روش

لتیس بولتزمن

www.ketab.ir

مؤلف: عبدالمجید محمد

مترجمان:

دکتر محمدرضا شاه‌نظری

(دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین‌طوسی)

مهندس فاطمه نیکان

شماره ۴۲۸

سرشناسه: محمد، عبدالمجید. Mohamad, Abdulmajeed A
عنوان و نام پدیدآور: روش لتیس بولتزمن/ مولف عبدالمجید محمد؛ مترجمان محمدرضا شاه‌نظری، فاطمه نیکان.
مشخصات نشر: تهران: دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، ۱۳۹۵.
مشخصات ظاهری: ۲۰۳ ص.؛ ۲۲×۲۹ س‌م.
شابک: 978-600-7867-42-6
وضعیت فهرست نویسی: فیپا
یادداشت: عنوان اصلی: Lattice Boltzmann method : Fundamentals and Engineering Applications With Computer Codes, c2011.
یادداشت: کتاب حاضر اولین بار در سال ۱۳۹۳ تحت عنوان«حل مسایل دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از روش لاتیزبولتزمن» با ترجمه محمدمهدی کشتکار توسط دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرمان، مرکز انتشارات علمی منتشر شده است.
یادداشت: کتابنامه: ص. ۱۹۱ - ۱۹۳.
عنوان دیگر: حل مسایل دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از روش لاتیزبولتزمن.
موضوع: سیالات — مکانیک — الگوهای ریاضی
موضوع: Fluid Mechanics -- Mathematical Models
موضوع: مکانیک عملی — الگوهای ریاضی
موضوع: Mechanics, Applied -- Mathematical Models
شناسه افزوده: شاه‌نظری، محمدرضا، ۱۳۴۵ - ، مترجم
شناسه افزوده: نیکان،فاطمه،۱۳۶۸ - مترجم
رده بندی کنگره: ۱۳۹۵ ۸ح۲۶م/TA۳۵۷
رده بندی دیویی: ۶۲۰/۱۰۶
شماره کتابشناسی ملی: ۴۶۳۲۹۹۸

ناشر: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی www.press.kntu.ac.ir

عنوان: روش لتیس بولتزمن
تألیف: عبدالمجید محمد
مترجمان: دکتر محمدرضا شاه‌نظری، مهندس فاطمه نیکان
نوبت چاپ: دوم
تاریخ انتشار: دی ۱۳۹۹، تهران
شمارگان: ۲۰۰ نسخه
شابک: ۶-۴۲-۷۸۶۷-۶۰۰-۹۷۸
چاپ: کیمیا
صحافی: گرنامی
ویراستار: گروه ویراستاری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
بها: ۴۳۰۰۰ تومان

(تمام حقوق برای ناشر محفوظ است)

خیابان میرداماد غربی- پلاک ۴۷۰- انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تلفن: ۸۸۸۸۱۰۵۲
میدان ونک - خیابان ولی‌عصر(عج) - بالاتر از چهارراه میرداماد - پلاک ۲۶۲۶- مرکز پخش و فروش انتشارات
www.press.kntu.ac.ir

www.ketab.ir

فهرست

فصل اول- مقدمه و سینتیک ذرات ۱

۱-۱ مقدمه ۱

۱-۲) نظریهٔ جنبشی ۴

۱-۲-۱) دینامیک ذرات ۴

۱-۲-۲) دما و فشار ۵

۱-۲-۳) تابع توزیع ۸

۱-۲-۴) توزیع بولتزمن ۱۴

فصل دوم - معادله بولتزمن ۱۷

۲-۱) معادله انتقالی بولتزمن ۱۷

۲-۲) رویکرد BGKW ۲۱

۲-۳) آرایش لتیس ۲۲

۲-۳-۱) مسائل یکبعدی ۲۲

۲-۳-۲) مسائل دوبعدی ۲۴

۲-۴) تابع توزیع تعادلی ۲۷

فصل سوم- الگوسازی معادلات نفوذ ۲۹

۳-۱) معادلات نفوذ ۲۹

۳-۲ رویکرد تفاضل محدود ۳۱

۳-۳) روش لیتس- بولتزمن ۳۳

۳-۴) تابع توزیع تعادلی ۳۶

۳-۵ بسط چپمن-انسکگ ۳۷

۳-۵-۱) بی‌بُعدسازی ۴۱

۳-۵-۲) نفوذ حرارت در یک صفحه نامتناهی تحت یک دمای ثابت ۴۳

www.ketab.ir

۳-۵-۳) شرایط مرزی ۴۴
۳-۶) جمله چاه یا چشمه ۴۷
۳-۷) انتشار تقارن محوری ۴۸
۳-۸) معادلهٔ نفوذ دوبعدی ۴۹
۳-۸-۱) الگوی $D2Q4$ ۵۰
۳-۸-۲) الگوی $D2Q5$ ۵۱
۳-۹) شرایط مرزی ۵۱
۳-۹-۱) مقادیر داده شده در مرز مشخص ۵۱
۳-۹-۲) شرایط مرزی آدیاباتیک ۵۲
۳-۹-۳) شرط مرزی شار ثابت ۵۲
۳-۱۰) نفوذ حرارتی دوبعدی در صفحه ۵۳
۳-۱۰-۱) الگوی $D2Q9$ ۵۳
۳-۱۰-۲) شرایط مرزی ۵۷
۳-۱۰-۳) شرایط مرزی شار ثابت ۵۷
۳-۱۱) مسائل ۵۷

فصل چهارم- شبیه‌سازی معادلات جابه‌جایی ۶۱

۴-۱) جابه‌جایی ۶۱
۴-۲) معادله جابه‌جایی- نفوذ ۶۲
۴-۲-۱) روش تفاضل محدود ۶۳
۴-۲-۲) لتیس بولتزمن ۶۴
۴-۳) تابع توزیع تعادلی ۶۶
۴-۴) بسط چپمن- انسکگ ۶۸
۴-۴-۱) مسائل جابه‌جایی- نفوذ دوبعدی ۷۴
۴-۵) روش لتیس بولتزمن دوبعدی ۷۵

www.ketab.ir

۴-۵-۱) الگوی $D2Q4$ ۷۵
۴-۵-۲) الگوی $D2Q9$ ۷۷
۴-۶) مسائل ۸۰
۴-۶-۱) احتراق در لایه متخلخل ۸۰
۴-۶-۲) خنک‌سازی صفحهٔ گرم ۸۱
۴-۶-۳ معادلات جفت شده با جمله منبع ۸۲
فصل پنجم- جریان سیال تراکم‌ناپذیر هم‌دما ۸۳
۵-۱) معادله ناویر- استوکس ۸۳
۵-۲) لتیس بولتزمن ۸۵
۵-۲-۱) رویکرد BGK ۸۵
۵-۳) شرایط مرزی ۹۰
۵-۳-۱) جهش به عقب ۹۰
۵-۳-۲) جهش به عقب با سرعت‌های معلوم ۹۳
۵-۳-۳) شرایط مرزی بلن ۹۸
۵-۳-۴) شرط مرزی پریودیک ۹۹
۵-۳-۵) شرط تقارنی ۹۹
۵-۴) کدنویسی ۱۰۰
۵-۵) مثال‌ها ۱۰۱
۵-۵-۱) حفره با دیوارهٔ بالاانی متحرک ۱۰۱
۵-۵-۲) جریان در حال توسعه در یک کانال دوبعدی ۱۰۲
۵-۵-۳) جریان حول موانع ۱۰۵
فصل ششم- جریان سیال تراکم‌ناپذیر غیر هم‌دما ۱۱۱
۶-۱) معادلات ناویر- استوکس و انرژی ۱۱۱
۶-۲) جابه‌جایی اجباری الگوی $D2Q9$ ۱۱۲
۶-۳) حفرهٔ تحت انتقال حرارت ۱۱۳

www.ketab.ir

پیشگفتار نویسنده

روش‌های محاسباتی به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای تحقیق و بررسی پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی و تحلیل مسائل مهندسی شناخته شده است. روش المانِ محدود برای نخستین‌بار به‌منظور حل مسائل سازهٔ توسط **تِرنر** در ۱۹۵۶م. مورد استفاده قرار گرفت.

در اواخر دههٔ ۶۰ میلادی روش یاد شده به‌عنوان روشی مقتدر در حل مسائل مشتقِ جزئی شناخته شد، همچنین در همان زمان، روش تفاضلِ محدود برای تحلیل مسائل مکانیک سیالات مورد استفاده قرار گرفت. در ۱۹۸۰م. روش حجمِ محدود در امپریال کالج لندن، به همین منظور، توسعه و ارائه شد. از آن زمان روش FVM به‌طور گسترده برای حل مسائل پدیدهٔ انتقال مورد بهره‌برداری قرار گرفت. در واقع روش‌های مورد اشارهٔ به یک خانواده از روش‌های باقی‌مانده وزنی تعلق دارند و تنها تفاوت آن‌ها مربوط به طبیعت و توابع وزنی‌شان می‌باشد. در ۱۹۸۸م.، «روش لتیس بولتزمن» توسط **مک نامارا** و **زانتی** برای رفع نقصان‌های روش لتیس گاز معرفی شد. از آن به بعد که این روش به‌عنوان الگوی جانشینِ ارزشمند برای حل مسائل دینامیک سیالات معرفی گردید، در روش‌های دینامیکِ محاسباتی سنتی معادلات ناویر- استوکس، معادلات پایستگی جرم، اندازه حرکت و انرژی را در نقاط گسسته به تحلیل می‌پردازد. به بیان دیگر، معادلات مشتق جزئی غیرخطی تبدیل به مجموعه‌ای ازمعادلات جبری شده که به‌صورت متوالی مورد حل قرار می‌گیرند. در روش LBM سیال با ذرات منقطع جایگزین می‌گردد. این جریان ذراتْ مشخص‌کننده جهت (لتیس) بوده و در نقاط لتیس برخورد می‌نمایند. روش LBM را می‌توان «روش صریح» نام برد. این فرایندهای جریان و برخورد به‌صورت محلی می‌باشند. از این‌رو دارای قابلیت برنامه‌نویسی در ماشین‌های پردازش به‌طور موازی هستند. زیباییِ دیگر روش مذکور در مواجهه با پدیده‌های پیچیده نظیر مرز متحرک (مسائل چندفاز، انجماد و ذوب) نهفته است.

www.ketab.ir

چندین سال پیش، من بعد از سال‌ها تجربه در روش‌های تفاضل محدود و حجم محدود به فراگیری روش لتیس بولتزمن پرداختم. به‌عنوان یک مهندس با پیش‌زمینه‌ای از نظریه سینتیک ذرات، نواقصی در تشریح رویکرد مورد استفاده در تئوری جنبشی برایم پدیدار شد. به هر طریق، زیباییِ نهفته در سادگی روش یاد شده برایم جذاب می‌نمود. می‌توانستم آیندهٔ آن را در مواجهه با جریان‌های چندمؤلفه و چندفاز روشن ببینم. سهولت لحاظ کردن ترمودینامیک توسط روش لتیس بولتزمن بر خلاف روش‌های متداول دینامیک سیالات قابل توجه بود. زمان‌برترین فرایند در حل جریان‌های تراکم‌ناپذیر، مواجهه با جمله فشار است. در هر مرحلهٔ معادله لاپلاس برای ارضای شرط پیوستگی باید حل گردد. این فرایند به‌خصوص برای مسائل گذرا نیازمند امکانات پردازشی قابل توجه است. در روش لتیس بولتزمن نیازی به این پروسه نبوده، که روش گفته شده به طبع روشی صریح است.

نیاز به کتابی به این عنوان برای مهندسین و کسانی که خواستار استفاده از روش یاد شده‌اند و پیش‌زمینهٔ اندکی از فیزیک و ریاضیات دارند، وجود دارد. این کتاب برای پژوهشگران

جهت به‌کارگیری روش لتیس بولتزمن در شبیه‌سازی معادلات انتقال جرم، حرارت و اندازه حرکت منظور گردیده است. سعی بر اجتناب از تئوری و ریاضیات پیچیده تا حد امکان بوده است. بدین منظور با استفاده از علائم و اختصارات مرسوم، برخلاف آنچه در گذشته بوده برای جلوگیری از گمراهیِ خواننده گام برداشتم. این کتاب در ابتدا با مسائل سادهٔ تک‌بعدی با تشریح گام‌به‌گام، به منظور شفاف‌سازی مسیر پیش‌رو و افزایش فهم از مسائل پیچیده‌تر آغاز می‌شود.

من بر این باورم که مواجهه با مسائل به‌صورت کاربردی به درک بهتر موضوع کمک می‌نماید. دانشجویان مهندسی و برخی از علومْ نسبت به مکانیک آماری و تئوری جنبشی آمادگی مطلوبی ندارند. این کتاب سعی در معرفی بنیان تئوری جنبشی و روش‌های آماری پیش از معرفی روش لتیس بولتزمن دارد که به نوعی شاکلهٔ بسیاری از تحلیل‌های میکروسکوپیک و مولکولیِ انتقال است. رویکردی تدریجی در این کتاب، نیاز خواننده از جست‌وجو در منابع مختلف را به حداقل می‌رساند اگرچه فهرستی از منابع مطالعاتی به منظور کنکاش عمیق‌تر بحث پیشنهاد می‌گردد. کتابِ پیش‌رو شامل تعریف روش LBM با تأکید بر کاربرد آن و تعدادی مثال جامع و کُد برنامه‌نویسی مربوطه می‌باشد. خواننده باید توانایی دستیابی به نتایج ارائه‌شده در کتاب را داشته باشد. این کتاب می‌تواند به عنوان کتاب مرجع به همراه مسائل مربوطه مورد استفاده قرار گیرد. گمان می‌کنم آن‌طور که موارد در این کتاب معرفی گردیده‌اند، اطمینان به نفس خواننده را در یادگیری موضوع افزایش می‌دهد. در برخی از موارد، روش تفاضل محدود به دو منظور به طور موازی معرفی گردیده است. اول به منظور تبیین تفاوت‌ها و شباهت‌ها و دوم قیاس نتایج به‌دست آمده از دو روش. روش تفاضلِ محدود به دلیل مبنای بسط تیلور به آسانی قابل درک است.

کدهای برنامه‌نویسی کامل به‌همراه مثال مربوطه بیان شده‌اند. کدها به زبان Fortran نوشته شده‌اند که قابلیت تبدیل به هر زبان برنامه نویسی را دارند.

در فصل اول مقدمه‌ای بر تئوری سینتیک به منظور آشنایی خواننده با مقولهٔ مورد نظر بیان گردیده است. فصل دوم مبیّن معادلهٔ بولتزمن بوده و فصل سوم با معادلات نفوذ حرارت، جرم و اندازه حرکت سر و کار دارد. فصل چهارم دربرگیرنده معادلات جابه‌جاییِ نفوذ در حضور یا غیاب جمله منبع و فصل پنجم به تشریح مسائل جریان ایزوترمال سیال (بدون انتقال جرم و حرارت) پرداخته و فصل ششم تکمیلی بر فصل پیش است؛ جایی‌که جریان هم‌دما در مواجهه با جابه‌جایی آزاد یا اجباری قرار دارد. فصل هفتم به معرفی روش‌های چندآسایشه می‌پردازد و فصل هشتم حاوی کلیاتی از روش موجود برای شرایط جریان پیچیده و مراجعی که با هر موضوع مرتبط‌اند نظیر: جریان در محیط متخلخل، جریان‌های عکس‌العملی، احتراق، تغییر فاز و ... را عنوان می‌دارد.

www.ketab.ir