

حرارت و ترمودینامیک

ویراست هفتم

تألیف

مارک دبلیو. زیمانسکی

استاد پیشین فیزیک

سیتی کالج نیویورک

دیچارد ایچ. دیتمن

استاد فیزیک

دانشگاه ویسکانسین- میلوکی

ترجمه

محمد رضا خوش بین خوش نظر

نیاز دانش

تقدیم به

آدل سی. زیمانسکی و ماریا ام. دیتمن

درباره‌ی نویسندهان

مارک دبلیو. زیمانسکی^۱ در سال ۱۹۰۰ در شهر نیویورک به دنیا آمد، از سیتی کالج نیویورک در سال ۱۹۲۱ فارغ‌التحصیل شد، و دکتری خود را در سال ۱۹۲۷ از دانشگاه نیویورک گرفت. در سال ۱۹۲۵ به عضویت هیئت علمی کالج درآمد و تا زمان بازنیستگی در سال ۱۹۶۷ در همانجا ماند، به جز دوره‌ای که برای مطالعات تحقیقی بیشتر از سال ۱۹۲۸ تا سال ۱۹۳۰ به دانشگاه پرینستون و سپس از سال ۱۹۳۰ تا ۱۹۳۱ به استیتو قیصر ویاهم^۲ در برلین رفت. زیمانسکی نخستین ویراست حرارت و ترمودینامیک را در سال ۱۹۳۷ نوشت. در سال ۱۹۴۷، فرانسیس دبلیو سیزر^۳ و زیمانسکی نخستین ویراست کالج فیزیکس^۴ و سپس فیزیک دانشگاهی^۵ را در سال ۱۹۴۹ به چاپ رساندند. در طول همکاری طولانی مدت خود با نجمان معلمان فیزیک آمریکا^۶ او از سال ۱۹۴۱ تا ۱۹۴۷ ویراستار همکار مجله‌ی آمریکن جرنال آف فیزیکس^۷، رئیس AAPT در سال ۱۹۵۱، و دبیر اجرایی آن از سال ۱۹۶۷ تا ۱۹۷۰ بود. او در سال ۱۹۸۱ درگذشت.

ریچارد دیتمن^۸ در سال ۱۹۳۷ در ساکرامنتو کالیفرنیا به دنیا آمد، در سال ۱۹۵۹ از دانشگاه سانتاکلارا فارغ‌التحصیل شد، و دکتری خود را در سال ۱۹۶۵ از دانشگاه نوتردام گرفت. پس از یک سال تحقیق در استیتوی فرتیزه‌هابر^۹ در برلین به عضویت هیئت علمی دانشگاه ویسکانسین در میلوکی درآمد و برای همیشه در آنجا ماند. همراه با گلن ام اشمیگ^{۱۰} کتاب فیزیک در زندگی روزمره^{۱۱} را در سال ۱۹۷۹ نوشت. دیتمن دو جایزه‌ی ارزشمند در امر آموزش فیزیک را یکی در سال ۱۹۷۱ و دیگری در سال ۱۹۸۹ به دست آورد. او همچنین رئیس دپارتمان فیزیک و رئیس وابسته‌ی کالج معارف و علوم^{۱۲} بوده است.

-
1. Mark W.Zemansky
 2. Kaisar Wilhelm Institute
 - 3.Francis W.Sears
 4. College Physics
 5. University Physics
 6. American Association of Physics Teachers (AAPT)
 7. American Journal of Physics
 8. Richard H. Ditzman
 9. Fritz Haber Institute
 10. Glen M.Schmieg
 11. Physics in Everyday Life
 12. College of Letters and Science

پیش‌گفتار

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 گرمایی 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. هرجا که نیاز بوده است، قضیه‌های ریاضی فراتر از حساب دیفرانسیل جزئی مقدماتی، استنتاج و توضیح 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. عمدۀی موارد اضافه شده یا تغییر یافته عبارت‌اند از:

- جایگزین نمودن نماد θ برای دمای گازهای کامل با نماد T برای دمای مطلق در فصل اول، پیش از آن که 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 $K/65^{\circ}$ را تعریف کرد و ترموکوپی را به عنوان دما‌سنج معیار اصلی کنار 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 بر حسب دما به جای نسبت‌های تراکم و انبساط، و بنابراین تدارک مقدمه‌چینی بهتری برای ماشین کارنو.
- جایگزین نمودن ارائه مبتنی بر اصول موضوعی قانون دوم ترمودینامیک، بر طبق نظر کارائئوکری^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 پلی‌مُرف (چندریخت) بسیار پرسشار یخ را شامل شود.
- استفاده از تبدیلات لرژاندر به منظور ساماندهی پتانسیل‌های ترمودینامیکی دستگاه‌های بسته-انرژی درونی، آنتالپی، تابع هلمجهور، و تابع گیبس.
- معرفی چهار پتانسیل ترمودینامیکی برای دستگاه‌های باز-تابع گراند^۲، تابع گوگنهام^۳، تابع هیل^۴ و تابع ری^۵- که کمکی بزرگ در گذار از ترمودینامیک به مکانیک آماری هستند.

1. Caratheodory

2. Grand function

3. Guggenheim

4. Hill

5. Ray

داده‌ها و مراجع به طور مقتضی به روز شده‌اند.

هیچ کتابی نمی‌تواند بدون مشاره با دیگران نوشته شود. مایلیم با کمال افتخار از همکاری و مشارکت اشخاص زیر سپاسگزاری کنم: هنری جی. گارین، دیوید ال. هوگن بون، چارلز کافمن، جی.ام. مارکاند، مارک مک‌کنا، ریچارد بی. مک‌کویستن، سو نیکلاس، دورن دبلیو پترسون، جرج راینی، جان‌ری، جیمز ای. راتلچ، گلن اشمیگ، دیل استنایدر، لسلی اسپانل، و آنا توپال. ریچارد. ایچ دیمن

مقدمه‌ی مترجم

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. بلاfaciale با نگاهی اجمالی دریافتیم که کتاب دستخوش تغییرات قابل توجه‌ای نسبت به ویراست ششم شده است و در شگفت‌ماندم که چرا اکثر دانشگاه‌ها همچنان از ویراست ششم کتاب برای تدریس استفاده می‌کنند. ویراست هفتم کتاب حرارت و ترمودینامیک، کتابی روز آمدتر است، کلی از حشو و زوائد ریاضی آن کاسته شده است، انسجام مطالب آن به مراتب پیشتر 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 تمام عیار است و از همین‌رو به گمانم رسید می‌باشد 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 گوش و کثار 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 مقاله‌ای 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 این‌دست باعث شد که شورای برنامه‌ریزی درسی آموزش عالی کتاب نحیف و مهجور حرارت و گرما ¹ را در جایگزین کتاب ستری چون زیمانسکی بکند و این انجیل کتاب‌های حرارت و ترمودینامیک را به عنوان منبعی فرعی پیشنهاد دهد. به گمان من، این خطایی فاحش است و باید به دلایل حاشیه‌ای، چنین اشتباہی را مرتکب شد. کتاب زیمانسکی – دیتمن به معنای دقیق کلمه یک کتاب درسی در سطح متوسط 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 جرل واکر استاد دانشگاه ایالتی کلیولند و ولغاگانگ باوئر استاد دانشگاه ایالتی میشیگان داشتم، دریافتیم هردو اظهارنظرهای خود را مستند به این کتاب می‌کردند و از همین‌رو است که واقعاً در شگفت‌هستم که چرا دانشگاه‌های ایران باید مستثنی از سایر دانشگاه‌های معتبر جهان باشند. با این همه، بر آن شدم بدون هیچ‌گونه پیش‌داوری به بررسی کتاب ¹ پردازم تا یک‌طرفه به قاضی نرفته باشم. اما با بررسی این کتاب دریافتیم که انتخاب این کتاب به عنوان یک کتاب درسی اشتباہی نایخودنی 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

1. Stephen J. Blundell and Katherine M. Blundell

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 گستره (افزایشی) و متمنکر (ناافزایشی) 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 دهم، خوانندگان را به قیاس یک مطلب در دو کتاب ارجاع می‌دهم: گذارهای فاز مرتبه‌ی دوم. در حالی که کتاب بلندل مثیل 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 حساب احتملات و مکانیک آماری وارد طرح موضوع می‌شود. نمی‌شود یک سلیقه را جایگزین ایده‌های کلی کرد. خود نگارنده چوب چنین تصمیم‌گیری‌های سلیقه‌ای را سال‌ها پیش خورده است، وقتی که استاد محترم درس مکانیک کوانتموی پیش‌رفته‌ی این جانب که سرآمد تمام مختصصان این حوزه بوده است، به جای کتاب معظم ساکورایی تصمیم به تدریس این درس از کتاب مهجور بالتاپن گرفت. کتاب بالتاپن نیز بنا به سلیقه‌ی مؤلف خود، از راهی خاص وارد مبحث مکانیک کوانتموی می‌شد که کاملاً مشابه طرح ورود به درس بلندل در ترمودینامیک است. ظاهراً استاد محترم بنده و سایر اساتیدی که در آن سال‌ها اقدام به تدریس مکانیک کوانتموی از کتاب بالتاپن کردند، نمی‌دانسته‌اند که بدین ترتیب ستون فقرات یک درس را نابود می‌کنند. تب بالتاپن نیز پس از چند سالی فرو نشست و دوباره ساکورایی سربرا آورد. به گمان من، علاج درد پیش از وقوع آن است و باید پیش از آن که تبی حادث شود جلوی این بیماری را گرفت و شورای برنامه‌ریزی آموزش عالی با برطرف کردن این اشتباه، هرچه سریع‌تر به اصلاح آن پردازد.

در پایان می‌خواستم به ترجمه‌ی چند واژگان بپردازم که آن‌ها را به دلایلی انتخاب کرده‌ام. ترجیح‌م آن بود از همان واژگانی استفاده شود که در کتاب‌های درسی سیستم نیست ولی بی‌گمان ترجمه‌ی درست‌تری از سامانه‌است که ظاهراً چزو واژگان مصوب فرهنگ‌ستان بوده است. به همین ترتیب به جای واژه‌ی صحیح تر 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 گستره‌ای برای extensive و متمنکر برای intensive که برخی آن‌ها را فرونور و نافرونور یا افزایشی و ناافزایشی 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.

نمادگذاری

حروف ایتالیک کوچک

حروف ایتالیک بزرگ

<i>a</i>	تابع هلمهولتز؛ نخستین ضریب ویریال؛ مساحت	<i>A</i>	تابع هلمهولتز؛ نخستین ضریب ویریال؛ مساحت
<i>b</i>	یک بعد؛ یک ثابت	<i>B</i>	مدول کپهای، دومین ضریب ویریال؛ جزء سازنده‌ی شیمیایی
<i>c</i>	ظرفیت گرمایی مدلی یا ویژه؛ تعداد جزه‌ای سازنده‌ی شیمیایی، ضرایب ترموموکوپل؛ سرعت نور	<i>C</i>	ظرفیت گرمایی؛ سومین ضریب ویریال؛ نقطه‌ی بحرانی
<i>c'</i>	مؤلفه‌ها	<i>D</i>	یک ثابت
<i>d</i>	دیفرانسیل کامل	<i>E</i>	میدان الکتریکی، پتانسیل یونش
<i>e</i>	پایه‌ی لگاریتم طبیعی؛ تعادل	<i>F</i>	نیرو؛ ثابت فاراده
<i>f</i>	حالت نهایی؛ وردایی؛ تابع	<i>G</i>	تابع گیبس
<i>g</i>	تابع گیبس مولی؛ شتاب گرانی تبهگی	<i>H</i>	آنالپی؛ تابیدگی
<i>h</i>	آنالپی مولی؛ ضریب همرفت؛ ثابت پلانک	<i>I</i>	ماشین برگشت‌ناپذیر؛ جریان
<i>i</i>	حالت اولیه	<i>J</i>	ماشین ماسیو، تابع گراند
<i>j</i>	ظرفیت؛ شاخص جمع‌بندی	<i>K</i>	رسانندگی گرمایی؛ ثابت تعادل
<i>k</i>	ثابت هوک؛ ثابت بولتزمن	<i>L</i>	طول؛ مقیاس لگاریتمی دما؛ تابع هیل
<i>l</i>	فاصله	<i>M</i>	جرم مولی
<i>m</i>	جرم یک ذره	<i>N</i>	تعداد مولکول‌ها
<i>n</i>	تعداد مول‌ها؛ عدد کوانتوموئی	<i>P</i>	فشار
<i>p</i>	فشار جزئی؛ تکانه‌ی خطی	<i>Q</i>	گرما
<i>q</i>	گرمای مولی	<i>R</i>	ثابت مولی گاز؛ ماشین کارنوی برگشت‌پذیر؛ مقاومت الکتریکی؛ تابع ری
<i>r</i>	شعاع؛ نسبت؛ تعداد تک‌تک واکنش‌ها	<i>S</i>	آنتروپی
<i>s</i>	آنتروپی مولی	<i>T</i>	دماهی مطلق (کلوین یا رانکین)
<i>t</i>	دماهی عملی (سلسیوس یا فارنهایت)؛ زمان	<i>U</i>	انرژی درونی
<i>u</i>	انرژی درونی مولی	<i>V</i>	حجم
<i>v</i>	حجم مولی	<i>W</i>	کار
<i>w</i>	کار مولی؛ تندی موج ذره	<i>X</i>	جابه‌جایی تعمیم یافته
<i>x</i>	مختصه‌ی فضایی؛ کسر مولی	<i>Y</i>	نیروی تعمیم یافته؛ مدول یانگ؛ تابع پلانک
<i>y</i>	مختصه‌ی فضایی؛ کسر میزان	<i>Z</i>	بار الکتریکی؛ تابع گوگنهایم؛ تابع پارش
<i>z</i>	مختصه‌ی فضایی، تعداد معادلات تحدیدی		

حروف بزرگ تحریری

B میدان مغناطیسی القایی

C_C ثابت کوری

N_A عدد آووگادرو

R' مقاومت الکتریکی

U' ضریب انتقال گرمای کل

P قطبش دی الکتریک کل

R گسیلنندگی تابشی

حروف بزرگ پرنگ ایتالیک

B میدان مغناطیسی القایی

D جابه جایی الکتریکی

E شدت میدان الکتریکی

G تابع گیبس یک دستگاه چندگن

M مغناطش

P قطبش دی الکتریک

S آنتروپی یک دستگاه چندگن

V حجم یک دستگاه چندگن

نمادهای خاص

d دیفرانسیل ناکامل

\tilde{G} نیروی محرکه‌ی الکتریکی

\mathcal{F} کشش

\mathcal{H} [شدت] میدان مغناطیسی

\mathcal{M} مغناطش کل

نمادهای رومی برای یکاهای

(فشار) اتمسفر [جو] atm

دین dyn

کیلوگرم kg

ثانیه s

آمپر A

آمپر بر متر A/m

کولن C

هرتز Hz

ژول J

کلوین K

نیوتون N

پاسکال Pa

تسلا T

ولت V

وات W

حروف یونانی

γ	بسامد؛ چگالی مولی؛ ضریب استیوکیومتری	ضریب انبساط خطی؛ نمای نقطه‌ی برانی	α
β		ضریب انبساط جمعی؛ نمای نقطه‌ی	
		بحرانی؛ $1/kT$	
Π	فشار اسمری	ضریب گرونیسن	Γ
ρ	چگالی جرمی	کشش سطحی؛ نسبت گرماهای ویژه؛ جمله‌ی الکترونی در ظرفیت گرمایی؛ نمای نقطه‌ی بحرانی	γ
σ	ثابت استفان - بولتزمان	تفاوت متناهی	Δ
τ	دوره‌ی تناوب	نمای نقطه‌ی بحرانی	δ
		انرژی یک ذره؛ گذردهی؛ گسلمینندی؛ درجه‌ی واکنش یا یونش؛ اختلاف دمای کاهیده	ϵ
ϕ	تابع دما؛ زاویه	تابع زتا ریمان	ζ
φ	فاز	بازده گرمایی؛ ضریب ژول	η
ψ	تابع دما	دمای دبی	Θ
Ω	زاویه‌ی فضایی؛ احتمال ترمودینامیکی؛ اهم تندی زاویه‌ای؛ ضریب عملکرد	دمای تجربی؛ زاویه	θ
ω		ضریب تراکم	κ
		طول موج؛ ضریب لاغرانژ	λ
		ضریب ژول - تامسون؛ پتانسیل شیمیابی	μ
		تراوایی خلا	μ_0

گرما و ترمودینامیک

کتاب درسی در سطح متوسط

فهرست مطالب

۵۸.....	۶-۲ رویه‌ها
۵۹.....	۷-۲ پل الکتروشیمیابی
۶۲.....	۸-۲ برهی دی‌الکتریک
۶۳.....	۹-۲ میله‌ی پارامغناطیسی
۶۴.....	۱۰-۲ مختصات متمرکز و گستردگی
۶۵.....	مسئله‌ها
فصل ۳ کار	
۶۹.....	۱-۳ کار
۷۰.....	۲-۳ فرایند ایستادار
۷۲.....	۳-۳ کار در تغییر حجم یک دستگاه هیدروستاتیکی
۷۴.....	۴-۳ نمودار PV
۷۵.....	۵-۳ کار هیدروستاتیکی به مسیر بستگی دارد
۷۷.....	۶-۳ محاسبه‌ی $\int PdV$ برای فرآیندهای ایستاور
۷۹.....	۷-۳ کار لازم برای تغییر طول یک سیم
۸۰.....	۸-۳ کار لازم برای تغییر مساحت یک فیلم سطحی
۸۲.....	۹-۳ کار لازم برای حرکت بار توسط یک پل الکتروشیمیابی
۸۳.....	۱۰-۳ کار لازم برای تغییر قطبش یک جامد دی‌الکتریک
۸۶.....	۱۱-۳ کار لازم برای تغییر مغناطش کل یک جامد پارامغناطیسی
۸۶.....	۱۲-۳ کار تعیین یافته
۸۸.....	۱۳-۳ دستگاه‌های مرکب
مسئله‌ها	

بخش ۱ مفاهیم بنیادی

فصل ۱ دما و قانون صفرم ترمودینامیک

۱۹.....	۱-۱ از دیدگاه ماکروسکوپی
۲۰.....	۲-۱ دیدگاه میکروسکوپی
۲۱.....	۳-۱ مقایسه‌ی دیدگاه‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی
۲۲.....	۴-۱ گستره‌ی ترمودینامیک
۲۳.....	۵-۱ تعادل گرمایی و قانون صفرم
۲۶.....	۶-۱ مفهوم دما
۲۸.....	۷-۱ دماسنجه‌ها و اندازه‌گیری دما
۳۱.....	۸-۱ مقایسه‌ی دماسنجه‌ها
۳۳.....	۹-۱ دماسنجه گازی
۳۴.....	۱۰-۱ دمای گاز کامل
۳۷.....	۱۱-۱ مقیاس دمای سلسیوس
۳۷.....	۱۲-۱ دماسنجه با مقاومت پلاتینی
۳۸.....	۱۳-۱ دماسنجه تابشی
۳۹.....	۱۴-۱ دماسنجه فشار بخار
۴۹.....	۱۵-۱ ترموکوپل
۴۹۰.....	۱۶-۱ مقیاس دمای بین‌المللی سال (ITS-۹۰)
۴۱.....	۱۷-۱ مقیاس‌های دمای رانکین و فارنهایت
۴۳.....	۱۸-۱ مسئله‌ها

فصل ۲ دستگاه‌های ترمودینامیکی ساده

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

۱۷۴.....	۵-۶ ماشین استریلینگ
۹-۶.....	ماشین گرمایی؛ بیان کلوین- پلانک قانون دوم
۱۷۷.....	۷-۶ یخچال؛ بیان کلاسیوس قانون دوم
۸-۶.....	۸-۶ هم ارزی بیان های کلوین- پلانک و کلاسیوس
۱۸۰.....	۹-۶ برگشت پذیری و برگشت ناپذیری
۱۸۲.....	۱۰-۶ برگشت ناپذیری مکانیکی خارجی
۱۸۳.....	۱۱-۶ برگشت ناپذیری داخلی مکانیکی
۱۸۵.....	۱۲-۶ برگشت ناپذیری گرمایی خارجی و داخلی
۱۸۶.....	۱۳-۶ برگشت ناپذیری شیمیایی
۱۸۷.....	۱۴-۶ شرایط لازم برای برگشت پذیری
۱۸۸.....	مسئله ها

فصل ۷ چرخه کارنو و مقیاس ترمودینامیکی دما

۱۹۳.....	۱-۷ چرخه کارنو
۱۹۴.....	۲-۷ نمونه هایی از چرخه کارنو
۱۹۸.....	۳-۷ یخچال کارنو
۱۹۹.....	۴-۷ قضیه کارنو و پیامد آن
۲۰۱.....	۵-۷ مقیاس دمای ترمودینامیکی
۲۰۴.....	۶-۷ صفر مطلق و بازدهی کارنو
۲۰۵.....	۷-۷ تساوی دمای گاز کامل و ترمودینامیکی
۲۰۷.....	مسئله ها

فصل ۸ آنتروپی

۲۱۱.....	۱-۸ بخش برگشت پذیر قانون دوم
۲۱۴.....	۲-۸ آنتروپی
۲۱۷.....	۳-۸ اصل کاراتئودوری
۲۱۹.....	۴-۸ آنتروپی گاز کامل
۲۲۱.....	۵-۸ نمودار TS
۲۲۳.....	۶-۸ آنتروپی و برگشت پذیری
۲۲۴.....	۷-۸ آنتروپی و برگشت ناپذیری
۲۲۹.....	۸-۸ بخش برگشت ناپذیر قانون دوم
۲۳۱.....	۹-۸ گرمای و آنتروپی در فرآیندهای برگشت ناپذیر
۲۳۳.....	۱۰-۸ آنتروپی و حالت های ناتعادلی

فصل ۴ گرمای و قانون اول ترمودینامیک

۹۱.....	۱-۴ کار و گرمای
۹۳.....	۲-۴ کار بی دررو
۹۶.....	۳-۴ تابع انرژی درونی
۹۶.....	۴-۴ فرمول بندی ریاضی قانون اول ترمودینامیک
۹۹.....	۵-۴ مفهوم گرمای
۱۰۰.....	۶-۴ شکل دیفرانسیلی قانون اول ترمودینامیک
۱۰۲.....	۷-۴ ظرفیت گرمایی و اندازه گیری آن
۱۰۶.....	۸-۴ گرمای ویژه آب؛ کالری
۱۰۷.....	۹-۴ معادلات یک دستگاه هیدروستاتیکی
۱۰۸.....	۱۰-۴ شارش ایستاوار گرمای؛ منع گرمای
۱۱۰.....	۱۱-۴ رسانش گرمای
۱۱۱.....	۱۲-۴ رسانندگی گرمایی و اندازه گیری آن
۱۱۲.....	۱۳-۴ همرفت گرمای
۱۱۳.....	۱۴-۴ تابش گرمایی؛ جسم سیاه
۱۱۶.....	۱۵-۴ قانون کیرشهوف، گرمای تابیده
۱۱۹.....	۱۶-۴ قانون استفان-بولتزمان
۱۲۰.....	مسئله ها

فصل ۵ گاز کامل

۱۲۷.....	۱-۵ معادله حالت یک گاز
۱۳۰.....	۲-۵ انرژی داخلی یک گاز واقعی
۱۳۳.....	۳-۵ گاز کامل
۱۳۵.....	۴-۵ تعیین آزمایشگاهی ظرفیت های گرمایی
۱۳۸.....	۵-۵ فرایند ایستاوار بی دررو
۱۴۰.....	۶-۵ روش رونهاردت برای اندازه گیری γ
۱۴۴.....	۷-۵ سرعت یک موج طولی
۱۴۹.....	۸-۵ دیدگاه میکروسکوپی
۱۵۰.....	۹-۵ نظریه جنبشی گازهای کامل
۱۵۷.....	مسئله ها

فصل ۶ قانون دوم ترمودینامیک

۱۶۳.....	۱-۶ تبدیل کار به گرمای و بر عکس
۱۶۵.....	۲-۶ ماشین بنزینی
۱۶۹.....	۳-۶ ماشین دیزل
۱۷۱.....	۴-۶ ماشین بخار

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

بخش ۱ مفاهیم بنیادی

فصل ۱۲ مکانیک آماری

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

فصل ۱۳ ویژگی‌های گرمایی جامدات

۳۷۳	۱-۱۳ مکانیک آماری یک بلور غیرفلزی
۳۷۸	۲-۱۳ طیف بسامد بلورها
۳۸۲	۳-۱۳ ویژگی‌های گرمایی غیرفلزات
۳۸۴	۴-۱۳ ویژگی‌های گرمایی فلزات
۳۹۴	مسئله‌ها

فصل ۱۴ پدیده‌های بحرانی؛ گذارهای فاز مرتبه‌های بالاتر

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

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

فصل ۹ مواد خالص

۲۴۹	۱-۹ نمودار PV برای یک ماده‌ی خالص
۲۵۳	۲-۹ نمودار PT برای یک ماده‌ی خالص؛ نمودار فاز
۲۵۵	۳-۹ سطح PVT
۲۵۹	۴-۹ معادله‌های حالت
۲۶۱	۵-۹ ظرفیت گرمایی مولی در فشار ثابت
۲۶۳	۶-۹ انبساط‌بندیری حجمی؛ ضریب انبساط حجمی
۲۶۶	۷-۹ تراکم‌بندیری
۲۷۰	۸-۹ ظرفیت گرمایی مولی در حجم ثابت
۲۷۲	۹-۹ نمودار TS برای یک ماده‌ی خالص
۲۷۴	مسئله‌ها

فصل ۱۰ روش‌های ریاضی

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

فصل ۱۱ دستگاه‌های باز

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

.....	مسئله‌ها
.....	۴۲۲
فصل ۱۵ تعادل شیمیایی	
۱-۱۵ قانون دالتون	۴۲۵
۲-۱۵ غشاء نیمه‌تراوا	۴۲۶
۳-۱۵ قضیه‌ی گیس	۴۲۷
۴-۱۵ آنتروپی مخلوطی از گازهای کامل بی‌اثر	۴۲۹
۵-۱۵ تابع گیس مخلوطی از گازهای کامل بی‌اثر	۴۳۱
۶-۱۵ تعادل شیمیایی	۴۳۳
۷-۱۵ توصیف ترمودینامیک حالت‌های غیرتعادلی	۴۳۴
۸-۱۵ شرایط لازم برای تعادل شیمیایی	۴۳۶
۹-۱۵ شرط لازم برای پایداری مکانیکی	۴۳۸
۱۰-۱۵ معادلات ترمودینامیکی برای یک فاز	۴۴۰
۱۱-۱۵ پتانسیل‌های شیمیایی	۴۴۳
۱۲-۱۵ درجه‌ی واکنش	۴۴۵
۱۳-۱۵ معادله‌ی تعادل واکنش	۴۴۸
.....	۴۴۹
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
فصل ۱۷ دستگاه‌های چندگان	
۱-۱۷ معادلات ترمودینامیکی برای یک دستگاه چندگان	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
.....	۴۹۷
مسئله‌ها	
.....	۵۰۳
پیوست الف ثابت‌های فیزیکی	
پیوست ب روش ضرایب لاگرانژ	۵۰۴
پیوست پ محاسبه‌ی انگرال	۵۰۶
.....	$\int_0^{\infty} e^{-ax^2} dx$
پیوست ت توابع ذاتی ریمان	۵۰۷
پیوست ث تعاریف و فرمول‌های ترمودینامیکی	۵۰۹
کتاب‌شناسی	۵۱۵
پاسخ به مسئله‌های برگزیده	۵۱۷
.....	۷-۱۶ ظرفیت گرمایی گازهای در حال واکنش، در تعادل
.....	۴۷۲
مسئله‌ها	
.....	۴۷۳