

طراحی سامانه‌های تبرید و سردخانه

تألیف

دکتر محمدعلی اخوان بهابادی

مهندس مجتبی مغاری

توجه!

این کتاب مشمول قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان است. تکثیر کتاب به هر روش اعم از فتوکپی، ریسوگرافی، تهیه فایل‌های pdf، لوح فشرده، بازنویسی در وبلاگ‌ها، سایت‌ها، مجله‌ها و کتاب، بدون اجازه کتبی ناشر مجاز نیست و موجب پیگرد قانونی می‌شود.



انتشارات دانشگاه تهران

شماره ۳۲۴۹

شماره مسلسل ۷۰۴۵

اخوان بهابادی، محمدعلی، ۱۳۳۱. طراحی سامانه‌های تبرید و سردخانه / تألیف محمدعلی اخوان بهابادی. مجتبی مغاری. — تهران: دانشگاه تهران، مؤسسه انتشارات، ۱۳۹۰. ف، ۳۵۰ ص.؛ تصویر، جدول، نمودار (انتشارات دانشگاه تهران: شماره ۳۲۴۹). ISBN 978-964-03-6240-2	
فهرست‌نویس براساس اطلاعات فبا کتابنامه. سردسازی و دستگاه‌های سردکننده. تهویه مطبوع. مغاری، مجتبی، ۱۳۵۸ - دانشگاه تهران. مؤسسه انتشارات. ۱۳۹۰ ۹۶۴/۵۱ TP ۴۹۲ / الف ۳ ط ۴ شماره کتابشناسی ملی ۲۵۵۳۹۴۹	

ISBN: 978-964-03-6240-2



9 789640 362402

عنوان: طراحی سامانه‌های تبرید و سردخانه
تألیف: دکتر محمدعلی اخوان بهابادی - مهندس مجتبی مغاری
ویراستار: مرضیه ثمره حسینی
نوبت چاپ: اول
تاریخ انتشار: ۱۳۹۰
شمارگان: ۱۰۰۰ نسخه
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران
چاپ و صحافی: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

«مسئولیت صحت مطالب کتاب با مؤلفان است»
«کلیه حقوق برای ناشر محفوظ است»

بها: ۸۲۰۰۰ ریال

خیابان کارگر شمالی - خیابان شهید فرشی مقدم - مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران
پست الکترونیک: press@ut.ac.ir - سایت: www.press.ut.ac.ir
پخش و فروش: تلفکس ۸۸۰۱۲۰۷۸

فهرست

ع	مقدمه
۱	فصل اول
۱	مقدمه‌ای بر علم ترمید و کاربردهای آن
۷	فصل دوم
۷	مروری بر مفاهیم ترمودینامیک و انتقال حرارت
۷	۱-۲- خواص ترمودینامیکی
۷	۱-۲-۲- چگالی و حجم ویژه
۷	۲-۲-۲- فشار
۹	۳-۲-۲- درجه حرارت
۹	۴-۲-۲- گرمای ویژه
۱۰	۳-۲- فرایند ترمودینامیکی
۱۰	۴-۲- سیستم و حجم کنترل
۱۱	۵-۲- انرژی
۱۲	۶-۲- حرارت
۱۳	۱-۶-۲- هدایت
۱۳	۲-۶-۲- جابه جایی
۱۴	۳-۶-۲- تابش
۱۴	۷-۲- کار
۱۵	۸-۲- قانون اول ترمودینامیک
۱۷	۹-۲- قانون دوم ترمودینامیک
۱۹	۱۰-۲- روابط بین خواص ترمودینامیکی
۲۰	۱۱-۲- کار و انتقال حرارت ماکزیمم
۲۱	۱۲-۲- گاز کامل
۲۲	۱۳-۲- مواد تراکم ناپذیر
۲۳	۱۴-۲- فرایندهای تغییر فاز مواد خالص
۲۵	مراجع

۲۷.....	فصل سوم
۲۷.....	سامانه تبرید هوایی
۲۷.....	۱-۳- پارامترهای مهم در سامانه تبرید
۲۷.....	۱-۱-۳- تن سرمایشی
۲۸.....	۱-۲- اثر تبرید
۲۸.....	۱-۳- ضریب عملکرد
۲۸.....	۲-۳- چرخه تبرید هوایی استاندارد
۳۴.....	۳-۳- سامانه خنک‌کننده هواپیما
۳۶.....	۱-۳-۳- سامانه ساده تبرید هوایی در هواپیما
۴۴.....	۴-۳- چرخه تبرید استاندارد هوا با بازتاب
۴۷.....	۵-۳- فن‌آوری دست‌یابی به دماهای بسیار پایین (کرایوژنیک)
۴۹.....	مسائل:
۵۴.....	مراجع:
۵۵.....	فصل چهارم
۵۵.....	سامانه تبرید تراکمی بخار
۵۷.....	۱-۴- چرخه معکوس کارنو
۵۹.....	۲-۴- چرخه ایده‌آل تبرید تراکمی بخار (ساده)
۶۲.....	۳-۴- آثار تغییرات در شرایط عملکرد سامانه تبرید تراکمی بخار
۶۲.....	۱-۳-۴- اثر دما و فشار اواپراتور
۶۳.....	۲-۳-۴- اثر دما و فشار کندانسور
۶۳.....	۳-۳-۴- اثر فوق‌داغ (سوپرهیت) کردن بخار مکش در ورود به کمپرسور
۶۴.....	۴-۳-۴- اثر مادن سرد کردن میرد
۶۷.....	۴-۴- چرخه واقعی تبرید تراکمی بخار
۷۱.....	مسائل:
۷۵.....	مراجع:
۷۷.....	فصل پنجم
۷۷.....	سامانه تبرید جذبی
۷۸.....	۱-۵- سامانه تبرید جذبی ساده
۷۹.....	۲-۵- چرخه ایده‌آل تبرید جذبی
۸۱.....	۳-۵- سامانه تبرید جذبی برومیدلئیم- آب

۸۱.....	۵-۳-۱- خواص دما- فشار- غلظت محلول پرومیدلیم- آب
۸۲.....	۵-۳-۲- خواص انتالپی- دما- غلظت محلول پرومیدلیم- آب
۸۸.....	۵-۳-۳- سامانه تبرید جذبی همراه با مبدل حرارتی (بازیاب)
۹۱.....	۵-۳-۴- واحدهای جذبی تجاری
۹۲.....	۵-۳-۵- بلور شدن محلول در سامانه‌های تبرید جذبی
۹۲.....	۵-۳-۶- سامانه ترکیبی تراکمی بخار و جذبی
۹۳.....	۵-۴- سامانه تبرید جذبی آب- آمونیاک
۹۴.....	۵-۵- خواص محلول‌های دوگانه
۹۶.....	۵-۵-۱- نمودار دما- غلظت محلول‌ها
۹۸.....	۵-۵-۲- نمودار انتالپی- غلظت محلول‌ها
۱۰۰.....	۵-۵-۳- فرایند اختلاط بی‌دررو
۱۰۳.....	۵-۵-۴- فرایند اختلاط همراه با انتقال حرارت
۱۰۵.....	۵-۵-۵- فرایند خفگی
۱۰۶.....	۵-۶- سامانه تبرید جذبی سه‌سیالی
۱۰۹.....	مسائل:
۱۱۳.....	مراجع:
۱۱۵.....	فصل ششم
۱۱۵.....	سامانه تبرید جت بخار
۱۱۶.....	۶-۱- اجزای سامانه تبرید جت بخار
۱۱۷.....	۶-۲- بررسی ترمودینامیکی سامانه تبرید جت بخار
۱۲۴.....	مسائل:
۱۲۷.....	مراجع:
۱۲۹.....	فصل هفتم
۱۲۹.....	سامانه تبرید تراکمی بخار چندمرحله‌ای
۱۲۹.....	۷-۱- جداسازی بخار و مایع مبرد
۱۳۴.....	۷-۲- خنک کردن میانی
۱۴۰.....	۷-۳- سامانه‌های تبرید مجهز به چند اواپراتور و چند کمپرسور
۱۴۱.....	۷-۳-۱- سامانه‌های تبرید با یک کمپرسور
۱۴۲.....	۷-۳-۱-۱- حالت اول: سامانه‌هایی که دمای کارکرد همه اواپراتورها در آن‌ها یکسان است
۱۴۲.....	۷-۳-۱-۲- حالت دوم: استفاده از شیرهای فشارشکن مستقل برای هر اواپراتور

۱۴۴.....	۷-۳-۱-۳- حالت سوم: استفاده از شیرهای فشارشکن مرکب
۱۴۸.....	۷-۳-۲- سامانه‌های مجهز به کمپرسورهای مستقل برای هر اواپراتور
۱۴۸.....	۷-۳-۲-۱- حالت اول: استفاده از شیر فشارشکن مستقل برای هر اواپراتور
۱۵۰.....	۷-۳-۲-۲- حالت دوم: استفاده از شیر فشارشکن مرکب
۱۵۱.....	۷-۳-۳- استفاده از تراکم مرکب در سامانه‌های تبرید تراکمی بخار
۱۵۲.....	۷-۳-۳-۱- حالت اول: استفاده از شیر فشارشکن مستقل برای هر اواپراتور
۱۵۴.....	۷-۳-۳-۲- حالت دوم: استفاده از شیرهای فشارشکن مرکب
۱۵۷.....	مسائل:
۱۶۱.....	مراجع:
۱۶۳.....	فصل هشتم
۱۶۳.....	میردها
۱۶۳.....	۸-۱- انواع میردها براساس ترکیبات شیمیایی آن‌ها
۱۶۳.....	۸-۱-۱- ترکیبات هالوکربن
۱۶۴.....	۸-۱-۲- هیدروکربن‌ها
۱۶۵.....	۸-۱-۳- ترکیبات غیر آلی
۱۶۵.....	۸-۱-۴- آزن‌تروپها
۱۶۶.....	۸-۲- خواص ترمودینامیکی برخی از میردهای رایج
۱۶۷.....	۸-۳- مطالعه میردها از نظر ایمنی و آثار زیست محیطی آن‌ها
۱۶۹.....	۸-۴- انتخاب میردها
۱۶۹.....	۸-۴-۱- پارامترهای تعیین‌کننده در انتخاب یک میرد اولیه مطلوب
۱۷۰.....	۸-۴-۲- کاربرد اصلی برخی از میردهای رایج
۱۷۱.....	۸-۵- میردهای ثانویه
۱۷۵.....	مراجع:
۱۷۷.....	فصل نهم
۱۷۷.....	محاسبات بار سرمایشی سردخانه‌ها
۱۷۷.....	۹-۱- بار سرمایشی ناشی از انتقال حرارت از طریق دیوارها، سقف و کف سردخانه
۱۷۸.....	۹-۱-۱- محاسبه انتقال حرارت ناشی از هدایت حرارتی در جداره‌های سردخانه
۱۸۹.....	۹-۱-۲- روش‌های عایق کاری جداره‌های سردخانه
۱۹۱.....	۹-۱-۳- انتقال حرارت تشعشعی ناشی از تابش خورشید
۱۹۲.....	۹-۲- بار سرمایشی ناشی از نفوذ هوای گرم به داخل سردخانه

۱۹۶.....	۳-۹- بار محصولات گرم ورودی به سردخانه.....
۲۰۰.....	۴-۹- بارهای متفرقه.....
۲۰۱.....	۵-۹- بار سرمایشی کل سردخانه.....
۲۰۴.....	۶-۹- روش کوتاه محاسبه بار سردخانه.....
۲۰۶.....	مراجع:
۲۰۷.....	فصل دهم.....
۲۰۷.....	کمپرسورها.....
۲۰۸.....	۱-۱۰- کمپرسور رفت و برگشتی.....
۲۰۸.....	۱-۱-۱۰- انواع کمپرسور رفت و برگشتی از نظر موقعیت کمپرسور و موتور.....
۲۱۲.....	۱-۱-۲- واحدهای تقطیر.....
۲۱۲.....	۱-۱-۳- بررسی ترمودینامیکی کمپرسورهای رفت و برگشتی.....
۲۲۲.....	۱-۱-۴- عملکرد کمپرسور.....
۲۲۴.....	۱-۱-۵- طراحی ابعاد کمپرسورهای رفت و برگشتی.....
۲۲۷.....	۱-۱-۶- انتخاب کمپرسورهای رفت و برگشتی.....
۲۳۰.....	۱-۱-۷- انتخاب واحد تقطیر.....
۲۳۳.....	۱-۲- کمپرسورهای گریزازمرکز.....
۲۳۷.....	۱-۳- کمپرسور پیچی دوار.....
۲۴۱.....	مسائل:
۲۴۵.....	مراجع:
۲۴۷.....	فصل یازدهم.....
۲۴۷.....	کندانسورها.....
۲۴۸.....	۱-۱۱- کندانسورهای آبی.....
۲۴۹.....	۱-۱-۱۱- کندانسور لوله و پوسته‌ای.....
۲۵۰.....	۱-۲- کندانسور کویل و پوسته‌ای.....
۲۵۰.....	۱-۳- کندانسور دو لوله‌ای.....
۲۵۱.....	۱-۴- مطالعه انتقال حرارت در کندانسورهای آبی.....
۲۵۳.....	۱-۵- پدیده رسوب در کندانسورهای آبی.....
۲۵۳.....	۱-۶- لوله‌های فین‌دار.....
۲۶۲.....	۱-۷- عملکرد اقتصادی کندانسورهای آبی.....
۲۶۳.....	۱-۲- کندانسورهای هوایی.....

۲۶۵.....	۱۱-۳- کندانسورهای تبخیری
۲۶۶.....	مسائل.....
۲۶۸.....	مراجع:.....
۲۶۹.....	فصل دوازدهم.....
۲۶۹.....	وسایل انبساط.....
۲۶۹.....	۱۲-۱- لوله موئین.....
۲۶۹.....	۱۲-۱-۱- تبادل بین کمپرسور رفت و برگشتی و لوله موئین.....
۲۷۱.....	۱۲-۱-۲- انتخاب لوله موئین.....
۲۷۳.....	۱۲-۱-۳- مزایا و معایب لوله موئین.....
۲۷۳.....	۱۲-۲- شیر انبساط.....
۲۷۴.....	۱۲-۲-۱- طرز کار شیر انبساط.....
۲۷۵.....	۱۲-۳- شیرشاور.....
۲۷۵.....	۱۲-۳-۱- شیرشاور فشار پایین.....
۲۷۷.....	۱۲-۳-۲- شیرشاور فشار بالا.....
۲۷۸.....	مسائل.....
۲۷۹.....	مراجع:.....
۲۸۱.....	فصل سیزدهم.....
۲۸۱.....	اواپراتورها.....
۲۸۲.....	۱۳-۱- اواپراتورهای مرطوب و خشک.....
۲۸۳.....	۱۳-۲- اواپراتور کویل انبساط مستقیم.....
۲۸۵.....	۱۳-۳- انتقال حرارت در اواپراتورها.....
۲۸۵.....	۱۳-۳-۱- انتقال حرارت در هنگام جوشش.....
۲۸۸.....	۱۳-۳-۲- محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی مبرد در جوشش اجباری.....
۲۸۹.....	۱۳-۳-۳- محاسبه ضریب انتقال حرارت سیال خنک‌شونده.....
۲۹۰.....	۱۳-۴- روش‌های مختلف برفک‌زدایی در اواپراتورها.....
۲۹۱.....	۱۳-۴-۱- روش برفک‌زدایی فشار/دما.....
۲۹۳.....	۱۳-۴-۲- روش پاشش آب گرم.....
۲۹۳.....	۱۳-۴-۳- روش استفاده از گاز داغ خروجی از کمپرسور.....
۲۹۳.....	۱۳-۴-۴- روش استفاده از کویل الکتریکی در داخل اواپراتور.....
۲۹۴.....	۱۳-۴-۵- روش برفک‌زدایی چرخه معکوس.....

فهرست □ ذ

مسائل: ۲۹۹

مراجع ۳۰۰

پیوست‌ها: ۳۰۱

www.ketab.ir

فهرست اشکال:

- شکل (۱-۱): فضای داخلی یک سردخانه صنعتی ۲
- شکل (۲-۱): فریزر صنعتی نوع حلزونی برای انجماد مواد پروتئینی همچون گوشت قرمز، مرغ و ماهی ۳
- شکل (۳-۱): نمونه‌ای از یک کامیون مجهز به سردخانه ۴
- شکل (۴-۱): یک واحد تولید اکسیژن، نیتروژن، آرگون و دی‌اکسیدکربن مایع در شیراز ۴
- شکل (۵-۱): یک سامانه سردساز بتن که در ساخت سد بیرزیک در ترکیه به کار رفته است ۵
- شکل (۱-۲): روابط بین فشار مطلق، فشار نسبی و فشار خلأ ۸
- شکل (۲-۲): شمایی از فشارسنج نوع لوله‌بوردن ۸
- شکل (۳-۲): فشارهای مختلف در جریان سیال ۹
- شکل (۴-۲): شمایی از یک سامانه بسته (جرم کنترل) ۱۱
- شکل (۵-۲): شمایی از یک سیستم باز (حجم کنترل) ۱۱
- شکل (۶-۲): کار و حرارت توابعی از مسیر هستند، اما خواص ترمودینامیکی مستقل از مسیر بوده و توابع نقطه‌ای هستند ۱۵
- شکل (۷-۲): تبادل انرژی بین سیستم و محیط اطرافش با تبادل حرارت، کار و جریان سیال (انتقال جرم) ۱۶
- شکل (۸-۲): سطوح رنگ شده در دیاگرام فشار-حجم میزان کار ماکزیمم را نشان می‌دهند ۲۰
- شکل (۹-۲): سطح زیر نمودار دما-انتروپی میزان انتقال حرارت بازگشت‌پذیر را نشان می‌دهد ۲۱
- شکل (۱۰-۲): فرایندهای پلی‌تروپیک در دیاگرام‌های $T-s$ و $P-v$ ۲۲
- شکل (۱۱-۲): دیاگرام $P-v$ یک ماده خالص ۲۳
- شکل (۱۲-۲): دیاگرام‌های $P-v$ و $T-v$ یک ماده خالص ۲۴
- شکل (۱-۳): شمایی از چرخه معکوس برایتون ۲۹
- شکل (۲-۳): نمودارهای $T-s$ و $P-v$ چرخه تبرید هوایی استاندارد ۲۹
- شکل (۳-۳): تغییرات ضریب عملکرد چرخه تبرید هوایی ایده‌آل با نسبت تراکم ۳۱
- شکل (۴-۳): چرخه تبرید هوایی و نمودار دما-انتروپی مثال (۱-۳) ۳۲
- شکل (۵-۳): شمایی از برخورد جریان هوا به یک ایرفویل ۳۵
- شکل (۶-۳): شمایی از یک سامانه ساده تبرید هوایی در هواپیما ۳۶
- شکل (۷-۳): نمودار دما-انتروپی یا انتالپی-انتروپی مربوط به یک سامانه ساده تبرید هوایی در هواپیما ۳۷
- شکل (۸-۳): نمودار دما-انتروپی یا انتالپی-انتروپی مربوط به مثال (۲-۳) ۴۱
- شکل (۹-۳): چرخه تبرید استاندارد هوا با بازیاب و نمودار دما-انتروپی آن ۴۴
- شکل (۱۰-۳): چرخه تبرید گازی با بازیاب و نمودار دما-انتروپی مربوط به مثال (۲-۳) ۴۵
- شکل (۱۱-۳): سامانه لیند-همپسون برای میعان گازها ۴۸
- شکل (۱-۴): سامانه تبرید تراکمی بخار ساده ۵۶
- شکل (۲-۴): اجزای اصلی سامانه تبرید تراکمی بخار ساده ۵۷
- شکل (۳-۴): چرخه معکوس کارنو و نمودار دما-انتروپی مربوط به آن ۵۸
- شکل (۴-۴): نمودارهای دما-انتروپی و فشار-انتالپی چرخه ایده‌آل تراکمی بخار ۶۰
- شکل (۵-۴): اجزای یخچال خانگی ۶۱

- شکل (۴-۶): تأثیر فوق داغ کردن بخار میرد ورودی به کمپرسور روی نمودارهای دما-انترپزی و فشار-انتالپی ۶۴
- شکل (۴-۷): تأثیر مادون سرد کردن میرد پیش از شیرانبساط روی نمودارهای دما-انترپزی و فشار-انتالپی ۶۵...
- شکل (۴-۸): آرایش های سری و موازی کندانسور آبی و مادون سردکن ۶۶.....
- شکل (۴-۹): سامانه تبرید تراکمی بخار با بازیاب و نمودار فشار-انتالپی مربوط به آن ۶۷.....
- شکل (۴-۱۰): چرخه واقعی تبرید تراکمی بخار و نمودار دما-انترپزی مربوط به آن ۶۷.....
- شکل (۴-۱۱): نمودار دما-انترپزی مثال (۴-۱) ۶۹.....
- شکل (۵-۱): مقایسه دو سامانه تبرید تراکمی بخار و تبرید جذبی در بالا بردن فشار میرد ۷۸.....
- شکل (۵-۲): سامانه تبرید جذبی ساده ۷۹.....
- شکل (۵-۳): شمایی از مدل ایده آل کارنو برای چرخه تبرید جذبی ۸۰.....
- شکل (۵-۴): تعادل فشار بخار آب ۸۲.....
- شکل (۵-۵): نمودار دما-فشار-غلظت محلول برومیدلیم-آب اشباع ۸۳.....
- شکل (۵-۶): نمودار انتالپی-دما-غلظت محلول برومیدلیم-آب ۸۴.....
- شکل (۵-۷): سامانه تبرید جذبی برومیدلیم-آب مربوط به مثال (۵-۱) ۸۵.....
- شکل (۵-۸): شمایی از جریان های ورودی و خروجی محفظه جاذب ۸۶.....
- شکل (۵-۹): سامانه تبرید جذبی برومیدلیم-آب همراه با بازیاب ۸۹.....
- شکل (۵-۱۰): آرایش اجزای مختلف در یک واحد تبرید جذبی تجاری ۹۱.....
- شکل (۵-۱۱): یک واحد جذبی تجاری با ظرفیت تبرید ۱۲۰ تا ۱۳۷۷ تن تبرید (محصول شرکت یورک آمریکا) ۹۲.....
- شکل (۵-۱۲): ترکیب سامانه های تراکمی بخار و جذبی ۹۳.....
- شکل (۵-۱۳): سامانه تبرید جذبی آب-آمونیاک ۹۴.....
- شکل (۵-۱۴): اختلاط دو مایع A و B ۹۵.....
- شکل (۵-۱۵): نمودار دما-غلظت محلول های دوگانه در یک فشار ثابت ۹۷.....
- شکل (۵-۱۶): فرایند چگالش در محلول های دوگانه در یک فشار ثابت ۹۷.....
- شکل (۵-۱۷): خطوط اشباع برای فشارهای مختلف محلول دوگانه ۹۷.....
- شکل (۵-۱۸): نمودار انتالپی-غلظت محلول آب-آمونیاک ۹۸.....
- شکل (۵-۱۹): نمودار انتالپی-غلظت محلول آب-آمونیاک ۹۹.....
- شکل (۵-۲۰): اختلاط بی دررو دو محلول دوگانه ۱۰۱.....
- شکل (۵-۲۱): نمودار انتالپی-غلظت مربوط به مثال ۵-۳ ۱۰۲.....
- شکل (۵-۲۲): اختلاط همراه با انتقال حرارت دو جریان محلول ۱۰۴.....
- شکل (۵-۲۳): نمودار انتالپی-غلظت مربوط به مثال ۵-۴ ۱۰۴.....
- شکل (۵-۲۴): فرایند خفگی یک محلول دوگانه و نمودار انتالپی-غلظت مربوط به آن ۱۰۶.....
- شکل (۵-۲۵): یخچال جذبی سه سیالی ۱۰۷.....
- شکل (۶-۱): سامانه تبرید جت بخار ۱۱۵.....
- شکل (۶-۲): شمایی از کمپرسور جت بخار ۱۱۷.....
- شکل (۶-۳): نمودار دما-انترپزی سامانه تبرید جت بخار ۱۱۸.....

- شکل (۴-۶): نمودار دما-انترپزی مثال (۱-۶)..... ۱۲۰
- شکل (۱-۷): محفظه تبخیر به منظور جداسازی بخار و مایع میرد..... ۱۳۰
- شکل (۲-۷): سامانه تبرید تراکمی بخار با محفظه تبخیر..... ۱۳۱
- شکل (۳-۷): نمودار فشار-انتالپی چرخه تبرید تراکمی بخار..... ۱۳۱
- شکل (۴-۷): میزان صرفه جویی در توان مصرفی کل کمپرسور برای چند ماده میرد متداول که در نتیجه استفاده از محفظه تبخیر به منظور جداسازی بخار میرد از مایع آن به دست آمده است..... ۱۳۴
- شکل (۵-۷): تأثیر خشک کن میانی در تراکم دومرحله‌ای روی نمودار فشار-حجم..... ۱۳۵
- شکل (۶-۷): تأثیر خشک کن میانی در تراکم دومرحله‌ای یک میرد روی نمودار فشار-انتالپی..... ۱۳۵
- شکل (۷-۷): خشک کردن میانی در بین مراحل تراکم با استفاده از مبدل‌های حرارتی خشک‌شونده با:..... ۱۳۶
- شکل (۸-۷): فرایند خشک‌کاری بخار فوق‌داغ میرد خارج شده از کمپرسور به وسیله مایع میرد..... ۱۳۷
- شکل (۹-۷): سامانه تبرید تراکمی بخار دومرحله‌ای با خشک کن میانی به همراه نمودار فشار-انتالپی مربوط به آن..... ۱۳۷
- شکل (۱۰-۷): میزان صرفه جویی در توان مصرفی کل کمپرسور برای چند ماده میرد متداول که در نتیجه استفاده از خشک کن میانی به دست آمده است..... ۱۳۹
- شکل (۱۱-۷): سامانه تبرید تراکمی بخار با یک کمپرسور و سه اواپراتور با دمای یکسان و نمودار فشار-انتالپی مربوط به آن..... ۱۴۱
- شکل (۱۲-۷): سامانه تبرید تراکمی بخار با یک کمپرسور و سه اواپراتور با شیرهای فشارشکن مستقل و نمودار فشار-انتالپی مربوط به آن..... ۱۴۲
- شکل (۱۳-۷): سامانه تبرید تراکمی بخار با یک کمپرسور و سه اواپراتور با شیرهای فشارشکن مرکب و نمودار فشار-انتالپی مربوط به آن..... ۱۴۵
- شکل (۱۴-۷): سامانه تبرید تراکمی بخار با کمپرسورهای مستقل برای هر اواپراتور و شیرهای فشارشکن مستقل و نمودار فشار-انتالپی مربوط به آن..... ۱۴۸
- شکل (۱۵-۷): سامانه تبرید تراکمی بخار با کمپرسورهای مستقل برای هر اواپراتور و شیرهای فشارشکن مرکب و نمودار فشار-انتالپی مربوط به آن..... ۱۵۰
- شکل (۱۶-۷): سامانه تبرید تراکمی بخار با کمپرسورهای مستقل برای هر اواپراتور و شیرهای فشارشکن مستقل و به همراه خشک کن‌های میانی در بین مراحل تراکم مرکب و نمودار فشار-انتالپی مربوط به آن..... ۱۵۲
- شکل (۱۷-۷): خشک کن میانی (۱) به همراه جریان‌های ورودی و خروجی از آن..... ۱۵۳
- شکل (۱۸-۷): سامانه تبرید تراکمی بخار با کمپرسورهای مستقل برای هر اواپراتور و شیرهای فشارشکن مرکب به همراه خشک کن میانی در بین مراحل تراکم و نمودار فشار-انتالپی مربوط به آن..... ۱۵۴
- شکل (۱-۸): نقطه انجماد محلول آب و اتیلن گلیکول..... ۱۷۱
- شکل (۲-۸): چگالی ویژه محلول آب و اتیلن گلیکول نسبت به آب °C 4 (با جرم ویژه 1000 kg/m^3)..... ۱۷۲
- شکل (۳-۸): ضریب هدایت حرارتی محلول آب و اتیلن گلیکول..... ۱۷۲
- شکل (۴-۸): لزجت دینامیکی محلول آب و اتیلن گلیکول..... ۱۷۳
- شکل (۵-۸): گرمای ویژه محلول آب و اتیلن گلیکول..... ۱۷۴
- شکل (۱-۹): نحوه استفاده از مواد عایق حرارتی در روش سنتی..... ۱۸۹

شکل (۳-۹): استفاده از فاصله هوایی در جداره سردخانه‌ها.....	۱۹۰
شکل (۲-۹): پانل‌های مرکب درهم کلاف شده.....	۱۹۱
شکل (۴-۹): استفاده از کویل الکتریکی در کف سردخانه.....	۱۹۱
شکل (۵-۹): پرده هوای عمودی برای ممانعت از نفوذ هوا در ورودی سردخانه.....	۱۹۵
شکل (۶-۹): نمونه‌ای از پرده هوایی افقی در ورودی سردخانه.....	۱۹۶
شکل (۷-۹): نمایی از مصالح به کار رفته در جداره‌های سردخانه مربوط به مثال (۵-۹).....	۲۰۲
شکل (۱-۱۰): سازه تیربه تراکمی بخار ساده و نمودار فشار-انتالپی آن.....	۲۰۸
شکل (۲-۱۰): شمایی از کمپرسور رفت و برگشتی.....	۲۰۹
شکل (۳-۱۰): شمایی از یک کمپرسور ضربه‌ای ۱۶ سیلندر با میرد آمونیاک.....	۲۰۹
شکل (۴-۱۰): شمایی از یک کمپرسور رفت و برگشتی باز ۱۶ سیلندر.....	۲۱۰
شکل (۵-۱۰): نمونه‌ای از یک کمپرسور رفت و برگشتی بسته.....	۲۱۱
شکل (۶-۱۰): مقطع یک نمونه کمپرسور نیمه بسته.....	۲۱۲
شکل (۷-۱۰): نمونه‌ای از یک راننده تطبیق.....	۲۱۳
شکل (۸-۱۰): نمودار ترمودینامیکی فشار-حجم ایده آل مربوط به کمپرسور رفت و برگشتی.....	۲۱۴
شکل (۹-۱۰): نمایی ساده از حرکت پیستون در داخل سیلندر کمپرسور رفت و برگشتی.....	۲۱۶
شکل (۱۰-۱۰): تأثیر نسبت فشار تخلیه به مکش روی رانده‌های حجمی مرده و حجمی واقعی کمپرسور پرسرعت با میرد R-22.....	۲۱۷
شکل (۱۱-۱۰): نمودار دما-انتروپی و فشار-حجم چرخه ساده تبرید تراکمی بخار.....	۲۱۸
شکل (۱۲-۱۰): نمودارهای دما-انتروپی و فشار-انتالپی مربوط به مثال (۱-۱۰).....	۲۱۹
شکل (۱۳-۱۰): تأثیر دمای مکش روی ظرفیت تبرید و توان مصرفی کمپرسور.....	۲۲۳
شکل (۱۴-۱۰): تأثیر دمای چگالش روی ظرفیت تبرید و توان مصرفی کمپرسور.....	۲۲۴
شکل (۱۵-۱۰): ظرفیت تبرید و توان موردنیاز کمپرسور رفت و برگشتی بسته مدل H625P-22E با میرد R-22 و دور 1750 rpm که به وسیله شرکت سازنده Borg-Warner طراحی و ارائه شده است.....	۲۲۸
شکل (۱۶-۱۰): نمایی از پروانه یک کمپرسور گریزازمرکز.....	۲۳۴
شکل (۱۷-۱۰): نمایی از کمپرسور گریزازمرکز چهار طبقه.....	۲۳۵
شکل (۱۸-۱۰): نمایی از جریان گاز در داخل کمپرسور گریزازمرکز.....	۲۳۵
شکل (۱۹-۱۰): نمایی از کمپرسور گریزازمرکز یک طبقه.....	۲۳۶
شکل (۲۰-۱۰): نمایی از روتور دو طبقه یک کمپرسور گریزازمرکز.....	۲۳۶
شکل (۲۱-۱۰): نمایی از یک واحد کامل کمپرسور پیچی دوار.....	۲۳۷
شکل (۲۲-۱۰): نمایی از اجزاء تشکیل دهنده یک کمپرسور پیچی دوار.....	۲۳۸
شکل (۲۳-۱۰): نحوه حرکت چرخه‌ای یک کمپرسور پیچی دوار.....	۲۳۹
شکل (۲۴-۱۰): فرایند تراکم جریان گاز در بین چرخه‌ای کمپرسور پیچی دوار.....	۲۳۹
شکل (۲۵-۱۰): نمایی از سویاپ لغزشی به منظور کنترل ظرفیت کمپرسور.....	۲۴۰
شکل (۱-۱۱): نمایی از کندانسور آبی.....	۲۴۷
شکل (۲-۱۱): نمایی از کندانسور هوایی.....	۲۴۸

- شکل (۳-۱۱): نمایی از کندانسور تبخیری ۲۴۸
- شکل (۴-۱۱): نمایی از یک کندانسور لوله و پوسته‌ای ۲۴۹
- شکل (۵-۱۱): نمایی ساده از حرکت جریان آب و میرد در داخل یک کندانسور لوله و پوسته‌ای دو مسیره ... ۲۵۰
- شکل (۶-۱۱): شمایی از یک کندانسور کوئل و پوسته‌ای ۲۵۰
- شکل (۷-۱۱): شمایی از یک کندانسور دو لوله‌ای ۲۵۱
- شکل (۸-۱۱): انتقال حرارت بین جریان میرد و آب‌خنک جاری در داخل لوله ۲۵۱
- شکل (۹-۱۱): نمودار فشار-انتالپی چرخه تبرید تراکمی بخار به‌همراه آرایش لوله‌ها در کندانسور آبی لوله و پوسته‌ای مثال (۱۰-۱۱) ۲۵۴
- شکل (۱۰-۱۱): نمایی ساده از نحوه حرکت جریان آب و میرد با دمای ورودی و خروجی مشخص در داخل کندانسور ۲۵۵
- شکل (۱۱-۱۱): آرایش لوله‌ها در کندانسور آبی لوله و پوسته‌ای مربوط به مثال (۲-۱۱) ۲۵۸
- شکل (۱۲-۱۱): نمودار تغییرات نسبت دفع حرارت برحسب دمای چگالش و تبخیر برای میردهای R-12 و R-22 ۲۵۹
- شکل (۱۳-۱۱): الگوی هزینه انجم برای تولید هرودت 1 Ton, hr در فشارهای مختلف کندانسور ۲۶۲
- شکل (۱۴-۱۱): شمایی از دو نوع عمده کندانسورهای هوایی ۲۶۳
- شکل (۱۵-۱۱): شمایی از یک کندانسور تبخیری ۲۶۵
- شکل (۱-۱۲): نقاط تعادل بین یک کمپرسور رفت‌و برگشتی و لوله موئین ۲۷۰
- شکل (۲-۱۲): شرایط نامتعادلی که باعث پدیده کم‌خورانی و پرخورانی اواپراتور در فشار چگالش ثابت می‌شود. ۲۷۱
- شکل (۳-۱۲): نمودار تغییرات دبی جرمی میردهای R-12 و R-22 برحسب فشار ورودی لوله موئین به قطر 1.63 mm و طول 2.03 m ۲۷۲
- شکل (۴-۱۲): ضرایب تصحیح دبی جرمی میرد برای لوله‌های موئین با اندازه‌های متفاوت با ابعاد مذکور در شکل (۳-۱۲) ۲۷۲
- شکل (۵-۱۲): تصویری از یک شیرانبساط ترموستاتیک ۲۷۴
- شکل (۶-۱۲): نحوه عملکرد شیرانبساط ترموستاتیک ۲۷۵
- شکل (۷-۱۲): نمایی از شیرشناور فشار پایین ۲۷۶
- شکل (۸-۱۲): نقاط تعادل کمپرسور و شیرشناور در بارهای سرمایشی مختلف ۲۷۶
- شکل (۹-۱۲): نحوه قرارگیری شیرشناور فشار بالا در سامانه تبرید ۲۷۷
- شکل (۱-۱۳): شمایی از اواپراتور مرطوب (شناور) ۲۸۱
- شکل (۲-۱۳): شمایی از اواپراتور خشک ۲۸۲
- شکل (۳-۱۳): شمایی از اواپراتور مرطوب معمولی با شیرشناور ۲۸۳
- شکل (۴-۱۳): شمایی از اواپراتور کوئل انبساط مستقیم ۲۸۴
- شکل (۵-۱۳): نمودار لگاریتمی جوشش آب در فشار اتمسفر ۲۸۶
- شکل (۶-۱۳): نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت جوششی برای میرد فرئون R-12 ۲۸۷

شکل (۷-۱۳): نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت مبرد R-22، نسبت به کیفیت بخار این مبرد در هنگامی که در داخل لوله تبخیر واقع در اواپراتور می جوشد.....	۲۸۸
شکل (۸-۱۳): تأثیر برفک روی ضریب انتقال حرارت کلی اواپراتور در سه سرعت مختلف هوای جریان یافته در لابه لای کویل پنج ردیفه	۲۹۰
شکل (۹-۱۳): افت فشار هوا بر اثر انباشته شدن برفک روی کویل اواپراتور با شرایط شکل (۸-۱۳).....	۲۹۱
شکل (۱۰-۱۳): سامانه تبرید دارای سیستم کنترل فشار برای برفک زدایی.....	۲۹۲
شکل (۱۱-۱۳): سامانه تبرید دارای سیستم کنترل دما برای برفک زدایی	۲۹۲
شکل (۱۲-۱۳): سامانه تبرید مجهز به خط کنارگذر گاز داغ برای برفک زدایی	۲۹۳
شکل (۱۳-۱۳): نمایی از اواپراتور مجهز به کویل الکتریکی برای برفک زدایی	۲۹۴
شکل (۱۴-۱۳): روش برفک زدایی چرخه معکوس با شیر چهارطرفه	۲۹۴

فهرست جدول‌ها

جدول (۱-۳):	درجه حرارت‌های بحرانی چند گاز	۴۷
جدول (۱-۸):	برخی از میردهای هالوکربن	۱۶۴
جدول (۲-۸):	برخی از میردهای هیدروکربن	۱۶۴
جدول (۳-۸):	برخی از میردهای غیرآلی	۱۶۵
جدول (۴-۸):	خواص ترمودینامیکی برخی از میردها در چرخه استاندارد تبرید تراکمی بخار با دمای تبخیر 15°C - و دمای تکانش 30°C	۱۶۶
جدول (۵-۸):	ضریب هدایت حرارتی و لزجت دینامیکی حالت‌های مایع اشباع و بخار اشباع برخی از میردها	۱۶۸
جدول (۱-۹):	ضریب هدایت حرارتی مواد مورد استفاده در جداره‌های سردخانه‌ها	۱۷۹
جدول (۲-۹):	ضرایب انتقال حرارت (ضریب h) برای دیوارها، سقف و کف سردخانه‌ها بر حسب $\text{W/m}^2\text{K}$	۱۷۹
جدول (۳-۹):	شرایط آب و هوایی ایران	۱۸۰
جدول (۴-۹):	دمای زمین برای اتاق‌های سردخانه‌ها	۱۸۹
جدول (۵-۹):	اطلاعات طراحی برای نگهداری انواع گوشت‌ها در سردخانه	۱۸۱
ادامه جدول (۵-۹):	اطلاعات طراحی برای نگهداری انواع گوشت‌ها در سردخانه	۱۸۲
جدول (۶-۹):	اطلاعات طراحی برای نگهداری سبزیجات در سردخانه	۱۸۳
ادامه جدول (۶-۹):	اطلاعات طراحی به منظور نگهداری سبزیجات در سردخانه	۱۸۴
جدول (۷-۹):	اطلاعات طراحی برای نگهداری انواع میوه‌ها در سردخانه	۱۸۵
ادامه جدول (۷-۹):	اطلاعات طراحی برای نگهداری انواع میوه‌ها در سردخانه	۱۸۶
جدول (۸-۹):	اطلاعات طراحی برای نگهداری دیگر مواد غذایی در سردخانه	۱۸۷
ادامه جدول (۸-۹):	اطلاعات طراحی برای نگهداری دیگر مواد غذایی در سردخانه	۱۸۸
جدول (۹-۹):	مقاومت حرارتی جداره‌های (دیوارها و سقف) تشکیل از پانل‌های مرکب در هم کلاف شده	۱۹۰
جدول (۱۰-۹):	تصحیح اثر تشعشع خورشید	۱۹۲
جدول (۱۱-۹):	دبی هوای نفوذی ناشی از باز و بسته شدن در سردخانه بر حسب لیتر بر ثانیه	۱۹۳
جدول (۱۲-۹):	حرارت لازم برای سرمایش هر لیتر هوای نفوذی بر حسب کیلوژول در سردخانه‌های بالای صفر	۱۹۴
جدول (۱۳-۹):	حرارت لازم برای سرمایش هر لیتر هوای نفوذی بر حسب کیلوژول در سردخانه‌های زیر صفر	۱۹۴
جدول (۱۴-۹):	حرارت ناشی از تنفس میوه‌ها و سبزیجات	۱۹۸
جدول (۱۵-۹):	ضریب مورد استفاده در رابطه (۹-۹) برای محاسبه حرارت ناشی از موتورهای الکتریکی	۲۰۱
جدول (۱۶-۹):	حرارت معادل به ازای هر نفر که در سردخانه رفت و آمد دارد	۲۰۱
جدول (۱۷-۹):	ضریب سرویس	۲۰۵
جدول (۱-۱۰):	نمونه‌ای از کاتالوگ یک سازنده کمپرسور رفت و برگشتی باز با میرد R-22	۲۲۹
جدول (۲-۱۰):	ظرفیت واحدهای تقطیر بر حسب کیلو وات	۲۳۱
جدول (۱-۱۳):	مشخصات و ظرفیت مدل‌های مختلف کولر	۲۹۵

- جدول (۲-۱۳): مشخصات مدل‌های مختلف کولر با توان بالا ۲۹۶
- جدول (۲-۱۳-الف): ضرایب تصحیح ظرفیت کویل پرده‌دار برای نرخ‌های مختلف جریان هوا ۲۹۷
- جدول (۲-۱۳-ب): ضرایب تصحیح ظرفیت دما پایین DX برای مبردهای R-12 و R-22, R-502 ۲۹۷
- جدول (۲-۱۳): نرخ خنک‌کاری برج‌های خنک‌کن بر مبنای سرعت باد ۲۹۸

مقدمه

طراحی سامانه‌های تبرید و سردخانه یکی از دروس تخصصی دوره کارشناسی مهندسی مکانیک است. در این درس، نخست مقدمه‌ای بر علم تبرید و کاربردهای آن و مروری بر مفاهیم ترمودینامیک و انتقال حرارت ارائه می‌شود. در ادامه اصول طراحی سامانه‌های تبرید هوایی، تراکمی بخار، جذبی، جت بخاری، چندمرحله‌ای و غیره مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس به معرفی انواع میزدها و اصول طراحی سردخانه پرداخته و در نهایت اصول کارکرد، طراحی و انتخاب اجزاء سامانه تبرید شامل کمپرسورها، کندانسورها، وسایل انبساط و اواپراتورها شرح داده می‌شود.

باتوجه به این که کتاب جامعی که به تنهایی بتواند سیلابس درس مذکور را پوشش داده و به‌عنوان کتاب درسی معرفی شود، به‌ویژه به زبان فارسی وجود ندارد، براین اساس بااستفاده از تجربیات سال‌های متعددی تدریس درس طراحی سیستم‌های تبرید و سردخانه در دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران به نگارش کتاب حاضر پرداخته که امیدوارم بتواند این کمبود را به‌خوبی برطرف سازد. خداوند منان را بی‌نهایت شاکرم که توفیق تهیه این نگاره را به من عطا فرمود.

در این‌جا لازم می‌دانم از راهنمایی‌های ارزنده آقای دکتر محمدحسن سعیدی استاد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف تشکر و قدردانی کنم. از همکاری صمیمانه آقای دکتر محمدرضا سلیم‌پور استادیار محترم دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان به‌ویژه در تهیه مسائل کتاب، ممنون و سپاس‌گزارم. از مهندس مجتبی مغاری کارشناس ارشد مهندسی مکانیک که در تهیه و تدوین این کتاب همواره با اینجانب بوده و همکاری همه‌جانبه و صمیمانه‌ای داشته‌اند و آقای امیر نوروز مسئول دفتر ریاست دانشکده مهندسی مکانیک پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران که امور چاپ و ترسیم شکل‌های کتاب را برعهده گرفته‌اند، کمال تشکر را دارم.

از آن‌جا که این مجموعه چاپ اول این کتاب است، قطعاً دارای اشکالات و کمبودهایی خواهدبود، که ممنون و متشکر خواهم شد اگر خوانندگان محترم و صاحب‌نظران عزیز نظرات اصلاحی خود را در این رابطه به‌منظور در نظر گرفتن در ویرایش‌های بعدی از طریق پست الکترونیک به آدرس akhtarun@ut.ac.ir یا مکاتبه با آدرس تهران، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، صندوق پستی ۴۵۶۳-۱۱۱۵۵ به اطلاع اینجانب برسانند.

دکتر محمد علی اخوان بهابادی

دی ۱۳۹۰