



روش شبکه بولتزمن: اصول و کاربردها

جلد اول: اصول

www.ketab.ir

تألیف:

تی. کروگر، اچ. کاساماتماجا، ا. کازمین، ه. شارت، جی. سیلوا و ای. ام. ویگن

ترجمه:

نوید عادلیان راسی

ایمان زحمتکش

عنوان و نام پدیدآور	روش شبکه بولتزمن: اصول و کاربردها / تألیف تی. کروگر... [و دیگران]; ترجمه نوید عادلیان راسی، ایمان زحمتکش.
مشخصات نشر	مشهد: چشم انداز، ۱۴۰۰.
مشخصات ظاهری	ج.
شابک	۹۷۸-۶۲۲-۹۸۰۱۹-۷-۰
وضعیت فهرست نویسی	فیا
یادداشت	عنوان اصلی: The Lattice Boltzmann Method: Principles and Practice, 2017.
یادداشت	تألیف تی. کروگر، اچ. کاساماتا، ا. کازمین، ه. شارت، جی. سیلوا و ای. ام. ویگن.
یادداشت	کتابنامه.
موضوع	علوم کامپیوتر -- ریاضیات Computer Science - - Mathematics
موضوع	دینامیک Dynamics
موضوع	سیالات -- مکانیک Fluid - - Mechanics
موضوع	سیالات Fluid
موضوع	فیزیک Physics
موضوع	فیزیک آماری Statistical physics
شناسه افزوده	کروگر، تیم Kruger, Timm
شناسه افزوده	عادلیان راسی، نوید، ۱۳۷۰- مترجم.
شناسه افزوده	زحمتکش، ایمان، ۱۳۵۹-
رده بندی کنگره	QA9
رده بندی دیویی	۵۱۱/۳
شماره کتابشناسی ملی	۷۶۶۹۲۳۹



روش شبکه بولتزمن: اصول و کاربردها (جلد اول: اصول)

تألیف: تی. کروگر، اچ. کاساماتا، ا. کازمین، ه. شارت، جی. سیلوا و ای. ام. ویگن
ترجمه: نوید عادلیان راسی - ایمان زحمتکش
قطع: وزیری

نوبت چاپ: چاپ اول، ۱۴۰۰

تیراژ: ۲۰۰ نسخه

قیمت: ۶۰۰۰۰۰ ریال

شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۹۸۰۱۹-۷-۰

کلیه حقوق مادی و معنوی اثر برای مترجمین محفوظ است.

هرگونه چاپ و تکثیر از محتویات این کتاب بدون اجازه کتبی ممنوع است.

متخلفان به موجب قانون حمایت از حقوق مولفان، مصنفان و هنرمندان تحت پیگرد قانونی قرار می گیرند.

فهرست مطالب

۹	پیشگفتار
۱۵	واژه‌های اختصاری
۱۷	پرسش‌های متداول
۲۳	بخش اول: دورنما
۲۵	فصل اول: مبانی هیدرودینامیک و نظریه جنبشی
۲۶	۱-۱ معادله ناویر-استوکس و نظریه محیط پیوسته
۲۶	۱-۱-۱ معادله پیوستگی
۲۸	۱-۱-۲ معادله ناویر-استوکس
۳۱	۱-۱-۳ معادلات حالت
۳۵	۱-۲ مقیاس‌های حاضر
۳۹	۱-۳ نظریه جنبشی
۳۹	۱-۳-۱ مقدمه
۴۰	۱-۳-۲ تابع توزیع و گشتاورهای آن
۴۴	۱-۳-۱ تابع توزیع تعادلی
۴۶	۱-۳-۴ تابع بولتزمن و عملگر برخورد
۴۸	۱-۳-۵ توابع پایستگی ماکروسکوپی
۴۸	۱-۳-۵-۱ معادله پایستگی جرم
۴۹	۱-۳-۵-۲ معادله پایستگی تکانه
۵۰	۱-۳-۵-۳ معادله پایستگی انرژی
۵۰	۱-۳-۵-۴ بررسی
۵۲	۱-۳-۶ نظریه H بولتزمن
۵۴	مراجع
۵۵	فصل دوم: روش‌های عددی تحلیل سیالات
۵۷	۲-۱ حلگرهای ناویر-استوکس متعارف

۵۹	۲-۱-۱ روش اختلاف محدود
۵۹	۲-۱-۱-۱ تقریب مشتقات اختلاف محدود
۶۱	۲-۱-۱-۲ روش‌های اختلاف محدود برای CFD
۶۳	۲-۱-۱-۳ مزایا و معایب
۶۴	۲-۱-۲ روش حجم محدود
۶۴	۲-۱-۲-۱ تقریب حجم محدود معادلات پایداری
۶۶	۲-۱-۲-۲ روش‌های حجم محدود برای CFD
۶۶	۲-۱-۲-۳ مزایا و معایب
۶۷	۲-۱-۳ روش‌های اجزای محدود
۶۸	۲-۲ حلگرهای مبتنی بر ذره
۶۹	۲-۲-۱ دینامیک مولکولی
۷۰	۲-۲-۲ مدل‌های شبکه‌ای گازی
۷۰	۲-۲-۲-۱ الگوریتم
۷۳	۲-۲-۲-۲ مزایا و معایب
۷۴	۲-۲-۳ دینامیک پراکنش ذرات
۷۵	۲-۲-۴ دینامیک برخورد چند ذره‌ای
۷۶	۲-۲-۴-۱ الگوریتم
۷۸	۲-۲-۴-۲ مزایا و معایب
۷۹	۲-۲-۵ شبیه‌سازی مستقیم مونته‌کارلو
۸۰	۲-۲-۶ هیدرودینامیک ذرات هموار
۸۱	۲-۳ جمع‌بندی
۸۲	۲-۴ چشم‌انداز: چرا شبکه بولتزمن؟
۸۵	مراجع

بخش دوم: مبانی شبکه بولتزمن ۸۹

فصل سوم: معادله شبکه بولتزمن ۹۱

۹۳	۳-۱ مقدمه
۹۳	۳-۲ معادله شبکه بولتزمن در یک نگاه
۹۳	۳-۲-۱ کلیات
۹۷	۳-۲-۲ گام زمانی: برخورد و جاری شدن
۹۸	۳-۳ پیاده‌سازی اجمالی روش شبکه بولتزمن
۹۸	۳-۳-۱ حدس اولیه
۹۸	۳-۳-۲ الگوریتم گام زمانی

۹۹	۳-۳-۳ نکاتی در مورد چیدمان حافظه و راهنمایی‌های کدنویسی
۱۰۰	۳-۳-۳-۱ حدس اولیه
۱۰۰	۳-۳-۳-۲ جاری شدن
۱۰۱	۳-۳-۳-۳ به روزرسانی متغیرهای ماکروسکوپی
۱۰۲	۳-۳-۳-۴ تعادل
۱۰۲	۳-۳-۳-۵ برخورد
۱۰۲	۳-۴ گسسته‌سازی در فضای سرعتی
۱۰۴	۳-۴-۱ بی‌بعدسازی
۱۰۵	۳-۴-۲ قوانین پایستگی
۱۰۶	۳-۴-۳ چندجمله‌ای‌های هرمیت
۱۰۶	۳-۴-۳-۱ تعریف و ساخت چندجمله‌های هرمیت
۱۰۸	۳-۴-۳-۲ تعامد و بسط
۱۱۰	۳-۴-۴ بسط هرمیت توزیع تعادلی
۱۱۲	۳-۴-۵ گسسته‌سازی تابع توزیع تعادلی
۱۱۵	۳-۴-۶ گسسته‌سازی تابع توزیع ذره
۱۱۶	۳-۴-۷ مجموعه‌های سرعت
۱۱۷	۳-۴-۷-۱ توضیحات و تعاریف عمومی
۱۱۸	۳-۴-۷-۲ تشکیل مجموعه‌های سرعت و نیازمندی‌های آن
۱۱۹	۳-۴-۷-۳ مجموعه سرعت‌های رایج در هیدرودینامیک
۱۲۴	۳-۴-۷-۴ روابط مجموعه‌های سرعت
۱۲۷	۳-۴-۷-۵ توزیع‌های تعادلی
۱۲۸	۳-۴-۷-۶ گشتاورهای ماکروسکوپی
۱۲۹	۳-۵ گسسته‌سازی مکانی و زمانی
۱۳۰	۳-۵-۱ روش خطوط مشخصه
۱۳۲	۳-۵-۲ گسسته‌سازی مرتبه اول و دوم
۱۳۳	۳-۵-۲-۱ گسسته‌سازی مرتبه اول
۱۳۴	۳-۵-۲-۲ گسسته‌سازی مرتبه دوم
۱۳۵	۳-۵-۳ عملگر برخورد BGK
۱۳۷	۳-۵-۳-۱ آرامش کم، آرامش زیاد و آرامش کامل
۱۳۸	۳-۵-۴ جاری شدن و برخورد
۱۴۰	مراجع
۱۴۳	فصل ۴: تحلیل معادله شبکه بولتزمن
۱۴۴	۴-۱ تحلیل چاپمن-انسکاگ

۱۴۵	۴-۱-۱ بسط اختلال
۱۴۶	۴-۱-۲ بسط تیلور، اختلال و گسسته‌سازی
۱۴۸	۴-۱-۳ گشتاورها و نوترکیب‌ها
۱۵۱	۴-۱-۴ معادلات ماکروسکوپی
۱۵۲	۴-۲ بحث در مورد تحلیل چارمن-انسکاگ
۱۵۲	۴-۲-۱ وابستگی گشتاورهای سرعت
۱۵۴	۴-۲-۲ تفسیر مقیاس زمانی
۱۵۶	۴-۲-۳ تحلیل چارمن-انسکاگ برای جریان پایا
۱۵۸	۴-۲-۴ اختلال توزیع صریح
۱۵۹	۴-۲-۵ روش‌های چندمقیاسی جایگزین
۱۶۱	۴-۳ مدل‌های تعادلی جایگزین
۱۶۲	۴-۳-۱ جریان سیال خطی
۱۶۴	۴-۳-۲ جریان تراکم‌ناپذیر
۱۶۶	۴-۳-۳ معادلات حالت جایگزین
۱۶۸	۴-۳-۴ سایر مدل‌ها
۱۶۹	۴-۴ پایداری
۱۶۹	۴-۴-۱ تحلیل پایداری
۱۷۲	۴-۴-۲ پایداری BGK
۱۷۶	۴-۴-۳ پایداری عملگرهای برخورد پیشرفته
۱۷۷	۴-۴-۴ دستورالعمل‌های پایداری
۱۷۹	۴-۵ دقت
۱۷۹	۴-۵-۱ مرتبه دقت
۱۸۱	۴-۵-۲ سنجش دقت
۱۸۲	۴-۵-۳ خطاهای عددی
۱۸۳	۴-۵-۳-۱ خطای گرد کردن
۱۸۳	۴-۵-۳-۲ خطای تکرار (حالت پایا)
۱۸۴	۴-۵-۳-۳ خطای گسسته‌سازی
۱۸۷	۴-۵-۴ خطاهای مدل‌سازی
۱۹۰	۴-۵-۵ دقت روش شبکه بولتزمن
۱۹۱	۴-۵-۶ روش‌های بهبود دقت
۱۹۴	۴-۶ جمع‌بندی
۱۹۶	منابع

پیشگفتار

علاقه به روش شبکه بولتزمن از دهه ۱۹۸۰ میلادی و از زمان گسترش مدل‌های شبکه‌ای گاز، به طور مداوم افزایش یافته است. در حالی که هر دوی این روش‌ها با تقلید از رفتار بنیادی گاز، جریان مایعات و گازها را شبیه‌سازی می‌کنند، مولکول‌ها رو به جلو حرکت می‌کنند و در اثر برخورد با یکدیگر پراکنده می‌شوند. روش شبکه بولتزمن به مرور زمان و در حالی که نقاط قوت خود را حفظ کرده، از معایب خود کاسته است. علاوه بر این، این روش به یک پایه نظری قوی‌تر در نظریه جنبشی گازها رسیده است. این روزها محققان در سرتاسر دنیا به دلایلی مانند سادگی روش شبکه بولتزمن، مقیاس‌پذیری آن در رایانه‌های موازی، تعمیم‌پذیری و سهولت کار با هندسه‌های مختلف در این روش، به آن علاقه‌مند هستند.

همه ما نویسندگان جوان اخیراً مطالعه مقطع دکترای خود را بر روی روش شبکه بولتزمن انجام داده‌ایم و به خوبی نحوه یادگیری این روش را به یاد می‌آوریم. به ویژه، جنبه‌هایی که یادگیری آن‌ها دشوار بود را به خاطر داریم؛ برخی از جنبه‌ها آن‌طور که باید و شاید به طور واضح در متون علمی توضیح داده نشده‌اند و برخی دیگر با جزئیات تشریح نشده‌اند. برخی از مباحث را نمی‌توان به طور یکجا در یک مکان پیدا کرد. از آن جایی که روش شبکه بولتزمن، روشی نوین اما به شدت در حال رشد است، بسیاری از اطلاعات در مورد روش، در میان منابع گسترده پخش شده‌اند که هر کدام از این مقالات ممکن است از رویکردها و قراردادهای مختلفی تبعیت کنند. بنابراین، هدف ما نوشتن کتابی است که افراد بعد از ما علاقه‌مند باشند در طول مطالعات دکترای خود داشته باشند؛ به راحتی خوانا باشد، کاربردی باشد، از دیدگاه نظری، استوار باشد و مقدمه‌ای جامع بر روش شبکه بولتزمن باشد.

همان‌طور که یکی از عناوین این کتاب ذکر می‌کند، در این جا تلاش داریم تا هم مبانی روش شبکه بولتزمن، یعنی هم نظریه بنیادی آن و هم کاربرد آن یعنی چگونگی کاربرد آن در شبیه‌سازی‌های عملی را پوشش دهیم. تا حد امکان سعی کرده‌ایم که کتاب را برای افراد مبتدی، خوانا بنویسیم؛ به جز دانش قبلی حساب دانشگاهی، جبر خطی و مبانی فیزیک، انتظار اطلاعات قبلی بیشتری نداریم تا این اطمینان حاصل شود که این کتاب می‌تواند برای

دانشجویان تحصیلات تکمیلی، دانشجویان دکتری و تنوع گسترده‌ای از سوابق علمی استفاده شود. البته یک کتاب درسی نمی‌تواند همه چیز را پوشش دهد و برای مباحث شبکه بولتزمن فراتر از محدوده این کتاب، به متون علمی مراجعه می‌کنیم.

روش شبکه بولتزمن در ۲۵ سال اخیر به یک زمینه تحقیقاتی گسترده تبدیل شده است. احتمالاً نمی‌توان تمام کاربردهای مهم را در این کتاب پوشش داد. مثال‌هایی از سیستم‌هایی که اغلب با این روش شبیه‌سازی می‌شوند، که البته در اینجا با جزئیات کامل به آن‌ها نمی‌پردازیم، عبارتند از جریان‌های متلاطم، جداسازی فازی، جریان در محیط‌های متخلخل، جریان‌های حدود صوت و مافوق صوت، رئولوژی غیرنیوتونی، جریان گازهای رقیق، میکرو و نانو سیالات، جریان‌های نسبیتی، مگنتوهیدرودینامیک و انتشار امواج الکترومغناطیسی.

باور داریم که این کتاب می‌تواند به شما خوانندگان، مبانی لازم جهت نوشتن و درک مقالات علمی در مورد روش شبکه بولتزمن، توانایی اجرای کاربردی و بهینه‌سازی‌های شبکه بولتزمن و دید لازم برای شروع بهیم شدن در یک تحقیق در مورد این روش را آموزش دهد.

چگونه این کتاب را بخوانیم؟

هر کتاب درسی، سبک و شیوه مخصوص به خود را دارد که می‌خواهیم زودتر شما را در این مورد آگاه سازیم.

متن اصلی این کتاب به چهار بخش تقسیم می‌شود. در ابتدا، فصل‌های ۱ و ۲ دورنمایی برای بقیه کتاب ارائه می‌دهند. بخش دوم، یعنی فصل‌های ۳ تا ۷، مبانی روش شبکه بولتزمن برای شبیه‌سازی‌های جریان سیال را پوشش می‌دهد. بخش سوم، یعنی فصل‌های ۸ تا ۱۲، به تعمیم‌ها، بهبودها و جزئیات شبکه بولتزمن می‌پردازد. بخش چهارم نیز بر روی این موضوع تمرکز دارد که روش شبکه بولتزمن چگونه می‌تواند به طور بهینه بر روی تنوعی از بسترهای سخت‌افزاری، پیاده‌سازی و بهینه‌سازی شود. این کتاب همراه با مثال‌های کد کامل است و می‌توان آن‌ها را در <https://github.com/lbm-principles-practice> پیدا کرد.

تا حد امکان در برخی فصل‌ها، نتایج کاربردی اساسی فصل را به جای ارائه آن‌ها در انتها، به اجمال در چکیده اولیه فصل گردآوری کرده‌ایم. بخش‌های چکیده به همراه یکدیگر می‌توانند به عنوان یک دوره آموزشی فشرده در روش شبکه بولتزمن استفاده شوند که به شما این امکان را می‌دهد که مبانی لازم برای شروع و اجرا با یک کد LB پایه را در زمان بسیار کوتاهی یاد

بگیرید. به علاوه، بخش ویژه‌ای قبل از فصل اول، به سوالات متداول پرسیده شده توسط افراد مبتدی که در حال یادگیری روش شبکه بولتزمن هستند، پاسخ می‌دهد.

این کتاب ما به طور گسترده‌ای از نمادگذاری شاخصی برای بردارها (مثل u_α) و تانسورها (مثل $\sigma_{\alpha\beta}$) استفاده می‌کند که در آن‌ها، نمایه یونانی، مختصات دکارتی (x یا y یا z) را نشان می‌دهد و تکرار نمایه یونانی در جمله، یک جمع‌بندی از آن جمله را برای تمام مقادیر ممکن برای آن نمایه اعمال می‌کند. برای خوانندگانی که پیش‌زمینه کمی از مکانیک سیالات یا جامدات دارند، این نمادگذاری برای مثال در پیوست طور کامل توضیح داده شده است.

مهم‌ترین پاراگراف‌ها در هر فصل با چند کلیدواژه به صورت برجسته، نمایان شده‌اند. این امر، در وهله اول، فهمیدن نتایجی که مهم هستند را ساده‌تر می‌کند. در وهله دوم، به خوانندگان این امکان را می‌دهد که به طور سریع و آسان، اساسی‌ترین مفاهیم و نتایج در طول یک فصل را با خواندن پاراگراف‌های برجسته شده با جزئیات بیشتر جست و جو کنند.

به جای گردآوری تمرین‌ها در انتهای هر فصل، آن‌ها را در سرتاسر متن به طور پیوسته آورده‌ایم. این امر به شما اجازه می‌دهد تا درک خود را در حین خواندن کتاب بیازمایید و به ما این امکان را می‌دهد تا به معنی واقعی کلمه، اثبات خاصی را به عنوان تمرینی برای خواننده بر عهده خوانندگان بگذاریم.