بسم الله الرحمن الرحیم

انتشارات
۸۱۹

ترمودینامیک پیشرفتهٔ مهندسی

انتروپی اگزرژی

دکتر محسن قاضی‌خانی
استاد دانشگاه فردوسی مشهد

press.um.ac.ir

سرشناسه: قاضی‌خانی، محسن، ۱۳۳۱-
عنوان و نام پدیدآور: ترمودینامیک پیشرفته مهندسی، انتروپی اگزرژی/ محسن قاضی‌خانی.
مشخصات نشر: مشهد: دانشگاه فردوسی مشهد، انتشارات، ۱۴۰۱.
مشخصات ظاهری: ۳۶۸ ص.: مصوّر، جدول، نمودار.
فروست: انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد؛ ۸۱۹.
شابک: ISBN: 978-964-386-511-5
وضعیت فهرست‌نویسی: فیپا.
یادداشت: نمایه. کتابنامه: ص. ۳۶۵-۳۶۷.
عنوان دیگر: انتروپی اگزرژی
موضوع: ترمودینامیک -- راهنمای آموزشی (عالی) — Thermodynamics -- Study and teaching (Higher)
اگزرژی -- راهنمای آموزشی (عالی) — Exergy -- Study and teaching (Higher)
آنتروپی -- راهنمای آموزشی (عالی) — Entropy -- Study and teaching (Higher)
شناسه افزوده: دانشگاه فردوسی مشهد، انتشارات.
رده‌بندی کنگره: QC۳۱۱
رده‌بندی دیویی: ۶۲۱/۴۰۲۱
شماره کتابشناسی ملی: ۸۸۱۲۴۶۰

ترمودینامیک پیشرفتهٔ مهندسی؛ انتروپی اگزرژی

پدیدآورنده: دکتر محسن قاضی‌خانی
ویراستار ادبی: هانیه اسدپور فعال مشهد
مشخصات: وزیری، ۱۰۰ نسخه، چاپ اوّل، تابستان ۱۴۰۱
چاپ و صحافی: چاپخانهٔ دقت
بها : ۱/۶۰۰/۰۰۰ ریال
حق چاپ برای انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد محفوظ است.

انتشارات
۸۱۹

مراکز پخش:

فروشگاه و نمایشگاه کتاب پردیس: مشهد، میدان آزادی، دانشگاه فردوسی مشهد، جنب سلف یاس
تلفن: ۳۸۸۰۲۶۶۶- ۳۸۸۳۳۷۲۷ (۰۵۱)
مؤسّسهٔ کتابیران: تهران، میدان انقلاب، خیابان کارگر جنوبی، بین روانمهر و وحید نظری، بن‌بست گشتاسب، پلاک ۸ تلفن: ۶۶۴۸۴۷۱۵ (۰۲۱)
مؤسّسهٔ دانشیران: تهران، خیابان انقلاب، خیابان منیری جاوید (اردیبهشت) نبش خیابان نظری، شمارهٔ ۱۴۲
تلفکس: ۶۶۴۰۰۲۲۰ – ۶۶۴۰۰۱۴۴ (۰۲۱)

http://press.um.ac.ir Email: press@um.ac.ir

press.um.ac.ir

تقدیم به پدر و مادرم

که برای تربیت دینی و سلامت جسم من
متحمّل رنج و زحمت شدند؛
رحمت و غفرانِ خداوند را برای ایشان درخواست می‌کنم.

و تقدیم به همسرم

press.um.ac.ir

press.um.ac.ir

فهرست مطالب

مقدّمه..... ۱۶

فصل ۱. یادآوری ترمودینامیک مقدّماتی..... ۱۷

۱- سیستم واسطه..... ۱۷

۱-۱ ضرورت تعریف سیستم واسطه..... ۱۸

۱-۱-۱ تعریف سیستم واسطه..... ۱۸

۱-۱-۲ موارد استفادهٔ سیستم واسطه..... ۱۸

۱-۱-۳ نمایش تغییر دما در مرز سیستم توسط سیستمِ واسطه در فرایند انتقال حرارت..... ۱۸

۱-۱-۴ نمایش تولید انتروپی در سیستم واسطه در فرایند انتقال حرارت..... ۱۹

۱-۱-۵ محاسبهٔ تولید انتروپی و بازگشت‌ناپذیری براثر انتقال حرارت در سیستم واسطه..... ۱۹

۱-۲ فرایند بازگشت‌پذیر و فرایند بازگشت‌ناپذیر..... ۲۰

۱-۲-۱ فرایند بازگشت‌پذیر..... ۲۰

۱-۲-۲ نشانه‌های فرایند بازگشت‌پذیر..... ۲۰

۱-۲-۳ فرایند بازگشت‌ناپذیر..... ۲۰

۱-۲-۴ عوامل بازگشت‌ناپذیری..... ۲۰

۱-۲-۵ اصطکاک عامل بازگشت‌ناپذیری است..... ۲۰

۱-۲-۶ انتقال حرارت عامل بازگشت‌ناپذیری..... ۲۲

۱-۲-۷ تحلیل بازگشت‌ناپذیر بودن انتقال حرارت..... ۲۳

۱-۲-۸ آیا انتقال حرارت بازگشت‌پذیر میسّر است؟..... ۲۳

۱-۲-۹ اختلاط موادّ متفاوت عامل بازگشت‌ناپذیری است..... ۲۴

۱-۲-۱۰ انبساط سریع عامل بازگشت‌ناپذیری است..... ۲۵

۱-۲-۱۱ احتراق عامل بازگشت‌ناپذیری است..... ۲۵

۱-۲-۱۲ تفاوت فرایند بازگشت‌پذیرداخلی و بازگشت‌پذیر کامل..... ۲۵

۱-۲-۱۳ مثال‌هایی برای فرایندهای بازگشت‌پذیر..... ۲۶

۱-۳ توضیح فازهای مختلف درجداول ترمودینامیکی و محاسبهٔ انتالپی مایع متراکم با استفاده از دیاگرام T-v..... ۲۸

۱-۴ گاز ایدئال..... ۲۹

۱-۴-۱ مقدّمهٔ گاز ایدئال..... ۲۹

۱-۴-۲ با آزمایش ژول چگونه رفتار گاز ایدئال توضیح داده می‌شود؟..... ۲۹

press.um.ac.ir

۱-۴-۳ دلیل ژول برای مشخص شدن رفتار گاز: ایدئال است؟ یا غیرایدئال؟..... ۳۰
۱-۴-۴ نمودار تراکم‌پذیری، وسیله‌ای برای درک رفتار گاز..... ۳۰
۱-۴-۵ چگونه رفتار گاز ایدئال با نمودار تراکم‌پذیری مشخص می‌شود؟..... ۳۰
۱-۴-۶ قسمت‌های مختلف نمودار تراکم‌پذیری چه مفاهیمی را می‌رسانند؟..... ۳۱
۱-۴-۷ چرا انتالپی و گرماهای ویژه در گاز ایدئال فقط تابع دما هستند؟..... ۳۲
۱-۵ بازدهی در فرایندهای ترمودینامیکی..... ۳۳
۱-۵-۱ بازدهی حرارتی..... ۳۳
۱-۵-۲ بازدهی ایزنتروپیک..... ۳۳
۱-۵-۳ فرایند ایدئال ایزنتروپیک..... ۳۳
۱-۵-۴ بازدهی ایزنتروپیک توربین..... ۳۳
۱-۵-۵ ترسیم کار ایزنتروپیک و کار واقعی توربین در دیاگرام h-S..... ۳۴
۱-۵-۶ بازده ایزنتروپیک کمپرسور، پمپ مایع و پمپ هوا..... ۳۴
۱-۵-۷ ترسیم کار ایزنتروپیک وکار واقعی کمپرسور و پمپ در دیاگرام h-S..... ۳۵
۱-۵-۸ بازدهی قانون دوم (تأثیرپذیری)..... ۳۶
۱-۵-۹ مدلِ ایدئال بازگشت‌پذیر در توربین، کمپرسور و پمپ..... ۳۶
۱-۵-۱۰ بازده قانون دوم توربین..... ۳۷
۱-۵-۱۱ بازده قانون دوم کمپرسور و پمپ..... ۳۸
۱-۶ قانون اوّل ترمودینامیک..... ۳۹
۱-۶-۱ علامت کار و حرارت در فرایندهای ترمودینامیکی..... ۳۹
۱-۶-۲ قانون اوّل ترمودینامیک برای سیکل ترمودینامیکی..... ۴۰
۱-۶-۳ آیا قانون اوّل ترمودینامیک برای سیکل قابل‌اثبات است؟..... ۴۰
۱-۶-۴ قانون اوّل ترمودینامیک برای سیستم..... ۴۱
۱-۶-۵ قانون اوّل ترمودینامیک برای حجم کنترل..... ۴۲
۱-۶-۶ قانون اوّل ترمودینامیک برای حجم کنترل در شرایط پایدار..... ۴۳
۱-۶-۷ قانون اوّل ترمودینامیک برای حجم کنترل در شرایط پایدار یک‌جریانه..... ۴۳
۱-۶-۸ قانون اوّل ترمودینامیک برای حجم کنترل در شرایط گذرا..... ۴۴
۱-۷ مثال‌های حل‌شدهٔ فصل اوّل..... ۴۵
۱-۸ مسائل..... ۴۸

فصل ۲. قانون دوم ترمودینامیک..... ۵۱
۲-۱ چگونه قانون دوم ترمودینامیک فهمیده می‌شود؟..... ۵۱
۲-۱-۱ گرم شدن خودبه‌خود لیوان قهوهٔ سردشده امکان‌پذیر نیست..... ۵۱

press.umsu.ir

۲-۱-۲ انتقال حرارت به سیستم نمی‌تواند عامل کار در پرهٔ اصطکاکی باشد..... ۵۲
۲-۱-۳ نتیجه‌گیری از فرایندهای نشدنی..... ۵۳
۲-۲ قانون دوم ترمودینامیک برای سیکل ترمودینامیکی..... ۵۳
۲-۲-۱ بیان نظری قانون دوم ترمودینامیک در سیکل ترمودینامیکی..... ۵۳
۲-۲-۲ نظریهٔ کلوین‌پلانک..... ۵۳
۲-۲-۳ نظریهٔ کلاسیوس..... ۵۴
۲-۲-۴ نقش کلاسیوس در تدوین قانون اوّل و دوم ترمودینامیک..... ۵۴
۲-۲-۵ اثبات نظریه‌های کلوین‌پلانک و کلاسیوس..... ۵۵
۲-۲-۶ نقض نظریهٔ کلاسیوس معادل با نقض نظریهٔ کلوین‌پلانک است..... ۵۵
۲-۲-۷ نقض نظریهٔ کلوین‌پلانک معادل است با نقض نظریهٔ کلاسیوس..... ۵۶
۲-۲-۸ بیان نظری قانون دوم در سیکل با توجه به بازده موتور حرارت و ضریب بازده یخچال..... ۵۷
۲-۲-۹ جایگاه سیکل کارنو در قانون دوم ترمودینامیک..... ۵۷
۲-۲-۱۰ سعدی کارنو..... ۵۸
۲-۲-۱۱ سیکل کارنو..... ۵۸
۲-۲-۱۲ سیکل کارنو در دیاگرام T-S..... ۵۹
۲-۲-۱۳ مفهوم بازگشت‌پذیر بودن سیکل کارنو..... ۵۹
۲-۲-۱۴ اثبات بازده بیشتر سیکل کارنو از سیکل واقعی با منابع گرم و سرد یکسان..... ۶۰
۲-۲-۱۵ معادل بودن بازده سیکل‌های کارنو با منابع گرم و سرد یکسان..... ۶۱
۲-۲-۱۶ بازده برابر سیکل‌های کارنو با منابع سرد و گرم یکسان و پیشنهاد کلوین..... ۶۲
۲-۲-۱۷ مبدأ ترمودینامیکی دما با استفاده از سیکل کارنو..... ۶۳
۲-۲-۱۸ استدلال کلوین برای صفر مطلق دما با استفاده از سیکل کارنو..... ۶۳
۲-۲-۱۹ محدود شدن نظریهٔ کلوین‌پلانک و کلاسیوس با سیکل کارنو..... ۶۵
۲-۲-۲۰ محدود شدن نظریهٔ کلوین‌پلانک با سیکل کارنو..... ۶۵
۲-۲-۲۱ محدود شدن نظریهٔ کلاسیوس با سیکل کارنو..... ۶۵
۲-۲-۲۲ سیکل‌هایی که تابع محدویت بازده سیکل کارنو نیستند..... ۶۶
۲-۲-۲۳ لغو نظریهٔ کلاسیوس با توجه به سیکل تبرید جذب سطحی..... ۶۷
۲-۲-۲۴ بیان کمّی قانون دوم در سیکل ترمودینامیکی (نامعادلهٔ کلاسیوس)..... ۶۷
۲-۲-۲۵ اثبات نامعادلهٔ کلاسیوس در سیکل واقعی..... ۶۷
۲-۲-۲۶ اثبات معادلهٔ کلاسیوس در سیکل بازگشت‌پذیر..... ۶۸
۲-۲-۲۷ نامعادلهٔ کلاسیوس درحالت‌عام..... ۶۹
۲-۲-۲۸ چرا با توجه به نامعادلهٔ کلاسیوس، لیوان قهوه نمی‌تواند بعداز سرد شدن در محیط مجدّداً گرم شود؟..... ۶۹
۲-۳ قانون دوم ترمودینامیک در فرایند سیستم..... ۷۰
۲-۳-۱ قانون دوم در فرایند بازگشت‌پذیر، وسیله‌ای برای معرفی انتروپی..... ۷۱

press.um.ac.ir

۲-۳-۲ قانون دوم ترمودینامیک در فرایند واقعی..... ۷۲
۲-۳-۳ قانون دوم‌ترمودینامیک فرایند درحالت‌عام (بازگشت‌پذیر و واقعی)..... ۷۳
۲-۳-۴ معادلهٔ انتروپی برای فرایند واقعی در سیستم..... ۷۴
۲-۳-۵ معادلهٔ انتروپی در سیستم با بیان ساده..... ۷۶
۲-۳-۶ عوامل تغییر انتروپی سیستم با توجه به معادلهٔ انتروپی..... ۷۷
۲-۳-۷ انواع تولید انتروپی در سیستم، چرا تولید انتروپی مثبت است؟..... ۷۷
۲-۳-۸ تعداد معادلات انتروپی در یک فرایند..... ۷۷
۲-۳-۹ معادلهٔ انتروپی برای سیستم..... ۷۷
۲-۳-۱۰ معادلهٔ انتروپی برای سیستم واسطه..... ۷۸
۲-۳-۱۱ معادلهٔ انتروپی برای محیط..... ۷۹
۲-۳-۱۲ تولید انتروپی کل در سیستم..... ۷۹
۲-۳-۱۳ تفاوت تولید انتروپی کل ($S_{gen,total}$)، با اصل افزایش انتروپی..... ۷۹
۲-۳-۱۴ تفاوت انتقال انتروپی براثر انتقال حرارت به سیستم و تولید انتروپی در سیستم واسطه..... ۸۱
۲-۳-۱۵ تولید انتروپی سیستم‌های واسطه در منابع حرارتی با دماهای مختلف..... ۸۱
۲-۳-۱۶ ادغام معادلهٔ انتروپی سیستم و معادلهٔ انتروپی سیستم واسطه..... ۸۲
۲-۳-۱۷ مفهوم خاصیت ترمودینامیکی انتروپی..... ۸۳
۲-۳-۱۸ تعبیر درهم‌برهمی از انتروپی به چه معنی است ؟..... ۸۳
۲-۳-۱۹ آیا مفهوم درهم‌برهمی از انتروپی همواره قابل‌اعتبار است؟..... ۸۵
۲-۳-۲۰ چگونه از انتروپی استفاده کنیم؟..... ۸۵
۲-۳-۲۱ فرایند مناسب و نامناسب از دیدگاه قانون دوم..... ۸۶
۲-۳-۲۲ تغییر انتروپی و تأثیر آن در کیفیت فرایند..... ۸۶
۲-۳-۲۳ آیا افزایش انتروپی در فرایندی با انتقال‌حرارت بازگشت‌پذیر، دلیلی بر مناسب و یا نامناسب بودن فرایند است؟..... ۸۷
۲-۳-۲۴ تغییر انتروپی در فرایند با انتقال حرارت واقعی ($S_{gen,Q} > 0$)..... ۹۰
۲-۳-۲۵ تغییر خاصیت ترمودینامیکی انتروپی در فرایند آدیاباتیک..... ۹۱
۲-۳-۲۶ نتیجه‌گیری «چگونه از انتروپی استفاده کنیم؟»..... ۹۱
۲-۴ معادلهٔ انتروپی در حجم کنترل..... ۹۱
۲-۴-۱ ادغام معادلهٔ انتروپی حجم کنترل و سیستم واسطه..... ۹۳
۲-۴-۲ روش‌های فنّاورانه در آب‌گرم‌کن‌ها (پکیج‌های) خانگی..... ۹۴
۲-۴-۳ روش جدید فنّاورانه در پکیج‌های خانگی با دودکش دوجدار..... ۹۶
۲-۴-۴ چرا با تولید انتروپی بازده توربین کاهش می‌یابد؟..... ۹۷
۲-۴-۵ چرا با تولید انتروپی بازده کمپرسور کاهش می‌یابد؟..... ۹۸
۲-۴-۶ چرا با تولید انتروپی بازده نازل کاهش می‌یابد؟..... ۹۹

press.iau.ac.ir

۲-۴-۷ علّت امکان استفاده از قوانین ترمودینامیک سیستم در حجم کنترل پایدار.....۱۰۰
۲-۴-۸ تولید انتروپی در جریان سیّال در کانال.....۱۰۱
۲-۴-۹ تولید انتروپی در جریان گاز ایدئال در کانال.....۱۰۲
۲-۴-۱۰ تولید انتروپی کانال در جریان سیّال تراکم‌ناپذیر.....۱۰۳
۲-۵ تولید انتروپی در سیکل ترمودینامیکی.....۱۰۳
۲-۵-۱ تولید انتروپی سیکل موتور حرارت بازگشت‌پذیر داخلی.....۱۰۴
۲-۵-۲ تولید انتروپی سیکل موتور حرارت واقعی.....۱۰۵
۲-۵-۳ نتیجه‌گیری تولید انتروپی در سیکل‌های ترمودینامیکی.....۱۰۷
۲-۶ مثال‌های حل‌شدهٔ فصل دوم.....۱۰۷
۲-۷ مسائل.....۱۱۱

فصل ۳. اگزرژی.....۱۱۷
۳- اگزرژی (قابلیت کاردهی).....۱۱۷
۳-۱ تعریف اگزرژی.....۱۱۷
۳-۱-۱ مبدأ صفر اگزرژی (حالت مُرده).....۱۱۷
۳-۱-۲ تعریف اگزرژی (قابلیت کاردهی) سیّال در فرایند کارتولید.....۱۱۸
۳-۱-۳ چگونه می‌توان بیشترین کار تولیدی ممکن از یک فرایند کارتولید را به‌دست آورد؟.....۱۱۸
۳-۱-۴ تعریف اگزرژی (قابلیت کاردهی) سیّال در فرایند کارمصرف.....۱۱۸
۳-۱-۵ چگونه می‌توان کار مصرفی کمینه در یک فرایند کارمصرف را هزینه کرد؟.....۱۱۸
۳-۱-۶ تعریف اگزرژی (قابلیت کاردهی) در فرایند انتقال حرارت.....۱۱۸
۳-۱-۷ چگونه می‌توان کمترین بازگشت‌ناپذیری ممکن در یک فرایند انتقال حرارت را ایجاد کرد؟.....۱۱۸
۳-۱-۸ تعریف اگزرژی (قابلیت کاردهی) سیّال در فرایند انتقال جرم.....۱۱۸
۳-۱-۹ چگونه می‌توان کمترین بازگشت‌ناپذیری ممکن در یک فرایند انتقال جرم را ایجاد کرد؟.....۱۱۹
۳-۲ مفهوم کمّیت و کیفیت انرژی.....۱۱۹
۳-۲-۱ مقایسهٔ کمّیت و کیفیت انرژی در دو معدن آب‌گرم زیرزمینی.....۱۱۹
۳-۲-۲ تفاوت کیفیت کار و حرارت منتقله.....۱۲۱
۳-۲-۳ اشتباه ویلیام کولن، مخترع سیکل پمپ حرارت، دررابطه‌با کیفیت انرژی.....۱۲۲
۳-۳ تفاوت فرایند ایدئال بازگشت‌پذیر و فرایند ایدئال ایزنتروپیک.....۱۲۳
۳-۳-۱ اگزرژی مثبت و اگزرژی منفی.....۱۲۴
۳-۳-۲ رتبهٔ انرژی و کاهش رتبهٔ انرژی.....۱۲۴
۳-۳-۳ دیدگاه قانون اوّل و دوم ترمودینامیک دررابطه‌با رتبهٔ انرژی.....۱۲۵
۳-۳-۴ سیاست‌گذاری کلان کشوری دررابطه‌با صرفه‌جویی انرژی و جلوگیری از کاهش رتبهٔ انرژی.....۱۲۵

press.um.ac.ir

۳-۳-۵ معادلهٔ اگزرژی ۱۲۶
۳-۳-۶ معادلهٔ اگزرژی حجم کنترل با بازگشت‌ناپذیری داخلی ۱۲۷
۳-۳-۷ معادلهٔ اگزرژی در حجم کنترل با بازگشت‌ناپذیری کلّی ۱۲۹
۳-۳-۸ محاسبهٔ توان بازگشت‌پذیر داخلی و توان بازگشت‌پذیر کلّی ۱۳۰
۳-۳-۹ نمایش توان بازگشت‌پذیر داخلی، بازگشت‌ناپذیری داخلی، توان بازگشت‌پذیر کلّی و بازگشت‌ناپذیری کلّی در فرایندهای کارتولید و کارمصرف ۱۳۱
۳-۳-۱۰ توان بازگشت‌پذیر داخلی یا توان بازگشت‌پذیر کلّی کدام‌یک در تحلیل‌های صنعتی مورداستفاده قرار می‌گیرند؟ ۱۳۲
۳-۳-۱۱ چرا باوجود معادلهٔ انتروپی، معادلهٔ اگزرژی مطرح شده است؟ ۱۳۲
۳-۳-۱۲ آیا معادلهٔ اگزرژی به‌معنی قانون دوم ترمودینامیک است؟ ۱۳۲
۳-۳-۱۳ تفاوت اگزرژی و تغییر اگزرژی ۱۳۳
۳-۳-۱۴ مؤلّفه‌های اگزرژی ۱۳۳
۳-۳-۱۵ تعریف اگزرژی جایگزین انتقال حرارت ۱۳۳
۳-۳-۱۶ محاسبهٔ اگزرژی جایگزین انتقال حرارت ۱۳۴
۳-۳-۱۷ تحلیل اگزرژی جایگزین انتقال حرارت و اگزرژی انتقال حرارت مثبت و منفی با کمک سیکل کارنو ..۱۳۶
۳-۳-۱۸ اگزرژی انتقال حرارت از منبع یا سیستمی با دمای بالاتر از محیط با کمک سیکل کارنو ۱۳۶
۳-۳-۱۹ اگزرژی انتقال حرارت به منبع یا سیستمی با دمای بیشتر از دمای محیط ۱۳۷
۳-۳-۲۰ اگزرژی انتقال حرارت از منبعی یا سیستمی با دمایی کمتر از محیط ۱۳۸
۳-۳-۲۱ اگزرژی انتقال حرارت به منبعی یا سیستمی با دمایی کمتر از محیط ۱۳۹
۳-۳-۲۲ بازگشت‌ناپذیری در فرایند انتقال حرارت بین دو منبع حرارتی در سیستم واسطه ۱۴۰
۳-۳-۲۳ رسم بازگشت‌ناپذیری در انتقال حرارت بین دو منبع حرارتی در دیاگرام T-S ۱۴۱
۳-۳-۲۴ تأثیرپذیری یا بازده قانون دوم در انتقال حرارت بین دو منبع ۱۴۲
۳-۳-۲۵ اگزرژی غیرجریانی ۱۴۴
۳-۳-۲۶ محاسبهٔ تغییر اگزرژی غیرجریانی ۱۴۶
۳-۳-۲۷ معادلهٔ اگزرژی غیرجریانی در سیستم ۱۴۷
۳-۳-۲۸ معادلهٔ اگزرژی و تأثیرپذیری انتقال حرارت در سیستم حجم ثابت ۱۴۷
۳-۳-۲۹ معادلهٔ اگزرژی و تأثیرپذیری انتقال حرارت در سیستم فشار ثابت ۱۴۹
۳-۳-۳۰ معادلهٔ اگزرژی و تأثیرپذیری فرایند تراکم در سیلندر پیستون عایق ۱۴۹
۳-۳-۳۱ معادلهٔ اگزرژی و تأثیرپذیری انتقال حرارت در سیّال تراکم‌ناپذیر ۱۵۰
۳-۳-۳۲ در چه شرایطی اگزرژی غیرجریانی مثبت و یا منفی است؟ ۱۵۱
۳-۳-۳۳ اگزرژی غیرجریانی مثبت، حالت «أ» ($P_1>P_0, T_1>T_0$) ۱۵۱
۳-۳-۳۴ اگزرژی غیرجریانی مثبت، حالت «ب» ($P_1>P_0, T_1<T_0$) ۱۵۲

press.um.ac.ir

۳-۳-۳۵ علامت اگزرژی غیرجریانی درحالتی که دما و فشار سیستم کمتر از محیط باشد.....۱۵۳
۳-۳-۳۶ علامت اگزرژی غیرجریانی در حالتی که دما بیشتر از محیط و فشار سیستم کمتر از محیط باشد.....۱۵۴
۳-۳-۳۷ حل چند مثال برای محاسبهٔ اگزرژی غیرجریانی.....۱۵۵
۳-۳-۳۸ تعریف اگزرژی جریان جرم.....۱۵۸
۳-۳-۳۹ محاسبهٔ اگزرژی جریان جرم.....۱۵۸
۳-۳-۴۰ اگزرژی جریانی حجم کنترل یک توربین ساده.....۱۵۹
۳-۳-۴۱ در چه شرایطی اگزرژی جریانی مثبت و یا منفی است؟.....۱۶۰
۳-۳-۴۲ اگزرژی جریانی مثبت.....۱۶۰
۳-۳-۴۳ اگزرژی جریانی منفی.....۱۶۱
۳-۳-۴۴ اگزرژی جریانی بدون‌بُعد گاز ایدئال با گرماهای ویژهٔ ثابت.....۱۶۲
۳-۳-۴۵ ترسیم اگزرژی جریانی بدون‌بُعد در گاز ایدئال با گرمای ویژهٔ ثابت.....۱۶۳
۳-۳-۴۶ ترسیم اگزرژی واحد جرم جریانی با ناچیز بودن سینیتیک و پتانسیل در دیاگرام h-s.....۱۶۴
۳-۳-۴۷ تغییر اگزرژی جریانی در حجم کنترل حالت پایدار جریان پایدار.....۱۶۶
۳-۳-۴۸ تغییر اگزرژی جریانی در حجم کنترل غیرپایدار.....۱۶۸
۳-۳-۴۹ ترسیم تغییر اگزرژی جریانی در دیاگرام T-S در حجم کنترل حالت پایدار یک‌جریانه با ناچیز بودن تغییر سینیتیک و پتانسیل.....۱۶۹
۳-۳-۵۰ بازگشت‌ناپذیری و تأثیرپذیری در توربین‌های یک‌جریانه.....۱۷۱
۳-۳-۵۱ ترسیم کار ایزنتروپیک، کار واقعی، کار بازگشت‌پذیر، بازگشت‌ناپذیری و حرارت اصطکاکی در توربین یک‌جریانهٔ آدیاباتیک با ناچیز بودن تغییر سینیتیک و پتانسیل در دیاگرام T-S.....۱۷۲
۳-۳-۵۲ چرا توان توربین آدیاباتیک بازگشت‌پذیر با توان توربین ایزنتروپیک متفاوت است؟.....۱۷۵
۳-۳-۵۳ بازگشت ناپذیری و تأثیرپذیری در نازل آدیاباتیک.....۱۷۶
۳-۳-۵۴ ترسیم تغییر سینیتیک ایزنتروپیک، تغییر سینیتیک واقعی، بازگشت‌ناپذیری و حرارت اصطکاکی نازل در دیاگرام T-S ۱۷۶
۳-۳-۵۵ بازگشت‌ناپذیری و تأثیرپذیری در پمپ و کمپرسورآدیاباتیک و غیرآدیاباتیک.....۱۷۹
۳-۳-۵۶ ترسیم کار واقعی، کار ایزنتروپیک، کار بازگشت‌پذیر، بازگشت‌ناپذیری و حرارت اصطکاکی کمپرسورهای آدیاباتیک در دیاگرام T-S.....۱۸۱
۳-۳-۵۷ چرا کار بازگشت‌پذیر در کمپرسور آدیاباتیک با کار ایزنتروپیک آن متفاوت است؟.....۱۸۳
۳-۳-۵۸ بازگشت ناپذیری و تأثیرپذیری در فرایند اختناق.....۱۸۳
۳-۳-۵۹ قانون دوم ترمودینامیک (معادلهٔ اگزرژی) در مبدّل حرارت‌ها.....۱۸۵
۳-۳-۶۰ بازگشت‌ناپذیری و تأثیرپذیری در مبدّل حرارت بدون اختلاط.....۱۸۶
۳-۳-۶۱ ترسیم بازگشت‌ناپذیری مبدّل حرارت بدون اختلاط.....۱۸۷

press.um.ac.ir

۳-۳-۶۲ معرفی و اهمیت Pinch Point در کاهش بازگشت‌ناپذیری در مبدّل حرارت بدون اختلاط، با ترسیم در دیاگرام T-S.....۱۸۸
۳-۳-۶۳ مبدّل حرارت همراه با اختلاط.....۱۸۹
۳-۳-۶۴ معرفی و اهمیت پینچ‌پوینت در مبدّل حرارت همراه با اختلاط، با ترسیم در دیاگرام T-S.....۱۹۰
۳-۳-۶۵ چرا حرارت اصطکاکی در مبدّل حرارت‌ها مطرح نمی‌شود؟.....۱۹۱
۳-۴ حل چند مثال از فصل سوم.....۱۹۱
۳-۵ مسائل.....۱۹۵

فصل ۴. بازگشت‌ناپذیری، تأثیرپذیری و دیاگرام اگزرژی در سیکل‌های ترمودینامیکی.....۲۰۳
۴-۱ بازگشت‌ناپذیری، تأثیرپذیری و دیاگرام اگزرژی در سیکل‌های ترمودینامیکی.....۲۰۳
۴-۱-۱ دیاگرام اگزرژی و تأثیرپذیری سیکل بازگشت‌پذیر موتور حرارت کارنو.....۲۰۳
۴-۱-۲ دیاگرام اگزرژی و تأثیرپذیری در سیکل موتور حرارتِ بازگشت‌پذیر داخلی.....۲۰۴
۴-۱-۴ ارتباط تأثیرپذیری و بازده حرارتی در موتور حرارت.....۲۰۸
۴-۱-۵ دیاگرام اگزرژی و تأثیرپذیری در سیکل تبرید کارنو.....۲۰۸
۴-۱-۶ دیاگرام اگزرژی و تأثیرپذیری در سیکل تبرید واقعی.....۲۱۰
۴-۱-۷ ارتباط تأثیرپذیری و ضریب بازده در سیکل تبرید.....۲۱۲
۴-۱-۸ دیاگرام اگزرژی و تأثیرپذیری در سیکل پمپ حرارت کارنو.....۲۱۲
۴-۱-۹ دیاگرام اگزرژی و تأثیرپذیری در سیکل پمپ حرارت واقعی.....۲۱۴
۴-۱-۱۰ ارتباط تأثیرپذیری و ضریب بازده در سیکل پمپ حرارت.....۲۱۵
۴-۲ ترسیم دیاگرام‌های تفصیلیِ اگزرژی در نیروگاه‌ها و سیکل‌های ترمودینامیکی.....۲۱۶
۴-۲-۱ دیاگرام اگزرژی نیروگاه بخار.....۲۱۶
۴-۲-۲ دیاگرام اگزرژی پمپ نیروگاه بخار.....۲۱۷
۴-۲-۳ دیاگرام اگزرژی دیگ بخار در نیروگاه بخار.....۲۱۷
۴-۲-۴ دیاگرام اگزرژی کندانسور نیروگاه بخار.....۲۱۹
۴-۲-۵ دیاگرام اگزرژی توربین نیروگاه بخار.....۲۱۹
۴-۲-۶ دیاگرام اگزرژی کل نیروگاه بخار.....۲۲۰
۴-۲-۷ دیاگرام اگزرژی نیروگاه گازی.....۲۲۲
۴-۲-۸ دیاگرام اگزرژی کمپرسور نیروگاه گازی.....۲۲۲
۴-۲-۹ دیاگرام اگزرژی اتاق احتراق نیروگاه گازی.....۲۲۳
۴-۲-۱۰ دیاگرام اگزرژی توربین در نیروگاه گازی.....۲۲۴
۴-۲-۱۱ دیاگرام اگزرژی کل نیروگاه گازی.....۲۲۵
۴-۲-۱۲ دیاگرام اگزرژی یخچال تراکمی.....۲۲۶

pressline.ir

۴-۲-۱۳ دیاگرام اگزرژی کمپرسور یخچال تراکمی..... ۲۲۶
۴-۲-۱۴ دیاگرام اگزرژی کندانسور یخچال تراکمی..... ۲۲۸
۴-۲-۱۵ دیاگرام اگزرژی شیر انبساط یخچال تراکمی..... ۲۲۹
۴-۲-۱۶ نقشهٔ اگزرژی اواپراتور یخچال تراکمی..... ۲۲۹
۴-۲-۱۷ دیاگرام اگزرژی کلّی یخچال تراکمی..... ۲۳۰
۴-۲-۱۸ دیاگرام اگزرژی کلّی پمپ حرارت..... ۲۳۱
۴-۳ مثال‌های حل‌شدهٔ فصل چهارم..... ۲۳۲
۴-۴ مسائل..... ۲۳۷

فصل ۵. تابع گیبز و هلموت و تفاوت آن‌ها با نتایج حاصل از معادلهٔ اگزرژی..... ۲۴۱
۵- تابع گیبز و هلموت و تفاوت آن‌ها با نتایج حاصل از معادلهٔ اگزرژی..... ۲۴۱
۵-۱ تفاوت سیّال سادهٔتراکم‌پذیر با ترکیبات موجود در فرایندهای شیمیایی..... ۲۴۱
۵-۲ تابع گیبز..... ۲۴۲
۵-۳ تابع هلموت..... ۲۴۳
۵-۴ محاسبهٔ کار یا توان بازگشت‌پذیر در فرایند دمای ثابت..... ۲۴۳
۵-۴-۱ شرایط استفاده از تابع گیبز در محاسبهٔ توان بازگشت‌پذیر در حجم کنترل..... ۲۴۵
۵-۴-۲ مثال کاربردی در استفاده از تابع گیبز برای محاسبهٔ کار بازگشت‌پذیر داخلی..... ۲۴۵
۵-۴-۳ استفاده از تابع گیبز در سیستم با فشار و دمای ثابت..... ۲۴۵
۵-۴-۴ رابطهٔ گیبز تبخیر و گیبز میعان در سیستم..... ۲۴۶
۵-۴-۵ روش دوم اثبات برابری رابطهٔ گیبز تبخیر و گیبز میعان در سیستم..... ۲۴۷
۵-۴-۶ شرایط استفاده از تابع هلموت در محاسبهٔ کار بازگشت‌پذیر..... ۲۴۸
۵-۴-۷ شرایط استفاده از تابع هلموت در محاسبهٔ کار بازگشت‌پذیر در سیستم..... ۲۴۸
۵-۴-۸ مدل استفاده از توابع گیبز و هلموت..... ۲۴۹
۵-۴-۹ حل مثال..... ۲۴۹
۵-۵ مسائل..... ۲۵۱

فصل ۶. مبدأ اگزرژی شیمیایی..... ۲۵۳
۶- مقدّمه..... ۲۵۳
۶-۱ مبدأ اگزرژی شیمیایی وتفاوت آن با حالت مُرده (مبدأ ترمومکانیکی) در سیستم..... ۲۵۳
۶-۲ مبدأ اگزرژی شیمیایی و تفاوت آن با حالت مُرده (مبدأ ترمومکانیکی) در حجم کنترل..... ۲۵۴
۶-۳ اگزرژی کل شامل اگزرژی ترمومکانیکی و شیمیایی در سیستم..... ۲۵۵
۶-۴ اگزرژی کل شامل اگزرژی ترمومکانیکی و شیمیایی در حجم کنترل..... ۲۵۷

press.um.ac.ir

۶-۵ اگزرژی شیمیایی و مورد استفادهٔ آن در اگزوز وسایل تبدیل انرژی..... ۲۵۹
۶-۵-۱ بازیابی انرژی و اگزرژی اگزوز؛ اگزرژی شیمیایی (بازگشت‌ناپذیری شیمیایی اگزوز)..... ۲۵۹
۶-۶ روش محاسبهٔ اگزرژی شیمیایی عناصر و ترکیبات مختلف..... ۲۶۰
۶-۷ محاسبهٔ اگزرژی کلّی مخلوط گازهای ایدئال با مبنای تعادل شیمیایی..... ۲۶۰
۶-۷-۱ اگزرژی کلّی گازهای ایدئال در سیستم با مبنای تعادل شیمیایی..... ۲۶۱
۶-۷-۲ اگزرژی کلّی گازهای ایدئال در حجم کنترل با مبنای تعادل شیمیایی..... ۲۶۲
۶-۸ محاسبهٔ اگزرژی کلّی فرایندهای تهویه مطبوع با مبنای تعادل شیمیایی..... ۲۶۳
۶-۸-۱ محاسبهٔ اگزرژی کلّی هوای طبیعی با مبنای تعادل شیمیایی به‌ازای واحد جرم هوای خشک موردنیاز در فرایندهای تهویه مطبوع..... ۲۶۳
۶-۸-۲ محاسبهٔ اگزرژی کلّی آب مایع یا بخار با مبنای تعادل شیمیایی..... ۲۶۶
۶-۸-۳ محاسبهٔ اگزرژی کلّی مایع با مبنای تعادل شیمیایی..... ۲۶۷
۶-۸-۳ حل مثال محاسبهٔ اگزرژی کلّی فرایندهای تهویهٔ مطبوع..... ۲۶۹
۶-۹ اگزرژی شیمیایی سوخت..... ۲۷۲
۶-۹-۱ تعریف اگزرژی شیمیایی سوخت..... ۲۷۳
۶-۹-۲ محاسبهٔ اگزرژی شیمیایی سوخت..... ۲۷۳
۶-۹-۳ محاسبهٔ اگزرژی شیمیایی سوختِ هیدروکربنی با رفتار گاز ایدئال..... ۲۷۴
۶-۹-۴ حل مثال محاسبهٔ اگزرژی سوخت..... ۲۷۷
مسائل..... ۲۷۷

فصل ۷. اگزرژی احتراق..... ۲۷۹
۷- معادلهٔ اگزرژی در فرایند احتراق..... ۲۷۹
۷-۱ معادلهٔ اگزرژی در فرایند احتراق با مبدأ شیمیایی..... ۲۷۹
۷-۱-۱ معرفی اجزای معادلهٔ اگزرژی در فرایند احتراق با مبدأ شیمیایی..... ۲۸۰
۷-۱-۲ بازگشت‌ناپذیری در فرایند احتراق..... ۲۸۰
۷-۱-۳ بازگشت‌ناپذیری احتراق..... ۲۸۱
۷-۲ معادلهٔ اگزرژی در فرایند احتراق با مبدأ ترمومکانیکی..... ۲۸۱
۷-۳ قابلیت کاردهی احتراق با توجه به معادلهٔ گیبز..... ۲۸۱
۷-۴ معادلهٔ اگزرژی در نیروگاه بخار..... ۲۸۲
۷-۴-۱ اگزرژی خروجی از دهانهٔ اگزوز با مبنای شیمیایی..... ۲۸۳
۷-۴-۲ معادلهٔ اگزرژی با مبنای شیمیایی در نیروگاه بخار..... ۲۸۴
۷-۵ دیاگرام اگزرژی نیروگاه بخار با تحلیل اگزرژی برمبنای شیمیایی..... ۲۸۵
۷-۶ معادلهٔ اگزرژی بر مبنای شیمیایی در توربین گازی..... ۲۸۵

press.um.ac.ir

۷-۷ دیاگرام اگزرژی برمبنای شیمیایی در توربین‌های گازی..... ۲۸۶
۷-۸ معادلهٔ اگزرژی با مبنای شیمیایی در موتور احتراق داخلی..... ۲۸۷
۷-۹ دیاگرام اگزرژی برمبنای شیمیایی در موتورهای احتراق داخلی..... ۲۸۸
۷-۱۰ حل مثال فصل هفتم..... ۲۸۸

فصل ۸. مسائل حل‌شده و پاسخ به سؤالات کتاب..... ۲۹۵

جداول ترمودینامیکی..... ۳۲۵
منابع..... ۳۶۴
نمایه..... ۳۶۵

press.um.ac.ir

مقدّمه

در تمام مدّت کار دانشگاهی، اعمّ از تدریس و پژوهش، این دغدغه در ذهنم بوده است که دستاوردهای حاصل از بحث و طرح مباحث ارزشمند و پیچیده با جوانان مستعد و نخبهٔ ارشد و دکتری، می‌توانند چاپ و تکثیر شوند. این کتاب برای دانشجویانِ مهندسی کارشناسی علاقه‌مند به‌عنوان یک کتاب فوق درسی، به‌خصوص در مباحث انتروپی، برای دانشجویانِ تحصیلات تکمیلی به‌عنوان کتاب درسی و برای پژوهشگران و همکاران گرامی که درزمینهٔ انرژی و اَگزرژی (قانون اوّل و دوم ترمودینامیک)، تدریس و پژوهش می‌کنند، می‌تواند مورداستفاده واقع شود.

در این کتاب، انتروپی و اگزرژی موردبحث واقع شده و سعی شده است انتروپی، اگزرژی و استفادهٔ آن در تحلیل‌های مهندسی ابهام‌زدایی شود. در ادامه، ارتباط رابطهٔ گیبز و هلموت با معادلهٔ اگزرژی، اگزرژی با مبنای شیمیایی (مبنای فنا شدن در محیط) و اگزرژی احتراق مطرح شده است.

در مباحث ارائه‌شده، به‌ندرت و به‌ضرورت از کتاب وارک[1]، پرفسور فقید دانشگاه پردو، استفاده شده است؛ در این مواقع، آدرس این مرجع آورده شده است. ولیکن اکثر مطالب با نوآوری‌های مؤلّف تدوین شده است. این کتاب نتیجهٔ بیست سال تدریس مؤلّف در مقطع تحصیلات تکمیلی است و تألیف این کتاب نزدیک به هفت سال از ابتدای تصمیم به نوشتن در کنار سایر فعالیت‌های آموزشی و پژوهشی زمان برده است.

در فصل اوّل این کتاب، یادآوری ترمودینامیک مقدّماتی، در فصل دوم قانون دوم ترمودینامیک و مباحث انتروپی، در فصل سوم مبحث اگزرژی، در فصل چهارم بازگشت‌ناپذیری و نقشه‌های اگزرژی با مبنای ترمومکانیکی، در فصل پنجم ارتباط رابطهٔ گیبز و هلموت با معادلهٔ اگزرژی، در فصل ششم اگزرژی با مبنای شیمیایی و در فصل هفتم اگزرژی احتراق ارائه شده است. در هر فصل، مسائل نمونه حل شده و در انتهای هر فصل سئوالات و مسائل پیشنهادی جهت پاسخ و حل آورده شده است.

از خوانندگان محترم نکته‌سنج درخواست می‌کنم درصورت مشاهدهٔ سهو و لغزش احتمالی که لازمهٔ طبیعت بشری است، از تذکر به این‌جانب برای تصحیح در چاپ‌های بعدی دریغ نفرمایند.

محسن قاضی‌خانی
تابستان ۱۴۰۰

1. Wark

press.iran.ir