

۱۵۹۲۰۳۶

کتابخانه

مبانی ترمودینامیک

ویراست نهم

کلاوس بورگناک

ریچارد ای. زونتاگ

دانشگاه میشیگان

ترجمه محمدرضا خضلی

www.ketab.ir



نشر کتاب دانشگاهی

سرشناسه	بورگناک، کلاوس Borgnakke, C. (Claus)
عنوان و نام پدیدآور	مبانی ترمودینامیک / کلاوس، ریچارد ای. زونتگ؛ ترجمه محمدرضا افضلی
مشخصات نشر	تهران: نشر کتاب دانشگاهی، ۱۳۹۷
مشخصات ظاهری	۸۱۶ ص.: مصور (رنگی)، جدول (رنگی)، ۱۰ ودار (رنگی).
شابک	۹۷۸-۶۰۰-۵۱۰۷-۹۳-۷
وضعیت فهرست نویسی	فیا
یادداشت	عنوان اصلی: Fundamentals of Thermodynamics, 9th ed.
یادداشت	واژه نامه.
یادداشت	نمایه.
عنوان دیگر	اصول ترمودینامیک کلاسیک.
عنوان دیگر	مبانی ترمودینامیک کلاسیک.
موضوع	ترمودینامیک
موضوع	Thermodynamics
شناسه افزوده	زونتگ، ریچارد ادوین، ۱۹۳۳-۲۰۱۰م.
شناسه افزوده	Sonntag, Richard Edwin
شناسه افزوده	افضلی، محمدرضا، ۱۳۳۱-، مترجم.
رده بندی کنگره	۱۳۹۷ الف۸۵/ب TJ۲۶۵
رده بندی دیویی	۶۲۱/۴۰۲۱
شماره کتاب شناسی ملی	۵۱۴۱۵۴۶

سازمان اسناد و کتابخانه ملی جمهوری اسلامی ایران

کتابخانه ملی



نشر کتاب دانشگاهی

بورگناک • زونتاگ

مبانی ترمودینامیک

ویراست نهم

جمعه محمد رضا افضلی

ویرایش: سونته خوانی

ویرایش: فرزانیان

حررت چاپینی و صفحه رایی

فاله محمدی

قالب نرم رایی

مرتضی استاد عظمی

امور هنری و طراحی

فاران اتحاد

چاپ اول ۱۳۹۷

لیتوگرافی رامین

چاپ صادق

صحافی کتیبه

تعداد صفحات ۸۱۶، خشتی

۹۰۰ نسخه

شابک ۷-۹۳-۵۱۰۷-۶۰۰-۹۷۸-۷۸ ISBN 978-600-5107-93-7



مرکز پخش: شماره ۸۷ خیابان بزرگمهر، بین وصال و قدس، تلفن ۶۶۴۱۸۵۸۶

website: www.ketabedanehshgahi.com e-mail: ketabedanehshgahi@gmail.com

کتاب فردا: www.fardabook.com

حقوق چاپ و نشر دائم این اثر محفوظ و مخصوص نشر کتاب دانشگاهی است.

۵۶۰۰۰ تومان

پیش‌گفتار

در این ویراست (ویراست نهم) اهداف اصلی ویراست‌های قبلی را حفظ کرده‌ایم:

- تشریح جامع و دقیق ترمودینامیک کلاسیک، در عین حال حفظ چشم‌انداز مهندسی، و در حین انجام این کار
- فراهم کردن زمینه لازم برای نسل‌های بعدی در حوزه‌هایی مانند مکانیک سیالات، انتقال گرما، و ترمودینامیک آماری، و هم‌چنین
- آماده کردن دانشجویان برای کاربرد ترمودینامیک در کارهای مهندسی.

ما دانسته، مطالب خود را در جهت خواست دانشجویان ارائه می‌دهیم. مفاهیم و تعریف‌های جدید در جایی از کتاب مطرح می‌شوند که برای نخستین بار، و در ریان سرست طبیعی موضوع، با آن‌ها سروکار پیدا می‌کنیم. نخستین خواص ترمودینامیکی که باید تعریف شوند (فصل ۱)، «مفاهیمی هستند که به آسانی می‌توان آن‌ها را اندازه‌گیری کرد: فشار، حجم مخصوص، و دما. در فصل ۲، خواص ترمودینامیکی معرفی می‌شوند، اما فقط در ارتباط با این خواص قابل اندازه‌گیری. انرژی داخلی و آنتالپی در ارتباط با قانون اول، آنتروپی در ارتباط با قانون دوم، و توابع هلمهولتز و گیبس در فصل مربوط به روابط ترمودینامیکی مطرح می‌شوند. در این کتاب مثال‌های واقعی بسیاری گنجانده‌ایم تا دانشجویان در درک ترمودینامیک، به‌ویژه مسائل و مسئله‌های انتهای هر فصل نیز با دقت مرتب شده‌اند تا با مطالب مطرح‌شده در آن فصل رابطه متقابل داشته باشند و به همین ترتیب نیز دسته‌بندی و مشخص شده‌اند. فصل‌های اولیه کتاب مثال، تصویر و مسئله‌های بیشتری دارند، و در سرتاسر کتاب، خلاصه‌ای در انتهای هر فصل گنجانده‌ایم و در پی آن مجموعه‌ای از مسئله‌ها، سوالات/مطالعاتی ارائه شده که می‌بایست برای دانشجویان مفید باشد.

ویژگی‌های جدید این ویراست

تجدید سازمان و تجدیدنظر در فصل‌ها

بخش عمده تغییرات ویراست نهم، کوتاه‌تر کردن بعضی مطالب و کاهش مقدار عملیات ریاضی نظری است. از بخش عمده تغییرات ریاضی که در درک موضوع نقش دارند، در متن باقی مانده‌اند. بسیاری از مثال‌ها کوتاه شده‌اند. شامل واحدها و تبدیل‌های آن‌ها هستند، بدون این که بیش از اندازه تکراری باشند؛ در عین حال، بعضی مثال‌های تکراری را حفظ کرده‌ایم تا کاربرد واحدهای انگلیسی را نیز نشان دهیم. بخش‌های کاربردی پایان هر فصل را تا حدودی گسترش داده‌ایم تا بر مثال‌های واقعی از وسایل و فرایندهایی تأکید کنیم که این موضوع در تحلیل و طراحی آن‌ها اهمیت دارد.

فصل ۱ شامل مهم‌ترین مفاهیم فیزیک و آن دسته از مفاهیم خواص ترمودینامیکی است که وضعیت ماده موردتحلیل را توصیف می‌کند. برای در دست داشتن ابزار تحلیل، ترتیب ارائه مطالب، همان ترتیب ارائه در ویراست‌های قبل است، بنابراین رفتار ماده خالص در فصل ۲ با بسط مختصر و تفکیک حوزه‌های متفاوت رفتار حالت‌های جامد، مایع، و گاز همراه است. معرفی برنامه CATT3 حذف شده است، اما این برنامه را هم‌چنان می‌توان از وب‌گاه وایلی مربوط به این کتاب دریافت کرد.

فصل ۳ شامل نخستین تغییر مهم، به صورت گنجانیدن شرحی از منابع انرژی مصرفی ما و شیوه‌های متداول برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی در جوامع مدرن است. این بحث، در کنار اشاره به منابع انرژی تجدیدپذیر و مصرف نهایی انرژی، برای همه فرایندها و جزئیات بعدی که مطالعه خواهیم کرد، پیش‌زمینه بهتری فراهم می‌آورد. توصیف مختصر سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و بعضی از فرایندها و وسایل انتقال انرژی نیز، همراه با جدول‌های کوچکی با اعداد معمول برای این وسایل ارائه شده است. دانشجویان در مورد ابعاد بسیاری از وسایل و فرایندهایی که درباره آن‌ها بحث می‌کنیم، ایده مبهمی دارند. این مطلب در بخش کاربردهای فصل ۳، پس از آشنایی با معادله‌های انرژی مطرح می‌شود. در فصل‌های بعد با تحلیل فرایندها و وسایلی سروکار داریم که به این موضوع مربوط می‌شوند و هر جا اقتضا کند، شامل بخش ویژه‌ای برای مسئله‌های تکلیف نیز هستند. با تأکید زودهنگام بر این موضوع، انگیزه مناسبی برای مطالعه مطالب بعدی ایجاد می‌شود؛ مطالبی که طی آن‌ها، کاربرد و ضرورت نظریه آشکار خواهد شد. تکلیف‌های پیشنهادی مربوط به این مقوله نیز از وب‌گاه وایلی قابل دریافت‌اند. برای آن دسته از مدرسانی که می‌خواهند بر موضوع تبدیل انرژی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی تأکید کنند، مفید واقع می‌شوند.

معادله‌های موازنه جرم، اندازه حرکت، انرژی و آنتروپی نیز از همین قالب پیروی می‌کنند تا یکدستی اصول به نشانه شده شود و مفاهیم وجه ادراکی بیابند، نه حفظ‌کردنی. دلیل استفاده از نام‌های معادله انرژی و معادله آنتروپی برای قانون‌های اول و دوم ترمودینامیک نیز همین است؛ تأکید بر این نکته که این قانون‌ها کلی‌اند و فقط در حوزه‌ای صدق نمی‌کنند، بلکه در همه موارد و حوزه‌های مطالعه، بدون استثنا، کاربرد دارند. بدیهی است که حال‌های خاص نیازمند بحث و گسترش‌هایی هستند که در حیطه کار این کتاب نمی‌گنجد، اما بعضی از آن‌ها را در فصل ۱۲ سه راه با روابط خواص ترمودینامیکی، اضافه کرده‌ایم.

معادله انرژی در مورد حجم کنترل کلی را از ویراست قبل نگه داشته‌ایم. این بحث شامل بخشی در مورد وسایل چندجریانی نیست. از این کار را به قصد تقویت این باور در دانشجو انجام داده‌ایم که تحلیل با کاربرد اصول پایه در مورد سیستم‌های تحت بررسی انجام می‌گیرد. به این معنا که صورت ریاضی قوانین کلی از طرح‌ها و شکل‌های سیستم پیروی می‌کند و مسئله تحلیل، یافتن فرمولی مناسب در متن کتاب نیست. جدول کوچکی اضافه شده تا دانشجویان در مورد ردی نسبی وسایل جریان برحسب انتقال انرژی بر واحد جرم ایده‌ای بیابند.

تکامل تاریخی قانون دوم ترمودینامیک در فصل ۱۰۵ به دست داده‌ایم تا نامعادله کلاویوس را هم شامل شود. این فصل شامل همه بیان‌های تاریخی قانون دوم ترمودینامیک است، بنابراین در فصل ۶ منحصراً با معادله آنتروپی سروکار داریم. برای نشان دادن کلی بودن معادله آنتروپی، مثال که چکی ارائه می‌شود و در آن معادله‌های انرژی و آنتروپی در مورد ماشین‌های حرارتی و پمپ‌های گرما به کار می‌روند. به این ترتیب، نشان می‌دهیم که ارائه تاریخی قانون دوم در فصل ۵ را می‌توان به طور کامل با بدیهی دانستن معادله آنتروپی و وجود مقیاس دمای مطلق جایگزین کرد. بازده چرخه کارنو و این نکته که بازده وسایل واقعی پایین‌تر است، از قوانین پایه کلی نتیجه می‌شوند. به علاوه، جهت انتقال گرما از منبعی با دمای بالاتر به منبعی با دمای پایین‌تر، با استفاده از معادله آنتروپی پیش‌بینی می‌شود، زیرا باید آنتروپی مثبت تولید شود. این‌ها مثال‌هایی از کاربرد قوانین کلی در موارد خاص است و درک دانشجو را از موضوع افزایش می‌دهد.

بخش کاربرد فصل ۷ را تا حدودی گسترش داده‌ایم تا توصیف سردکن‌های میانی و بازگرمکن‌ها را، به عنوان روشی برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی و افزایش بازده، شامل شود. در این بخش، بازده وسایل را نیز به عنوان کاربرد معادله آنتروپی مطرح کرده‌ایم و این بخش حدود ۳۰ مسئله تکلیف دارد. خلاصه کلی تحلیل حجم کنترل را حذف کرده‌ایم، اما می‌توانید آن را در وب‌گاه وایلی بیابید.

فهرست

۱ آشنایی و مقدمات ۱

- ۱-۱ سیستم ترمودینامیکی و حجم کنترل ۲
- ۲-۱ مقایسه دیدگاه‌های ماکروسکوپ و میکروسکوپی ۵
- ۳-۱ خواص و حالت ماده ۶
- ۴-۱ فرایندها و چرخه‌ها ۶
- ۵-۱ واحدهای جرم، طول، زمان و نیرو ۶
- ۶-۱ حجم مخصوص و چگالی ۱۰
- ۷-۱ فشار ۱۳
- ۸-۱ انرژی ۱۹
- ۹-۱ برابری دما ۲۲
- ۱۰-۱ قانون صفرم ترمودینامیک ۲۲
- ۱۱-۱ مقیاس‌های دما ۲۳
- ۱۲-۱ کاربردهای مهندسی ۲۴

۲ خواص ماده خالص ۳۶

- ۱-۲ ماده خالص ۳۷
- ۲-۲ مرزهای فاز ۳۷
- ۳-۲ سطح $P-v-T$ ۴۱
- ۴-۲ جدول‌های خواص ترمودینامیکی ۴۴
- ۵-۲ حالت‌های دوفاز ۴۶
- ۶-۲ حالت‌های مایع و جامد ۴۸
- ۷-۲ حالت‌های بخار فوق اشباع ۵۰
- ۸-۲ حالت‌های گاز کامل ۵۳
- ۹-۲ ضریب تراکم پذیری ۵۷
- ۱۰-۲ معادله‌های حالت ۶۱
- ۱۱-۲ کاربردهای مهندسی ۶۱

۳ معادله انرژی و قانون اول ترمودینامیک ۷۲

- ۱-۳ معادله انرژی ۷۲

ر ■ مبانی ترمودینامیک

- ۲-۳ قانون اول ترمودینامیک ۷۵
- ۳-۳ تعریف کار ۷۶
- ۴-۳ کار انجام شده در مرز متحرک سیستم تراکم پذیر ساده ۸۱
- ۵-۳ تعریف گرما ۸۹
- ۶-۳ مودهای انتقال گرما ۹۰
- ۷-۳ انرژی داخلی-خاصیتی ترمودینامیکی ۹۲
- ۸-۳ فنون تحلیل و حل مسئله ۹۴
- ۹-۳ آنتالپی، خاصیتی ترمودینامیکی ۱۰۰
- ۱۰-۳ گرمای ویژه در حجم ثابت و در فشار ثابت ۱۰۳
- ۱۱-۳ انرژی داخلی، آنتالپی، گرما و ویژه گازهای کامل ۱۰۴
- ۱۲-۳ توزیع غیریکنواخت حالت ما و جرم ۱۱۱
- ۱۳-۳ فرایند گذرا ۱۱۲
- ۱۴-۳ سیستم های کلی شامل کار ۱۱۴
- ۱۵-۳ کاربردهای مهندسی ۱۱۶

۴ تحلیل انرژی برای حجم کنترل ۱۴۳

- ۱-۴ بقای جرم و حجم کنترل ۱۴۳
- ۲-۴ معادله انرژی برای حجم کنترل ۱۴۶
- ۳-۴ فرایند حالت پایا ۱۴۸
- ۴-۴ نمونه هایی از فرایندهای حالت پایا ۱۵۰
- ۵-۴ دستگاه هایی با چند جریان ۱۶۱
- ۶-۴ فرایند جریان گذرا ۱۶۳
- ۷-۴ کاربردهای مهندسی ۱۶۹

۵ قانون دوم ترمودینامیک ۱۸۹

- ۱-۵ ماشین های حرارتی و یخچال ها ۱۸۹
- ۲-۵ قانون دوم ترمودینامیک ۱۹۵
- ۳-۵ فرایند برگشت پذیر ۱۹۷
- ۴-۵ عامل هایی که موجب برگشت ناپذیری فرایندها می شوند ۱۹۹
- ۵-۵ چرخه کارنو ۲۰۲
- ۶-۵ دو قضیه در مورد بازده چرخه کارنو ۲۰۴
- ۷-۵ مقیاس ترمودینامیکی دما ۲۰۵
- ۸-۵ مقیاس دمای گاز کامل ۲۰۶
- ۹-۵ مقایسه ماشین های ایده آل و ماشین های واقعی ۲۰۸
- ۱۰-۵ نامعادله کلازیوس ۲۱۱
- ۱۱-۵ کاربردهای مهندسی ۲۱۵

۶ آنتروپی ۲۲۹

- ۱-۶ آنتروپی-خاصیت سیستم ۲۲۹
- ۲-۶ آنتروپی ماده خالص ۲۳۱
- ۳-۶ تغییر آنتروپی در فرایندهای برگشت پذیر ۲۳۳
- ۴-۶ رابطه خاصیت ترمودینامیکی ۲۳۷
- ۵-۶ تغییر آنتروپی برای مواد جامد یا مایع ۲۳۸
- ۶-۶ تغییر آنتروپی گاز کامل ۲۳۹
- ۷-۶ فرایند پلی تروپیک برگشت پذیر برای گاز کامل ۲۴۴
- ۸-۶ تغییر آنتروپی جرم کنترل در حین فرایندی برگشت ناپذیر ۲۴۷
- ۹-۶ تولید آنتروپی و معادله آنتروپی ۲۴۸
- ۱۰-۶ اصل افزایش آنتروپی ۲۵۱
- ۱۱-۶ آنتروپی به صورت معادله آهنگی ۲۵۴
- ۱۱-۶ رهنمود کلی در مورد آنتروپی و آشوب ۲۵۸

۷ تعاریف آنتروپی، برای حجم کنترل ۲۷۵

- ۱-۷ معادله آنتروپی برای حجم کنترل ۲۷۵
- ۲-۷ فرایند حالت پایا، فرایند گذرا ۲۷۷
- ۳-۷ فرایند تک جریان حالت پایا، ۲۸۵
- ۴-۷ اصل افزایش آنتروپی ۲۸۱
- ۵-۷ کاربردهای مهندسی؛ صرفه جویی در انرژی و بازده دستگاه ۲۹۳

۸ اکسرژی ۳۱۵

- ۱-۸ اکسرژی، کار برگشت پذیر، و برگشت ناپذیر ۳۱۵
- ۲-۸ اکسرژی و معادله موازنه آن ۳۲۷
- ۳-۸ بازده قانون دوم ۳۳۲
- ۴-۸ کاربردهای مهندسی ۳۳۷

۹ سیستم های توان و تبرید با تغییر فاز ۳۵۰

- ۱-۹ آشنایی با سیستم های تولید توان ۳۵۱
- ۲-۹ چرخه رانکین ۳۵۲
- ۳-۹ اثر فشار و دما بر چرخه رانکین ۳۵۵
- ۴-۹ چرخه بازگرمایش ۳۵۹
- ۵-۹ چرخه بازایاب و گرم کن های آب تغذیه ۳۶۰

- ۶-۹ انحراف چرخه‌های واقعی از چرخه‌های ایده‌آل ۳۶۶
- ۷-۹ تولید هم‌زمان گرما و توان: پیکربندی‌های دیگر ۳۷۰
- ۸-۹ آشنایی با سیستم‌های تبرید ۳۷۳
- ۹-۹ چرخه تبرید تراکم بخاری ۳۷۳
- ۱۰-۹ سیال‌های عامل برای سیستم‌های تبرید تراکم بخاری ۳۷۶
- ۱۱-۹ انحراف چرخه تبرید تراکم بخاری واقعی از چرخه ایده‌آل ۳۷۷
- ۱۲-۹ پیکربندی‌های چرخه تبرید ۳۷۸
- ۱۳-۹ چرخه تبرید جذبی ۳۸۱
- ۱۴-۹ تحلیل اکسرژی چرخه‌ها ۳۸۲

۱۰ سیستم‌های توان و تبرید سیال‌های عامل گازی ۳۹۹

- ۱-۱۰ چرخه‌های استاندارد نواز هوا ۳۹۹
- ۲-۱۰ چرخه برایتون ۴۰۰
- ۳-۱۰ چرخه توربین گازی ساده با باریک‌گرد ۴۰۰
- ۴-۱۰ پیکربندی‌های چرخه توان توربین گازی ۴۰۱
- ۵-۱۰ چرخه استاندارد هوا برای پیش‌رانش جت ۴۱۳
- ۶-۱۰ چرخه تبرید استاندارد هوا ۴۱۴
- ۷-۱۰ چرخه‌های توان موتور پیستونی ۴۱۷
- ۸-۱۰ چرخه اوتو ۴۱۹
- ۹-۱۰ چرخه دیزل ۴۲۲
- ۱۰-۱۰ چرخه استرلینگ ۴۲۵
- ۱۱-۱۰ چرخه‌های اتکینسون و میلر ۴۲۶
- ۱۲-۱۰ سیستم‌های چرخه ترکیبی توان و تبرید ۴۲۹

۱۱ مخلوط‌های گازی ۴۴۴

- ۱-۱۱ ملاحظات کلی و مخلوط‌های گاز کامل ۴۴۴
- ۲-۱۱ مدل ساده‌شده مخلوطی شامل چند گاز و یک بخار ۴۵۱
- ۳-۱۱ کاربرد معادله انرژی برای مخلوط‌های گازبخار ۴۵۷
- ۴-۱۱ فرایند اشباع آدیاباتیک ۴۵۹
- ۵-۱۱ کاربردهای مهندسی؛ دماهای حباب-خیس و حباب-خشک و نمودار رطوبت-سنتجی ۴۶۲

۱۲ رابطه‌های خاصیت ترمودینامیکی ۴۸۳

- ۱-۱۲ معادله کلاپیرون ۴۸۳
- ۲-۱۲ رابطه‌های ریاضی برای فازی همگن ۴۸۷
- ۳-۱۲ روابط ماکسول ۴۸۸
- ۴-۱۲ روابط ترمودینامیکی شامل آنتالپی، انرژی داخلی، و آنتروپی ۴۹۱

- ۵-۱۲ انبساط پذیری حجمی و تراکم پذیری آدیاباتیکی و همدمای ۴۹۶
 ۶-۱۲ رفتار گاز حقیقی و معادله های حالت ۴۹۹
 ۷-۱۲ نمودار تعمیم یافته برای تغییرات آنتالپی در دمای ثابت ۵۰۳
 ۸-۱۲ نمودار تعمیم یافته برای تغییرات آنتروپی در دمای ثابت ۵۰۶
 ۹-۱۲ رابطه خاصیت برای مخلوط ها ۵۰۹
 ۱۰-۱۲ مدل های ماده شبه خالص برای مخلوط های گاز حقیقی ۵۱۲
 ۱۱-۱۲ کاربردهای مهندسی ۵۱۷

۱۳ واکنش های شیمیایی ۵۳۲

- ۱-۱۳ سوخت ها ۵۳۲
 ۲-۱۳ فرایند احتراق ۵۳۶
 ۳-۱۳ آنتالپی تشکیل ۵۴۲
 ۴-۱۳ تعادل انرژی سیستم های واکنش دهنده ۵۴۴
 ۵-۱۳ آنتالپی انرژی داخلی احتراق؛ گرمای واکنش ۵۵۰
 ۶-۱۳ انرژی آدیاباتیکی ۵۵۵
 ۷-۱۳ قانون سوم ترمودینامیک و آنتروپی مطلق ۵۵۷
 ۸-۱۳ تحلیل دئون در برابر سیستم های واکنش دهنده ۵۵۸
 ۹-۱۳ پیل های سوخت ۵۶۰
 ۱۰-۱۳ کاربردهای مهندسی ۵۶۱

۱۴ آشنایی با تعادل فاز و تعادل شیمیایی ۵۸۳

- ۱-۱۴ شرایط تعادل ۵۸۳
 ۲-۱۴ تعادل بین دو فاز از یک ماده خالص ۵۸۵
 ۳-۱۴ تعادل شبه پایدار ۵۸۹
 ۴-۱۴ تعادل شیمیایی ۵۹۰
 ۵-۱۴ واکنش های هم زمان ۵۹۹
 ۶-۱۴ گازی کردن زغال سنگ ۶۰۳
 ۷-۱۴ یونش ۶۰۴
 ۸-۱۴ کاربردهای مهندسی ۶۰۶

۱۵ جریان تراکم پذیر ۶۱۷

- ۱-۱۵ خواص سکون ۶۱۷
 ۲-۱۵ معادله اندازه حرکت برای حجم کنترل ۶۱۹
 ۳-۱۵ جریان آدیاباتیکی یک بعدی سیال تراکم ناپذیر در نازل ۶۲۱
 ۴-۱۵ سرعت صوت در گاز کامل ۶۲۳

ش ■ مبانی ترمودینامیک

- ۵-۱۵ جریان یک بُعدی، آدیاباتیک و برگشت پذیر گاز کامل در نازل ۶۲۶
۶-۱۵ آهنگ جریان جرمی گاز کامل در نازل هم آنتروپی ۶۲۹
۷-۱۵ موج شوکی قائم در گاز کاملی که از نازل می گذرد ۶۳۳
۸-۱۵ ضرایب نازل و پخش کن ۶۳۹

فهرست پیوست ها ۶۵۳

- پیوست الف. واحدهای SI: خواص حالت تنها ۶۵۵
پیوست ب. واحدهای SI: جدول های ترمودینامیکی ۶۷۵
پیوست ج. گرمای ویژه گاز کامل ۷۲۵
پیوست د. معادله های حالت ۷۲۷
پیوست و. جدول های واحدی انگلیسی ۷۳۷

پاسخ مسئله های برگزیده ۷۷۸

واژه نامه ۷۸۷

نمایه ۷۹۰