گرفته است که روش حجم محدود به دلیل سازگاری فیزیکی، بیش از دیگر روشها مورد توجه است. Xi و همکاران[۲۱] با حل انتگرالی معادله بولتزمن در یک شبکه دوگانه چهارضلعی غیر منظم با لتیس D_2Q_9، جریان چرخشی کوئت را با FV-LBM[1] حل کرده و نتایج آن را با نتایج تحلیلی مقایسه نموده اند که نشان از دقت خوب این روش دارد. Peng و همکاران[۲۲]، ترکیب FV-LBM را برای شبکه بی سازمان مثلثی با لتیس D_2Q_7 توسعه داده و برای محاسبه متغیرهای میکروسکوپیکی هر لتیس از شش نقطه مجاور استفاده نمودند. آنها با گسسته سازی جمله شار با اختلاف مرکزی، جریان پوازی را با اعمال نیروی خارجی حل نمودند که خطای کمی در نتایج دیده می‌شود. با وجود دقت خوب، زمان محاسبه در این روش بالا است. Stiebler و همکاران[۲۳] ترکیب FV-LBM را با طرح Upwind در حل جریان تراکم ناپذیر صلیبی اطراف استوانه در داخل کانال دو بعدی به کار برده و با نتایج دیگر روش‌ها مقایسه نموده اند. آنها نشان دادند که زمان محاسبه حدود ۵۰٪ نسبت به روش LBM کاهش می یابد ولی دقت آن کمتر است. تحقیقاتی نیز در زمینه استفاده از روش LB برای حل جریان متلاطم انجام گرفته و این روش مستقیماً در شبیه سازی این نوع جریانها نیز مورد استفاده قرار گرفته است. Succi و همکاران[۱]، پیشنهاد استفاده از زمان رهایش در روش LB را در جریان متلاطم را ارایه

[1] - Finite-Volume Lattice Boltzmann

نموده‌اند. Luo و همکاران[۲۴] جریان متلاطم در لایه مرزی را با استفاده از هر دو روش Pseudo-spectral و LB مطالعه و نتایج آن با مقادیر پیش بینی شده از روشهای تئوری مقایسه کردند که موفقیت خوب این روش را در حل میدانهای چرخش در جریان متلاطم را نشان می دهد.

اعمال شرایط مرزی در روش لتیس-بولتزمن و سازگار نمودن آن با قوانین پایستاری جرم، اندازه حرکت و انرژی بر حسب متغیرهای ماکروسکوپیکی، از مسایل مهم در این روش است. Chen و همکارش[۲۰] شرط مرزی عدم لغزش در دیواره و شرط فشار در جریان اطراف استوانه با روش لتیس-بولتزمن را با برونیابی بر حسب متغیرهای میکروسکوپیکی اعمال و نتایج خوبی را در مقایسه با روش اختلاف-محدود به دست آوردند. Zoh و He[۲۵] شرط مرزی برگشت به عقب[۱] در روش لتیس-بولتزمن با تقریب BGK را بررسی کرده و نشان دادند که شرط مرزی برگشت به عقب برای شرط عدم لغزش در دیواره ساکن بسیار مناسب است. علاوه بر آن روشهایی را برای اعمال شرایط ورودی، خروجی و فشار ارایه داده‌اند.

در این پایان نامه روش جدیدی برای اعمال شرایط مرزی در FV-LBM مرکز-سلول ارایه شده است که شرایط عدم لغزش در دیواره و شرایط ورودی، خروجی و فشار را ارضا می نماید. بهبود شرایط همگرائی و افزایش دقت عددی روش لتیس-بولتزمن از دیگر زمینه‌هایی است که به آن توجه گسترده شده است. در این پایان‌نامه با معرفی فاکتورهای جدیدی برای معادله ممنتوم و انرژی، بهبود چشمگیری در همگرایی و کاهش تعداد تکرار محاسبات گردیده است.

کاربرد نانوسیال‌ها که جزء سیالات دو جزیی محسوب می‌گردند، به دلیل بالا بودن مشخصه‌های انتقال گرما نسبت به سیال پایه، از اهمیت بالایی برخوردارند. مدل‌های تجربی و یا نیمه تجربی در این زمینه برای انواع نانوسیال‌ها ارایه گردیده که تصحیحاتی بر اساس خواص فیزیکی و یا شکل هندسی نانوذرات در معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی سیال پایه انجام گرفته است[۳۰-۲۶]. با توجه به

[۱]- Bounce-back

اینکه درصد نانوذرات در نانوسیال نسبت به سیال پایه بسیار کم است، عوامل اصلی بهبود انتقال گرما باید در سطح میکروسکوپی دنبال شود. با در نظر گرفتن نانوسیال به صورت یک سیال کلوئیدی، نتیجه گرفته می‌شود که این عوامل ناشی از برخوردهای بین ذرات و وجود پتانسیل‌های داخلی در نانوسیال است. در روش لتیس-بولتزمن این عوامل را می‌توان مستقیماً در معادلات اعمال کرد که از دلایل اصلی انتخاب آن برای تحلیل جریان و انتقال گرمای نانوسیال‌ها در این پایان‌نامه است. پژوهش‌های کمی در زمینه روش لتیس-بولتزمن در تحلیل نانوسیال صورت گرفته است. Xuan و Li[۳۱] با دید میکروسکوپیکی به عوامل بهبود انتقال گرما در نانوسیال‌ها پرداخته و Xuan و همکاران[۳۲] ضمن توسعه کار قبلی توزیع نانوذرات در نانوسیال آب-مس را با استفاده از روش لتیس-بولتزمن به دست آورده‌اند.

با بررسی پیشینه پژوهشی، در فصل دوم این پایان‌نامه مبانی نظری روش لتیس-بولتزمن و ترکیب آن با حجم محدود برای تحلیل جریان و انتقال گرما در سیال تراکم‌ناپذیر ارایه گردیده و با ارایه ایده‌های جدید، این مبانی برای بهبود نتایج عددی و اعمال شرایط مرزی توسعه داده شده است. در فصل سوم به بررسی نانوسیال‌ها به عنوان سیالات مهم از نظر انتقال گرما پرداخته شده است و مدل جامعی برای مشخصه‌های انتقال گرما در حضور گرادیان دما برای نانوسیالها ارایه گردیده است. در فصل چهارم به بررسی نتایج حل عددی حاصل از معادلات گسسته شده و ارزیابی ایده‌ها و مدل-های ارایه شده پرداخته و این نتایج با داده‌های مشابه عددی و تجربی مشابه دیگران مقایسه گردیده است. در پایان با بحث در مورد مطالب پایان‌نامه، پیشنهاداتی برای ادامه کار در این زمینه ارایه شده است.