

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

روش‌های تبدیل و ذخیره‌سازی انرژی

روش‌های تبدیل و ذخیره‌سازی انرژی

دکتر رامین حقیقی خوشخو



۶۸۴

مرکز چاپ و انتشارات دانشگاه شهید بهشتی

روش‌های تبدیل و ذخیره‌سازی انرژی
دکتر رامین حقیقی خوشخو

ویراستار: اکرم کیانی

حروف‌نگار و صفحه‌آرا: سمیرا دهقان

طراح جلد: امیرشاهرخ فریوسفی

ناظر چاپ: صفر ممیزاد

چاپ اول: ۱۳۹۷

شمارگان: ۵۰۰

قیمت: ۳۵۰.۰۰۰ ریال

کلیه حقوق برای دانشگاه شهید بهشتی محفوظ است.

سرشناسه:	حقیقی خوشخو، رامین، ۱۳۴۳-
عنوان و نام پدیدآور:	روش‌های تبدیل و ذخیره‌سازی انرژی/رامین حقیقی خوشخو.
مشخصات نشر:	تهران: دانشگاه شهید بهشتی، مرکز چاپ و انتشارات، ۱۳۹۷.
مشخصات ظاهری:	بیست‌وشش، ۴۲۰ص: مصور، جدول.
فروست:	دانشگاه شهید بهشتی، مرکز چاپ و انتشارات؛ ۶۸۴.
شابک:	۹۷۸ ۹۶۴ ۴۵۷ ۴۲۱ ۴
وضعیت فهرست‌نویسی:	فیبا
یادداشت:	کتابنامه: ص. ۳۹۷-۳۹۹.
موضوع:	ذخیره‌سازی انرژی؛ Energy storage؛
موضوع:	ذخیره‌سازی گرما؛ Heat storage؛
موضوع:	انرژی - صرفه‌جویی؛ Energy conservation
شناسه افزوده:	دانشگاه شهید بهشتی، مرکز چاپ و انتشارات
شناسه افزوده:	Shahid Beheshti University. Printing & Publishing Center
رده‌بندی کنگره:	TK۲۹۸۰/ج۷ر۹ ۱۳۹۷
رده‌بندی دیویی:	۶۲۱/۳۱۲۶
شماره کتابشناسی ملی:	۵۲۵۶۹۰۸

کد ناشر ۱۰۰۱۷۳۴

www.pub.sbu.ac.ir

unipress@mail.sbu.ac.ir

فهرست مطالب

پیشگفتار مؤلف	بیست و سه
فصل ۱. ذخیره‌سازی انرژی	۱
۱.۱. انرژی	۱
۲.۱. سطوح مختلف ذخیره انرژی	۱
۳.۱. ذخیره‌سازی منابع مختلف انرژی	۳
۱.۳.۱. نفت	۴
۲.۳.۱. گاز	۴
۳.۳.۱. سوخت‌های هسته‌ای	۶
۴.۱. نیاز به ذخیره انرژی	۶
۵.۱. تقسیم‌بندی سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی	۷
فصل ۲. ذخیره‌سازی انرژی حرارتی	۱۱
۱.۲. ذخیره‌سازی انرژی حرارتی	۱۱
۲.۲. آبگرمکن خورشیدی	۱۲
۱.۲.۲. معرفی آبگرمکن خورشیدی	۱۲
۲.۲.۲. روابط ریاضی	۱۴
۳.۲. نیروگاه حرارتی خورشیدی	۲۷
۱.۳.۲. نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی از نوع سهموی خطی	۲۸
۲.۳.۲. نیروگاه‌های حرارتی از نوع دریافت‌کننده مرکزی	۲۹
۳.۳.۲. نیروگاه‌های حرارتی از نوع بشقابی	۲۹
۴.۳.۲. انواع سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی در نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی	۳۰
۵.۳.۲. روش‌های ذخیره‌سازی داخلی انرژی حرارتی در نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی	۳۰
۶.۳.۲. تقسیم‌بندی بر اساس نوع انرژی ذخیره‌شده	۳۲

۷.۳.۲. بررسی مواد گوناگون ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در دمای بالا ۳۸

فصل ۳. ذخیره‌سازی توسط مادهٔ ذخیره‌سازی در حالت عملکرد دمش تک‌جریان: ظرفیت گرمایی

سیال نامحدود مدل‌های ساده ۵۷

۱.۳. مقدمه ۵۷

۲.۳. حالت‌های عملکرد مدل ۵۸

۱.۲.۳. هندسهٔ واحد ذخیره‌سازی ۵۸

۲.۲.۳. ظرفیت گرمایی سیال بی‌نهایت است ۵۹

۳.۲.۳. گرادیان دمایی ناچیز در مادهٔ ذخیره‌سازی ۶۰

۴.۲.۳. گرادیان دمای داخلی در مادهٔ ذخیره‌سازی ۶۱

۳.۳. مدل ساده‌شده ۶۵

۴.۳. مدل ساده‌شده‌ای که ضریب انتقال حرارت اصلاح‌شده را به‌کار می‌برد ۷۵

فصل ۴. حالت عملکرد دمش تک‌جریان (مدل رسانایی محدود) ۷۷

۱.۴. مقدمه ۷۷

۲.۴. مدل رسانایی محدود: صفحهٔ تخت ۷۸

۳.۴. مدل رسانایی محدود: استوانهٔ توخالی ۹۱

۴.۴. مقایسهٔ نتایج مدل رسانایی محدود برای شکل استوانه‌ای توخالی و شکل صفحهٔ

تخت ۱۱۰

فصل ۵. پاسخ‌گذاری واحد ذخیره‌سازی حرارت یا متغیرهای زمانی دما و دبی جرمی سیال ورودی ۱۱۳

۱.۵. مقدمه ۱۱۳

۲.۵. اصل جمع آثار: تغییرات زمانی در دمای سیال ورودی ۱۱۴

۳.۵. اصل جمع آثار: توزیع دمای اولیهٔ دلخواه در مواد ذخیره‌سازی انرژی ۱۲۱

۴.۵. اصل جمع آثار: تغییرات دلخواه در دبی جرمی سیال ۱۲۳

فصل ۶. مفاهیم اساسی در مبدل‌های جریان مخالف ۱۳۱

۱.۶. مقدمه ۱۳۱

۲.۶. ریکوپراتور ۱۳۲

۳.۶. ریکوپراتورهای از نوع مبدل‌های صفحه‌ای با سطوح اولیه ۱۳۵

۱.۳.۶. سطوح موج‌دار متقاطع (CC) ۱۳۶

۲.۳.۶. سطوح موج‌دار متقاطع تغییر یافته (CU) ۱۳۷

۱۳۷	..... ۳.۳.۶. سطوح متقاطع موج‌دار (CW)
۱۳۷	..... ۴.۳.۶. سطوح متقاطع موج‌دار دوزنقه‌ای (TCW)
۱۳۷	..... ۴.۶. محاسبات ریکوپراتور
۱۳۹	..... ۵.۶. ریژنراتورهای گرمایی
۱۴۲	..... ۶.۶. اصول عملکرد ریژنراتورها
۱۴۳	..... ۱.۶.۶. ویژگی‌های طراحی
۱۴۵	..... ۷.۶. محاسبات ریژنراتورها
۱۶۱	..... فصل ۷. بسترهای متراکم
۱۶۱	..... ۱.۷. مقدمه
۱۸۱	..... ضمیمه الف) اثبات شرایط مرزی معادله ۶.۷، انتقال حرارت گذرای بستر متراکم
۱۸۳	..... فصل ۸. روابط انتقال حرارت و افت فشار
۱۸۳	..... ۱.۸. مقدمه
۱۸۳	..... ۲.۸. روابط انتقال حرارت و افت فشار برای جریان داخل کانال
۱۹۲	..... ۳.۸. روابط انتقال حرارت و افت فشار برای جریان در بسترهای فشرده
۱۹۵	..... ۴.۸. رابطه انتقال حرارت
۱۹۹	..... فصل ۹. ذخیره‌سازی انرژی به روش مکانیکی
۱۹۹	..... مبحث اول: روش ذخیره‌سازی هوای فشرده
۱۹۹	..... ۱.۹. پیشینه ذخیره انرژی به روش هوای فشرده
۲۰۱	..... ۲.۹. انواع روش‌های ذخیره‌سازی انرژی برق
۲۰۷	..... ۳.۹. بررسی پارک ذخیره انرژی آیوا به‌مثابه یک نیروگاه هیبرید بادی و گازی
۲۱۰	..... ۴.۹. مزایا و معایب نیروگاه CAES
۲۱۱	..... ۵.۹. ضرورت ابداع نیروگاه‌های ترکیبی CAES
۲۱۲	..... ۶.۹. بررسی سیکل کلی یک توربین گازی CAES
۲۲۰	..... ۷.۹. سیر تکامل نیروگاه‌های ذخیره‌سازی هوای فشرده CAES
۲۲۹	..... مبحث دوم: روش ذخیره‌سازی چرخ طیار
۲۲۹	..... ۸.۹. مقدمه
۲۲۹	..... ۹.۹. تاریخچه استفاده از چرخ طیار
۲۳۱	..... ۱۰.۹. مراحل ساخت چرخ طیار

۲۳۱	..... آزمایش‌های چرخ طیار	۱۱.۹
۲۳۲	..... چرخ طیارهای قدیمی	۱۲.۹
۲۳۳	..... چرخ طیارهای مدرن (سرعت بالا)	۱۳.۹
۲۳۵	..... جنس، ممان اینرسی و وزن چرخ طیار	۱۴.۹
۲۳۶	..... آنالیز تنش در چرخ طیار	۱۵.۹
۲۳۸	..... مراحل طراحی چرخ طیار	۱۶.۹
۲۴۰	..... معادلات حاکم بر چرخ طیار	۱۷.۹
۲۴۱	..... کاربردهای چرخ طیار	۱۸.۹
۲۴۱	..... نقش چرخ طیار در دستگاه‌های پرس و سنگ‌شکن	۱۹.۹
۲۴۲	..... چرخ طیار در موتورهای احتراق داخلی	۲۰.۹
۲۴۳	..... ارتعاش‌گیر هیدرولیکی	۲۱.۹
۲۴۵	..... چرخ طیار در ترمزها	۲۲.۹
۲۴۵	..... چرخ طیار در خودروهای هیبریدی	۲۳.۹
۲۴۶	..... ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی با چرخ طیار	۲۴.۹
۲۴۷	..... چرخ طیارهای سرعت بالا در صنعت برق	۲۵.۹
۲۴۹	..... انتقال قدرت پیوسته	۲۶.۹
۲۴۹	..... بهبود کیفیت قدرت	۲۷.۹
۲۵۱	..... فصل ۱۰. ذخیره‌سازی ترموشیمیایی و باتری‌ها	
۲۵۱	..... ۱.۱۰. ذخیره‌سازی انرژی به روش ترموشیمیایی	
۲۵۲	..... ۲.۱۰. واکنش‌های ذخیره‌سازی انرژی	
۲۵۳	..... ۳.۱۰. معادله انرژی آزاد گیبس (G)	
۲۵۷	..... ۴.۱۰. پتانسیل شیمیایی	
۲۵۹	..... ۵.۱۰. شرایط ترمودینامیکی	
۲۵۹	..... ۶.۱۰. واکنش‌های در حال تحقیق و توسعه	
۲۶۵	..... ۷.۱۰. کاتالیست‌ها	
۲۶۶	..... ۸.۱۰. فناوری فرایند ذخیره‌سازی ترموشیمیایی انرژی خورشید	
۲۶۷	..... ۹.۱۰. بررسی و توسعه ذخیره‌سازی انرژی ترموشیمیایی در نیروگاه خورشیدی	
	..... ۱۰.۱۰. آنالیز فنی اقتصادی نیروگاه ۱۰MW حرارتی خورشیدی با سیستم	
۲۷۰	..... ذخیره‌سازی ترموشیمیایی	
۲۷۴	..... ۱۱.۱۰. ذخیره‌سازی انرژی در باتری‌های الکتروشیمیایی	

۲۷۵	..... ۱۲.۱۰. باتری و پیل
۲۷۷	..... ۱۳.۱۰. طبقه‌بندی انواع باتری‌ها
۲۷۸	..... ۱۴.۱۰. تعاریف و اصطلاحات خاص باتری‌ها
۲۸۰	..... ۱۵.۱۰. باتری‌های اسید-سرب
۲۸۱	..... ۱۶.۱۰. مزایا و معایب باتری‌های اسید-سرب
۲۸۱	..... ۱۷.۱۰. باتری‌های قلیایی
۲۸۴	..... ۱۸.۱۰. مقایسه خصوصیات باتری‌های شارژپذیر
۲۹۳	..... فصل ۱۱. ذخیره‌سازی هیدروژن و سرما
۲۹۳	..... مبحث اول: ذخیره‌سازی هیدروژن
۲۹۳	..... ۱.۱۱. مقدمه
۲۹۴	..... ۲.۱۱. خواص هیدروژن
۳۰۱	..... ۳.۱۱. اثرات هیدروژن گازی فشار بالا بر ساختار فلزات
۳۰۱	..... ۴.۱۱. بررسی مواد به‌منظور استفاده برای گاز هیدروژن
۳۰۳	..... ۵.۱۱. هیدروژن به‌مثابه یک منبع انرژی
۳۰۵	..... ۶.۱۱. منابع تجدیدپذیر انرژی برای تولید هیدروژن
۳۰۶	..... ۷.۱۱. توافقنامه جهانی هیدروژن
۳۰۸	..... ۸.۱۱. نگرش محیط‌زیستی به هیدروژن
۳۰۹	..... ۹.۱۱. محدودیت‌های کاربرد انرژی هیدروژن
۳۰۹	..... ۱۰.۱۱. محدودیت‌های ذخیره‌سازی برای سوخت شهری و صنعتی
۳۱۰	..... ۱۱.۱۱. مقاومت افکار عمومی
۳۱۰	..... ۱۲.۱۱. محدودیت‌های زیربنایی
۳۱۱	..... ۱۳.۱۱. ذخیره‌سازی در خودروها
۳۱۲	..... ۱۴.۱۱. روش‌های تولید و ذخیره‌سازی هیدروژن
۳۲۰	..... ۱۵.۱۱. کاربرد این روش در صنعت خودروسازی
۳۲۶	..... ۱۶.۱۱. بررسی جذب و ذخیره‌سازی هیدروژن در نانوساختارها
	..... ۱۷.۱۱. مقایسه روش‌های تولید و ذخیره‌سازی هیدروژن با استفاده از پارامترهای
۳۲۶	..... مربوط به آن
۳۲۹	..... مبحث دوم: ذخیره‌سازی سرما
۳۲۹	..... ۱۸.۱۱. مقدمه
۳۳۰	..... ۱۹.۱۱. تاریخچه ذخیره‌سازی انرژی سرمایی

۳۳۲	..... ضرورت ذخیره‌سازی انرژی سرمایی
۳۳۳	..... سیستم‌های گوناگون ذخیره‌سازی انرژی سرمایی
۳۳۴	..... مزایا و معایب استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز سرما
۳۳۸	..... مبحث‌های ترمودینامیکی سیستم‌های ذخیره‌سازی سرما
۳۴۲	..... موارد کاربرد سیستم‌های ذخیره‌سازی سرما
۳۴۴	..... پارامترهای اصلی طراحی
۳۴۵	..... محاسبهٔ پروفایل بار سرمایی
۳۴۵	..... انواع سیستم‌های ذخیره‌سازی سرما
۳۴۶	..... تقسیم‌بندی سیستم‌های ذخیره‌سازی سرما از نظر نوع انرژی مصرفی
۳۴۷	..... فناوری‌های گوناگون سیستم‌های ذخیره‌سازی سرما
۳۴۹	..... تجهیزات ذخیره‌سازی سرما
۳۵۲	..... کنترل چیلر
۳۵۲	..... بدنهٔ مخزن ذخیره
۳۵۳	..... مخازن فلزی
۳۵۴	..... مخازن بتونی
۳۵۵	..... مخازن پلاستیکی
۳۵۵	..... کنترل تجهیزات
۳۵۶	..... استراتژی‌های کاری سیستم‌های ذخیره‌سازی
۳۵۶	..... استراتژی کاری ذخیره‌سازی کامل
۳۵۷	..... استراتژی کاری ذخیره‌سازی جزئی، کنترل بار (یکنواخت کردن بار)
۳۵۸	..... استراتژی کاری ذخیره‌سازی جزئی، محدودکنندهٔ تقاضا
۳۵۹	..... استراتژی کاری برمبنای بار پایهٔ چیلر
۳۶۰	..... استراتژی کاری ترتیب‌دهی استفاده از چیلرها (جداکردن چیلرها)
۳۶۲	..... استراتژی‌های کاری از نظر نوع زمانبندی شارژ و دشارژ مخزن
۳۶۳	..... بهینه‌سازی وضعیت کاری
۳۶۵	..... تعامل مخزن با دیگر دستگاه‌های سیستم
۳۶۶	..... توزیع هوای سرد
۳۶۷	..... سیالات انتقال‌دهندهٔ حرارت و اتیلن گلیکول
۳۶۸	..... بازیابی انرژی گرمایی
۳۶۸	..... استفاده از اختلاف دمای شب و روز به‌منظور صرفه‌جویی بیشتر انرژی

۳۶۹	۵۰.۱۱. کاربرد تانک ذخیره به‌مثابه منبع آب اطفاءحریق
۳۶۹	۵۱.۱۱. کنترل ضخامت یخ
۳۷۲	۵۲.۱۱. تعیین اندازه مخزن ذخیره
۳۷۴	۵۳.۱۱. بررسی اقتصادی طرح
۳۷۵	۵۴.۱۱. آنالیز سیستم‌های مختلف ذخیره‌سازی سرما
۳۷۶	۵۵.۱۱. ذخیره‌سازی یخ روی لوله با ذوب خارجی
۳۷۸	۵۶.۱۱. مشخصات مخزن ذخیره
۳۷۹	۵۷.۱۱. ابزار کنترل
۳۸۰	۵۸.۱۱. تخمین اندازه موردنیاز مخزن
۳۸۰	۵۹.۱۱. ذخیره‌سازی یخ روی لوله با ذوب داخلی
۳۸۲	۶۰.۱۱. مخزن ذخیره
۳۸۳	۶۱.۱۱. تجهیزات کنترل
۳۸۳	۶۲.۱۱. ویژگی‌های شارژ و دشارژ مخزن
۳۸۴	۶۳.۱۱. کارکرد و نگهداری سیستم
۳۸۴	۶۴.۱۱. ذخیره‌سازی یخ کپسولی
۳۸۷	۶۵.۱۱. مخازن ذخیره
۳۸۷	۶۶.۱۱. ابزار کنترل
۳۸۷	۶۷.۱۱. شرایط کاری
۳۸۸	۶۸.۱۱. ویژگی‌های شارژ و دشارژ
۳۸۸	۶۹.۱۱. هزینه‌ها و بازده
۳۸۹	۷۰.۱۱. دمای ورودی و خروجی از مخزن
۳۸۹	۷۱.۱۱. ذخیره‌سازی به‌وسیله نمک‌های اوتکتیک یا مواد تغییرفازدهنده
۳۹۱	۷۲.۱۱. سیستم سرمایه‌گذاری
۳۹۱	۷۳.۱۱. مخازن ذخیره
۳۹۲	۷۴.۱۱. بسته‌های نمک اوتکتیک
۳۹۲	۷۵.۱۱. ابزارهای کنترل
۳۹۲	۷۶.۱۱. مشخصات شارژ و تخلیه
۳۹۳	۷۷.۱۱. هزینه‌ها و بازده
۳۹۳	۷۸.۱۱. ذخیره‌سازی یخ مستقیم
۳۹۴	۷۹.۱۱. ذخیره‌سازی آب سرد

۳۹۷	..... منابع
۳۹۹	..... واژه‌نامهٔ فارسی-انگلیسی
۴۰۷	..... واژه‌نامهٔ انگلیسی-فارسی
۴۱۵	..... نمایه

فهرست جدول‌ها

جدول ۱.۱. ضرایب تبدیل واحدهای مختلف انرژی به یکدیگر	۲
جدول ۲.۱. برخی از انواع روش‌های ذخیره‌سازی انرژی	۹
جدول ۱.۲. مواد ذخیره‌سازی پیشنهادی برای واحدهای SEGS	۳۴
جدول ۲.۲. مواد جامد ذخیره‌سازی برای واحدها SEGS	۳۵
جدول ۳.۲. مواد مایع ذخیره‌سازی در واحدهای SEGS	۳۶
جدول ۴.۲. مواد ذخیره‌سازی انرژی نهان در واحدهای SEGS	۳۷
جدول ۵.۲. مشخصات نمک‌های نیترات و ترمینول VP-1	۴۱
جدول ۶.۲. مقایسه دمای ذوب مخلوط‌های مختلف نمک نیترات مذاب	۴۳
جدول ۷.۲. دمای ذوب ترکیبات چندجزئی نمک نیترات مذاب. ترکیبات بر اساس درصد مول و بر پایه یون مثبت	۴۵
جدول ۱.۳. دمای بدون بُعد سیال	۶۸
جدول ۲.۳. حرارت ذخیره‌شده بی‌بعد در واحد ذخیره‌سازی	۷۲
جدول ۱.۴. دمای بدون بُعد سیال خروجی در حالت برابری عدد بیو با ۰/۱	۸۲
جدول ۲.۴. دمای بدون بُعد سیال خروجی در حالت برابری عدد بیو با ۱	۸۳
جدول ۳.۴. دمای بدون بُعد سیال خروجی در حالت برابری عدد بیو با ۱۰	۸۴
جدول ۴.۴. دمای بدون بُعد سیال خروجی در حالت برابری عدد بیو با ۵۰	۸۵
جدول ۵.۴. دمای بدون بُعد سیال خروجی در حالت برابری عدد بیو با ۱۰۰	۸۶
جدول ۶.۴. مقادیر ذخیره حرارت بدون بُعد در حالت برابری عدد بیو با ۰/۱	۸۷
جدول ۷.۴. مقادیر ذخیره حرارت بدون بُعد در حالت برابری عدد بیو با ۱	۸۷
جدول ۸.۴. مقادیر ذخیره حرارت بدون بُعد در حالت برابری عدد بیو با ۱۰	۸۸
جدول ۹.۴. مقادیر ذخیره حرارت بدون بُعد در حالت برابری عدد بیو با ۵۰	۸۹
جدول ۱۰.۴. مقادیر ذخیره حرارت بدون بُعد در حالت برابری عدد بیو با ۱۰۰	۹۰
جدول ۱۱.۴. مقادیر ذخیره حرارت بدون بُعد در لوله استوانه‌ای با جریان داخلی در حالت برابری عدد بیو با ۲	۹۵
جدول ۱۲.۴. مقادیر ذخیره حرارت بدون بُعد در لوله استوانه‌ای با جریان داخلی در حالت برابری عدد بیو با ۶	۹۶
جدول ۱۳.۴. مقادیر ذخیره حرارت بدون بُعد در لوله استوانه‌ای با جریان داخلی در حالت برابری عدد بیو با ۱۰	۹۶

جدول ۱۴.۴. مقادیر ذخیرهٔ حرارت بدون بُعد در لولهٔ استوانه‌ای با جریان داخلی، در حالت برابری عدد بیو با ۱۵	۹۶
جدول ۱۵.۴. مقادیر ذخیرهٔ حرارت بدون بُعد در لولهٔ استوانه‌ای با جریان داخلی، در حالت برابری عدد بیو با ۲۰	۹۷
جدول ۱۶.۴. مقادیر ذخیرهٔ حرارت بدون بُعد در لولهٔ استوانه‌ای با جریان داخلی در حالت برابری عدد بیو با ۳۰	۹۷
جدول ۱۷.۴. مقادیر ذخیرهٔ حرارت بدون بُعد در لولهٔ استوانه‌ای با جریان داخلی در حالت برابری عدد بیو با ۲	۹۷
جدول ۱۸.۴. مقادیر ذخیرهٔ حرارت بدون بُعد در لولهٔ استوانه‌ای با جریان داخلی در حالت برابری عدد بیو با ۶	۹۸
جدول ۱۹.۴. مقادیر ذخیرهٔ حرارت بدون بُعد در لولهٔ استوانه‌ای با جریان داخلی در حالت برابری عدد بیو با ۱۰	۹۸
جدول ۲۰.۴. مقادیر ذخیرهٔ حرارت بدون بُعد در لولهٔ استوانه‌ای با جریان داخلی در حالت برابری عدد بیو با ۱۵	۹۸
جدول ۲۱.۴. مقادیر ذخیرهٔ حرارت بدون بُعد در لولهٔ استوانه‌ای با جریان داخلی در حالت برابری عدد بیو با ۲۰	۹۹
جدول ۲۲.۴. مقادیر ذخیرهٔ حرارت بدون بُعد در لولهٔ استوانه‌ای با جریان داخلی در حالت برابری عدد بیو با ۳۰	۹۹
جدول ۲۳.۴. مقادیر ذخیرهٔ حرارت بدون بُعد در لولهٔ استوانه‌ای با جریان داخلی در حالت برابری عدد بیو با ۲	۹۹
جدول ۲۴.۴. مقادیر ذخیرهٔ حرارت بدون بُعد در لولهٔ استوانه‌ای با جریان داخلی در حالت برابری عدد بیو با ۶	۱۰۰
جدول ۲۵.۴. مقادیر ذخیرهٔ حرارت بدون بُعد در لولهٔ استوانه‌ای با جریان داخلی در حالت برابری عدد بیو با ۱۰	۱۰۰
جدول ۲۶.۴. مقادیر ذخیرهٔ حرارت بدون بُعد در لولهٔ استوانه‌ای با جریان داخلی در حالت برابری عدد بیو با ۱۵	۱۰۰
جدول ۲۷.۴. مقادیر ذخیرهٔ حرارت بدون بُعد در لولهٔ استوانه‌ای با جریان داخلی در حالت برابری عدد بیو با ۲۰	۱۰۱
جدول ۲۸.۴. مقادیر ذخیرهٔ حرارت بدون بُعد در لولهٔ استوانه‌ای با جریان داخلی در حالت برابری عدد بیو با ۳۰	۱۰۱
جدول ۲۹.۴. مقادیر ذخیرهٔ حرارت بدون بُعد در لولهٔ استوانه‌ای با جریان خارجی در حالت برابری عدد بیو با ۲	۱۰۱

جدول ۴۶.۴. مقادیر ذخیرهٔ حرارت بدون بُعد در لولهٔ استوانه‌ای با جریان خارجی در حالت برابری عدد بیو با ۳۰	۱۰۷
جدول ۱.۵. پارامترها و مقادیر آن‌ها	۱۲۰
جدول ۱.۶. (نرخ) کارایی گرمایی (η_{REG})، متناسب با طول و زمان کاهیده برای بازیاب‌های جریان مخالف متقارن	۱۵۲
جدول ۱.۷. توزیع دما در بستر متراکم، پس از گذشت ۵ دقیقه	۱۷۶
جدول ۲.۷. توزیع دما در بستر متراکم، پس از گذشت ۱۰ دقیقه	۱۷۷
جدول ۳.۷. جدول T_s/T_0 بر حسب y و z	۱۷۹
جدول ۴.۷. جدول T_g/T_0 بر حسب y و z	۱۸۰
جدول ۱.۸. زبری سطح مواد	۱۸۵
جدول ۲.۸. ضرایب فانیگ	۱۸۸
جدول ۳.۸. تأثیر هندسه و شرایط مرزی گرمایی بر عدد ناسلت	۱۸۹
جدول ۴.۸. روابط افت فشار در محدودهٔ $10^3 < Re < 10^4$	۱۹۴
جدول ۵.۸. روابط انتقال حرارت برای استوانه‌ها، حلقه‌ها و کره‌ها	۱۹۸
جدول ۱.۹. مقایسهٔ اولین و دومین نیروگاه CAES جهان در مقیاس تجاری	۲۰۱
جدول ۲.۹. شرایط نامی کارکرد اتاق‌های احتراق توربین گاز CAES با سوخت گاز طبیعی	۲۱۵
جدول ۳.۹. داده‌های عملکردی و هزینهٔ برآوردشدهٔ سیکل‌های مختلف CAES (معمولی و پیشرفته)	۲۲۵
جدول ۴.۹. مقاومت مخصوص برای چند نمونه از مواد سازندهٔ چرخ طیار	۲۳۶
جدول ۱.۱۰. عمر و قیمت تقریبی بانری‌های شارژ‌پذیر	۲۸۹
جدول ۲.۱۰. مشخصه‌های شارژ باتری‌های ثانویه	۲۹۰
جدول ۱.۱۱. مشخصات اتوبوس هیدروژن‌سوز مرکز تحقیقات انرژی بیلینگ	۳۲۳
جدول ۲.۱۱. مقایسهٔ ظرفیت انواع چیلرها	۳۵۰
جدول ۳.۱۱. مقایسهٔ بازده کاری انواع چیلرها	۳۵۱
جدول ۴.۱۱. دمای معمول خروجی از انواع گوناگون مخزن ذخیره	۳۶۶

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱.۱. زنجیره انرژی ۳
- شکل ۲.۱. میزان کل تولید نفت در ایران طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۲ ۵
- شکل ۳.۱. میزان کل تولید گاز طبیعی در ایران طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۱ ۵
- شکل ۴.۱. نوسانات تقاضای انرژی الکتریکی طی شبانه روز در کشور ایران ۱۳۹۱ ۷
- شکل ۵.۱. الف. تولید انرژی متغیر و نرخ مصرف ثابت نسبت به زمان ۸
- شکل ۵.۱. ب. تولید انرژی و نرخ مصرف متغیر با زمان ۸
- شکل ۵.۱. ج. تولید انرژی ثابت با نرخ مصرف متغیر نسبت به زمان ۹
- شکل ۱.۲. اجزاء تشکیل دهنده آبگرمکن خورشیدی ۱۳
- شکل ۲.۲. نمونه ساخته شده آبگرمکن خورشیدی ۱۳
- شکل ۳.۲. آبگرمکن خورشیدی ترموسیفون ۱۴
- شکل ۴.۲. نمایش شماتیک یک آبگرمکن ۱۵
- شکل ۵.۲. تغییرات بار مصرفی و مفید بر حسب زمان ۱۹
- شکل ۶.۲. تغییرات دمای مخزن بر حسب زمان ۱۹
- شکل ۷.۲. مبدل همسو و ناهمسو ۲۰
- شکل ۸.۲. تانک ذخیره‌سازی لایه‌ای ۲۲
- شکل ۹.۲. تانک ذخیره‌سازی دوطبقه ۲۳
- شکل ۱۰.۲. نیروگاه حرارتی خورشیدی با سیستم ذخیره‌سازی انرژی ۲۷
- شکل ۱۱.۲. غلظت نیتريت در نمک‌های نترات مذاب چهارگانه در زمان تعادل شیمیایی
با هوا در مقایسه با نمک خورشیدی دوگانه ۴۷
- شکل ۱۲.۲. ویسکوزیته نمک‌های نترات مذاب چهارگانه در مقایسه با نمک نترات سه‌تایی
لیتیم-سدیم-پتاسیم ۴۹
- شکل ۱.۳. واحد ذخیره‌سازی: الف) کانال جریان با سطح مقطع مستطیلی؛ ب) کانال جریان با
سطح مقطع دایره‌ای ۵۹
- شکل ۲.۳. سطح مقطع (برش عرضی) واحد ذخیره‌سازی ۶۲
- شکل ۳.۳. سطح مقطع (برش عرضی) واحد ذخیره‌سازی ۶۴

- شکل ۴.۳. دمای بی‌بُعد خروجی سیال ۷۰
- شکل ۵.۳. پاسخ گذرای واحد ذخیره‌سازی مثال ۱: الف) دمای خروجی سیال؛ ب) دمای مواد ذخیره‌کننده ۷۱
- شکل ۶.۳. حرارت ذخیره‌شده بی‌بُعد در واحد ذخیره‌سازی، مثال ۱ ۷۴
- شکل ۷.۳. حرارت ذخیره‌سازی‌شده در بازه کاری ۳ ساعت ۷۵
- شکل ۱.۴. واحد ذخیره‌سازی گرما ۷۸
- شکل ۲.۴. سطح تقاطع واحد ذخیره‌سازی ۷۸
- شکل ۳.۴. دمای سیال بدون بعد خروجی در عدد بیو ۰/۱ برای مقادیر مختلف $\frac{G^+}{V^+}$ ۸۲
- شکل ۴.۴. استوانه توخالی، حالت دمش تک‌جریان؛ الف) جریان داخلی؛ ب) جریان خارجی .. ۹۱
- شکل ۵.۴. واحد ذخیره‌سازی گرما؛ الف) سوراخ‌های دایره‌ای در مواد ذخیره‌سازی جامد؛ ب) جریان بیرون حلقه ۹۱
- شکل ۶.۴. دمای سیال خروجی در برابر زمان بدون بُعد برای حالت برابری با عدد بیو ۲ و مقادیر مختلف انحنای ۱۰۷
- شکل ۷.۴. دمای سیال خروجی در برابر زمان بدون بُعد برای حالت برابری با عدد بیو ۱۰ و مقادیر مختلف انحنای ۱۰۸
- شکل ۸.۴. دمای سیال خروجی در برابر زمان بدون بُعد برای حالت برابری با عدد بیو ۳۰ و مقادیر مختلف انحنای ۱۰۸
- شکل ۹.۴. مقادیر ذخیره‌حرارت، بدون بُعد در برابر زمان بدون بُعد برای حالت برابری با عدد بیو ۲ و مقادیر مختلف انحنای ۱۰۹
- شکل ۱۰.۴. مقادیر ذخیره‌حرارت بدون بُعد در برابر زمان بدون بُعد برای حالت برابری با عدد بیو ۱۰ و مقادیر مختلف انحنای ۱۰۹
- شکل ۱۱.۴. مقادیر ذخیره‌حرارت بدون بُعد در برابر زمان بدون بُعد برای حالت برابری با عدد بیو ۳۰ و مقادیر مختلف انحنای ۱۱۰
- شکل ۱.۵. دمای ورودی سیال در برابر زمان بی‌بعد ۱۱۴
- شکل ۲.۵. تغییرات دمای ورودی: الف) دمای هوای ورودی؛ ب) حالت مورد بررسی در مثال ۱ ۱۱۷
- شکل ۳.۵. دمای سیال ورودی ۱۱۹
- شکل ۴.۵. توزیع دمای اولیه در واحد ذخیره‌سازی ۱۲۳

- شکل ۵.۵. تغییرات دبی جرمی سیال در طول زمان ۱۲۴
- شکل ۱.۶. شماتیک عملکرد یک ریکوپراتور ۱۳۳
- شکل ۲.۶. ریکوپراتور با جریان معکوس و متقاطع ۱۳۴
- شکل ۳.۶. نمونه‌ای از یک ریکوپراتور به کاررفته در یک میکروتوربین ۱۳۵
- شکل ۴.۶. نمایی از سطوح موج‌دار متقاطع ۱۳۶
- شکل ۵.۶. نمایی از سطوح موج‌دار متقاطع تغییر یافته ۱۳۷
- شکل ۶.۶. نمایی از سطوح متقاطع موج‌دار ۱۳۸
- شکل ۷.۶. ریژنراتور دوار ساخته شده از الیاف پلی استر ۱۴۰
- شکل ۸.۶. سیستم بازیاب کوره کوپر ۱۴۱
- شکل ۹.۶. ریژنراتور دوار با بستر ثابت ۱۴۱
- شکل ۱۰.۶. پکینگ بازیاب‌های چرخان ۱۴۳
- شکل ۱۱.۷. نمایش شماتیک بستر متراکم در یک سیستم ذخیره‌سازی حرارتی ۱۶۱
- شکل ۲.۷. نمودار توزیع دما در بستر متراکم پس از ۵ دقیقه ۱۷۶
- شکل ۳.۷. نمودار توزیع دما در بستر متراکم پس از ۱۰ دقیقه ۱۷۷
- شکل ۴.۷. توزیع دما در بستر متراکم پس از ۵ و ۱۰ دقیقه ۱۷۸
- شکل ۵.۷. نمودار دمای سیال نسبت به دمای ورودی سیال (T_s/T_0) بر حسب z و y ۱۷۸
- شکل ۶.۷. نمودار دمای سیال نسبت به دمای ورودی سیال (T_g/T_0) بر حسب z و y ۱۷۸
- شکل ۱.۸. واحد ذخیره حرارت ۱۸۴
- شکل ۲.۸. ضرایب افت فشار خروجی و ورودی؛ الف) لوله‌های دایره‌ای؛ ب) کانال موازی .. ۱۸۵
- شکل ۳.۸. ضریب اصطکاک (Fanning) ۱۸۶
- شکل ۴.۸. روابط انتقال حرارت : مکعب‌ها، استوانه‌ها و بسته‌های تجاری؛ ۱. زین برل،
۲. حلقه‌های راشیگ و پال، ۳. استوانه (فلز)، ۴. استوانه (celite)، ۵. مکعب‌ها (فلزی) .. ۱۹۵
- شکل ۵.۸. بسته‌بندی‌های تجاری ۱۹۶
- شکل ۶.۸. روابط انتقال حرارت - کره‌ها، بسته‌بندی متغیر ۱۹۷
- شکل ۱.۹. تصویر نیروگاه CAES با ظرفیت ۲۹۰ MW در هانتورف آلمان ۱۹۹
- شکل ۲.۹. نیروگاه CAES با ظرفیت ۱۱۰ MW در مکینتاش امریکا ۲۰۰
- شکل ۳.۹. مقایسه انواع روش‌های ذخیره‌سازی انرژی ۲۰۲
- شکل ۴.۹. نمایش شماتیک یک نیروگاه ذخیره انرژی هوای فشرده ۲۰۴

- شکل ۵.۹. شماتیک نیروگاه هیبرید در ایالت آیوای آمریکا ۲۰۸
- شکل ۶.۹. شماتیک یک نیروگاه ذخیره انرژی هوای فشرده ۲۱۳
- شکل ۷.۹. تصویر واقعی سیکل توربین CAES نیروگاه هانتورف ۲۱۵
- شکل ۸.۹. تصویر واقعی سیکل توربین CAES و اتاق‌های احتراق آن در نیروگاه آلاباما ... ۲۱۶
- شکل ۹.۹. نمایش شماتیک یک مجموعه کامل از ماشین‌های دوار تک‌محوری به طول ۱۴۰ فوت در نیروگاه CAES با ظرفیت ۱۱۰ مگاوات ۲۱۷
- شکل ۱۰.۹. تصویر سه‌بعدی مجموعه کمپرسور و توربین نیروگاه CAES با ظرفیت ۱۱۰ مگاوات ۲۱۸
- شکل ۱۱.۹. تصویر واقعی اکسپندر فشار قوی نیروگاه آلاباما ۲۱۹
- شکل ۱۲.۹. نمودار مراحل راه‌اندازی نیروگاه ۱۱۰ مگاواتی در حالت تولید برق ۲۱۹
- شکل ۱۳.۹. نمودار مراحل راه‌اندازی نیروگاه ۱۱۰ مگاواتی در حالت فشرده‌سازی ۲۲۰
- شکل ۱۴.۹. دینامومتر جذبی ۲۳۸
- شکل ۱۵.۹. ترسیم نمودار (T_0) ، گشتاور میانگین ورودی $(T_m = ۲۶۸)$ ۲۳۹
- شکل ۱۶.۹. انرژی مکانیکی ۲۳۹
- شکل ۱۷.۹. تغییرات گشتاور و سرعت زاویه‌ای ۲۴۲
- شکل ۱۸.۱۰. ایستگاه ذخیره انرژی خورشیدی ۲۶۹
- شکل ۲۰.۱۰. طراحی مفهومی نیروگاه خورشیدی ۲۷۰
- شکل ۳.۱۰. ساختار یک حلقه سنتز آمونیاک ۲۷۳
- شکل ۴.۱۰. طرح‌واره‌ای از یک نمونه سلول الکترونیکی ۲۷۶
- شکل ۵.۱۰. منحنی شارژ و دشارژ یک نمونه باتری لیتیم یونی در نرخ‌های دشارژ متفاوت ۲۸۵
- شکل ۶.۱۰. حفظ ظرفیت باتری‌های ثانویه ۲۸۶
- شکل ۷.۱۰. اثر عمق تخلیه بر عمر سیکل ۲۸۷
- شکل ۸.۱۰. اثر شدت تخلیه بر ظرفیت باتری‌های شارژ‌پذیر (در ۲۰ درجه سانتی‌گراد) ۲۸۸
- شکل ۹.۱۰. اثر دما بر دانسیته انرژی باتری‌های ثانویه (در شدت تخلیه تقریبی ۰/۲۵ درجه سانتی‌گراد) ۲۸۹
- شکل ۱.۱۱. دیاگرام فازی هیدروژن ۲۹۴
- شکل ۲.۱۱. سرعت سوختن در مخلوط‌های هوا-هیدروژن ۲۹۹
- شکل ۳.۱۱. اندازه سلول انفجار ۳۰۰

- شکل ۴.۱۱. ذخیره‌سازی به روش الکترولیز ۳۱۴
- شکل ۵.۱۱. فرایند ید- سولفور برای تولید هیدروژن (روش تجزیه حرارتی بخار آب)..... ۳۱۵
- شکل ۶.۱۱. شماتیک تولید هیدروژن به روش هیدرولیز با آب ۳۱۶
- شکل ۷.۱۱. تولید هیدروژن با استفاده از فرایندهای برگشت‌پذیر هیدریدهای فلزی..... ۳۲۱
- شکل ۸.۱۱. خودروی پیل سوختی هیدروژنی هایبرین ۳۲۴
- شکل ۹.۱۱. افتتاح نخستین جایگاه عمومی سوخت‌گیری هیدروژن در ایالت بادن- وورتمبرگ
آلمان ۳۲۵
- شکل ۱۰.۱۱. حلقه‌های انتقال حرارت در سیستم سرماسازی ۳۳۸
- شکل ۱۱.۱۱. شماتیک یک سیکل تبرید ۳۳۹
- شکل ۱۲.۱۱. شماتیک شرایط آب ورودی و خروجی اواپراتور(اوپراتور) چیلر در حالت بدون
مخزن ذخیره) ۳۴۰
- شکل ۱۳.۱۱. شماتیک شرایط سیال(آب و گلیکول) ورودی و خروجی اواپراتور در حالت
با مخزن ذخیره (در حال شارژ مخزن) ۳۴۱
- شکل ۱۴.۱۱. نمایش چگونگی تقسیم بار میان چیلر و مخزن در حالت ذخیره‌سازی کامل. ۳۵۷
- شکل ۱۵.۱۱. نمایش چگونگی تقسیم بار میان چیلر و مخزن در حالت ذخیره‌سازی
جزئی، کنترل بار ۳۵۸
- شکل ۱۶.۱۱. نمایش چگونگی تقسیم بار میان چیلر و مخزن در حالت ذخیره‌سازی
جزئی، محدودکننده تقاضا ۳۵۸
- شکل ۱۷.۱۱. نمایش چگونگی تقسیم بار میان چیلر و مخزن در استراتژی کاری برمبنای
بار پایه چیلر ۳۵۹
- شکل ۱۸.۱۱. نمایش چگونگی تقسیم بار میان چیلر پایه و مخزن در استراتژی کاری برمبنای
بار پایه چیلر و انتخاب استراتژی ذخیره‌سازی کامل برای چیلرهای باقیمانده ۳۶۰
- شکل ۱۹.۱۱. نمایش امکان کاهش انرژی الکتریکی مورد نیاز برای جلوگیری از فراترفتن
از حدود مشخص ۳۶۲
- شکل ۲۰.۱۱. یک پروفایل بار هفتگی و وضعیت شارژ مخزن نسبت به آن ۳۶۳
- شکل ۲۱.۱۱. شماتیک روش چیلر مقدم ۳۶۴
- شکل ۲۲.۱۱. کنترل ILIQ برای مُد دستی (از شرکت B.A.C) ۳۷۱
- شکل ۲۳.۱۱. الف) سنسور تشخیص ضخامت یخ برای سیستم‌هایی با ذوب خارجی؛ ب)
سنسور تشخیص سطح برای سیستم‌هایی با ذوب داخلی (شرکت B.A.C) ۳۷۲

- شکل ۲۴.۱۱. یک مخزن ذخیره با روش ذخیره‌سازی یخ بر روی کویل با ذوب خارجی ۳۷۶
- شکل ۲۵.۱۱. فرایند شارژ و دشارژ ذخیره‌سازی یخ با ذوب خارجی ۳۷۷
- شکل ۲۶.۱۱. سیستم ذخیره‌سازی یخ با ذوب خارجی با استفاده از میرد ثانویه ۳۷۸
- شکل ۲۷.۱۱. سیستم ذخیره‌سازی با ذوب خارجی با استفاده از میرد مستقیم ۳۷۹
- شکل ۲۸.۱۱. فرایند شارژ و دشارژ در سیستم ذخیره‌سازی یخ روی لوله با ذوب داخلی ... ۳۸۱
- شکل ۲۹.۱۱. شماتیک چینش چیلر و تانک‌ها در سیستم ذخیره‌سازی یخ روی لوله با ذوب داخلی ۳۸۲
- شکل ۳۰.۱۱. یک مخزن ذخیره در روش ذخیره‌سازی یخ روی کویل با ذوب داخلی ۳۸۲
- شکل ۳۱.۱۱. ظروف پلاستیکی مکعب‌مستطیل و کروی شکل ۳۸۵
- شکل ۳۲.۱۱. تولید و ذوب یخ به هنگام شارژ و دشارژ در ظروف کروی ۳۸۵
- شکل ۳۳.۱۱. شماتیک مدار، در حالت مخزن بعد از چیلر (چیلر مقدم) ۳۸۶
- شکل ۳۴.۱۱. شماتیک مدار در حالت مخزن قبل از چیلر ۳۸۶
- شکل ۳۵.۱۱. بسته‌های پلاستیکی حاوی نمک‌های اوتکتیک ۳۹۰
- شکل ۳۶.۱۱. شماتیک آرایش چیلر بعد از مخزن در روش ذخیره‌سازی به‌وسیله نمک‌های اوتکتیک ۳۹۱
- شکل ۳۷.۱۱. شماتیک سیستم ذخیره‌سازی یخ مستقیم ۳۹۴
- شکل ۳۸.۱۱. لایه‌بندی آب سرد ۳۹۶

پیشگفتار مؤلف

پس از آغاز بحران جهانی نفت در سال ۱۹۷۳، کشورهای توسعه‌یافته بازنگری مباحث مربوط به مدیریت انرژی را، چه در بحث عرضه و چه در بحث تقاضا آغاز کردند. مدیریت محیط‌زیست نیز مسئله‌ای بود که بعدها اهمیت ویژه‌ای یافت. در این میان یکی از راه‌های استفاده بهتر از منابع انرژی، بهره‌گیری بهتر از ابزار لازم برای ذخیره‌سازی انرژی است. زمان اوج مصرف در روز موجب توسعه دیدگاه ذخیره‌سازی شد. انرژی در ساعاتی که مصرف کمتر است تولید شده و در ساعات اوج به مصرف می‌رسد. در نتیجه، شناخت هرچه دقیق‌تر راه‌های ذخیره‌سازی انرژی و استفاده هرچه مناسب‌تر از آن، موجب امنیت عرضه انرژی خواهد شد؛ مسئله‌ای که هم‌اکنون بشر با آن مواجه است.

در سال ۱۳۷۲ خورشیدی با توجه به انعقاد قرارداد همکاری میان وزارت نیروی ایران و محیط‌زیست آلمان در خصوص طرح احداث نخستین نیروگاه بزرگ حرارتی خورشیدی کشور، بحث امکان ذخیره‌سازی انرژی حرارتی خورشیدی برای تأمین انرژی موردنیاز تولید بار پیک الکتریکی برای ساعاتی از شب مدنظر قرار گرفت.

در آن زمان با توجه به قیمت بسیار پایین هزینه سوخت‌های فسیلی در کشور (در حدود ۳۰ دلار برای فروش صادراتی هر شبکه نفت و ۵ سنت برای فروش صادراتی هر مترمکعب گاز) و همچنین مطالعات اولیه انجام‌گرفته، مقرر شد به‌جای استفاده از ذخیره‌سازی انرژی، طرح یک نیروگاه تلفیقی سیکل ترکیبی گازی و حرارتی خورشیدی مدنظر قرار گیرد و در زمان‌هایی که آفتاب نیست از سوخت فسیلی ارزان به قیمت فروش داخلی کشور، به‌مثابه انرژی موردنیاز نیروگاه تولید برق، استفاده شود.

هم‌اکنون رشد قابل‌توجه هزینه سوخت‌های فسیلی و همچنین الزام‌های حیاتی محیط‌زیستی، سبب شده است حتی کشورهای در حال توسعه نیز به‌منظور مدیریت انرژی و کاهش مصرف انرژی و آلودگی‌های مربوط به آن، راهکارهای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی و الکتریکی را در برنامه کاری و تحقیقاتی خود قرار دهند.

از سوی دیگر، در خلال بیش از یک دهه تدریس روش‌های تبدیل ذخیره‌سازی انرژی،

باتوجه به ماهیت متغیر میزان تولید در انواع انرژی‌های تجدیدپذیر (همچون خورشید و باد) و همچنین ماهیت متغیر میزان مصرف بارهای الکتریکی، گرمایشی و سرمایشی در بازه‌های زمانی مختلف (روزانه، ماهیانه، فصلی و...)، ضرورت بررسی دقیق علمی روش‌های گوناگون کاربردی انواع روش‌های تبدیل و ذخیره‌سازی انرژی را مشخص کرده است.

در چاپ نخست این کتاب تلاش شده است، علاوه بر تحلیل مسائل گوناگون گذرای انتقال حرارت در ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، سایر انواع مرسوم ذخیره‌سازی انرژی نیز به صورت کاربردی توضیح داده شود.

هدف اصلی در این کتاب، آشنایی تئوریک و عملی با مباحث ذخیره‌سازی انرژی، به خصوص ذخیره‌سازی حرارتی است. تلاش شده است با دقت در منابع کلاسیک و نوین، ترکیبی از روش‌های ذخیره‌سازی بیان شود. همچنین، مثال‌هایی از انواع روش‌های ذخیره‌سازی به همراه حل توضیحی آن‌ها و در برخی موارد با بهره‌گیری از رایانه ارائه شده است که موجب افزایش توانایی خواننده در حل مسائل مربوط به ذخیره‌سازی می‌شود.

در فصل ۱ که ذیل عنوان ذخیره‌سازی انرژی چیست بیان می‌شود، مفهوم ذخیره‌سازی انرژی و دلایل نیاز به آن برای خواننده شرح داده می‌شود. در این فصل، تقسیم‌بندی مناسبی از سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی انجام می‌گیرد و مبانی ذخیره‌سازی به صورت کلی مشخص می‌شود. فصل ۲ یکی از فصل‌های مهم این کتاب و در ارتباط با ذخیره‌سازی حرارتی است. انرژی حرارتی (گرمایی) نوعی از انرژی موجود در مواد است که بر اثر تغییرات دما یا فاز ایجاد می‌شود و می‌توان با توجه به پتانسیل مواد گوناگون، این نوع انرژی را در آن‌ها ذخیره کرد. این نوع ذخیره‌سازی، مانند انواع روش‌های ذخیره‌سازی انرژی، برای پاسخ به نیاز انرژی در زمان اوج مصرف به کار می‌رود. همچنین، روش‌های ذخیره‌سازی حرارتی و مواد مورد استفاده در این روش به طور کامل بیان می‌شود. در فصل ۳ دربارهٔ دمش تک‌جریان بحث خواهد شد که یکی از روش‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی گاز عبوری از مقطع ذخیره‌سازی است. فصل ۴ نیز در ادامهٔ فصل ۳ به بسط مدل می‌پردازد و فرض‌هایی واقعی‌تر را در نظر می‌گیرد. پاسخ سیستم‌ها به تغییرات دمایی به صورت گذرا و پایدار است، بدین منظور، فصل ۵ به پاسخ گذرای مدل‌های ارائه‌شده در فصل‌های ۳ و ۴ ذیل عنوان دمش تک‌جریان می‌پردازد. مبدل جریان مخالف به مثابه نمونه‌ای از ابزار ذخیرهٔ انرژی حرارتی در فصل ۶ بررسی می‌شود. در فصل ۷ به کارگیری بستر متراکم به مثابه نمونهٔ دیگری از روش‌های متداول ذخیرهٔ انرژی حرارتی سیال ارائه می‌شود

که کاربرد فراوانی دارد. برای بررسی سیستم‌های ذخیره‌ حرارتی سیال، آشنایی با روابط انتقال حرارت و افت فشار در مبدل‌های حرارتی لازم است. این روابط در فصل ۸ بررسی می‌شود. در فصل ۹، علاوه بر بررسی هوای فشرده و نحوه ذخیره‌سازی آن، مروری بر چرخ طیار، به‌مثابه یکی از نخستین ابزارهای ذخیره‌سازی انرژی مکانیکی، خواهیم داشت و در فصل ۱۰ به سایر روش‌های ذخیره‌سازی انرژی می‌پردازیم. بدین ترتیب که در این فصل، ذخیره‌سازی شیمیایی و باتری‌ها و در نهایت در فصل ۱۱ ذخیره‌سازی سرما و هیدروژن بررسی و ارزیابی خواهد شد. در اینجا شایسته است ضمن تشکر از تمامی دانشجویان کارشناسی ارشد و دکترای اینجانب که با انجام دادن تمرینات و تزه‌های خود در پربار کردن فصل‌های این کتاب مرا یاری داده‌اند، از زحمات بی‌شائبه آقای مهندس حسام‌الدین شاهونی که هماهنگی، تکمیل و ویرایش اولیه بخش‌های کتاب را برعهده داشتند، تشکر کنم. همچنین از مسئولان و همکاران انتشارات دانشگاه شهید بهشتی که در آماده‌سازی و انتشار این کتاب همکاری صمیمانه داشته‌اند، سپاسگزارم.

بدیهی است با توجه به ضرورت زمانی، ضیق وقت و برخی مسائل دیگر، ممکن است در قسمت‌های مختلف کتاب اشکال‌هایی موجود باشد، لذا از استادان، صاحب‌نظران، دانشجویان و خوانندگان محترم تقاضا می‌شود با عنایت خاص، اینجانب را از نقص‌ها و نارسایی‌های موجود در چاپ نخست این کتاب که ممکن است از نظر دورمانده باشد مطلع کنند تا در چاپ‌های بعدی اشکالات موجود برطرف شود.

در خاتمه، امیدوارم این کتاب که نخستین کتاب تألیف‌شده در زمینه روش‌های تبدیل و ذخیره‌سازی انرژی در ایران است، بتواند به‌منزله مرجع درسی در دوره‌های تحصیلات تکمیلی و همچنین یکی از منابع کاربردی در مدیریت انرژی کشور به‌کار گرفته شود.

رامین حقیقی خوشخو

۱۳۹۷

فصل ۱

ذخیره‌سازی انرژی

۱.۱. انرژی

انرژی را می‌توان توانایی انجام‌دادن کار تعبیر کرد. در واقع، انرژی موجب ایجاد تغییر در سیستم می‌شود. در میان این تعاریف گوناگون، می‌توان تعریف ماکس پلانک از انرژی را کاملاً جامع دانست: انرژی استعداد اثرگذاری خارجی یک سیستم است. انرژی به اشکال گوناگون در سطح طبیعت موجود است و همواره بشر در فکر راهی برای بهره‌گیری از آن بوده است. از آسیاب‌های آبی و بادی تا نیروگاه‌های مدرن کنونی، همه‌وهمه با یک هدف ساخته شده‌اند و آن استفاده از انرژی موجود در مواد بوده است. برای استفاده از انرژی باید آن را مهار کرد. طی زمان روش‌های گوناگونی به‌منظور مهار انرژی به‌وجود آمده است. واحد اصلی اندازه‌گیری انرژی در سیستم آحاد بین‌المللی، ژول (SI) است. برای اینکه دید بهتری از واحد انرژی داشته باشیم به مثال‌های زیر توجه کنید:

- یک ژول مقدار انرژی است که برای بالا بردن یک جسم به جرم ۱ کیلوگرم و به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر صرف می‌شود.
- برای تبدیل حالت ۱ کیلوگرم آب در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد از حالت مایع به گاز، ۲۲۶۰ کیلوژول انرژی لازم است.
- همچنین، برای اندازه‌گیری انرژی واحدهای دیگری به‌جز ژول نیز به‌کار می‌رود که نحوه تبدیل آن‌ها به یکدیگر در جدول ۱.۱ مشخص شده است.

۲.۱. سطوح مختلف ذخیره انرژی

میلیون‌ها سال است که انرژی به‌صورت اولیه‌اش در بطن و سطح زمین ذخیره شده است. فقط