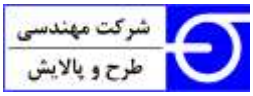
بسم الله الرحمن الرحيم

مرجع کاربردی طراحی و ساخت

نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتائیک

به کوشش گروه برق، الکترونیک و انرژی های تجدید پذیر



سرشناسه : کردآبادی، پویان، ۱۳۶۳.
عنوان و نام: مرجع کاربردی طراحی و ساخت نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتائیک.
پدیدآور به کوشش گروه برق، الکترونیک و انرژی های تجدیدپذیر شرکت مهندسی طرح و پالایش.
مشخص : تهران : پندار پارس ، ۱۴۰۳.
ات نشر
مشخص : ۳۹۶ ص.
ات
ظاهری
شابک : ۵۰۰۰۰۰۰ ریال-978-600-8201-67:
وضعیت : فیپا
فهرست
نویسی
یادداش : کتابنامه.
ت
موضوع : انرژی‌های تجدیدپذیر
موضوع : انرژی خورشیدی
موضوع : Renewable Energies
موضوع : Solar Energy
موضوع : صنایع انرژی
موضوع : Energy Industries
موضوع : نیروگاه‌های فتوولتائیک
موضوع : Photovoltaic Power Plant

شرکت مهندسی طرح و پالایش
تهران، خیابان قائم مقام فراهانی، کوچه آزادگان، شماره ۱۳، کد پستی ۱۵۸۶۷۳۵۵۱۴، info@tarhopalayesh.com

نام کتاب : مرجع کاربردی طراحی و ساخت نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتائیک.
ناشر : انتشارات پندار پارس، به سفارش شرکت مهندسی طرح و پالایش.
تالیف : پویان کردآبادی
چاپ نخست : مردادماه ۱۴۰۳
شمارگان : ۵۰۰ نسخه
طرح جلد : -
لیتوگرافی، چاپ، صحافی : ترام‌سنج، فرشیوه، نوری
قیمت : ۵۰۰۰۰۰ تومان شابک: ۰-۶۷-۸۲۰۱-۶۰۰-۹۷۸

* تمامی‌حقوق اعم از چاپ و تکثیر، نسخه‌برداری، ترجمه و اقتباس برای شرکت مهندسی طرح و پالایش محفوظ است.*

فهرست مطالب

۱-انرژی خورشیدی و سیستم‌های فتوولتائیک ۱
۱-۱-مقدمه ۱
۱-۲-انرژی خورشیدی ۲
۱-۳-تاریخچه سیستم‌های فتوولتائیک ۳
۱-۴-سیستم فتوولتائیک و مزایای استفاده از آن ۵
۱-۵-طبقه‌بندی سیستم‌های فتوولتائیک از لحاظ کاربری ۷
۱-۵-۱-سیستم‌های فتوولتائیک منفصل از شبکه برق یا OFF GRID ۸
۱-۵-۲-سیستم‌های فتوولتائیک متصل به شبکه برق یا ON GRID ۹
۱-۶-اجزای سیستم‌های فتوولتائیک ۱۱
۱-۷-تأثیرات فرهنگی، اجتماعی و زیست‌محیطی استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک ۱۴
۱-۷-۱-تأثیرات زیست محیطی استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک ۱۵
۱-۷-۲-انرژی تجدیدپذیر و توسعه پایدار اجتماعی ۱۶
۱-۷-۳-سیستم‌های فتوولتائیک و توسعه اجتماعی و اقتصادی مناطق محروم ۱۶
۱-۷-۴-انرژی خورشیدی و امنیت انرژی ۱۷
۱-۷-۵-انرژی خورشیدی و اقتصاد خانواده ۱۷
۱-۷-۶-نقش انرژی خورشیدی در زیست‌پذیر کردن شهرها ۱۷
۱-۷-۷-انرژی خورشیدی و تحولات جمعیتی ۱۸
۱-۷-۸-انرژی خورشیدی و اشتغال‌زایی ۱۸
۱-۷-۹-انرژی خورشیدی و کاهش معضلات اجتماعی ۱۸
۲-ساختار و مبانی نیروگاه‌های خورشیدی ۲۱
۲-۱-مقدمه ۲۱
۲-۲-کلیات نیروگاه‌های فتوولتائیک ۲۲
۲-۲-۱-سلول‌های فتوولتائیک ۲۴
۲-۲-۲-ماژول‌های فتوولتائیک ۳۴
۲-۲-۳-آرایه‌های فتوولتائیک ۳۸

۲-۲-۴-فرآیند ساخت سلول‌ها و ماژول‌های فتوولتائیک ۳۹
۲-۲-۴-۱-انواع سیلیکون ۳۹
۲-۲-۵-بررسی خط تولید سلول فتوولتائیک ۴۲
۲-۲-۵-۱-مواد اولیه ۴۳
۲-۲-۵-۲-ساخت شمش سیلیکونی ۴۵
۲-۲-۵-۳-برش شمش‌ها و ساخت آجرهای سیلیکونی ۴۷
۲-۲-۵-۴- برش آجرها و ساخت ویفر سیلیکونی ۴۸
۲-۲-۵-۵-منسوج کردن ویفرها ۵۰
۲-۲-۵-۶-تشکیل لایه امیتر ۵۲
۲-۲-۵-۷-ایزولاسیون لبه‌ها ۵۴
۲-۲-۵-۸-پوشش ضد بازتاب ۵۵
۲-۲-۵-۹-چاپ اتصالات بر روی سطح جلویی سلول ۵۷
۲-۲-۵-۱۰-چاپ اتصالات در سطح پشتی سلول ۵۸
۲-۲-۵-۱۱-تست و بررسی سلولها ۶۰
۲-۲-۵-۱۲-دستگاه برش لیزری ۶۱
۲-۲-۶-بررسی نحوه تولید ماژول فتوولتائیک ۶۱
۲-۲-۶-۱-ساختار ماژول فتوولتائیک ۶۲
۲-۲-۶-۲-اجزا تشکیل‌دهنده ماژول ۶۲
۲-۲-۶-۳-تراکم چینش ۶۷
۲-۲-۶-۴-مراحل ساخت ماژول خورشیدی ۶۸
۲-۲-۷-اینورترها ۷۳
۲-۲-۷-۱-اینورترهای با و بدون ترانسفورماتور ۷۶
۲-۲-۷-۲-میکرواینورترها ۷۷
۲-۲-۷-۳-اینورترهای رشته‌ای ۷۸
۲-۲-۷-۴-اینورترهای مرکزی ۷۹
۲-۲-۷-۵-کنترل توان راکتیو ۸۰
۲-۲-۷-۶-سیستم‌های حفاظت ۸۲

۲-۲-۸-ترانسفورماتور توزیع ۸۲
۲-۲-۹-ترانسفورماتورهای پست ۸۳
۲-۲-۱۰-کابل‌کشی ۸۴
۲-۲-۱۰-۱-کابل‌های مسی و آلومینیومی ۸۶
۲-۲-۱۱-تجهیزات حفاظت الکتریکی ۸۶
۲-۲-۱۱-۱-تجهیزات حفاظت اضافه جریان ۸۷
۲-۲-۱۱-۲-تجهیزات قطع مدار ۸۷
۲-۲-۱۱-۳-سیستم حفاظت زمین ۸۷
۲-۲-۱۱-۴-حافظت در برابر صاعقه ۸۸
۲-۲-۱۲-جعبه‌تقسیم/ جمع‌کننده (تابلو برق) ۸۸
۲-۲-۱۳-اندازه‌گیری ۸۸
۲-۲-۱۴-پایش سیستم ۹۰
۲-۲-۱۵-کیفیت اجزا نیروگاه خورشیدی ۹۱
۲-۲-۱۵-۱-آزمایش محصول ۹۱
۲-۲-۱۵-۲-گواهی‌ها و علائم ایمنی ۹۲
۲-۲-۱۵-۳-معیارهای طراحی سیستم فتوولتائیک ۹۳
۳-مبانی طراحی نیروگاه‌های خورشیدی ۹۷
۳-۱-مقدمه ۹۷
۳-۲-جانمایی و سایه‌اندازی ۹۸
۳-۲-۱-جانمایی کلی ۹۹
۳-۲-۲-زاویه نسبت به سطح افق ۹۹
۳-۳-پیکربندی ماژول فتوولتائیک ۱۰۰
۳-۴-فاصله بین ردیف‌ها ۱۰۰
۳-۵-جهت نصب ۱۰۲
۳-۶-انتخاب تکنولوژی تجهیزات نیروگاه فتوولتائیک ۱۰۲
۳-۶-۱-ماژول‌ها ۱۰۲
۳-۶-۱-۱-معیارهای کیفیت ماژول‌ها ۱۰۵

۳-۶-۲-اینورترها ۱۰۷
۳-۶-۲-۱-استفاده از اینورترها در قالب کانتینر ۱۱۰
۳-۶-۲-۲-معیارهای کیفیت اینورترها ۱۱۰
۳-۶-۳-ترانسفورماتور ۱۱۲
۳-۶-۳-۱-معیارهای کیفیت ترانسفورماتورها ۱۱۳
۳-۶-۴-سازه‌های نصب ۱۱۶
۳-۶-۴-۱-معیارهای کیفیت سازه‌های نصب ۱۱۶
۳-۷-طراحی الکتریکی ۱۱۷
۳-۷-۱-سیستم DC ۱۱۷
۳-۷-۱-۱-طراحی آرایه فتوولتائیک ۱۱۹
۳-۷-۱-۲-سایزینگ اینورتر ۱۲۰
۳-۷-۱-۳-سایزینگ و انتخاب کابل ۱۲۲
۳-۷-۱-۴-کامباینر باکس ۱۲۳
۳-۷-۱-۵-کنتاکتورها ۱۲۴
۳-۷-۱-۶-فیوزها یا MCBهای استرینگ ۱۲۵
۳-۷-۱-۷-کلیدزنی DC ۱۲۶
۳-۷-۱-۸-معیارهای کیفیت سیستم‌های DC ۱۲۷
۳-۷-۲-سیستم AC ۱۲۸
۳-۷-۲-۱-کابلکشی AC ۱۲۸
۳-۷-۲-۲-سوئیچگیر AC ۱۲۹
۳-۷-۲-۳-سایزینگ و انتخاب ترانسفورماتور ۱۲۹
۳-۷-۲-۴-پست نیروگاه ۱۳۲
۳-۷-۲-۵-حفاظت زمین و صاعقه ۱۳۲
۳-۷-۲-۶-اتصال به شبکه ۱۳۴
۳-۷-۲-۷-معیارهای کیفیت سیستمهای AC ۱۳۶
۳-۷-۲-۸-ساختمان‌های سایت ۱۳۷
۳-۷-۲-۹-امنیت سایت ۱۳۸

۳-۷-۲-۱۰-پایش نیروگاه ۱۴۱
۳-۷-۲-۱۱-بهینه‌سازی طراحی سیستم ۱۴۴
۳-۷-۲-۱۲-الزامات مدارک طراحی ۱۴۶
۴-مطالعات ژئوتکنیک، بستر سازی، فونداسیون و سازه نگهدارنده تأسیسات ۱۴۹
۴-۱-مقدمه ۱۴۹
۴-۲-مکان‌یابی بهینه احداث نیروگاه خورشیدی ۱۴۹
۴-۲-۱-توپوگرافی ۱۵۰
۴-۲-۱-۱-میزان مساحت زمین برای احداث نیروگاه خورشیدی ۱۵۰
۴-۲-۱-۲-تأثیر شیب زمین در احداث نیروگاه خورشیدی ۱۵۱
۴-۲-۱-۳-جهت شیب زمین در احداث نیروگاه خورشیدی ۱۵۱
۴-۲-۱-۴-ارتفاع زمین از سطح دریا ۱۵۱
۴-۲-۱-۵-گسل‌ها ۱۵۲
۴-۲-۲-اقلیم ۱۵۲
۴-۲-۲-۱-دمای محل احداث نیروگاه خورشیدی ۱۵۲
۴-۲-۲-۲-تابش محل احداث نیروگاه خورشیدی ۱۵۲
۴-۲-۲-۳-ساعات آفتابی محل احداث نیروگاه خورشیدی ۱۵۲
۴-۲-۲-۴-رطوبت زمین محل احداث نیروگاه خورشیدی ۱۵۳
۴-۲-۲-۵-گرد و غبار محل احداث نیروگاه خورشیدی ۱۵۳
۴-۲-۲-۶-میزان بارش در محل احداث نیروگاه خورشیدی ۱۵۳
۴-۲-۳-محیط زیست ۱۵۴
۴-۲-۳-۱-کاربری اراضی ۱۵۴
۴-۲-۳-۲-رودخانه‌ها و دریاچه‌ها ۱۵۴
۴-۲-۴-محیط انسانی ۱۵۴
۴-۲-۴-۱-جاده ارتباطی ۱۵۴
۴-۲-۴-۲-مناطق روستایی و شهری ۱۵۵
۴-۲-۴-۳-فاصله از خطوط انتقال نیرو ۱۵۵
۴-۲-۴-۴-فاصله از مناطق نظامی و امنیتی ۱۵۵

۴-۳-مطالعات ژئوتکنیک و هیدرولوژی ۱۵۵
۴-۳-۱-تعداد و عمق گمانه‌ها ۱۵۸
۴-۳-۲-گزارش مطالعات ژئوتکنیک ۱۵۹
۴-۳-۳-معیارهای انتخاب نوع شمع ۱۶۰
۴-۳-۴-شمع‌های کوبشی ۱۶۰
۴-۳-۴-۱-نکات اجرایی شمع‌های کوبشی ۱۶۰
۴-۳-۴-۲-شمع‌های فولادی ۱۶۳
۴-۳-۴-۳-نوع مصالح ۱۶۳
۴-۳-۴-۲-۱-ملاحظات جابجایی و انبار کردن شمع‌ها ۱۶۴
۴-۳-۴-۲-۲-کوبش شمع‌های فولادی ۱۶۴
۴-۳-۴-۲-۳-شمع‌های بیرون زده ۱۶۶
۴-۳-۴-۲-۴-مستندسازی عملیات کوبش از آغاز تا توقف ۱۶۶
۴-۳-۵-آزمایش‌های شمع ۱۶۶
۴-۳-۵-۱-آزمایش بارگذاری دینامیکی ۱۶۷
۴-۳-۵-۲-آزمایش بارگذاری استاتیکی ۱۶۹
۴-۴-استراکچرهای خورشیدی ۱۶۹
۴-۴-۱-انواع استراکچر (سازه) خورشیدی ۱۷۰
۴-۴-۱-۱-استراکچرهای ثابت ۱۷۰
۴-۴-۱-۱-۱-استراکچر سقفی ۱۷۱
۴-۴-۱-۲-استراکچرهای متغیر ۱۷۱
۴-۴-۱-۲-۱-استراکچرهای دو فصل ۱۷۱
۴-۴-۱-۲-۲-استراکچرهای چهار فصل ۱۷۲
۴-۴-۱-۳-استراکچرهای دنبال کننده خورشید ۱۷۲
۴-۴-۱-۳-۱-استراکچرهای دنبال کننده خورشید تک محوره ۱۷۲
۴-۴-۱-۳-۲-استراکچرهای دنبال کننده خورشید دو محوره ۱۷۳
۴-۴-۲-روشهای اتصال سازه‌های خورشیدی به زمین ۱۷۵
۴-۴-۲-۱-استفاده از وزنه یا بلوک بتنی پیش ساخته جهت سنگین کردن سازه ۱۷۶

۴-۴-۲-۲-استفاده از روش بتن در جا و قرار دادن پایه سازه در بتن ۱۷۶
۴-۴-۲-۳-استفاده از روش کوبیدن پایه سازه در زمین با ماشین پایه‌کوب ۱۷۷
۴-۴-۳-مشخصات فنی عمومی استراکچرهای خورشیدی مطابق با دستورالعمل ساتبا ۱۷۸
۴-۴-۳-۱-محاسبات ۱۷۹
۴-۴-۳-۲-تولید مقاطع سازه ۱۸۲
۴-۴-۳-۳-نصب ۱۸۳
۵-بررسی اقتصادی نیروگاه‌های خورشیدی ۱۸۵
۵-۱-مقدمه ۱۸۵
۵-۲-هزینه‌های احداث نیروگاه‌های خورشیدی ۱۸۶
۵-۲-۱-هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه ۱۸۷
۵-۲-۱-۱-هزینه مطالعات امکان سنجی، اخذ مجوزات و طراحی و نظارت ۱۸۷
۵-۲-۱-۲-هزینه خرید تجهیزات ۱۸۷
۵-۲-۱-۲-۱-هزینه ماژول فتوولتائیک ۱۸۸
۵-۲-۱-۲-۲-هزینه اینورتر خورشیدی ۱۹۲
۵-۲-۱-۳-هزینه نصب و راه‌اندازی ۱۹۵
۵-۲-۱-۴-هزینه‌های جانبی ۱۹۶
۵-۲-۱-۴-۱-هزینه‌های افزایش دیماند ۱۹۶
۵-۲-۱-۴-۲-هزینه‌های زیرسازی و تسطیح نیروگاه ۱۹۶
۵-۲-۱-۴-۳-هزینه‌های اتصال به شبکه نیروگاه خورشیدی ۱۹۷
۵-۲-۱-۴-۴-هزینه تابلو وسیمکارت ۱۹۸
۵-۲-۱-۴-۵-هزینه‌های مانیتورینگ نیروگاه خورشیدی ۱۹۸
۵-۲-۱-۴-۶-هزینه سیستم حفاظت از صاعقه نیروگاه خورشیدی ۱۹۹
۵-۲-۱-۴-۷-هزینه‌های پیاده‌سازی شبکه ارت (زمین) نیروگاه خورشیدی ۲۰۰
۵-۲-۱-۴-۸-هزینه‌های حمل و نقل تجهیزات نیروگاه خورشیدی ۲۰۱
۵-۲-۱-۴-۹-مالیات بر ارزش افزوده در فاکتور احداث نیروگاه خورشیدی ۲۰۲
۵-۲-۱-۴-۱۰-هزینه‌های تعمیر، نگهداری و بهره‌برداری ۲۰۲
۵-۳-فرمول محاسبه مبلغ درآمد ماهانه نیروگاه خورشیدی ۲۰۳

۵-۳-۱-انرژی تولیدی نیروگاه خورشیدی ۲۰۳
۵-۳-۲-نرخ خرید تضمینی برق (تعرفه پایه مصوب وزیر نیرو) ۲۰۴
۵-۳-۳-نرخ خدمات انتقال ۲۰۴
۵-۳-۴-نرخ تعدیل (تورم) ۲۰۴
۵-۳-۵-ضریب ساخت داخل(ضریب بومی‌سازی) ۲۰۵
۵-۳-۶-ضریب همزمانی (ضریب بهای آمادگی ساعتی) ۲۰۶
۵-۳-۷-ضریب سالانه ۲۰۶
۵-۴-پارامترهای تاثیرگذار در آنالیز اقتصادی نیروگاه‌های خورشیدی ۲۰۶
۵-۴-۱-جریان نقدینگی ۲۰۷
۵-۴-۲-جریان نقدی تنزیل شده ۲۰۷
۵-۴-۳-نرخ تنزیل ۲۰۷
۵-۴-۴-معیار ارزش خالص فعلی ۲۰۸
۵-۴-۵-نسبت منفعت- هزینه ۲۰۹
۵-۴-۶-معیار نرخ بازده داخلی ۲۰۹
۵-۴-۷-معیار دوره بازگشت خالص سرمایه ۲۱۰
۵-۴-۸-معیار هزینه‌ی تراز شده انرژی ۲۱۰
۶-مدل سازی و مطالعات نیروگاه‌های فتوولتائیک با نرم افزار PVSYST ۲۱۱
۶-۱-مقدمه ۲۱۱
۷-قوانین و و مقررات احداث نیروگاه خورشیدی در ایران ۲۷۹
۷-۱-مقدمه ۲۷۹
۷-۲-پتانسیل انرژی خورشیدی در ایران ۲۸۰
۷-۳-استقبال از نیروگاه‌های خورشیدی در ایران ۲۸۱
۷-۴-قوانین سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا) در احداث نیروگاه‌های خورشیدی ۲۸۲
۷-۴-۱-مراحل احداث نیروگاه‌های خورشیدی از ثبت‌نام تا بهره‌برداری ۲۸۴
۷-۴-۱-۱-مرحله اول: ثبت‌نام و صدور پروانه احداث ۲۸۶
۷-۴-۱-۲-مرحله دوم: اخذ مجوزها و عقد قرارداد ۲۸۸
۷-۴-۱-۲-۱-شرایط درخواست قرارداد خرید تضمینی برق ۲۸۸

۷-۴-۱-۲-۲-مدارک موردنیاز برای انعقاد قرارداد خرید تضمینی برق تجدیدپذیر ۲۸۹
۷-۴-۱-۳-مرحله سوم: دوره پیشبرد و احداث نیروگاه (پس از عقد قرارداد) ۲۹۶
۷-۴-۱-۴-مرحله چهارم: دوره بهره‌برداری..... ۲۹۸
۷-۵-استانداردهای ملی و بین‌المللی مورد استفاده برای نیروگاه‌های خورشیدی..... ۳۰۱
۷-۶-ضرورت ایجاد انگیزه برای توسعه انرژی خورشیدی..... ۳۲۹
۸-نیروگاه خورشیدی شرکت مهندسی طرح و پالایش در عسلویه ۳۳۹
۹-واژه نامه انگلیسی - فارسی..... ۳۴۵
۱۰-مراجع ۳۵۷

فهرست اشکال

شکل ۱-۱ نمای کلی از سیستم فتوولتائیک منفصل از شبکه برق یا Off Grid ۹
شکل ۱-۲ نمای کلی از سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه برق یا On Grid ۱۰
شکل ۱-۳ نمای کلی از سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه برق دارای سیستم ذخیره ساز ۱۱
شکل ۲-۱ نمایی کلی از یک نیروگاه فتوولتائیک ۲۲
شکل ۲-۲ انواع سلولهای فتوولتائیک ۲۴
شکل ۲-۳ ساختار کریستالی سیلیکون و پیوند کووالانسی بین اتم‌های آن ۲۵
کل ۲-۴ الکترون آزاد و حفره در ساختار سیلیکون خالص ۲۶
شکل ۲-۵ ناخالصی های نوع N و نوع P ۲۷
شکل ۲-۶ اتصال لایه های نوع N و نوع P و تشکیل پیوند P-N ۲۷
شکل ۲-۷ تشکیل ناحیه تخلیه و ایجاد میدان الکتریکی ۲۸
شکل ۲-۸ تابش نور خورشید، شکستن پیوند در ناحیه خلأ و تأثیر میدان بر الکترون و حفره آزاد شده ۲۸
شکل ۲-۹ بستن مدار برای جاری شدن جریان ۲۹
شکل ۲-۱۰ مشخصه های جریان- ولتاژ سلول فتوولتائیک تحت تابش های مختلف ۳۰
شکل ۲-۱۱ زاویه تابش نور خورشید با خط عمود برای محاسبه AM ۳۱
شکل ۲-۱۲ منحنی های توان بر حسب ولتاژ برای یک نمونه سلول فتوولتائیک در چهار سطح تابش مختلف ۳۲
شکل ۲-۱۳ وابستگی نمودار توان بر حسب ولتاژ به دما برای یک نمونه سلول فتوولتائیک ۳۳
شکل ۲-۱۴ الف) مدار معادل یک سلول فتوولتائیک ایدهآل. ب) مدار معادل یک سلول فتوولتائیک با در نظر گرفتن مقاومتهای سری و موازی ۳۴
شکل ۲-۱۵ استفاده از دیود بایپس برای محافظت از سلول سایه دار. الف) ماژول بدون دیود بایپس. ۳۵
شکل ۲-۱۶ تعیین منحنی مشخصه I-V برای سلولهای سری ۳۷
شکل ۲-۱۷ سلول، ماژول و آرایه فتوولتائیک ۳۸
شکل ۲-۱۸ ساختار سیلیکون تک کریستالی ۳۹
شکل ۲-۱۹ فرآیند تشکیل سیلیکون تک کریستالی ۴۰
شکل ۲-۲۰ شمش مولتی کریستال ۴۱
شکل ۲-۲۱ الف) ساختار مولکولی سیلیکون چند کریستالی. ب) سلول فتوولتائیک چند کریستالی ۴۱

شکل ۲–۲۲ الف) ساختار مولکولی سیلیکون آمورف. ب) سلول فتوولتائیک سیلیکونی آمورف ۴۲
شکل ۲–۲۳ پسماندهای صنایع مبتنی بر تولید تجهیزات نیمه هادی ۴۴
شکل ۲–۲۴ استفاده از سلولهای بازیافتی به عنوان مواد اولیه ۴۴
شکل ۲–۲۵ قالب مورد استفاده برای ساخت شمش سیلیکون ۴۵
شکل ۲–۲۶ کوره هایی که شمشهای سیلیکونی در آنها تشکیل میشود ۴۶
شکل۲–۲۷ بارگذاری یک قالب شمش سیلیکونی در کوره ۴۶
شکل ۲–۲۸ یک شمش آماده خروج از کوره ۴۷
شکل ۲–۲۹ برش شمش بزرگ سیلیکونی بهصورت آجرهایی با ابعاد کوچکتر ۴۷
شکل ۲–۳۰ آجرهای آماده شده از برش شمشهای سیلیکونی ۴۸
شکل ۲–۳۱ یک دستگاه اره سیمی بزرگ ۴۸
شکل ۲–۳۲ نمای نزدیک از اره سیمی ۴۹
شکل ۲–۳۳ نمایی از اره سیمی به همراه آجرهای بارگذاری شده و آماده برش ۴۹
شکل ۲–۳۴ قرارگیری ویفرها در محفظه های مخصوص ۵۰
شکل ۲–۳۵ محفظه های آماده ورود به محلول ۵۱
شکل ۲–۳۶ ویفرهای قرار گرفته در محلول به منظور منسوج شدن ۵۱
شکل ۲–۳۷ قرارگیری ویفرها در یک دستگاه سانتریفیوژ به منظور خشک شدن ۵۲
شکل ۲–۳۸ ورود سلولها به کوره ۵۲
شکل ۲–۳۹ خروج سلولها از کوره ۵۳
شکل ۲–۴۰ قرارگیری سلولها در محلول به منظور پاکسازی ۵۳
شکل ۲–۴۱ آماده سازی سلولها جهت قرارگیری در دستگاه پلاسما ۵۴
شکل ۲–۴۲ دستگاه تراشکاری پلاسما ۵۴
شکل ۲–۴۳ دستگاهی که سلولها در آن در معرض نیترید سیلیسیم قرار میگیرند ۵۵
شکل ۲–۴۴ سلولها پیش از ورود به دستگاه ۵۶
شکل ۲–۴۵ سلولها پس از خروج از دستگاه ۵۶
شکل ۲–۴۶ قرارگیری خمیر نقره بر روی سلولها از طریق شابلون ۵۷
شکل ۲–۴۷ نمای نزدیک از سلول شابلون کاری شده ۵۸

شکل ۲–۴۸ قرارگیری خمیر آلومینیوم بر سطح پشتی سلولها از طریق شابلون ۵۸
شکل ۲–۴۹ سلول بلافاصله پس از قرار گرفتن خمیر آلومینیوم در پشت آن ۵۹
شکل ۲–۵۰ خشک شدن خمیر آلومینیوم ۶۰
شکل ۲–۵۱ مرحله تست و دسته بندی نهایی سلولها ۶۰
شکل ۲–۵۲ دستگاه برش لیزری ۶۱
شکل ۲–۵۳ نوارهای متصل به سلول برای تشکیل استرینگ ۶۱
شکل ۲–۵۴ لایه های ماژول فتوولتائیک ۶۳
شکل ۲–۵۵ چسب EVA بصورت ورقه های نازک در بازار ارائه میشود که بین سلولهای خورشیدی و سطح بالایی و زیرین پهن میشود ۶۴
شکل ۲–۵۶ یک ورقه پلیمر نازک معمولاً از جنس Tedlar بعنوان سطح زیرین استفاده میشود ۶۵
شکل ۲–۵۷ قاب ماژولهای فتوولتائیک ۶۶
شکل۲–۵۸ ریبون ۶۶
شکل ۲–۵۹ جعبه تقسیم ۶۷
شکل ۲–۶۰ تراکم چینش در شکلهای مختلف سلول ۶۸
شکل ۲–۶۱ آماده سازی شیشه و اولین لایه از چسب EVA ۶۹
شکل ۲–۶۲ تشکیل استرینگ ۶۹
شکل ۲–۶۳ چینش سلولها در کنار یکدیگر برای تشکیل ماژول ۷۰
شکل ۲–۶۴ اتصال استرینگها به یکدیگر ۷۰
شکل ۲–۶۵ قرارگیری لایه دوم چسب EVA و صفحه پشتی ماژول ۷۰
شکل ۲–۶۶ بازرسی ماژولها با استفاده از پدید الکترونورتاب ۷۱
شکل ۲–۶۷ قرارگیری در دستگاه لمینت جهت اتصال لایه ها به یکدیگر ۷۱
شکل ۲–۶۸ قابگذاری ماژولهای فتوولتائیک ۷۲
شکل ۲–۶۹ نصب جعبه تقسیم ۷۲
شکل ۲–۷۰ تست IV ماژولها با استفاده از شبیه ساز خورشیدی ۷۳
شکل ۲–۷۱ میکرو اینورتر برند Enphase ۷۷

شکل ۲-۷۲ الف) اینوتر تک فاز SMA مدل 11000TL. ب) در این نیروگاه ۶ مگاواتی در تایلند از ۵۴۰ اینورتر رشته‌ای استفاده شده است. ۷۹
شکل ۲-۷۳ الف) اینورتر مرکزی Sunny مدل 500CP XT/630C*P*. ب) نیروگاه ۲۷/۵ مگاواتی در آلمان که در آن از ۱ اینورتر 500CP XT، ۴ اینورتر 630CP XT، ۱۸ اینورتر 760CP XT و ۸ اینورتر 800CP XT استفاده شده است ۸۰
شکل ۲-۷۴ ساختار اصلی یک ترانس توزیع سه فاز. بخش سمت راست، بخش فشار ضعیف و بخش سمت چپ، بخش فشار قوی می‌باشد ۸۳
شکل ۲-۷۵ ترانسفورماتور پست به همراه تجهیزات کلیدزنی و حفاظتی ۸۴
شکل ۲-۷۶ کامباینر باکس استرینگ ۸۹
شکل ۲-۷۷ عملکردهای سیستم SCADA در یک نیروگاه خورشیدی ۹۰
شکل ۳-۱ دیاگرام زوایای سایه اندازی ۱۰۱
شکل ۳-۲ دیاگرام تک خطی یک سیستم AC با سطوح ولتاژ عملکردی معمول ۱۳۰
شکل ۳-۳ شماتیک سیستم پایش نیروگاه فتوولتائیک ۱۴۳
شکل ۴-۱ تست خاک نیروگاه خورشیدی ۱۵۶
شکل ۴-۲ تصویر شماتیک شمع و تجهیزات کوبش ۱۶۱
شکل ۴-۳ استراکچرهای دنبال کننده خورشیدی تک محوره ۱۷۲
شکل ۴-۴ استراکچرهای دنبال کننده خورشیدی دو محوره ۱۷۳
شکل ۴-۵ زنگ زدگی و فرسودگی اتصالات پیچ و مهره سازه ها به دلیل استفاده از استیل نامرغوب ۱۷۵
شکل ۴-۶ استفاده از وزنه یا بلوک سیمانی به جهت سنگین کردن سازه ۱۷۶
شکل ۴-۷ استفاده از روش بتن در جا و قرار دادن پایه سازه در بتن ۱۷۷
شکل ۴-۸ استفاده از رول بولت جهت اتصال کوبشی به فونداسیون ۱۷۷
شکل ۴-۹ استفاده از روش کوبیدن پایه سازه در زمین با ماشین پایه کوب ۱۷۸
شکل ۵-۱ طرحوارهای از سهم هزینه بخشهای مختلف سیستم فتوولتائیک ۱۸۸
شکل ۵-۲ معرفی شماری از تولیدکنندگان برتر ماژول خورشیدی ۱۹۲
شکل ۵-۳ معیارهای انتخاب اینورتر در نیروگاههای خورشیدی ۱۹۳
شکل ۵-۴ نصب ماژولهای فتوولتائیک در یک نیروگاه خورشیدی ۱۹۶
شکل ۵-۵ زیرسازی و تسطیح زمین جهت احداث نیروگاه خورشیدی ۱۹۷

شکل ۵-۶ اتصال به شبکه به عنوان یکی از مهمترین بخشهای احداث یک نیروگاه خورشیدی ۱۹۸
شکل ۵-۷ مانیتورینگ پارامترهای مختلف یک نیروگاه خورشیدی ۱۹۹
شکل ۵-۸ جایگاه سیستم مانیتورینگ در شماتیک یک نیروگاه خورشیدی ۱۹۹
شکل ۵-۹ برخورد صاعقه به عنوان یکی از مخاطرات جدی در سیستمهای فتوولتائیک ۲۰۰
شکل ۵-۱۰ سیستم اتصال به زمین در یک نیروگاه خورشیدی ۲۰۱
شکل ۵-۱۱ اجرای سیستم اتصال به زمین یک نیروگاه خورشیدی ۲۰۱
شکل ۵-۱۲ نظافت دورهای ماژولهای فتوولتائیک یک نیروگاه خورشیدی ۲۰۳
شکل۷-۱ اطلس خورشیدی کشور ایران (سایت Solargis.com) ۲۸۱
شکل ۷-۲ فلوچارت روند اجرایی سرمایهگذاری احداث نیروگاه تجدیدپذیر و پاک ۲۸۵
شکل ۷-۳ نمونه پروانه احداث نیروگاه تجدیدپذیر و پاک ۲۸۸
شکل ۷-۴ نمونه ای از نمای موقعیت سایت در استان و نسبت به مرکز استان، شهرستانهای نزدیک و راههای در دسترس .۲۹۲
شکل۷-۵ نمونه ای از نمای موقعیت سایت نسبت به نزدیکترین شهر ۲۹۳
شکل ۷-۶ نمونه ای از نمای نزدیک سایت ۲۹۳
شکل۷-۷ نمونه ای از سایت پلان نیروگاه ۲۹۴
شکل۷-۸ نمونه یکی از صفحات گزارش نرمافزار شبیه سازی تابش سنجی PVsyst ۲۹۵
شکل۷-۹ فلوچارت فرآیند اجرایی خرید تضمینی برق از نیروگاههای تجدیدپذیر بزرگ ۳۰۰

فهرست جداول

جدول ۲-۱ خلاصه‌ای از پارامترهای عملکردی انواع اینورترها ۷۵
جدول ۲-۲ مقایسه مشخصات کنترل توان برای مدلهای مختلفی از اینورتر ۸۱
جدول ۳-۱ معیارهای انتخاب ماژول فتوولتائیک ۱۰۳
جدول ۳-۲ مشخصات فنی یک ماژول فتوولتائیک در شرایط STC ۱۰۶
جدول ۳-۳ معیارهای انتخاب اینورتر ۱۰۷
جدول ۳-۴ اطلاعات برگه مشخصات فنی اینورتر ۱۱۱
جدول ۳-۵ مشخصات ترانسفورماتور ۱۱۴
جدول ۳-۶ تعریف IPهای مختلف ۱۲۴
جدول ۳-۷ تعداد پیرانومترهای توصیه شده با توجه به ظرفیت نیروگاه ۱۴۴
جدول ۳-۸ استراتژی‌های بهینه سازی عملکرد ۱۴۵
جدول ۳-۹ الزامات مربوط به دیاگرام سیم‌کشی ۱۴۷
جدول ۴-۱ مشخصات سازه نگهدارنده ۱۷۹
جدول ۴-۲ مشخصات مقاطع فولادی ۱۸۲
جدول ۵-۱ مدل و برند شماری از ماژولهای فتوولتائیک با بیشترین بازدهی در سال ۲۰۲۱ ..... ۱۹۰
جدول ۵-۲ چند نمونه از پرکاربردترین برندهای اینورترهای خورشیدی ۱۹۴

پیش‌گفتار

نقش بی‌بدیل تولید و استفاده از منابع انرژی بعنوان یکی از اصلی ترین مؤلفه های توسعه یافتگی بر کسی پوشیده نیست. کشور ما هم از این قاعده مستثنی نبوده بطوریکه بخش عمده‌ای از پیشرفت و توسعه ایران طی صده گذشته، با همه تبعات زیان‌بار ناشی از آن، مرهون استفاده وسیع و بعضاً خارج از قاعده از منابع با ارزش هیدروکربوری ممکلت بعنوان انرژی بوده است.

بدیهی است ادامه استفاده بی‌رویه از منابع باقیمانده هیدروکربوری کشور بعنوان انرژی، نه تنها تاریخ پایان محتوم منابع مذکور را که می‌تواند برای سالیان متمادی در جهات با ارزش دیگری مورد استفاده قرار گیرند تسریع می‌نماید که تخریب روز افزون و عمدتاً غیرقابل جبران محیط زیست را نیز به همراه خواهد داشت.

در همین ارتباط به نظر می‌رسد به منظور حفظ جایگاه رفیع ایران در تولید انرژی و پیشگیری از مخاطرات آتی و رهائی از تمام مشکلات پیش‌گفته، هیچ چاره دیگری بجز جایگزینی هرچه سریعتر مصارف انرژی هیدروکربوری با انرژی‌های تجدیدپذیر و سازگار با محیط زیست وجود ندارد و لذا تمامی دست اندرکاران و مسئولین و مدیران و تصمیم سازان و تصمیم‌گیران عالی رتبه حوزه انرژی کشور می‌بایست تمامی مساعی و تمهیدات لازم را برای اجرائی شدن این تغییر بنیادی بکار گیرند.

از بین انواع انرژی‌های تجدیدپذیر استفاده از انرژی لایزال خورشید، با توجه به جمیع جوانب فنی و اقتصادی و شرایط اقلیمی ایران، برای کشور ما از اهمیت بیشتری برخوردار است. به همین جهت کتاب حاضر بر پایه مطالعات و تجربیات شرکت مهندسی طرح و پالایش در زمینه انرژی خورشیدی تحت عنوان "مرجع کاربردی طراحی و ساخت نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتائیک" به کوشش گروه برق و الکترونیک و انرژی‌های تجدیدپذیر این شرکت تهیه شده که امید است مورد استفاده علاقه‌مندان قرار گیرد.

فـرامـرز ذوالریـاستیـن

رئیس هیئت مدیره و مدیر عامل شرکت مهندسی طرح و پالایش

مقدمه مولف

خورشید نه تنها خود منبع عظیم انرژی است، بلکه سرآغاز حیات و منشأ تمام انرژی‌های دیگر است. طبق برآوردهای عملی در حدود ۶۰۰۰ میلیون سال از تولد این گوی آتشین می‌گذرد و در هر ثانیه ۴/۲ میلیون تن از جرم خورشید به انرژی تبدیل می‌شود. با توجه به وزن خورشید که حدود ۳۳۳ هزار برابر وزن زمین است. این کره نورانی را می‌توان به عنوان منبع عظیم انرژی تا ۵ میلیارد سال آینده به حساب آورد.

قطر خورشید $۱/۳۹ \times ۱۰^{۶}$ کیلومتر است و حدود ۹۹ ٪ وزن خورشید را گازهای هیدروژن و هلیوم تشکیل داده اند، که حدود ۷۰ ٪ هیدروژن، ۲۹ ٪ هلیوم و یک درصد مابقی، شامل ۶۳ عنصر دیگر که مهم‌ترین آن ها اکسیژن، کربن، نئون و نیتروژن تشکیل داده است.

میزان دما در مرکز خورشید حدود ۱۰ تا ۱۴ میلیون درجه سانتیگراد می‌باشد که از سطح آن با حرارتی نزدیک به ۵۶۰۰ درجه و به صورت امواج الکترومغناطیسی در فضا منتشر می‌شود.

زمین در فاصله ۱۵۰ میلیون کیلومتری خورشید واقع است و ۸ دقیقه و ۱۸ ثانیه طول می‌کشد تا نور خورشید به زمین برسد بنابراین سهم زمین در دریافت انرژی خورشید حدود $\frac{1}{2*10^9}$ از کل انرژی تابشی آن می‌باشد.

جالب است بدانید که سوخت‌های فسیلی ذخیره شده در اعماق زمین، انرژی‌های باد و آبشار و امواج دریاها و بسیاری موارد دیگر از جمله نتایج همین مقدار اندک انرژی دریافتی زمین از خورشید است.

انرژی خورشیدی به‌عنوان یک منبع اساسی از انرژی تجدیدپذیر، نور و گرمای تابشی خورشید بوده که با استفاده از فناوری‌های در حال تکامل مانند گرمایش خورشیدی، فتوولتائیک، انرژی حرارتی خورشیدی، معماری خورشیدی، نیروگاه‌های نمک مذاب و فتوسنتز مصنوعی مهار می‌گردد. در این بین با فناوری فتوولتائیک می‌توان از تابش نور خورشید به‌منظور تولید برق بهره‌برداری نمود.

با توجه به اثرات زیان‌بار سوخت‌های فسیلی که در روند تولید برق به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند بدیهی است که تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی می‌تواند از جنبه‌های گوناگون سبب کاهش آسیب به محیط زیست گردد؛ از این رو احداث نیروگاه خورشیدی با اهمیت بوده و نیز موجب افزایش امنیت انرژی می‌شود.

در کتاب حاضر تلاش شده است تا بصورت جامع و کاربردی و به زبانی ساده به معرفی نیروگاه های خورشیدی فتوولتائیک و شرایط احداث آن پرداخته شود و امید است بتواند در جهت افزایش توان فنی و مهندسی صنعت انرژی های تجدیدپذیر کشورمان مورد استفاده مهندسین و متخصصین این صنعت قرار گیرد.

در پایان از مدیریت محترم شرکت مهندسی طرح و پالایش جناب آقای مهندس فرامرز ذوالریاستین رئیس محترم هیئت مدیره و مدیرعامل به دلیل حمایت های بی دریغ و مساعدت های به عمل آمده قدردانی می‌نماید.

همچنین از کارشناسان محترم بخش های مهندسی برق و انرژی های تجدیدپذیر و مهندسی سازه شرکت طرح و پالایش آقایان مهندسین عباس مجازی، مهدی سلیم بیگی، فردین نوری، حیدر ابراهیمی، پوریا پزش پور و علیرضا روزبهانی و خانم ها مهندسین سمیرا محمدی، سلمی چشمه خاور و ناهید عیوضخانی که در گردآوری و تدوین مطالب همکاری نموده اند، صمیمانه قدردانی می‌گردد.

پویان کردآبادی

مدیر گروه برق، الکترونیک و انرژی های تجدیدپذیر
شرکت مهندسی طرح و پالایش

فصل اول

انرژی خورشیدی و سیستم‌های فتوولتائیک

۱-۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، انرژی‌های تجدیدپذیر و نوین به دلیل مزیت‌های بسیار زیاد از جمله پاک بودن و در دسترس بودن بشدت مورد توجه قرار گرفته‌اند. از سوی دیگر استفاده بی‌رویه از منابع سوخت فسیلی با آلوده ساختن محیط‌زیست حیات را در کره‌ی زمین تهدید می‌کند.

یکی از پاک‌ترین و فراوان‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر در جهان انرژی خورشیدی است که با پیشرفت تکنولوژی بیش از پیش در زندگی روزمره بشر تأثیر گذاشته است و یکی از مهم‌ترین گزینه‌های جایگزین برای سوخت‌های فسیلی به شمار می‌آید. انرژی خورشیدی با توجه به منابع بسیار فراوان مورد توجه ویژه قرار دارد به‌طوری‌که طی سالیان اخیر بیشترین رشد مصرف سالانه در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر متعلق به انرژی خورشیدی می‌باشد.

در این فصل به معرفی کلی انرژی خورشیدی و سیستم‌های فتوولتائیک، انواع این سیستم‌ها از نظر کاربری، معرفی اجزای اصلی آن و همچنین تأثیرات فرهنگی، اجتماعی و زیست‌محیطی استفاده از این سیستم‌ها خواهیم پرداخت.

۱-۲- انرژی خورشیدی

از میان منابع انرژی تجدیدپذیر، خورشید با یک ساعت تابش می‌تواند تقاضای انرژی مورد نیاز تمام ساکنین زمین در طول یک سال را تأمین کند. انرژی خورشیدی همان فوتون‌های انرژی هستند که همراه با پرتوهای خورشیدی به سمت زمین حرکت می‌کنند. فوتون‌ها در مدت زمان ۸ دقیقه و ۱۸ ثانیه فاصله‌ی ۱۵۰ میلیون کیلومتری خورشید تا زمین را طی می‌کنند. به‌طور متوسط خورشید در هر ثانیه $۱/۱\times۱۰^{۲۰}$ کیلووات ساعت انرژی ساطع می‌کند. از کل انرژی منتشرشده توسط خورشید، تنها در حدود ۰/۴۷ آن به سطح زمین می‌رسد. این بدان معنی است که زمین در هر ساعت تابشی در حدود ۶۰ میلیون واحد گرمایی بریتانیایی دریافت می‌کند.

مقدار انرژی که از طریق خورشید به زمین می‌رسد ۱۰۰۰۰ برابر بیش از مقدار انرژی مصرفی توسط جمعیت جهان است. با این حال اگر تنها ۱٪ از سطح زمین با مبدل‌های انرژی خورشیدی با بازدهی ۱۰٪ پوشیده شود انرژی موردنیاز جهان تأمین می‌شود.

بنابراین با به‌کارگیری کلکتورهای خورشیدی می‌توان تا حدودی از این منبع انرژی بی‌پایان، پاک و رایگان استفاده کرد و تا حد زیادی در مصرف سوخت‌های فسیلی صرفه‌جویی نمود.

یکی از کاربردهای مهم انرژی خورشیدی، تبدیل این انرژی بدون بهره‌گیری از مکانیزم‌های متحرک به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم به انرژی الکتریکی است. در روش مستقیم، انرژی خورشید مستقیماً توسط سلول‌های خورشیدی به الکتریسیته تبدیل می‌شود که به آن سیستم فتوولتائیک می‌گویند. اما در روش غیرمستقیم، ابتدا انرژی خورشید به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود و سپس از طریق یک سیکل ترمودینامیکی انرژی حرارتی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌گردد، که به آن سیستم حرارتی-خورشیدی گفته می‌شود.

امروزه سیستم‌های فتوولتائیک یکی از متداول‌ترین و بهترین راه‌های تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی به حساب می‌آیند. در این سیستم با تابش پرتوهای خورشیدی بر ماژول‌های فتوولتائیک، انرژی فوتون‌ها توسط این ماژول‌ها جذب و بخشی از آن به انرژی الکتریکی تبدیل می‌گردد.

۱-۳- تاریخچه سیستم‌های فتوولتائیک

کشف پدیده فتوولتائیک به فیزیکدان فرانسوی الکساندر ادموند بکرل[1] نسبت داده می‌شود که نخستین کسی است که در سال ۱۸۳۹ میلادی این پدیده را کشف نمود. او هنگام آزمایش یک سلول ساخته‌شده از الکترودهای فلزی در محلول رسانا، متوجه شد که با در معرض نور قرار گرفتن این سلول، ولتاژ افزایش یافته و الکتریسیته بیشتری تولید می‌شود.

برای اولین بار در سال ۱۸۷۶ میلادی دو دانشمند دانشگاه کمبریج، ویلیام گریلز آدامز[2] و ریچارد ایوانز دی[3] در مقاله‌ای به انجمن سلطنتی، تغییرات خواص الکتریکی سلنیوم را هنگام قرار گرفتن در مقابل تابش نور خورشید شرح دادند. آن‌ها کشف کردند که وقتی سلنیوم در مقابل نور خورشید قرار می‌گیرد الکتریسیته تولید می‌کند.

هفت سال بعد در سال ۱۸۸۳ میلادی، یک مخترع آمریکایی چارلز فریتس[4] یک سلول خورشیدی سلنیومی ساخت که از برخی جهات شبیه به سلول‌های خورشیدی سیلیکونی امروزی بود. این سلول از یک ویفر نازک سلنیوم تشکیل و با یک توری از سیم‌های خیلی نازک طلا و یک ورق حفاظتی از شیشه پوشانده شده بود. اما سلول ساخته‌شده توسط چارلز فریتس، راندمان اندکی داشت به‌نحوی‌که فقط کمتر از ۱٪ انرژی خورشیدی تابیده‌شده به سطح این سلول به الکتریسیته تبدیل می‌شد.

آلبرت اینشتین[5]، فیزیکدان مشهور آلمانی، از دیگر افرادی است که توجه جهانیان را به انرژی خورشیدی و پتانسیل‌های بالقوه‌اش جلب نمود. وی در سال ۱۹۰۵ میلادی، مقاله‌ای در مورد اثر فتوولتائیک و چگونگی حمل انرژی توسط نور منتشر ساخت که اثری کلیدی در توجه بیشتر برای انرژی خورشیدی را به همراه داشت. وی بابت خدمات ارزشمندش به فیزیک نظری و به‌طور خاص، کشفیات پیرامون اثر فتوولتائیک، جایزه نوبل سال ۱۹۲۱ میلادی را به خود اختصاص داد.

با وجود تلاش‌های مخترعین و دانشمندان فوق، توسعه و تجاری‌سازی دستگاهی که بتواند انرژی خورشید را ذخیره و قابل استفاده کند، تا سال‌های میانی قرن بیستم ممکن نبود. تقریباً صد

1 Alexandre Edmond Becquerel
2 William Grylls Adams
3 Richard Evans Day
4 Charles Fritts
5 Albert Einstein

سال پس از کشف ادموند بکرل و به فاصله کوتاهی از اختراع ترانزیستور، در سال ۱۹۳۹ میلادی، راسل اهل[1]، موفق به ساخت نخستین سلول‌های خورشیدی به معنای مدرن آن گردید.

در سال ۱۹۵۴ میلادی، سه دانشمند آمریکایی دریل ماسکات چپین[2]، کالوین ساوزر فولر[3] و جرالد پیرسون[4] از محققان آزمایشگاه بل، از طراحی راسل اهل استفاده کرده و بدین ترتیب موفق به ساخت اولین سلول فتوولتائیک سیلیکونی با بازده حدود ۶٪ شدند. این سلول قادر بود برق کافی را از طریق خورشید برای تجهیزات الکترونیکی فراهم نماید.

این دستاورد، جهشی بزرگ به سمت سلول‌های خورشیدی نسل کنونی و ماژول‌های مدرن خورشیدی به حساب می‌آمد.

در دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ میلادی، با رشد فناوری‌های فضایی و موفقیت‌های پی در پی بشر، ماژول‌های خورشیدی برای تأمین انرژی بخش‌های مختلف فضاپیماهای غول‌پیکر مورد استفاده قرار گرفت. برای نخستین بار در سال ۱۹۵۸ میلادی در فضاپیما Vanguard I از ماژول‌های خورشیدی استفاده شد که در ادامه و با توجه به موفقیت این پروژه، در فضاپیماهای Vanguard II، Explorer III و همچنین Sputnik-3 نیز از ماژول‌های خورشیدی استفاده شد.

در نهایت ناسا در سال ۱۹۶۴ میلادی، ماهواره Nimbus را راه‌اندازی نمود که از مجموعه ماژول‌های خورشیدی فتوولتائیک ۴۷۰ واتی بهره می‌برد. این پیشرفت‌ها به خوبی پتانسیل‌های انرژی خورشیدی را هویدا ساخت که عملاً سرآغازی برای تجاری‌سازی گسترده ماژول‌های خورشیدی به حساب می‌آمد.

به دلیل بحران نفتی ناشی از تحریم نفتی اوپک در سال ۱۹۷۳ میلادی و در نتیجه افزایش شدید قیمت نفت، ضرورت نوآوری برای تأمین انرژی آشکار شد. با فشارهای اقتصادی فزاینده ناشی از این موضوع، علاقه مردم به تکنولوژی فتوولتائیک برای کاربردهای زمینی در دهه ۱۹۷۰ میلادی افزایش یافت. در آن زمان، تکنولوژی فتوولتائیک از یک تکنولوژی ویژه برای کاربردهای فضایی به یک تکنولوژی قابل استفاده برای کاربردهای زمینی تبدیل گردید.

1 Russell Ohl
2 Daryl Muscott Chapin
3 Calvin Souther Fuller
4 Gerald L. Pearson

در اواخر دهه ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ میلادی، بسیاری از شرکت‌ها و آزمایشگاه‌ها شروع به توسعه سیستم و ماژول‌های فتوولتائیک برای کاربردهای زمینی کردند. در اواسط دهه ۱۹۸۰ میلادی که اولین سلول‌های خورشیدی سیلیکونی کریستالی با بازده بالای ۲۰٪ ساخته شد و همچنین با بالا رفتن قیمت سوخت، نگاه صنعتی به این فناوری نیز شکل جدی‌تری به خود گرفت و زمینه برای توجیه کاربردهای نیروگاهی این فناوری هموار شد. از آن زمان تاکنون، پیشرفتی مستمر در زمینه بهبود عملکرد و کاهش هزینه ماژول‌های خورشیدی به وقوع پیوسته و عملاً بهره‌مندی از خورشید برای تأمین انرژی، در بسیاری از کشورهای جهان به یک روش واقع‌گرایانه و کاملاً عملی مبدل شده است.

۱-۴- سیستم فتوولتائیک و مزایای استفاده از آن

فتوولتائیک یا به اختصار PV[1]، یکی از انواع سامانه‌های تولید برق از انرژی خورشیدی محسوب می‌شود که بر اساس پدیده‌ای تحت عنوان فتوولتائیک کار می‌کند. در این روش با به‌کارگیری سلول‌های خورشیدی، تولید مستقیم الکتریسیته از تابش خورشید امکان‌پذیر می‌شود. سلول‌های خورشیدی از نوع نیمه‌رسانا هستند که از سیلیسیوم یعنی دومین عنصر فراوان پوسته زمین ساخته می‌شوند. هنگامی‌که نور خورشید به یک سلول فتوولتائیک می‌تابد، بین دو الکترود منفی و مثبت اختلاف پتانسیل بروز کرده و این امر موجب جاری شدن جریان بین آن‌ها می‌گردد. سیستم فتوولتائیک دارای مزایای فراوانی است که از جمله می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

- رایگان و تجدیدپذیر بودن:

یکی از مهم‌ترین مزایای سیستم‌های فتوولتائیک، تجدیدپذیر بودن منبع آن است. در این سیستم‌ها برای تولید انرژی فقط به نور خورشید نیاز است که آن هم در هر منطقه‌ای در دسترس می‌باشد. همچنین جهت بهره‌مندی از این منبع، به پرداخت هیچ هزینه‌ای نیاز نیست. هرکجا که خورشید وجود داشته باشد و مسائل فنی و اقتصادی اجازه دهد امکان استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک وجود دارد.

1 Photovoltaic

- هزینه نگهداری و تعمیرات پایین:

اگرچه سیستم‌های فتوولتائیک هزینه نصب اولیه بالایی دارند اما پس از نصب به دلیل عدم وجود اجزای چرخان و مکانیکی و در نتیجه کاهش خرابی‌ها، هزینه نگهداری و تعمیرات به شکل چشمگیری کاهش می‌یابد.

در سیستم‌های مربوط به منابع تجدید ناپذیر، هزینه‌های حمل‌ونقل مواد و نیروی کار بسیار بالا است. اما در مقابل چنین هزینه‌هایی در سیستم‌های فتوولتائیک وجود ندارد و این سیستم‌ها فقط به بازرسی دوره‌ای آن هم با هزینه‌ای اندک نیاز دارند.

- عدم ایجاد آلودگی زیست‌محیطی:

سیستم‌های فتوولتائیک در مرحله بهره‌برداری هیچ‌گونه آلودگی و یا تأثیرات مخربی روی محیط‌زیست نخواهند داشت. اگرچه این سیستم‌ها در فرآیند ساخت، انتقال و نصب مقداری آلودگی تولید می‌کنند، اما میزان آن در برابر آلودگی تولیدشده توسط نیروگاه‌های سوخت فسیلی متداول بسیار کم و از نظر زیست‌محیطی کاملاً قابل قبول است. همچنین این سیستم‌ها در هنگام تولید برق تقریباً هیچ سر و صدا و نویزی تولید نمی‌کنند. به‌طور قطع این تکنولوژی از سایر تکنولوژی‌های سبز مانند توربین‌های بادی بسیار مطلوب‌تر می‌باشد.

- سهولت نصب و اجرا:

برخلاف نیروگاه‌های فسیلی که طراحی و اجرای پیچیده و زمان‌بری دارند، سیستم‌های فتوولتائیک به‌سرعت قابل طراحی و اجرا هستند.

- قابلیت احداث پراکنده:

یکی از مزایای سیستم‌های فتوولتائیک، قابلیت نصب این سیستم‌ها به‌صورت پراکنده و نزدیک به محل مصرف می‌باشد.

- قابلیت نصب و راه‌اندازی سیستم‌های فتوولتائیک در ظرفیت‌های گوناگون:

با توجه به وجود ماژول‌های پیش‌ساخته، در سیستم‌های فتوولتائیک می‌توان الکتریسیته را در مقیاس‌های مختلف تولید کرد. چنانچه با استفاده از این سیستم‌ها می‌توان از چند میلی‌وات تا