

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

انرژی خورشیدی:

فیزیک و مهندسی فوتوولتائیک؛

فناوری‌ها و سامانه‌ها



# انرژی خورشیدی:

فیزیک و مهندسی فوتوولتائیک؛

فناوری‌ها و سامانه‌ها

آرنو‌ها. ام. اسمتس - کلاوس یگر و همکاران

ترجمه

مجید قناعت‌شعار

سید مرتضی احمدی ملاسرایبی

مسعود ابراری

۱۳۹۷



۶۷۷

مرکز چاپ و انتشارات دانشگاه شهید بهشتی

انرژی خورشیدی: فیزیک و مهندسی فوتوولتائیک، فناوری‌ها و سامانه‌ها / آرنو.ام. اسمتس و دیگران  
ترجمه دکتر مجید قناعت‌شعار، سید مرتضی احمدی ملاسرای، مسعود ابراری  
Arno H.M. Smets, Klaus Jäger, Olindo Isabella, René ACMM van Swaaij, Miro Zeman,  
*Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems*;  
UIT Cambridge, England, 2016

ویراستار: ندا نوری  
حروف‌نگار و صفحه‌آرا: سمیرا دهقان  
طراح جلد: امیرشاهرخ فریوسفی  
ناظر چاپ: صفر ممیزاد  
چاپ اول: ۱۳۹۷  
شمارگان: ۱۰۰۰  
قیمت: ۴۰۰.۰۰۰ ریال

کلیه حقوق برای دانشگاه شهید بهشتی محفوظ است.

عنوان و نام پدیدآور:	انرژی خورشیدی: فیزیک و مهندسی فوتوولتائیک، فناوری‌ها و سامانه‌ها / آرنو.ام. اسمتس... و دیگران؛ [مترجمان] مجید قناعت‌شعار، سیدمرتضی احمدی ملاسرای، مسعود ابراری.
مشخصات نشر:	تهران: دانشگاه شهید بهشتی، مرکز چاپ و انتشارات، ۱۳۹۷.
مشخصات ظاهری:	سی، ۵۷۸ ص. مصور، جدول.
فروست:	مرکز چاپ و انتشارات شهید بهشتی، ۶۷۷.
شابک:	۹۷۸ ۹۶۴ ۴۵۷ ۴۱۱ ۵
وضعیت فهرست‌نویسی:	فیا
یادداشت:	عنوان اصلی: Solar energy: The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems, 2016.
یادداشت:	واژه‌نامه؛ کتابنامه؛ نمایه.
موضوع:	تولید برق از انرژی خورشیدی؛ Photovoltaic power generation؛ برق -- سامانه‌های فوتوولتائی؛ Photovoltaic power systems؛ تبدیل انرژی؛ Energy conversion؛ انرژی خورشیدی Solar energy؛ انرژی -- توسعه؛ Energy development؛ انرژی حرارتی خورشیدی؛ Solar thermal energy.
شناسه افزوده:	استمس، آرنو.ام.، ۱۹۷۴-م. Arno H.M. Smets
شناسه افزوده:	قناعت‌شعار، مجید، مترجم، ۱۳۴۷-، مترجم
شناسه افزوده:	احمدی ملاسرای، سیدمرتضی، ۱۳۷۰-، مترجم
شناسه افزوده:	ابراری، مسعود، ۱۳۶۴-، مترجم
شناسه افزوده:	دانشگاه شهید بهشتی، مرکز چاپ و انتشارات
رده‌بندی کنگره:	Shahid Beheshti University. Printing & Publishing Center TJ۸۱۰/الف/۷۸ ۱۳۹۷
رده‌بندی دیویی:	۶۲۱/۴۷
شماره کتابشناسی ملی:	۵۱۰۰۹۲۰

کد ناشر ۱۰۰۱۷۳۴  
www.pub.sbu.ac.ir  
unipress@mail.sbu.ac.ir

## فهرست مطالب

پیشگفتار مترجمان .....	پانزده
پیشگفتار .....	هفده
پیام مدیر .....	نوزده
دبیاچه .....	بیست و یک
درباره کتاب .....	بیست و سه
علائم اختصاری .....	بیست و پنج
بخش نخست: مقدمه .....	
۱. انرژی .....	۳
۱.۱. برخی تعاریف .....	۴
۲.۱. میزان مصرف انرژی انسان .....	۵
۳.۱. روش‌های تبدیل انرژی .....	۱۱
۱.۳.۱. حامل‌های انرژی تجدیدپذیر .....	۱۲
۲.۳.۱. برق .....	۱۳
۴.۱. تمرین .....	۱۵
۲. وضعیت کنونی و دورنمای فناوری فوتولتائیک .....	۱۷
تمرین .....	۲۴
۳. اصول کار سلول‌های خورشیدی .....	۲۵
۱.۳. تولید حامل‌های بار به دلیل جذب فوتون .....	۲۵
۲.۳. تفکیک حامل‌های بار تولیدشده از طریق نور در پیوند .....	۲۷
۳.۳. جمع‌آوری حامل‌های بار تولیدشده از طریق نور در پایانه‌های پیوند .....	۲۷
بخش دوم: مبانی فوتولتائیک .....	
۴. اصول الکترودینامیک .....	۳۱
۱.۴. نظریه الکترومغناطیس .....	۳۱
۲.۴. امواج الکترومغناطیسی .....	۳۲
۳.۴. نورشناخت فصل مشترک تخت .....	۳۴
۴.۴. نورشناخت در محیط‌های جاذب .....	۳۶
۵.۴. معادلات پیوستگی و پواسون .....	۳۸
۱.۵.۴. معادله پواسون .....	۳۸

۳۸	۲.۵.۴. معادله پیوستگی
۳۹	۶.۴. تمرین
۴۱	۵. تابش خورشیدی
۴۱	۱.۵. خورشید
۴۳	۲.۵. پرتوسنجی
۴۷	۳.۵. تابش جسم سیاه
۵۰	۴.۵. دوگانگی موج- ذره
۵۱	۵.۵. طیف خورشیدی
۵۴	۶.۵. تمرین
۵۷	۶. فیزیک پایه نیمرسانا
۵۷	۱.۶. مقدمه
۵۸	۲.۶. ساختار اتمی
۶۱	۳.۶. آلایش
۶۳	۴.۶. چگالی حامل ها
۶۳	۱.۴.۶. نیمرساناهای ذاتی
۶۷	۲.۴.۶. نیمرساناهای آلابیده
۶۹	۵.۶. ویژگی های ترابرد
۷۰	۱.۵.۶. سوق
۷۲	۲.۵.۶. پخش
۷۳	۳.۵.۶. معادلات پیوستگی
۷۵	۶.۶. تمرین
۷۹	۷. تولید و باز ترکیب زوج های الکترون- حفره
۷۹	۱.۷. مقدمه
۸۱	۲.۷. گذارهای نواربه نوار
۸۱	۱.۲.۷. تولید تابشی
۸۵	۲.۲.۷. باز ترکیب مستقیم
۸۸	۳.۷. باز ترکیب شاکی- رید- هال
۹۳	۴.۷. باز ترکیب اوژه
۹۵	۵.۷. باز ترکیب سطحی
۹۷	۶.۷. چگالی حامل ها در حالت غیر تعادلی
۹۹	۷.۷. تمرین
۱۰۳	۸. پیوندهای نیمرسانا
۱۰۳	۱.۸. پیوند همگون $p-n$

۱۰۳	تشکیل منطقه بار- فضا در پیوند $p-n$ .....
۱۰۵	پیوند $p-n$ در شرایط تعادل .....
۱۱۳	پیوند $p-n$ در معرض اعمال ولتاژ .....
۱۱۶	پیوند $p-n$ در معرض تابش .....
۱۲۰	پیوند ناهمگون .....
۱۲۳	پیوند فلز- نیمرسانا .....
۱۲۶	سد شاتکی .....
۱۲۸	اتصال اهمی .....
۱۲۹	تمرین .....
۱۳۵	۹. پارامترها و مدار معادل سلول خورشیدی .....
۱۳۵	۱.۹. پارامترهای خارجی سلول خورشیدی .....
۱۳۵	۱.۱.۹. شرایط آزمون استاندارد .....
۱۳۵	۲.۱.۹. چگالی جریان اتصال کوتاه .....
۱۳۶	۳.۱.۹. ولتاژ مدار باز .....
۱۳۶	۴.۱.۹. ضریب پرشدگی .....
۱۳۸	۵.۱.۹. بازده تبدیل .....
۱۴۰	۲.۹. بازده کوانتومی خارجی .....
۱۴۳	۳.۹. مدار معادل .....
۱۴۶	۴.۹. تمرین .....
۱۵۱	۱۰. تلفات و محدودیت‌های بازده .....
۱۵۱	۱.۱۰. حد ترمودینامیک .....
۱۵۴	۲.۱۰. حد شاکلی- کوئایسر .....
۱۵۵	۱.۲.۱۰. نداشتن تطابق طیفی .....
۱۵۷	۲.۲.۱۰. حد توازن جزئی بازده .....
۱۶۱	۳.۲.۱۰. حد بازده سلول‌های خورشیدی سیلیکونی .....
۱۶۲	۳.۱۰. تلفات اضافی .....
۱۶۲	۱.۳.۱۰. تلفات نوری .....
۱۶۳	۲.۳.۱۰. تلفات جمع‌آوری سلول‌های خورشیدی .....
۱۶۴	۳.۳.۱۰. عوامل محدودکننده فرعی .....
۱۶۴	۴.۳.۱۰. بازده تبدیل .....
۱۶۵	۴.۱۰. قوانین طراحی سلول خورشیدی .....
۱۶۶	۱.۴.۱۰. کاربری گاف انرژی .....
۱۶۸	۲.۴.۱۰. کاربری طیفی .....

۱۶۹.....	۳.۴.۱۰. مدیریت نور .....
۱۷۵.....	۵.۱۰. تمرین .....
۱۷۷.....	<b>بخش سوم: فناوری فوتولتائیک.....</b>
۱۷۹.....	۱.۱. تاریخچه فناوری سلول‌های خورشیدی.....
۱۸۵.....	۱.۲. سلول‌های خورشیدی مبتنی بر سیلیکن بلوری .....
۱۸۵.....	۱.۱۲. سیلیکن بلوری .....
۱۸۹.....	۲.۱۲. ساخت ویفرهای سیلیکنی .....
۱۹۴.....	۳.۱۲. طراحی سلول‌های خورشیدی سیلیکن بلوری .....
۲۰۲.....	۴.۱۲. ساخت سلول خورشیدی سیلیکن بلوری.....
۲۰۵.....	۵.۱۲. نظریه بازده بالا .....
۲۰۵.....	۱.۵.۱۲. نظریه PERL .....
۲۰۷.....	۲.۵.۱۲. اتصال‌های پشتی جفت‌شده در سلول خورشیدی .....
۲۰۹.....	۳.۵.۱۲. سلول‌های خورشیدی با پیوند ناهمگون .....
۲۱۲.....	۶.۱۲. تمرین .....
۲۱۷.....	۱.۳. سلول‌های خورشیدی لایه‌نازک .....
۲۱۸.....	۱.۱۳. اکسیدهای رسانای شفاف .....
۲۲۲.....	۲.۱۳. فناوری فوتولتائیک گروه III-V .....
۲۲۴.....	۱.۲.۱۳. سلول‌های چندپیوندی .....
۲۲۹.....	۲.۲.۱۳. ساخت نیم‌رساناهای گروه III-V .....
۲۳۲.....	۳.۱۳. فناوری سیلیکن لایه‌نازک .....
۲۳۲.....	۱.۳.۱۳. آلیاژهای سیلیکن لایه‌نازک .....
۲۳۶.....	۲.۳.۱۳. طراحی سلول‌های خورشیدی سیلیکن لایه‌نازک .....
۲۴۴.....	۳.۳.۱۳. تولید سلول‌های خورشیدی سیلیکن لایه‌نازک .....
۲۴۶.....	۴.۳.۱۳. سلول‌های خورشیدی لایه‌نازک سیلیکن بلوری .....
۲۴۶.....	۴.۱۳. سلول‌های خورشیدی کالکونژناید .....
۲۴۷.....	۱.۴.۱۳. سلول‌های خورشیدی کالکوپیریت .....
۲۵۳.....	۲.۴.۱۳. سلول‌های خورشیدی کادمیوم تلورايد .....
۲۵۶.....	۵.۱۳. قطعات فوتولتائیک آلی .....
۲۶۱.....	۶.۱۳. سلول‌های خورشیدی هیبرید آلی- غیر آلی .....
۲۶۱.....	۱.۶.۱۳. سلول‌های حساس‌شده با رنگ .....
۲۶۳.....	۲.۶.۱۳. سلول‌های خورشیدی پروسکایت .....
۲۶۵.....	۷.۱۳. تمرین .....



۲۷۱	۱۴. نگاهی عمیق تر به برخی روش‌های لایه‌نشانی
۲۷۱	۱.۱۴. لایه‌نشانی بخار شیمیایی تقویت‌شده با پلاسما
۲۷۲	۲.۱۴. لایه‌نشانی بخار فیزیکی
۲۷۳	۱.۲.۱۴. کندوپاش
۲۷۳	۲.۲.۱۴. تبخیر
۲۷۴	۳.۱۴. روش چاپ سیلک
۲۷۶	۴.۱۴. روش آبرکاری
۲۷۶	۱.۴.۱۴. اصول عملکرد
۲۷۷	۲.۴.۱۴. آبرکاری مس
۲۷۹	۱۵. ماژول‌های فوتولتائیک
۲۷۹	۱.۱۵. اتصالات سری و موازی در ماژول‌های فوتولتائیک
۲۸۲	۲.۱۵. پارامترهای ماژول خورشیدی
۲۸۳	۳.۱۵. دیودهای گذرگاه
۲۸۶	۴.۱۵. ساخت ماژول‌های خورشیدی
۲۸۷	۵.۱۵. آزمودن طول عمر ماژول‌های خورشیدی
۲۸۹	۶.۱۵. ماژول‌های لایه‌نازک
۲۹۲	۷.۱۵. چند مثال
۲۹۲	۸.۱۵. متمرکزکننده‌های فوتولتائیک (CPV)
۲۹۳	۱.۸.۱۵. جنبه‌های نظری متمرکزکننده‌های خورشیدی
۲۹۵	۲.۸.۱۵. انواع متمرکزکننده‌های فوتولتائیک
۲۹۵	۳.۸.۱۵. جنبه‌های دیگر متمرکزکننده‌های خورشیدی
۲۹۶	۹.۱۵. تمرین
۲۹۹	۱۶. نظریه‌های نسل سوم
۳۰۰	۱.۱۶. سلول‌های خورشیدی چندپیوندی
۳۰۱	۲.۱۶. دگرگونی طیفی
۳۰۱	۱.۲.۱۶. بالادگرگونی طیفی
۳۰۲	۲.۲.۱۶. پایین‌دگرگونی طیفی
۳۰۵	۳.۱۶. تولید چنداکسیتونی
۳۰۷	۴.۱۶. سلول‌های خورشیدی میان‌نواری
۳۰۸	۵.۱۶. سلول‌های خورشیدی حامل داغ
۳۰۹	۶.۱۶. تمرین
۳۱۷	بخش چهارم: سامانه‌های فوتولتائیک
۳۱۹	۱۷. معرفی سامانه‌های فوتولتائیک

۳۱۹	۱.۱۷. مقدمه
۳۱۹	۲.۱۷. انواع سامانه‌های فوتوولتائیک
۳۲۰	۱.۲.۱۷. سامانه‌های مستقل (منفصل از شبکه)
۳۲۱	۲.۲.۱۷. سامانه‌های متصل به شبکه
۳۲۳	۳.۲.۱۷. سامانه‌های هیبریدی
۳۲۴	۳.۱۷. اجزای سامانه فوتوولتائیک
۳۲۵	۴.۱۷. تمرین
۳۲۷	۱۸. موقعیت جغرافیایی
۳۲۷	۱.۱۸. مکان خورشید
۳۳۱	۲.۱۸. شدت تابش بر ماژول فوتوولتائیک
۳۳۱	۱.۲.۱۸. زاویه برخورد (AOI)
۳۳۳	۲.۲.۱۸. سایه
۳۳۴	۳.۱۸. شدت تابش مستقیم و پخشی
۳۳۷	۱.۳.۱۸. محاسبه شدت تابش رسیده به ماژول
۳۳۸	۴.۱۸. تمرین
۳۳۹	۱۹. اجزای سامانه‌های فوتوولتائیک
۳۳۹	۱.۱۹. ردیابی نقطه بیشینه توان
۳۴۱	۱.۱.۱۹. MPPT غیرمستقیم
۳۴۲	۲.۱.۱۹. MPPT مستقیم
۳۴۶	۳.۱.۱۹. برخی ملاحظات
۳۴۶	۲.۱۹. الکترونیک قدرت
۳۴۸	۱.۲.۱۹. معماری سامانه
۳۵۳	۲.۲.۱۹. مبدل‌های DC-DC
۳۵۹	۳.۲.۱۹. مبدل‌های DC-AC (اینورترها)
۳۶۴	۴.۲.۱۹. برخی ملاحظات
۳۶۶	۳.۱۹. باتری
۳۶۸	۱.۳.۱۹. انواع باتری‌ها
۳۷۲	۲.۳.۱۹. مدار معادل
۳۷۳	۳.۳.۱۹. پارامترهای باتری
۳۷۷	۴.۳.۱۹. باتری‌های اسید سرب به کاررفته در کاربردهای فوتوولتائیک
۳۷۸	۴.۱۹. کنترلرهای شارژ
۳۸۱	۱.۴.۱۹. کنترلرهای شارژ باتری‌های اسید سرب استفاده‌شده در کاربردهای فوتوولتائیک
۳۸۲	۵.۱۹. کابل‌ها

۳۸۵	۶.۱۹. تمرین
۳۹۱	۲۰. طراحی سامانه‌های فوتوولتائیک
۳۹۲	۱.۲۰. روشی ساده برای طراحی سامانه‌های فوتوولتائیک مستقل
۳۹۹	۲.۲۰. انواع مصرف‌کننده (بار)
۴۰۰	۳.۲۰. تأثیرات آب‌وهوایی
۴۰۰	۱.۳.۲۰. مدل‌های گرمایی ساده‌شده برای آرایه فوتوولتائیک
۴۰۳	۲.۳.۲۰. تأثیر دما در عملکرد ماژول فوتوولتائیک
۴۰۵	۳.۳.۲۰. تأثیر شدت تابش در عملکرد سلول خورشیدی
۴۰۷	۴.۳.۲۰. عملکرد کلی ماژول
۴۰۹	۵.۳.۲۰. خلاصه
۴۰۹	۴.۲۰. طراحی سامانه‌های فوتوولتائیک متصل به شبکه
۴۱۱	۱.۴.۲۰. بازده اینورتر
۴۱۶	۲.۴.۲۰. تحلیل عملکرد
۴۱۷	۳.۴.۲۰. تلفات سالیانه سامانه‌های فوتوولتائیک متصل به شبکه
۴۱۹	۵.۲۰. طراحی سامانه فوتوولتائیک مستقل
۴۲۱	۱.۵.۲۰. نگاهی دقیق‌تر به باتری
۴۲۲	۲.۵.۲۰. طراحی سامانه‌ای فوتوولتائیک با استفاده از توازن انرژی
۴۲۵	۳.۵.۲۰. تحلیل عملکرد
۴۲۷	۶.۲۰. تمرین
۴۳۱	۲۱. اقتصاد و بوم‌شناسی سامانه‌های فوتوولتائیک
۴۳۱	۱.۲۱. اقتصاد سامانه‌های فوتوولتائیک
۴۳۱	۱.۱.۲۱. زمان بازگشت سرمایه
۴۳۲	۲.۱.۲۱. رویه‌های جبران
۴۳۲	اندازه‌گیری مجموع
۴۳۳	تعرفه‌های تغذیه شبکه
۴۳۳	۳.۱.۲۱. خودمصرفی
۴۳۵	۴.۱.۲۱. هزینه هم‌تراز شده برق
۴۳۶	۵.۱.۲۱. توازن شبکه و پریز
۴۳۸	۲.۲۱. بوم‌شناسی سامانه‌های فوتوولتائیک
۴۳۸	۱.۲.۲۱. ردپای کربن
۴۳۹	۲.۲.۲۱. نرخ بهره انرژی
۴۳۹	۳.۲.۲۱. زمان بازگشت سرمایه انرژی
۴۴۲	۴.۲.۲۱. آلودگی

۴۴۲	..... ۳.۲۱. تمرین
۴۴۵	..... بخش پنجم: دیگر فناوری‌های تبدیل انرژی خورشیدی
۴۴۷	..... ۲.۲. انرژی خورشیدگرمایی
۴۴۷	..... ۱.۲.۲. میانی خورشیدگرمایی
۴۵۱	..... ۲.۲.۲. گرمایش خورشیدی
۴۵۲	..... ۱.۲.۲.۲. جمع‌کننده‌های حرارتی خورشیدی
۴۵۵	..... ۲.۲.۲.۲. ذخیره‌سازی گرما
۴۵۷	..... ۳.۲.۲.۲. طراحی سامانه
۴۵۸	..... ۴.۲.۲.۲. خنک‌سازی خورشیدی
۴۶۲	..... ۳.۲.۲. توان خورشیدی متمرکز (CSP)
۴۶۵	..... ۴.۲.۲. تمرین
۴۶۹	..... ۲.۳. سوخت‌های خورشیدی
۴۷۱	..... ۱.۲.۳. الکترولیز آب
۴۷۴	..... ۲.۲.۳. شکافت فوتوالکتروشیمیایی آب (PEC)
۴۷۹	..... ۳.۲.۳. تمرین
۴۸۳	..... پیوست‌ها
۴۸۵	..... الف. استخراج روابط الکترودینامیکی
۴۸۵	..... الف. ۱. معادلات مکسول
۴۸۶	..... الف. ۲. به‌دست‌آوردن معادله موج الکترومغناطیسی
۴۸۷	..... الف. ۳. ویژگی‌های امواج الکترومغناطیسی
۴۹۱	..... ب. استخراج منحنی‌های $J-V$ پیوند همگون
۴۹۱	..... ب. ۱. مشخصه $J-V$ در شرایط خاموشی
۴۹۶	..... ب. ۲. مشخصه $J-V$ در معرض تابش
۵۰۱	..... ج. برخی از جنبه‌های بازترکیب
۵۰۱	..... ج. ۱. سرعت بازترکیب سطحی نامحدود
۵۰۳	..... ج. ۲. سرعت بازترکیب سطحی صفر
۵۰۴	..... ج. ۳. ولتاژ مدار باز در سلول‌های خورشیدی با پیوند $p-n$
۵۰۷	..... د. ریخت‌شناسی نمونه‌های TCO
۵۰۷	..... د. ۱. پارامترهای سطح
۵۰۹	..... د. ۲. چند مثال
۵۱۱	..... ه. برخی از جنبه‌های مکان‌یابی
۵۱۱	..... ه. ۱. موقعیت خورشید

۵۱۹.....	۲.ه. معادلهٔ زمان.....
۵۲۱.....	۳.ه. زاویهٔ بین خورشید و ماژول.....
۵۲۲.....	۴.ه. ماژول‌های نصب‌شده روی بام‌های شیب‌دار.....
۵۲۴.....	۵.ه. طول سایهٔ پشت ماژول.....
۵۲۹.....	و. استخراج معادلات مبدل‌های DC-DC.....
۵۲۹.....	و. ۱. مبدل باک.....
۵۳۰.....	و. ۲. مبدل بوست.....
۵۳۱.....	و. ۳. مبدل باک-بوست.....
۵۳۳.....	ز. مدل دینامیک سیالات.....
۵۳۳.....	ز. ۱. چارچوب مدل دینامیک سیالات.....
۵۳۶.....	ز. ۲. ضریب همرفت.....
۵۳۶.....	ز. ۱.۲. انتقال حرارت همرفتی در سطح جلویی.....
۵۳۸.....	ز. ۲.۲. انتقال حرارت همرفتی در سطح پشتی.....
۵۳۹.....	ز. ۳. پارامترهای دیگر.....
۵۳۹.....	ز. ۱.۳. برآورد دمای آسمان.....
۵۴۰.....	ز. ۲.۳. سرعت باد در ارتفاع ماژول.....
۵۴۰.....	ز. ۳.۳. جذب و گسیل ماژول خورشیدی.....
۵۴۰.....	ز. ۴. برآورد مدل حرارتی.....
۵۴۳.....	منابع.....
۵۵۷.....	واژه‌نامهٔ فارسی-انگلیسی.....
۵۶۳.....	واژه‌نامهٔ انگلیسی-فارسی.....
۵۶۹.....	نمایه.....



## پیشگفتار مترجمان

سوخت‌های فسیلی، که در حال حاضر منابع اصلی تأمین انرژی انسان به‌شمار می‌روند، طی چند دهه آینده، به پایان خواهند رسید و انسان ناگزیر باید به‌سمت استفاده از منابع انرژی جایگزین برود. همچنین کره زمین، بر اثر استفاده از منابع انرژی فعلی، به‌شدت دچار آسیب شده است و به همین دلیل، منابع انرژی جایگزین باید پاک و بدون آلودگی باشند. در آینده‌ای نه‌چندان دور، تنها گزینه پیش روی انسان استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر خواهد بود؛ مانند انرژی آب، باد، امواج، انرژی زمین‌گرمایی و انرژی خورشیدی. در میان منابع نام‌برده، فقط خورشید است که می‌تواند همه انرژی مورد نیاز بشر را تأمین کند. به همین دلیل، تحقیقات و توسعه روش‌های استفاده از انرژی خورشیدی با سرعت خیره‌کننده‌ای در سراسر جهان دنبال می‌شود.

کشور عزیز ما نیز، در کنار دارا بودن منابع عظیم سوخت‌های فسیلی، از نعمت تابش خورشید بهره بسیار دارد. استفاده از این نعمت بزرگ صرفه‌های اقتصادی و محیط زیستی بسیار برای ایران به‌دنبال دارد که این موضوع اهمیت آموزش نیروی کارآمد و نخبه در زمینه انرژی خورشیدی را برجسته می‌کند. همین امر ما را بر آن داشت تا به ترجمه این کتاب اقدام کنیم.

کتاب حاضر که مرجع درسی در رشته‌های مرتبط با انرژی خورشیدی مانند فیزیک، مهندسی برق، فوتونیک، شیمی و ... شناخته می‌شود بسیار به‌روز است و به زبان‌های عربی و چینی نیز ترجمه شده است. این کتاب جنبه‌های گوناگون انرژی خورشیدی را، شامل مبانی علمی، روش‌های به‌کارگیری، اقتصاد فوتولتائیک و ... بررسی می‌کند؛ از این رو، می‌تواند مورد توجه علاقه‌مندان فراوانی قرار گیرد. دو روش اصلی استفاده از انرژی خورشیدی استفاده از فناوری فوتولتائیک و فناوری خورشیدگرمایی‌اند که در این کتاب، به‌صورت کامل، بررسی شده‌اند.

امیدواریم ترجمه این کتاب به گسترش یادگیری مباحث انرژی خورشیدی در کشورمان کمک کند و مورد استفاده دانشجویان و همه افراد علاقه‌مند قرار گیرد.

مترجمان

پژوهشکده لیزر و پلاسما





## پیشگفتار

تأمین انرژی جهانی از منابع تجدیدپذیر یکی از مهم‌ترین تمهیداتی است که باید برای پیشگیری از تغییرات بیشتر آب‌وهوایی اندیشیده شود. انرژی خورشیدی می‌تواند نقشی اساسی در این برنامه ایفا کند. این انرژی بسیار در دسترس و تطبیق‌پذیر است.

قرن‌ها از انرژی خورشیدی به‌منظور گرمایش استفاده می‌شد. پس از اینکه جرال د پیرسون<sup>۱</sup>، داریل چاپین<sup>۲</sup> و کالوین فولر<sup>۳</sup> در سال ۱۹۵۴ سیلیکن بلوری را اختراع کردند، سلول‌های خورشیدی به یکی از ابزارهای مهم برای تولید برق خورشیدی در مقیاس بزرگ تبدیل شدند. در سال ۲۰۱۵، سهم برق خورشیدی از بازار برق جهان به ۰.۱٪ رسیده است. نقشه راه ۲۰۱۴ آژانس بین‌المللی انرژی سهمی ۲۷ درصدی از بازار برق جهان را، تا سال ۲۰۵۰، برای برق فوتوولتائیک و خورشیدگرمایی پیش‌بینی می‌کند.

در حال حاضر، از انرژی خورشیدی برای تأمین برق و گرمای اندک در مناطق روستایی استفاده می‌شود که به توسعه اقتصادی این مناطق کمک می‌کند. همچنین، میلیون‌ها سامانه فوتوولتائیک عملیاتی انرژی بخش‌های گوناگونی، همچون روشنایی و مخابراتی، را فراهم می‌کنند. سامانه‌های انرژی خورشیدی را می‌توان به‌صورت مجتمع در محیط استفاده کرد. این موضوع کمک شایانی به بهره‌برداری از انرژی خورشیدی می‌کند که امروزه شاهد آنیم. از انرژی خورشیدی می‌توان در نیروگاه‌ها و با استفاده از صفحات تخت، سامانه‌های متمرکزکننده فوتوولتائیک و نیز سامانه‌های توان خورشیدی متمرکز، برای تولید برق در مقیاس بزرگ، استفاده کرد.

استفاده از انرژی خورشیدی به‌سرعت در حال رشد است. همچنین، اهداف سیاست‌های دولت‌ها، در سطح ملی و قاره‌ای، برای انرژی خورشیدی بسیار بلندپروازانه است. در نتیجه، نقش‌آفرینان جدیدی در حال ورود به این عرصه‌اند که باعث رونق‌بخشیدن به رقابت می‌شوند. جهت نیل به این اهداف، به تمرین و آموزش بسیاری نیاز است و این تلاش‌ها باید بر سطوح دانشگاهی، مهندسی سامانه و نصب‌کننده‌ها متمرکز شود.

زمینه انرژی خورشیدی، و به‌ویژه مباحث فوتوولتائیک، بسیار گسترده است. برای طراحی کامل سامانه‌های مستقل و متصل به شبکه، به دانش گسترده‌ای در زمینه فوتوولتائیک نیاز داریم؛ از نورشناخت و فیزیک مواد و قطعات برای توسعه سلول‌های خورشیدی گرفته تا

---

1. Gerald Pearson

2. Daryl Chapin

3. Calvin Fuller

الکترونیک قدرت و ماژول‌ها. رسیدن به دیدگاهی مناسب در همهٔ زمینه‌های فوتوولتائیک نه تنها برای تازه‌کاران بلکه برای متخصصان نیز معمولاً دشوار است. از سویی، بسیار اهمیت دارد که طراحان سلول‌ها و ماژول‌های خورشیدی دانشی بسنده از سامانه‌های فوتوولتائیک و کاربردهای آن داشته باشند. از دیگر سو، طراحان باید در مورد فناوری‌های گوناگون سلول خورشیدی دانش کافی داشته باشند تا انتخاب درستی انجام دهند و بدانند چگونه از سلول‌ها برای بهینه‌کردن بهرهٔ انرژی استفاده کنند.

در این کتاب، ابتدا شرحی جامع و روشن بر جنبه‌های گوناگون تبدیل انرژی فوتوولتائیک بیان می‌شود. سپس فناوری‌های حال حاضر و در حال رشد سلول‌های خورشیدی بررسی و برخی رهیافت‌های جدید برای بهبود بازدهی در آینده معرفی می‌شود. در ادامه، سامانه‌های مستقل و متصل به شبکه معرفی می‌شود. کتاب با مروری بر دیگر فناوری‌های خورشیدی، مانند جمع‌کننده‌های خورشیدی تخت، فناوری‌های انرژی خورشیدی متمرکز و سوخت‌های خورشیدی، به پایان می‌رسد.

این کتاب، برای آموزش و خودآموزی در سطح دانشگاهی، عالی است اما برای افرادی با پیش‌زمینهٔ فنی نیز مناسب به نظر می‌رسد. اگرچه تأکید این کتاب بر مبحث فوتوولتائیک است، دیدگاه بسیار مناسبی در دیگر زمینه‌های خورشیدی مطرح می‌کند.

ژوئن ۲۰۱۵

رونالد جی. سی. اچ. فن زولینگن<sup>۱</sup>

استاد بازنشسته دانشگاه صنعتی آینده‌وون<sup>۲</sup>

---

1. Ronald J. Ch. Van Zolingen

2. Eindhoven University of Technology

## پیام مدیر

یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی بشر تأمین انرژی پایدار و پاک است. در آینده، انرژی خورشیدی نقشی برجسته در تولید برق خواهد داشت که نرخ مصرف آن حتی با سرعت بیشتری، به نسبت کل مصرف انرژی جهان، رو به افزایش است. این رشد سریع مصرف برق به دلیل فراگیر شدن تجهیزات دیجیتال در جامعه، توسعه شهرها و رشد حمل‌ونقل برقی در بخش‌های خصوصی و عمومی به وجود آمده است. تولید انرژی سالیانه جهان نزدیک به یک زتا ژول ( $10^{21} J$ ) است که حدود ۲۰٪ از آن به صورت انرژی الکتریکی است. امروزه فقط در حدود ۱٪ از کل انرژی الکتریکی را سامانه‌های خورشیدی تولید می‌کنند.

برحسب تصادف، جمعیت جهان در سال یک زتابایت اطلاعات تولید می‌کند. به‌ازای تولید هر بایت اطلاعات، یک ژول انرژی مصرف می‌شود. خوشبختانه تولید اطلاعات با سرعتی بیشتر از مصرف انرژی انسان در حال رشد است و این نوید را می‌دهد که می‌توان، برای تولید و انتقال انرژی، راه‌حل‌های هوشمندانه‌ای یافت. برای افزایش مصرف برق خورشیدی، چنین راه‌حلی‌هایی گریزناپذیر است. استفاده از شبکه‌های هوشمند برای انتقال و استفاده بهینه از برقی که منابع متغیر و گسترده تولید می‌کنند ضروری است. مجتمع‌سازی سامانه‌های تولید برق خورشیدی در مناطق شهری یکی دیگر از مواردی است که می‌تواند استفاده از آن‌ها را افزایش دهد.

برنامه تحقیقاتی سلول خورشیدی در دانشگاه صنعتی دلفت<sup>۱</sup> یکی از برنامه‌های پیشرو در این زمینه است. محققان این دانشگاه جایگاه‌های کلیدی در جامعه جهانی انرژی خورشیدی دارند و راه‌حل‌های نوآورانه آن‌ها از سوی شرکت‌های بزرگ، شرکت‌های نوپا و نیز در حوزه عمومی به کار گرفته شده است. تیم تحقیقاتی دانشگاه دلفت نقش مهمی در آموزش انرژی‌های پایدار ایفا کرده و دانشجویان بسیاری دوره‌های آموزشی آن‌ها را دنبال می‌کنند. انرژی‌های پایدار دانشجویان مقطع کارشناسی ارشد بسیاری را، از کشور هلند و سرتاسر جهان که در حال تحصیل در رشته‌های مرتبط‌اند، به خود جذب می‌کند.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، رشد فراگیر فناوری‌های دیجیتال نقش بسزایی در فرصت‌های آموزشی نیز داشته است. این موضوع در دوره‌های برخط و آزاد انبوه (MOOC) دانشگاه دلفت و دیگر انجمن‌های برخط آموزشی مشهود است. یکی از اولین دوره‌های برخط دانشگاه دلفت «انرژی خورشیدی» است. این دوره، که در سامانه edX برگزار شد، بسیار موفق

---

1. Delft University of Technology

بود و در نخستین دوره، نزدیک به شصت هزار نفر را جذب کرد. تا کنون، این دوره سه بار برگزار شده و تعداد ثبت‌نام‌های کل آن از یکصد هزار گذشته است.

این دوره‌ها، افزون بر زبان انگلیسی، به زبان عربی نیز برگزار شده و با کمک سازمان‌های همکار، به‌زودی به زبان چینی نیز برگزار خواهد شد. تعداد بسیار شرکت‌کنندگان و اشتیاق آن‌ها برای یادگیری موضوع انرژی خورشیدی مدرسان دوره را بر آن داشت به نوشتن این کتاب اقدام کنند. به یقین دانش و اشتیاق گسترده برای یادگیری تولید برق خورشیدی بیانگر افزایش سریع سهم برق خورشیدی از مصرف انرژی انسان در آینده‌ای نزدیک خواهد بود. بسیار خرسندیم که دوره‌های ما علاقه‌افراد بسیاری را برای یادگیری دانش و کاربردهای انرژی خورشیدی برانگیخته است. حتی برخی شرکت‌کنندگان از این دوره‌ها الهام گرفته و راه‌حلهایی را برای جامعه خود طرح کرده‌اند.

اوت ۲۰۱۵

پروفسور راب فستینائو<sup>۱</sup>

مدیر دانشکده مهندسی برق، ریاضیات و علوم رایانه

مدیر دانشکده توسعه

دانشگاه صنعتی دلفت

---

1. Rob Fastenau

## دیباچه

در دانشگاه دلفت، بر این عقیده‌ایم که سامانه‌های انرژی آینده با سامانه‌هایی که امروز می‌شناسیم کاملاً متفاوت خواهند بود. در آینده، تمامی انرژی مورد استفاده بشر از خورشید تأمین خواهد شد که این دریافت انرژی یا به صورت مستقیم، از طریق مازول‌های فوتولتائیک و جمع‌کننده‌های گرمایی، یا غیرمستقیم و از طریق باد یا سوخت‌های زیستی خواهد بود. در سامانه انرژی آینده، تبدیل انرژی و استفاده از آن بسیار بهینه خواهد بود. منابع انرژی تجدیدپذیر و بهینه‌بودن انرژی دو مؤلفه اصلی انرژی‌های پایدار به‌شمار می‌روند. گذار به سمت سامانه‌های انرژی پایدار یکی از چالش‌های بزرگ بشر به منظور حفظ کره زمین برای نسل‌های آینده است.

این گذار به معنای این است که، در تقاضا برای انرژی آینده، برق جایگاه مهم‌تری خواهد داشت. انتظار می‌رود که در آینده، برق به حامل انرژی جهانی و عامل اصلی تأمین انرژی تبدیل شود. با نوشتن کتابی در مورد انرژی خورشیدی که تمرکز آن بر تبدیل مستقیم انرژی خورشیدی به برق یا، به عبارتی، فوتولتائیک (PV) است، قصد داریم افراد بیشتری را با این فناوری جالب تبدیل انرژی آشنا کنیم. ما بر این باوریم که کتاب حاضر می‌تواند ادای سهم ما در شتاب‌بخشیدن به گذار انرژی به سمت انرژی‌های پایدار تلقی شود.

امیدواریم کتاب *انرژی خورشیدی، فیزیک و مهندسی فوتولتائیک، فناوری‌ها و سامانه‌ها* منبع مفیدی برای مطالعه‌کنندگان موضوعات گوناگون انرژی خورشیدی باشد. این موضوعات در سه دوره فوتولتائیک دانشگاه صنعتی دلفت، با عناوین «مبانی فوتولتائیک»، «فناوری‌های فوتولتائیک» و «سامانه‌های فوتولتائیک» تدریس می‌شود. همچنین، این کتاب جنبه‌های دیگر انرژی خورشیدی را، مانند سوخت‌های خورشیدی و کاربردهای خورشیدگرمایی، پوشش می‌دهد. امید داریم کتاب حاضر الهام‌بخش دانشجویان و متخصصان سرتاسر جهان، با هدف سهیم‌شدن در درک و اجرای ساختارهای انرژی پایدار، باشد و در نهایت، به ساخت سامانه‌های فوتولتائیک به دست آن‌ها منجر شود. کتاب حاضر مرجع بسیار خوبی برای دوره‌های عمومی برخط (MOOC)، با موضوع انرژی خورشیدی (DelftX, ET.3034TU)، محسوب می‌شود که آرنو اسمتس<sup>1</sup> در سامانه‌های edX و edraak تدریس می‌کند.

برای نوشتن این کتاب، از کمک‌های بسیاری بهره‌مند شدیم. از رونالد فن زولینگن، استاد دانشگاه صنعتی آینده‌وون، به دلیل بازخوانی کتاب، تشکر ویژه داریم. وی راهنمایی‌ها و

---

1. Arno Smets

پیشنهادهای ارزشمندی برای بهبود کتاب مطرح کرد که به نتیجه بهتر و نوشتن کتاب منظم‌تری انجامید. همچنین، مفتخریم پیشگفتار این کتاب نیز به‌قلم ایشان نوشته شده است. افزون بر این، می‌خواهیم سپاس ویژه خود را از گیریش گانیشان نیر<sup>۱</sup>، برای تأمین شکل‌ها و تمرین‌ها و ویرایش متن، ابراز کنیم. از متیو آلانی<sup>۲</sup> و ادویت اپته<sup>۳</sup> نیز برای ویرایش این کتاب تشکر می‌کنیم. گیورگوس پاپاکونستانتینو<sup>۴</sup> به‌همراه دیمیتریس دلیگیانیس<sup>۵</sup> بخشی از متن و شکل‌های فصل چهاردهم را فراهم کردند. از آریانا توتزی<sup>۶</sup> برای فراهم کردن جلوه‌های بصری مدل تخمین‌زننده تأثیر سرعت باد و شدت تابش در دمای سطح ماژول، که در بخش ۳.۲۰ ارائه می‌شود، تشکر می‌کنیم. همچنین، از اشتفان فن برکل<sup>۷</sup> برای عرضه اطلاعات در زمینه سامانه‌های فوتوولتائیک واقعی سپاسگزاریم. راوی واسودوان<sup>۸</sup> و دو یون کیم<sup>۹</sup> مبحث‌های گوناگونی را در سامانه‌های فوتوولتائیک طرح کردند. میریام تیلن<sup>۱۰</sup> فناوری‌های CIGS و CdTe و آندرنای اینجنیتو<sup>۱۱</sup> تولید سلول‌های خورشیدی سیلیکونی بلوری را تشریح کردند. از ویلسون اسمیت<sup>۱۲</sup> و پائولا پرس رودریگس<sup>۱۳</sup> برای پشتیبانی در فصل سوخت‌های خورشیدی، کریستین بکر<sup>۱۴</sup> از کمپانی هلمتس-سنتروم<sup>۱۵</sup> آلمان، برای دیدگاه‌هایش در مورد ساخت سلول‌های خورشیدی سیلیکونی بلوری لایه‌نازک، روان مک کوئین<sup>۱۶</sup> از دانشگاه ولز جنوبی جدید، برای مرور مفاهیم نسل سوم، و نیشان نارایان<sup>۱۷</sup> برای کمک در نوشتن تمرین‌ها و بخش سامانه‌های فوتوولتائیک سپاسگزاریم. همچنین، از تمامی دانشجویانی که در کلاس‌های دانشگاه صنعتی دلفت حاضر شدند، یا در دوره‌های برخط آن شرکت کردند و با بیان دیدگاه‌های خود، در بهتر شدن این کتاب نقش داشتند قدردانی می‌کنیم.

از این کتاب لذت ببرید.

نویسندگان

دلفت، هلند و برلین، آلمان

سپتامبر ۲۰۱۵

1. Gireesh Ganesan Nair
2. Mathew Alani
3. Adwait Apte
4. Giorgos Papakonstantinou
5. Dimitris Deligiannis
6. Arianna Tozzi
7. Stephan van Berkel
8. Ravi Vasudevan
9. Do Yun Kim
10. Mirjam Theelen
11. Andrea Ingenito
12. Wilson Smith
13. Paula Perez Rodriguez
14. Christiane Becker
15. Helmholtz-Zentrum
16. Rowan MacQueen
17. Nishant Narayan

## درباره کتاب

هدف کتاب حاضر پوشش تمامی موضوعات مربوط، برای داشتن دید کلی به جنبه‌های گوناگون انرژی خورشیدی، با تأکید بیشتر بر فناوری فوتولتائیک است. این فناوری امکان تبدیل مستقیم نور خورشید به برق را فراهم می‌کند.

مباحث این کتاب برگرفته از سه دوره تدریس شده درمورد فوتولتائیک در دانشکده مهندسی برق، ریاضیات و علوم رایانه دانشگاه صنعتی دلفت است. این دوره‌ها شامل مبانی فوتولتائیک (بخش دوم کتاب)، فناوری‌های فوتولتائیک (بخش سوم کتاب) و سامانه‌های فوتولتائیک (بخش چهارم کتاب) است.

این کتاب دارای پنج بخش است. در مقدمه (بخش نخست) و در فصل اول، مطالبی عمومی از انرژی مطرح می‌کنیم، در فصل دوم، وضعیت کنونی فناوری فوتولتائیک را بررسی و در فصل سوم، به‌طور خلاصه، شیوه کارکرد سلول خورشیدی را بیان می‌کنیم.

بخش دوم این کتاب سعی می‌کند تمامی مبانی مورد نیاز برای درک سلول‌های خورشیدی را معرفی کند. پس از اندکی بحث الکترودینامیک پایه در فصل چهارم و تابش خورشیدی در فصل پنجم، طی چند فصل، مهم‌ترین مفاهیم فیزیک نیمرسانا را بررسی می‌کنیم. در فصل ششم، مبانی این فیزیک را توضیح می‌دهیم و انواع گوناگون تولید و بازترکیب را در فصل هفتم شرح می‌دهیم. در فصل هشتم، انواع پیوندهای نیمرسانا را معرفی و پس از تعریف مهم‌ترین پارامترهای مشخصه‌یابی سلول‌های خورشیدی در فصل نهم، در فصل دهم، با بحث درمورد محدودیت‌های بازده سلول خورشیدی، بخش دوم کتاب را جمع‌بندی می‌کنیم. مفاهیم مطرح‌شده در این بخش برای طراحی‌های بخش سوم بسیار اهمیت دارند.

فناوری‌های گوناگون فوتولتائیک در بخش سوم بررسی شده است. در ابتدای این بخش و در فصل یازدهم، خلاصه‌ای از تاریخچه سلول‌های خورشیدی را بیان می‌کنیم. در فصل دوازدهم، سلول‌های خورشیدی سیلیکونی را تشریح می‌کنیم که هنوز هم مهم‌ترین فناوری سلول‌های خورشیدی محسوب می‌شود. در ادامه بحث و در فصل سیزدهم، نگاهی به فناوری‌های گوناگون سلول‌های خورشیدی لایه‌نازک خواهیم داشت. پس از آن، برخی فرایندهای لایه‌نشانی را، در فصل چهاردهم، مرور می‌کنیم و شیوه ساخت ماژول‌های فوتولتائیک را در فصل پانزدهم توضیح می‌دهیم. جمع‌بندی بخش سوم به بحث درمورد چند مفهوم نسل سوم اختصاص دارد که می‌خواهند بازدهی‌های بالا و قیمت اندک را با هم ترکیب کنند. این نوع سلول‌های خورشیدی در فصل شانزدهم بررسی شده‌اند.

بخش پنجم به طراحی سامانه‌های فوتوولتائیک عملی اختصاص داده شده است. پس از مقدمه کوتاهی در مورد سیستم‌های فوتوولتائیک در فصل هفدهم، موقعیت خورشید و تأثیرات آن را، به‌طور دقیق، در فصل هجدهم بررسی می‌کنیم. اجزای گوناگون سامانه فوتوولتائیک، که از مازول آغاز و شامل اجزای توازن سامانه نیز می‌شود، در فصل نوزدهم معرفی خواهند شد. با استفاده از تمامی این اطلاعات، طراحی سامانه‌های فوتوولتائیک—هم سامانه‌های مستقل و هم سامانه‌های متصل به شبکه—را در فصل بیستم توضیح خواهیم داد. این قسمت با مبحثی در مورد اقتصاد و بوم‌شناسی سامانه‌های فوتوولتائیک، در فصل بیست‌و یکم، جمع‌بندی می‌شود.

در بخش پنجم، دو گونه دیگر از فناوری‌های تبدیل انرژی خورشیدی توضیح داده خواهند شد: مفاهیم گوناگون انرژی خورشیدگرمایی را در فصل بیست‌و دوم توضیح می‌دهیم. در فصل بیست‌وسوم، که فصل آخر نیز شمرده می‌شود، در مورد سوخت‌های خورشیدی صحبت می‌کنیم که امکان ذخیره‌سازی طولانی‌مدت انرژی خورشیدی را به‌صورت انرژی شیمیایی فراهم می‌آورد. بیشتر فصل‌ها شامل تمرین‌هایی‌اند که به خواننده امکان ارزیابی مفاهیم خوانده‌شده را می‌دهد. این کتاب منبع ارزشمندی است که دانشجویان را، در یادگیری موضوعات مرتبط با انرژی خورشیدی، یاری می‌دهد. در پایان کتاب نیز پیوست‌هایی آمده که استخراج روابط طولانی کتاب در آن‌ها انجام شده است.



## علائم اختصاری

### مخفف‌ها

<i>AM</i>	جرم هوا،-
<i>AOI</i>	زاویه فرود،-
<i>BOS</i>	توازن سامانه
<i>DoD</i>	عمق تخلیه،-
<i>DHI</i>	تابندگی افقی پخشی، $Wm^{-2}$
<i>DNI</i>	تابندگی عمودی مستقیم، $Wm^{-2}$
<i>EQE</i>	بازده کوانتومی خارجی،-
<i>GHI</i>	تابندگی افقی کل، $Wm^{-2}$
<i>IQE</i>	بازده کوانتومی داخلی،-
<i>ppm</i>	ذره در میلیون
<i>SoC</i>	حالت شارژ،-
<i>SRH</i>	شاگلی-رید-هال (باز ترکیب)
<i>SVF</i>	ضریب دید آسمان،-
<i>TCO</i>	اکسیدهای رسانای شفاف

### حروف لاتین

<i>A</i>	ضریب جذب، $cm^{-3}s^{-1}$
<i>A</i>	مساحت، $m^2$
<i>a, a</i>	شتاب، $m^2$
<i>D</i>	ضریب پخش، $m^2s^{-1}$
<i>E</i>	انرژی، <i>J</i>
<i>f</i>	توزیع فرمی-دیراک،-
<i>F, F</i>	نیرو، <i>N</i>

FF	ضریب پرشدگی،-
G	نرخ تولید، $m^{-3}s^{-1}$
g	تابع چگالی حالت‌ها، $m^{-3}J^{-1}$
$G_M$	تابندگی روی مازول،
I	جریان، $A$
$I_e$	تابندگی، $Wm^{-2}$
J	چگالی جریان، $Am^{-2}$
k	عدد موج، $m^{-1}$
$l_n, l_p$	عرض ناحیه بار- فضا، $m$
$L_e$	درخشندگی، $Wm^{-2}sr^{-1}$
m	جرم، $kg$
$m^*$	جرم موثر، $kg$
$M_e$	گسیل تابشی، $Wm^{-2}sr^{-1}$
N	چگالی ذره، $m^{-3}$
n	چگالی الکترون، $m^{-3}$
n	ضریب شکست (بخش حقیقی)، -
P	توان، $W$
p	چگالی حفره، $m^{-3}$
Q	گرما، $J$
R	نرخ بازترکیب، $m^{-3}s^{-1}$
R	بازتابندگی، -
$S_r$	سرعت بازترکیب سطحی، $ms^{-1}$
T	دما، $K$
T	گذردهی
U	ضریب تبادل حرارتی، $WK^{-1}$
V	پتانسیل الکتریکی، $V$

$v, v$	سرعت، $ms^{-1}$
$W$	کار، $J$
$z$	ارتفاع (تابع)، $m$

### حروف یونانی

$\alpha$	ضریب جذب، -
$\alpha$	سپیدایی، -
$\gamma$	زاویه فرود، -
$\varepsilon$	گذردهی الکتریکی، -
$\varepsilon$	ضریب گسیل، -
$\zeta$	میدان مغناطیسی، $Am^{-1}$
$\eta$	بازده، -
$\theta$	زاویه قطبی، -
$\kappa$	ضریب شکست (موهومی)، -
$\lambda$	طول موج، $m$
$\mu$	تحرک پذیری، $m^2V^{-1}s^{-1}$
$\nu$	بسامد، $s^{-1}$
$\xi$	میدان الکتریکی، $Vm^{-1}$
$\rho$	چگالی بار، $A.s.m^{-3}$
$\sigma$	سطح مقطع، $m^2$
$\sigma_r$	زبری مؤثر، $m$
$\tau$	طول عمر، زمان واهلش، $s$
$\Upsilon$	حجم، $m^3$
$\varphi$	زاویه سمتی، -
$\varphi$	تابع کار، $V$
$\Phi_{ph}$	شار فوتون، $m^{-2}s^{-1}$

$\chi$	پذیرفتاری دی الکتریک،-
$\chi$	الکترون خواهی، $V$
$\Psi_{ph}$	جریان فوتون، $s^{-1}$
$\Omega$	زاویه فضایی،-
$\omega$	بسامد زاویه‌ای ( $\omega = 2\pi\nu$ )، $s^{-1}$

### زیرنویس

0	در خلأ
A	پذیرنده
C	نوار رسانش
D	دهنده
d	سوق
F	فرمی
G	گاف انرژی
i	ذاتی، فرودی
$\lambda$	جزء طیفی با پارامتر طول موج
L	نور
mpp	نقطه بیشینه توان
$\nu$	جزء طیفی با پارامتر بسامد
oc	مدار باز
p	پلازما
ph	فوتون
r	بازتابی
sc	اتصال کوتاه
t	عبوری
th	گرمایی
V	نوار ظرفیت

### ثابت‌ها

$C_0$	سرعت نور در خلأ ( $299792458 \text{ ms}^{-1}$ )
$\epsilon_0$	گذردهی خلأ ( $8/854187 \times 10^{-12} \text{ AsV}^{-1} \text{ m}^{-1}$ )
F	ثابت فارادی ( $96485/3365 \text{ As mol}^{-1}$ )
h	ثابت پلانک ( $6/626069 \times 10^{-34} \text{ Js}$ )
$k_B$	ثابت بولتزمان ( $1/380649 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ )
$\mu_0$	تراوایی خلأ ( $4\pi \times 10^{-7} \text{ VsA}^{-1} \text{ m}^{-1}$ )
q	بار پایه ( $1/602 \times 10^{-19} \text{ C}$ )
$\sigma$	ثابت استفان-بولتزمان ( $5/670373 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ )
$Z_0$	امپدانس فضای آزاد ( $367/7 \Omega$ )



بخش نخست

مقدمه





## ۱. انرژی

کتاب حاضر در مورد انرژی خورشیدی است؛ پس بهتر است بحث را با گفتمانی درباره انرژی شروع کنیم. در کتاب سخنرانی‌های فاینمن<sup>۱</sup> [۱] آمده است:

حقیقت یا، به اصطلاح، قانونی وجود دارد که بر تمامی مفاهیم طبیعی که تا کنون شناخته شده‌اند حاکم است. تا به حال هیچ استثنایی برای این قانون یافت نشده است یا، به عبارت دیگر، تا آنجا که اطلاع داریم، این قانون صادق است. نام این قانون بقای انرژی است. بر طبق این قانون، کمیت معینی وجود دارد که انرژی نام گرفته است و با تغییرات فراوان طبیعت نیز تغییر نمی‌کند. این قانون نظریه‌ای کاملاً مطلق محسوب می‌شود زیرا یک اصل ریاضی است؛ این اصل ریاضی بیان می‌کند کمیتی عددی وجود دارد که تحت تأثیر رخداد‌های گوناگون قرار نمی‌گیرد. این موضوع تشریح فرایند یا موضوعی ثابت نیست بلکه حقیقتی عجیب است که با آن می‌توانیم عددی را محاسبه کنیم که پس از فرایندهای طبیعی، دوباره با محاسبه، به همان عدد می‌رسیم.

...

انرژی صورت‌های بسیار متنوعی دارد که برای هر یک رابطه مشخصی موجود است. این صورت‌ها شامل انرژی گرانشی، انرژی جنبشی، انرژی گرمایی، انرژی کشسانی، انرژی الکتریکی، انرژی شیمیایی، انرژی تابشی، انرژی هسته‌ای و انرژی جرم می‌شوند. اگر تمامی روابط این حالت‌ها را جمع‌بندی کنیم، به‌جز انرژی وارد یا خارج‌شونده، مورد دیگری تغییر نمی‌کند.

بیان این نکته دارای اهمیت است که در فیزیک امروز، هیچ اطلاعاتی از ماهیت انرژی نداریم. هیچ‌گاه نمی‌گوییم انرژی به‌صورت حباب‌های کوچکی با مقدار مشخص ظاهر می‌شود. خیر؛ به این صورت نیست. با این حال، برای محاسبه برخی مقادیر عددی، روابطی موجود است که وقتی آن‌ها را با هم جمع می‌کنیم، همیشه به عددی

---

1. Feynman