

Polymer Solar Cells: Components, Production, Applications, and the Market

Ali Akbar Yousefi, Alireza Mohebbi, Samira Fallahdoust Moghadam

Polymer Solar Cell Group, Faculty of Polymer Processing,

Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box 14975-112, Tehran, Iran

Received: 24 October 2017, Accepted: 02 October 2018

Abstract

Human need for energy is an inevitable necessity, which is increasing day by day. The reason for this is the need for technological change and the development of various human societies around the world. There are limited sources of energy available on the earth, while solar energy is abundantly available at the surface of the earth. The polymers normally used in organic solar cells are often made of aromatic heterocycles structures which contain heteroatoms such as oxygen, nitrogen and sulfur. These structures form a resonating network which leads to closing together HUMO and LOMO which results in small energy gaps. Polymers are normally used as donors and other molecules are used as acceptors to conduct electrons towards anode. Activities on different technologies are underway to collect and store solar energy, and some of them have grown well. Polymer solar cells are one of these technological branches, which have many advantages due to their low energy consumption in their production and the rapid roll-to-roll production process. On the other hand, due to the flexibility and lightness of the polymeric solar cells, there are many developing applications for this type of solar cells. Thus, in the near future, by increasing the efficiency and longevity, polymer solar cells grow rapidly and take on dominant positions in areas such as building integrated photovoltaics (BIPVs).

Key Words

solar energy,
polymer solar cell,
conductive polymer,
market,
building integrated photovoltaic
(BIPV)

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: a.yousefi@ippi.ac.ir

بسپارش

فصلنامه علمی-ترویجی

سال هشتم، شماره ۴

صفحه ۶۵-۷۸، ۱۳۹۷

ISSN: 2252-0449

سلول‌های خورشیدی پلیمری: اجزای سازنده، تولید، کاربردها و بازار

علی اکبر یوسفی*، علیرضا محبی، سمیرا فلاحدوست مقدم
تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشکده فرایند هسته، سلول‌های خورشیدی پلیمری،
صندوق پستی ۱۱۲-۱۴۹۷۵

دریافت: ۱۳۹۶/۸/۲، پذیرش: ۱۳۹۷/۷/۱۰

نیاز بشر به انرژی اجتناب‌ناپذیر است که به‌طور روزافزون بیشتر می‌شود. دلیل این نیاز تغییرات فناوری و توسعه جوامع مختلف انسانی در سراسر جهان است. منابع انرژی زمین محدود است، در حالی که انرژی خورشیدی به‌وفور در سطح زمین یافت می‌شود. پلیمرهای به‌کاررفته در سلول‌های خورشیدی آلی اغلب از ساختارهای آروماتیک ناجورحلقه حاوی اتم‌های غیرکربنی مانند اکسیژن، نیتروژن و گوگرد تشکیل شده‌اند. این ساختارها شبکه رزونانسی تشکیل می‌دهند که باعث نزدیکی بالاترین اوربیتال‌های مولکولی اشغال‌شده (HOMO) به پایین‌ترین اوربیتال‌های مولکولی اشغال‌نشده (LUMO) و در نتیجه کوچک‌شدن گاف‌های انرژی می‌شود. به‌طور کلی، پلیمرها به‌عنوان دهنده و سایر مولکول‌ها به‌عنوان گیرنده الکترون استفاده می‌شوند تا الکترون‌ها را به سمت آند هدایت کنند. فعالیت در زمینه فناوری‌های مختلف برای جمع‌آوری و ذخیره انرژی خورشیدی در حال انجام است و برخی فناوری‌ها رشد خوبی داشته‌اند. سلول‌های خورشیدی پلیمری یکی از این شاخه‌های فناوری است که به‌دلیل انرژی‌بری کم طی تولید و فرایند سریع تولید غلتک‌به‌غلطک از مزایای متعددی برخوردار است. از سوی دیگر، به‌دلیل انعطاف‌پذیری و سبکی، سلول‌های خورشیدی پلیمری کاربردهای گسترده و در حال توسعه‌ای یافته‌اند. از این‌رو، در آینده نزدیک با افزایش بازده و طول عمر، این سلول‌ها رشد سریعی داشته و در حوزه‌هایی مانند مواد فوتوولتایی یکپارچه ساختمانی نقش غالب خواهند داشت.

چکیده



علی اکبر یوسفی



علیرضا محبی



سمیرا فلاحدوست مقدم

واژگان کلیدی

انرژی خورشیدی،
سلول خورشیدی پلیمری،
پلیمر رسانا،
بازار،
مواد فوتوولتایی یکپارچه ساختمانی



مقدمه

خورشید منبع اصلی تامین انرژی منظومه خورشیدی است که زمین و تمدن بشری در آن قرار دارد. خورشید بیش از ۴ میلیارد سال سن دارد و به همین مقدار نیز از عمر آن باقی‌مانده است. منظومه خورشیدی از تعدادی سیاره و قمر و یک خورشید تشکیل شده است که خورشید به‌تنهایی ۹۹/۹٪ جرم کل آن را تشکیل می‌دهد. مقدار انرژی که خورشید در یک ثانیه تولید می‌کند، با انرژی برق مصرف فعلی یک میلیون سال بشر در زمین هم‌ارز است. مقدار انرژی که از خورشید در دسترس است با منابع انرژی فسیلی قابل مقایسه نیست (شکل ۱). روش‌های مختلفی برای بهره‌برداری از انرژی خورشید ابداع و به‌کارگرفته شده‌است [۱]:

- سلول‌های خورشیدی فوتوولتایی (photovoltaics, PV): تبدیل انرژی خورشید به ولتاژ DC از راه سلول‌های خورشیدی،
- انرژی خورشیدی متمرکز (concentrating solar power, CSP): متمرکز کردن انرژی خورشید و استفاده از انرژی گرمایی آن برای به حرکت درآوردن توربین و تولید برق و
- سرمایش و گرمایش خورشیدی (solar heating and cooling, SHC): سامانه‌هایی که از انرژی مستقیم خورشید بدون تبدیل آن به برق، برای تولید گرما و سرما استفاده می‌کنند (مانند آبگرمکن خورشیدی). پیامدهای زیست‌محیطی استفاده از انرژی خورشیدی بسیار مفید هستند [۱].

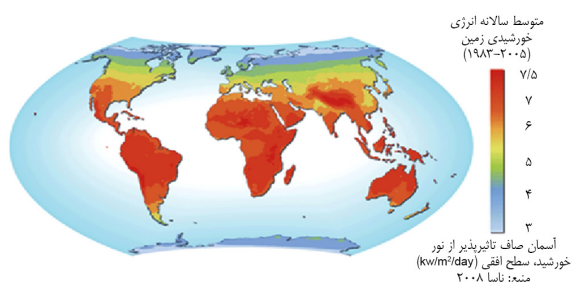
مقدار انرژی تولیدشده در خورشید روزانه معادل $3/1 \times 10^{31}$ erg است (معادل تبدیل $3/46 \times 10^{11}$ ton ماده). طبق محاسبات، زمین 2×10^{-9} از انرژی تولیدشده خورشید را دریافت می‌کند (معادل $1/55 \times 10^{23}$ erg/day). زمین در هر ۲۴ h انرژی ۱۷۳ ton ماده تبدیل‌شده در خورشید را دریافت می‌کند (معادل ۲ kg/s). با

شکل ۲- مقایسه انرژی دریافتی از خورشید با مصرف انرژی سالانه جهان [۲].

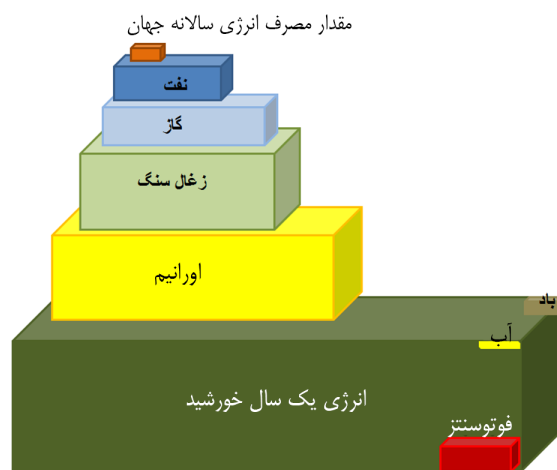
توجه به مساحت کره زمین تقریباً معادل $5/15 \times 10^{14}$ m² و با فرض اینکه همه نقاط زمین به‌طور مساوی از انرژی خورشید بهره‌مند می‌شوند، مقدار انرژی دریافتی هر متر مربع از زمین در روز معادل $3/0 \times 10^7$ erg است (معادل $348/38$ erg/m².s یا $3/9 \times 10^{-15}$ kg/s). در شکل ۲ مقدار انرژی تابشی خورشید که به سطح زمین می‌رسد با مقدار انرژی مصرفی بشر (البته به‌جز انرژی ناشی از غذا) مقایسه شده‌است [۳]. نتیجه‌گیری می‌شود، خورشید ۱۰۰۰ برابر نیاز فعلی بشر به زمین انرژی می‌رساند.

فرض برابری انرژی تابشی دریافتی در سطح زمین فرض درستی نیست و از این نظر نقاط مختلف بسته به موقعیت جغرافیایی متفاوت‌اند. در شکل ۳ شدت انرژی تابشی خورشید در نقاط مختلف سطح کره زمین و در شکل ۴ در ایران نشان داده شده است. در این شکل دیده می‌شود، تابش دریافتی از خورشید حدود ۷۵٪ از خاک کشور بین ۲۲۰ و ۲۴۰ W/m² است. افزون بر این، بیش از ۱۷٪ مساحت کشور ۲۶۰ W/m² و بیش از ۱٪ از آن بیش از ۲۷۰ W/m² از انرژی تابشی را جذب می‌کند.

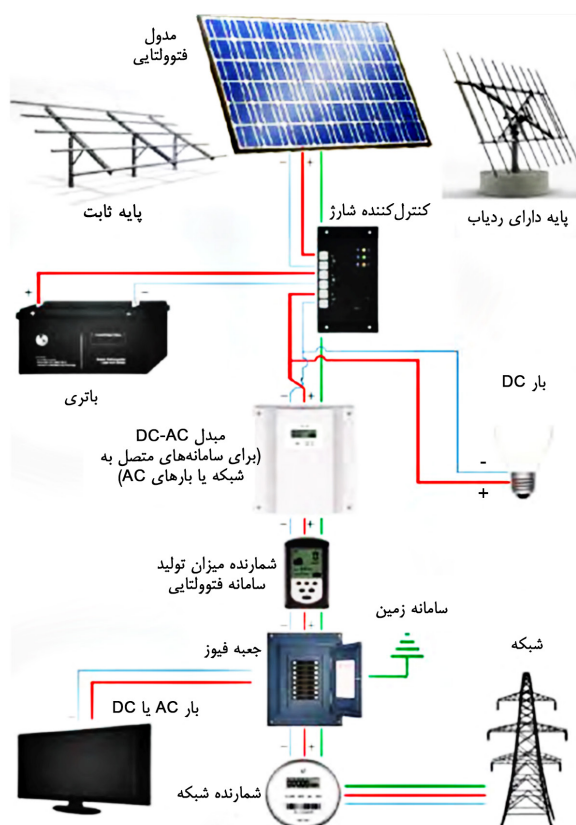
این سطح زیاد انرژی خورشیدی حاکی از ظرفیت زیاد کشور در توسعه فناوری استحصال انرژی خورشیدی و بومی‌سازی آن است. تقاضای برق در ایران به‌طور فزاینده در حال رشد است. در حال حاضر، انرژی کشور عمدتاً از سوخت‌های فسیلی تامین می‌شود. سهم استفاده از نفت در حوزه‌های مختلف تامین انرژی نشان داده است، با وجود مزیت مهم کشور در سطح بالای دریافت انرژی



شکل ۳- توزیع شدت تابش انرژی تابشی دریافتی از خورشید بر متر مربع در نقاط مختلف زمین [۳].



شکل ۱- مقایسه مقدار انرژی در دسترس از منابع مختلف [۱].

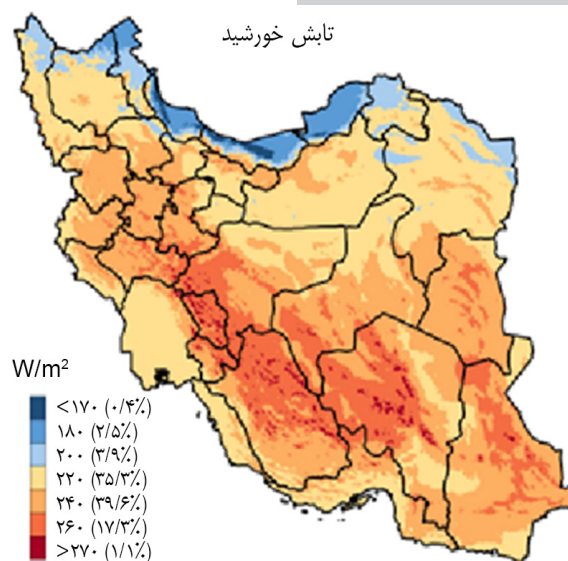


شکل ۵- فرایند تولید انرژی الکتریکی در سامانه‌های فتوولتایی [۷].

ذخیره باتری را داشته باشد، نیازمند فرایند کنترل دقیق است تا توازن میان تولید، مصرف و ذخیره‌سازی الکتریسیته را برقرار سازد. اجرای این فرایند بر عهده کنترل‌کننده شارژ است (شکل ۵) [۷].

پلیمرهای رسانا

در سال ۱۹۷۷ با کشف اینکه پلی‌استیلن ترانس دوپه‌شده با دوپه‌کننده‌های اکسایشی پذیرنده یا دهنده الکترون رسانا می‌شود، پلیمرهای رسانا معرفی شدند. از آن پس، پلیمرهای رسانا به‌عنوان مواد جدید دارای خواص الکتریکی فلزات یا نیمه‌رساناها با حفظ خواص پلیمری، معرفی شدند. اندازه گاف انرژی و موقعیت لبه‌های نوار رسانش و ظرفیت عوامل مهمی در کنترل خواص رسانایی پلیمر هستند. پلیمرهای رسانا از نظر مقدار رسانندگی در دسته نیمه‌رساناها قرار می‌گیرند. در یک نیمه‌رسانا، یک نوار ظرفیت پر شده و یک نوار رسانش خالی با گاف انرژی از هم جدا می‌شوند که هیچ سطح انرژی در آنجا وجود ندارد. نوار رسانش نیمه‌رساناها به مقدار کم با الکترون‌های تحریک‌شده در دمای محیط از راه گرمایی یا نورشیمیایی اشغال می‌شود. این برانگیختگی حامل‌های بار، برای جریان بار الکتریکی در نیمه‌رساناها فراهم است [۸].



شکل ۴- درصد شدت‌های تابش مختلف دریافتی در سطح زمین ایران [۴].

تابشی خورشید، متاسفانه ۱۸٪ نفت در تولید برق مصرف می‌شود که معادل تقریباً ۹۸٪ برق تولیدی است. این بدان معنی است که تنها ۲٪ از برق مصرفی کشور با روش‌های مبتنی بر سوخت‌های غیرفسیلی تولید می‌شود [۵]. استفاده گسترده از سوخت‌های فسیلی برای تولید برق، تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی و کربن دی‌اکسید را در پی دارد [۶]. کشور ظرفیت بالقوه‌ای برای تولید برق از نور خورشید دارد. دلیل عمده این عدم توجه به شناخت کم از این فناوری و غیربومی بودن صنعت ساخت صفحات مواد اولیه، سلول‌ها و صفحات خورشیدی و در کل فناوری فتوولتایی در کشور است.

ساختار سامانه‌های خورشیدی فتوولتایی

در فناوری فتوولتایی پرتوهای خورشید با صفحات سلولی کوچکی از نیمه‌رساناهای فتوولتایی، موسوم به سلول خورشیدی به الکتریسیته تبدیل می‌شوند. سلول‌های فتوولتایی به دو شکل صفحه‌تخت و متمرکزکننده ساخته می‌شوند. سلول‌های خورشیدی به هم وصل می‌شوند تا مدول‌ها را بسازند. مدول‌ها نیز برای ایجاد ولتاژ و جریان مناسب، به‌طور متوالی و موازی به هم متصل می‌شوند تا مدول خورشیدی ساخته شود [۷]. خروجی مدول خورشیدی، جریان مستقیم است و در بسیاری از موارد باید به جریان متناوب تبدیل شود. در سامانه‌های فتوولتایی متصل به شبکه یا مستقل از آن با بار متناوب، این کار برعهده مبدل است. سامانه‌ای که هر سه قابلیت مصرف محلی (خانگی-صنعتی)، اتصال به شبکه سراسری و

در سلول خورشیدی، نیروی الکتریکی جذب فوتون، تولید جفت‌های الکترون-حفره می‌کند و از حرکت آن‌ها جریان به وجود می‌آید. نیمه‌رساناها به‌طور ذاتی، آستانه جذب انرژی دارند که با آن ولتاژ نیمه‌رسانا تعیین می‌شود. انرژی‌های فوتونی و جذب آستانه با واحد الکترون‌ولت (eV) بیان می‌شوند. برای مثال، انرژی آستانه جذب در سیلیکون ۱/۱ eV و مساوی با طول موج ۱/۱ μm است. فوتون‌های با انرژی کمتر از ۱/۱ eV جذب نشده و طول موج‌های بلندتر از ۱/۱ μm تلف می‌شوند [۱۰].

انواع سلول‌های فوتوولتایی

سلول‌های فوتوولتایی دو دسته‌اند:

- دسته اول، سلول‌های متداول مانند اتصالات p-n سیلیکونی و - دسته دوم، سلول‌های فوتوولتایی اکسایتونی (exitionics).
دسته اول از متوالی کردن مواد الکترون‌دهنده (n) و الکترون‌گیرنده (p) معدنی ساخته می‌شوند و به دلیل بهینه‌سازی، آن‌ها هنوز در بازار مصرف موجودند. همچنین، پایداری زیاد باعث حفظ کارایی سلول‌های نصب‌شده تا حد زیادی شده است. دسته دوم عمدتاً سلول‌های فوتوولتایی ساخته‌شده از مواد آلی یا ترکیب آن‌ها با مواد معدنی هستند. برای مثال، از ترکیب پلیمرهای رسانا مانند پلی‌آیلین، تیتانیم دی‌اکسید و رنگ‌دانه آلی می‌توان سلول‌های خورشیدی حساس‌شده با رنگینه (dye-sensitized solar cell, DSSC) تهیه کرد. در این دسته از سلول‌های خورشیدی تابش نور به ماده آلی یا پلیمر تولید اکسایتون می‌کند که به حفره و الکترون تبدیل می‌شود. در صورتی که این زوج بتواند خود را از محل تولید به مرز مشترک بین پلیمر و ماده الکترون‌گیرنده برساند حفره و الکترون از هم تفکیک‌شده و جریان الکتریکی تولید می‌شود. برخلاف دسته اول که حفره و الکترون در توده ماده به‌طور جداگانه تشکیل می‌شوند، در دسته دوم سلول‌های خورشیدی حفره و الکترون در مرز مشترک دو فاز دهنده و گیرنده الکترون از هم جدا می‌شوند. جدایش بارهای مثبت و منفی از یکدیگر از ویژگی‌های انحصاری سلول‌های اکسایتونی است. این اختلاف سازوکار تولید بار به تفاوت‌های گسترده در بازده این دو دسته سلول فوتوولتایی منجر می‌شود [۱۱].

در سلول‌های دسته اول از نوع سیلیکونی، برخورد پرتوهای خورشید دارای انرژی ۱/۱ eV باعث تولید جریان الکترون‌ها از بخش n به فاز p می‌شود. این انرژی معادل انرژی نوار قرمز رنگ طیف خورشیدی است. در نتیجه، به‌طور نظری تمام پرتوهای خورشیدی را می‌توان به الکتریسیته تبدیل کرد که به معنی ۱۰۰٪

گاف انرژی پلیمر (E_g) که تفاوت انرژی بین پایین‌ترین اوربیتال مولکولی اشغال‌نشده (lowest unoccupied molecular orbital, LUMO) و بالاترین اوربیتال مولکولی اشغال‌شده (highest occupied molecular orbital, HOMO) است، با عوامل مختلف کنترل می‌شود.

پلیمرهای با گاف کوچک، پلیمرهایی هستند که جذب نور با طول موج بیش از ۶۰۰ nm دارند. پلیمرهای تجاری استفاده‌شده در فوتوولتایی آلی از قبیل MEH-PPV دارای جذب قابل گسترش تا طول موج ۵۵۰ nm هستند. P3HT که به‌طور معمول استفاده می‌شود، دارای جذبی است که تا ۶۵۰ nm گسترش می‌یابد. اگر از پلیمری با گاف انرژی کم استفاده شود، این عدم تطابق طیفی کاهش می‌یابد که نشان از هم‌پوشانی بهتر با طیف نشری خورشید دارد. برای به‌دست آوردن سلول خورشیدی کارآمد یافتن مواد الکترون‌دهنده که محدوده جذب نوری و هم‌پوشانی بهتری با نور خورشید دارند (دارای گاف انرژی کم) ضروری است. گاف انرژی می‌تواند عملاً برای تعیین انرژی به‌دست آمده از سلول استفاده شود [۹].

عوامل متعددی بر گاف انرژی پلیمرها اثر دارند که برای مثال می‌توان به طول مزدوج‌شدن، تناوب طول پیوند، انتقال بار درون‌زنجیری، برهم‌کنش‌های بین‌مولکولی، آروماتیک‌بودن و استخلاف‌ها اشاره کرد. ادغام بخش‌های الکترون‌دهنده و الکترون‌گیرنده در زنجیر پلیمر، روش موفقی برای سنتز پلیمرهای با گاف انرژی کم هستند. تناوب در زنجیر اصلی پلیمر به انتقال بار درون‌مولکولی از دهنده به گیرنده منجر شده و نوار جذبی با انرژی کمتر ایجاد می‌شود. منطق مفهوم دهنده-گیرنده-دهنده این است که HOMO دهنده و LUMO گیرنده در پلیمر حاصل، ادغام می‌شوند. بنابراین، در ساختار الکترونی پلیمر خصلت پیوند دوگانه افزایش و موجب گسترش نوارهای رسانش و القای گاف انرژی کم می‌شوند. سازوکار رسانایی در پلیمرهای مزدوج بر پایه وجود حامل‌های بار مثبت یا منفی و حرکت این حامل‌های بار در طول زنجیر اصلی پلیمر است. حامل‌های بار مثبت یا منفی از راه فرایند اکسایش یا کاهش در زنجیر اصلی پلیمر ایجاد می‌شوند. گیرنده یا پذیرنده‌های الکترون می‌توانند پلیمر یا مولکولی کوچک باشند. مواد الکترون‌گیرنده با الکترون‌خواهی زیاد شامل C_{60} و مشتقات محلول آن هستند. فولرن‌ها به دلیل داشتن الکترون‌خواهی زیاد و قابلیت انتقال، بهترین گیرنده‌های الکترونی شناخته‌شده هستند. مشتقات فولرن حل‌پذیری خوبی دارند. PCBM مشتق متانوفولرن (۶،۶-فنیل- C_{61} -بوتیریک اسید متیل استر) با حل‌پذیری زیاد است.

تبدیل انرژی نورانی به انرژی الکتریکی است. در واقعیت، درصد تبدیل انرژی نورانی در سلول‌های خورشیدی دسته اول در حد ۲۰٪ است. این درصد برای دسته دوم در حد نصف این مقدار است [۱۲].

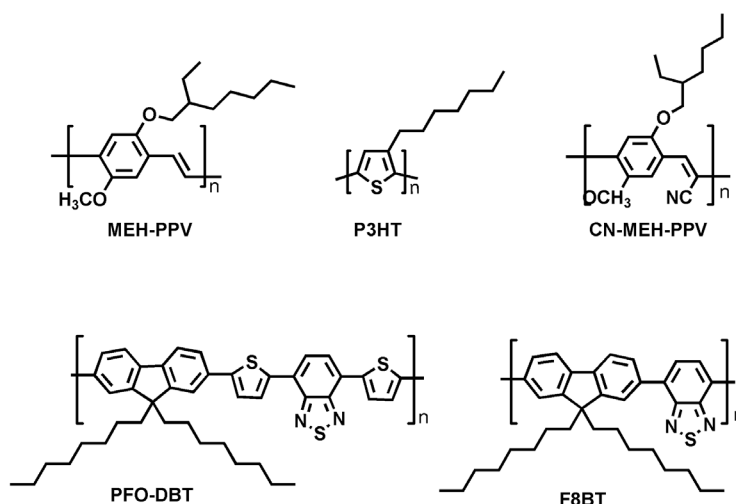
سلول‌های خورشیدی پلیمری

مواد پلیمری نیمه‌رسانا می‌توانند انرژی تابشی خورشید را جذب و به الکتریسیته تبدیل کنند. از طرفی، سلول‌های پلیمری انعطاف‌پذیر بوده و می‌توان آن‌ها را در ابعاد بزرگ تولید کرد. افزون بر این، سلول‌های پلیمری از نمونه‌های سیلیکونی ارزان‌تر هستند، ولی بازده کمتر و قابل توجهی دارند [۱۳]. عامل تعیین‌کننده برای انواع مختلف سلول‌های خورشیدی بازده آن‌هاست. بیش از یک دهه است که پژوهشگران برای افزایش بازده سلول‌های خورشیدی پلیمری تلاش می‌کنند [۱۴].

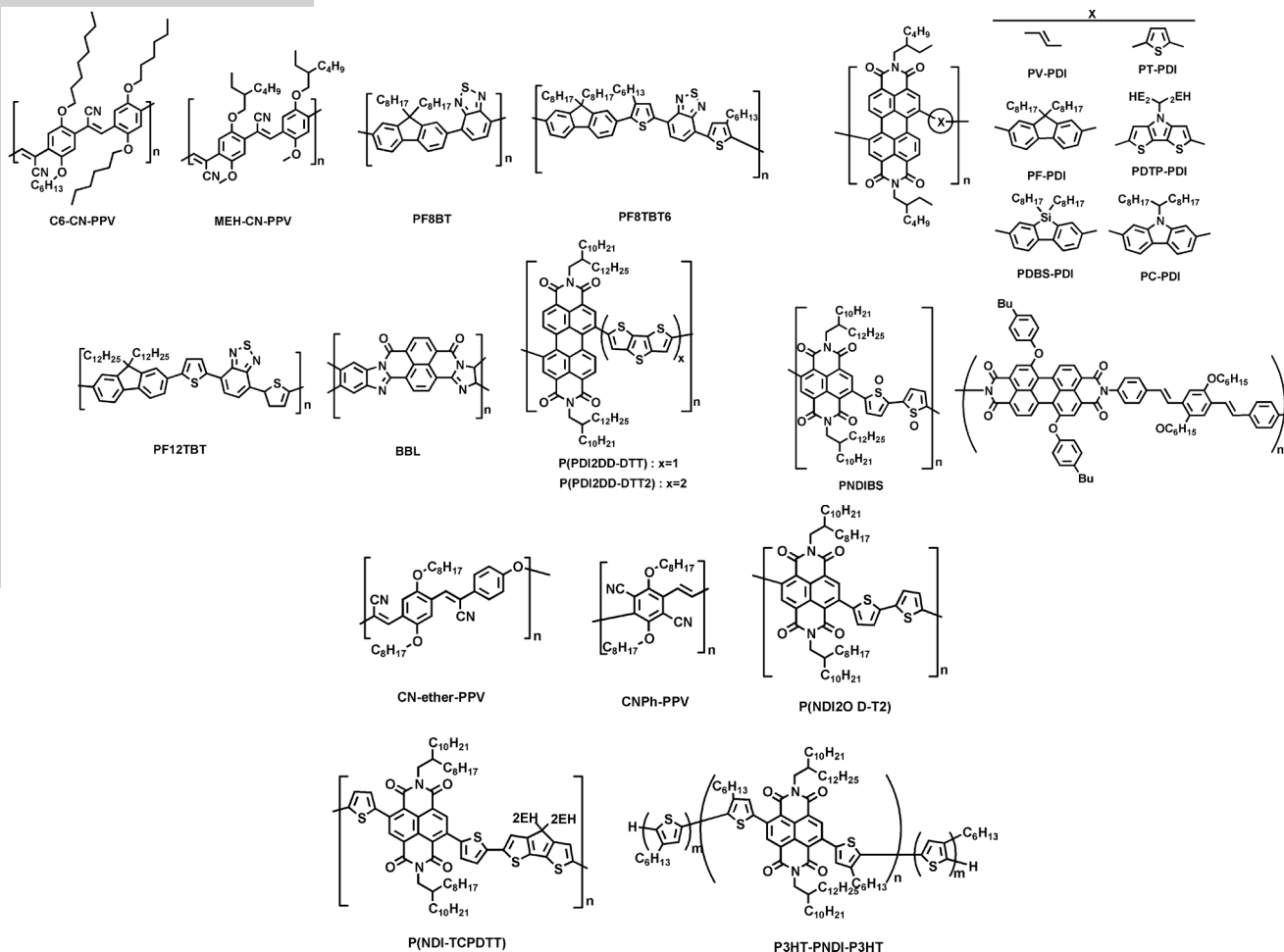
به‌طور هم‌زمان سعی شده است تا طول عمر و انعطاف‌پذیری این نوع سلول‌ها افزایش یابد. برای افزایش شفافیت سلول‌های مزبور از شیشه‌های ایندیم قلع اکسید (ITO) استفاده می‌شود. با توجه به هزینه زیاد این نوع شیشه، تلاش شده است تا جایگزین مناسبی برای آن از مواد ارزان‌تر و انعطاف‌پذیرتر یافت شود. برای مثال، روی اکسید دوپه‌شده با گالیم (GZO) به جای ITO در سلول خورشیدی پلیمری به کار رفته است که به دلیل شفافیت کمتر بازده سلول کاهش یافته است [۱۵]. لایه شفاف آلومینیم دوپه‌شده با روی اکسید و لایه نازک نقره نیز به جای ITO استفاده شده‌اند که بازده قابل قبول و انعطاف‌پذیری مناسب داشته‌اند [۱۶].

در شرایط فعلی، تمرکز پژوهش‌ها بر افزایش بازده سلول‌های خورشیدی پلیمری است. از مهم‌ترین عوامل موثر، نوع پلیمر

به کاررفته، بهبود ولتاژ مدار باز، مقدار جذب نور و ساختار سلول هستند. مواد پلیمری عمدتاً دارای الکترون‌های π هستند که پس از جذب نور در آن‌ها بار الکتریکی ایجاد می‌شود. بدین دلیل، این مواد را می‌توان در ساخت سلول‌های خورشیدی پلیمری به کار برد. مواد پلیمری به دو دسته اصلی الکترون‌دهنده و الکترون‌گیرنده تقسیم می‌شوند. شکل‌های ۶ و ۷ برخی از پلیمرهای نیمه‌رسانای این دو دسته را نشان می‌دهند. اکثر پلیمرهای نیمه‌رسانا، انتقال‌دهنده حفره هستند که الکترون‌دهنده نامیده می‌شوند. چهار نوع متداول و مهم این نوع پلیمرها پلی[۹'-N-هپتادکانیل-۷,۲-کربازول-*alt*-۵,۵-(۷',۴'-دی‌تیل-۳',۱'۲'-بنزوتیادی‌آزول)] (PCDTBT)، پلی[۲-متوکسی-۵-(۲-اتیل‌هگزیلوکسی)-۴,۱-فنیلن وینیلن] (MEH-PPV)، پلی[۳-هگزیل تیوفن] (P3HT) و پلی[۲,۷-(۹,۹-دی اکتیل-فلوئورن)-*alt*-۵,۵-(۷,۴-دی-۲-تیل-۳,۱,۲-بنزوتیادی‌آزول)] (PFO-DBT) هستند. سایر پلیمرهای دارای گاف انرژی کم نیز در سلول‌های خورشیدی پلیمری به کار می‌روند [۱۷]. در سال ۲۰۱۲ نوع جدیدی از سلول‌های خورشیدی بر پایه پلی‌آنیلین معرفی شد. پلیمرهایی مانند پلی[۲-متوکسی-۵,۲-اتیل‌هگزیلوکسی]-۴,۱-(۱-سیانووینیلن-فنیلن)] (CN-MEH-PPV) و پلی[دی‌اکتیل‌فلوئورن-co-بیس-N',N-(۴-بوتیل‌فنیل)-بیس-N',N-فنیل-۴,۱-فنیلن‌دی‌آمین] (PF8TB) و مولکول‌های کوچک C_{19} (فولدن) و محلول مشتقات C_{70} و C_{19} به نام‌های ۶,۶-فنیل- C_{21} -بوتیریک اسید متیل استر (PC70BM) و ۶,۶-فنیل-CV۱-بوتیریک اسید متیل استر (PC19BM) به عنوان الکترون‌گیرنده‌ها استفاده شدند. کامپوزیت‌های پلیمر-فولرن، با هزینه نسبتاً کمی در ساخت سلول‌های خورشیدی به کار برده می‌شوند [۱۹]. مقدار جذب کم، گاف انرژی زیاد و ناهم‌هنگی این دو با تابش



شکل ۶- برخی از پلیمرهای نیمه‌رسانای الکترون‌دهنده استفاده شده در سلول‌های خورشیدی پلیمری [۱۸].



شکل ۷- برخی از پلیمرهای نیمه‌رسانای الکترون‌گیرنده استفاده‌شده در سلول‌های خورشیدی پلیمری [۲۰].

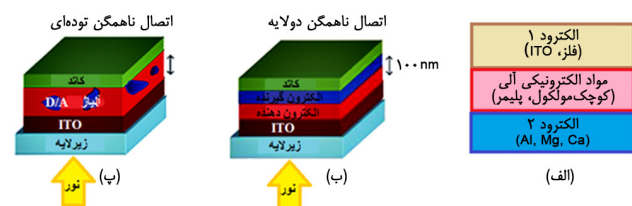
مانند آلومینیم، منیزیم یا کلسیم تهیه می‌شود (شکل ۸). الکترون‌های HOMO پلیمر مزدوج در صورت جذب نور، به اوربیتال LUMO برانگیخته شده و اکسایتون تشکیل می‌شود. در میدان الکتریکی حاکم بر سلول، پیوندهای الکتروستاتیک اکسایتون‌ها تفکیک‌شده و در نتیجه الکترون‌های اکسایتون در الکتروود مثبت و حفره‌ها در الکتروود منفی جذب می‌شوند. گسسته‌شدن اکسایتون‌ها به بارهای مثبت و منفی و سرریز شدن آن‌ها در الکتروودها جریان و اختلاف ولتاژ الکتریکی معین و ثابتی را در سلول و مدار مربوط ایجاد

خورشید از عوامل محدودکننده سلول‌های خورشیدی پلیمری هستند. برای مثال، پلی(پارافیلین‌وینیلن)ها (PPVs) و پلی‌تیوفن‌ها به‌ترتیب دارای گاف انرژی ۲/۲ eV و ۱/۸۵ eV هستند. پلی‌تیوفن با گاف انرژی ۱/۸۵ eV دارای آستانه جذب ۶۷۰ nm، تنها ۱۶٪ از فوتون‌های نور خورشید را جذب می‌کند، در حالی که این مقدار برای گاف انرژی ۱/۱ eV سیلیکون ۹۰٪ است. از این‌رو، در صورتی که پلیمر الکترون‌گیرنده باشد، برای دستیابی به بازده حدود ۱۰٪، گاف انرژی پلیمر الکترون‌دهنده باید ۱/۷ eV باشد. از سوی دیگر، گاف انرژی کمتر علاوه بر افزایش مقدار جذب نور خورشید، بیشینه چگالی جریان را نیز افزایش می‌دهد.

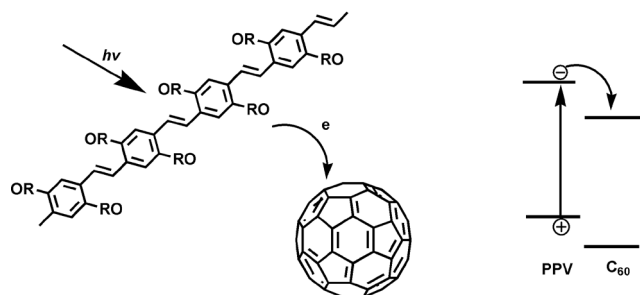
انواع آرایش سلول‌های فوتوولتایی آلی

ساختار سلولی تک‌لایه

این نوع سلول از راه قراردادن لایه بسیار خالصی از پلیمر دارای ساختار مزدوج بین الکتروود ایندیم قلع اکسید (ITO) و الکتروود فلزاتی



شکل ۸- اجزای تشکیل‌دهنده سلول‌های خورشیدی: (الف) تک‌لایه، (ب) دولایه و (پ) اتصالات ناهمگن توده‌ای [۲۱].



شکل ۹- حرکت حفره و الکترون در پلیمر مزدوج-PCBM [۲۵].

حاصل افزایش مطلوبی نشان می‌دهد. موثرترین روش در این حوزه، تهیه آمیخته پلیمر مزدوج رسانا با فولرن است که در آن الکترون‌دهنده‌های پلیمری و الکترون‌گیرنده فولرن (از خانواده C_{60}) با هم در مقیاس بسیار ریز نزدیک به مقیاس مولکولی در پلیمر پراکنده می‌شوند. برای تهیه این آمیزه ابتدا مولکول‌های فولرن در حلال تعلیق شده و سپس با پلیمر مخلوط می‌شوند. پس از حذف حلال، فولرن الکترون‌های تولیدشده به وسیله پلیمر را در معرض نور جذب و هدایت می‌کند. سپس، لایه نازکی از این آمیخته فعال نوری و رسانا بین دو الکترود با تابع کار ناهمسان قرار داده می‌شود که می‌تواند باعث تولید جریان الکتریسیته شود. در حال حاضر، آمیزه دارای اتصالات ناهمگن توده‌ای متشکل از پلیمر مزدوج با PCBM موثرترین سلول فوتوولتایی شناخته شده است (شکل ۹) [۲۵].

اگرچه سامانه‌های فوتوولتایی پلیمری ارزان‌تر بوده و ساخت آن‌ها ساده‌تر است، ولی بازده سلول‌های خورشیدی پلیمری دارای اتصالات ناهمگن توده‌ای بسیار کم است. از مزیت‌های این نوع سلول‌های فوتوولتایی آن است که به سادگی از راه اختلاط و بهینه‌کردن دو پلیمر مزدوج مختلف می‌توان گستره وسیع‌تری از طیف نور خورشید را جذب و به الکتریسیته تبدیل کرد (شکل ۱۰) [۲۵].

در صورتی که از مواد نیمه‌رسانای آلی و معدنی به‌طور هم‌زمان در ساخت سلول فوتوولتایی استفاده شود، آن را سلول خورشیدی هیبریدی می‌نامند. در این آرایش‌های هیبریدی از مزیت‌های دو ماده از دو حوزه مختلف آلی و معدنی استفاده می‌شود. پلیمر آلی مزدوج در برهم‌کنش با نور مرئی الکترون تولید می‌کند و ماده معدنی می‌تواند الکترون تولیدشده را جذب کرده و به آند حمل کند. برای کاهش اندازه حوزه‌های آلی و معدنی در تجزیه موثر اکسایتون‌های تشکیل‌شده، از مواد معدنی در ابعاد نانو استفاده می‌شود. در این شرایط آمیخته به‌دست آمده همانند ماده مرکب دارای اتصالات ناهمگن توده‌ای عمل می‌کند.

آرایش سلولی دولایه

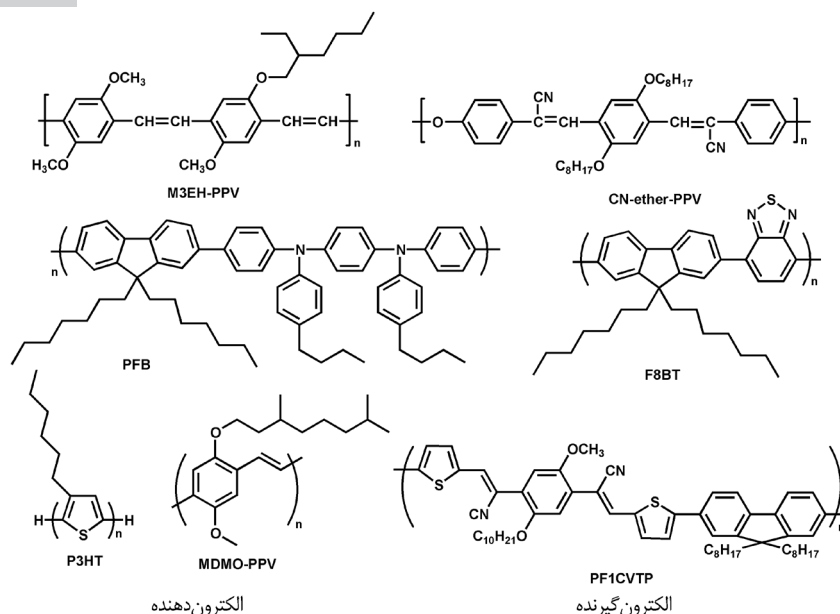
در این آرایش دو لایه دهنده و گیرنده الکترون به‌ترتیب مانند پلیمر مزدوج و فولرن در بین الکترودهای مثبت و منفی سلول محصور می‌شوند (شکل ۸). الکترون‌خواهی و انرژی یونش این دو لایه یکسان نیستند. در نتیجه این اختلاف‌های الکتریکی در سطح مشترک دو لایه نیروی الکتروستاتیک توسعه می‌یابد. در مقایسه با آرایش‌های تک‌لایه، وجود میدان‌های الکتریکی موضعی ایجادشده به جدایش بارهای مثبت و منفی اکسایتون‌ها کمک می‌کند. لایه دارای الکترون‌خواهی و قابلیت یونش زیاد، الکترون‌های اکسایتون‌ها را جذب می‌کند، در حالی که لایه دیگر از راه الکترون‌دهی حفره را جذب کرده و به سمت کاتد هدایت می‌کند. ساختار حاصل را اتصالات ناجور دهنده-گیرنده توده (bulk donor-acceptor hetero junctions) می‌نامند. ضخامت لازم برای لایه پلیمر حساس به نور در حد ۱۰۰ nm است. چون طول عمر یا مسافت طی‌شده اکسایتون‌ها بسیار کوتاه است، در عمل فقط تعداد اندکی از آن‌ها قابلیت رسیدن به سطح مشترک لایه‌های دهنده و گیرنده را دارند و بقیه حفره‌ها و الکترون‌ها مجدداً ترکیب و غیرفعال می‌شوند. طراحی‌های جدید دارای اتصالات سلول‌های فوتوولتایی نامتقارن هستند [۲۳].

سلول‌های دارای اتصالات ناهمگن توده‌ای

در این نوع سلول‌ها، آمیخته‌ای از مواد الکترون‌گیرنده و الکترون‌دهنده به‌کار برده می‌شود (شکل ۸). در صورتی که جدایی بین‌فازی در این آمیخته بیش از طول نفوذ اکسایتون (۱۰۰ nm) باشد، اغلب اکسایتون‌های تشکیل‌شده نمی‌توانند به سطح بین‌فازی برسند و پیش از اینکه بتوانند در تولید جریان نقشی داشته باشند نابود می‌شوند. پس از انتقال الکترون‌ها به فاز گیرنده به سمت آند رفته و وارد مدار می‌شوند. از طرفی، حفره‌ها در مسیر به سمت کاتد رفته و با الکترون‌های برگشتی از مدار ترکیب می‌شوند. ساختار آمیخته‌ای مساحت بین فازهای الکترون‌دهنده و الکترون‌گیرنده را افزایش می‌دهد و باعث بهبود بازده سلول فوتوولتایی می‌شود [۲۴].

انواع سلول‌های دارای اتصالات ناهمگن لایه‌ای

در صورتی که بتوان مواد فعال نوری پلیمری را به‌طور مناسب با مواد الکترون‌گیرنده درهم‌آمیخت، کارایی سلول خورشیدی



شکل ۱۰- ساختار پلیمرهای آلی به کار رفته در سلول‌های خورشیدی [۲۵].

معمولاً بسیار بزرگ است. این ترکیبات تنها محدوده باریکی از طیف انرژی خورشید رسیده به زمین را جذب می‌کنند. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، طول عمر و مسیر طی شده به وسیله آن‌ها بسیار کوتاه است. این بدان معناست که در صورت طولانی بودن ضخامت فازهای مختلف و عدم دسترسی اکسایتون تشکیل شده به فاز پذیرنده الکترون پیش از اینکه فرصت تولید جریان الکتریکی را داشته باشند، مسیرهای غیرالکتریکی مانند مسیرهای تابشی را طی کرده و غیرفعال می‌شوند. این کار، به شدت از کارایی سلول فوتوولتایی می‌کاهد. اختلاط پلیمرهای مزدوج رسانا با پذیرنده‌هایی مانند فولرن در شکل‌شناسی نانومتری بستر مناسبی را برای تجزیه اکسایتون‌های تشکیل شده در فاز پلیمر ایجاد می‌کند که می‌تواند به شکل موثری الکترون‌های حاصل از تفکیک اکسایتون‌ها را به آند و حفره‌ها را به سمت کاتد هدایت کند.

روش تولید سلول‌های خورشیدی آلی

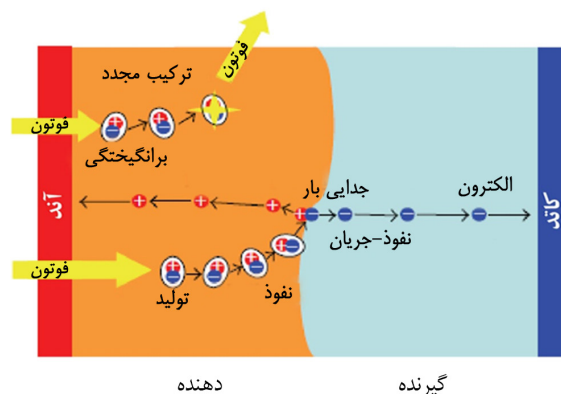
تولید سلول آلی از فرایند ساخت غلتک به غلتک در دمای کم و سرعت زیاد و فناوری چاپ استاندارد استفاده می‌کند. در نتیجه، سلول‌های خورشیدی آلی در بعضی کاربردها، ممکن است که قابلیت رقابت با سایر فناوری‌های PV را داشته باشند، زیرا هزینه‌های ساخت رو به کاهش است و انتظار می‌رود، تا سال ۲۰۲۰ به ۰/۵ دلار در هر وات برسد [۲۷].

سلول‌های آلی می‌توانند برای ورقه‌های پلاستیکی در روش مشابه با صنایع چاپ و رنگ، به کار برده شوند. این به معنای

سازوکار داخلی سلول‌های فوتوولتایی پلیمری

در این نوع سلول‌ها انرژی نورانی طی چند مرحله زیر به الکتریسیته تبدیل می‌شوند (شکل ۱۱):

- ۱- نور جذب پلیمر مزدوج می‌شود و الکترون‌های آن را برانگیخته می‌کند،
 - ۲- یک اکسایتون تشکیل می‌شود،
 - ۳- اکسایتون تشکیل شده در اثر جابه‌جایی بارها به حفره مثبت و الکترون جدا شده تبدیل می‌شود و
 - ۴- الکترون تشکیل شده در ماده نیمه‌رسانای پلیمری به وسیله الکترون‌گیرنده به کاتد منتقل می‌شود و حفره هم برای دریافت الکترون به آند می‌رسد.
- گاف انرژی بین اوربیتال‌های اشغال شده و نشده ترکیبات آلی



شکل ۱۱- سازوکار عملکرد سلول خورشیدی پلیمری با اتصالات نامتقارن دهنده گیرنده [۲۶].

جدول ۱- ظرفیت نصب شده تجمعی فوتولتایی از سال ۲۰۰۰ تا سال ۲۰۱۳ در مناطق مختلف جهان [۳۱].

کشور	۲۰۰۰	۲۰۰۱	۲۰۰۲	۲۰۰۳	۲۰۰۴	۲۰۰۵	۲۰۰۶	۲۰۰۷	۲۰۰۸	۲۰۰۹	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲۰۱۲	۲۰۱۳
باقی کشورهای جهان	۷۵۱	۸۰۷	۸۸۷	۹۶۴	۹۹۳	۱۰۰۳	۱۱۰۸	۱۱۵۰	۱۲۲۶	۱۳۰۶	۱۵۹۰	۲۰۹۸	۲۰۹۸	۲۰۹۸
آفریقا و خاورمیانه	-	-	-	-	۱	۱	۱	۲	۳	۲۵	۸۰	۲۰۵	۵۷۰	۹۵۳
چین	۱۹	۲۴	۴۲	۵۲	۶۲	۷۰	۸۰	۱۰۰	۱۴۰	۳۰۰	۸۰۰	۳۳۰۰	۶۸۰۰	۱۸۶۰۰
آمریکا	۲۱	۲۴	۵۴	۱۰۲	۱۶۳	۲۴۶	۳۵۵	۵۲۲	۸۲۸	۱۳۲۸	۲۴۱۰	۴۵۹۰	۸۳۶۵	۱۳۷۲۷
آسیا-اقیانوسیه	۳۶۸	۴۹۶	۶۸۶	۹۱۶	۱۱۹۸	۱۵۰۲	۱۸۲۷	۲۰۹۸	۲۶۲۸	۳۳۷۳	۴۹۵۱	۷۵۱۳	۱۲۱۵۹	۲۱۹۹۲
اروپا	۱۲۹	۲۶۵	۳۹۹	۶۰۱	۱۳۰۶	۲۲۹۱	۳۲۸۹	۵۳۱۲	۱۱۰۲۰	۱۶۸۵۴	۳۰۵۰۵	۵۲۷۶۴	۷۰۵۱۳	۸۱۴۸۸
جمع کل	۱۲۸۸	۱۶۱۵	۲۰۶۹	۲۶۳۵	۳۷۲۳	۵۱۱۲	۶۶۶۰	۹۱۸۳	۱۵۸۴۴	۲۳۱۸۵	۴۰۳۳۶	۷۰۴۶۹	۱۰۰۵۰۴	۱۳۸۸۵۶

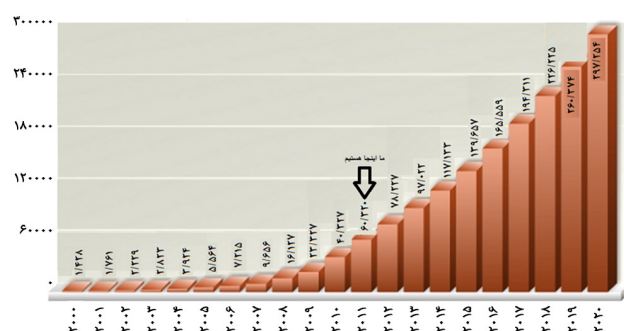
یافت و پس از دو سال در حدود نصب سالیانه ۳۰ گیگاوات رکورد جهانی جدید ۳۸ گیگاوات در ۲۰۱۳ ثبت شد. واقعیت بسیار مهم در ۲۰۱۳ توسعه سریع فوتولتایی در آسیا به همگام با افت تند نصب در اروپا است. این رکورد بالاتر هم خواهد رفت. در عمل، با لحاظ کردن ۱,۱ گیگاوات نصب شده در چین تقریباً ۴۰ گیگاوات در ۲۰۱۳ نصب شده است.

الگوی رشد بازار

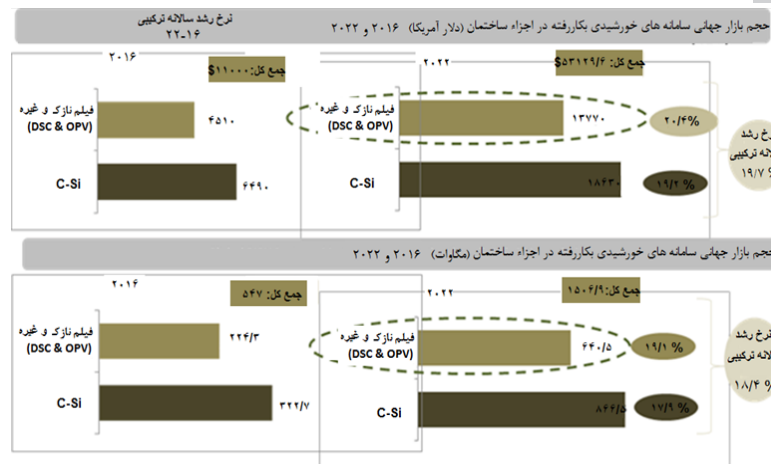
چین در قله بازار فوتولتایی جهان در سال ۲۰۱۳ قرار داشت و با نصب سامانه‌های فوتولتایی با توان ۱۱/۸ GW متصل به شبکه پس از ایتالیا با ۹/۳ GW در سال ۲۰۱۱ و آلمان با ۷/۴ و ۷/۶ GW از سال ۲۰۱۰ تا سال ۲۰۱۲ بیشترین نصب را به خود اختصاص داد. در سال ۲۰۱۳ ژاپن سامانه‌های فوتولتایی با توان ۶/۹ GW نصب و جایگاه دوم را کسب کرد، در حالی که ایالات متحده در همان سال فقط سامانه‌هایی با توان ۴/۸ GW نصب کرد [۳۱]. طی دهه گذشته بازار اروپا پیوسته پیشرفت کرده است. این بازار از مقدار سالیانه ۱ GW در سال ۲۰۰۶ به بیش از ۱۳/۷ GW در سال ۲۰۱۰ و ۲۲/۳ GW در سال ۲۰۱۱ با وجود مشکلات اقتصادی و مخالفت‌های مختلف با فناوری برق خورشیدی در برخی کشورها، رسیده است. رکورد سال ۲۰۱۱ به دلیل گسترش سریع در ایتالیا و ادامه نصب زیاد در آلمان است که به دلیل قابل تکرار نبودن در سال ۲۰۱۲ بازار به ۱۷/۷ GW و تقریباً ۱۱ GW در سال ۲۰۱۳ بالغ شد که پایین‌ترین تراز بازار از سال ۲۰۰۹ است. پس از ۷ بار حفظ مقام اول بازار فوتولتایی طی ۱۴ سال، آلمان با نصب ۳/۳ GW مقام چهارم را کسب کرده و هنوز بزرگ‌ترین بازار است. انگلستان با

رسیده است، اگر ۱/۱ GW چین نیز به حساب آورده شود.

اروپا در سال ۲۰۱۳ منطقه پیشگام جهان برحسب ظرفیت نصب تجمعی با مقدار ۸۱/۵ GW باقی مانده است. این مقدار حدود ۵۹٪ ظرفیت نصب تجمعی جهانی فوتولتایی که از ۲۰٪ در سال ۲۰۱۲ افزون‌تر و از ۷۵٪ ظرفیت جهانی سال ۲۰۱۱ کمتر است. کشورهای آسیا-اقیانوسیه با نصب فعلی ۴۰/۶ GW به سرعت در حال رشد هستند. ظرفیت کشورهای آمریکایی ۱۳/۷ GW است. بسیاری از کشورهای خارج از منطقه اروپا، به‌ویژه هند و ایالات متحده بخش کوچکی از ظرفیت‌های بی‌شمار خود را استفاده کرده‌اند. در سال ۲۰۱۳ کشورهای آسیایی پیش‌افتاده و خیلی سریع‌تر از بازارهای اروپایی مرسوم رشد کردند. چند کشور از ناحیه کمربند خورشیدی مانند آفریقا، خاورمیانه، جنوب‌شرقی آسیا و آمریکای لاتین در شروع توسعه خود هستند. ظرفیت نصب تجمعی خارج از اروپا از مقدار ۳۰ GW در سال ۲۰۱۲ تقریباً به حدود ۲ برابر یعنی ۶۰ گیگاوات رسیده است. اروپا و بقیه جهان تقریباً الگوی مصرف برق مشابهی را نشان می‌دهند. بازار جهانی فوتولتایی در ۲۰۱۳ توسعه



شکل ۱۳- پیش‌بینی رشد جهانی نصب فوتولتایی تا ۲۰۲۰ [۳۳].



شکل ۱۵- تقسیم‌بندی فناوری‌های به‌کاررفته در BIPV و سهم بازار جهانی آن‌ها [۳۴].

بسیار زیاد تولید برخوردار است، در دمای محیط انجام می‌گیرد و مانند فناوری لایه نازک محدودیت مواد اولیه ندارد.

با توجه به پایداری کمتر مواد آلی و پلیمری در مقایسه با مواد معدنی مانند سیلیکون، هدف فعلی این حوزه افزایش بازده تا ۱۰٪ و پایداری ۱۰ ساله صفحات خورشیدی پلیمری است [۳۵].

حجم بازار جهانی سامانه‌های فوتولتایی یکپارچه ساختمانی (building integrated photovoltaics, BIPVs) بر حسب مگاوات و میلیون دلار در مرجع ۳۴ تا سال ۲۰۲۲ بررسی شده است. در واقع، سلول‌های نصب‌شده و قابلیت‌های بالقوه در آینده پررنگ می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۵ دیده می‌شود، فناوری‌های لایه نازک و آلی خورشیدی سرعت رشد زیادی در کاربردهای ساختمانی دارند که البته این رشد در بخش‌های آسیایی سرعت بیشتری خواهد داشت [۳۶].

نتیجه‌گیری

با توجه به نیاز بشر به انرژی در شکل مطلوب و قابل استفاده که معمولاً الکتریسیته است، انتظار می‌رود تا مصرف برق رشد زیادی داشته باشد. محدودیت منابع انرژی مرسوم و از سویی فراوانی و دسترس‌پذیری تابش خورشید، صنعت انرژی جوامع را به سمت بهبود روش‌های استحصال انرژی خورشیدی به پیش می‌راند. فناوری‌های صفحات خورشیدی سیلیکونی، جا افتاده بوده و در حال افزایش بازده هستند، ولی به دلیل مصرف زیاد انرژی در فرایندهای تولید آن‌ها در دماهای زیاد و تولید کربن دی‌اکسید

۱/۵ GW نصب مقام دوم اروپا را داشت. ایتالیا که در سال ۲۰۱۲ مقام دوم را داشت با نصب ۱/۴ GW در سال ۲۰۱۳ از ۳/۶ GW سال قبل و ۹/۳ GW در سال ۲۰۱۱ بسیار پایین‌تر رفت. سایر کشورهای اروپایی که بیش از ۱ GW نصب کرده‌اند، عبارتند از: رومانی با ۱/۱ GW و یونان با ۱/۰۴ GW. مجموع ظرفیت چین، ژاپن، ایالات متحده، آلمان و انگلستان ۲۸/۳ GW یا سه چهارم بازار جهانی را در سال ۲۰۱۳ تشکیل می‌دهد. این در حالی است که در سال ۲۰۱۲ این پنج کشور فقط حدود ۶۵٪ بازار را تشکیل می‌دادند.

منطقه آسیا-اقیانوسیه (APAC) که شامل چین، ژاپن، کره استرالیا، تایوان و تایلند است در سال ۲۰۱۳ مقام سوم را با سهم ۵۶٪ از بازار جهانی فوتولتایی را داشته است. اروپا با ۱۱ GW از ۳۸/۴٪ معادل ۲۹٪ را نصب کرده است. سومین منطقه پیشرو امریکای شمالی شامل کانادا که به موازات ایالات متحده به سرعت در حال رشد است. در منطقه‌های خاورمیانه و شمال آفریقا ظرفیت‌های استفاده نشده وجود دارد. فوتولتایی ظرفیت‌های زیادی در امریکای جنوبی و آفریقا دارد، تقاضای برق در سال‌های آینده فزاینده است و طرح‌های زیادی برای نصب در سال‌های آتی وجود دارد.

آمار تولید

در حال حاضر، سلول‌های پلیمری خورشیدی با توجه به بازده کم آن‌ها، سهم زیادی در بازار جهانی ندارند. با توجه به پژوهش‌های بسیاری که در زمینه فناوری‌های نوین سلول‌های خورشیدی پلیمری و آلی در دست اجراست، بازده این نوع سلول‌ها به سرعت افزایش یافته و بخش مهمی از بازار به آن‌ها اختصاص خواهد یافت. دلیل این رشد، فناوری غلتک به غلتک چاپی است که از سرعت

در مقایسه با فناوری لایه‌های نازک دارای محدودیت مواد اولیه نبوده و در عمل با افزایش بازده و پایداری سلول‌های پلیمری میدان رقابت را در بازار برق خورشیدی به دست خواهند گرفت. دلیل اصلی این موفقیت وزن کم و انعطاف‌پذیری زیاد این سلول‌هاست.

مراجع

- Sodagar H., <http://www.hossein-sodagar.com> (available in 15 February 2018).
- <http://www.helpsavetheclimate.com/solar.html> (available in 15 February 2018).
- <https://www.eia.gov/energyexplained/images/charts/world-solar-large.gif> (available in 15 February 2018).
- Azadi P., Nezam Sarmadi A., Mahmoudzadeh A., and Shirvani T., https://iranian-studies.stanford.edu/sites/default/files/publications/the_outlook_for_natural_gas_electricity_and_renewable_energy_in_iran_2.pdf (available in 15 February 2018).
- Abbaszadeh P., Maleki A., Alipour M., and Kanani Maman Y., Iran's Oil Developments Senarios by 2025, *Energy Policy*, **56**, 612–622, 2013.
- <http://www.iea.org/stats/WebGraphs/IRAN2.pdf> (available in 15 February 2018).
- Shams M.H., Khavari F., Mohammadi M., and Nouri J., A Review of Technology of Electricity Production from Solar Energy and Comparision of the World Largest Solar Power Plants, *J. Dev. Indust. Tech. (Persian)*, **21**, 1-22, 2013.
- Thomas C.A., *Donor-Acceptor Methods for Band Gap Reduction In Conjugated Polymers: The Role of Electron Rich Donor Heterocycles*, University of Florida, Ph.D dissertation, 2002.
- Polymer Photovoltaics A Practical Approach (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers)*, Krebs F.C. (Ed.), SPIE, Bellingham, USA, 2007.
- Fraas L. and Partain L., *Solar Cells and Their Applications*, John Wiley and Sons, USA, 2nd ed., 45-46, 2010.
- Gregg B.A., Excitonic Solar Cells, *J. Phys. Chem. B*, **107**, 4688-4698, 2003.
- Allon H.I. and Peidong Y., Semiconductor Nanowires for Energy Conversion, *Chem. Rev.*, **110**, 527–546, 2010.
- Ito T., Fukushima H., and Yamaguchi M., Efficiency Potential of Thin Film Polycrystalline Silicon Solar Cells by Silane-Gas-Free Process using Aluminum-induced-crystallization, *Sol. Energy Mat. Sol. Cells*, **83**, 91–99, 2004.
- Lee J., Lakshminarayan N., Dhungel S.K., Kim K., and Yi J., Optimization of Fabrication Process of High-efficiency and Low-cost Crystalline Silicon Solar Cell for Industrial Applications, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **93**, 256-261, 2009.
- Ihn S-Gh, Shin K.S., Jin Jin M., Bulliard X., Yun S.Y., Choi Y.S., Kim Y., Park J.H., Sim M., Kim M., Cho K., Kim T., Choi D., Choi J.Y., Choi W., and Kim S., ITO-Free Inverted Polymer Solar Cells using a GZO Cathode Modified by ZnO, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **95**, 1610–1614, 2011.
- Kohlstädt M., Grein M., Reinecke P., Kroyer T., Zimmermann B., and Urfel U., Inverted ITO- and PEDOT: PSS-Free Polymer Solar Cells with High Power Conversion Efficiency, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **117**, 98–102, 2013.
- Gao C., Wu H., Que W., and Wei W., The Performance of New Polymer Solar Cells Based on Thiophene and Thienyl-quinoxaline with the Post Treatments, *Mater. Lett.*, **122**, 74–77, 2014.
- Cai W., Gong X., and Yong Cao Y., Polymer Solar Cells: Recent Development and Possible Routes for Improvement in the Performance, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **94**, 114–127, 2010.
- Ebrahim S., Abdel-Fattah T.M., Soliman M., and Hafez M., Novel Organic Solar Cell Based on Polyaniline-Carbon Nanotubes Composite, ECS transactions, *220th ECS Meeting*, Boston, MA, October 9-14, **41**, 135-140, 2011.
- Facchetti A., Polymer-Donor-Polymer Acceptor (All-polymer) Solar Cells, *Mater. Today*, **16**, 123–132, 2013.
- Kietzke T., Recent Advances in Organic Solar Cells Advances in Opto-electronics, 2007, 15 pages, 2007, doi: 10.1155/2007/40285

22. Brabec C.J., Sariciftci N.S., and Hummelen J.C., Plastic Solar Cells, *Adv. Funct. Mater.*, **11**, 15-26, 2001.
23. Semiconducting Polymers; Chemistry, Physics and Engineering, Hadziioannou G. and vanHutten P.F. (Eds.), Wiley-VCH, Germany, 88-91, 1999.
24. Liao K.S., Yambem S.D., Haldar A., Alley N.J., and Curran S.A., Designs and Architectures for the Next Generation of Organic Solar Cells, *Energies*, **3**, 1212-1250, 2010.
25. Gunes S., Neugebauer H., and Sariciftci N.S., Conjugated Polymer-Based Organic Solar Cells, *Chem. Rev.*, **107**, 1324-1338, 2007.
26. Mazaheri M. and Landarani A., <http://edu.nano.ir/paper/68> (available in 15 February 2018).
27. European Photovoltaic Industry Association (EPIA), Solar Generation 6: Solar Photovoltaic Energy Empowering the World, EPIA, Brussels <http://www.greenpeace.org/international/Global/international/publications/climate/2011/Final%20SolarGeneration%20VI%20full%20report%20lr.pdf> (available in 15 February 2018).
28. Huang Y.C., Cha H.C., Chen C.Y., and Tsao C.S, Morphological Control and Performance Improvement of Organic Photovoltaic Layer of Roll-to-Roll Coated Polymer Solar Cells, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **150**, 10-18, 2016.
29. Krebs F.C., Gevorgyan S.A., and Alstrup J., A Roll-to-Roll Process to Flexible Polymer Solar Cells: Model Studies, Manufacture and Operational Stability Studies, *J. Mater. Chem.*, **19**, 5442-5451, 2009.
30. Søndergaard R.R., Hösel M., and Krebs F.C., Large-Area Processing of Organic Photovoltaics, in *Organic Solar Cells: Fundamentals, Devices, and Upscaling*, Rand B.P. and Richter H (Eds.), CRC, Taylor and Francis, USA, 639-660, 2014.
31. Kazemifard S., Naji L, Afshar Taromi F., and Fakhara Z., Polymer Solar Cells and Their Performance Mechanism and Characterization (Persian), *Polymerization*, **6**, 44-54, 2015.
32. Mahmoudi S., Naji L., and Kazemifard S., An Introduction to Poly(3,4-thiophene)ethylenedioxy-Polystyrene Sulfonate as a Hole Transporting Layer in Polymer Solar Cells (Persian), *Polymerization*, **7**, 13-25, 2017.
33. Aruvian's Research, Analyzing Organic Photovoltaics, 2016, <http://www.discoveryinvesting.com/blog/2014/7/15/case-study-of-a-growth-driver-silver-in-solar>, (available in 15 February 2018).
34. <http://www.greenchipstocks.com/report/investing-in-solar-forecasts-trends-leaders/717>, (available in 15 February 2018).
35. Søndergaard R., Hösel M., Angmo D., Larsen-Olsen T.T., and Krebs F.C., Roll-to-Roll Fabrication of Polymer Solar Cells, *Mater. Today*, **15**, 36-49, 2012.
36. Global Building Integrated Photovoltaic: 2014-2022, Aim Market Insight, November 2016.