

۱۲۵۸۲۶۷

حرارت و ترمودینامیک

ویراست هفتم

تألیف

مارک و. زیمانسکی

استاد پیشین فیزیک

سیتی کالج نیویورک

ریچارد ایچ. دین

استاد فیزیک

دانشگاه ویسکانسین - میلواکی

ترجمه

محمد رضا خوش بین خوش نظر

نیاز دانش

سرشناسه

: زمانسکی، مارک والدو، ۱۹۰۰-م.

Zemansky, Mark Waldo

عنوان و نام پدیدآور

: حرارت و ترمودینامیک / تالیف مارک دبلیو زیمانسکی، ریچارد ایچ دیتمن؛ ترجمه محمدرضا خوش‌بین خوش‌نظر.

وضعیت ویراست

: ویراست ۷.

مشخصات نشر

: تهران، نیاز دانش، ۱۳۹۵

مشخصات ظاهری

: ۵۲۰ص: تصویر، جدول، نمودار؛ وزیری

شابک

: ۹۷۸-۶۰۰-۷۷۲۴-۷۳-۶

وضعیت فهرست‌نویسی

: فیپا

موضوع

: گرما

موضوع

: **Heat**

موضوع

: ترمودینامیک

موضوع

: **Thermodynamic**

شناسه افزوده

: دیتمن، ریچارد

شناسه افزوده

: **Dittman, Richard**

شناسه افزوده

: خوش‌بین خوش‌نظر، محمدرضا، ۱۳۴۸-، مترجم.

رده‌بندی کنگره

: QC۲۵۴/۲/۸۰۴ ۱۲۰۵

رده‌بندی دیویی

: ۳۶

شماره کتابشناسی ملی

: ۰۷۵۰۶



نیاز دانش

نام کتاب

: حرارت و ترمودینامیک - ویراست هفتم

مؤلف

: مارک دبلیو زیمانسکی - ریچارد ایچ دیتمن

مترجم

: محمد رضا خوش‌بین خوش‌نظر

مدیر اجرایی - ناظر بر چاپ

: حمیدرضا محمد شیرازی - محمد شمس

ناشر

: نیاز دانش

صفحه‌آرا

: واحد تولید انتشارات نیازدانش

نوبت چاپ

: اول - ۱۳۹۵

شمارگان

: ۸۰۰

قیمت

: ۳۰۰۰۰۰۰ ریال

ISBN: 978-600-7724-73-6

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۷۷۲۴-۷۳-۶

هرگونه چاپ و تکثیر (اعم از زیراکس، بازنویسی، ضبط کامپیوتری و تهیه CD) از محتویات این اثر بدون اجازه کتبی ناشر ممنوع است، متخلفان به موجب بند ۵ از ماده ۲ قانون حمایت از مؤلفان، مصنفان و هنرمندان تحت پیگرد قانونی قرار می‌گیرند.

کلیه حقوق این اثر برای ناشر محفوظ است.

تماس با انتشارات: ۰۹۱۲۷۰۷۳۹۳۵-۰۶۶۴۷۸۱۰۸-۰۶۶۴۷۸۱۰۶-۰۲۱

www.Niaze-Danesh.com

مشاوره جهت نشر: ۰۲۱۰۶۷۰۹ - ۰۹۱۲

پیش گفتار

مارک زیمانسکی پنج ویراست نخست حرارت و ترمودینامیک را نوشت و من در ویراست ششم به او پیوستم. در ویراست پیش رو، سبک و اندیشه‌ی آموزشی زیمانسکی چراغ راه من در انجام اصلاحات بوده است. دقیقاً منطبق بر سبک و سیاق او، تأکید اصلی بر مطالعه‌ی ترمودینامیک (ماکروسکوپی) دما، انرژی، و آنتروپی است، در حالی که اذعان می‌شود معادله‌های حالت، تغییرات دمایی گرماهای ویژه، و بینشی ارزشمند و راهگشا، از رهیافت مکانیک آماری (میکروسکوپی) حاصل می‌آید. روش‌های اندازه‌گیری در سرتاسر کتاب توضیح داده شده‌اند و داده‌هایی واقعی در نمودارها و جداول ارائه شده است. هر جا که نیاز بوده است، قضیه‌های ریاضی فراتر از حساب دیفرانسیل جزئی مقدماتی، استنتاج و ترضیح داده شده‌اند.

توالی مباحث در این ویراست مشابه آخرین ویراست است و عموماً از همه‌ی ویراست‌های قبلی پیروی می‌کند، اما تغییراتی داده شده است تا کتاب را به روز نگه دارد و یا کمک‌حالی برای دانشجویان باشد. عمده‌ی موارد اضافه شده به تعریف یافته عبارت‌اند از:

- جایگزین نمودن نماد θ برای دمای گرماهای کامل با نماد T برای دمای مطلق در فصل اول، پیش از آن‌که با استفاده از قانون دوم ثابت شود که این کمیت‌ها یکسان هستند.
- وارد کردن مقیاس بین‌المللی دما مربوط به سال ۱۹۹۰ که مقیاس عملی دما زیر 0.65 K را تعریف کرد و ترموکوپل را به عنوان دماسنج معیار اصلی تراز گذاشت.
- تعیین ثابت جهانی گازهای R با استفاده از اندازه‌گیری سرعت صوت؛ این معیاری تازه در سال ۱۹۸۶ شد و روش مبتنی بر قانون گازهای کامل را کنار گذاشت.
- بیان بازدهی گرمایی ماشین‌های درون‌سوز برحسب دما به جای نسبت‌های تراکم و انبساط، و بنابراین تدارک مقدمه‌چینی بهتری برای ماشین کارنو.
- جایگزین نمودن ارائه مبتنی بر اصول موضوعه‌ی قانون دوم ترمودینامیک، بر طبق نظر کاراتئودوری^۱، با روش کارنو، کلاسیوس، کلوین و پلانک که مبتنی بر استفاده از چرخه‌ها در یک ماشین گرمایی برگشت‌پذیر است.
- بسط نمودار فاز H_2O برای این‌که دو پلی‌تर्फ (چندریخت) بسیار پرفشار یخ را شامل شود.
- استفاده از تبدیلات لژاندر به منظور ساماندهی پتانسیل‌های ترمودینامیکی دستگاه‌های بسته-انرژی درونی، آنتالپی، تابع هلمهولتز، و تابع گیبس.
- معرفی چهار پتانسیل ترمودینامیکی برای دستگاه‌های باز-تابع گراند^۲، تابع گوگنها^۳، تابع هیل^۴ و تابع ری^۵ - که کمکی بزرگ در گذار از ترمودینامیک به مکانیک آماری هستند.

داده‌ها و مراجع به طور مقتضی به‌روز شده‌اند.

هیچ کتابی نمی‌تواند بدون اشاره با دیگران نوشته شود. مایلم با کمال افتخار از همکاری و مشارکت اشخاص زیر سپاسگزاری کنم: هنری جی. گاربن، دیوید ال. هوگن بون، چارلز کافمن، جی.ام. مارکاند، مارک مک‌کنا، ریچارد بی. مک کویستن، سونیکلاس، دورن دبلیو پترسون، جرج رابینی، جانری، جیمز ای. راتلج، گلن اشمیگ، دیل اسنایدر، لسلای اسپانل، و آنا توپال.

ریچارد. ایچ دیتمن

www.ketab.ir

به گمانم سال ۱۳۹۲ بود؛ به همراه همکارانم در حال نوسازی کتاب‌های فیزیک دوره‌ی متوسطه بودیم که اختلاف‌نظری در مورد یکی از مباحث ترمودینامیک پیش آمد. دوست و همکار متین‌مان جناب دکتر مهدی سعادت را به یکی از جلسات کارگروه دعوت کردیم و همان موقع بود که ایشان فایل ویراست هفتم کتاب حرارت و ترمودینامیک زیمانسکی - دیتمن را در اختیارمان قرار داد. بلافاصله با نگاهی اجمالی دریافتیم که کتاب دستخوش تغییرات قابل توجه‌ای نسبت به ویراست ششم شده است و در شگفت ماندم که چرا اکثر دانشگاه‌ها همچنان از ویراست ششم کتاب برای تدریس استفاده می‌کنند. ویراست هفتم کتاب حرارت و ترمودینامیک، کتابی روزآمدتر است، کلی از حشو و زوائد ریاضی آن کاسته شده است، انسجام مطالب آن به مراتب بیشتر است، از حجم برخی فصل‌ها کاسته، چند فصل درهم ادغام و چند فصل به کلی حذف شده است. این ویراست، کتابی شکیل و به واقع یک کتاب درسی تمام‌عیار است و از همین رو به گمانم رسید می‌بایست جانشین ویراست ششم کتاب شود که در مقایسه با این کتاب، کاستی‌هایی داشت - کاستی‌هایی که عمده‌ی آن‌ها در ویراست هفتم برطرف شده است. اما در این بین، از گوشه و کنار می‌شنیدم همکاران محترمی هم هستند که از سختی تدریس کتاب زیمانسکی - دیتمن می‌نالند و این که نمی‌توانند سرفصل‌های مصوب آموزش عالی را به کمال تدریس کنند. جالب است بدانم که از همکار محترمی در دانشگاه صنعتی اصفهان را مطالعه کردم که بی‌آن‌که توجه دقیق و عمیقی به ویراست هفتم کتاب داشته باشد، در حالی که به نقد ویراست ششم کتاب پرداخته بود و تمام ارجاعاتش به همین ویراست بود، آن را به ویراست هفتم نیز تعمیم داده بود. ظاهراً مقالات و اظهارنظرهایی از این دست باعث شد که شورای برنامه‌ریزی درسی آموزش عالی کتاب نحیف و مهجور حرارت و گرما بلافاصله آن را در جایگزین کتاب ستبری چون زیمانسکی بکند و این اتجیل کتاب‌های حرارت و ترمودینامیک را به عنوان منبعی فرعی پیشنهاد دهد. به گمان من، این خطایی فاحش است و نباید به دلایل حاشیه‌ای، این اشتباه را مرتکب شد. کتاب زیمانسکی - دیتمن به معنای دقیق کلمه یک کتاب درسی در سطح متوسطه رو به بالا است که با بررسی که من کرده‌ام در تمامی دانشگاه‌های برتر جهان همچنان تنها منبع مورد تأیید برای درس ترمودینامیک محسوب می‌شود. جالب است که بنده در مکاتباتی خصوصی که با جرنل‌واکر استاد دانشگاه ایالتی کلیولند و وولفگانگ باوئر استاد دانشگاه ایالتی میشیگان داشتم، دریافتیم هردو اظهارنظرهای خود را مستند به این کتاب می‌کردند و از همین رو است که واقعاً در شگفت هستم که چرا دانشگاه‌های ایران باید مستثنی از سایر دانشگاه‌های معتبر جهان باشند. با این همه، بر آن شدم بدون هیچ‌گونه پیش‌داوری به بررسی کتاب بلاندر بپردازم تا یک‌طرفه به قاضی نرفته باشم. اما با بررسی این کتاب دریافتیم که انتخاب این کتاب به عنوان یک کتاب درسی اشتباهی نابخشودنی بوده است. بخش‌های I تا III این کتاب که شامل ۸ فصل است، به جز آموزش اندکی از مقدمات فیزیک احتمالات که در هر کتاب مقدماتی آماری وجود دارد چیزی فراتر از فیزیک گرمایی نیست که دانشجویان در درس فیزیک پایه ۳

و حتی در دوره‌ی متوسطه‌ی خود می‌خوانند. از منظر ترمودینامیک می‌توان گفت کتاب از فصل ۱۱ وارد موضوع اصلی این درس می‌شود که آن نیز به اعتقاد نگارنده به جز معرفی کمیت‌های گسترده (افزایشی) و متمرکز (نافزایشی) در سطحی نازل‌تر از کتاب‌های مقدماتی فیزیک حرارت است که صرفاً به ترمودینامیک گازها می‌پردازند. در واقع شاید به درستی بتوان گفت این کتاب تازه از فصل ۱۶ است که اندکی رنگ و لعاب درسی به عنوان ترمودینامیک در سطح کارشناسی را به خود می‌گیرد! و با این وجود، حتی از فصل ۱۶ به بعد نیز، کتاب بیشتر در حد یک دانشنامه جلوه می‌کند تا یک کتاب درسی. برای آن‌که نمونه‌ای را به دست دهیم، خوانندگان را به قیاس یک مطلب در دو کتاب ارجاع می‌دهم: گذارهای فاز مرتبه‌ی دوم. در حالی که کتاب بلاندل مثل یک دایره‌المعارف تعریفی یک خطی از این گذارها به دست می‌دهد، کتاب زیمانسکی - دیتمن یک فصل کامل را به این گذارها اختصاص داده است. از سویی دیگر، طرح درس و چگونگی ورود به مبحث این کتاب نیز اشکال دارد. این کتاب تصویری را که کتاب زیمانسکی برای دانشجویان فراهم می‌آورد، به دست نمی‌دهد. یکسره فاقد توضیحات فیزیکی از دستگاه‌های مختلف و نیز مثال‌هایی از فرآیندهای برگشت‌پذیر و برگشت‌ناپذیر است و بیشتر از سبب تمایلات و مکانیک آماری وارد طرح موضوع می‌شود. نمی‌شود یک سلیقه را جایگزین ایده‌های کنونی نگارنده چوب چنین تصمیم‌گیری‌های سلیقه‌ای را سال‌ها پیش خورده است، وقتی که اساتید مرمس مکانیک کوانتومی پیشرفته‌ی این‌جانب که سرآمد تمام مختصصان این حوزه بوده است به کتاب معظم ساکورایی تصمیم به تدریس این درس از کتاب مهجور بالتاین گرفت. کتاب بالتاین نیز به سلیقه‌ی مؤلف خود، از راهی خاص وارد مبحث مکانیک کوانتومی می‌شد که کاملاً مشابه می‌باشد به درس بلاندل در ترمودینامیک است. ظاهراً استاد محترم بنده و سایر اساتیدی که در آن سال‌ها اقدام به تدریس مکانیک کوانتومی از کتاب بالتاین کردند، نمی‌دانسته‌اند که بدین ترتیب ستون فقرات یک درس را نابود می‌کنند. تب بالتاین نیز پس از چند سالی فرو نشست و دوباره ساکورایی سربرآورد. به همان منوال، علاج درد پیش از وقوع آن است و باید پیش از آن‌که تبی حادث شود جلوی این بیماری را گرفت. بنابراین برنامه‌ریزی آموزش عالی با برطرف کردن این اشتباه، هرچه سریع‌تر به اصلاح آن پردازد.

در پایان می‌خواستم به ترجمه‌ی چند واژگان پردازم که آن‌ها را به انتخاب کرده‌ام. ترجیحم آن بود از همان واژگانی استفاده شود که در کتاب‌های درسی دوره‌ی متوسطه استفاده می‌شود، مثلاً گرچه دستگاه ترجمه‌ی درستی برای سیستم نیست ولی بی‌گمان ترجمه‌ی درست‌تری از سامانه است که ظاهراً جزو واژگان مصوب فرهنگستان بوده است. به همین ترتیب به جای واژه‌ی صحیح‌تر گاز آرمانی از گاز کامل استفاده کرده‌ام که دانشجویان بیشتر با این واژه آشنا هستند. انتخاب برخی از واژه‌ها هم سلیقه‌ای بوده است. مثلاً انتخاب گسترده برای extensive و متمرکز برای intensive که برخی آن‌ها را فرونور و نافزونور یا افزایشی و نافزایشی ترجمه کرده‌اند. شاید اشتباه کرده‌ام؛ اگر این‌طور است سپاسگزار می‌شوم همکاران محترم نظرات و پیشنهادهای اصلاحی خود را برایم ارسال کنند تا در چاپ‌های احتمالی بعدی کتاب اعمال گردد.

فهرست مطالب

بخش ۱ مفاهیم بنیادی

فصل ۱ قانون صفرم ترمودینامیک

- ۱-۱ از دیدگاه ماکروسکوپی ۱۹
- ۲-۱ دیدگاه میکروسکوپی ۲۰
- ۳-۱ مقایسه‌ی دیدگاه‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی ۲۱
- ۴-۱ گستره‌ی ترمودینامیک ۲۲
- ۵-۱ تعادل گرمایی و قانون صفرم ۲۳
- ۶-۱ مفهوم دما ۲۴
- ۷-۱ دماسنج‌ها و اندازه‌گیری دما ۲۸
- ۸-۱ مقایسه‌ی دماسنج‌ها ۳۱
- ۹-۱ دماسنج گازی ۳۳
- ۱۰-۱ دمای گاز کامل ۳۴
- ۱۱-۱ مقیاس دمای سلسیوس ۳۷
- ۱۲-۱ دماسنجی با مقاومت پلاتینی ۳۷
- ۱۳-۱ دماسنجی تابشی ۳۸
- ۱۴-۱ دماسنجی فشار بخار ۳۹
- ۱۵-۱ ترموکوپل ۳۹
- ۱۶-۱ مقیاس دمای بین‌المللی سال ۱۹۹۰ (ITS-۹۰) ۴۱
- ۱۷-۱ مقیاس‌های دمای رانکین و فارنهایت ۴۳
- مسئله‌ها ۴۳

فصل ۲ دستگاه‌های ترمودینامیکی ساده

- ۱-۲ تعادل ترمودینامیکی ۴۷
- ۲-۲ معادله‌ی حالت ۴۸
- ۳-۲ دستگاه‌های هیدروستاتیکی ۵۰
- ۴-۲ قضیه‌های ریاضی ۵۳
- ۵-۲ سیم کشیده ۵۶

- ۶-۲ رویه‌ها ۵۸
- ۷-۲ پیل الکتروشیمیایی ۵۹
- ۸-۲ بره‌ی دی‌الکتریک ۶۲
- ۹-۲ میله‌ی پارامغناطیسی ۶۳
- ۱۰-۲ مختصات متمرکز و گسترده ۶۴
- مسئله‌ها ۶۵

فصل ۳ کار

- ۱-۳ کار ۶۹
- ۲-۳ فرایند ایستادار ۷۰
- ۳-۳ کار در تغییر حجم یک دستگاه هیدروستاتیکی ۷۲
- ۴-۳ نمودار PV ۷۴
- ۵-۳ کار، هیدروستاتیکی به مسیر بستگی دارد ۷۵
- مسئله‌ی $\int PdV$ برای فرایندهای ایستادار ۷۷
- ۷-۳ کار لازم برای عبور طول یک سیم ۷۹
- ۸-۳ کار لازم برای تغییر مساحت یک فیلم سطحی ۷۹
- ۹-۳ کار لازم برای حرکت بار توسط یک پیل الکتروشیمیایی ۸۰
- ۱۰-۳ کار لازم برای تغییر قطبش یک جامد دی‌الکتریک ۸۲
- ۱۱-۳ کار لازم برای تغییر مغناطش کل یک جامد پارامغناطیسی ۸۳
- ۱۲-۳ کار تعمیم یافته ۸۶
- ۱۳-۳ دستگاه‌های مرکب ۸۶
- مسئله‌ها ۸۸

فصل ۴ گرما و قانون اول ترمودینامیک

۵-۶	ماشین استرلینگ	۱۷۴
۶-۶	ماشین گرمایی؛ بیان کلوین- پلانک قانون	
دوم		۱۷۷
۷-۶	یخچال؛ بیان کلاسیوس قانون دوم	۱۷۸
۸-۶	هم‌ارزی بیان‌های کلوین- پلانک و کلاسیوس	۱۸۰
۹-۶	برگشت‌پذیری و برگشت‌ناپذیری	۱۸۲
۱۰-۶	برگشت‌ناپذیری مکانیکی خارجی	۱۸۳
۱۱-۶	برگشت‌ناپذیری داخلی مکانیکی	۱۸۵
۱۲-۶	برگشت‌ناپذیری گرمایی خارجی و داخلی	۱۸۵
۱۳-۶	برگشت‌ناپذیری شیمیایی	۱۸۶
۱۴-۶	شرایط لازم برای برگشت‌پذیری	۱۸۷
۱۸۸	مسئله‌ها	

فصل ۷ چرخه‌ی کارنو و مقیاس ترمودینامیکی دمای

۱-۷	چرخه‌ی کارنو	۱۹۳
۲-۷	نمونه‌هایی از چرخه‌ی کارنو	۱۹۴
۳-۷	یخچال کارنو	۱۹۸
۴-۷	قضیه‌ی کارنو و پیامد آن	۱۹۹
۵-۷	مقیاس دمای ترمودینامیکی	۲۰۱
۶-۷	صفر مطلق و بازده‌ی کارنو	۲۰۴
۷-۷	سای دماهای گاز کامل و ترمودینامیکی	۲۰۵
۲۰۷	مسئله‌ها	

فصل ۸ آنتروپی

۱-۸	بخش ۴-۱-۱ قانون دوم	۲۱۱
۲-۸	آنتروپی	۲۱۴
۳-۸	اصل کارانتودوری	۲۱۷
۴-۸	آنتروپی گاز کامل	۲۱۹
۵-۸	نمودار TS	۲۲۱
۶-۸	آنتروپی و برگشت‌پذیری	۲۲۳
۷-۸	آنتروپی و برگشت‌ناپذیری	۲۲۴
۸-۸	بخش برگشت‌ناپذیر قانون دوم	۲۲۹
۹-۸	گرما و آنتروپی در فرآیندهای برگشت‌ناپذیر	۲۳۱
۱۰-۸	آنتروپی و حالت‌های ناعادلی	۲۳۳

۱-۴	کار و گرما	۹۱
۲-۴	کار بی‌دررو	۹۳
۳-۴	تابع انرژی درونی	۹۶
۴-۴	فرمول‌بندی ریاضی قانون اول ترمودینامیک	۹۶
۵-۴	مفهوم گرما	۹۹
۶-۴	شکل دیفرانسیلی قانون اول ترمودینامیک	۱۰۰
۷-۴	ظرفیت گرمایی و اندازه‌گیری آن	۱۰۲
۸-۴	گرمای نهی؛ آب؛ کالری	۱۰۶
۹-۴	معادلات یک دستگاه هیدروستاتیکی	۱۰۷
۱۰-۴	شارش؛ ایستوار؛ مایع گرما	۱۰۸
۱۱-۴	رسانش گرما	۱۱۰
۱۲-۴	رسانندگی گرمایی؛ اندازه‌گیری آن	۱۱۱
۱۳-۴	همرفت گرما	۱۱۲
۱۴-۴	تابش گرمایی؛ جسم سیاه	۱۱۳
۱۵-۴	قانون کیرشهوف، گرمای تابید	۱۱۶
۱۶-۴	قانون استفان- بولتزمان	۱۱۹
۱۲۰	مسئله‌ها	

فصل ۵ گاز کامل

۱-۵	معادله‌ی حالت یک گاز	۱۲۷
۲-۵	انرژی داخلی یک گاز واقعی	۱۳۰
۳-۵	گاز کامل	۱۳۳
۴-۵	تعیین آزمایشگاهی ظرفیت‌های گرمایی	۱۳۵
۵-۵	فرایند ایستوار بی‌دررو	۱۳۸
۶-۵	روش روهخاردت برای اندازه‌گیری γ	۱۴۰
۷-۵	سرعت یک موج طولی	۱۴۴
۸-۵	دیدگاه میکروسکوپی	۱۴۹
۹-۵	نظریه‌ی جنبشی گازهای کامل	۱۵۰
۱۵۷	مسئله‌ها	

فصل ۶ قانون دوم ترمودینامیک

۱-۶	تبدیل کار به گرما و برعکس	۱۶۳
۲-۶	ماشین بتزینی	۱۶۵
۳-۶	ماشین دیزل	۱۶۹
۴-۶	ماشین بخار	۱۷۱

۱۱-۵	معادله‌ی کلاسیوس- کلاپیرون و ماشین کارنو	۳۲۵
۱۱-۶	پتانسیل شیمیایی	۳۲۶
۱۱-۷	دستگاه‌های هیدروستاتیکی باز در تعادل	
۳۳۰	ترمودینامیکی	
۳۳۴	مسئله‌ها	

بخش ۱ مفاهیم بنیادی

فصل ۱۲ مکانیک آماری

۱-۱۲	اصول بنیادی	۳۴۱
۲-۱۲	توزیع دمایی	۳۴۴
۳-۱۲	اهمیت ضرایب لاگرانژ λ و β	۳۴۸
۴-۱۲	تابع پارش برای هنگرد بندادی	۳۵۱
۵-۱۲	تابع پارش یک گاز کامل تک‌اتمی	۳۵۴
۶-۱۲	همپاری انرژی	۳۵۶
۷-۱۲	توزیع تندی‌ها در یک گاز کامل تک‌اتمی	
۳۵۹		
۸-۱۲	مفهوم آماری کار و گرما	۳۶۳
۹-۱۲	آنترپی و اطلاعات	۳۶۵
۳۶۸	مسئله‌ها	

فصل ۱۳ ویژگی‌های گرمایی جامدات

۱-۱۳	مکانیک آماری یک بلور غیرفلزی	۳۷۳
۲-۱۳	توان و دمای بلورها	۳۷۸
۳-۱۳	حرکت مای گرمایی غیرفلزات	۳۸۲
۴-۱۳	ویژگی‌های گرمایی فلزات	۳۸۴
۳۹۴	مسئله‌ها	

فصل ۱۴ پدیده‌های بحرانی؛ گذارهای فاز

مرتب‌های بالاتر

۱-۱۴	حالت بحرانی	۳۹۷
۲-۱۴	نمایان نقطه‌ی بحرانی یک دستگاه هیدروستاتیکی	۴۰۱
۳-۱۴	نمایان نقطه‌ی بحرانی یک دستگاه مغناطیسی	۴۰۶
۴-۱۴	گذارهای فاز مرتبه‌های بالاتر	۴۱۰
۵-۱۴	گذارهای لاندا در ^4He	۴۱۲
۶-۱۴	هلیوم مایع و جامد	۴۱۷

۱۱-۸	اصل افزایش آنترپی	۲۳۶
۱۲-۸	کاربرد اصل آنترپی	۲۳۹
۱۳-۸	آنترپی و بی‌نظمی	۲۴۰
۱۴-۸	دیفرانسیل‌های کامل	۲۴۲
۲۴۳	مسئله‌ها	

فصل ۹ مواد خالص

۱-۹	نمودار PV برای یک ماده‌ی خالص	۲۴۹
۲-۹	نمودار PT برای یک ماده‌ی خالص؛ نمودار فاز	۲۵۳
۳-۹	سطح $P-T$	۲۵۵
۴-۹	معادله‌های حالت	۲۵۹
۵-۹	ظرفیت گرمایی در فشار ثابت	۲۶۱
۶-۹	انبساط‌پذیری، حجمی؛ ضریب انبساط حجمی	۲۶۳
۷-۹	تراکم‌پذیری	۲۶۶
۸-۹	ظرفیت گرمایی مولی در حجم ثابت	۲۶۸
۹-۹	نمودار TS برای یک ماده‌ی خالص	۲۷۱
۲۷۲	مسئله‌ها	

فصل ۱۰ روش‌های ریاضی

۱-۱۰	توابع مشخصه	۲۷۷
۲-۱۰	آنتالپی	۲۸۰
۳-۱۰	توابع هلمهولتز و گیس	۲۸۶
۴-۱۰	دو قضیه‌ی ریاضی	۲۸۹
۵-۱۰	رابطه‌های ماکسول	۲۹۰
۶-۱۰	معادلات TS	۲۹۳
۷-۱۰	معادلات انرژی داخلی	۲۹۸
۸-۱۰	معادلات ظرفیت گرمایی	۲۹۹
۳۰۳	مسئله‌ها	

فصل ۱۱ دستگاه‌های باز

۱-۱۱	انبساط ژول-تامسون	۳۰۹
۲-۱۱	میعان گازها از طریق انبساط ژول-تامسون	۳۱۲
۳-۱۱	گذارهای فاز مرتبه‌ی اول: معادله‌ی کلاسیوس-کلاپیرون	۳۱۹
۴-۱۱	معادله‌ی کلاسیوس-کلاپیرون و نمودارهای فاز	۳۲۲

مسئله‌ها ۴۲۲

فصل ۱۵ تعادل شیمیایی

۱-۱۵ قانون دالتون ۴۲۵

۲-۱۵ غشاء نیمه‌تراوا ۴۲۶

۳-۱۵ قضیه‌ی گیبس ۴۲۷

۴-۱۵ آنتروپی مخلوطی از گازهای کامل بی‌اثر

..... ۴۲۹

۵-۱۵ تابع گیبس مخلوطی از گازهای کامل بی‌اثر

..... ۴۳۱

۶-۱۵ تعادل شیمیایی ۴۳۳

۷-۱۵ تعادل ترمودینامیک حالت‌های

غیرتعادلی ۴۳۴

۸-۱۵ شرایط لازم برای تعادل شیمیایی ۴۳۶

۹-۱۵ شرط لازم برای پایداری مکانیکی ۴۳۸

۱۰-۱۵ معادلات ترمودینامیک برای یک فاز ۴۴۰

۱۱-۱۵ پتانسیل‌های شیمیایی ۴۴۳

۱۲-۱۵ درجه‌ی واکنش ۴۴۸

۱۳-۱۵ معادله‌ی تعادل واکنش ۴۴۸

مسئله‌ها ۴۴۱

فصل ۱۶ واکنش‌های گاز کامل

۱-۱۶ قانون کنش جرم ۴۵۵

۲-۱۶ تعیین آزمایشگاهی ثابت‌های تعادلی ۴۵۶

۳-۱۶ گرمای واکنش ۴۵۹

۴-۱۶ معادله‌ی نرنست ۴۶۳

۵-۱۶ میل ترکیبی ۴۶۵

۶-۱۶ جابه‌جایی تعادل ۴۷۰

۷-۱۶ ظرفیت گرمایی گازهای در حال واکنش،

در تعادل ۴۷۲

مسئله‌ها ۴۷۳

فصل ۱۷ دستگاه‌های چندگن

۱-۱۷ معادلات ترمودینامیکی برای یک دستگاه

چندگن ۴۷۷

۲-۱۷ قاعده‌ی فاز بدون واکنش شیمیایی ۴۷۹

۳-۱۷ کاربردهای ساده‌ای از قاعده‌ی فاز ۴۸۳

۴-۱۷ قاعده‌ی فاز در حضور واکنش شیمیایی

..... ۴۸۶

۵-۱۷ تعیین تعداد مؤلفه‌ها ۴۹۱

۶-۱۷ جابه‌جایی تعادل ۴۹۵

مسئله‌ها ۴۹۷

پیوست الف ثابت‌های فیزیکی ۵۰۳

پیوست ب روش ضرایب لاگرانژ ۵۰۴

پیوست پ محاسبه‌ی انتگرال

$\int_0^{\infty} e^{-ax^2} dx$ ۵۰۶

پیوست ت توابع زتای ریمان ۵۰۷

پیوست ث تعاریف و فرمول‌های

ترمودینامیکی ۵۰۹

کتابخانه ۵۱۵

پاسخ به سؤالی برگزیده ۵۱۷