به نام خداوند جان و خرد

انتشارات
۷۴۵

آشنایی با انواع سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر

ویراست دوم

والکر کوآشنینگ

ترجمه:
دکتر مهدی هدایتی‌زاده
عضو هیئت علمی دانشگاه بیرجند

سرشناسه: کوآشنینگ، والکر، ۱۹۶۹ - Quaschning, Volker.
عنوان و نام پدیدآور: آشنایی با انواع سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر/ والکر کوآشنینگ؛ ترجمه مهدی هدایتی‌زاده؛ ویراستاران علمی محمودرضا گلزاریان، محمدعلی ابراهیمی‌نیک؛ ویراستار ادبی مصطفی قندهاری.
مشخصات نشر: مشهد: دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۹۹.
مشخصات ظاهری: ۵۴۸ ص. مصوّر، جدول، نمودار.
فروست: انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد؛ ۷۴۵.
شابک: ISBN: 978-964-386-442-2
وضعیت فهرست‌نویسی: فاپا.
یادداشت: عنوان اصلی: Regenerative energiesysteme
یادداشت: کتاب حاضر از متن انگلیسی اثر با عنوان "Understanding renewable energy systems , [2016]." به فارسی برگردان شده است.
یادداشت: چاپ قبلی: نشر چهار درخت ۱۳۹۷، (۳۷۱ص.)
یادداشت: نمایه.
موضوع: انرژی‌های پایان‌ناپذیر Renewable energy sources
شناسه افزوده: هدایتی‌زاده، مهدی، ۱۳۶۲ - ، مترجم.
شناسه افزوده: گلزاریان، محمودرضا، ۱۳۵۵ - ، ویراستار.
شناسه افزوده: ابراهیمی نیک، محمدعلی، ۱۳۴۸- ، ویراستار.
شناسه افزوده: دانشگاه فردوسی مشهد، انتشارات.
رده‌بندی کنگره: TJ۸۰۸
رده‌بندی دیویی: ۳۳۳/۷۹۴
شماره کتابشناسی ملی: ۶۱۸۹۸۴۸

انتشارات ۷۴۵

آشنایی با انواع سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر (ویراست دوم)

پدیدآورنده: والکر کوآشنینگ
ترجمه: دکتر مهدی هدایتی‌زاده
ویراستاران علمی: دکتر محمودرضا گلزاریان؛ دکتر محمدعلی ابراهیمی نیک
ویراستار ادبی: مصطفی قندهاری
مشخصات: وزیری، ۱۰۰ نسخه، چاپ دوم، زمستان ۱۴۰۴ (اوّل، ۱۳۹۹)
چاپ و صحافی: همیار
بها : ۸/۲۰۰/۰۰۰ ریال

حق چاپ برای انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد محفوظ است.

مراکز پخش:

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

فهرست مطالب

پیشگفتار ناشر خارجی ۲۷
پیشگفتار مترجم ۲۸

فصل ۱: انرژی و حفاظت از آب‌وهوا ۲۹
واژهٔ انرژی ۲۹
روند تقاضای انرژی ۳۶
روند تقاضا برای انرژی در سطح دنیا ۳۶
روند تقاضا برای انرژی در آلمان ۳۸
وسعت منابع متداول انرژی ۴۱
اثر گلخانه‌ای ۴۳
توان هسته‌ای به‌عنوان راهکاری برای (مقابله با) اثر گلخانه‌ای ۵۰
شکافت هسته‌ای ۵۰
هم‌جوشی هسته‌ای ۵۴
استفاده از انرژی تجدیدپذیر ۵۵
انرژی زمین‌گرمایی ۵۷
انرژی سیاره‌ای ۵۸
انرژی خورشیدی ۵۸
استفادهٔ مستقیم از انرژی خورشیدی ۶۰
نیروگاه‌های حرارتی‌خورشیدی ۶۰
کلکتورهای خورشیدی برای تولید حرارت ۶۱
فتوولتائیک‌ها ۶۲
استفادهٔ غیرمستقیم از انرژی خورشیدی ۶۳
توان برقابی ۶۳
توان باد ۶۴
زیست‌توده ۶۵

حرارت با دمای پایین ۶۶
پیل‌های سوختی و تولید هیدروژن ۶۷
نیاز آتی به انرژی، تبدیل انرژی و حفاظت از آب‌وهوا ۶۸
روند جهانی نیاز به انرژی ۶۸
حفاظت بین‌المللی از آب‌وهوا ۷۱
تبدیل انرژی در آلمان و حفاظت از آب‌وهوا ۷۳
روند تصاعدات کربنی در آلمان ۷۳
منبع انرژی تجدیدپذیر در آلمان ۷۴
منبع توان ۷۵
تأمین گرما ۷۹
حمل‌ونقل ۷۹
تغییر منبع انرژی ۸۰
منابع فصل اوّل ۸۲

فصل ۲: تابش خورشیدی ۸۵
مقدمه ۸۵
خورشید: یک رآکتور هم‌جوش ۸۶
شدت تابش خورشید روی سطح زمین ۹۲
شدت تابش روی یک صفحهٔ افقی ۹۸
موقعیت خورشید و زاویهٔ تابش ۱۰۲
شدت تابش روی یک سطح شیب‌دار ۱۰۷
شدت تابش مستقیم روی یک سطح شیب‌دار ۱۰۷
شدت تابش پخشی روی سطح شیب‌دار ۱۰۸
بازتابش زمین ۱۱۰
جذب تابش درنتیجهٔ تعقیب خورشید ۱۱۱
محاسبهٔ تلفات ناشی از سایه ۱۱۴
ناحیهٔ پیرامون ۱۱۵
تعیین میزان سایه مستقیم ۱۱۶
تعیین میزان سایهٔ پراکنده ۱۱۸
تخمین کلی سایه ۱۲۰
فاصلهٔ بهینه برای ماژول‌های خورشیدی روی تکیه‌گاه ۱۲۰
ابزارهای اندازه‌گیری شدت تابش و شبیه‌سازهای خورشیدی ۱۲۵
اندازه‌گیری شدت تابش کل ۱۲۵
اندازه‌گیری تابش مستقیم و پخشی ۱۲۶

خورشیدهای مصنوعی ۱۲۸
منابع فصل دوم ۱۲۹

فصل ۳: گرمایش خورشیدی حاصل از به‌کارگیری غیرمتمرکزکننده‌ها ۱۳۱
مبانی ۱۳۱
سیستم‌های حرارتی‌خورشیدی ۱۳۵
گرمایش خورشیدی استخر شنا ۱۳۵
سیستم‌های حرارتی‌خورشیدی برای گرم‌کردن آب ۱۳۷
سامانه‌های ثقلی و ترموسیفونی ۱۳۸
سامانه‌های حرارتی‌خورشیدی با گردش اجباری ۱۴۰
استفاده از انرژی خورشیدی برای گرمایش منزل ۱۴۳
گرمایش تنها به‌واسطهٔ خورشید ۱۴۳
گرمایش خورشیدی ناحیه‌ای ۱۴۶
سرمایش خورشیدی ۱۴۷
کلکتورهای خورشیدی ۱۴۸
کلکتورهای یکپارچه با مخزن ۱۴۹
کلکتورهای صفحه‌تخت ۱۵۱
کلکتورهای لوله‌خلأ ۱۵۶
صفحات جاذب کلکتور ۱۵۸
عملکرد و بازده کلکتور ۱۶۰
پایپ‌ها و لوله‌ها ۱۶۷
تلفات طی مرحلهٔ گرمایش لوله‌ها ۱۷۰
تلفات گردش سیّال ۱۷۱
ذخیرهٔ گرمایی ۱۷۳
ذخیرهٔ آب آشامیدنی ۱۷۵
استخرهای شنا ۱۷۹
طراحی سامانه ۱۸۲
انرژی مفید موردنیاز ۱۸۲
میزان تابش خورشیدی و میزان مصرف ۱۸۳
تأمین آب شرب با انرژی خورشید ۱۸۵
انرژی حرارتی‌خورشیدی به‌منظور کمک به گرمایش محیط داخل ۱۸۷
گرمایشی خالص خورشیدی ۱۸۹
برج‌های مکشی خورشیدی ۱۹۰
منابع فصل سوم ۱۹۲

فصل ٤: توان خورشیدی متمرکز ۱۹۳
مقدمه ۱۹۳
تابش متمرکز ۱۹۴
کلکتورهای متمرکزکننده ۱۹۷
کلکتورهای خطی ۱۹۹
انواع کلکتورها و هندسه آن‌ها ۱۹۹
خروجی و بازده کلکتور ۲۰۱
انبساط ناشی از حرارت ۲۰۶
میدان کلکتورهای ناودانی سهمی‌گون ۲۰۷
کلکتورهای نقطه‌ای ۲۰۹
موتورهای حرارتی ۲۱۱
فرایند کارنو ۲۱۱
فرایند رانکین‌کلازیوس ۲۱۲
چرخهٔ برایتون ۲۱۶
فرایند استرلینگ ۲۱۷
سامانه‌های حرارتی‌خورشیدی متمرکزکننده ۲۱۸
برج‌های خورشیدی ۲۲۳
دریافت‌کننده حجمی باز ۲۲۵
دریافت‌کننده تحت فشار ۲۲۵
سامانه‌های استرلینگ بشقابی ۲۲۷
کوره‌های خورشیدی و شیمی خورشیدی ۲۲۸
واردات برق ۲۲۹
منابع فصل چهارم ۲۳۲

فصل ۵: فتوولتائیک‌ها ۲۳۳
مقدمه ۲۳۳
نحوهٔ کار سلول‌های خورشیدی ۲۳۶
مدل اتمی بوهر ۲۳۶
اثر فوتوالکتریک ۲۳۷
نحوهٔ کار یک سلول خورشیدی ۲۴۰
ساخت سلول‌ها و ماژول‌های خورشیدی ۲۵۰
سلول‌های خورشیدی ساخته شده از سیلیکون کریستالی ۲۵۰
ماژول‌های خورشیدی ساخته‌شده از سلول‌های کریستالی ۲۵۵
سلول‌های خورشیدی ساخته شده از سیلیکون آمورف ۲۵۶

سلول‌های ساخته‌شده از سایر مواد ۲۵۸
ارزیابی ماژول‌ها و تضمین کیفیت ۲۶۰
توصیف الکتریکی سلول‌های خورشیدی ۲۶۱
مدار معادل ساده ۲۶۱
مدار معادل بسط‌یافته (مدل تکدیودی) ۲۶۳
مدل دودیودی ۲۶۶
مدل دودیودی با ترم بسیط ۲۶۷
سایر پارامترهای الکتریکی سلول ۲۶۸
ضرایب دمایی ۲۷۱
تعیین پارامترها ۲۷۶
توصیف الکتریکی ماژول‌های خورشیدی ۲۷۷
سلول‌های خورشیدی در مدارهای سری ۲۷۷
اتصال سری تحت شرایط ناهمگن ۲۷۹
اتصال موازی سلول‌های خورشیدی ۲۸۳
اطلاعات فنی در رابطه با ماژول‌های خورشیدی ۲۸۵
مولّدهای خورشیدی و بار (الکتریکی) ۲۸۷
بار مقاومتی ۲۸۷
مبدّل دی‌سی‌دی‌سی ۲۸۸
مبدّل‌های کاهنده ۲۹۰
مبدّل‌های افزاینده ۲۹۳
سایر مبدّل‌های دی‌سیدی‌سی ۲۹۴
تعقیب‌کنندهٔ نقطهٔ توان بیشینه ۲۹۵
ذخیره‌سازی در باتری ۲۹۸
انواع باتری‌ها ۲۹۸
باتری‌های سربی ۲۹۹
سایر باتری‌های ۳۰۵
سامانه‌های باتری ۳۰۸
سایر روش‌های ذخیره ۳۱۳
اینورترها ۳۱۴
فناوری اینورتر ۳۱۴
اینورتر مستطیلی ۳۱۶
توپولوژی اینورترهای جدید ۳۱۹
اینورتر برای فتوولتائیک ۳۲۲
وظایف و عملکردهای یک اینورتر ۳۲۲

بازده اینورتر ۳۲۴
مفاهیم سامانه ۳۲۷
استفادهٔ مستقیم از فتوولتائیک‌ها ۳۳۰
برنامه‌ریزی و طراحی ۳۳۴
سامانه‌های منفصل از شبکه ۳۳۴
سامانه‌های متصل به شبکه ۳۳۷
سامانه‌هایی با مصرف مستقیم ۳۴۱
منابع فصل پنجم ۳۴۸

فصل ٦: انرژی باد ۳٤۹
مقدمه ۳۴۹
تأمین انرژی بادی ۳۵۱
باد چگونه پدید می‌آید؟ ۳۵۱
گروه‌بندی سرعت‌های باد ۳۵۲
توزیع سرعت باد ۳۵۳
تأثیر محیط اطراف و ارتفاع ۳۵۶
بهره‌برداری (استفاده) از انرژی باد ۳۵۹
محتوای انرژی باد ۳۵۹
توربین پسا ۳۶۱
توربین برا ۳۶۴
توربین‌های بادی محور عمودی ۳۶۸
انواع طراحی‌های توربین بادی ۳۷۰
توربین‌های بادی محور افقی ۳۷۱
ساختمان ۳۷۱
پره‌های روتور ۳۷۲
محدودهٔ سرعت باد ۳۷۳
محدودکردن توان خروجی و توقف توربین طی طوفان ۳۷۵
تعقیب باد ۳۷۸
برج، پی (فونداسیون)، جعبه‌دنده و ژنراتور ۳۷۹
توربین‌های بادی فراساحلی ۳۸۱
ماشین‌های الکتریکی ۳۸۳
محاسبهٔ جریان الکتریکی متناوب ۳۸۴
میدان مغناطیسی دوّار ۳۸۸
موتورهای سنکرون ۳۹۳

طراحی ۳۹۳
توصیف الکتریکی ماشین سنکرون ۳۹۵
سنکرون کردن ۳۹۸
موتورهای القایی ۳۹۹
طراحی و شرایط کاری ۳۹۹
مدارهای معادل و منحنی‌های لوکاس جریان ۴۰۰
موازنه توان ۴۰۴
منحنی‌های سرعت‌گشتاور و داده‌های معمول ژنراتور ۴۰۵
اجزای سامانهٔ الکتریکی ۴۰۷
ژنراتور القایی با اتصال مستقیم به شبکه ۴۰۷
ژنراتور سنکرون با اتصال مستقیم به شبکه ۴۱۲
ژنراتور سنکرون با مدار میانی و مبدّل ۴۱۳
ژنراتورهای القایی کنترل‌شده با سرعت ۴۱۵
سامانه‌های ریزشبکه ۴۱۶
توربین‌های بادی متصل به شبکه ۴۱۷
بهرهٔ سامانه ۴۱۷
اتصال شبکه ۴۱۷
منابع فصل ششم ۴۲۰

فصل ۷: توان برقابی ٤٢١
مقدمه ۴۲۱
پتانسیل برقابی ۴۲۲
نیروگاه‌های برقابی ۴۲۷
سدهای ذخیره‌ای ۴۳۰
نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای ۴۳۱
توربین‌های آبی ۴۳۵
توربین کاپلان و توربین حبابی ۴۳۶
توربین اوزبرگر ۴۳۷
توربین فرانسیس ۴۳۷
توربین پلتون ۴۳۸
بازده توربین ۴۳۹
انواع دیگر سامانه‌های برقابی ۴۴۱
نیروگاه‌های جزرومدی ۴۴۱
نیروگاه‌های جریان اقیانوسی ۴۴۲

نیروگاه‌های موجی ۴۴۴
منابع فصل هفتم ۴۴۵

فصل ۸: انرژی زمین گرمایی ٤٤٧
منابع زمین‌گرمایی ۴۴۷
ایستگاه‌های حرارتی زمین‌گرمایی ۴۵۳
تأمین برق از انرژی زمین‌گرمایی ۴۵۴
فرایندهای نیروگاهی ۴۵۵
نیروگاه‌های زمین‌گرمایی ۴۵۶
پمپ‌های حرارتی ۴۵۹
پمپ‌های حرارتی تراکمی ۴۶۰
پمپ‌های حرارتی جذبی ۴۶۱
پمپ‌های حرارتی جذب سطحی ۴۶۴
کاربردها، طرح‌ریزی و ضریب عملکرد ۴۶۵
منابع فصل هشتم ۴۶۹

فصل ۹: استفاده از زیست‌توده ٤٧١
دسترسی به زیست‌توده ۴۷۱
سوخت جامد ۴۷۴
زیست سوخت‌های مایع ۴۷۸
روغن گیاهی ۴۷۹
بیودیزل ۴۸۰
الکل‌های زیستی ۴۸۰
سوخت‌های زیست‌توده به مایع ۴۸۲
زیست سوخت‌های گازی ۴۸۳
عملکرد در هکتار و تعادل زیست‌محیطی ۴۸۵
واحدهای زیست‌توده ۴۸۷
هیتر زیست‌توده‌ای ۴۸۷
ایستگاه‌های حرارتی زیست‌توده ۴۹۰
منابع فصل نهم ۴۹۲

فصل ۱۰: تولید هیدروژن، پیل‌های سوختی و تولید متان ٤٩٣
مقدمه ۴۹۳
تولید و ذخیرهٔ هیدروژن ۴۹۳

پیل‌های سوختی ۴۹۸
مقدمه ۴۹۸
انواع پیل‌های سوختی ۴۹۸
بازده‌ها و پاسخ عملکردی ۵۰۲
متانسیون و ذخیرهٔ زیرزمینی ۵۰۴
منابع فصل دهم ۵۰۸

فصل ۱۱: بررسی امکانسنجی اقتصادی ۵۰۹
مقدمه ۵۰۹
هزینهٔ تولید انرژی ۵۱۱
محاسبات بدون لحاظ سود سرمایه ۵۱۱
هزینه‌های یک سامانهٔ حرارتی‌خورشیدی برای تأمین آب گرم ۵۱۲
نیروگاه‌های حرارتی‌خورشیدی ۵۱۳
سامانه‌های فتوولتائیک ۵۱۴
توربین‌های بادی ۵۱۵
تأسیسات برقابی ۵۱۶
تأسیسات زمین‌گرمایی ۵۱۷
گرمایش حاصل از پلت‌های چوبی ۵۱۸
محاسبهٔ سود سرمایه ۵۲۰
سامانه‌های حرارتی‌خورشیدی برای تأمین آب گرم ۵۲۳
نیروگاه‌های حرارتی‌خورشیدی ۵۲۴
سامانه‌های فتوولتائیک ۵۲۴
توربین‌های بادی ۵۲۵
کمک به سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر ۵۲۵
روند آتی هزینه‌های انرژی تجدیدپذیر ۵۲۶
هزینه‌های سامانه‌های متداول انرژی ۵۲۹
هزینه‌های خارجی ۵۳۱
سوبسید بر بازار انرژی ۵۳۱
هزینه‌های تحقیق و توسعه ۵۳۴
هزینهٔ اثرات زیست‌محیطی و (تأثیر آن بر) سلامتی ۵۳۵
سایر هزینه‌های خارجی ۵۳۷
درونی‌سازی هزینه‌های خارجی ۵۳۷
دیدگاه نقّادانه بر تحلیل‌های امکان‌سنجی اقتصادی ۵۳۹

رشد نامحدود سرمایه ۵۳۹
مسئولیت سرمایه..... ۵۴۱
منابع فصل یازدهم ۵۴۲

ضمیمه: ثابت‌های مهم ۵۴۳
واحدهای اصلی انگلیسی و آمریکایی ۵۴۴

نمایه ۵۴۵

فهرست شکل‌ها

شکل ۱–۱ هزینهٔ گرمایش آب ۳۳
شکل ۱–۲ زنجیرهٔ تبدیل انرژی، تلفات و انتشار دی‌اکسیدکربن ناشی از گرمایش آب ۳۵
شکل ۱–۳ تولید سالیانهٔ نفت خام در جهان ۳۷
شکل ۱–۴ مصرف جهانی انرژی اوّلیه در سال ۲۰۱۱ در هر منطقه ۳۸
شکل ۱–۵ سهم منابع گوناگون در مصرف انرژی اوّلیه در آلمان در سال ۲۰۱۱ ۴۰
شکل ۱–۶ سهم بخش‌های مختلف در مصرف انرژی نهایی در آلمان در سال ۲۰۱۰ ۴۰
شکل ۱–۷ مصرف انرژی تجدیدپذیر در بخش انرژی آلمان ۴۱
شکل ۱–۸ نحوهٔ اثر گلخانه‌ای آنتروپژون (ناشی از فعالیت‌های بشر) ۴۴
شکل ۱–۹ افزایش غلظت دی‌اکسیدکربنِ اتمسفر در طی چهارصدهزار سال و نیز هزار سال گذشته ۴۵
شکل ۱– ۱۰ سرانهٔ انتشار دی‌اکسیدکربن ناشی از مصرف انرژی در سال ۲۰۱۰ ۴۷
شکل ۱–۱۱ مسیرهای کاهش تصاعدات دی‌اکسیدکربن کل به‌منظور محدودکردن گرمایش جهان به زیر ۲ درجهٔ سلسیوس. ۴۹
شکل ۱–۱۲ سهم انرژی هسته‌ای در تأمین برق در سال ۲۰۱۱ ۵۲
شکل ۱–۱۳ منابع و روش‌های استفاده از انرژی تجدیدپذیر ۵۶
شکل ۱–۱۴ دایره‌های انرژی. مقدار انرژی خورشیدی که سالیانه به زمین می‌رسد، چندین برابر بیشتر از کل مصرف انرژی سالیانه و کل ذخایر انرژی است ۵۹
شکل ۱–۱۵ ارقام فروش پمپ‌های حرارتی در آلمان ۶۷
شکل ۱–۱۶ روندهای تصاعد دی‌اکسیدکربن در آلمان ۷۴
شکل ۱–۱۷ روند گذشتهٔ توسعهٔ تقاضا برای انرژی اوّلیه در آلمان طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۱ در کنار یک سناریو برای توسعهٔ پایدار تا سال ۲۰۵۰ ۷۵
شکل ۱–۱۸ روند گذشتهٔ مصرف انرژی ناخالص در آلمان طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۱ در کنار یک سناریو برای توسعهٔ پایدار تا سال ۲۰۵۰ ۷۶
شکل ۱–۱۹ مفهوم ذخیره برای یک منبع انرژی تجدیدپذیر ۷۸
شکل ۱–۲۰ تأمین حرارت بلوک‌های ساختمانی از انرژی‌های تجدیدپذیر ۸۰
شکل ۲–۱ هم‌جوشی چهار هستهٔ هیدروژن برای تشکیل یک هستهٔ هلیوم (ذرهٔ آلفا) ۸۷
شکل ۲–۲ توان تابشی عبوری از سطح یک کره با شعاع rSE برابر با توان تابشی عبوری از سطح خورشید است ۸۹
شکل ۲–۳ طیف AM0 و طیف پلانک برای یک جسم سیاه با دمای ۵۷۷۷ کلوین ۹۱

شکل ۲–۴ طیف‌های نور خورشید. AM0: طیف در فضا؛ AM1.5g: طیف روی زمین، درحالی‌که زاویهٔ خورشید ۴۱/۸ درجه و یک سطح با زاویهٔ ۳۷ درجه به‌سمت خورشید است ۹۳
شکل ۲–۵ مسیرهای خورشید و مقادیر AM برای روزهای مختلفی در برلین و قاهره..... ۹۴
شکل ۲–۶ منحنی‌های روزانهٔ شدت تابش کل در کارلسروهه در۲ ژوئن، ۲۲ دسامبر و ۲۸ دسامبر ۱۹۹۱ ..... ۹۵
شکل ۲–۷ میانگین درازمدت شدت تابش کل سالیانهٔ روی سطح افقی در طی سال در اروپا..... ۹۷
شکل ۲–۸ شدت تابش سالیانه در پوتسدام از سال ۱۹۳۷ تا ۲۰۱۱ به‌همراه مقادیر میانگین..... ۹۸
شکل ۲–۹ عبور تابش خورشیدی از جو..... ۹۹
شکل ۲–۱۰ مجموع تابش مستقیم و پخشی در برلین..... ۱۰۰
شکل ۲–۱۱ مجموع تابش مستقیم و پخشی در قاهره ۱۰۰
شکل ۲–۱۲ سهم شدت تابش بخشی با توجه به kT و Ys..... ۱۰۲
شکل ۲–۱۳ اختصاص زوایا برای موقعیت خورشید با توجه به..... ۱۰۳
شکل ۲–۱۴ نمودار مربوط به موقعیت خورشید برای برلین..... ۱۰۵
شکل ۲–۱۵ نمودار مربوط به موقعیت خورشید برای قاهره..... ۱۰۶
شکل ۲–۱۶ محاسبهٔ زاویه برخورد تابش خورشید روی یک سطح شیب‌دار ۱۰۶
شکل ۲–۱۷ شدت تابش خورشید روی یک سطح افقی و یک سطح عمود بر تابش..... ۱۰۷
شکل ۲–۱۸ تفاوت میزان تابش روی یک سطح افقی و سطحی که خورشید را تعقیب می‌کند در روزهای غیرابری و عرض جغرافیایی ۵۰ درجه ۱۱۱
شکل ۲–۱۹ تفاوت در تابش خورشیدی سالیانه در برلین با توجه به جهت و زاویه در مقایسه با یک سطح افقی..... ۱۱۳
شکل ۲– ۲۰ محاسبهٔ میزان تابش روی یک سطح شیب‌دار از روی داده‌های موجود برای یک سطح افقی..... ۱۱۵
شکل ۲– ۲۱ تعیین ارتفاع و زاویهٔ آزیموت یک مانع نسبت به یک نقطهٔ مرجع..... ۱۱۶
شکل ۲–۲۲ محیط پیرامون داخل یک شبکهٔ زاویه‌بندی‌شده ۱۱۷
شکل ۲–۲۳ نمودار موقعیت خورشید برای برلین با شبه‌سایه‌هایی از اشیای پیرامون..... ۱۱۷
شکل ۲–۲۴ آزمایش سایه برای دو موقعیت مختلف خورشید A و B..... ۱۱۸
شکل ۲–۲۵ سطحی که با اتصال دو نقطه و افق مشخص شده است ۱۱۹
شکل ۲–۲۶ هندسهٔ ماژول‌ها روی پایه‌های نگهدارنده..... ۱۲۱
شکل ۲–۲۷ زاویهٔ سایهٔ α نسبت به میزان بهره‌برداری از سطح f و زاویهٔ شیب EY..... ۱۲۲
شکل ۲–۲۸ تلفات نسبی سایهٔ s نسبت به زاویهٔ سایهٔ α و زاویه شیب YE در برلین..... ۱۲۳
شکل ۲–۲۹ تابش‌سنج برای اندازه‌گیری شدت تابش کل ۱۲۵
شکل ۲– ۳۰ ایستگاهی که تابش مستقیم، پخشی و کل را اندازه‌گیری می‌کند..... ۱۲۶
شکل ۲–۳۱ بالا: تابش‌سنج با کرهٔ سایه‌انداز؛ پایین: آذرسنج ۱۲۷
شکل ۳–۱ عبور حرارت از یک مانع شامل n لایه با سطح مقطع یکسان A..... ۱۳۴
شکل ۳–۲ نحوهٔ کار استخر خورشیدی ۱۳۵
شکل ۳–۳ سامانه‌های خورشیدی تولید آب داغ ۱۳۸
شکل ۳–۴ چگونگی نحوهٔ کار یک سامانهٔ حرارتیخورشیدی ثقلی (ترموسیفونی)..... ۱۳۹

شکل ۳–۵ نحوهٔ کار یک سامانهٔ دومداره با جریان اجباری ۱۴۱
شکل ۳–۶ نحوهٔ کار یک سامانهٔ تأمین آب گرم نوشیدنی با دو مخزن حرارتی ۱۴۲
شکل ۳–۷ سامانهٔ حرارتی‌خورشیدی برای تأمین آب گرم و نیز گرمایش هوای محیط ۱۴۳
شکل ۳–۸ سامانهٔ حرارتی‌خورشیدی برای تأمین آب گرم و گرمایش محیطی کاملاً متکی به خورشید ۱۴۵
شکل ۳–۹ یک مجموعهٔ مسکونی در اُربرگ سوئیس که گرمایشی محیطی منازل آن تماماً به‌وسیلهٔ خورشید است ۱۴۵
شکل ۳– ۱۰ چگونگی نحوهٔ کار شبکهٔ حرارتی‌خورشیدی ناحیه‌ای ۱۴۶
شکل ۳–۱۱ نحوهٔ کار یک سامانهٔ سرمایش خورشیدی ۱۴۹
شکل ۳–۱۲ کلکتورهای صفحه‌تخت و لوله‌خلأ ۱۵۰
شکل ۳–۱۳ مقطع عرضی یک کلکتور با منبع ذخیرهٔ یکپارچه ۱۵۰
شکل ۳–۱۴ عرض مقطع یک کلکتور صفحه‌تخت ۱۵۲
شکل ۳–۱۵ نحوهٔ کار یک کلکتور صفحه‌تخت ۱۵۳
شکل ۳–۱۶ تبدیل انرژی در یک کلکتور خورشیدی و انواع مختلف تلفات ۱۵۳
شکل ۳–۱۷ برخورد اشعهٔ خورشید با پوشش شیشه‌ای بالا ۱۵۴
شکل ۳–۱۸ سطح مقطع یک کلکتور ۱۵۶
شکل ۳–۱۹ نحوهٔ کار یک کلکتور لوله‌خلأ ۱۵۷
شکل ۳– ۲۰ طرح‌های مختلف جاذب‌های خورشیدی ۱۵۹
شکل ۳–۲۱ تلفات ناشی از پوشش‌های مختلف ۱۶۰
شکل ۳–۲۲ طیف‌های اجسام سیاه در دماهای ۵۷۷۷ و ۳۵۰ کلوین در کنار مقادیر جذبِ جاذب‌های انتخابی و غیرانتخابی ۱۶۱
شکل ۳–۲۳ بازده‌های کلکتور در مقابل شدت تابش و اختلاف دماهای متفاوت ۱۶۳
شکل ۳–۲۴ بازده انواع کلکتورها بسته به اختلاف دما در شدت تابش ۸۰۰ وات بر مترمربع ۱۶۴
شکل ۳–۲۵ ضریب اصلاح‌کنندهٔ زاویهٔ برخورد برای یک کلکتور صفحه‌تخت و لوله‌خلأ با توجه به زاویهٔ برخورد ۱۶۷
شکل ۳–۲۶ یک مخزن ذخیرهٔ استوانه‌ای با دو انتهای کروی ۱۷۵
شکل ۳–۲۷ منحنی دمای مخزن در برابر زمان برای یک مخزن ۳۰۰ لیتری بدون ورود یا خروج آب ۱۷۹
شکل ۳–۲۸ تعادل انرژی برای یک استخر شنا ۱۸۰
شکل ۳–۲۹ کسر خورشیدی برای آب آشامیدنی در مقابل مساحت کلکتور برای انواع کلکتورها و اندازه‌های مختلف مخزن ۱۸۴
شکل ۳– ۳۰ منحنیِ مشخصهٔ کسر تابش برای سامانه‌های آبگرم‌کن حرارتی‌خورشیدی در آلمان ۱۸۶
شکل ۳– ۳۱ رشدِ معمول نیاز به گرمایشِ محیط و آب داغ در آلمان و سهم انرژی خورشیدی و گرمایش رایج در یک ساختمان قدیمی که ۲۰ درصد از نیاز حرارتی آن توسط انرژی خورشید تأمین می‌شود ۱۸۸
شکل ۳–۳۲ نحوهٔ کار یک برج مکشی خورشیدی ۱۹۱
شکل ۴–۱ نحوهٔ تمرکز یافتن نور ۱۹۵
شکل ۴–۲ زاویهٔ نیمه‌مخروطی خورشید ۱۹۵
شکل ۴–۳ بیشینهٔ دمای جاذب برمبنای ضریب تمرکز ۱۹۷
شکل ۴–۴ متمرکز کردن تابش خورشید با استفاده از کلکتورهای خطی ۱۹۸
شکل ۴–۵ متمرکز کردن تابش خورشید با استفاده از کلکتورهای نقطه‌ای ۱۹۹

شکل ۴–۶ کلکتورهای ناودانی سهمی‌گون در مرکز تحقیقاتی PSA در آلمریا، اسپانیا ۲۰۰
شکل ۴–۷ هندسهٔ یک کلکتور ناودانی سهمی‌گون ۲۰۱
شکل ۴–۸ میزان تلفات و انرژی دریافتی در نقاط انتهایی کلکتورهای ناودانی سهمی‌گونی که در یک ردیف کنار هم قرار دارند ۲۰۲
شکل ۴–۹ رخدادهای حرارتی و نوری در لولهٔ جاذب ۲۰۳
شکل ۴–۱۰ بازده کلکتور در مقابل دمای جاذب برای ضریب تمرکزهای مختلف ۲۰۵
شکل ۴– ۱۱ بالا: استفاده از قطعهٔ آکاردئونی برای جذب انبساط‌های شیشه و فلز؛ پایین: لولهٔ جاذب برای دماهای بالا که توسط شرکت Schott برای نیروگاه‌های ناودانی سهمی‌گون ساخته شده است ۲۰۶
شکل ۴–۱۲ سایه افتادن روی ردیفی از کلکتورهای ناودانی سهمی‌گون به‌واسطهٔ ردیفی دیگر ۲۰۸
شکل ۴–۱۳ منحنی معمول زمان برای شدت تابش مستقیم عمود و (توان) خروجی میدان و ژنراتور در طی یک روز برای یک نیروگاه ناودانی سهمی‌گون ۲۱۰
شکل ۴–۱۴ هلیوستات‌های واقع در مرکز تحقیقاتی PSA در آلمریا، اسپانیا ۲۱۰
شکل ۴–۱۵ کردار فرایند رانکین‌کلازیوس (فرایند توربین بخار) ۲۱۲
شکل ۴–۱۶ نمودار حجم‌فشار برای فرایند رانکین‌کلازیوس ۲۱۳
شکل ۴–۱۷ نمودار T-s برای فرایند رانکینکلازیوسِ بدون فوق گرمایشِ میانی ۲۱۵
شکل ۴–۱۸ نحوهٔ کار یک توربین گازی باز ۲۱۶
شکل ۴–۱۹ یک نیروگاه ناودانی سهمی‌گون با تولید بخار موازی و یک کلکتور مجزّا و یک مدار توربین بخار ۲۱۹
شکل ۴–۲۰ یک نیروگاه ناودانی سهمی‌گون با مخزن حرارتی ۲۲۰
شکل ۴–۲۱ خروجی تضمینی یک نیروگاه ناودانی سهمی‌گون با مخزن حرارتی ۲۲۱
شکل ۴–۲۲ یک توربین گازی سیکلِ ترکیبی به‌همراه میدان کلکتور ناودانی سهمی‌گون یکپارچه ۲۲۲
شکل ۴–۲۳ برج خورشیدی در مجموعه تحقیقاتی PSA در آلمریا (اسپانیا) ۲۲۴
شکل ۴–۲۴ برج خورشیدی با دریافت‌کنندهٔ حجمی باز ۲۲۶
شکل ۴–۲۵ برج خورشیدی با دریافت‌کنندهٔ تحت فشار حجمی به‌منظور به‌گردش درآوردن توربین‌های بخار و گاز با استفاده از انرژی خورشید ۲۲۶
شکل ۴–۲۶ نمونه‌های یورو بشقاب در مرکز تحقیقاتی PSA در آلمریا، اسپانیا ۲۲۸
شکل ۴–۲۷ کوره‌های خورشیدی در مرکز تحقیقاتی PSA در آلمریا، اسپانیا ۲۲۹
شکل ۴–۲۸ گزینه‌های واردات برق تجدیدپذیر از آفریقای شمالی به اروپا در کنار هزینه و ظرفیت آن‌ها در میان‌مدت ۲۳۱
شکل ۵–۱ سامانهٔ فتوولتائیک یکپارچه با بام ۲۳۵
شکل ۵–۲ وضعیت انرژی الکترون‌ها در یک اتم، در مولکول‌ها و جامدات ۲۳۹
شکل ۵–۳ باندهای انرژی برای رساناها، نیمه‌رساناها و عایق‌ها ۲۳۹
شکل ۵–۴ فوتون‌ها باعث حرکت الکترون‌ها از نوار ظرفیت به نوار رسانش می‌شوند ۲۴۰
شکل ۵–۵ ساختمان کریستالی سیلیکون (چپ)، هدایت ذاتی به‌دلیل حفره‌های الکترونی در شبکهٔ کریستالی (راست) ۲۴۲
شکل ۵–۶ سیلیکون n– دوپینگ و p– دوپینگ ۲۴۳
شکل ۵–۷ تشکیل ناحیهٔ سدّی در یک اتصال p-n درنتیجهٔ نفوذ الکترون‌ها و حفره‌های الکترونی ۲۴۵

شکل ۵–۹ اتفاقاتی که داخل یک سلول خورشیدیِ در معرض نور خورشید روی می‌دهد ۲۴۷
شکل ۵– ۱۰ منحنی رایج برای بازده کوانتوم داخلیِ انواع سلول‌های خورشیدی ۲۴۸
شکل ۵–۱۱ منحنی رایجِ حساسیت طیفی یک سلول خورشیدی برای انواع سلول‌های خورشیدی ۲۴۸
شکل ۵–۱۲ سیلیکون پلی‌کریستال برای سلول‌های خورشیدی ۲۵۱
شکل ۵–۱۳ ساختمان یک سلول خورشیدی کریستالی ۲۵۵
شکل ۵–۱۴ بالا: ساختمان کلی یک ماژول خورشیدی؛ پایین: ماژول‌های خورشیدی نصب‌شده ۲۵۷
شکل ۵–۱۵ ساختمان کلی یک سلول خورشیدی آمورف ۲۵۸
شکل ۵–۱۶ بالا: تصویر الکترولومینوسانس که نشان‌دهندهٔ سلول‌های آسیب‌دیده است ۲۶۲
شکل ۵–۱۷ مدار معادل ساده‌شدهٔ یک سلول خورشیدی ۲۶۴
شکل ۵–۱۸ تأثیر شدت تابش بر منحنی مشخصهٔ جریان‌ولتاژ یک سلول خورشیدی ۲۶۴
شکل ۵–۱۹ مدار معادل بسط‌یافته برای یک سلول خورشیدی (مدل تک‌دیودی) ۲۶۴
شکل ۵– ۲۰ تأثیر مقاومت سری Rs بر منحنی مشخصهٔ جریان‌ولتاژ یک سلول خورشیدی ۲۶۵
شکل ۵–۲۱ تأثیر مقاومت موازی Rp بر منحنی مشخصهٔ جریان‌ولتاژ یک سلول خورشیدی ۲۶۵
شکل ۵–۲۲ مدل دودیودی یک سلول خورشیدی ۲۶۷
شکل ۵–۲۳ مدار معادل دودیودی با منبع جریان ثانویهٔ معرّف شکست در ولتاژهای منفی ۲۶۸
شکل ۵–۲۴ منحنی جریان‌ولتاژ یک سلول پلی‌کریستال در گسترهٔ وسیعی از ولتاژ ۲۶۹
شکل ۵–۲۵ مشخصه‌های جریان‌ولتاژ و توان‌ولتاژ سلول خورشیدی با نقطهٔ توان بیشینه ۲۷۰
شکل ۵–۲۶ چگونگی تغییر منحنی مشخصهٔ سلول خورشیدی با تغییرات دما ۲۷۴
شکل ۵–۲۷ اتصال سری سلول‌های خورشیدی ۲۷۷
شکل ۵–۲۸ منحنی مشخصهٔ یک ماژول برمبنای منحنی‌های حاصل از ۳۶ سلول ۲۷۹
شکل ۵–۲۹ منحنی مشخصهٔ ماژولی که ۷۵ درصدِ یک سلول آن سایه شده است ۲۸۰
شکل ۵–۳۰ ترکیب دیودهای کنارگذر در یک ماژول خورشیدی با ۳۶ سلول ۲۸۲
شکل ۵–۳۱ منحنی مشخصهٔ یک ماژول، درحالی‌که یک سلول آن ۷۵ درصد سایه شده و نیز با تعداد سلول‌هایی که یک تک‌دیود به آن‌ها متصل است ۲۸۳
شکل ۵–۳۲ منحنی‌های جریان‌ولتاژ یک ماژول با ۳۶ سلول و دو دیود کنارگذر که هریک به ۱۸ سلول متصل است و یک سلول میزان سایهٔ متفاوتی را تجربه می‌کند ۲۸۴
شکل ۵–۳۳ منحنی‌های توان‌ولتاژ یک ماژول با ۳۶ سلول و دو دیود کنارگذر که هریک به ۱۸ سلول متصل است و یک سلول میزان سایهٔ متفاوتی را تجربه می‌کند. ۲۸۴
شکل ۵–۳۴ تعداد n سلول خورشیدی که به‌صورت موازی به‌هم متصل شده‌اند ۲۸۵
شکل ۵–۳۵ مولّد خورشیدی با بار مقاومتی ۲۸۸
شکل ۵–۳۶ ماژول خورشیدی به‌همراه مقاومت الکتریکی در شرایط کاری مختلف ۲۸۸
شکل ۵–۳۷ مولّد خورشیدی متصل به یک وسیلهٔ برقی ازطریق مبدّل دی‌سیدی‌سی ۲۸۹
شکل ۵–۳۸ یک ماژول خورشیدی با بارِ ولتاژ ثابت در شرایط کاری مختلف ۲۸۹
شکل ۵–۳۹ یک مبدّل کاهنده با بار مقاومتی ۲۹۰

شکل ۵– ۴۰ منحنی جریان و ولتاژ به‌همراه یک مبدّل کاهنده ۲۹۲
شکل ۵–۴۱ مبدّل کاهنده با خازن‌ها ۲۹۲
شکل ۵–۴۲ نحوهٔ کار یک مبدّل افزاینده ۲۹۴
شکل ۵–۴۳ مبدّل باکبوست ۲۹۵
شکل ۵–۴۴ نحوهٔ کار یک مبدّل فلای‌بک ۲۹۵
شکل ۵–۴۵ چگونگی عملکرد یک تعقیب‌کنندهٔ نقطهٔ توان بیشینه ۲۹۸
شکل ۵–۴۶ فرایندهای شارژ و تخلیه داخل یک باتری سربی ۳۰۱
شکل ۵–۴۷ ظرفیت موجود یک باتری سربی با C100=100 Ah به‌صورت تابعی از جریان تخلیه و دما ۳۰۲
شکل ۵–۴۸ ولتاژ باتری به‌صورت تابعی از مدت‌زمان تخلیه و جریان تخلیه ۳۰۳
شکل ۵–۴۹ فلوچارت محاسبهٔ حالت شارژ یک سامانهٔ باتری فتوولتائیک ۳۰۵
شکل ۵–۵۰ یک سامانهٔ فتوولتائیک ساده با ذخیرهٔ باتری ۳۰۹
شکل ۵–۵۱ نقاط توان یک مولّد خورشیدی به‌همراه یک باتری سربی برای ذخیره و نیز یک دیود مسدودکننده
و مقاومت کابل ۰/۱ اُهمی، بدون بار ۳۱۱
شکل ۵–۵۲ یک سامانهٔ باتری فتوولتائیک به‌همراه یک کنترل‌کنندهٔ شارژ ۳۱۱
شکل ۵–۵۳ یک سامانهٔ باتری فتوولتائیک با یک کنترل‌کنندهٔ شارژ سری ۳۱۲
شکل ۵–۵۴ یک سامانهٔ باتری فتوولتائیک با یک کنترل‌کنندهٔ شانت ۳۱۲
شکل ۵–۵۵ مدار یک ماسفت n کاناله با قابلیت خودانسدادی ۳۱۵
شکل ۵–۵۶ پل اچ ۳۱۶
شکل ۵–۵۷ یک منحنی توان ایده‌ال برای یک پل اچ نیمه‌کنترلی ۳۱۷
شکل ۵–۵۸ ایجاد یک موج مستطیلی با استفاده از موج‌های سینوسی مختلف ۳۱۸
شکل ۵–۵۹ پل شش‌پالسی ۳۲۰
شکل ۵– ۶۰ منحنی حاصل از ماژولاسیون پهنای پالس ۳۲۰
شکل ۵–۶۱ مدارهای اینورتر با بازده بالا ۳۲۱
شکل ۵–۶۲ اجزای یک اینورتر فتوولتائیک ۳۲۲
شکل ۵–۶۳ بازده اینورتر نسبت به خروجی سامانهٔ دی‌سی و (نیز) سهم متداول انرژی برای خروجی متوسطِ ساعتی
سامانه در انرژی کل برای شهر برلین ۳۲۵
شکل ۵–۶۴ بازده اینورتر نسبت به خروجیِ سامانهٔ دی‌سی در دو ولتاژِ دی‌سیِ مختلف و (نیز) سهم متداول انرژی،
برای خروجی متوسطِ ساعتیِ سامانه، در انرژی کل برای شهر لس‌آنجلس ۳۲۶
شکل ۵–۶۵ یک سامانهٔ فتوولتائیک شامل چندین رشته که به یک اینورتر مرکزی متصل شده‌اند ۳۲۸
شکل ۵–۶۶ اینورتر مرکزیِ اربابرده برای سامانهٔ فتوولتائیک ۳۲۸
شکل ۵–۶۷ مبدّل فتوولتائیک با اینورترهای رشته‌ای (بالا) و ریزْاینورترها (پایین) ۳۲۹
شکل ۵–۶۸ سامانهٔ فتوولتائیک متصل به شبکه با ذخیره‌سازی در باتریِ متصل به جریان متناوب ۳۳۱
شکل ۵–۶۹ سامانهٔ فتوولتائیک متصل به شبکه با ذخیره‌سازی در باتریِ متصل به جریان مستقیم ۳۳۲
شکل ۵–۷۰ سامانهٔ فتوولتائیک متصل به شبکه به‌همراه منبع ذخیرهٔ هیدروژن ۳۳۳

شکل ۵–۷۱ یک سامانهٔ فتوولتائیک متصل به شبکه به‌همراه منبع ذخیرهٔ انرژی مازاد ۳۳۴
شکل ۵–۷۲ متوسطِ روزانه و ماهیانهٔ شدت تابش خورشید روی سطحی افقی و نیز سطحی با شیب ۶۰ درجه به‌سمت جنوب در ماه دسامبر برای شهر برلین ۳۳۶
شکل ۵–۷۳ گستره‌های ولتاژ برای یک مولّد فتوولتائیک و یک اینورتر ۳۳۹
شکل ۵–۷۴ بار معمول برای یک خانهٔ تک‌خانوار در آلمان در یک پایانِ هفتهٔ بهاریِ آفتابی با رزولوشن یک دقیقه‌ای در مقابل برق تولیدی یک سامانهٔ فتوولتائیک ۵ کیلوواتی ۳۴۱
شکل ۵–۷۵ نرخ خودمصرفیِ متوسط سالیانه و معمول در آلمان برای یک خانهٔ تک‌خانوار نسبت به‌اندازهٔ سامانه فتوولتائیک و تعداد نفرات ۳۴۲
شکل ۵–۷۶ منحنی بار معمولی برای یک شرکت تجاری برمبنای استاندارد بار G0 با مصرف ۶۰۰۰۰ کیلووات‌ساعت برق... ۳۴۴
شکل ۵–۷۷ روش‌های استفاده از انرژی مازاد تولیدی توسط یک سامانهٔ فتوولتائیک که مستقیماً به مصرف نمی‌رسد ۳۴۵
شکل ۵–۷۸ مقادیر متوسط سالیانهٔ معمول برای نرخ خودمصرفی نسبت به ظرفیت فتوولتائیک و ظرفیت ذخیرهٔ باتری در آلمان برای یک خانوار با مصرف سالیانهٔ ۴۷۰۰ کیلووات‌ساعت ۳۴۵
شکل ۵–۷۹ مقادیر متوسط سالیانهٔ معمول برای نرخ خودمصرفی در سامانه‌های خودمصرف نسبت به ظرفیت فتوولتائیک و ظرفیت ذخیرهٔ باتری در آلمان برای یک خانوار با مصرف سالیانهٔ ۴۷۰۰ کیلووات‌ساعت ۳۴۶
شکل ۵–۸ نحوهٔ کار سلول خورشیدی برمبنای مدل باند (نوار) انرژی ۲۴۶
شکل ۵–۸۰ مقادیر متوسط سالیانهٔ معمول برای میزان خودکفایی نسبت به ظرفیت فتوولتائیک و ظرفیت ذخیرهٔ باتری در آلمان برای یک خانوار با مصرف سالیانهٔ ۴۷۰۰ کیلووات‌ساعت ۳۴۷
شکل ۶–۱ گردش کلی (روی سطح کرهٔ زمین) و تولید باد ۳۵۲
شکل ۶–۲ توزیع فراوانی سرعت‌های باد در مکانی واقع در ساحل دریایی در شمال آلمان در ارتفاع ده متری ۳۵۴
شکل ۶–۳ توزیع‌های ریلی برای انواع سرعتهای متوسط باد ۳۵۶
شکل ۶–۴ عباراتی که برای توصیف راستای باد استفاده می‌شوند ۳۵۶
شکل ۶–۵ افزایش سرعت باد با ارتفاع و با توجه به طول ناهمواری، در مقایسه با سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری ۳۵۸
شکل ۶–۶ جریان باد در اطراف یک توربین بادی در مزرعه ۳۶۰
شکل ۶–۷ ضرایب مقاومت برای شکل‌های مختلف ۳۶۲
شکل ۶–۸ مدل بادسنج استفاده‌شده برای محاسبهٔ توان ۳۶۳
شکل ۶–۹ سرعت باد و چرخش روتور برای محاسبهٔ نرخ جریان استفاده شده‌اند ۳۶۵
شکل ۶– ۱۰ نیروهای مؤثر برای یک توربین برا ۳۶۶
شکل ۶–۱۱ سرعت‌های باد و نیروهای روی یک پرّهٔ روتور ۳۶۶
شکل ۶–۱۲ ضریب توان cP به‌صورت تابعی از نسبت سرعت نوک λ برای توربین وستاس ۳۶۸
شکل ۶–۱۳ ضرایب توان و تقریب‌هایی با استفاده از چندجمله‌ای درجهٔ ۳ ..... ۳۶۹
شکل ۶–۱۴ روتورهای محور عمودی ۳۶۹
شکل ۶–۱۵ طراحی و اجزای یک توربین بادی ۳۷۲
شکل ۶–۱۶ تغییر ضخامت و زاویه در عرض پرّهٔ روتور ۳۷۴

شکل ۶–۱۷ توان واقعی و ضریب توان یک ژنراتور در مقابل سرعت باد برای یک توربین بادیِ ۲/۳ مگاواتی Enercon E-70 [Ene06] ۳۷۶
شکل ۶–۱۸ برهم‌خوردن (اختلال در) جریان باد به‌علت اثر استال در هنگام وزش بادی با سرعت زیاد ۳۷۶
شکل ۶–۱۹ تنظیم (زاویه) پیچ پرّه در سرعت‌های متفاوت باد ۳۷۸
شکل ۶– ۲۰ منحنی توان برای توربین‌های بادی‌ای که به شیوهٔ استال و پیچ کنترل می‌شوند ۳۷۸
شکل ۶–۲۱ ساخت یک توربین بادی ۳۸۰
شکل ۶–۲۲ انواع فونداسیون‌ها برای توربین‌های بادی فراساحلی ۳۸۲
شکل ۶–۲۳ منحنی زمانی جریان و ولتاژ در برابر دامنه ۳۸۴
شکل ۶–۲۴ مدار سری مقاومت و سلف به‌همراه نمودارهای برداری ۳۸۶
شکل ۶–۲۵ میدانهای مغناطیسی در اطراف یک رسانا و یک سلف بر اثر جریان عبوری از آن‌ها ۳۸۸
شکل ۶–۲۶ چپ: مقطع عرضی یک استاتور با سه سیمپیچ که با زوایای ۱۲۰ درجه نسبت به یکدیگر و به‌منظور تولید میدان دوّار قرار گرفته‌اند ۳۸۹
شکل ۶–۲۷ تغییر میدان مغناطیسی در دو نقطهٔ مختلف زمانی (مرحلهٔ I و مرحلهٔ II) و در پی اعمالِ جریان سینوسی‌ای که ۱۲۰ درجه اختلاف فاز دارد. ۳۸۹
شکل ۶–۲۸ جریان سه‌فاز برای ایجاد ایجاد یک میدان مغناطیسی دوّار ۳۹۰
شکل ۶–۲۹ اتصالات مثلث و ستاره ۳۹۱
شکل ۶– ۳۰ مقطع عرضی یک موتور سنکرون ۳۹۴
شکل ۶–۳۱ مدار معادل ساده‌شدهٔ یک روتور توربو با یک سیم ۳۹۶
شکل ۶–۳۲ نمودارهای برداری یک موتور سنکرون با یک روتور توربو در چهار حالت ۳۹۶
شکل ۶–۳۳ منحنی گشتاور یک موتور سنکرون با روتور توربو نسبت به زاویهٔ قطب و ولتاژ داخلی قطبی ۳۹۸
شکل ۶–۳۴ یک ترانسفورماتور ایدهال با مقاومت‌های راکتیو و واقعی ۴۰۱
شکل ۶–۳۵ مدار معادل تک‌رشته‌ای برای یک موتور القایی ۴۰۲
شکل ۶–۳۶ نموداری براساس هایلند و اوسانا، برای تعیین منحنی‌های مکان هندسی جریان برای جریان استاتور ۴۰۳
شکل ۶–۳۷ مدار معادل تک‌فاز سادهشدهٔ یک موتور القایی ۴۰۳
شکل ۶–۳۸ موازنهٔ توان برای یک موتور القایی ۴۰۴
شکل ۶–۳۹ منحنی سرعت‌گشتاورِ یک موتور القایی ۴۰۶
شکل ۶–۴۰ ژنراتور القایی با اتصال مستقیم به شبکه ۴۰۸
شکل ۶–۴۱ منحنی گشتاور نسبت به لغزش s در کنار مقاومت‌های قابل‌تغییر روتور RL ۴۰۹
شکل ۶–۴۲ نقاط توان یک ژنراتور القایی که مستقیماً به شبکه متصل شده است ۴۱۰
شکل ۶–۴۳ نقاط توان یک توربین بادی با دو ژنراتور القایی در سرعت‌های متفاوت ۴۱۱
شکل ۶–۴۴ ژنراتور سنکرون با اتصال مستقیم به شبکه ۴۱۲
شکل ۶–۴۵ ژنراتور سنکرون با مدار جریان مستقیمِ میانی ۴۱۳
شکل ۶–۴۶ نقاط کاری یک توربین بادی سرعت متغیر ۴۱۴
شکل ۶–۴۷ ژنراتور سنکرون اتصال مستقیم با یک مدار جریان مستقیم میانی ۴۱۴

شکل ۶–۴۸ ژنراتور القایی سرعت متغیر به‌همراه مبدّلی در مدار روتور ۴۱۵
شکل ۶–۴۹ اصول یک ریزشبکه به‌همراه توان بادی ۴۱۶
شکل ۷–۱ چرخهٔ آب روی زمین ۴۲۳
شکل ۷–۲ تخلیهٔ متوسط رودخانهٔ راین در شهر رنفلدان از سال ۱۹۵۶ تا ۲۰۱۱ ۴۲۵
شکل ۷–۳ تخلیهٔ رودخانهٔ راین نزدیک شهر رنفلدان و رودخانهٔ نکار در شهر راکنو، طی سال ۱۹۹۱ ۴۲۵
شکل ۷–۴ منحنی‌های تداوم بار برای رودخانه‌های راین واقع در رنفلدان و نکار در راکنو در سال ۱۹۹۱ ۴۲۶
شکل ۷–۵ تعیین تخلیهٔ نامی براساس منحنی تداوم (بار) پایین ۴۲۷
شکل ۷–۶ شماتیک یک نیروگاه جریانی ۴۲۸
شکل ۷–۷ عکس هوایی از نیروگاه ایتایپو ۴۳۱
شکل ۷–۸ نحوهٔ کار یک نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای ۴۳۲
شکل ۷–۹ یک نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای نزدیک شهر مالاگا در اسپانیا ۴۳۲
شکل ۷– ۱۰ تلفات و بازده یک نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای ۴۳۴
شکل ۷–۱۱ کار پمپ و تولید برق توسط یک نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای واقع در آلمان در تاریخ ۱۵ آگوست ۱۹۹۶ ۴۳۴
شکل ۷–۱۲ استفاده از توربین‌های آبی بسته به ارتفاع آب و تخلیه ۴۳۵
شکل ۷–۱۳ شماتیک یک توربین کاپلان (در سمت چپ) و عکسی از آن (در سمت راست) ۴۳۶
شکل ۷–۱۴ شماتیک یک توربین حبابی به‌همراه ژنراتور ۴۳۷
شکل ۷–۱۵ شماتیک یک توربین پمپیِ فرانسیس در نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای گولدیشتال (سمت چپ) و عکسی از یک توربین فرانسیس در نیروگاه ایتایپو (سمت راست) ۴۳۸
شکل ۷–۱۶ شماتیک یک توربین پلتون با ۶ عدد جت (سمت چپ) و عکس یک توربین پلتون (سمت راست) ۴۳۹
شکل ۷–۱۷ بازدهی هریک از انواع توربین در مقابل تخلیهٔ Q استانداردشده براساس تخلیهٔ اسمی ۴۳۹
شکل ۷–۱۸ منحنی بازدهٔ کل در مقابل تخلیهٔ استاندارد در یک نیروگاه با ۶ عدد توربین ۴۴۱
شکل ۷–۱۹ سمت چپ: یک نمونهٔ اوّلیه در پروژهٔ seaflow، دور از ساحل غربی بریتانیا؛ سمت راست: کشتی (تعمیر) و نگهداری در نیروگاه جریان اقیانوسی ۴۴۳
شکل ۷– ۲۰ نحوهٔ کار نیروگاه‌های موجی؛ سمت چپ: سامانهٔ شناور؛ سمت راست: سامانه محفظه‌ای ۴۴۴
شکل ۸–۱ نمای برش‌خوردهٔ زمین ۴۴۸
شکل ۸–۲ صفحات تکتونیک روی زمین ۴۴۹
شکل ۸–۳ دما در عمق ۱۰۰۰ و ۳۰۰۰ متری در آلمان ۴۵۰
شکل ۸–۴ بالا: متّهٔ نو؛ وسط: متّهٔ کارکرده؛ پایین: دکل حفاری ۴۵۲
شکل ۸–۵ چگونگی نحوهٔ کار یک نیروگاه حرارتی زمین‌گرمایی ۴۵۴
شکل ۸–۶ چگونگی کار نیروگاه زمین‌گرمایی ORC ۴۵۶
شکل ۸–۷ نحوهٔ کار فرایند کالینا ۴۵۷
شکل ۸–۸ بازده انواع فرایندهای دماپایین در مقایسه با بازده ایده‌ال کارنو (دمای مرجع ۴۰ درجهٔ سلسیوس) در مقابل دمای تغذیه (ورودی) ۴۵۷
شکل ۸–۹ نحوهٔ کار یک نیروگاه HDR ۴۵۹

شکل ۸– ۱۰ نحوهٔ کار یک پمپ حرارتی تراکمی ۴۶۰
شکل ۸–۱۱ اثر زیست‌محیطیِ دو سامانهٔ حرارتیِ مجهز به پمپ حرارتی در مقایسه با یک هیتر گازسوز ۴۶۲
شکل ۸–۱۲ نحوهٔ کار یک پمپ حرارتی جذبی ۴۶۳
شکل ۹–۱ انواع روش‌های استفاده از زیست‌توده ۴۷۴
شکل ۹–۲ روش‌های مختلف فراوری چوب ۴۷۵
شکل ۹–۳ ارزش گرمایی الوار نسبت به میزان آب و درصد رطوبت ۴۷۶
شکل ۹–۴ نحوهٔ تولید سوخت‌های بی‌تی‌ال ۴۸۴
شکل ۹–۵ اثر زیست‌محیطی استفاده از سوخت‌های زیست‌محیطی ۴۸۶
شکل ۹–۶ بویلر چوب ۴۸۸
شکل ۹–۷ سامانهٔ حرارتیِ پلتی و مکان ذخیره ۴۸۹
شکل ۹–۸ نیروگاه برقی‌حرارتیِ زیست‌توده در شهر فافن‌هوفن ۴۹۱
شکل ۱۰–۱ روش‌های تولید هیدروژن ۴۹۴
شکل ۱۰–۲ اکترولیز آب با استفاده از الکترولیت قلیایی ۴۹۶
شکل ۱۰–۳ یک پیل سوختی با الکترولیت اسیدی ۴۹۹
شکل ۱۰–۴ گازها، الکترولیت‌ها، دماهای کاری و عامل اکسیداسیون انواع پیل‌های سوختی ۵۰۰
شکل ۱۰–۵ یک نمونهٔ پیل سوختی ۵۰۱
شکل ۱۰–۶ منحنی ولتاژْجریان یک پیل سوختی ۵۰۵
شکل ۱۰–۷ تولید متان از انرژی تجدیدپذیر (انرژی به گاز) ۵۰۶
شکل ۱۱–۱ روند قیمت خرده‌فروشی گاز طبیعی، نفت و برق برای کارکردن پمپ‌حرارتی با ضرایب متفاوت عملکردی در آلمان ۵۱۸
شکل ۱۱–۲ مقایسهٔ قیمت مصرف‌کننده برای نفت، گاز طبیعی و پلت ۵۱۹
شکل ۱۱–۳ چگونگی تأمین اعتبار مالیِ نیروگاه‌های تجدیدپذیر به‌واسطهٔ قانون انرژی تجدیدپذیر آلمان ۵۲۶
شکل ۱۱–۴ قیمت تعدیل‌شدهٔ ماژول‌های فتوولتائیک نسبت به نرخ تورم در مقابل تولید تجمّعی ماژول‌های فتوولتائیک از سال ۱۹۷۶ تا ۲۰۱۱ ..... ۵۲۷
شکل ۱۱–۵ تعرفه‌های تشویقی برای سامانه‌های فتوولتائیکِ کوچک‌تر از ۱۰ کیلووات در کنار نرخ خرده‌فروشی و قیمت سوخت برای هیترهای نفتی (بازده بویلر ۸۰ درصد است) تا سال ۲۰۱۲ و نمایش روندها تا سال ۲۰۲۰ ..... ۵۲۸
شکل ۱۱–۶ قیمت متوسط سالیانهٔ نفت که براساس نرخ تورم و تبدیل ارز تعدیل شده‌اند ۵۳۰

فهرست جدول‌ها

جدول ۱–۱ ضرایب تبدیل برای انواع واحدهای انرژی ۳۱
جدول ۱–۲ پیشوندها و مخفف آن‌ها ۳۱
جدول ۱–۳ انرژی اوّلیه، نهایی و مفید ۳۵
جدول ۱–۴ مصرف جهانی انرژی اوّلیه بدون زیست‌توده و سایر ۳۷
جدول ۱–۵ ذخایر انرژی فسیلی در سال ۲۰۱۰ ..... ۴۳
جدول ۱–۶ ذخایر اورانیوم ۴۳
جدول ۱–۷ ویژگی‌های گازهای گلخانه‌ای در جو ۴۴
جدول ۱–۸ مساحت جدید کلکتور حرارتی خورشیدی نصب‌شده با پوشش شیشه‌ای از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۱ ..... ۶۱
جدول ۱–۹ ظرفیت فتوولتائیک نصب‌شده در سطح جهان برحسب گیگاوات ۶۲
جدول ۱–۱۰ ظرفیت جهانی نصب‌شدهٔ توان برقابی برحسب گیگاوات ۶۴
جدول ۱–۱۱ ظرفیت نصب‌شدهٔ جهانی توان بادی ۶۵
جدول ۱–۱۲ فرضیات مربوط به رشد اقتصادی و رشد جمعیت تا سال ۲۱۰۰ در سناریوهای مختلف IPCC ۶۹
جدول ۱–۱۳ فرضیات مربوط به افزایش نیاز انرژی اوّلیه و سهم انرژی عاری از کربن تا سال ۲۱۰۰ بر اساس سناریوهای مختلف IPCC ۶۹
جدول ۱–۱۴ افزایش تصاعدات دی‌اکسیدکربن تا سال ۲۱۰۰ در کنار افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن جو، افزایش دمای متوسط سالانه و بالا آمدن سطح آب دریا در انواع سناریوهای IPCC ۷۰
جدول ۱–۱۵ ضرایب ویژهٔ تصاعد دی‌اکسیدکربن برای حامل‌های انرژی ۷۱
جدول ۱–۱۶ الزامات کاهش طبق پروتکل کیوتو و روند واقعی آن در کشورهای امضاکننده ۷۲
جدول ۱–۱۷ ترکیب تولید توان توسط چهار شرکت بزرگ تأمین‌کنندهٔ توان آلمان در سال ۲۰۱۱ ..... ۸۱
جدول ۲–۱ پارامترهای اصلی در فیزیک تابش و نور ۸۶
جدول ۲–۲ داده‌های مربوط به زمین و خورشید ۸۶
جدول ۲–۳ جرم انواع ذرات و هسته‌ها ۸۷
جدول ۲–۴ طول‌موج انواع رنگ‌ها ۹۰
جدول ۲–۵ تأثیرات کاهش در مقابل ارتفاع خورشید ۹۳
جدول ۲–۶ متوسط ماهیانهٔ تابش‌دهی کل در درازمدت (۲۰۱۰–۱۹۹۸) ۹۶
جدول ۲–۷ متوسط ماهیانهٔ تابش‌دهی کل برحسب کیلووات‌ساعت در مترمربع ۹۷
جدول ۲–۸ متوسط (۲۰۱۰–۱۹۹۸) تابش مستقیم و پخشی کل در برلین برحسب کیلووات‌ساعت در مترمربع ۹۹
جدول ۲–۹ متوسط (۲۰۱۰–۱۹۹۸) تابش‌دهی پخشی و مستقیم کل سالیانه برحسب کیلووات‌ساعت بر مترمربع ۱۰۱

جدول ۲–۱۰ تعاریف و علائم متفاوت از زاویهٔ آزیموت خورشید ۱۰۳
جدول ۲–۱۱ ثابت‌هایی برای تخمین F1 و F2 متناسب با [Per90] ε ۱۱۰
جدول ۲–۱۲ مقدار آلبیدو برای محیط‌های مختلف ۱۱۰
جدول ۲–۱۳ میانگین (۱۹۹۸–۲۰۱۰) تابش ماهانه و سالانهٔ روی سطحی با راستاهای مختلف برحسب کیلووات‌ساعت بر مترمربع ۱۱۴
جدول ۲–۱۴ تلفات سایهٔ s و ضریب تصحیح کل k برای نقطهٔ P0 در مقابل مقادیر مختلف بهره‌برداری از زمین و زوایای شیب سطح در شهر برلین ۱۲۳
جدول ۲–۱۵ تلفات سایه و ضریب تصحیح کلِ میان‌گیری‌شده از سه نقطهٔ P0، P1 و P2 در مقابل مقادیر مختلف بهره‌برداری از زمین و زوایای شیب سطح در شهر برلین ۱۲۴
جدول ۲–۱۶ تلورانس‌های مجاز و مشخصات شبیه‌سازهای خورشیدی برمبنای IEC 904-9 ..... ۱۲۸
جدول ۲–۱۷ توزیع ایده‌ال شدت تابش کل در قالب طول‌موج در استاندارد IEC 904-9 ..... ۱۲۹
جدول ۳–۱ کمّیت‌های ترمودینامیکی برای محاسبات گرمایی ۱۳۲
جدول ۳–۲ ظرفیت گرمایی c مواد مختلف در دمای بین ۰ تا ۱۰۰ درجهٔ سلسیوس ۱۳۳
جدول ۳–۳ هدایت حرارتی مواد مختلف ۱۳۴
جدول ۳–۴ داده‌های مربوط به برخی پروژه‌های حرارتی‌خورشیدی ناحیه‌ای ۱۴۷
جدول ۳–۵ ضریب عبور حرارت U و ضریب عبور انرژی کلِ (مقدار g) برای مواد عایق شفاف و معمول مختلف ۱۵۱
جدول ۳–۶ ضریب جذب α، عبور τ و بازتابش ρ برای انواع مواد به‌کاررفته در جاذب‌ها ۱۶۱
جدول ۳–۷ نمونه‌ای از ضرایب تبدیل و اتلاف ۱۶۴
جدول ۳–۸ ویژگی‌های لوله‌های مسی استاندارد ۱۶۹
جدول ۳–۹ قطرهای توصیه‌شده برای لوله‌های مسی در تأسیسات پمپیِ شامل مخلوط آب و ضدیخ ۱۷۰
جدول ۳–۱۰ قطرهای توصیه‌شده برای لوله‌های مسی در سامانه ترموسیفونی شامل مخلوط آب و ضد یخ ۱۷۰
جدول ۳–۱۱ ویژگی‌های برخی از موادی که قابلیت ذخیرهٔ دمای پایین را دارند ۱۷۴
جدول ۳–۱۲ فشار بخار آب و دمای نقطهٔ شبنم در رطوبت نسبی ۷۰ درصدی در مقابل دمای هوای محیط ۱۸۱
جدول ۳–۱۳ مقدار آب داغ موردنیاز خانگی ۱۸۲
جدول ۳–۱۴ مقدار آب داغ موردنیاز در هتل‌ها و غیره ۱۸۳
جدول ۳–۱۵ مقدار مصرف آب داغ برای کارهای مختلف ۱۸۳
جدول ۳–۱۶ کسر خورشیدی ۱۸۹
جدول ۳–۱۷ داده‌های مربوط به منازل مسکونی واقع در آلمان و سوئیس با تأمین گرمای ۱۰۰ درصدی از خورشید ۱۹۰
جدول ۴–۱ داده‌های فنی برای کلکتورهای ناودانی سهمی‌گون ۲۰۰
جدول ۴–۲ پارامترهای معمول به‌منظور محاسبهٔ بازده کلکتورهای ناودانی سهمی‌گون ۲۰۶
جدول ۴–۳ ضرایب انبساط خطی برای اجسام مختلف در گسترهٔ دمایی ۰ تا ۵۰۰ درجهٔ سلسیوس ۲۰۷
جدول ۴–۴ داده‌های فنی برای نیروگاه ناودانی سهمی‌گون SEGS در کالیفرنیا ۲۲۰
جدول ۴–۵ داده‌های فنی مربوط به مجموعه‌ای از نیروگاه‌های ناودانی سهمی‌گون جدید ۲۲۳
جدول ۴–۶ داده‌های فنی مربوط به مجموعه‌ای از برج‌های خورشیدی ۲۲۵

جدول ۴–۷ داده‌های فنی برای واحد یورو بشقاب استرلینگ ۲۲۸
جدول ۴–۸ داده‌های کلیدی برای خطوط انتقال برق هوایی برای حالت HVAC و HVDC [Hos88] ۲۳۰
جدول ۵–۱ پارامترهای کلیدی الکتریکی ۲۳۵
جدول ۵–۲ شکاف باند برای انواع نیمه‌رساناها در ۳۰۰ کلوین ۲۴۱
جدول ۵–۳ مروری بر اختصارات رایج مربوط به سیلیکون ۲۵۲
جدول ۵–۴ پارامترهای مدل دودیودی برای ماژول‌های فتوولتائیک مختلف ۲۶۷
جدول ۵–۵ پارامترهای الکتریکی سلول خورشیدی ۲۶۹
جدول ۵–۶ بازده‌های بیشینه و ضرایب انباشتگی برای انواع فناوری‌های سلول (خورشیدی) ۲۷۲
جدول ۵–۷ پارامترهای مربوط به ضرایب دمایی انواع ماژول‌های فتوولتائیک ۲۷۳
جدول ۵–۸ ضرایب دمایی متداول برای جریان، ولتاژ و توان برای برخی از ماژول‌های خورشیدی متداول ۲۷۵
جدول ۵–۹ ضریب تناسب c برای محاسبهٔ دمای یک ماژول در حالت‌های مختلف نصب ۲۷۵
جدول ۵–۱۰ داده‌های فنی برای برخی از ماژول‌های خورشیدی ۲۸۶
جدول ۵–۱۱ اطلاعاتی مربوط به انواع باتری‌ها ۲۹۹
جدول ۵–۱۲ ولتاژ مدارباز و چگالی اسید بسته به حالت شارژ یک باتری سربیِ ۱۲ ولتی ۳۰۳
جدول ۵–۱۳ ولتاژ باتری ۱۲ ولتی چه چیزی از حالت شارژ را بیان می‌دارد ۳۰۴
جدول ۵–۱۴ داده‌های فنیِ انتخابی برای برخی از اینورترهای فتوولتائیک ۳۲۷
جدول ۵–۱۵ مجموع ماهیانه و سالیانهٔ شدت تابش خورشید برحسب کیلوات‌ساعت در هر مترمربع برای مکان‌های و جهت‌گیری‌های مختلف ۳۳۵
جدول ۶–۱ طبقه‌بندی سرعت باد برمبنای معیار بیوفورت ۳۵۳
جدول ۶–۲ پارامترهای ویبل و سرعت‌های متوسط باد در ارتفاع ۱۰ متری در نقاط مختلف آلمان ۳۵۵
جدول ۶–۳ طول ناهمواری برای طبقه‌بندی‌های مختلف زمین در داونپورت ۳۵۷
جدول ۶–۴ چگالی هوا با توجه به دما در فشار یک بار ۳۵۹
جدول ۶–۵ سرعت و لغزش در شرایط کاری مختلف ۴۰۰
جدول ۶–۶ داده‌های فنی برای یک ژنراتور القایی ۶۰۰ کیلوواتی در یک توربین بادی ۴۰۷
جدول ۷–۱ سهم توان برقابی از تولید توان در سال ۲۰۱۰ ۴۲۳
جدول ۷–۲ داده‌های فنی مربوط به نیروگاه ایتایپو ۴۳۱
جدول ۷–۳ پارامترهای رایج برای تعیین بازده توربین ۴۴۰
جدول ۷–۴ نیروگاه‌های جزرومدی دنیا ۴۴۲
جدول ۸–۱ خواص فیزیکی مبردهای رایج و پتانسیل گاز گلخانه‌ای در طی ۱۰۰ سال ۴۶۲
جدول ۸–۲ ضریب عملکرد میانگین سالیانهٔ معمول برای پمپ‌های حرارتی الکتریکی به‌منظور گرمایش محیط ۴۶۷
جدول ۸–۳ مقدار ممکن برای استخراجِ حرارتِ ویژه برای یک چاه U شکل دوتایی براساس [VDI4640] برای سامانه‌های کوچکی تا ۳۰ کیلووات و طول لوله تا ۱۰۰ متر ۴۶۸
جدول ۸–۴ سطوح ممکن جهت استخراج حرارت ویژه برای کلکتورهای زمین‌گرمایی با ۱۸۰۰ ساعت کار سالانه ۴۶۹
جدول ۹–۱ بازده تولید زیست‌توده ۴۷۲

جدول ۹–۲ ارزش گرمایی انواع سوخت‌های حاصل از زیست‌توده ۴۷۲
جدول ۹–۳ پتانسیل زیست‌توده در آلمان ۴۷۳
جدول ۹–۴ ویژگی‌های انواع مختلف الوار ۴۷۶
جدول ۹–۵ ضرایب تبدیل اندازه‌گیری حجم محصولات الواری (تقریبی) ۴۷۷
جدول ۹–۶ مشخصات پلت‌های چوبی برمبنای ENplus / EN 14961-2 ..... ۴۷۷
جدول ۹–۷ مشخصات برای توزیع اندازهٔ ذرات تراشه‌های چوب برمبنای دو استاندارد ONORM M7133 و CEN/TS 14961 ..... ۴۷۸
جدول ۹–۸ مقایسهٔ ویژگی‌های بیوانرژی‌ها با سوخت‌های رایج ۴۷۹
جدول ۹–۹ عملکرد مواد خام مصرفی به‌منظور تولید بیواتانول ۴۸۱
جدول ۹– ۱۰ عملکرد بیوگاز و حجم متانِ انواع مواد زیست‌تودهٔ اوّلیه (خام) ۴۸۴
جدول ۹–۱۱ پتانسیل انواع محصولات انرژی که در مساحت ۲۰۰ هکتاری کشت شده‌اند ۴۸۴
جدول ۹–۱۲ عملکرد ناخالص بیوانرژی در زمین زراعی ۴۸۶
جدول ۱۰–۱ داده‌های انرژی هیدروژن در شرایط معمول (فشار ۰/۱۰۱ مگاپاسکال، دمایِ ۲۷۳/۱۵ کلوین) ۴۹۴
جدول ۱۰–۲ واکنش شیمیایی در آند و کاتد انواع پیل‌های سوختی و جابه‌جایی یون در الکترولیت ۵۰۱
جدول ۱۰–۳ پرامترهای کلیدی پیل‌های سوختیِ اکسیژن‌هیدروژن در شرایط استاندارد ۵۰۴
جدول ۱۰–۴ خواص مشخصهٔ انواع سوخت‌های گازی ۵۰۶
جدول ۱۰–۵ بازده تولید هیدروژن و متان ۵۰۷
جدول ۱۰–۶ ظرفیت ذخیرهٔ هیدروژن و متان در آلمان ۵۰۸
جدول ۱۱–۱ شاخص قیمت مصرف‌کننده در آلمان؛ داده‌های قبل از سال ۱۹۹۱ به آلمان غربیِ سابق برمی‌گردد... ..... ۵۱۰
جدول ۱۱–۲ هزینه تولید حرارت برحسب یورو به‌ازای هر کیلووات‌ساعت حرارتی (یورو به‌ازای کیلووات‌ساعت حرارت) برای تولید آب گرم خورشیدی بدون درنظرگرفتن سود سرمایه و نیز هزینهٔ کاری سالیانهٔ ۴۰ یورو ۵۱۴
جدول ۱۱–۳ عملکرد انرژی یک توربین با توجه به اندازهٔ توربین و سرعت باد در ارتفاع توپیِ توربین و توزیع ریلیِ سرعت‌های باد ۵۱۷
جدول ۱۱–۴ ضرایب سالوارهٔ a برای انواع دوره‌های کاری n و نرخ‌های مختلف سود p ۵۲۳
جدول ۱۱–۵ هزینه‌های تولید انرژی توسط سامانه‌های آب‌گرم‌کن حرارتیخورشیدی برحسب یورو درازای هر کیلووات‌ساعت حرارت، با نرخ سود ۶ درصد و هزینه‌های کاری (عملیاتی) ۴۰ یورویی ۵۲۴
جدول ۱۱–۶ قیمت متوسط انرژی در آلمان در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ ..... ۵۳۱
جدول ۱۱–۷ سوبسید دادهشده به معادن استخراج زغالسنگ سخت آلمان ۵۳۲
جدول ۱۱–۸ کمک دولتی ازسوی دولت فدرال برای حوزهٔ زغال‌سنگ سختِ آلمان ۵۳۲
جدول ۱۱–۹ هزینهٔ میلیون یورویی فدرال که مابین سال‌های ۱۹۵۶ تا ۱۹۸۸ برای تحقیق و توسعهٔ حوزهٔ انرژی در آلمان صرف گردید ۵۳۴
جدول ۱۱– ۱۰ هزینهٔ میلیون یورویی فدرال که مابین سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۲ برای تحقیق و توسعهٔ حوزهٔ انرژی در آلمان صرف گردید. ۵۳۵
جدول ۱۱–۱۱ فجایع بزرگ آب‌وهوایی (بلایای طبیعی به‌غیر از زلزله) و خسارات ناشی از آن ۵۳۷

پیشگفتار ناشر خارجی

اگر بخواهیم که توان هسته‌ای را به‌تدریج از مدار خارج و جلوی تغییرات آب‌وهوایی را با موفقیت سد کنیم، بایستی تا اواسط این قرن، تمام انرژی موردنیازمان را از منابع انرژی تجدیدپذیر تأمین کنیم.

در ویرایش دوم این کتاب که نسبت به ویرایش اوّل به‌روز شده و جنبه‌های وسیع‌تری را در برگرفته است، تمامی سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر بررسی شده‌اند و در کنار آن موضوعات جاری ازقبیل ذخیره‌سازی انرژی خورشید، فنّاوری‌های تبدیل توان (الکتریکی) به (سوخت) گاز و تکنیک‌های لازم به‌منظور تبدیلِ کامل و موفقیت‌آمیز انرژی موردِ واکاوی قرار گرفته است.

عناوین به‌صورت جامع بررسی شده‌اند، به‌شکلی که مباحث ریاضی، مهندسی، محیط‌زیستی و اقتصادی یکجا آورده شده‌اند و خواننده را قادر می‌سازند تا به درک صحیح و جامعی از فنّاوری‌های مرتبط با انرژی‌های تجدیدپذیر و پتانسیل آن‌ها دست یابد. همچنین به‌منظور انجام محاسبات، مثال‌های فراوانی آورده شده است و از شکل‌ها برای به تصویر کشیدن انواع فنّاوری‌ها و اصول ریاضی بهره گرفته شده است. کتاب حاضر با عنوان *آشنایی با انواع سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر* می‌تواند در قالب دروسی ازقبیل انرژی تجدیدپذیر در رشته‌های تحصیلی مهندسی برق، فنّاوری مهندسی، فیزیک، مهندسی فرایند، مهندسی عمران، محیط‌زیست، مکانیک کاربردی و مهندسی مکانیک و به‌عنوان یک منبع ایده‌ال برای دانشجویان رشتهٔ تحصیلیِ انرژی‌های تجدیدپذیر در دانشگاه‌ها و دانشکده‌های فنی تدریس شود و نیز مورداستفادهٔ محققان و مهندسان در صنعت قرار گیرد.

والکر کوآشنینگ درحال‌حاضر در گروه سیستم‌های انرژی تجدیدپذیرِ دانشگاه علوم کاربردی برلین (HTW)، در آلمان، مشغول به تدریس و تحقیق بوده و دارای تجارب فراوانی در زمینه‌های مختلف انرژی تجدیدپذیر در آلمان و خارج از این کشور است.

پیشگفتار مترجم

خداوند متعال را شاکرم که امکان ترجمهٔ ویرایش دوم این کتاب را برای این‌جانب فراهم آورد تا بتوانم گامی بسیار کوچک، با هدف و امید درجهت ارتقای دانش عمومی/تخصصی دانشجویان، محققان و صاحب‌نظران حوزهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر بردارم.

ویرایش دوم این کتاب در مقایسه با ویرایش اوّل، با تغییرات قابل‌توجهی همراه است که ازجملهٔ این موارد می‌توان به افزایش تعداد فصل‌های کتاب اشاره کرد. بنابراین ازجمله دلایلی که مترجم را بر آن داشت تا به ترجمهٔ ویرایش دوم این کتاب بپردازد، پوشش بیشتر مباحث حوزهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر بود.

لازم به ذکر است که باوجود صرف زمان فراوان برای ترجمهٔ هرچه صحیح‌تر و روان‌تر کتاب حاضر، مطمئناً ترجمهٔ ارائه‌شده عاری از ایراد نخواهد بود. بنابراین از تمامی عزیزانی که کتاب حاضر را مطالعه می‌کنند، خواهشمند است تا نکات ارزنده و یا اشکالات علمی و ادبی مشاهده‌شده را به این‌جانب منعکس کنند تا در چاپ‌های بعدی بتوان آن‌ها را رفع کرد.

بر خود لازم می‌دانم تا از جناب پروفوسور کوآشنینگ که در حین ترجمه کتاب حاضر از هیچ کمک و مساعدتی دریغ نکردند و همچنین شکل‌های رنگی کتاب مذکور را در اختیار بنده قرار دادند، تشکر ویژه نمایم. لذا در صورتی که خوانندهٔ محترم به شکل‌های رنگی کتاب حاضر نیاز داشته باشد، می‌تواند از طریق آدرس‌های ایمیلی ذیل با بنده تماس حاصل نماید، تا با افتخار شکل‌های موردنظر را در اختیار ایشان بگذارم.

در پایان، از مدیریت محترم و کارشناسان زحمت‌کش حوزهٔ نشر آثار علمی دانشگاه فردوسی مشهد و همچنین از ویراستاران علمی و ادبی این کتاب که وقت زیادی صرف بهبود کیفی این کتاب کرده‌اند، کمال تشکر و سپاس را دارم.

با آرزوی توفیق

مهدی هدایتی‌زاده

mhedayatizadeh@birjand.ac.ir

mhedayatizadeh@gmail.com

۱

انرژی و حفاظت از آب‌وهوا

واژهٔ انرژی

خیلی اوقات واژه انرژی به گوش ما می‌رسد، ولی بدون توجه و تفکر چندان، از کنار آن می‌گذریم. این کلمه در موارد متعددی به‌کار می‌رود. به‌عنوان مثال، از آن در توصیف حسّ سرزندگی استفاده می‌شود و می‌گوییم که برخی افراد سرشار از انرژی‌اند تا توصیفی از خوی (سرزندگی) آن‌ها باشد. در این کتاب تنها به بررسی انواعی از انرژی، خصوصاً تجدیدپذیر پرداخته می‌شود که منتجِ فناوری بوده و در توصیف آن از قوانین فیزیک استفاده می‌شود.

انرژی و توان، تقریباً ارتباطی ناگسستنی با یکدیگر دارند. اما ازآنجاکه غالباً این دو را با یکدیگر اشتباه می‌گیرند، توضیح تمایزات و توصیف سایر عبارات مرتبط با آن‌ها می‌تواند نقطهٔ آغاز خوبی به‌حساب آید. در حالت کلی، انرژی به‌صورت توانایی یک سیستم به‌منظور ایجاد اثرات خارجی تعریف می‌شود؛ به‌عنوان مثال نیرویی که در طی فاصله‌ای اثر می‌کند. درصورتی‌که از جسمی کاری گرفته شود و یا روی آن کاری انجام شود، انرژی آن جسم تغییر می‌یابد. انرژی اشکال مختلفی دارد که ازآن‌جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

انرژی مکانیکی
انرژی پتانسیل
انرژی جنبشی
انرژی گرمایی

انرژی مغناطیسی

جرم

انرژی الکتریکی

انرژی تابشی

و انرژی شیمیایی

بر اساس تعاریف بالا، یک لیتر بنزین، یک نوع انرژی ذخیره‌شده به‌حساب می‌آید. بعد از احتراق بنزین، نیروی موتور قادر خواهد بود تا ماشینی را (با جرم معیّن) در فاصلهٔ مشخصی به جلو براند. بنابراین، حرکت ماشین نوعی کار به‌حساب می‌آید.

گرما نیز صورتی از انرژی است. هوای داغی که از فراز یک شمع به‌سمت بالا حرکت می‌کند، قادر است تا اجزای یک آویز ساخته‌شده از کاغذ و نخ (هنگینگ موبایل[1]) را به حرکت درآورد. برای این حرکت، قاعدتاً نیرویی نیاز است.

باد نیز دارای انرژی است و بدین‌سبب است که می‌تواند پرّه‌های یک توربین بادی را به گردش درآورد.

اشعه‌های خورشید هم قادر به تولید گرما هستند. تابش، خصوصاً تابش خورشیدی هم شکل دیگری از انرژی قلمداد می‌شود.

(ولی) توان عبارت است از مقدار کاری (W) که در طی زمان (t) انجام می‌شود:

$$p = \frac{dW}{dt} \qquad (۱-۱)$$

بنابراین، توان بیانگر مدت‌زمانی است که در طی آن مقدار مشخصی کار انجام می‌شود. به‌عنوان مثال، اگر شخصی یک کیسه سیمان را یک متر بلند کند، کار انجام داده است. کار انجام‌شده باعث افزایش انرژی پتانسیل کیسه می‌گردد. اگر شخص، کیسه را با سرعتی دو برابر سرعت حالت قبل بلند کند، مدت‌زمان انجام کار نصف می‌شود. بنابراین اگرچه مقدار کار انجام‌شده تغییری نکرده است، ولی توان موردنیاز در این حالت، دو برابر حالت قبل است.

براساس سیستم SI، واحد کار و انرژی، ژول (J)، وات‌ثانیه (Ws) و نیوتن‌متر (Nm) است و واحد توان، وات (W) می‌باشد. در جدول ۱-۱ ضرایب تبدیل برای واحدهای اصلی انرژی متداول آورده شده است. علاوه‌برآن، یکسری از واحدهای منسوخ‌شدهٔ انرژی مانند کیلوپوندمتر، kpm (یک کیلوپوندمتر برابر با $۲٫۷۲\times۱۰^{-۶}$ کیلووات‌ساعت)؛ erg (یک ای‌آرجی برابر با $۲٫۷۸\times۱۰^{-۱۴}$ کیلووات‌ساعت است)؛ eV (هنوز در فیزیک کاربرد دارد و یک الکترون‌ولت برابر با $۴٫۴۵\times۱۰^{-۲۶}$ کیلووات‌ساعت است) و (هنوز در

1. Hanging mobile

آمریکا) Btus (واحد بریتانیایی گرما و یک بی‌تی‌یو برابر با ۱۰۵۵٫۰۶ ژول و یا ۰٫۰۰۰۲۹۳۰۷۱ کیلووات‌ساعت است) نیز وجود دارند.

قرارداد کلی بر این است که تنها از واحدهای SI استفاده شود. در این کتاب نیز از این قرارداد پیروی شده است و تنها در مباحث مربوط به خواص نیمه‌هادی‌ها از واحد الکترون‌ولت (eV) استفاده شده است.

ازآنجاکه برخی مقادیر بسیار کوچک و برخی بسیار بزرگ هستند و استفاده از نمایش توانی گاهی‌اوقات کار مشکلی است، از پیشوندهایی که در جدول ۱–۲ آورده شده‌اند، استفاده می‌شود.

عموماً عباراتی که از آن‌ها برای توصیف انرژی و توان استفاده می‌شود و نیز واحدهای این دو با یکدیگر اشتباه می‌شوند و زمانی‌که واحدها اشتباه به‌کار روند، باعث سوء برداشت می‌شود. به‌عنوان مثال، در دهۀ ۱۹۹۰، مقاله‌ای در رابطه با خانه‌ای که مجهز به سقف خورشیدی بود، در یک روزنامه به چاپ رسید. در آن مقاله به تشریح یک سیستم فتوولتائیک[1] با توان کل ۲٫۲ کیلووات پرداخته شده بود. نویسنده در مقاله به این موضوع اشاره کرده بود که قیمت هر کیلووات برق فروخته‌شده به شبکۀ برق، بسیار پایین یعنی ۰٫۰۸۷ یورو یا تقریباً معادل ۰٫۰۵ سنتِ[2] امروزی بود.

جدول ۱–۱ ضرایب تبدیل برای انواع واحدهای انرژی

	کیلوژول	کیلوکالری	کیلووات ساعت	کیلوگرم نفت خام	گاز طبیعی (مترمکعب)
یک کیلوژول	۱	۰٫۲۳۸۸	۰٫۰۰۰۲۷۸	۰٫۰۰۰۰۲۴	۰٫۰۰۰۰۳۲
یک کیلوکالری	۴٫۱۸۶۸	۱	۰٫۰۰۱۱۶۳	۰٫۰۰۰۱	۰٫۰۰۰۱۳
یک کیلووات‌ساعت	۳۶۰۰	۸۶۰	۱	۰٫۰۸۶	۰٫۱۱۳
معادل یک کیلوگرم نفت خام	۴۱۸۶۸	۱۰۰۰۰	۱۱٫۶۳	۱	۱٫۳۱۹
یک مترمکعب گاز طبیعی	۳۱۷۳۶	۷۵۸۰	۸٫۸۱۶	۰٫۷۵۸	۱

جدول ۱–۲ پیشوندها و مخفف آن‌ها

پیشوند	نماد	مقدار	پیشوند	نماد	مقدار
کیلو	K	10^{3} (هزار)	میلی	m	10^{-3} (یک هزارم)
مگا	M	10^{6} (میلیون)	میکرو		10^{-6} (یک میلیونیوم)
گیگا	G	10^{9} (میلیارد)	نانو	n	10^{-9} (یک میلیاردم)
ترا	T	10^{12} (تریلیون)	پیکو	p	10^{-12} (یک تریلیونم)
پتا	P	10^{15} (کادریلیون)	فمتو	f	10^{-15} (یک کادریلیونم)
اگزا	E	10^{18} (کَنتیلیون)	آتو	a	10^{-18} (یک کَنتیلیونم)

1. Photovoltaic
2. Cent

بنابراین اگر پول دریافتی برای سیستم (فتوولتائیک) براساس توان آن سیستم محاسبه می‌شد، مبلغی برابر با ۰٫۱۹ یورو (یعنی ۲٫۲ کیلووات ضرب در ۰٫۰۸۷ یورو به‌ازای هر کیلووات) درمی‌آمد. مطمئناً این عائدی حاصل از توان خورشیدی در درازمدت، کافی نبود و محتملاً هیچ صاحب سامانهٔ فتوولتائیکی مجبور نبود که با یک‌چنین دریافتی اندک (مبلغی کمتر از ۰٫۲۰ یورو) کنار بیاید. در اینجا درواقع نویسنده در رابطه با انرژی الکتریکیِ فروخته‌شده به شبکهٔ برق صحبت کرده و ۰٫۰۸۷ یوروی دریافتی، مابه‌ازای یک کیلووات‌ساعت بوده است (نه یک کیلووات). ازاین‌رو اگر سامانه (فتوولتائیک)، ۱۶۵۰ کیلووات‌ساعت برق به شبکهٔ برق می‌فروخت، صاحب آن مبلغی برابر با ۱۴۳٫۵۵ یورو (یعنی ۱۶۵۰ کیلووات‌ساعت ضرب در ۰٫۰۸۷ یورو به‌ازای هر کیلووات‌ساعت) دریافت می‌کرد که ۷۵۰ برابر حالت قبلی است. بنابراین، این داستان به‌روشنی اختلاف بزرگی را که به‌سبب حذف «h» (ساعت) می‌تواند بروز کند، به تصویر کشیده است.

برطبق قوانین فیزیکی، انرژی نه تولید می‌شود و نه از بین می‌رود. باوجوداین، ما از تلفات انرژی و تولید آن صحبت می‌کنیم و این درحالی است که قانون بقای انرژی بیان می‌دارد که:

محتوای انرژی یک سیستم ایزوله ثابت می‌ماند. انرژی نه از بین می‌رود و نه بی‌جهت تولید می‌شود؛ بلکه این قابلیت را دارا است که به‌صورت‌های دیگر انرژی درآید و یا اینکه بین قسمت‌های مختلف یک سیستم مبادله شود.

برای اینکه متوجه چگونگی تبدیل یک شکل انرژی به شکل دیگر آن بشویم، به‌سراغ مثال خودرو و بنزین می‌رویم. بنزین نوعی انرژی شیمیایی ذخیره‌شده است که بعد از احتراق، به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود. موتور این انرژی حرارتی را به انرژی جنبشی تبدیل می‌کند و به ماشین شتاب می‌دهد. زمانی‌که بنزین به اتمام برسد، ماشین متوقف می‌شود. باوجوداین، انرژی ناپدید نشده است و به انرژی پتانسیل (درصورت اختلاف ارتفاع)، گرمای غیرقابل‌استفادهٔ موتور و اصطکاک (در تایرها) تبدیل و به‌صورت گرما به محیط پیرامون داده شده است. طبیعی است که گرمای داده‌شده به محیط دیگر قابل‌استفاده نیست. بنابراین، به‌دنبالِ راندن ماشین، بخش اعظمی از انرژی مفید موجود در بنزین به‌صورت گرمای غیرقابل‌استفاده به محیط داده شد. از دیدگاه ما این انرژی ازدست‌رفته قلمداد می‌شود. بنابراین زمانی‌که ما از اتلاف و یا مصرفِ انرژی بحث می‌کنیم، منظورمان این است که ما انرژیِ با کیفیت بالا را به یک نوع انرژی غیرقابل‌استفاده و با کیفیت پایین تبدیل کرده‌ایم.

درمورد سامانه‌های فتوولتائیک، عکس این قضیه صدق می‌کند. این سامانه‌ها نور خورشید را مستقیماً به الکتریسیته تبدیل می‌کنند و در عرف گفته می‌شود که سامانهٔ انرژی خورشیدی، برق تولید کرده است. حال‌آنکه براساس قوانین فیزیک، این توصیف اشتباه است. اگر بخواهیم به‌درستی صحبت کنیم، باید بگوییم که سامانهٔ فتوولتائیک، شکلی از انرژی را که به‌راحتی قابل‌استفاده نیست (انرژی تابشی خورشید)،