

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

روش شبکه بولتزمن

اصول کاربردهای مهندسی
به همراه برنامه رایانه ای

بولتز: ا.ا. محمد

ترجمه:

احمد رضا رحمتی

امین تاج دانی



نشر تراوا

سرشناسه	:	محمد، عبدالمجید Mohamad, Abdoulmajieed A
عنوان و پدیدآور	:	روش شبکه بولتزمن
مشخصات نشر	:	اهواز: تر آوا، ۱۳۹۴.
مشخصات ظاهری	:	۲۲۰ص.:
شابک	:	۹۷۸-۶۰۰-۳۴۷-۱۳۷-۵
وضعیت فهرست نویسی	:	فیبای مختصر
یادداشت	:	فهرست نویسی کامل این اثر در نشانی: http://opac.nlai.ir
موضوع	:	قابل دسترسی است
ناسه افزوده	:	تاج دانی، امین، ۱۳۵۲ -
ناسه افزوده	:	رحمتی، احمد رضا، ۱۳۵۴ -
شماره کتابشناسی ملی	:	۳۸۷۹۲۰۰



نام کتاب: روش شبکه بولتزمن

تألیف: ا.ا. محمد

ترجمه: احمد رضا رحمتی / امین تاج دانی

طرح روی جلد: هادی مدرسن

ناشر: تر آوا

شماره ی نشر: ۳۸۴

نوبت چاپ: اول / ۱۳۹۵

تیراژ: ۱۰۰۰ نسخه

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۳۴۷-۱۳۷-۵

قیمت: ۲۰۰۰۰ تومان

نشر تر آوا: اهواز- کیانپارس- خیابان نهم غربی- پلاک ۱۲۸

نمایر: ۰۶۱۳۳۹۰۳۷۱۴ همراه: ۰۹۱۶۱۱۳۶۷۸۵

Taravapublication@yahoo.com

فروشگاه اینترنتی www.tarava.com



taravapub

حق چاپ و نشر مخصوص ناشر است.

سخن مترجمین:

امروزه به کمک روش های عددی شبیه سازی جریان و انتقال حرارت سیال نیاز به آزمایش های پرهزینه کاهش یافته و پیشرفت های چشمگیری در ساخت تجهیزات و ابزارهای جدید حاصل شده است. بی شک شیوه هایی نظیر اجزاء محدود، تفاضل محدود و یا حجم محدود از جمله معروفترین این روش هاست. اغلب کتب دینامیک سیالات محاسباتی به بیان این روش ها می پردازند. روش شبکه بولتزمن که در سال ۱۹۸۸ ارائه شد ضمن پوشش مزایای روش های کلاسیک دینامیک سیالات محاسباتی، از توانایی بهتری نیز برخوردار است. این روش در دامنه وسیعی از جریان سیال صادق بوده و حجم محاسبات منبری نیز نسبت به سایر روش های مینا ذره ای دارد. عدم وجود منابع جامع و دملی به زبان فارسی مترجمین را بر آن داشت تا کتابی مناسب ترجمه و به جامعه علمی کشور تقدیم نمایند. این کتاب از بیانی ساده و مناسب برخوردار بوده و مطابق با کتاب "روش شبکه بولتزمن" ارائه می دهد. در پایان کتاب نیز به کمک برنامه های رایانه ای می توان مسائل کاربردی تری را نیز شبیه سازی کرد. لازم به ذکر است این برنامه ها به زبان فرترن می باشند که می توان با اندکی تغییرات به زبان های برنامه نویسی دیگر تبدیل شوند.

با توجه به اینکه هیچ اثری بدون اشکال نمی باشد از کلیه دانشجویان و اساتید محترم خواهشمند است چنانچه اشکالی مشاهده نمودند بهت اصلاح در چاپ های بعدی با ایمیل های ar_rahmati@kashanu.ac.ir و یا Tajdani.amin@yahoo.com تماس حاصل فرمایند.

احمد رضا رحمتی - امین تاج دانی

دانشکده مکانیک دانشگاه کاشان

پیش‌گفتار مؤلف:

روش‌های محاسباتی به عنوان تکنیک‌های قدرتمندی برای بررسی و تحقیق پدیده‌های شیمیایی و فیزیکی و همچنین برای حل مسائل واقعی مهندسی پدیدار گشته‌اند. روش **المان محدود**¹ برای اولین بار در سال 1956 توسط تورنر و همکارانش برای حل یک مسأله‌ی بنیادی به کار گرفته شد. در اواخر دهه 1960، این روش به یک تکنیک قدرتمند برای حل مسائل دیفرانسیل جزئی، انتقال حرارت و مسائل دینامیک سیالات محاسباتی تبدیل شد. همچنین در همان زمان روش **تفاضل محدود**² برای حل مسائل دینامیک سیالات به کار گرفته شد. در سال 1980، روش **حجم محدود**³ به طور اساسی در کالج امپریال برای حل مسائل دینامیک سیالات توسعه داده شد. از آن پس روش حجم محدود در موارد بسیار زیاد برای حل مسائل انتقال به کار گرفته شد.

در واقع روش‌های **تفاضل محدود**، **المان محدود** و **حجم محدود** همگی متعلق به یک خانواده می‌باشند که همان روش‌های باقیمانده‌ی وزنی می‌باشند و تنها تفاوت بین این روش‌ها، طبیعت توابع پایه و توابع وزنی آنها می‌باشند. در سال 1988 روش **شبکه بولتزمن** توسط مک‌نامارا و زانتی برای غلبه بر مشکلات شبکه‌ی نظریه‌ی ماشین‌های سلولی گاز مطرح گردید. از آن پس این روش به عنوان یک روش قدرتمند جایگزین برای حل مسائل دینامیک سیالات پدیدار گشت. در روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی سنتی، معادلات ناویر-استوکس، معادلات بقای جرم، انرژی، حرکت و انرژی را در گره‌ها، المان‌ها یا حجم‌های گسسته حل می‌کند. به عبارت دیگر، معادلات دیفرانسیل جزئی غیر خطی به یک دستگاه معادلات جبری غیر خطی تبدیل می‌شوند که به روش تکرار حل می‌شوند. در روش شبکه بولتزمن یک سری ذرات جایگزین سیال می‌شوند. این ذرات در امتداد جهات مشخصی (پیوندهای شبکه) انتشار می‌یابند و در

¹ FEM

² FDM

³ FVM

مکان‌های شبکه به یکدیگر برخورد می‌کنند. روش شبکه بولتزمن را می‌توان به عنوان یک روش صریح در نظر گرفت. مراحل برخورد و انتشار وابسته به مکان می‌باشند. بنابراین به طور طبیعی می‌تواند توسط ماشین‌های پردازش موازی برنامه‌نویسی شود. حُسن دیگر روش شبکه بولتزمن این است که می‌تواند برای پدیده‌های پیچیده‌ای از قبیل مرزهای متحرک (مسائل چندفازی، انجماد و ذوب) به کار گرفته شود، بدون اینکه همانند روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی سنتی نیازی به استفاده از روش ردیابی باشد.

بعد از چندین سال تجربه در روش‌های حجم محدود و تفاضل محدود، من چند سال قبل فائیری روش شبکه بولتزمن را آغاز کردم. به عنوان یک مهندس با پس زمینه‌ای که در مورد تئوری جنبشی ذرات داشتم، درک بعضی از اصطلاحات فنی مورد استفاده در تئوری جریان می‌رایم دشوار بود. هرچند ویژگی ساده بودن روش مرا به خود جذب کرد. من آینده این روش را بر طرز رفتار آن با جریان‌های چندفازی و چندجزیی می‌بینم. ترکیب حالات ترمودینامیکی با استفاده از روش شبکه بولتزمن ساده می‌باشد، درحالی که چنین ترکیبی با استفاده از روش‌های حل مرسوم معادلات ناویر-استوکس دشوار می‌باشد. با استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی مرسوم اغلب فرآیندهای زمان‌بر در حل جریان‌های تراکم‌ناپذیر با جمله‌ی فشار سروکار دارند. در هر مرحله برای ارضای معادله‌ی پیوستگی معادله‌ی پیوستگی باید حل شود. این فرآیند، به ویژه برای حل مسائل گذرا نیاز به منابع رایانه‌ای با پردازش قوی دارد. در روش شبکه‌ی بولتزمن که طبعاً یک روش صریح می‌باشد نیازی به چنین فرآیندی نیست، اگرچه هیچ روشی خالی از اشکال و دشواری نیست.

من فکر می‌کنم برای مهندسان و افرادی با دانسته‌های اندکی در زمینه‌ی ریاضیات و فیزیک که خواهان استفاده از توانایی روش می‌باشند نیاز است که کتابی در این زمینه وجود داشته باشد. این کتاب برای مهندسين و محققینی که می‌خواهند روش شبکه بولتزمن را برای شبیه‌سازی انتقال گرما، جرم و اندازه حرکت به کار ببرند نوشته شده است. هرچند برای اینکه خواننده با علایم ساختگی موجود در مقالات گنج نشود،

ریاضیات را با استفاده از علائم حساب دیفرانسیل به کار برده‌ام. هرچند کتاب با شرح قدم به قدم مسائل یک‌بعدی و آسان آغاز می‌شود، اما به طور کلی مبتنی راهی است که خواننده بتواند موضوعات پیچیده‌تر را درک کند.

من معتقدم که یادگیری به وسیله‌ی کار کردن با مسائل و نرم افزارهای موجود می‌تواند به درک مطلب کمک کند. برای آن دسته از دانشجویانی که تئوری جنبشی و مکانیک آماری به خوبی روشن نشده است، کتاب تلاش می‌کند قبل از مطرح کردن روش شبکه بولتزمن، مفاهیم بنیادی تئوری جنبشی و روش‌های آماری، که پایه و اساس اغلب تحلیل‌های انتقال میکرو و مولکولی می‌باشند، را پوشش دهد. برای اینکه به خواننده کمک شود که موضوع را بدون پرش از مرجعی به مرجع دیگر دنبال کند، در این کتاب روش قدم به قدم به کار گرفته شده است. هرچند برای درک بیش‌تر مطالب لیستی از مراجع، کتاب‌ها و ... پیشنهاد شده است. کتاب حاضر مقدمه‌ای به روش شبکه بولتزمن با تأکید بیشتر روی نرم‌افزارها و برنامه‌های کامپیوتری موجود در متن می‌باشد. این کتاب می‌تواند به عنوان یک کتاب درسی برای دانشجویان ارشد و یا برای دانشجویان طی یک نیمسال تحصیلی مورد استفاده قرار گیرد. اعتقاد من به این است که سبک مطالب مطرح شده در کتاب، بدون شک اطمینان خاطر خواننده را در فهم موضوع و برنامه نویسی فراهم می‌سازد. به دو دلیل در بعضی از موارد، روش انتقال محدود به طور موازی با روش شبکه بولتزمن مطرح شده است، اول اینکه تفاوت‌ها و شباهت‌های بین روش تفاضل محدود محرز شده و روش شبکه بولتزمن نشان داد شود و دوم اینکه نتایج به دست آمده توسط دو روش مقایسه شود. درک روش تفاضل محدود آسان است چراکه این روش بر پایه‌ی بسط سری تیلور بنا نهاده شده است که اغلب دانشجویان با آن آشنایی دارند.

تمامی برنامه‌های رایانه ای همراه با مثال‌ها آورده شده است. هرچند برنامه‌ها در زبان برنامه‌نویسی فرترن نوشته شده‌اند اما به آسانی قابل تبدیل به زبان‌های دیگر برنامه‌نویسی می‌باشند. در فصل اول به قصد آشنایی خواننده با مفاهیم تئوری جنبشی، مقدمه‌ای از تئوری جنبشی آورده شده است. فصل دوم معادله‌ی شبکه بولتزمن را همراه

با بحث کلی در مورد روش مطرح می‌کند. فصل سوم با معادله‌ی پخش برای حرارت، جرم و اندازه حرکت سروکار دارد. فصل چهارم معادله‌ی جابه‌جایی - پخش را با و بدون جمله‌ی چشمه مطرح می‌کند. فصل پنجم با مثال‌هایی در مورد مسائل جریان سیال هم‌دما بحث می‌کند (بدون انتقال حرارت و جرم). فصل ششم مکمل فصل پنجم می‌باشد، که در آن در مورد مسائل جریان سیال غیر هم‌دما با و بدون کوپلینگ (یعنی جابه‌جایی طبیعی و اجباری) بحث شده است. فصل هفتم روش شبکه بولتزمن با ضریب تخفیف پندتایی را مطرح می‌کند و فصل هشتم یک دید کلی در مورد رفتار با جریان‌ها با شرایط پیچیده می‌دهد و برای هر موضوع از قبیل جریان در محیط متخلخل، جریان واکس‌پذیر، احتراق، تغییر فاز، جریان‌های چندفازی و غیره مراجعی را پیشنهاد می‌دهد.

۱۵	۱-۱ مقدمه و تئوری جنبشی ذرات
۱۹	۲-۱ تئوری سینتیک
۲۰	۱-۲-۱ دینامیک ذره
۲۲	۲-۲-۱ فشار و دما
۲۴	۳-۱ تابع توزیع
۳۱	۱-۳-۱ توزیع بولتزمن
	فصل دوم: معادله بولتزمن
۳۵	۱-۲ معادله انتقال بولتزمن
۳۸	۱-۱-۲ مثال ۱-۲
۳۹	۲-۲ تقریب بی - جی - کی - دبلیو
۴۱	۳-۲ آرایش های شبکه
۴۱	۱-۳-۲ یک بعدی
۴۲	۲-۳-۲ دو بعدی
۴۴	۳-۳-۲ سه بعدی
۴۶	۴-۲ تابع توزیع تعادل
	فصل سوم: معادله پخش
۴۹	۱-۳ معادله پخش
۵۰	۱-۱-۳ مثال ۱-۳
۵۰	۲-۱-۳ مثال ۲-۳
۵۱	۲-۳ تقریب اختلاف محدود
۵۳	۳-۳ روش شبکه بولتزمن

- ۵۶ 4-3 تابع توزیع تعادلی
- ۵۷ 5-3 بسط چاپمن - انزکوگ
- ۶۰ 1-5-3 بی بُعد شده سازی و مقیاس گیری
- ۶۲ 2-5-3 پخش گرما در یک صفحه نامتناهی در معرض دمای ثابت
- ۶۳ 3-5-3 شرایط مرزی
- ۶۴ 4-5-3 مثال شار حرارتی ثابت
- ۶۶ 4-3 جمله چشمه یا چاه
- ۶۷ 7-3 پخش متقارن محوری
- ۶۸ 8-3 معادله پخش دو بعدی
- ۶۹ D2Q1 1-8-3
- ۷۱ D2Q5 2-8-3
- ۷۱ 9-3 شرایط مرزی
- ۷۱ 1-9-3 مقدار تابع معلوم در مرز
- ۷۲ 2-9-3 شرایط مرزی آدیباتیک
- ۷۳ 3-9-3 شرط مرزی شار ثابت
- ۷۳ 10-3 پخش حرارت دو بعدی در یک صفحه
- ۷۴ D2Q9 1-10-3
- ۷۷ 2-10-3 شرایط مرزی
- ۷۸ 3-10-3 شرط مرزی شار ثابت
- ۷۹ 11-3 مسائل
- فصل چهارم: مسائل جابجایی - پخش
- ۸۱ 1-4 جابجایی
- ۸۲ 2-4 معادله جابجایی - پخش
- ۸۳ 1-2-4 روش تفاضل محدود

۸۵	4-2-2 شبکه بولتزمن
۸۶	4-3 تابع توزیع تعادل
۸۸	4-4 بسط چابمن - انزکوگ
۹۳	4-4-1 مسائل دو بعدی جابجایی - پخش
۹۴	4-5 روش شبکه بولتزمن دو بعدی
۹۴	4-5-1 D2Q4
۹۶	4-5-2 D2Q9
۹۹	4-6 مسائل
۹۹	4-6-1 احتراق در لایه متخلخل
۱۰۰	4-6-2 خنک سازی صفحه گرم شده
۱۰۱	4-6-3 معادلات جف - شد، با عبارت چشمه
	فصل پنجم: جریان سیال تراکم پذیر همدما
۱۰۳	5-1 معادلات ناویر - استوکس
۱۰۵	5-2 شبکه بولتزمن
۱۰۵	5-2-1 تقریب بی - جی - کی
۱۰۹	5-2-2 معادلات بقای جرم و ممنتوم
۱۱۰	5-3 شرایط مرزی
۱۱۱	5-3-1 روش کمانه کردن
۱۱۴	5-3-2 شرط مرزی با سرعت مشخص
۱۱۷	5-3-3 تابع توزیع تعادلی و غیر تعادلی
۱۱۸	5-3-4 شرط مرزی باز
۱۱۹	5-3-5 شرط مرزی تناوبی
۱۱۹	5-3-6 شرط تقارن
۱۲۰	5-4 برنامه رایانه ای

- ۱۲۱ 5-5 مثال‌ها
- ۱۲۱ 1-5-5 جریان داخل یک حفره
- ۱۲۲ 2-5-5 جریان توسعه یافته در کانال دو بعدی
- ۱۲۵ 3-5-5 جریان روی مانع
- ۱۳۲ 6-5 روش گردابه و تابع جریان
- ۱۳۲ 7-5 شبکه شش ضلعی
- ۱۳۴ 8-5 مسائل
- فصل ششم: جریان سیال تراکم‌ناپذیر غیر هم‌دما
- ۱۳۵ 1-6 مدل‌های ترمو-استوکس و انرژی
- ۱۳۶ 2-6 انتقال حرارت جابجایی اجباری، D2Q9
- ۱۳۷ 3-6 جریان در یک حفره گرم‌شده
- ۱۳۸ 4-6 انتقال حرارت جابجایی اجباری در کانال گرم شده
- ۱۴۰ 5-6 انتقال گرما در جریان سیال و سطح جامد
- ۱۴۱ 6-6 انتقال حرارت جابجایی طبیعی
- ۱۴۳ 1-6-6 مثال: انتقال حرارت جابجایی طبیعی در یک حفره گرم شده
- ۱۴۶ 7-6 جریان و انتقال حرارت در محیط متخلخل
- فصل هفتم: روش شبکه بولتزمن با ضریب تخفیف چندتایی
- ۱۴۷ 1-7 روش ضریب تخفیف چندتایی
- ۱۵۱ 2-7 مسأله
- ۱۵۱ 3-7 روش شبکه بولتزمن با ضریب تخفیف دوتایی
- ۱۵۳ فصل هشتم: جریان‌های پیچیده
- ۱۵۵ پیوست A: برنامه‌های رایانه‌ای
- ۲۰۸ برنامه MRT