

• زونتاگ

• بورگناک

اصول ترمودینامیک

وفا وایلن

ویرایش هفتم

• دکتر محسن حسن وند

• محمدعلی رضائی



نوپردازان

این اثر، مشمول قانون حمایت مولفان و مصنفان و هنرمندان مصوب ۱۳۴۸ است. هرکس تمام یا قسمتی از این اثر را بدون اجازه ناشر، نشر یا پخش کند، مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.

سرشناسه

: بورگناک، کلاوس.

Borgnakke, Claus

عنوان و نام پدیدآور

: اصول ترمودینامیک ون وایلن / مولفان کلاوس بورگناک، ریچارد ای. زونتگ؛ مترجمان محسن حسن‌وند، محمدعلی رضانی.

مشخصات نشر

: تهران: نوپردازان، ۱۳۹۲.

مشخصات ظاهری

: بیست و چهار، ۹۶۰ ص.: مصور (رنگی)، جدول (رنگی)، نمودار (رنگی)، ۲۹×۲۲ س.م.

شابک

: 978-964-975-221-1

وضعیت فهرست نویسی

: فیبا

: عنوان اصلی: Fundamentals of thermodynamics, 7th. ed, c2009.

یادداشت

: در ویراست‌های قبلی ریچارد ادوین سانتگ سرشناسه بوده است.

عنوان دیگر

: اصول ترمودینامیک.

موضوع

: ترمودینامیک

شناسه افزوده

: سانتگ، ریچارد ادوین

شناسه افزوده

: Sonntag, Richard Edwin

شناسه افزوده

: حسن‌وند، محسن، ۱۳۴۴-، مترجم

رده‌بندی کنگره

: ۱۳۹۲ الف ۶۲/۲۶۵ TJ

رده‌بندی دیویی

: ۶۲۱/۴۰۲۱

شماره کتابشناسی ملی

: ۳۴۸۷۴۰۲



نوپردازان

اصول ترمودینامیک ون وایلن

تالیف

کلاوس بورگناک، ریچارد ای. زونتگ

ترجمه

دکتر محسن حسن‌وند، محمدعلی رضانی

ناشر

نوپردازان

قطع

رحلی

ویرایش

هفتم

نوبت چاپ

اول

تاریخ

بهار ۱۳۹۴

تیراژ

۲۰۰۰

صفحات

۹۸۴

شابک

۹۷۸-۹۶۴-۹۷۵-۲۲۱-۱

لیتوگرافی

نورنگ ۷۷۵۲۹۳۶۳-۷۷۵۳۱۰۲۷

چاپ و صحافی

طرفه ۵۵۲۶۹۲۸۷-۸

۴۸۰۰۰ تومان

کتابیران: تهران، میدان انقلاب، ابتدای خیابان آزادی، خیابان دکتر قریب، بعد از فرصت شیرازی.

پلاک ۷، تلفن: ۱۸-۶۶۵۶۶۵۰۹

نوپردازان: تهران، خیابان لبافی‌نژاد، بین اردیبهشت و فروردین، پلاک ۲۳۸

تلفن: ۶۶۴۱۴۴۷۳-۶۶۴۱۴۵۱۵-۶۶۴۱۱۱۷۳-۶۶۴۹۴۴۰۹

WWW.Ketabiran.ir

فروش اینترنتی

پیشگفتار

در نگارش هفتم این کتاب، ضمن نگه داشتن اهداف اصلی در نگارش های قبلی موارد زیر را اضافه نموده ایم:

- ارائه یک بررسی دقیق، جامع و فراگیر از ترمودینامیک کلاسیک، در عین حفظ دیدگاه مهندسی
- فراهم کردن پیش زمینه های مناسب برای مطالعات بعدی در موضوعاتی نظیر مکانیک سیالات، انتقال گرما و ترمودینامیک آماری و همچنین،
- آماده کردن دانشجویان برای استفاده مؤثر از دانش ترمودینامیک در حرفه مهندسی.

سمت و سوی ارائه مطالب این کتاب بیشتر متوجه دانشجویان است. در جای جای کتاب، برحسب لزوم، مفاهیم و تعاریف جدیدی آورده شده است. نخست، در فصل ۲، خواصی که به راحتی قابل اندازه گیری هستند مانند فشار، حجم مخصوص و دما تعریف شده اند. در فصل ۳، جداول خواص ترمودینامیکی فقط برای این خواص قابل اندازه گیری ارائه شده اند. در فصل روابط ترمودینامیکی، انرژی داخلی و انتالپی در ارتباط با قانون اول، انتروپی در رابطه با قانون دوم و توابع هلمهولتز و گیبس معرفی شده اند. برای کمک به دانشجویان در درک مفاهیم ترمودینامیک، مثال های واقعی زیادی در کتاب گنجانده شده است و مسایل انتهایی هر فصل، طوری با دقت مرتب و گروه بندی شده اند که همه مفاهیم و موضوعات ارائه شده در فصل را تحت پوشش قرار می دهند. خصوصاً در فصل های آغازین، در این نگارش تعداد مثال ها، شکل ها و مسایل نسبت به نگارش های قبلی بیشتر است و در سرتاسر کتاب، خلاصه های انتهایی هر فصل حاوی مجموعه ای از مفاهیم و نکات کلیدی و مفید برای دانشجویان است.

ویژگی های جدید در این نگارش

سؤالات مفهومی درون متن

در این نگارش، بعد از بخش های اصلی هر موضوع در هر فصل، تعدادی سؤال مفهومی قرار داده ایم تا دانشجو بتواند بر روی موضوعی که به تازگی فراگرفته است تفکر و تعمق نماید. این سؤالات نوعی خودآزمایی سریع برای دانشجویان است و اساتید نیز می توانند از آنها به عنوان خلاصه موضوع و یا جمع بندی مطالب، در هر مورد، استفاده نمایند. اکثر این سؤالات، نتایج مستقیم برگرفته شده از متن موضوع هستند و نیازی به حفظ کردن ندارند. اما تعدادی از آنها به تفکر بیشتری نیاز دارند. برای هریک از این سؤالات، در حل المسایل کتاب جوابی کوتاه ارائه کرده ایم. علاوه بر اینها، سؤالات مفهومی دیگری را نیز در انتهایی هر فصل تحت عنوان مسایل تکلیفی اضافه کرده ایم.

کاربردهای مهندسی در انتهای هر فصل

در انتهای هر فصل، بخش کوتاهی را تحت عنوان کاربردهای مهندسی اضافه نموده‌ایم. در این بخش‌ها، مطالبی جالب همراه با مثال‌هایی از کاربردهای عملی و مهندسی موضوعات مطروحه در هر فصل ارائه شده است. عمده این بخش‌ها، حاوی مباحث تئوری یا معادلات نیستند و صرفاً از طریق عکس و یا تصاویر به توضیح تعدادی از سیستم‌های فیزیکی واقعی، که موضوعات فصل مربوطه در طراحی و تحلیل مهندسی آنها کاربرد دارد، می‌پردازند. این بخش‌ها را عمدتاً کوتاه نگه داشته‌ایم و سعی نکرده‌ایم که برای هر دستگاه همه جزئیات آن را بیان کنیم تا به این ترتیب، خواننده ایده‌ای از کاربرد مطالب در زمانی نسبتاً کوتاه به دست آورد. در برخی از فصول انتهایی، که موضوع کل فصل در آنها کاربردی و مهندسی است، این بخش‌ها شامل مقداری مباحث تئوری و فرمول‌اند و بنابراین کمی پیچیده‌ترند. اگرچه این بخش‌ها را در انتهای هر فصل قرار داده‌ایم تا جریان اصلی ارائه مطالب را مختل نکنند، ولی به مدرسان مؤکداً پیشنهاد می‌کنیم که مقداری از مطالب مندرج در آنها را پیشاپیش، قبل از آغاز هر فصل، مطرح نمایند تا دانشجویان مطالب آن فصل را با اشتیاق بیشتری مطالعه نمایند.

تفکیک فصل چرخه‌های قدرت و سردسازی به دو فصل

فصل ۱۱ در نگارش قبلی که موضوع آن چرخه‌های مولد توان و سردسازی بود به دو فصل، یکی برای چرخه‌هایی که در آنها ماده عامل دچار تغییر فاز می‌شود و دیگری برای چرخه‌های گازی، بدون تغییر فاز، تفکیک شده است. در ضمن، با حفظ توازن، به هریک از این فصل‌ها مقداری مطلب جدید اضافه نموده‌ایم. بخشی را در مورد آرایش‌های چرخه‌های سردسازی اضافه کرده‌ایم و دو ماده جدید را، R-410a و دی‌اکسید کربن، به عنوان سردسازهای جایگزین در جداول پیوست ب گنجانده‌ایم. این موضوع، مطالعه و تحلیل جنبه‌های مرتبط با طراحی سیستم‌های جدید را با روشی نوین ممکن می‌سازد. مبحث چرخه‌های گازی را با افزودن چرخه‌های اتکینسون و میلر گسترش داده‌ایم. این چرخه‌ها برای نشان دادن تنوع موجود در چرخه‌های مورد استفاده در موتورهای هیبریدی جدید در خودروها اهمیت دارند و به ما کمک می‌کنند که مطالب مرتبط با جدیدترین فن‌آوری‌های روز را ارائه نماییم.

فصل جریان‌های تراکم‌پذیر

در این نگارش، فصل مربوط به جریان‌های تراکم‌پذیر را که آخرین بار در نگارش پنجم وجود داشت دوباره اضافه کرده‌ایم. جهت هماهنگی با سایر فصول، سؤالات مفهومی درون متن، مسایل راهنما برای مطالعه و مسایل تکلیفی را نیز به این فصل افزوده‌ایم.

ویژگی‌هایی از نگارش ششم که در این نگارش نیز رعایت شده‌اند

خلاصه‌های انتهای هر فصل

این خلاصه‌ها مروری اجمالی هستند بر مفاهیم اصلی که در طول فصل به آنها پرداخته شده است. در این بخش‌ها، لغات و مفاهیم کلیدی در هر فصل به صورت برجسته و مشخص آورده شده‌اند و مورد تأکید قرار گرفته‌اند. همچنین، در این بخش‌ها فهرستی از مجموعه توانایی‌ها و مهارت‌هایی که دانشجو پس از مطالعه هر فصل باید فراگرفته باشد ارائه شده است. در هنگام حل سؤالات مفهومی و نیز مسایل اصلی هر فصل، دانشجو می‌تواند این توانایی‌ها را مورد ارزیابی و آزمون قرار دهد.

مفاهیم و فرمول‌های اصلی

در انتهای هر فصل مفاهیم و فرمول‌های اصلی آن فصل برای رجوع آورده شده است. مجموعه کامل این مفاهیم و فرمول‌ها برای همه فصول کتاب در پایگاه وب انتشارات وایلی در دسترس است.

مسائل مفهومی و راهنمای مطالعه

با هدف یک بررسی سریع از موضوعات و مواد درسی ارائه شده، یک سری مسائل مفهومی در انتهای هر فصل گنجانده شده است. این مسائل مختصر و مفید و هریک از آنها بر یک مفهوم خیلی خاص متمرکز است. دانشجو می‌تواند با پاسخ به این پرسش‌ها، سطح درک و فهم خود از موضوعات مطروحه را ارزیابی و قسمت‌هایی را که نیاز به مطالعه بیشتری دارند مشخص نماید. همچنین، از این مسائل که پاسخ آنها در کتاب راهنمای حل المسایل نیز آورده شده است می‌توان در لابلای مسائل تکلیفی به نحو مناسبی استفاده کرد.

مسائل تکلیفی

در این نگارش تعداد مسائل تکلیفی بسیار افزایش یافته و حدوداً به ۲۸۰۰ عدد رسیده است. مسائل مقدماتی زیادی نیز در مورد تمام موضوعات ارائه شده در هر فصل اضافه شده است. علاوه بر این، مسائل را طبق ترتیب موضوعات هر فصل تقسیم‌بندی کرده‌ایم تا انتخاب مسائل براساس یک موضوع خاص راحت‌تر باشد. یک سری مسائل جامع نیز در انتهای مسائل، تحت عنوان مرور مسائل آورده شده است.

جداول

جداول مواد توسعه داده شده‌اند و دو ماده دیگر، یکی سردساز **R-410a** که جایگزین **R-22** است، و دیگری دی‌اکسید کربن که یک سردساز طبیعی است اضافه شده‌اند. چند ماده جدید دیگر به نرم‌افزار همراه کتاب اضافه شده است. جداول گاز ایده‌ال علاوه بر مبنای جرمی، برحسب مبنای مولی نیز ارائه شده‌اند تا بتوان در فصول مربوط به احتراق و تعادل شیمیایی از خواص مواد بر مبنای مولی به راحتی استفاده کرد.

بازنگری‌ها

از برخی رهیافت‌ها و نتایج ارائه شده در یکی دیگر از کتاب‌هایمان، تحت عنوان «مقدمه‌ای بر ترمودینامیک مهندسی»، ریچارد ای. زونتاک و کلاوس بورگنک، چاپ مؤسسه انتشارات جان وایلی و پسران (۲۰۰۱)، نیز بهره برده‌ایم.

در فصل ۳، پس از معرفی جداول ترمودینامیکی، رفتار بخار فوق گرم به صورت تنازلی در چگالی‌های پایین و پایین‌تر، که نهایتاً منجر به تعریف مدل گاز ایده‌ال می‌شود، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، برای ایجاد تمایز بین موضوعاتی نظیر ضریب تراکم‌پذیری و معادلات حالت و جداول رایانه‌ای، هریک از آنها را در بخشی مجزا ارائه کرده‌ایم.

در فصل ۵، با آزمون مقادیر مندرج در جداول بخار در دماها و فشارهای مختلف، درمی‌یابیم که انرژی گاز ایده‌ال تنها به دما وابسته است.

در فصل ۷، مفهوم قانون دوم ترمودینامیک با بیان بهتری از مفاهیم دمای ترمودینامیکی و دمای گاز ایده‌ال، به‌صورتی اساسی‌تر و مؤثرتر ارائه شده است. بحث مربوط به لزوم اختلاف دما در انتقال گرما، و اثر آن را بر روی پمپ‌ها و موتورهای گرمایی گسترش داده‌ایم و نهایتاً فهرست کوتاهی را از رخ داده‌های تاریخی مرتبط به تکامل علم ترمودینامیک اضافه نموده‌ایم.

در فصل ۸، مبحث انتروپی را با نحوه و ترتیب جدیدتری ارائه نموده‌ایم. انتروپی جامدات/مایعات و گازهای ایده‌ال در بخش‌های جداگانه مطرح شده‌اند و به دنبال آن، فرایندهای پلی‌تروپیک قبل از بررسی فرایندهای برگشت‌ناپذیر آورده شده است. در این قسمت، قبل از پرداختن به فرایندهای واقعی، انتروپی و ارزیابی آن در فازهای متفاوت و تغییرات آن در فرایندهای برگشت‌پذیر به‌طور کامل بیان می‌شود. نحوه تولید انتروپی در فرایندهای واقعی به‌صورت قوی‌تری توضیح داده شده است. مکان‌های بروز برگشت‌ناپذیری، و ارتباط آنها با حجم کنترل انتخاب شده، مورد بررسی دقیق قرار می‌گیرد. همچنین، ارتباط بین انتروپی و مفهوم بی‌نظمی و پراکندگی را در سطح مولکولی در قالب یک مثال ارائه کرده‌ایم تا به انتروپی که یک مفهوم انتزاعی است معنایی فیزیکی و واقعی داده شود.

در فصل ۹، با ارائه کار محوری برای فرایندهای واقعی تک‌جریانی و حالت پایا، آنالیز حجم کنترل عمومی گسترش می‌یابد و به شکل ساده‌شده معادلهٔ برنولی منجر می‌شود. در اینجا نیز مجدداً مفهوم تولید انتروپی و مکان رخ دادن آن را مورد تأکید قرار می‌دهیم. بخش کوچکی را اضافه کرده‌ایم که در آن، اساس آنچه را که یک دانشجو برای تحلیل یک حجم کنترل واقعاً باید فراگیرد، به‌صورتی جامع و گام به گام ارائه شده است. بازنگری کار برگشت‌پذیر و اکزرژی در فصل ۱۰، تعداد معادلات را کاهش داده و بر ایده اصلی فصل، مفاهیم کار برگشت‌پذیر و برگشت‌ناپذیری، تمرکز یافته است. در این فصل تأکید می‌شود که هر وضعیت خاص، شکل ساده‌شده‌ای از تحلیلی عمومی است و سپس نشان داده می‌شود که مفهوم اکزرژی از کار برگشت‌پذیر برگرفته شده است. این باعث می‌شود که معادلهٔ نهایی توازن اکزرژی کمتر انتزاعی به نظر برسد. استفاده از این معادله در کاربردهای مهندسی توضیح داده شده است.

در نگارش جدید، تک فصل ۱۱، مربوط به چرخه‌ها در نگارش قبل، به دو فصل ۱۱ و ۱۲ تفکیک شده است. فصل ۱۳، مربوط به مخلوط‌ها و هوای مرطوب، حفظ شده است ولی به عنوان مثال، در بخش کاربردهای مهندسی، تعدادی سیستم عملی و تجهیزات تهویه مطبوع به آن اضافه شده است.

فصل مربوط به روابط بین خواص به روز شده، و نحوهٔ تولید جداول ترمودینامیکی مدرن با کمک این روابط ارائه شده است. در این فصل، روند تطبیق یک تابع هلمهولتز بدون بُعد با داده‌های تجربی معرفی، و اصول و چگونگی محاسبه جداول متعارف و موجود توضیح داده شده است.

با توضیح ستون تقطیر و بیان پیشرفت‌های جاری در مورد سوخت‌ها، مبحث احتراق تقویت شده است. تعداد مثال‌های مربوط به قانون دوم و احتراق را کاهش داده‌ایم ولی در عوض اثرات اصلی آنها را بیان نموده‌ایم. از طرف دیگر، مدلی از پیل سوختی را اضافه کرده‌ایم تا موضوع جذاب‌تر شود. در این ارتباط، نحوهٔ محاسبهٔ کارکرد پیل‌های سوختی واقعی را تا حدودی بیان کرده‌ایم. برخی از جنبه‌های عملی احتراق را به بخش مربوط به کاربردهای مهندسی انتقال داده‌ایم.

موضوع تعادل‌های شیمیایی را با ارائه یک بخش تحت عنوان فرایند تولید گاز از ذغال سنگ، که بر تعدادی فرایند تعادلی استوار است برجسته‌تر کرده‌ایم. همچنین، مدلی از تشکیل NO_x را در بخش کاربردهای مهندسی اضافه کرده‌ایم تا نشان دهیم که تشکیل این گاز چگونه به تعادل شیمیایی وابسته است و چرا

بررسی آن به مطالعات پیشرفته بیشتری بر روی سرعت واکنش‌ها منجر می‌شود.

نرم‌افزار همراه کتاب^۱

در این نگارش، به نرم‌افزار CATT3 علاوه بر موارد موجود در جداول پیوست ب، تعدادی مواد دیگر اضافه شده است. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان خواص ترمودینامیکی مواد زیر را به دست آورد.

آب

سردسازها: R-11, 12, 13, 14, 21, 22, 23, 113, 114, 123, 134a, 152a, 404a, 407c,

410a, 500, 502, 507a و C 318

کرایونیک‌ها: آمونیاک، آرگن، اتان، اتیلن، ایزوبوتان، متان، نئون، نیتروژن، اکسیژن و پروپان

گازهای ایده‌ال: هوا، CO_2 ، CO ، N_2 ، N ، NO ، NO_2 ، H ، H_2 ، H_2O ، O ، O_2 و OH

خواص برخی از این مواد در کتابچه ترمودینامیک و خواص انتقالی، کلاوس بورگنک و ریچارد ای. زونتاک، جان وایلی و پسران ۱۹۹۷ موجود است. علاوه بر خواص مواد مذکور، این نرم‌افزار قادر است که نمودارهای رطوبت‌سنجی، تراکم‌پذیری و نمودارهای تعمیم‌یافته را با استفاده از معادله حالت لی-کسلر، البته با دقتی بیشتر به خاطر لحاظ کردن فاکتور خارج از مرکز، محاسبه کند. این نرم‌افزار، همچنین می‌تواند تعداد محدودی از فرایندها را روی نمودارهای $T-s$ و $\log P - \log v$ رسم کند و نمودارهای واقعی این فرایندها را به جای نمودارهای بدون مقیاس و صرفاً کیفی درون مقن، ارائه دهد.

انعطاف‌پذیری موضوعات و مباحث کتاب

تلاش کرده‌ایم که موضوعات بنیادی و اساسی ترمودینامیک کلاسیک را به‌طور بسیار جامع و فراگیر تحت پوشش قرار دهیم و معتقدیم که این کتاب، مقدمات کافی و مناسبی را جهت کاربرد ترمودینامیک در زمینه‌های تخصصی گوناگون و نیز زمینه‌های پیشرفته‌تر ترمودینامیک، نظیر موضوعات مربوط به مواد، پدیده‌های سطحی، پلاسما و کرایونیک، فراهم می‌آورد. می‌دانیم که برخی از دانشکده‌ها تنها یک دوره مقدماتی ترمودینامیک را در تمام رشته‌ها ارائه می‌دهند، بنابراین سعی کرده‌ایم آن دسته از موضوعاتی را که رشته‌های مختلف خواهان آموختن آن در چنین دوره‌ای هستند نیز تحت پوشش قرار دهیم. به هر حال، از آنجایی که دوره‌های خاص از نظر پیش نیازها، اهداف ویژه، طول مدت دوره و پیش زمینه دانشجویان به‌طور قابل توجهی باهم تفاوت دارند مواد این درس را، به‌ویژه در فصول انتهایی، طوری مرتب کرده‌ایم که انعطاف‌پذیری بسیار زیادی برای استفاده در سطوح مختلف و دوره‌های خاص داشته باشند.

واحدها

در تهیه این نگارش، فلسفه ما در مورد واحدها این بوده است که بتوان آن را تماماً براساس سیستم آحاد SI^۲ آموزش داد. بنابراین، تمام مثال‌های داخل کتاب و نیز مجموعه مسایل و جداول ترمودینامیکی برحسب

^۱ این نرم‌افزار همراه این کتاب نیست و برای تهیه آن باید به ناشر نسخه انگلیسی مراجعه کنید. م.

2. Le Système International d'Unités

واحد‌های SI هستند. ولی به‌خاطر نیاز مداومی که فارغ‌التحصیلان مهندسی به آشنایی با واحد‌های مهندسی انگلیسی دارند، در فصل ۲ مقدمه‌ای بر این سیستم آحاد ارائه شده است. همچنین تعدادی کافی از مثال‌ها، مسئله‌ها و جداول را، علاوه برحسب واحد‌های SI، براساس سیستم واحد انگلیسی نیز تکرار کرده‌ایم که فرصت خوبی را برای تمرین کسانی که ممکن است با این واحد‌ها سروکار داشته باشند، فراهم می‌کند. برای کار با واحد‌های انگلیسی، موضوع تبدیل پوند جرم به پوند نیرو تنها با یک تبدیل واحد، بدون نیاز به استفاده از یک ثابت تبدیل صریح، بیان و ساده شده است. در سرتاسر کتاب، نمادها، واحد‌ها و قرارداد علامت‌ها مطابق نگارش‌های قبلی است.

مکمل‌ها و پشتیبانی‌ها بیشتر

پشتیبانی‌های دیگری از قبیل مثال‌های حل شده، و مروری بر مواد درسی ارائه شده در متن، از طریق پایگاه وب www.wiley.com/college/borgnakke قابل دسترس است. دانشجویان می‌توانند از این طریق توانایی و مهارت‌های مربوط به موضوعات مختلفی را که معمولاً در اولین دوره‌های آموزش ترمودینامیک قرار می‌گیرد به صورت خودآموز کسب نمایند.

سعی کرده‌ایم مواد درسی را طوری در این کتاب بگنجانیم که برای تدریس در دو ترم دانشگاهی مناسب، و انتخاب موضوعات از انعطاف‌پذیری کافی برخوردار باشد. مدرسان می‌توانند از طریق پایگاه www.wiley.com/college/sonntag به اطلاعات و پیشنهادهایی در مورد ساختار و برنامه دوره‌های درسی، و نیز سؤالات اضافی برای مطالعه بیشتر، و غلط‌نامه کتاب دسترسی داشته باشند.

تشکر و قدردانی

از توصیه‌ها، مشورت‌ها و تشویق‌های بسیاری از همکاران در دانشگاه میشیگان و نیز دانشگاه‌های دیگر تشکر و قدردانی می‌کنیم. همانند نگارش‌های قبلی، این کمک‌ها و راهنمایی‌ها در این نگارش نیز بسیار مفید بوده است. دانشجویان دوره‌های کارشناسی و کارشناسی ارشد با طرح سؤالات مفهومی، که اغلب منجر به بازنویسی و بازنگری قسمت‌هایی از متن یا انتخاب راه بهتری برای ارائه موضوعات با هدف اجتناب از بروز چنان ابهامات و سؤالاتی می‌شد، کمک بسیار شایانی به ما کردند. در نهایت برای هر یک از ما، تشویق‌ها و شکیبایی همسران و خانواده‌هایمان غیرقابل انکار، و شایان تقدیر است. این حمایت‌ها سبب شد تا دوره زمانی نوشتن کتاب علیرغم وجود تمام فشارها، بسیار مطبوع و دلپذیر گردد. همچنین از تعدادی از همکاران که در سایر مؤسسات و دانشگاه‌ها این کتاب را مرور کردند تشکر ویژه به عمل می‌آوریم. برخی از این افراد عبارتند از:

روح الامین، دانشگاه ایالتی مونتانا

ادوارد ای. اندرسون، دانشگاه فنی تکزاس

سونگ وون چو، دانشگاه پیتزبرگ

سارا کاد، دانشگاه ایالتی مونتانا

رام دی‌وایدی، دانشگاه ایالتی لویی زيانا

فوکيون ایگولفو پولوس، دانشگاه کالیفرنیا جنوبی

هری هردی، دانشگاه ایالتی نیومکزیکو
بوریس خوسید، انستیتو فنی نیوجرسی
جوزف اف. کامک، دانشگاه پردو
روی دبل‌یو. نایت، دانشگاه اُبرن
دانیلا مین‌اردی، دانشگاه فنی لویی‌زیانا
هری جی. سوئر، جی‌ار. دانشگاه میسوری-رولا
جی‌ای. سخار، دانشگاه سین سیناتی
رضا توسی، دانشگاه ایالتی کالیفرنیا، لنگ بیچ
ایتم یو. یوبونگ، دانشگاه کترینگ
والتر یوان، دانشگاه کالیفرنیا در سانتا باربارا

ما همچنین از ویراستار جدیدمان، مایک مک‌دونالد به‌خاطر زحمات، کمک‌ها و تشویق‌هایش در طول مدت تهیه این نگارش تشکر می‌کنیم.
امیدواریم که این کتاب در آموزش مؤثر ترمودینامیک، به‌ویژه برای آن دسته از دانشجویان که در دوره زندگی حرفه‌ای خود با فرصت‌ها و چالش‌های بسیاری روبه‌رو هستند، سودمند باشد. از پیشنهادات، نقطه نظرات و انتقادات شما استقبال می‌شود. شما می‌توانید از طریق نشانی الکترونیکی claus@umich.edu، کلاوس بورگنک، با ما در تماس باشید.

کلاوس بورگنک
ریچارد ایی. زونتگ
آن آرپور، میشیگان
می ۲۰۰۸

فهرست مطالب

۱	آشنایی با ترمودینامیک و کاربرد آن در چند فرآیند متداول صنعتی	۱
	۱-۱ نیروگاه ساده بخار، ۱	
	۲-۱ پیل های سوختی، ۴	
	۳-۱ چرخه سردسازی تراکم بخار، ۶	
	۴-۱ یخچال ترموالکتریک، ۶	
	۵-۱ تأسیسات جداسازی هوا، ۸	
	۶-۱ توربین گازی، ۱۰	
	۷-۱ موتور راکت با سوخت شیمیایی، ۱۱	
	۸-۱ سایر کاربردها و مسائل زیست محیطی، ۱۲	
۱۵	مفاهیم و تعاریف	۲
	۱-۲ سیستم و حجم کنترل ترمودینامیکی، ۱۵	
	۲-۲ مقایسه دیدگاه های ماکروسکوپی و میکروسکوپی، ۱۶	
	۳-۲ خواص و حالت ماده، ۱۷	
	۴-۲ فرایندها و چرخه ها، ۱۸	
	۵-۲ یکاهای جرم، طول، زمان، و نیرو، ۱۹	
	۶-۲ انرژی، ۲۲	
	۷-۲ حجم مخصوص و چگالی، ۲۵	
	۸-۲ فشار، ۲۷	
	۹-۲ همدمایی، ۳۳	
	۱۰-۲ قانون صفرم ترمودینامیک، ۳۴	
	۱۱-۲ مقیاس های دما، ۳۴	
	۱۲-۲ کاربردهای مهندسی، ۳۶	
	خلاصه، ۴۰	
	مسائل، ۴۱	
۵۱	خواص ماده خالص	۳
	۱-۳ ماده خالص، ۵۲	
	۲-۳ تعادل فازی بخار-مایع-جامد در ماده خالص، ۵۲	

۳-۳	خواص مستقل ماده خالص، ۵۹
۴-۳	جدول‌های خواص ترمودینامیکی، ۵۹
۵-۳	سطوح ترمودینامیکی، ۶۷
۶-۳	رفتار $P-v-T$ در گازهایی با چگالی کم و متوسط، ۶۹
۷-۳	ضریب تراکم‌پذیری، ۷۲
۸-۳	معادلات حالت، ۷۶
۹-۳	جدول‌های رایانه‌ای، ۷۷
۱۰-۳	کاربردهای مهندسی، ۷۹
	خلاصه، ۸۱
	مسائل، ۸۲

۹۵

۴ کار و گرما

۱-۴	تعریف کار، ۹۵
۲-۴	یکاهای کار، ۹۷
۳-۴	کار انجام شده در مرز متحرک یک سیستم تراکم‌پذیر ساده، ۹۸
۴-۴	کار در سیستم‌های دیگر، ۱۰۷
۵-۴	چند نکته مهم درباره کار، ۱۰۹
۶-۴	تعریف گرما، ۱۱۱
۷-۴	شکل‌های انتقال گرما، ۱۱۲
۸-۴	مقایسه گرما و کار، ۱۱۴
۹-۴	کاربردهای مهندسی، ۱۱۶
	خلاصه، ۱۱۸
	مسائل، ۱۲۰

۱۳۵

۵ قانون اول ترمودینامیک

۱-۵	قانون اول ترمودینامیک در مورد جرم کنترلی که یک چرخه را طی می‌کند، ۱۳۵
۲-۵	قانون اول ترمودینامیک برای تغییر حالت یک جرم کنترلی، ۱۳۶
۳-۵	انرژی درونی - یک خاصیت ترمودینامیکی، ۱۴۳
۴-۵	تجزیه و تحلیل روشمند مسائل، ۱۴۵
۵-۵	انتالپی، یک خاصیت ترمودینامیکی، ۱۴۹
۶-۵	گرمای ویژه در فشار ثابت و گرمای ویژه در حجم ثابت، ۱۵۴
۷-۵	انرژی درونی، انتالپی و گرمای ویژه گازهای ایده‌ال، ۱۵۵
۸-۵	قانون اول به صورت یک معادله آهنگ، ۱۶۱
۹-۵	پایستگی جرم، ۱۶۳
۱۰-۵	کاربردهای مهندسی، ۱۶۴

خلاصه، ۱۶۸

مسائل، ۱۷۰

۱۹۱

۶ تحلیل قانون اول برای یک حجم کنترل

- ۱-۶ حجم کنترل و پایداری جرم، ۱۹۱
- ۲-۶ قانون اول ترمودینامیک برای یک حجم کنترل، ۱۹۴
- ۳-۶ فرایندهای حالت پایا، ۱۹۷
- ۴-۶ مثالهایی از فرایندهای حالت پایا، ۱۹۹
- ۵-۶ فرایند حالت گذرا، ۲۱۳
- ۶-۶ کاربردهای مهندسی، ۲۲۳
- خلاصه، ۲۲۸
- مسائل، ۲۳۰

۲۵۳

۷ قانون دوم ترمودینامیک

- ۱-۷ موتورهای گرمایی و یخچالها، ۲۵۳
- ۲-۷ قانون دوم ترمودینامیک، ۲۵۹
- ۳-۷ فرایند برگشت پذیر، ۲۶۲
- ۴-۷ عوامل برگشت ناپذیری فرایندها، ۲۶۳
- ۵-۷ چرخه کارنو، ۲۶۷
- ۶-۷ دو قضیه مهم درباره بازده چرخه کارنو، ۲۶۹
- ۷-۷ مقیاس دمای ترمودینامیکی، ۲۷۰
- ۸-۷ مقیاس دمای گاز ایده‌ال، ۲۷۱
- ۹-۷ مقایسه دستگاه‌های واقعی و ایده‌ال، ۲۷۵
- ۱۰-۷ کاربردهای مهندسی، ۲۷۸
- خلاصه، ۲۸۲
- مسائل، ۲۸۴

۲۹۹

۸ انتروپی

- ۱-۸ نامساوی کلازیوس، ۲۹۹
- ۲-۸ انتروپی-خاصیتی از یک سیستم، ۳۰۴
- ۳-۸ انتروپی ماده خالص، ۳۰۵
- ۴-۸ تغییر انتروپی در فرایندهای برگشت پذیر، ۳۰۷
- ۵-۸ روابط بین خواص ترمودینامیکی، ۳۱۲
- ۶-۸ تغییر انتروپی در جامدات و مایعات، ۳۱۳
- ۷-۸ تغییر انتروپی در گازهای ایده‌ال، ۳۱۴
- ۸-۸ فرایند برگشت پذیر پلی تروپیک در یک گاز ایده‌ال، ۳۱۸

- ۸-۹ تغییر انتروپی جرم کنترل طی یک فرآیند برگشت ناپذیر، ۳۲۲
 ۸-۱۰ تولید انتروپی، ۳۲۳
 ۸-۱۱ اصل افزایش انتروپی، ۳۲۶
 ۸-۱۲ انتروپی به صورت معادله آهنگ، ۳۳۰
 ۸-۱۳ چند نکته کلی درباره انتروپی و رابطه آن با بی نظمی و پراکندگی، ۳۳۲
 خلاصه، ۳۳۵
 مسائل، ۳۳۷

۳۵۹

۹ تحلیل قانون دوم برای حجم کنترل

- ۹-۱ قانون دوم ترمودینامیک برای حجم کنترل، ۳۵۹
 ۹-۲ فرآیند حالت پایا و فرآیند گذرا، ۳۶۰
 ۹-۳ فرآیندهای تک جریانی حالت پایا، ۳۶۹
 ۹-۴ اصل افزایش انتروپی، ۳۷۴
 ۹-۵ کاربردهای مهندسی؛ بازده، ۳۷۷
 ۹-۶ خلاصه تحلیل عمومی مسائل ترمودینامیکی از طریق حجم کنترل، ۳۸۳
 خلاصه، ۳۸۴
 مسائل، ۳۸۶

۴۰۹

۱۰ برگشت ناپذیری و انرژی دسترس پذیر

- ۱۰-۱ انرژی دسترس پذیر، کار برگشت پذیر و برگشت ناپذیری، ۴۰۹
 ۱۰-۲ انرژی دسترس پذیر و بازده قانون دوم، ۴۲۲
 ۱۰-۳ معادله توازن اکزرژی، ۴۳۱
 ۱۰-۴ کاربردهای مهندسی، ۴۳۵
 خلاصه، ۴۳۷
 مسائل، ۴۳۹

۴۵۳

۱۱ سیستم های مولد توان و سردسازی — با تغییر فاز شاره عامل

- ۱۱-۱ مقدمه ای بر سیستم های مولد توان، ۴۵۴
 ۱۱-۲ چرخه رانکین، ۴۵۶
 ۱۱-۳ اثر فشار و دما بر چرخه رانکین، ۴۵۹
 ۱۱-۴ چرخه با گرمایش مجدد، ۴۶۵
 ۱۱-۵ چرخه بازیاب، ۴۶۷
 ۱۱-۶ انحراف چرخه های واقعی از چرخه های ایده آل، ۴۷۴
 ۱۱-۷ تولید همزمان، ۴۸۰
 ۱۱-۸ مقدمه ای بر سیستم های سردسازی، ۴۸۱
 ۱۱-۹ چرخه سردسازی تراکم بخار، ۴۸۱

- ۱۰-۱۱ شماره‌های مورد استفاده در سیستم‌های سردسازی تراکم-بخار، ۴۸۴
 ۱۱-۱۱ انحراف چرخه سردسازی تراکم بخار واقعی از چرخه ایده‌ال، ۴۸۶
 ۱۲-۱۱ آرایش‌های چرخه سردسازی، ۴۸۸
 ۱۳-۱۱ چرخه سردسازی جذبی آمونیاک، ۴۹۰
 خلاصه، ۴۹۱
 مسائل، ۴۹۲

۵۱۳

۱۲ سیستم‌های مولد توان و سردسازی — بدون تغییر فاز شاره‌عامل

- ۱-۱۲ چرخه‌های مولد توان استاندارد هوا، ۵۱۳
 ۲-۱۲ چرخه برایتون، ۵۱۴
 ۳-۱۲ چرخه ساده توربین گاز با بازیاب، ۵۲۱
 ۴-۱۲ آرایش‌های چرخه مولد توان توربین گازی، ۵۲۳
 ۵-۱۲ چرخه استاندارد هوا برای پیش‌رانش جت، ۵۲۶
 ۶-۱۲ چرخه سردسازی استاندارد هوا، ۵۲۸
 ۷-۱۲ چرخه مولد توان موتورهای رفت و برگشتی، ۵۳۲
 ۸-۱۲ چرخه اُو، ۵۳۴
 ۹-۱۲ چرخه دیزل، ۵۳۸
 ۱۰-۱۲ چرخه استرلینگ، ۵۴۱
 ۱۱-۱۲ چرخه‌های اتکینسون و میلر، ۵۴۱
 ۱۲-۱۲ چرخه‌های ترکیبی در سیستم‌های مولد توان و سردسازی، ۵۴۳
 خلاصه، ۵۴۶
 مسائل، ۵۴۸

۵۶۳

۱۳ مخلوط‌های گازی

- ۱-۱۳ ملاحظات کلی و مخلوط گازهای ایده‌ال، ۵۶۳
 ۲-۱۳ یک مدل ساده برای مخلوطی شامل چند گاز و یک بخار، ۵۷۰
 ۳-۱۳ کاربرد قانون اول در مخلوط‌های گاز-بخار، ۵۷۶
 ۴-۱۳ فرآیند اشباع‌سازی آدیاباتیک، ۵۷۸
 ۵-۱۳ کاربردهای مهندسی: دمای حباب-تر، دمای حباب-خشک و منحنی رطوبت‌سنجی، ۵۸۱
 خلاصه، ۵۸۷
 مسائل، ۵۸۸

۶۰۷

۱۴ روابط ترمودینامیکی

- ۱-۱۴ معادله کلایپرون، ۶۰۷
 ۲-۱۴ روابط ریاضی برای یک فاز همگن، ۶۱۱

- ۳-۱۴ روابط ماکسول، ۶۱۲
- ۴-۱۴ روابط ترمودینامیکی شامل انتالپی، انرژی درونی و انتروپی، ۶۱۵
- ۵-۱۴ انبساط پذیری حجمی و تراکم پذیری آدیاباتیک و هم دما، ۶۲۰
- ۶-۱۴ رفتار گاز واقعی و معادله های حالت، ۶۲۳
- ۷-۱۴ نمودار تعمیم یافته برای تغییر انتالپی در دمای ثابت، ۶۲۸
- ۸-۱۴ نمودار تعمیم یافته برای تغییر انتروپی در دمای ثابت، ۶۳۱
- ۹-۱۴ روابط بین خواص برای مخلوط ها، ۶۳۴
- ۱۰-۱۴ مدل ماده شبه خالص برای مخلوط گازهای واقعی، ۶۳۷
- ۱۱-۱۴ کاربردهای مهندسی - نحوه تهیه جداول ترمودینامیکی، ۶۴۲
- خلاصه، ۶۴۶
- مسائل، ۶۴۹

۶۶۳

۱۵ واکنش های شیمیایی

- ۱-۱۵ سوخت ها، ۶۶۳
- ۲-۱۵ فرآیند احتراق، ۶۶۷
- ۳-۱۵ انتالپی تشکیل، ۶۷۵
- ۴-۱۵ تحلیل سیستم های شامل واکنش با استفاده از قانون اول، ۶۷۷
- ۵-۱۵ انتالپی و انرژی درونی احتراق؛ گرمای واکنش، ۶۸۴
- ۶-۱۵ دمای شعله آدیاباتیک، ۶۸۸
- ۷-۱۵ قانون سوم ترمودینامیک و انتروپی مطلق، ۶۹۰
- ۸-۱۵ تحلیل سیستم های همراه با واکنش با استفاده از قانون دوم، ۶۹۲
- ۹-۱۵ پیل های سوختی، ۶۹۷
- ۱۰-۱۵ کاربردهای مهندسی، ۷۰۰
- خلاصه، ۷۰۵
- مسائل، ۷۰۷

۷۲۵

۱۶ آشنایی با تعادل های فازی و شیمیایی

- ۱-۱۶ شرایط لازم برای تعادل، ۷۲۵
- ۲-۱۶ تعادل بین دو فاز از یک ماده خالص، ۷۲۷
- ۳-۱۶ تعادل کم پایدار، ۷۳۱
- ۴-۱۶ تعادل شیمیایی، ۷۳۳
- ۵-۱۶ واکنش های همزمان، ۷۴۲
- ۶-۱۶ تولید گاز از ذغال سنگ، ۷۴۷
- ۷-۱۶ یونش، ۷۴۷
- ۸-۱۶ کاربردهای مهندسی، ۷۵۰

خلاصه، ۷۵۳

مسائل، ۷۵۴

۷۶۵

۱۷ جریان‌های تراکم‌پذیر

۱-۱۷ خواص سکون، ۷۶۵

۲-۱۷ معادله مومنتوم برای حجم کنترل، ۷۶۷

۳-۱۷ نیروهای وارد بر یک سطح کنترل، ۷۷۰

۴-۱۷ جریان حالت پایا، یک‌بعدی و آدیاباتیک یک شاره تراکم‌ناپذیر در یک شیپوره، ۷۷۲

۵-۱۷ سرعت صوت در یک گاز ایده‌ال، ۷۷۴

۶-۱۷ جریان یک‌بعدی، آدیاباتیک و برگشت‌پذیر گازهای ایده‌ال در شیپوره‌ها، ۷۷۷

۷-۱۷ آهنگ جریان جرمی یک گاز ایده‌ال در یک شیپوره ایزنتروپیک، ۷۷۹

۸-۱۷ امواج شوکی عمودی در جریان گاز ایده‌ال در درون یک شیپوره، ۷۸۴

۹-۱۷ ضرایب شیپوره و دیفیوزر، ۷۹۰

۱۰-۱۷ استفاده از شیپوره و اریفیس برای اندازه‌گیری جریان، ۷۹۲

خلاصه، ۷۹۶

مسائل، ۷۹۹

فهرست پیوست‌ها

۸۱۱

پیوست الف سیستم واحدهای SI: خواص یک حالتی

۸۳۳

پیوست ب سیستم واحدهای SI: جداول ترمودینامیکی

۸۸۳

پیوست ج گرمای ویژه گاز ایده‌ال

۸۸۵

پیوست د معادلات حالت

۸۹۱

پیوست ه شکل‌ها

۸۹۵

پیوست و جداول یکاهای انگلیسی

۹۳۵

پاسخ به مسائل برگزیده

۹۴۹

واژه‌نامه

۹۵۳

نمایه