به نام خداوند جان و خرد

انتشارات
۷۶۲

انرژی خورشیدی

معرفی سامانه‌ها و فرایندهای نیروگاهی و غیرنیروگاهی انرژی خورشیدی

دکتر محمودرضا گلزاریان

سرشناسه: گلزاریان، محمودرضا، ۱۳۵۵ -
عنوان و نام پدیدآور: انرژی خورشیدی: معرفی سامانه‌ها و فرایندهای نیروگاهی و غیرنیروگاهی انرژی خورشیدی/ محمودرضا گلزاریان؛ ویراستار علمی مهدی خجسته‌پور؛ ویراستار ادبی مصطفی قندهاری.
مشخصات نشر: مشهد: دانشگاه فردوسی مشهد، انتشارات، ۱۳۹۹.
مشخصات ظاهری: ۳۷۶ ص.: مصوّر، جدول، نمودار.
فروست: انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد؛ ۷۶۲.
شابک: ISBN: 978-964-386-454-5
وضعیت فهرست‌نویسی: فاپا.
یادداشت: کتابنامه: ص.[۳۶۹]- ۳۷۲. نمایه.
عنوان دیگر: معرفی سامانه‌ها و فرایندهای نیروگاهی و غیرنیروگاهی انرژی خورشیدی.
موضوع: انرژی خورشیدی
Solar energy
موضوع: نیروگاه‌های خورشیدی
Solar power plants
شناسه افزوده: خجسته‌پور، مهدی، ۱۳۵۰- ویراستار.
شناسه افزوده: دانشگاه فردوسی مشهد، انتشارات.
رده‌بندی کنگره: TJ۸۱۰
رده‌بندی دیویی: ۶۲۱/۴۷
شماره کتابشناسی ملی: ۷۳۹۶۳۴۳

انرژی خورشیدی

معرفی سامانه‌ها و فرایندهای نیروگاهی و غیرنیروگاهی انرژی خورشیدی

پدیدآورنده: دکتر محمودرضا گلزاریان
ویراستار علمی: دکتر مهدی خجسته‌پور
ویراستار ادبی: مصطفی قندهاری
مشخصات: وزیری، ۱۰۰ نسخه، چاپ دوم، زمستان ۱۴۰۴ (اوّل، ۱۳۹۹)
چاپ و صحافی: همیار
بها : ۶/۰۰۰/۰۰۰ ریال

حق چاپ برای انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد محفوظ است.

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)

انتشارات
۷۶۲

http://press.um.ac.ir Email: press@um.ac.ir

فهرست مطالب

پیشگفتار..... ۷

فصل ۱. انرژی خورشیدی برای بشر..... ۹

۱– ۱ چرا انرژی و مخصوصاً برق اهمیت دارد؟..... ۹

۱– ۲ سوخت‌های فسیلی و منابع انرژی تجدیدپذیر..... ۱۱

۱– ۳ انرژی خورشیدی در مقایسه با سایر منابع انرژی تجدیدپذیر..... ۱۳

۱– ۴ دیماند و مصرف..... ۱۴

۱– ۵ محدودیت استحصال انرژی خورشیدی..... ۲۰

۱– ۶ روش‌های تبدیل انرژی خورشیدی: روش‌های استحصال انرژی از آفتاب..... ۲۲

فصل ۲. خورشید..... ۲۵

۲– ۱ موقعیت خورشید و طبیعت انرژی خورشیدی..... ۲۵

۲– ۲ چرخهٔ لکه‌های خورشیدی..... ۳۱

فصل ۳. تئوری انرژی خورشیدی و ویژگی‌های خورشید..... ۳۵

۳– ۱ تفاوت حرارت (گرما) و درجهٔ حرارت (دما)..... ۳۶

۳– ۲ مقاومت حرارتی..... ۳۸

۳– ۳ تفاوت نور تولیدشده با تشعشع و نور تولیدشده با مواد رنگی..... ۶۱

۳– ۴ تابش خورشیدی..... ۶۳

۳– ۵ ثابت خورشیدی: میزان تابش در سطح اتمسفر زمین..... ۶۴

۳– ۶ دمای مؤثر سطح سیاره‌ها..... ۶۹

۳–۷ تغییرات انرژی تا زمین..... ۷۴

۳– ۸ اندازه‌گیری تابش خورشیدی..... ۸۵

۳– ۹ تاریخچهٔ ثبت جریان تابشی (جهت مطالعهٔ آزاد)..... ۸۹

۳– ۱۰ پرسش‌های پایان فصل..... ۹۱

فصل ۴. تاریخچهٔ استفاده از انرژی خورشیدی ۹۹

فصل ۵ . نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی ۱۲۳
۵– ۱ نیروگاه‌های معمول (سوخت فسیلی) ۱۲۳
۵– ۲ نیروگاه‌های هم‌زمان گرما و برق ۱۲۵
۵– ۳ نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی ۱۲۷
۵– ۴ کورهٔ خورشیدی ۱۴۵
۵– ۵ مزایای نیروگاه‌های خورشیدی ۱۵۵

فصل ۶. کاربردهای غیرنیروگاهی انرژی گرمایی خورشیدی ۱۵۷
۶– ۱ آب‌گرم‌کن‌های خورشیدی ۱۵۷
۶– ۲ گرمایش و سرمایش ساختمان ۲۰۵
۶– ۳ آب‌شیرین‌کن خورشیدی ۲۱۸
۶– ۴ خوراک‌پز خورشیدی ۲۳۴
۶– ۵ خشک‌کن خورشیدی ۲۴۷

فصل ۷. تئوری فتوولتائیک: نیمه‌رساناها ۲۵۹
۷–۱ مواد رسانا، نارسانا و نیمه‌رسانا ۲۶۰
۷–۲ نظریهٔ نوارها در جامدات ۲۶۲
۷– ۳ ویژگی‌های نیمه‌رساناها و انواع آن ۲۶۸
۷– ۴ نیمه‌رسانای درونی یا ذاتی ۲۶۹
۷– ۵ افزودن ناخالصی به نیمه‌رساناها و تولید نیمه‌رساناهای بیرونی ۲۷۱
۷– ۶ سلول خورشیدی ۲۷۹
۷–۷ پرسش‌های پایان فصل ۲۸۲

فصل ۸. سامانه‌های فتوولتاییک (غیرنیروگاهی) ۲۸۵
۸– ۱ انواع سلول‌های خورشیدی فتوولتاییک ۲۸۸
۸– ۲ سلول‌های نسل اوّل: کریستالی سیلیکونی ۲۸۹
۸– ۳ سلول‌های خورشیدی نسل دوم: فیلم‌نازک ۲۹۹
۸– ۴ سلول‌های خورشیدی نسل سوم (فتوولتائیک نوظهور) ۳۰۴
۸– ۵ عملکرد سلول خورشید ۳۰۹
۸–۶ تأثیر میزان تابش و دما بر تولید الکتریسیتهٔ پنل فتوولتاییک ۳۲۰

۸-۷ طبقه‌بندی سیستم‌های فتوولتاییک..... ۳۲۳
۸-۸ نحوهٔ محاسبات جهت اندازهٔ اجزای لازم برای سامانهٔ برق فتوولتائیک منفصل از شبکه..... ۳۳۵

فصل ۹. نرم‌افزارهای خورشیدی..... ۳۵۷
۹-۱ نرم‌افزار Polysun..... ۳۵۷
۹-۲ نرم‌افزار TSOL..... ۳۵۹
۹-۳ نرم‌افزار PVSOL..... ۳۶۱
۹-۴ نرم‌افزار Homer Energy..... ۳۶۲
۹-۵ نرم‌افزار RETScreen..... ۳۶۴
۹-۶ نرم‌افزار PVsyst..... ۳۶۵

منابع..... ۳۶۹
نمایه..... ۳۷۳

پیشگفتار

خورشید منبع انرژی بسیار فراوان (تقریباً بی‌انتها)، بسیار ارزان (تقریباً رایگان)، پاک و در دسترس است. دریافت و جذب گرما و نور خورشید و تبدیل آن به انرژی بسیار اقتصادی است و بهره‌برداری از این انرژی، بدون تولید آلودگی‌های محیط‌زیستی است و با استفاده از این انرژی، میزان دی‌اکسیدکربن جو هم به‌شدت کاهش می‌یابد. سایر منابع انرژی دو مزیت اصلی انرژی خورشیدی را که شامل در دسترس بودن و تمام‌نشدنی بودن است، ندارند. انرژی حاصل از سوخت‌های فسیلی مانند نفت، گاز، زغال‌سنگ، علاوه‌بر مشکلات محیط‌زیستی که دارند، تمام‌شدنی هستند. سوختن و تولید انرژی از این منابع فسیلی، معمولاً ردپای کربن[1] بزرگی را به‌جای خواهد گذاشت. انرژی هسته‌ای[2]، انرژی جایگزین بهتری برای سوخت‌های فسیلی است؛ اما آلودگی‌های خطرناکِ حاصل از استفاده از این نوع انرژی و فناوری تاحدّی مرتبط با مسائل سیاسی که بسیار پیچیده، گران‌قیمت و در انحصار چند کشور خاص است، محدودیت بزرگی برای گسترش این انرژی محسوب می‌گردد.

در برابر منابع فسیلی، تابش خورشیدی تقریباً در بسیاری از نواحی ایران به‌مقدار زیادی قابل‌دسترس است. انرژی خورشیدی ردپای کربن ندارد و انرژی پاک و بدون آلودگی است. به‌ازای تولید هر کیلووات برق خورشیدی، به همان میزان، در منابع انرژی به‌ویژه منابعی که برای تولید و تزریق برق به شبکهٔ برق مورد استفاده قرار می‌گیرد صرفه‌جویی می‌کنید. فناوری جذب و دریافت انرژی خورشیدی و ایجاد نیروگاه‌ها و تولید سامانه‌های کوچک و بزرگ جذب انرژی خورشیدی، انحصاری و پیچیده نیست و علاوه‌بر وارد کردن فناوری، قابلیت اجرا و تولید انبوه تجهیزات مرتبط با این انرژی در کشور وجود دارد و پس از راه‌اندازی سامانه‌های خورشیدی، تقریباً هزینه‌ای برای تولید انرژی توسط آن‌ها پرداخت نمی‌شود.

آنچه در این کتاب موردتوجه قرار گرفته است، توضیح درمورد اهمیت انرژی خورشیدی، دانش پایه‌ای دربارهٔ انرژی خورشیدی، ویژگی‌های خاص این انرژی و موارد متعددی از شیوه‌های جذب و استفاده از انرژی خورشیدی به‌صورت نیروگاهی و غیرنیروگاهی (خانگی و تجاری) است. البته با توجه به قیمت بالای تجهیزات خورشیدی، هنوز لازم است که دولت با ایجاد مشوّق‌های جدید و ادامهٔ حمایت‌های تشویقی مالی ازجمله اختصاص یارانه، پاداش‌های اقتصادی و بخشودگی مالیاتی زمینه را برای گسترش استفادهٔ بیشتر مردم از این انرژی پاک مهیّا سازد. ازطرف‌دیگر، تبلیغات رسانه‌ای به‌منظور فرهنگ‌سازی درزمینهٔ صرفه‌جویی در مصرف انرژی و توسعه و تأکید بر حفظ محیط‌زیست و کاهش دی‌اکسیدکربن می‌تواند مردم بیشتری از کشورمان را به‌سمت سرمایه‌گذاری و استفاده از این منبع انرژی مفید هدایت کند.

کتاب حاضر در نه فصل تنظیم شده است. در فصل اوّل، درمورد اهمیت انرژی خورشیدی در بین منابع انرژی فسیلی و همچنین منابع انرژی تجدیدپذیر صحبت شده است. در فصل دوم، دربارهٔ خورشید، این ستارهٔ پرانرژی،

---

1. Carbon footprint

۲. اورانیوم که در نیروگاه اتمی استفاده می‌شود، یک منبع غیرتجدیدپذیر (non-renewable resource) است. در این نیروگاه، گازهای گلخانه‌ای تولید نمی‌شود، ولی مسائل دفن ضایعات حاصل از نیروگاه اتمی و مسائل زیست‌محیطی از جمله نگرانی‌های استفاده از این منبع برای تولید انرژی است.

اطلاعاتی ارائه داده شده است. در فصل سوم، به روابط و مفاهیم انرژی و ویژگی‌های انرژی خورشیدی مخصوصاً از دیدگاه انتقال حرارت پرداخته شده است. درک این روابط می‌تواند در اتّخاذ تصمیمات صحیح برای جذب و دریافت انرژی کمک‌کننده باشد. در فصل چهارم به تاریخچهٔ مختصری از استفاده بشر از انرژی خورشیدی و پیشرفت‌های انسان استحصال و استفاده از این انرژی مرور شده است. در فصل پنجم و ششم، کاربردهای نیروگاهی و غیرنیروگاهی گرمایی انرژی خورشیدی و فناوری های آن‌ها توضیح داده شده است. در فصل هفتم و هشتم به ویژگی‌های نیمه‌رساناها و کاربرد آن‌ها در پنل های فتوولتائیک که در آن ها تبدیل مستقیم نور خورشید به انرژی الکتریسیته اتفاق می‌افتد پرداخته‌شده است. در فصل نهم، برخی از ابزارها و نرم‌افزارهای محاسباتی و مدیریتی انرژی خورشیدی معرفی می‌شوند. با توجه به گسترده بودن کاربردهای انرژی خورشیدی، امکان پوشش و توضیح تمام تجهیزات استحصال انرژی خورشیدی در یک کتاب فراهم نیست. بنابراین، در این کتاب سعی شده است که برخی از موارد و مطالب اساسی مرتبط با انرژی خورشیدی که دارای کاربرد بیشتری هستند، آورده و توضیح داده شود. مخاطبان این کتاب، دانشجویان مقاطع کارشناسی و تحصیلات تکمیلی مهندسی بیوسیستم گرایش انرژی‌های تجدیدپذیر و دانشجویان مهندسی مکانیک، گرایش تبدیل انرژی هستند. درعین‌حال، مطالب کتاب به‌گونه‌ای است که می‌تواند برای سایر علاقه‌مندان به مبحث انرژی خورشیدی مفید باشد.

این کتاب حاصل تلاش چندین سال تدریس درس‌های مرتبط با انرژی خورشیدی ازجمله انرژی‌های نو، سامانه‌های حرارتی خورشیدی و سامانهٔ فتوولتائیک و اجرا و مشاورهٔ پروژه‌های پژوهشی خورشیدی در سطوح کارشناسی و تحصیلات تکمیلی است. در نگارش و تدوین این کتاب کوشیده‌ام ضمن به‌روز بودن مطالب، مطالعهٔ آن نیز برای خوانندگان روان و آسان باشد. هرچند تلاش شده است که با مرور چندبارهٔ مطالب کتاب، اشکالات آن تاحدّممکن برطرف گردد، بااین‌حال امکان اینکه اشکالات املایی و انشایی از زیر چشم ما خارج شده باشد، وجود دارد. بنابراین از خوانندگان محترم، اعم از دانش‌آموزان و دانشجویان عزیز و نیز اساتید گرامی سپاسگزار خواهم شد اگر انتقادها و دیدگاه‌های اصلاحی خود را به این‌جانب به‌صورت ایمیلی به m.golzarian@um.ac.ir یا mahmood.golzarian@gmail.com یا به‌صورت تلگرامی به آی‌دی Mahmood.Golzarian@ ارسال فرمایند.

در پایان بر خود لازم می‌دانم که از خانم مهندس مهتا رفیعی بابت پیشنهاد موارد اصلاحی که روی پیش‌نویس اوّلیهٔ کتاب دادند، تشکّر کنم. از آقای دکتر مهدی خجسته‌پور که زحمت ویراستاری علمی این کتاب را تقبّل کردند، متشکرم. از آقای قندهاری بابت ویراستاری ادبی قابل تقدیر، تیزبینانه و بسیار دقیق این کتاب بسیار سپاسگزارم. همچنین از همهٔ کسانی که در آماده‌سازی و چاپ این کتاب من را حمایت و تشویق کرده‌اند، تشکّر و قدردانی کنم. از داوران محترم که زحمت داوری را تقبّل کردند و در اسرع وقت این کار را انجام دادند، سپاسگزاری می‌کنم و همچنین به‌طور ویژه از آقای دکتر صابری مدیر محترم نشر آثار علمی دانشگاه فردوسی مشهد و کارکنان زحمت‌کش این مدیریت (آقایان قندهاری، نخعی، محمدزاده، ...) به‌دلیل فراهم کردن امکانات چاپ این کتاب کمال تشکّر و قدردانی را دارم.

در پناه تابش الطاف الهی حق باشید.

محمودرضا گلزاریان

تابستان ۱۳۹۹

۱

انرژی خورشیدی برای بشر

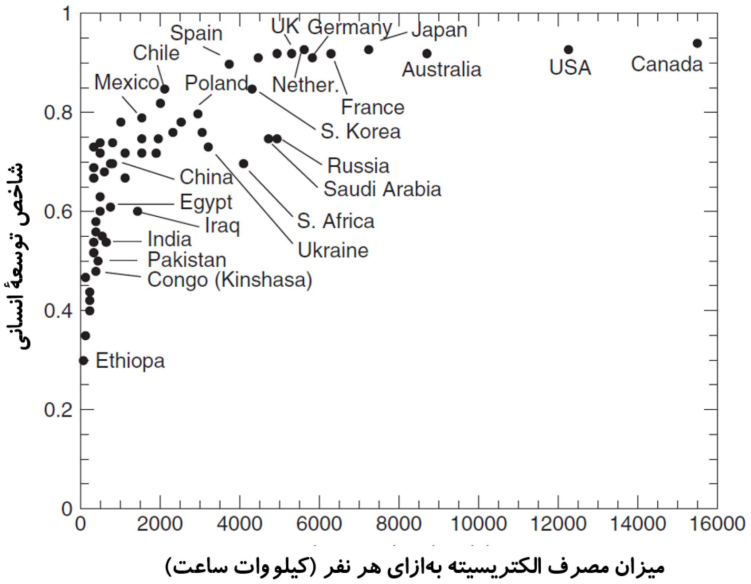
منبع اصلی تمام منابع انرژی‌های شناخته‌شده برای بشر خورشید است. انرژی خورشیدی قسمتی از انرژی تجدیدپذیر است که مستقیماً از خورشید به‌صورت گرما و نور دریافت می‌شود و یا به‌طور مستقیم ازطریق گرما و نور یا با تبدیل آن به الکتریسیته به‌صورت غیرمستقیم مورداستفاده قرار می‌گیرد. در این فصل به اهمیت انرژی و انرژی‌های تجدیدپذیر پرداخته می‌شود و انرژی خورشیدی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر و شیوه‌های استحصال آن معرفی خواهد شد.

۱- ۱ چرا انرژی و مخصوصاً برق اهمیت دارد؟

یکی از موارد مهمی که در جهان امروز تأثیر بسیار زیادی بر روابط بین‌المللی و توسعهٔ کشورها دارد، تأمین انرژی موردنیاز و مخصوصاً انرژی برق است. انرژی الکتریسیته (برق) نقش کلیدی هم در توسعهٔ اقتصادی و هم در توسعهٔ اجتماعی جوامع دارد. برطبق آمار منتشرشده توسط سازمان ملل، دسترسی به برق و مصرف الکتریسیته تا اندازه‌ای با کیفیت زندگی جوامع ارتباط مستقیم دارد. شکل ۱-۱ شاخص توسعهٔ انسانی[1] (HDI) را در ۶۰ کشور دنیا که مجموع جمعیت آن‌ها بیش از ۹۰ درصد جمعیت زمین را شامل می‌شود، در برابر مصرف سرانهٔ برق نشان می‌دهد.

شاخص توسعهٔ انسانی توسط سازمان ملل ارائه می‌شود و این شاخص آماره‌ای مرکّب از امید به زندگی[2] (عمر متوسط)، آموزش و شاخص‌های درآمدی[3] و سرانهٔ تولید ناخالص ملّی[4] برای رتبه بندی

1. Human Development Index
2. Life expectancy
3. Income indices
4. Per capita gross domestic product



شکل ۱–۱ ارتباط بین شاخص توسعهٔ انسانی (محور عمودی) در برخی از کشورها با سرانهٔ مصرف انرژی الکتریسیته (محور افقی)

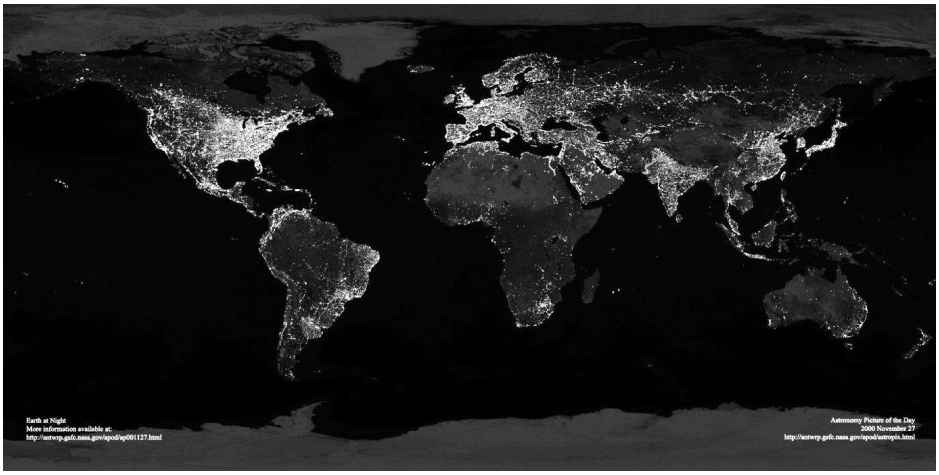
کردن کشورها به چهار ردیف استفاده می‌شود. نمودار شکل ۱–۱ نشان می‌دهد که بهبود کیفیت زندگی در اکثر کشورهای درحال‌توسعه، نیازمند افزایش چندین برابر تولید و استفاده از الکتریسیته از چند صد به چندین هزار کیلووات ساعت در سال است. علاوه‌بر این نمودار، نقشهٔ جهان در شب که توسط سازمان ناسا تهیه شده است نیز ارتباط بین مصرف برق و توسعهٔ انسانی و پیشرفته بودن کشور را نشان می‌دهد (شکل ۱–۲). در این نقشه، تراکم نقاط روشن در کشورهای توسعه‌یافته (ازجمله ژاپن و کشورهای اروپای غربی و آمریکای شمالی) نسبت به کشورهایی که هنوز از لحاظ اقتصادی و اجتماعی توسعه نیافته‌اند (اروپای شرقی، آفریقا، آمریکای جنوبی و خاورمیانه) بیشتر است.

برای تولید الکتریسیته که انرژی ثانویه محسوب می‌شود، از دو گروه عمدهٔ منابع انرژی اوّلیه استفاده می‌شود:

أ. منابع انرژی تجدیدناپذیر (سوخت‌های فسیلی)

ب. منابع انرژی تجدیدپذیر (انرژی‌های نو)

منبع انرژی تجدیدناپذیر به منبع انرژی‌ای گفته می‌شود که اگر آن را مصرف کنیم، قادر نخواهیم بود در زمان کم، آن را دوباره مهیّا کنیم. منبع انرژی تجدیدپذیر به منبع انرژی‌ای گفته می‌شود که در زمان کمی به‌طور مجدّد قابل‌استفاده گردد و به‌عبارت‌دیگر درطی زمانِ مصرف، مجدّداً تولید شود.



شکل ۱-۲ زمین در شب

۱- ۲ سوخت‌های فسیلی و منابع انرژی تجدیدپذیر

میلیون‌ها سال است که خورشید به زمین می‌تابد و انرژی می‌دهد. تابش نور خورشید بر گیاهانی که میلیون‌ها قرن پیش می‌زیسته‌اند عامل اصلی تشکیل زغال‌سنگ، نفت و گاز طبیعی است که امروزه مهم‌ترین منابع تأمین انرژی بشر هستند. این سوخت‌ها که انرژی خورشیدی را به‌صورت قدیمی و فسیل‌شده در خود ذخیره کرده‌اند، «سوخت فسیلی» نام دارند.

تودهٔ زیستی یا بیوماس[1] نیز یک منبع انرژی خورشیدی از نوع گیاهی است که نه به‌صورت فسیل‌شده، بلکه به‌صورت تازه‌تر استفاده می‌شود. این منبع انرژی، به رویش و رشد گیاهانی اشاره دارد که می‌توانند برای سوخت یا سایر مقاصد به‌کار برده شوند. برای مثال، چوبی که در بخاری‌های دیواری یا شومینه‌ها سوزانده می‌شود، شکلی از انرژی خورشیدی است که از بیوماس به‌دست می‌آید. محقّقان می‌کوشند تا از راه‌های دیگر به پرورش گیاهانی دست پیدا کنند که به‌عنوان انرژی به‌کار برده شوند. برای نمونه، جلبک‌های دریایی را پرورش می‌دهند و آن‌ها را برای تولید متان (گازی مشابه با گاز طبیعی) برداشت می‌کنند (شکل ۱-۳) یا درخت‌هایی را پرورش می‌دهند تا از سوزاندن آن‌ها برای تولید الکتریسیته در نیروگاه‌ها استفاده شود.

بااین‌حال، درحال‌حاضر مهم‌ترین منابع انرژی برای تبدیل به انرژی الکتریکی، منابع انرژی فسیلی هستند. سوخت‌های فسیلی به‌طورکلی سه دسته‌اند: زغال‌سنگ، نفت[2] و گاز طبیعی (شکل ۱-۴). شکل‌گیری این سه دسته از سوخت‌ها چندصدهزار یا حتّی چند میلیون سال قبل و پیش از ظهور دایناسورها

1. Biomass

۲. به نفت سنگینی که در برخی از نیروگاه های تولید برق استفاده می شود مازوت (mazut) گفته می شود.

شکل ۱-۳ محقّقان دانشگاه زوریچ درحال کار روی رآکتور جلبک[1] (منبع: www.algaeindustrymagazine.com)

شروع شده و به‌همین‌خاطر است که به این سوخت‌ها «سوخت‌های فسیلی» می‌گویند. این منابع به‌عنوان منابع تجدیدناپذیر[2] نیز خوانده می‌شوند؛ زیرا با مصرف آن‌ها امکان احیای آن منابع در زمان کم میسّر نیست. این منابع رو به اتمام هستند و قیمت آن‌ها متأثر از اوضاع سیاسی و اقتصادی جهان است. علاوه‌براین، استفاده از این منابع انرژی به‌دلیل مسائلی چون عدم امنیت درمورد تأمین انرژی و ارزش فراوان این نوع سوخت‌ها در صنایع جانبی نفت و پتروشیمی و مهم‌تر از همه، مسائل زیست‌محیطی ناشی از مصرف این سوخت‌ها که درحال‌حاضر به‌نوعی در اکوسیستم کرهٔ زمین مشکل ایجاد است، توجه را به منابع دیگر تأمین انرژی معطوف گردانیده است. ازآنجاکه پیدا کردن منابع جایگزین تأمین‌کنندهٔ انرژی موردنیاز بشر با توجه به افزایش جمعیت و تقاضا برای انرژی ضروری است، توجه به منابع انرژی تجدیدپذیر[3] که تمام‌نشدنی هستند (یا در زمان کمی، مجدّداً احیا می‌شوند) و مشکلات ناشی از منابع فسیلی ازقبیل افزایش گرمایش زمین و آلودگی‌های گازهای مضر را ندارند و ازلحاظ اقتصادی نیز انواع مختلف آن‌ها به‌صورت رایگان در اکثر مناطق جهان موجود است، افزایش یافته و موجب استحصال و استفاده‌های مختلفی از انرژی‌های تجدیدپذیر در سطح جهانی گردیده است. از مهم‌ترین استفاده‌های این منابع، تبدیل آن‌ها به الکتریسیته و استفاده از انرژی الکتریکی تولیدشده توسط آن‌ها در کاربردهای مختلف است. یک منبع تجدیدپذیر، منبعی است که بعد از استفاده از آن مجدّداً در یک دورهٔ زمانی نسبتاً کوتاه، قابل پر شدن[4] و اصطلاحاً تجدیدپذیر[5] باشد. برخی از منابع انرژی تجدید پذیر عبارت‌اند از: چوب، باد، آفتاب، انرژی زمین گرمایی، موج، جذر و مد، زیست‌توده، بیوگاز، بیودیزل و آب ذخیره‌شده در پشت سدها و ذخایر آبی (شکل ۱-۵).

1. Algea Bioreactor
2. Non-Renewable Energy Resources
3. Renewable Energy Resources
4. Replenishable
5. Renewable

شکل ۱-۴ نیروگاه‌هایی که توسط انرژی تجدیدناپذیر (نفت، گاز و زغال‌سنگ) کار می‌کنند.

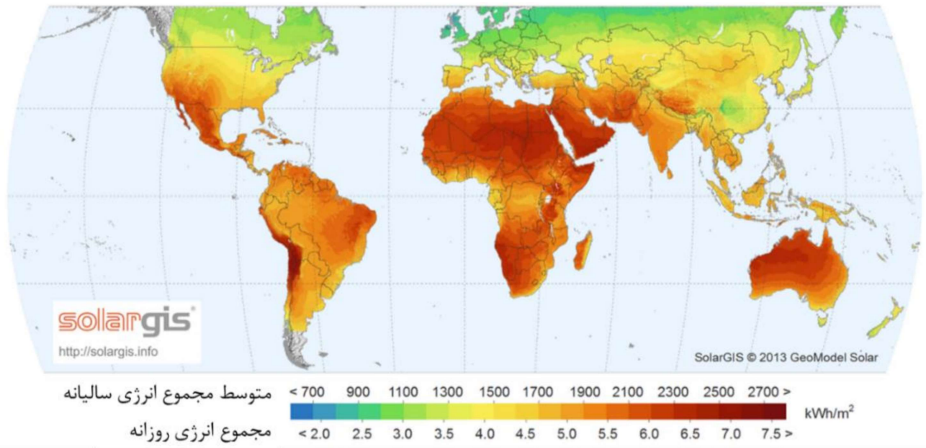
شکل ۱-۵ باد و خورشید و امواج از مهم‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر محسوب می‌شوند.

۱- ۳ انرژی خورشیدی در مقایسه با سایر منابع انرژی تجدیدپذیر

خورشید عظیم‌ترین منبع انرژی در جهان و منبع اصلی تمامی انرژی‌های موجود در زمین است. انرژی خورشیدی به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم می‌تواند به اشکال دیگر انرژی تبدیل شود. این سبب می‌شود که انرژی خورشیدی نسبت به سایر منابع از اهمیت بیشتری برخوردار باشد. این انرژی پاک، ارزان و بی‌پایان و در بیشتر مناطق کرهٔ زمین قابل‌استحصال است. نقشه‌ای که در شکل ۱-۶ نشان داده شده است، میزان انرژی خورشیدی قابل‌استحصال به‌صورت بالقوّه را در نقاط مختلف دنیا برحسب میزان کیلووات‌ساعت kWh به‌صورت روزانه و سالانه نشان می‌دهد.

پارامتر kW (کیلووات) برای اندازه‌گیری توان تولیدی به‌کار می‌رود و به‌نحوی به میزان نیاز یا دیماند بستگی دارد و kWh (کیلووات‌ساعت) برای اندازه‌گیری میزان مصرف انرژی استفاده می‌شود. انرژی، نشان‌دهندهٔ مقدار سوختی است که در چیزی وجود دارد یا مقدار توان و قدرت سوخت است که توسط مصرف‌کننده در یک دورهٔ زمان مشخص مصرف می‌شود.

به‌عبارت‌دیگر، توان، سرعت مصرف انرژی در واحد زمان است و کیلووات‌ساعت (kWh) واحدی از انرژی است. همان‌طور که یک فاصلهٔ ثابت بین دو شهر را می‌توان توسط واحدهای مختلفی مثل کیلومتر، فوت، یارد و... که البته قابل‌تبدیل به یکدیگر هستند بیان کرد، انرژی و میزان سوخت یک مادّه را نیز می‌توان برحسب واحدهای دیگری مانند ژول (Joul)، کالری (Calorie) یا بی‌تی‌یو (BTU) و... بیان کرد.

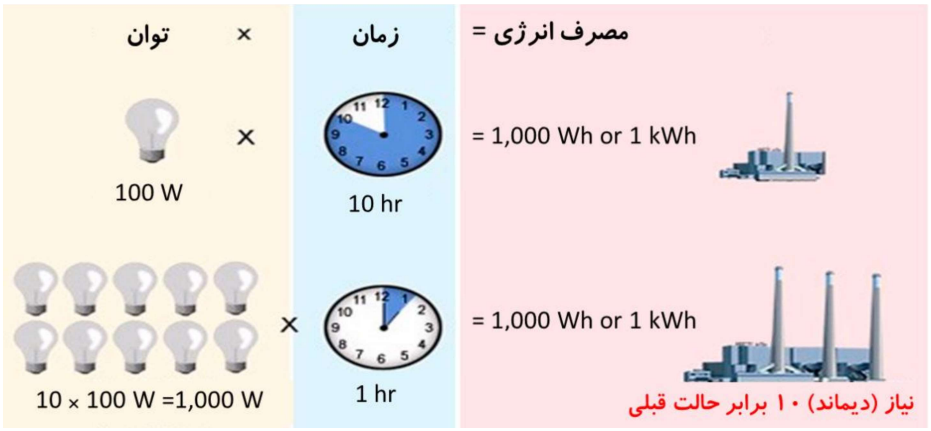


شکل ۱-۶ نقشهٔ میزان تابش خورشیدی دریافت‌شدهٔ روزانه و سالانه (برحسب کیلووات‌ساعت بر مترمربع) در مناطق مختلف زمین (منبع: solargis)

۱- ۴ دیماند و مصرف

واحد تقاضا برای انرژی الکتریسیته به‌صورت رایج، «دیماند» نامیده می‌شود که از واژهٔ انگلیسی آن، یعنی Demand گرفته شده است. دیماند به‌نحوی میزان برقی که مصرف‌کننده در لحظه نیاز دارد را نیز مشخص می‌کند و واحد آن کیلووات یا kW است. درحالی‌که واحد اندازه‌گیری مصرف، کیلووات‌ساعت یا kWh است. کیلووات، دیماند یا میزان تولید را مشخص می‌کند، درحالی‌که کیلووات‌ساعت میزان مصرف را به ما می‌دهد. درک تفاوت بین نیاز و مصرف در برگزیدن کاهش هزینه‌های انرژی حائز اهمیت است. با دو مثال زیر تفاوت بین نیاز و مصرف را بیشتر توضیح می‌دهیم.

فرض کنید که یک لامپ ۱۰۰ واتی به‌مدت ده ساعت کار می‌کند. میزان مصرف این لامپ ۱۰۰۰Wh یا ۱kWh است. در تمام زمانی‌که این لامپ روشن است، به ۱۰۰W نیاز دارد یا به‌عبارتی، تقاضا یا دیماند آن ۱۰۰W یا ۰٫۱ kW از تولیدکننده یا شرکت برق است. به‌عبارت‌دیگر، نیروگاه باید ۰٫۱ kW تولید کند و آماده داشته باشد تا هر موقع که موردنیاز مصرف‌کننده بود، در اختیار آن قرار بگیرد تا بتواند چراغ ۱۰۰ واتی خودش را روشن کند. به‌طور مشابه، ۱۰ لامپ ۱۰۰ وات که برای یک ساعت روشن باشد، ۱۰۰۰ وات ساعت یا ۱kWh مصرف می‌کند. در هر دو مورد، میزان مصرف، ۱kWh است، ولی توجه کنید که چگونه سناریوی دوم روی میزان تولید و به‌عبارت‌دیگر روی دیماند تأثیر می‌گذارد. در حالت دوم، شرکت خدمات‌دهندهٔ برق باید آمادگی مهیّا کردن میزان انرژی در واحد زمان ۱۰ برابر نسبت به سناریوی اوّلیه را داشته باشد (شکل ۱-۷). اگر این دو مشتری، هر دو قبض برق دریافت کنند، هر دو هزینه‌ای به میزان مصرف انرژی ۱kWh باید پرداخت کنند؛ ولی در حالت دوم، نیروگاه برق بایستی ظرفیت تولید ده برابر



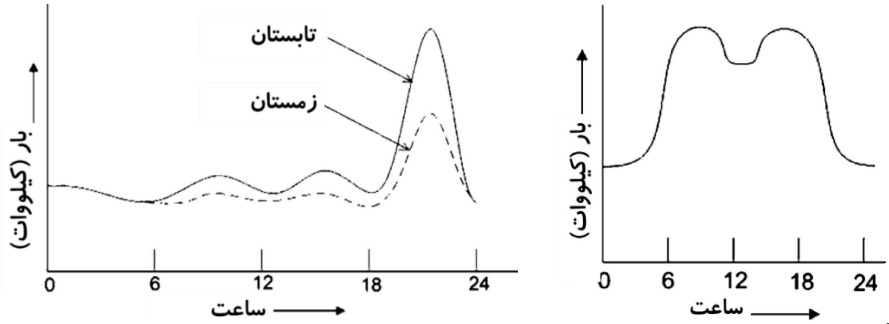
شکل ۱–۷ تفاوت نیاز (دیماند) و مصرف

وضـعیت اوّل را داشـته باشـد تا بتواند مشـتری دوم را که نیاز بالا ولی در زمان کم دارد را برآورده کند. مشـتریان صـنعتی و تجاری معمولاً براسـاس الگوی مصرف ساعتی‌شان و پیک دیماند برای انرژی مصرفی، هزینه پرداخت می‌کنند. این مشتریان معمولاً کنتورهایی دارند که هر دو پارامتر (مصرف و پیک دیماند) را در یک دوره محاسبه می‌کند.

میزان تقاضـا برای برق در واحد زمان برای ۲۴ ساعت معمول شبانه‌روز را با یک منحنی نشان می‌دهند. این منحنی به‌نام «منحنی بار روزانه[1]» شناخته می‌شود. اگر میزان تقاضا برای یک هفته، یک ماه یا یک سال رسـم شـود، این منحنی به‌ترتیب به‌نام‌های منحنی بار هفتگی، ماهیانه و سـالیانه شناخته می‌شود. این منحنی، میزان فعالیت جمعیت را نسـبت به مصـرف برق در یک دورهٔ زمانی نشـان می‌دهد. برای درک بهتر این مفهوم، نمونه‌ای از توزیع برق برای یک واحد صنعتی و یک واحد مسکونی را بررسی می‌کنیم.

شکل ۱–۸ أ، منحنی مدت بار روزانه را برای یک واحد صنعتی[2] در دورهٔ ۲۴ ساعت نشان می‌دهد. این منحنی نشـان می‌دهد که بالا رفتن تقاضـای دریافت برق از سـاعت ۵ صـبح که برخی از ماشین‌آلات واحد صنعتی شروع به کار می‌کنند، شروع می‌شود. در این ساعت، احتمالاً تجهیزاتی برای گرم کردن کارخانه و راه‌اندازی و هماهنگ‌سازی دستگاه‌های کارخانه در وضعیت مناسب به‌کار می‌افتند. تا ساعت ۸ صبح، یک واحد صنعتی به‌طور کامل مشغول به‌کار شده است و تقاضا (دیماند) ثابتی را تقریباً تا نزدیکی ظهر دارد. در نزدیکی ظهر، این دیماند کمی به‌خاطر زمان اسـتراحت، کاهش پیدا می‌کند و پس از آن در بعدازظهر از ساعت ۱۴ تا ۱۸، روند تقاضای برق مشابه با روند تقاضا در قبل از ظهر پیش می‌رود. در اوایل شب (ساعت ابتدایی بعد از غروب)، تقریباً تمام تجهیزات و ماشـین‌آلات خاموش می‌شـوند. میزان تقاضـا (دیماند) به

1. Daily load curve
2. Daily industrial load curve



شکل ۱–۸ منحنی بار (تقاضای) روزانه: (أ) برای واحدهای صنعتی؛ (ب) برای واحدهای مسکونی (Eelctrical4u, 2017)

حداقل خود در ساعت ۲۱ یا ۲۲ می‌رسد و تا ساعت ۵ صبح روز بعد در کمینهٔ ثابت باقی می‌ماند. این روند در یک بازهٔ ۲۴ ساعته تکرار می‌شود.

اگر به منحنی تقاضای روزانه یک واحد مسکونی نگاه کنیم (شکل ۱–۸ ب)، می‌بینیم که بار واردشدهٔ روی نیروگاه از واحدهای مسکونی در ۲ تا ۶ صبح به کمترین مقدار خود می‌رسد. این زمان، وقتی است که بیشتر مردم خواب هستند. در طول روز هم بیشتر مردم استفادهٔ کمتری از وسایل برقی و سامانه‌های روشنایی می‌کنند و مصرف برق تقریباً پایین است. بنابراین در طول روز، دیماند کم و فشار به نیروگاه حداقل است. نقطهٔ اوج میزان تقاضای واحدهای مسکونی، در اوایل غروب از ساعت تقریباً ۱۷ شروع می‌شود و تا ساعت ۲۱ تا ۲۲ در شب که بیشتر مردم برای خوابیدن آماده می‌شوند، ادامه پیدا می‌کند. بعد از این ساعت، دوباره کاهش سریعی در میزان بار دیده می‌شود. همان‌طور که از منحنی مصرف دیده می‌شود، میزان مصرف در تابستان (منحنی خط پر) به دلایل استفاده از تجهیزات سرمایشی (ازجمله کولرهای گازی) کمی بالاتر از میزان مصرف خانگی در زمستان (خط‌چین) است.

این نمودارها را می‌توان برای هر منطقه، ناحیه، شهر و بخش‌های مختلف فعال به‌دست آورد و از روی آن‌ها، منحنی دیماند (نیاز) کلی برق در آن منطقه را محاسبه کرد (شکل ۱–۹).

اطلاعاتی که این نمودارها در اختیار می‌گذارند، برای برنامه‌ریزی کار و توزیع برق در نیروگاه‌های برق مخصوصاً برای برآورده کردن بار لازم در ساعات اوج مصرف[1] و تنظیم و هماهنگ کردن ظرفیت تولید (و درصورت نیاز استفاده از نیروگاه‌های کمکی) و اقتصادی‌ترین اندازهٔ واحدهای تولیدکنندهٔ برق بسیار مفید است. مهم‌تر از همه، این منحنی کمک می‌کند که برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری بهتری روی اسکِجوئِل (برنامهٔ کاری)[2] یک نیروگاه صورت گیرد. این برنامه‌ریزی بهینه می‌تواند با درنظرگرفتن ملاحظات و محاسبات اقتصادی مشخص کند که چطور، چه زمان و در چه دامنهٔ ترتیب و توالی[3]،

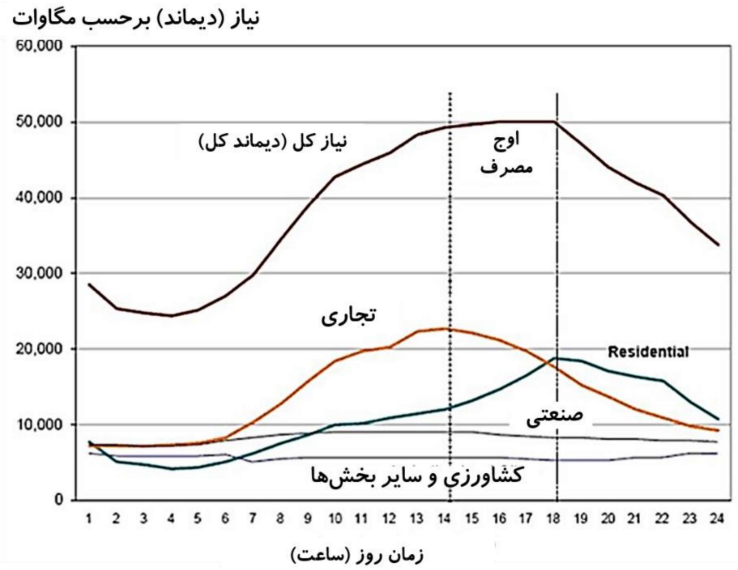
1. The peak load demand
2. Operating schedule
3. Sequence

واحدهای مختلف باید به‌کار بیفتند، کار کنند و خاموش شوند؛ اینکه در طی زمانی که مصرف بسیار کم است[1] (در دیماند باری پایین)، کدام ژنراتورها خاموش شوند و دوباره بعد از گذشتن از این ناحیه روشن شوند و چه‌موقع بار اضافه به نیروگاه تحمیل می‌شود.

به‌صورت خلاصه، موارد مهمی که از روی منحنی بار روزانه به‌دست می‌آید عبارت است از:

- تغییرات بار واردشده روی یک سامانهٔ تولید برق (برق موردنیاز یا دیماند) در طی ساعات مختلف روز
- توان تولیدشده در یک روز (سطح زیر منحنی)
- بیشترین دیماند و فشار روی نیروگاه برق در آن روز (بالاترین نقاط در منحنی)
- بار متوسطی که در یک ساعت روی یک نیروگاه برق می‌آید (سطح زیر منحنی تقسیم بر ۲۴)
- تعیین نیاز به واحد کمکی و به‌کارگیری تعداد واحدهای تولید قدرت موردنیاز[2] (مقایسهٔ میزان و ظرفیت تولید واحدهای تولید برق با میزان نیاز)

در موضوع به‌کارگیری انرژی خورشیدی نیز اطلاعات موجود در این نمودار حائز اهمیت است؛ زیرا میزان تولید یک نیروگاه خورشیدی در کنار واحد پشتیبانی سوخت فسیلی در مواقعی که خورشید تابش ندارد (مثل شب یا روزهای ابری) وابسته به دانستن مقدار انرژی موردنیاز یک منطقه است (شکل ۱-۱۰).



شکل ۱-۹ منحنی دیماند برای بخش‌ها و فعالیت‌های مختلف یک جامعه: از پایین به بالا: کشاورزی و دیگر بخش‌ها، صنایع، مسکونی، تجاری و دیماند کلی (منبع: mpoweruk.com)

1. Valley period (at lower load demand)
2. Required generating units