

برنام خدا

# ترمودیک پیشرفته

مهندس هادی جلالی فر

سرشناسه: هادی جلالی فر / ۱۳۶۷

عنوان و نام پدید آورنده: ترمودینامیک پیشرفته / هادی جلالی فر  
مشخصات نشر: تهران: پژوهشی دیبای دانش، لاهیجان: ندای سبز شمال، ۱۳۹۳  
مشخصات ظاهری: ۳۷ص: مصور، جدول، نمودار  
شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۹۳۸۶۴-۲-۷

وضعیت فهرست نویسی: فیبا

موضوع: ترمودینامیک — آموزشی (عالی)

موضوع: ترمودینامیک — آزمون ها و تمرین ها (عالی)

موضوع: ترمودینامیک — مسائل، تمرین ها و غیره (عالی)

رده بندی کلاسیک: ۱۳۹۳ ق ۸ ج ۱۱ QC۲۱۱

رده بندی دیبا: ۶۲۱/۴۰۲۱

شماره کتابخانه: ۳۶۰۸۹۴۹



تهران - خیابان حजरین عدی - خیابان - شهید تنهاجو

پلاک

تلفن: ۸۵۳۸ ۷۷۱ راه: ۰۹۱۲۴۸۵۹۵۶۲



عنوان کتاب: ترمودینامیک پیشرفته

مؤلف: مهندس هادی جلالی فر

ناشر: نشر پژوهشی دیبای دانش

ناشر همکار: ندای سبز شمال

نوبت و تاریخ چاپ: چاپ اول: ۱۳۹۳

تیراژ: ۵۰۰ نسخه

لیتوگرافی: فرانقش

چاپ: دیبا

قیمت: ۲۸۰۰۰۰ ریال

برای کسب اطلاعات بیشتر از این مجموعه با آدرس ایمیل زیر مکاتبه فرمایید

Diba\_Danesh10904@yahoo.com

## مقدمه

به نام آن که جان را فکرت آموخت

همچنان آرام گیرم در حصار بغض خود

همچنان چیزی نگویم در کمین شعر خود

همره سیر زمان خواهیم شد و افسار کویم در زمان

تا سکوتم بشکند در چاره‌های صبر خود

«صبا جلالی‌فر»

به نام آن که علم را آموخت، به نام آن که جان داد، به نام آن که هستی بخشید، به نام آن که بر قلم سوگند فرود آورد، به نام آن که حرمت بخشید بر آنچه می‌نگارد.

قلم بر دستاتم نمی‌چرخد، یادش نگارنده کلمات را ندارم، درگیری افکار، مجال نگاریدن نمی‌دهد، جز سر تعظیم بر آوردن «استان جانان، شکر بسی مزید از ایزد هستی».

خداوندگار صاحب افکار، صاحب انگار را چون کودکی، از هر آنچه دل تنگت می‌خواهد بگوی، سپاس می‌دارم و این که مرا سعادت نیست تا در همین سر خود را به رشته‌ی تحریر درآورم و منتی بی‌منت، به نور دیده‌ی بصیرت در روانم جاری شود. سرشتم قرار داد سرسپاسی بی‌حد و مقدار تقدیم می‌دارم.

آنچه اثری از هرکسی به جای می‌ماند بسان اولادی که با او می‌یادگار می‌ماند و جاودان می‌گردد، حلاوتی غیرقابل وصف به جان آدمی می‌بخشد به گونه‌ی افکار را بر صفحه‌ی روزگار حک نموده و شیرین‌تر از شیرینی فرهادی که بیستون را نگاشته.

آنچه معناگر واژه‌ی «من» برای حقیر بود، آنچه مرا معنا بخشید، شکر باد، جان داد، همت ساخت، پولادین اراده بخشید، حرم نفس‌های پدرم، مادرم، بی‌ریا دوستی هستی، بی‌بدیل همراهان زندگیم، بی‌منت انسان‌های کوهی خاکی بودند.

دستان پاک پدرم، کوه استوار زندگیم، مادرم، زندگی‌بخش زندگیم را بوسه می‌نهم که همواره دستم بگیرفت و پا به پا برد.

آنچه مرا به پیش راندن وا می‌دارد، آنچه لهیب آتش درونم را به التهاب می‌کشاند چشمان منتظر همراهانم، دل‌های نگران آنها که از دل نظاره‌گر ترقی و پیشرفتم هستند. آنان که مرا از پیش‌بران می‌دانند.

من سپاس بی‌کران نیز نثار همه‌ی آنان می‌کنم که کوتاهی افکارشان سنگریزه‌هایی را در مسیرم قرار داد، همان سنگریزه‌هایی که قوتم بخشید، نیرومندترم گرداند.

این اثر که عنوان ترمودینامیک را به یدک می‌کشد حاصل دسترنج چندین ساله‌ی حقیر در حوزه‌ی مهندسی مکانیک با رویکردی متفاوت از آنچه که بر بازار کتاب حکمفرماست. تلاش نموده‌ام چکیده‌ی مطالب مفید و سودمند را در قالب درس‌نامه‌ی کامل با ذکر تمامی جزئیات در کنار مثال‌های متنوع و همه‌ی تست‌های کارشناسی ارشد با تحلیل کاملاً تشریحی قرار دهم، از ایجاز و موجز، افراط و تفریط، چشم پوشیده‌ام تا خوانندگان و دانشجویان درگیر مسائل غیرضروری نگردد.

امید آن دارم که این کتاب گامی هرچند کوتاه، اثری هرچند ناچیز در مسیر پیشبرد اهداف عالی داشته باشد.

چون حقیر ساعی چندین ساله‌ی حقیر به بار ثمر بنشیند. رویکرد متفاوت رویکردی پژوهشی در راستای تجزیه و تحلیل جزء به جزء مطالب درسی هم برای قسمت اول ترمودینامیک به عنوان ترمودینامیک ۱ و هم برای قسمت دوم به عنوان ترمودینامیک ۲ نامیده شده است. چون کتاب قبلی از مناسبت، جناب آقای مهندس محمدی و خانواده‌ی محترمشان چون یک خانواده در کنارم بود، از آقای بزرگوارم دبیر فرهنگی جناب آقای بهروز جلالی فر و تمام اساتیدم در دانشگاه صنعتی شریف که در زمانی کوتاه تأثیر شگرفی در من ایجاد نمودند کمال امتنان و سپاسگزاری را دارم.

زندگی صحنه‌ی یکتای هنرمندان است  
هرکسی نغمه‌ی خود خواند و از صحنه رود  
صحنه پیوسته بجاست

خرم آن نغمه که مردم بسپارند به یاد....

هادی جلالی فر - پاییز ۱۳۸۳ خورشیدی - ایستخت ایران زمین، تهران

## فهرست

|    |                                                 |
|----|-------------------------------------------------|
| ۱۳ | فصل ۱/ خواص مواد خالص                           |
| ۱۳ | مقدمه:                                          |
| ۱۳ | سیستم ترمودینامیکی و حجم کنترل                  |
| ۱۴ | ترمودینامیک کلاسیک و آماری                      |
| ۱۵ | خواص مواد                                       |
| ۱۵ | خواص ترمودینامیکی                               |
| ۱۶ | تعادل ترمودینامیکی                              |
| ۱۶ | فرآیندهای سیکل‌ها                               |
| ۱۷ | خواص سیستم                                      |
| ۱۹ | فشار مطلق و نسبی (مطلق و مطلق)                  |
| ۲۰ | وسایل اندازه‌گیری فشار                          |
| ۲۲ | تساوی دما و قانون صفرام ترمودینامیک             |
| ۲۳ | خواص مواد خالص                                  |
| ۲۴ | دمای اشباع و فشار اشباع                         |
| ۲۶ | تحلیل نمودارهای $P-T$ , $P-V$ , $T-V$ ماده خالص |
| ۲۶ | نتایج برگرفته از نمودار $T-V$ عبارتند از:       |
| ۳۳ | معادله حالت                                     |
| ۳۵ | فشار کاهیده و دمای کاهیده                       |
| ۳۶ | معادله حالت واندروالس                           |
| ۳۷ | مسائل نمونه‌ی فصل اول                           |
| ۴۶ | آزمون فصل اول                                   |
| ۵۱ | حل تشریحی نمونه‌ی سؤالات کارشناسی ارشد فصل اول  |
| ۵۵ | فصل ۲/ کار                                      |
| ۵۶ | واحدهای کار                                     |
| ۵۸ | توابع نقطه‌ای و مسیری                           |
| ۶۰ | کار در مرز متحرک یک فرآیند غیرتعادلی            |
| ۶۰ | کار در سیستم‌های مرز متحرک                      |
| ۶۵ | حرارت (گرما)                                    |
| ۶۶ | واحدهای حرارت                                   |
| ۶۶ | انواع انتقال حرارت                              |
| ۶۸ | تشابه کار و حرارت                               |

|     |                                                 |
|-----|-------------------------------------------------|
| ۶۸  | تفاوت کار و حرارت                               |
| ۶۹  | مسائل نمونه فصل دوم                             |
| ۷۳  | تست های طبقه بندی شده فصل دوم                   |
| ۸۰  | حل تشریحی آزمون های فصل دوم                     |
| ۸۷  | <b>فصل ۳/ قانون اول ترمودینامیک</b>             |
| ۸۷  | قانون اول ترمودینامیک                           |
| ۸۹  | انرژی داخلی                                     |
| ۹۰  | حجم مخصوص                                       |
| ۹۰  | آنتالپی                                         |
| ۹۳  | گرمای ویژه و حجم ثابت و گرمای ویژه در فشار ثابت |
| ۹۵  | انرژی داخلی آنتالپی و گرمای ویژه گازهای ایده آل |
| ۱۰۰ | گرمای نهان ذوب تبخیر                            |
| ۱۰۰ | درجه حرارت تادل                                 |
| ۱۰۱ | قانون اول ترمودینامیک و معادله شدت              |
| ۱۰۵ | تحلیل قانون اول ترمودینامیک براساس حجم کنترل    |
| ۱۰۶ | رابطه آهنگ (شدت) جریان جرمی و خواص موضعی سیال   |
| ۱۰۶ | کار جریان                                       |
| ۱۰۷ | انرژی کل سیال در حال جریان                      |
| ۱۰۷ | بسط قانون اول ترمودینامیکی برای حجم کنترل       |
| ۱۰۸ | فرایند در حالت پایا (دائم) <i>SSSF</i>          |
| ۱۰۹ | نتایج مفروضات مدل پایا                          |
| ۱۰۹ | مدل پایا با یک جریان ورودی و خروجی در حجم کنترل |
| ۱۱۰ | نمونه هایی از فرایند پایا                       |
| ۱۱۱ | نازل (شیوره)                                    |
| ۱۱۲ | دیفیوزر (پخش کن)                                |
| ۱۱۲ | دریچه کنترل (فشارشکن) و فرایند اختناق           |
| ۱۱۵ | توربین                                          |
| ۱۱۷ | کمپرسور، پمپ، فن                                |
| ۱۱۸ | منطقه اختلاط                                    |
| ۱۱۹ | جریان در لوله و مجراها                          |
| ۱۲۰ | فرایندهای ناپایا                                |
| ۱۲۰ | فرایند یکنواخت <i>USUF</i>                      |

|     |                                                  |
|-----|--------------------------------------------------|
| ۱۲۰ | فرضیات مدل یکنواخت                               |
| ۱۲۲ | حالات خاص                                        |
| ۱۲۵ | مسائل نمونه فصل سوم                              |
| ۱۳۱ | آزمون فصل سوم                                    |
| ۱۴۷ | حل تشریحی آزمون فصل سوم                          |
| ۱۶۳ | <b>فصل ۱۱ قانون دوم ترمودینامیک</b>              |
| ۱۶۳ | مقدمه                                            |
| ۱۶۳ | موتورهای ترمودینامیکی (ماشین‌های گرمایی)         |
| ۱۷۱ | قانون دوم ترمودینامیک: بیان کلون - پلانک         |
| ۱۷۱ | قانون دوم ترمودینامیک: بیان کلازیوس              |
| ۱۷۲ | ماشین‌های دائم (موتورهای)                        |
| ۱۷۳ | فرایندهای برگشت پذیر                             |
| ۱۷۴ | فرایندهای برگشت پذیر داخلی                       |
| ۱۷۷ | مقیاس دمای ترمودینامیکی                          |
| ۱۷۹ | قیاس ماشین‌های ایده‌آل و حقیقی                   |
| ۱۸۰ | مسائل نمونه فصل چهارم                            |
| ۱۸۳ | آزمون فصل چهارم                                  |
| ۱۹۴ | حل تشریحی آزمون فصل چهارم                        |
| ۲۰۷ | <b>فصل ۱۲ آنتروپی، برگشت پذیری و اکسرژی</b>      |
| ۲۰۷ | نامساوی کلازیوس                                  |
| ۲۰۹ | قانون سوم ترمودینامیک                            |
| ۲۰۹ | آنتروپی یک ماده خالص                             |
| ۲۱۳ | تغییر آنتروپی سیستم در فرایندهای برگشت پذیر      |
| ۲۱۵ | روابط گیبس                                       |
| ۲۱۷ | تغییر آنتروپی سیستم در فرایندهای برگشت ناپذیر    |
| ۲۲۰ | اصل افزایش آنتروپی                               |
| ۲۲۳ | تغییر آنتروپی برای مواد جامد یا مایع             |
| ۲۲۴ | تغییر آنتروپی گازهای ایده‌آل                     |
| ۲۲۷ | فرایند پلی تروپیک برگشت پذیر برای یک گاز ایده‌آل |
| ۲۲۹ | آنتروپی به صورت معادله شدت                       |
| ۲۲۹ | قانون دوم ترمودینامیک برای حجم کنترل             |
| ۲۳۰ | قانون دوم ترمودینامیک در فرایندهای پایا و گذرا   |

|     |                                                          |
|-----|----------------------------------------------------------|
| ۲۳۱ | قرابند برگشت پذیر پایا                                   |
| ۲۳۴ | کار کمپرسور                                              |
| ۲۳۵ | اصل افزایش آنتروپی در حجم کنترل                          |
| ۲۳۵ | بازده                                                    |
| ۲۴۰ | کار برگشت پذیر                                           |
| ۲۴۳ | برگشت ناپذیری                                            |
| ۲۴۴ | اکسرژی (قابلیت کاردهی)                                   |
| ۲۴۵ | دسترس پذیری (اکسرژی) جریان و بدون جریان                  |
| ۲۴۷ | بازده قایم دوم                                           |
| ۲۴۹ | معادله شدت اکسرژی                                        |
| ۲۵۱ | اکسرژی، روابط بین شکل های مختلف انرژی                    |
| ۲۵۳ | اتلاف اکسرژی                                             |
| ۲۵۴ | مسائل نمونه فصل پنجم                                     |
| ۲۶۳ | آزمون فصل پنجم                                           |
| ۲۸۴ | حل تشریحی آزمون فصل پنجم                                 |
| ۳۰۷ | فصل ۶/ سیستم های قدرت تبرید                              |
| ۳۰۷ | مقدمه                                                    |
| ۳۱۲ | مشکلات ایجاد سیکل بخاری کارنو (شکل ۴-۶ الف)              |
| ۳۱۳ | سیکل رانکین                                              |
| ۳۱۹ | سیکل بازگرمایش (گرمایش مجدد)                             |
| ۳۲۱ | سیکل بازتاب                                              |
| ۳۲۶ | همزایی (تولید مشترک)                                     |
| ۳۲۷ | سیکل های استاندارد هوا                                   |
| ۳۲۹ | سیکل اتو                                                 |
| ۳۳۳ | سیکل دیزل                                                |
| ۳۳۶ | سیکل استرلینگ                                            |
| ۳۳۸ | سیکل اریکسون                                             |
| ۳۳۹ | سیکل برایتون                                             |
| ۳۴۳ | سیکل گازی با بازیاب                                      |
| ۳۴۶ | سیکل گازی (برایتون) با خنک کن میانی، بازگرمایش و بازیابی |
| ۳۴۸ | سیکل استاندارد هوا برای پیش رانش جت                      |
| ۳۵۰ | سیکل های تبرید                                           |

|     |                                                                    |
|-----|--------------------------------------------------------------------|
| ۳۵۰ | سیکل تراکمی ایده آل                                                |
| ۳۵۲ | انحراف سیکل تبرید تراکم واقعی از حالت ایده آل                      |
| ۳۵۴ | سیکل سرمایه‌ش جذبی آمونیاک                                         |
| ۳۵۶ | سیکل تبرید استاندارد هوایی (تبرید گازی)                            |
| ۳۵۸ | سیستم‌های ترکیبی سیکل قدرت و سیکل تبرید                            |
| ۳۵۹ | مسائل نمونه فصل ششم                                                |
| ۳۷۰ | آزمون فصل هفتم                                                     |
| ۳۷۷ | حل تشریحی آزمون فصل هفتم                                           |
| ۳۸۳ | <b>فصل ۷ مخلوط گازها</b>                                           |
| ۳۸۳ | کسر جرمی و مولی                                                    |
| ۳۸۴ | مخلوط گازهای ایده آل و واقعی                                       |
| ۳۸۵ | مدل دالتون                                                         |
| ۳۸۶ | مدل آماگات                                                         |
| ۳۸۹ | روابط کلی مخلوط‌ها                                                 |
| ۳۹۰ | مخلوط‌های گاز - بخار                                               |
| ۳۹۰ | نقطه شبنم                                                          |
| ۳۹۲ | هوای خشک و هوای مرطوب                                              |
| ۳۹۳ | رطوبت نسبی $\phi$                                                  |
| ۳۹۴ | رطوبت مخصوص $w$ و درجه اشباع                                       |
| ۳۹۶ | آنتالپی هوای اتمسفریک                                              |
| ۳۹۷ | فرآیند اشباع آدیاباتیک                                             |
| ۳۹۹ | دمای حباب - خیس و دمای حباب خشک                                    |
| ۴۰۲ | نمودار رطوبت - ستجی                                                |
| ۴۰۴ | فرآیند تهویه مطبوع                                                 |
| ۴۰۶ | مسائل نمونه فصل هفتم                                               |
| ۴۱۱ | آزمون فصل هفتم                                                     |
| ۴۱۴ | حل تشریحی آزمون فصل هفتم                                           |
| ۴۱۷ | <b>فصل ۸ روابط ترمودینامیکی</b>                                    |
| ۴۱۷ | روابط ریاضی برای فاز همگن                                          |
| ۴۱۷ | روابط ماکسول                                                       |
| ۴۱۸ | معادله کلاپرون                                                     |
| ۴۲۲ | روابط ترمودینامیکی شامل آنتالپی، آنالوژی، انرژی داخلی، $CP$ ، $CV$ |

|     |                                                    |
|-----|----------------------------------------------------|
| ۴۲۴ | انبساط پذیری حجمی و تراکم پذیری تک دما و آدیاباتیک |
| ۴۲۵ | رفتار گازهای واقعی و دمای بویل                     |
| ۴۲۹ | مسائل نمونه فصل هشتم                               |
| ۴۳۲ | آزمون فصل هشتم                                     |
| ۴۴۰ | حل تشریحی آزمون فصل هشتم                           |
| ۴۴۹ | <b>فصل ۹/ واکنش های شیمیایی</b>                    |
| ۴۵۰ | فرآیند احتراق                                      |
| ۴۵۱ | روای نظری (هوای تئوری)                             |
| ۴۵۲ | نسبت هوا به سوخت (AF)                              |
| ۴۵۴ | تأثیر دمای واکنش                                   |
| ۴۵۵ | آنتالپی تشکیل                                      |
| ۴۵۶ | آنتالپی و شش تراشه                                 |
| ۴۵۶ | ارزش گرمایی سوخت                                   |
| ۴۵۸ | نقطه شبنم محصولات                                  |
| ۴۵۹ | قانون اول در سیستم های واکنشی                      |
| ۴۶۰ | دمای شعله آدیاباتیک                                |
| ۴۶۱ | قانون سوم ترمودینامیک                              |
| ۴۶۱ | قابلیت کاردهی برای سیستم های واکنشی                |
| ۴۶۲ | ارزیابی فرایندهای احتراق واقعی                     |
| ۴۶۳ | مسائل نمونه فصل نهم                                |
| ۴۶۸ | آزمون فصل نهم                                      |
| ۴۷۲ | حل تشریحی آزمون فصل نهم                            |
| ۴۷۷ | پیموست                                             |