ترمودینامیک و مقدمه‌ای بر مکانیک آماری
جلد اول: ترمودینامیک

www.ketab.ir

مؤلف
هربرت کالن

مترجم
هادی هدایتی

شماره ۴۹۱

سرشناسه: کلن، هربرت بی. Callen, Herbert B.

عنوان و نام پدیدآور: ترمودینامیک و مقدمه‌ای بر مکانیک آماری/مولف هربرت کالن ؛ مترجم هادی هدایتی ؛ ویرایش گروه ویراستاری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

مشخصات نشر: تهران: دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، انتشارات، ۱۳۹۹.

مشخصات ظاهری: ۳۴۷ ص.: مصور، جدول، نمودار.

شابک: 978-622-665558-3

وضعیت فهرست نویسی: فیپا

یادداشت: عنوان اصلی: Thermodynamics and an introduction to thermostatistics, 2nd ed, c1985

موضوع: ترمودینامیک/ Thermodynamics

موضوع: مکانیک آماری/ Statistical Mechanics

شناسه افزوده: هدایتی، هادی، ۱۳۵۹-، مترجم

رده بندی کنگره: QC۳۱۱

رده بندی دیویی: ۵۳۶/۷

شماره کتابشناسی ملی: ۷۲۶۹۵۱۶

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

عنوان: ترمودینامیک و مقدمه‌ای بر مکانیک آماری

مؤلف: هربرت کالن

مترجم: دکتر هادی هدایتی

نوبت چاپ: دوم

تاریخ انتشار: بهمن ۱۴۰۱

شمارگان: ۲۰۰ جلد

ویرایش: ویراستار دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

چاپ: کیانک

صحافی: گرنامی

قیمت: ۱۶۵۰۰۰ تومان

تمام حقوق برای ناشر محفوظ است

خیابان میرداماد غربی- شماره ۴۷۰- انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تلفن: ۸۸۸۸۱۰۵۲

میدان ونک - خیابان ولی‌عصر(عج) - بالاتر از چهارراه میرداماد - شماره ۲۶۲۶- مرکز پخش و فروش انتشارات

تلفن: ۸۸۷۷۲۲۷۷ رایانامه: press@kntu.ac.ir - تارنما (فروش برخط): press.kntu.ac.ir

www.ketab.ir

پیش‌گفتار

www.ketab.ir

بیست سال پس از انتشار اولین نسخهٔ این متن، خوشحالم که اکنون این کتاب، پراستنادترین کتاب ترمودینامیک در متون تحقیقاتی فیزیک شده و طرح‌بندی مبتنی بر اصل موضوعهٔ آن به‌طور گسترده پذیرفته شده است. بااین‌وجود در ویرایش و قسمت‌های اضافه‌شدهٔ جدید ملاحظات مختلفی در نظر گرفته شده است.

اول اینکه در دو دههٔ اخیر، ترمودینامیک در حوزهٔ پدیده‌های بحرانی پیشرفت‌های زیادی کرده است. گرچه این پیشرفت‌ها از سطح این کتاب خارج است؛ ولی تلاش کرده‌ام تا ماهیت مسئله را بیان کنم و نماهای بحرانی و توابع مقیاسی که رفتار غیر تحلیلی توابع ترمودینامیکی در یک گذار فاز مرتبهٔ دوم را مشخص می‌کنند معرفی کنم. البته توضیحات ساده و توصیفی هستند و جایگزین نظریهٔ نسبتاً پیچیدهٔ گذار فاز مرتبهٔ دوم شده‌اند که به نظر بسیاری از دانشجویان سخت‌ترین قسمت ویرایش اول بود.

دوم اینکه تلاش کرده‌ام تا جنبه‌های آموزشی کتاب را بهبود دهم؛ تا بتواند به عنوان کتاب درسی برای دانشجویان تازه‌وارد کارشناسی تا سال اول کارشناسی ارشد در رشته‌های فیزیک، علوم مهندسی و شیمی مورد استفاده قرار گیرد. این هدف به کمک نظرات سودمند دانشجویان و مدرسان زیادی محقق شده است. بسیاری از توضیحات ساده‌سازی شده‌اند و مثال‌های زیادی صریحاً حل شده‌اند. تعداد تمرین‌ها افزایش یافته و برای بسیاری از آن‌ها جواب کامل یا جزئی اضافه شده است.

سوم اینکه مقدمه‌ای بر اصول مکانیک آماری اضافه شده است. باآنکه روح حاکم بر ویرایش اول

حفظ شده است؛ ولی تأکید بر سادگی ذاتی اصول و منطق آموزش است تا تعداد زیاد کاربردها. به این منظور و برای آن‌که متن برای دانشجویان کارشناسی قابل استفاده باشد، از مسائل ناجابه‌جایی مکانیک کوانتومی اجتناب کرده‌ام. تنها چیزی که لازم است، آشنایی با این حقیقت است که مکانیک کوانتومی برای سامانه‌های محدود، سطوح انرژی گسسته پیش‌بینی می‌کند. البته طرح‌بندی طوری بنا شده است که دانشجویان نخبه، نظریه را به‌درستی در موارد ناجابه‌جایی تعبیر کنند.

چهارم اینکه مدت‌ها با برخی مسائل مفهومی در مورد بنیان ترمودینامیک دچار سردرگمی بودم و سرانجام این امر مرا به تعبیر «معنی» ترمودینامیک رساند. در فصل آخر یک قسمت تفسیری به متن اصلی اضافه کرده‌ام که در آن این ایده را پیگیری کرده‌ام که ترمودینامیک در تقارن قوانین بنیادی فیزیک ریشه دارد نه در محتوای آن‌ها. بحث این قسمت کیفی و توصیفی است و هدف آن این است که یک بنیان شهودی ایجاد کند و دانشجو را تشویق کند تا علم را به‌صورت یک ساختار منسجم در نظر بگیرد که در آن ترمودینامیک یک نقش طبیعی و بنیادی دارد.

گرچه در ویرایش جدید هم ترمودینامیک و هم مکانیک آماری آمده است؛ ولی نه آن‌ها را به‌طور کامل از هم جدا کرده‌ام و نه به شیوهٔ عامه‌پسند «فیزیک گرما» در یکدیگر کاملاً ادغام کرده‌ام. اعتقاد من این است که هرکدام از این گزینه‌ها راه را به‌غلط می‌روند. اگر ترمودینامیک را کاملاً از پایه‌های مکانیک آماری آن جدا کنیم؛ آن را از بنیان‌های فیزیکی اصلی آن جدا کرده‌ایم. بدون درک مکانیک آماری، یک دانشمند در فضای تجربه محور درشت‌مقیاس قرن نوزدهم باقی‌مانده و از توسعهٔ معاصر و دیدگاه کلی‌نگر علم بازمی‌ماند. از طرف دیگر ادغام کامل ترمودینامیک و مکانیک آماری به‌صورت «فیزیک گرما» اهمیت ترمودینامیک را به حاشیه می‌راند. بنیادی بودن و عمق مکانیک آماری به شکل غیرقابل قبولی گمراه‌کننده است. دوره‌های «فیزیک گرما» تقریباً اعتراف کوچکی، آن‌هم به‌ناچار، به اصول عملیاتی درشت‌مقیاس می‌کنند[1]. علاوه بر این، ادغام ترمودینامیک و مکانیک آماری برخلاف «اصل صرفه‌جویی نظری» است: اصلی که بر مبنای آن پیش‌بینی‌ها باید از کلی‌ترین و مختصرترین فرضیات ممکن به‌دست آیند. وقتی‌که روش‌های درشت‌مقیاس کلی ترمودینامیک برای حل مسئله کافی هستند، باید از نظریه‌های مفصل‌تر مختص به مکانیک آماری اجتناب شود. این عادت ذهنی با در نظر گرفتن ترمودینامیک به‌صورت یک مطلب حاشیه‌ای در فیزیک گرما پدید نخواهد آمد.

ایجاد موازنه بین دو مؤلفهٔ متمایز علم گرما، با معرفی موضوع در سطح درشت‌مقیاس در این کتاب انجام شده است. در این کتاب طرح‌بندی ترمودینامیک به صورتی است که اصول موضوعهٔ

[1] مطابق گزارش کمیتهٔ کاربردهای فیزیک در انجمن فیزیک آمریکا، برآورد مسئولان پژوهش‌های صنعتی به این نتیجه رسیده است که ترمودینامیک در رأس تمامی موضوعات دیگر در برنامهٔ آموزشی کارشناسی باید مورد تأکید قرار گیرد؛ اما در دوره‌های فیزیک گرما این تأکید نادیده گرفته می‌شود.

www.ketab.ir

درشت‌مقیاس آن به‌دقت و به‌طور واضح همان قضایای مکانیک آماری هستند و اغلب گریزی به رابطهٔ این دو مؤلفه خواهیم زد. بااین‌وجود، مدرس به اختیار خود می‌تواند فصول مربوط به مکانیک آماری را در لابه‌لای فصول ترمودینامیک به شکلی که در ادامه توضیح داده می‌شود، بیاورد: اما حتی به این صورت مجتمع، ساختار درشت‌مقیاس پایهٔ ترمودینامیک پیش از مکانیک آماری خواهد آمد. با جداسازی و ترتیب موضوعات به این صورت، بر ساختار سلسله مراتبی علم تأکید شده و آن را حفظ می‌کند. در این صورت فیزیک به‌صورت واحدهای منسجم با روابط متقابل ساده و واضح سازمان‌دهی می‌شود. به‌طور مشابه مکانیک کلاسیک به‌صورت یک ساختار کامل اصل موضوعی به بهترین شکل درک می‌شود و تنها بعدها باید آن را به‌صورت حالت حدی مکانیک کوانتومی در نظر گرفت.

دو گزینهٔ آموزشی اصلی در جدولی که در ادامه آمده است، فهرست شده است. در یک گزینه فصول به ترتیب دنبال می‌شوند (ستون الف به‌تنهایی که در ادامهٔ آن ستون ب یا قسمتی از آن می‌آید). در گزینهٔ مجتمع، جدول را از بالا به پایین دنبال کنید. فصل ۱۵ یک فصل کوتاه و پایهٔ تعبیر آماری آنتروپی است. آن را می‌توانید بلافاصله بعد از فصل ۱، فصل ۴ و یا فصل ۷ بیاورید.

فصولی که زیر خط‌چین آمده‌اند نسبت به ترتیب موردنظر شما کاملاً انعطاف‌پذیر هستند. می‌توانید آن‌ها را دنبال کرده و یا حذف کنید. برای آن‌که تعادلی بین بخش‌های ملموس و ویژه در مقابل بخش‌های پیچیده‌تر به وجود آید؛ می‌توانید قسمت‌هایی از فصل ۱۳ (خواص مواد) را در جاهای مختلف بگویید و یا اینکه فصل آخر (فصل ۲۱، تقارن و بنیان‌های مفهومی) را در هر جایی از درس ارائه دهید.

البته کمترین دورهٔ لازم برای دانشجوی کارشناسی، ۷ فصل اول است که می‌توان درصورتی‌که زمان اجازه دهد فصول ۱۵ و ۱۶ را نیز اضافه کرد.

هربرت برنارد کالن

فیلادلفیا، پنسیلوانیا، نوامبر ۱۹۸۷

www.ketab.ir

۱. اصول موضوعه

۲. شرایط تعادل

۳. چند رابطهٔ مهم و سامانه‌های نمونه

۴. فرآیندهای برگشت‌پذیر و قضیهٔ کار بیشینه

۵. تبدیلات لژاندر

۶. اصل حدی در نمایش‌های تبدیل‌یافتهٔ لژاندر

۷. روابط ماکسول

۸. پایداری سامانه‌های ترمودینامیکی

۹. گذار فازهای مرتبهٔ اول

۱۰. پدیده‌های بحرانی

۱۱. اصل موضوعهٔ نرنست

۱۲. خلاصهٔ اصول پایه

۱۳. خواص مواد

۱۴. ترمودینامیک برگشت‌ناپذیر

۱۵. مکانیک آماری در نمایش آنتروپی

۱۶. فرمول‌بندی قانونی

۱۷. فرمول‌بندی درشت‌قانونی

۱۸. شاره‌های کوانتومی

۱۹. افت‌وخیزها

۲۰. خواص وردشی و نظریهٔ میدان میانگین

۲۱. سخن آخر: تقارن و بنیان‌های مفهومی ترمودینامیک

www.ketab.ir

فهرست مطالب

www.ketab.ir

پیش‌گفتار ج

بخش اول: اصول کلی ترمودینامیک کلاسیک ۱

مقدّمه ۲

۱ بیان مسئله و اصول موضوعه ۵

۱.۱ ماهیت زمانی اندازه‌گیری‌های درشت‌مقیاس ۵

۲.۱ ماهیت فضایی اندازه‌گیری‌های درشت مقیاس ۶

۳.۱ ترکیب سامانه‌های ترمودینامیکی ۹

مسائل ۱۱

۴.۱ انرژی داخلی ۱۲

۵.۱ تعادل ترمودینامیکی ۱۴

۶.۱ دیواره‌ها و قیدها ۱۷

۷.۱ اندازه‌پذیری انرژی ۱۸

۸.۱ تعریف کمّی گرما و واحدهای آن ۲۱

مسائل ۲۶

۹.۱ مسئلهٔ بنیادی ترمودینامیک ۲۸
۱۰.۱ اصل بیشینهٔ آنتروپی ۳۰
مسائل ۳۵

۲ شرایط تعادل **۳۹**
۱.۲ پارامترهای نافزون‌ور ۳۹
۲.۲ معادلات حالت ۴۱
مسائل ۴۳
۳.۲ پارامترهای نافزون‌ور نمایش آنتروپی ۴۴
مسائل ۴۶
۴.۲ تعادل گرمایی ـ دما ۴۷
۵.۲ سازگاری با مفهوم شهودی دما ۴۹
۶.۲ واحدهای دما ۵۰
مسائل ۵۳
۷.۲ تعادل مکانیکی ۵۴
مسائل ۵۷
۸.۲ تعادل نسبت به جریان ماده ۵۹
مسائل ۶۰
۹.۲ تعادل شیمیایی ۶۱
مسائل ۶۳

۳ چند رابطهٔ مهم و سامانه‌های نمونه **۶۵**
۱.۳ معادلهٔ اویلر ۶۵
مسائل ۶۶
۲.۳ رابطهٔ گیبس ـ دوهم ۶۶
مسائل ۶۸
۳.۳ خلاصهٔ ساختار رسمی ترمودینامیک ۶۹
مسائل ۷۲
۴.۳ گاز آرمانی ساده و گازهای آرمانی سادهٔ چند مؤلفه‌ای ۷۳

www.ketab.ir

مسائل ۷۹
۵.۳ شارهٔ آرمانی واندروالس ۸۲
مسائل ۸۶
۶.۳ تابش الکترومغناطیسی ۸۷
مسائل ۸۸
۷.۳ نوار لاستیکی ۸۹
مسائل ۹۰
۸.۳ متغیرهای محدودیت‌ناپذیر؛ سامانه‌های مغناطیسی ۹۱
مسائل ۹۳
۹.۳ ظرفیت گرمایی مولی و مشتقات دیگر ۹۴
مسائل ۹۸

۴ فرآیندهای برگشت‌پذیر و قضیهٔ کار بیشینه ۱۰۳
۱.۴ فرآیندهای ممکن و غیرممکن ۱۰۳
مسائل ۱۰۶
۲.۴ فرآیندهای ایستاوار و برگشت‌پذیر ۱۰۷
مسائل ۱۱۰
۳.۴ زمان واهلش و برگشت‌ناپذیری ۱۱۲
مسائل ۱۱۳
۴.۴ جریان گرما: سامانه‌های جفت شده و معکوس فرآیندها ۱۱۴
مسائل ۱۱۶
۵.۴ قضیهٔ کار بیشینه ۱۱۸
مسائل ۱۲۳
۶.۴ ضرایب عملکرد موتور، یخچال و تلمبهٔ گرمایی ۱۲۹
مسائل ۱۳۱
۷.۴ چرخهٔ کارنو ۱۳۳
مسائل ۱۳۷
۸.۴ اندازه‌پذیری دما و آنتروپی ۱۳۸
مسائل ۱۴۰

www.ketab.ir

۹.۴ معیارهای دیگر بازده موتور ۱۴۰
مسائل ۱۴۳
۱۰.۴ سایر فرآیندهای چرخه‌ای ۱۴۴
مسائل ۱۴۶

۵ فرمول‌بندی‌های جایگزین و تبدیلات لژاندر ۱۴۹
۱.۵ اصل کمینهٔ انرژی ۱۴۹
مسائل ۱۵۵
۲.۵ تبدیلات لژاندر ۱۵۶
مسائل ۱۶۴
۳.۵ پتانسیل‌های ترمودینامیکی ۱۶۴
مسائل ۱۶۷
۴.۵ توابع تعمیم‌یافتهٔ مسیو ۱۷۱
مسائل ۱۷۱

۶ اصل حدی در نمایش‌های تبدیل‌یافتهٔ لژاندر ۱۷۳
۱.۶ اصول کمینه برای پتانسیل‌ها ۱۷۳
۲.۶ پتانسیل هلمهولتز ۱۷۸
مسائل ۱۸۰
۳.۶ آنتالپی: فرآیند ژول‌ـ تامسون یا فرآیند خفانشی ۱۸۱
مسائل ۱۸۸
۴.۶ پتانسیل گیبس: واکنش‌های شیمیایی ۱۸۹
مسائل ۱۹۳
۵.۶ پتانسیل‌های دیگر ۱۹۴
۶.۶ گردآوری داده‌های تجربی: آنتالپی شکل‌گیری ۱۹۵
۷.۶ اصول بیشینه برای توابع مسیو ۱۹۹

۷ روابط ماکسول ۲۰۱
۱.۷ اصول کمینه برای پتانسیل‌ها ۲۰۱
۲.۷ یک نمودار یادآور ترمودینامیکی ۲۰۳

www.ketab.ir

مسائل ۲۰۵
۳.۷ روشی برای کاهش مشتقات در سامانه‌های تک‌مؤلفه‌ای ۲۰۶
مسائل ۲۱۰
۴.۷ چند کاربرد ساده ۲۱۰
۱.۴.۷ تراکم بی‌دررو ۲۱۱
۲.۴.۷ تراکم هم‌دما ۲۱۲
۳.۴.۷ انبساط آزاد ۲۱۳
مسائل ۲۱۷
۵.۷ تعمیم: سامانه‌های مغناطیسی ۲۲۱
مسائل ۲۲۳

۸ پایداری سامانه‌های ترمودینامیکی ۲۲۵
۱.۸ پایداری ذاتی سامانه‌های ترمودینامیکی ۲۲۵
مسائل ۲۲۹
۲.۸ شرایط پایداری پتانسیل‌های ترمودینامیکی ۲۲۹
مسائل ۲۳۰
۳.۸ نتایج فیزیکی پایداری ۲۳۱
مسائل ۲۳۲
۴.۸ اصل لوشاتلیه: اثر کیفی افت‌وخیزها ۲۳۲
۵.۸ اصل لوشاتلیه ـ براون ۲۳۴
مسائل ۲۳۶

۹ گذارهای فاز مرتبهٔ اول ۲۳۹
۱.۹ گذارهای فاز مرتبهٔ اول در سامانه‌های تک‌مؤلفه‌ای ۲۳۹
مسائل ۲۴۷
۲.۹ ناپیوستگی در آنتروپی: گرمای نهان ۲۴۷
مسائل ۲۴۹
۳.۹ شیب منحنی‌های همزیستی: معادلهٔ کلاپیرون ۲۵۰
مسائل ۲۵۳

www.ketab.ir

۴.۹ هم‌دماهای ناپایدار و گذارهای فاز مرتبهٔ اول ۲۵۵
مسائل ۲۶۳
۵.۹ ویژگی‌های کلی گذارهای فاز مرتبهٔ اول ۲۶۵
۶.۹ گذار فاز مرتبهٔ اول در سامانه‌های چندمؤلفه‌ای ـ قاعدهٔ فاز گیبس ۲۶۷
مسائل ۲۷۰
۷.۹ نمودارهای فاز برای سامانه‌های دوتایی ۲۷۱
مسائل ۲۷۴

۱۰ پدیده‌های بحرانی ۲۷۷
۱.۱۰ ترمودینامیک در مجاورت نقطهٔ بحرانی ۲۷۷
۲.۱۰ واگرایی و پایداری ۲۸۳
۳.۱۰ پارامتر نظم و نماهای بحرانی ۲۸۵
۴.۱۰ نظریهٔ کلاسیک در ناحیهٔ بحرانی: نظریهٔ لاندائو ۲۸۸
۵.۱۰ ریشه‌های مسئلهٔ نقطهٔ بحرانی ۲۹۳
۶.۱۰ . . . . . ۲۹۵
مسائل ۲۹۸

۱۱ اصل موضوعهٔ نرنست ۲۹۹
۱.۱۱ اصل موضوعهٔ نرنست و اصل تامسون و بقتلو ۲۹۹
مسائل ۳۰۲
۲.۱۱ ظرفیت‌های گرمایی و سایر مشتقات در دماهای پایین ۳۰۲
۳.۱۱ دسترس‌ناپذیری دمای صفر ۳۰۳

۱۲ خلاصهٔ اصول پایه برای سامانه‌های کلی ۳۰۵
۱.۱۲ سامانه‌های کلی ۳۰۵
۲.۱۲ اصول موضوعه ۳۰۶
۳.۱۲ پارامترهای نافزون‌ور ۳۰۶
۴.۱۲ تبدیلات لژاندر ۳۰۷
۵.۱۲ روابط ماکسول ۳۰۸
۶.۱۲ پایداری و گذارهای فاز ۳۰۸

www.ketab.ir

۷.۱۲ پدیده‌های بحرانی ۳۰۹
۸.۱۲ ویژگی‌های سامانه در دمای صفر ۳۰۹

آ چند رابطه از مشتقات جزئی ۳۱۱
آ.۱ مشتقات جزئی ۳۱۱
آ.۲ بسط تیلور ۳۱۲
آ.۳ دیفرانسیل‌ها ۳۱۳
آ.۴ توابع مرکب ۳۱۳
آ.۵ توابع ضمنی ۳۱۴

ب سرعت صوت ۳۱۷

ج جداول ترمودینامیکی ۳۲۱

د واحدها و ضرایب تبدیل ۳۲۹

منابع ۳۳۱

www.ketab.ir