

مروری بر عملکرد سلول خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا دارای پلیمرهای شفاف

مژگان حسین‌نژاد*

استادیار، الف) گروه پژوهشی مواد رنگزای آلی؛ ب) قطب علمی رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵۴.

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۲/۱۰ تاریخ بازبینی نهایی: ۹۹/۰۱/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۱/۲۴ در دسترس به صورت الکترونیک: ۹۹/۰۳/۲۱

چکیده

دستگاه‌های فوتوولتائیک پلیمری به دلیل وزن کم، دوست‌دار محیط‌زیست بودن و سهولت فرآیندپذیری به عنوان یک منبع سبز برای تولید انرژی مورد توجه قرار دارند. به ویژه افزاره‌های فوتوولتائیک پلیمری شفاف به دلیل پتانسیل منحصربه‌فرد آن‌ها در زمینه افزایش برداشت نور خورشید توجه بیشتری را به خود جلب کرده‌اند. کوپلیمرهای نوع p با ساختار D-A به عنوان مواد حساس به نور جدید تهیه شده‌اند تا به صورت موفقیت‌آمیز طیف جذبی را به ناحیه IR منتقل کرده و در نتیجه ایجاد شفافیت کند. بخش مهمی از تحقیقات بر روی افزاره‌های فوتوولتائیک پلیمری شفاف بر روی ساخت الکتروود متمرکز شده است. کوپلیمر PEDOT:PSS، نقره در اندازه نانو، بلورهای فوتونی یک‌بعدی و لایه‌های انتقال دهنده بر پایه کربن، گزینه‌های مناسبی برای الکترودهای شفاف قابل قبول هستند. در بین این مواد، لایه‌های بازتابنده کامپوزیتی مانند ساختارهای بلوری فوتونیک به دلیل طیف بازتابنده قابل تنظیم برای ساخت سلول‌های فوتوولتائیک پلیمری شفاف بسیار مناسب هستند که می‌توانند هم‌زمان پراکنش و انتقال نور را کنترل کنند. هدف از این مقاله، معرفی و تشریح افزاره‌های پلیمری فوتوولتائیک شفاف و عوامل موثر بر عملکرد آن‌ها است. درانتهای مقاله مختصری درباره فرصت تجاری‌سازی سلول‌های خورشیدی پلیمری بحث می‌شود.

واژه‌های کلیدی

سلول خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا، الکتروود شفاف، PEDOT:PSS، بلورهای فوتونی، کوپلیمرهای نوع p.

چکیده تصویری





Review on Dye-sensitized Solar Cells Performance Contain Transparent Polymers

Mozhgan Hosseinezhad ^{a, b *}

- a) Department of Organic Colorants; Institute for Color Science and Technology, Tehran, P. O. Box. 16765-654.
b) Center of Excellence for Color Science and Technology, Institute for Color Science and Technology, Tehran, P. O. Box. 16765-654.

Abstract

Polymeric photovoltaic devices are considered as a green source for energy production because of their low weight, environmental friendly and ease of process. Particularly, transparent polymer photovoltaic devices have attracted more attention because of their unique potential for increasing sunlight absorption. P-type copolymers with D-A structure have been developed as new light-sensitive materials to successfully transmit the absorption spectrum to the IR region, thereby creating transparency. Much of the research focus in transparent organic photovoltaics (TOPV) is on the electrode. PEDOT:PSS copolymer, thin silver, 1D photonic crystal, and other carbon-based transporting layers have proved to be good candidates for transparent electrodes. Among these materials, the composite mirror layers, such as photonic crystal structures, are more favorable in transparent organic photovoltaics because of their tunable reflection spectra that can control both the transmittance and color rendering. The purpose of this paper is to introduce and illustrate transparent photovoltaic polymer devices and the factors affecting their performance. Finally, some brief performance and outlook of the transparent organic photovoltaics are presented.

Keywords

Dye-sensitized solar cells, Transparent electrode, PEDOT:PSS, Photonic crystal, p-type copolymers.

Graphical abstract



۱- مقدمه

پایین بودن بازده به کندی پیشرفت کرده است. اخیراً به دلیل پیشرفت‌های سریع در نیمه‌هادی‌های جدید و الکترودهای متنوع شفاف، مطالعات در این حوزه افزایش یافته است [۶، ۷]. در این مقاله مروری بر توسعه و پیشرفت سلول‌های خورشیدی آلی (پلیمری) فوتوولتائیک شفاف، مواد و برنامه‌های بالقوه برای افزایش بازده ارائه شده است.

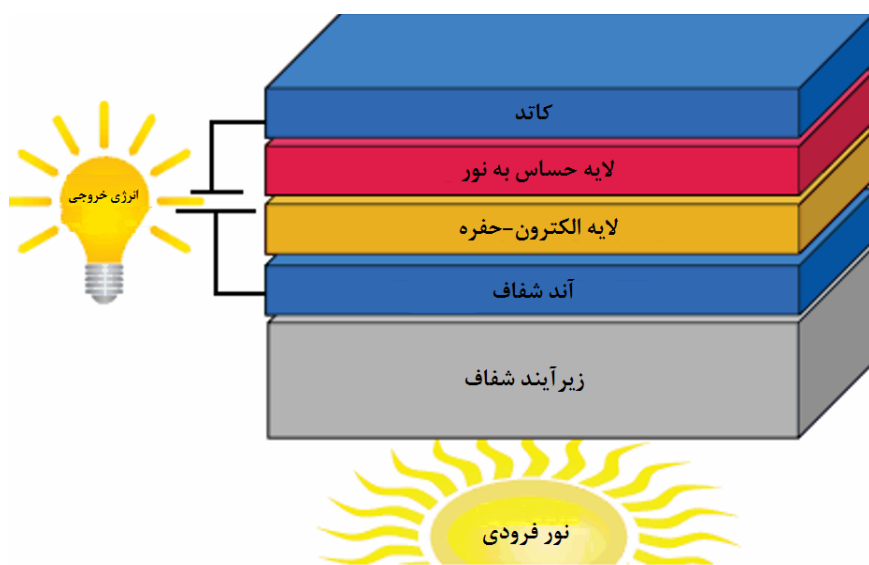
۲- سلول‌های خورشیدی آلی

سلول‌های خورشیدی آلی یک فناوری سبز برای کاربرد انرژی خورشیدی بوده که به دلیل تنوع در ساختارهای قابل اصلاح، انعطاف‌پذیری بالا و امکان تولید پنجره‌های تولیدکننده انرژی مورد توجه هستند. اولین سلول خورشیدی پلیمری از دو لایه شامل مولکول‌های کوچک مزدوج با بازده در حدود ۱٪ تهیه گردید. از آن پس تحقیقات زیادی در این حوزه انجام شده و یا در حال انجام است اما هدف اصلی تمام این پژوهش‌ها افزایش بازده این دستگاه‌ها می‌باشد. بازده این افزاره‌ها با استفاده از روش‌هایی مانند استفاده از فلورن به عنوان گروه‌های الکترون‌گیرنده و افزایش محدوده جذب، افزایش چشمگیری یافته است. البته ثبات سلول خورشیدی پلیمری به اندازه بازده آن دارای اهمیت است، زیرا هزینه ناشی از تخریب و جایگزینی پی‌درپی، می‌تواند تولید انرژی را محدود نماید [۸]. یورگنسن^۲ و همکارانش [۹] به صورت منظم مطالعات تخریب و تثبیت سلول‌های خورشیدی آلی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که عوامل اصلی که سبب بهبود چشمگیر ثبات می‌شوند عبارتند از: استفاده از مواد پلیمری پایدار در لایه فوتوآند، تهیه ساختار معکوس سلول خورشیدی پلیمری، استفاده از الکترودهای فلزی پایدار، تغییرات و بهینه‌سازی ریخت و درک چگونگی سازوکار تخریب و تعدیل آن.

امروزه، منابع مرسوم تولیدکننده انرژی، سوخت‌های فسیلی مانند نفت و گاز است که چالش‌های زیادی مانند آلاینده‌گی شدید محیط‌زیست را به همراه دارند. به همین دلیل استفاده از انرژی زیست‌سازگار خورشیدی مورد توجه قرار گرفته است. در دو دهه گذشته انواع افزاره‌های فوتوولتائیک پلیمری بر پایه ساختار بالک-هتروژن^۱ به دلیل ویژگی‌هایی مانند وزن پایین، دوست‌دار محیط‌زیست بودن و سهولت فرآیندپذیری، به عنوان یک گزینه نویدبخش برای تولید انرژی پاک در نظر گرفته شده‌اند [۱]. یکی از ویژگی‌های مهم این فناوری امکان حذف حلال و در نتیجه تولید دستگاه‌های فوتوولتائیک بر روی بسترهای قابل‌انعطاف در اندازه‌های بزرگ با تجهیزات ساده و کم هزینه است [۲]. بالاترین بازده این دستگاه‌ها در حدود ۱۲٪ گزارش شده است که پیش‌بینی می‌شود با استفاده از مواد جدید و بهینه‌سازی ریخت بهبود یابد [۳]. به دلیل ماهیت اوربیتال‌های مولکولی، طیف جذبی نیمه‌هادی‌های آلی مانند نیمه‌هادی‌های معدنی نیست. این موضوع سبب محدودیت در انتخاب پلیمر مناسب با بیشینه جذب نور فرودی، برای ساخت دستگاه‌های فوتوولتائیک می‌گردد. برای ساخت دستگاه‌های فوتوولتائیک آلی نیاز به یک لایه شفاف در ناحیه مرئی، ضروری است. کارایی دستگاه‌های فوتوولتائیک از جمله سلول‌های خورشیدی آلی، تحت شرایط نور AM 1.5G که معادل نور خورشید است، ارزیابی می‌شود. ۵۱ درصد از انرژی این طیف مربوط به انرژی زیرقرمز است. در نتیجه بازده تئوری افزاره‌های پلیمری فوتوولتائیک، تنها با جذب انرژی زیرقرمز قادر خواهد بوده که بازده خود را نسبت به دستگاه‌های مشابه بهبود دهد [۴]. اگرچه از دهه ۱۹۹۰ توجه به دستگاه‌های فوتوولتائیک پلیمری معطوف گردید اما پتانسیل تهیه نوع شفاف آن از سال ۲۰۰۶ محقق گردید. تصویر شمایی سلول خورشیدی پلیمری شفاف در شکل ۱ نشان داده شده است [۵]. در دهه گذشته توسعه دستگاه‌های پلیمری شفاف به دلیل

² Jørgensen

¹ Bulk-heterojunction (BHJ)



شکل ۱- شمایی از سلول خورشیدی پلیمری شفاف [۵].

مقاله

این ماده دارای یک ساختار مزدوج با برهم کنش‌های قوی $\pi-\pi$ است. به علاوه، گروه لاکتام این ماده دارای اثر الکترون گیرندگی قوی بوده که منجر به افزایش تمایل به الکترون دهندگی بالا DPP می‌گردد، در نتیجه سطوح انرژی LUMO و HOMO این ترکیب بسیار پایین خواهد بود [۱۰]. هیو و همکارانش یک سری پلیمر بر پایه DPP برای افزایش فوتون در محدوده نزدیک زیرقرمز سنتز نمودند و در ساختار سلول خورشیدی اعمال نمودند و بازده ۴/۵ درصد را به دست آوردند [۱۱، ۱۲].

با جایگزینی اتم‌های اکسیژن واحد بنزوتیوفن با تینیل بنزودی تیفن (BDTT) سطوح انرژی HOMO و LUMO کاهش می‌یابد (شکل ۲). این طراحی یک آرایش الکترون گیرنده قوی-الکترون دهنده ضعیف بوده که برای دستیابی به هر دو ویژگی لبه باند کم و ولتاژ مدار باز بزرگ، کاربردی است. مولکول تهیه شده بدون کاهش قدرت انتقال و جداسازی اگزیتون، منجر به افزایش ولتاژ مدار باز می‌شود. پنهان باند نوری این پلیمر در حدود ۱/۴۴ الکترون ولت می‌باشد. بازده سلول خورشیدی شفاف تهیه شده با این پلیمر و الکتروود مقابل نقره در حدود ۴٪ و شفافیت افزاره در حدود ۶۱٪ گزارش گردید [۱۳]. استفاده از سلنیم در بخش الکترون گیرنده این پلیمر، سبب بهبود بیشتر بازده و جذب بالاتر در ناحیه زیرقرمز، می‌شود، این پدیده به دلیل برهم کنش هترو حلقوی قوی‌تر سلنیم نسبت به گوگرد که ناشی از بزرگ‌تر بودن اندازه آن است، می‌باشد. بنابراین پلیمر PBDTT-SeDPP که با جایگزینی اتم سلنیم به جای اتم گوگرد پلیمر PBDTT-DPP تهیه شده، دارای باند گپ کمتر و تحرک انتقال بار بیشتر خواهد بود (شکل ۲) [۱۴]. بازده سلول خورشیدی تهیه شده با پلیمر PBDTT-SeDPP در حدود ۴/۶ درصد و میزان شفافیت آن در حدود ۶۳ درصد می‌باشد [۱۵].

یکی از ساختارهای سلول‌های خورشیدی پلیمری پایدار استفاده از الکتروود کاتد آلومینیم-تیتانیوم و الکتروود آنند ITO است. سلول خورشیدی تهیه شده با این ساختار در حدود یک سال در دمای محیط و در معرض هوا، پایدار است [۸]. سلول‌های خورشیدی آلی از پنج الی شش لایه مختلف تشکیل می‌شود که بر روی یک سطح مانند شیشه یا پلیمر شفاف قرار داده می‌شوند. این لایه‌ها عبارتند از: یک الکتروود شفاف رسانا، یک لایه الکترون-حفره، یک یا دو لایه حساس به نور شامل یک بخش الکترون دهنده و الکترون گیرنده (بیش از ۲۰۰ نوع کوچک مولکول یا نیمه‌هادی آلی الیگومر برای این منظور شناسایی شده‌اند)، یک لایه انتقال الکترونی و یک الکتروود کاتد. سلول خورشیدی آلی برای تولید فوتوجریان، باید بر مواردی غلبه کند که عبارتند از: تحرک کم یا عدم تحرک حامل‌ها در نیمه‌هادی‌ها، باز ترکیب بارهای تهییج یافته در فصل مشترک بخش الکترون دهنده-الکترون گیرنده، طول انتشار پایین اگزیتون‌ها در نیمه‌هادی‌های آلی، جذب موثر فوتون ورودی و خنک کردن اگزیتون‌های داغ انتقال بار در فصل مشترک بخش الکترون دهنده-الکترون گیرنده [۸].

۳- مواد پلیمری فوتولتائیک شفاف

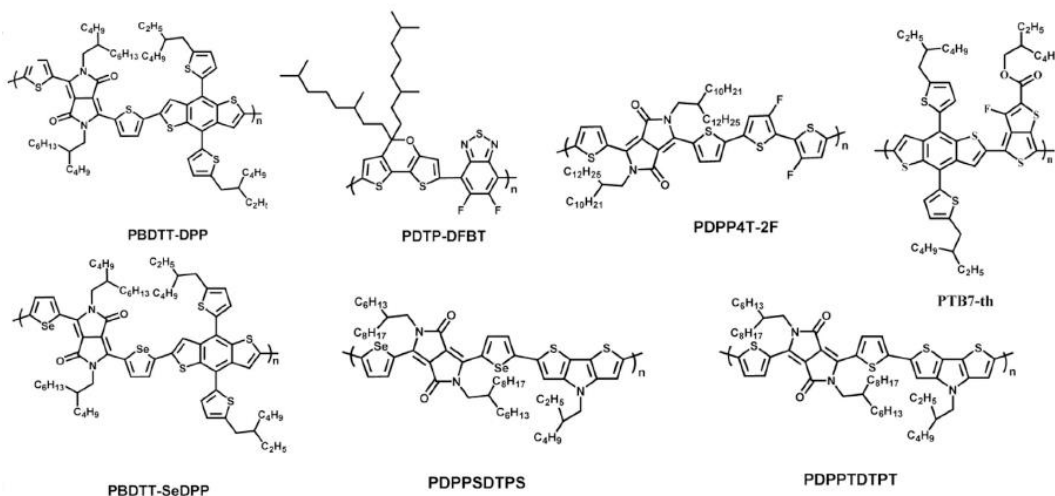
۳-۱- پلیمرهای الکترون دهنده

مواد پلیمری قابل استفاده در افزاره‌های فوتولتائیک شفاف در جدول ۱ فهرست شده‌اند. برخی از پلیمرهای آلی شفاف مرسوم مورد استفاده به عنوان بخش الکترون دهنده در شکل ۲ نشان داده شده است. دی‌کتوپیرولوپیرول (DPP)^۱ یک ترکیب قرمز بوده که به صورت گسترده در مرکب‌ها، افزاره‌های الکترو لومینسانس و ترانزیستورها استفاده می‌شود.

^۱ Diketopyrrolopyrrole (DPP)

جدول ۱- مواد مورد استفاده برای افزاره‌های فوتولتائیک پلیمری شفاف و زیرقرمز [۱۲].

ساختار افزاره	J_{sc} (mAcm ⁻²)	V_{oc} (mV)	FF	η (%)	لایه شفاف
PBDTT-DPP:PC61BM	۹/۳	۰/۷۷	۵۶/۲	۴/۰	AgNW
PDTP-DFBT:PC71BM	۱۸/۰	۰/۷۰	۶۳/۴	۸/۰	Ca/Al
PDPP4T-2F:PC71BM	۱۵/۹	۰/۷۹	۶۵/۸	۸/۲	MoO ₃ /Al
PBDTT-SeDPP:PC61BM	۱۰/۹	۰/۷۳	۵۸/۰	۴/۶	TiO ₂ /AgNW
PDPPSDTPS:PC61BM	۱۶/۷	۰/۳۵	۵۲/۰	۳/۱	MoO ₃ /Ag
PDPPTDTP:PC61BM	۱۷/۳	۰/۴۵	۵۷/۰	۴/۴	MoO ₃ /Ag
PTB7-Th:ITIC	۱۴/۲	۰/۸۱	۵۹/۱	۶/۸	TiO ₂ /AgNW
PTB7-Th:IHIC	۱۹/۰	۰/۷۵	۶۸/۱	۹/۸	MoO ₃ /Au(1)b/Ag(15)
PBDTTT-E-T:IEICO	۱۷/۷	۰/۸۲	۵۸/۰	۸/۴	PFN-Br/Al
PTB7-Th:IEICO-4F	۲۲/۸	۰/۷۴	۵۹/۴	۱۰/۰	PFN-Br/Al
P3HT:PC61BM	۹/۷	۰/۵۶	۵۸/۶	۴/۷	M-PEDOT:PSS/ITO
PCPDTFBT:PC71BM	۱۱/۴	۰/۷۴	۶۰/۲	۵/۰	M-PEDOT:PSS/Ag(10)
pDPP5T-2:PC61BM	۸/۵	۰/۵۶	۶۸/۰	۲/۹	ZnO/AgNW
PTB7:PC71BM	۱۰/۷	۰/۷۲	۵۷/۰	۵/۲	BCP/PC-thin-Ag(10)
PIDT-PhanQ:PC71BM	۵/۸	۰/۷۹	۴۲/۰	۲/۶	surfactant/Ag(10)
PSBTBT:PC71BM	۱۰/۷	۰/۶۱	۶۱/۰	۲/۸	LiCoO ₂ /Al/ZnO:Al
PBDTTT-C-T:PC71BM	۹/۳	۰/۷۵	۶۳/۱	۴/۳	MoO ₃ /Ag(6)
PCDTBT:PC71BM	۹/۶	۰/۸۷	۶۳/۱	۵/۳	WO ₃ /Ag/1DPC



شکل ۲- پلیمرهای الکترون دهنده برای سلول‌های فوتوولتائیک پلیمری شفاف [۱۲].

و سطوح انرژی مناسب و قابل تنظیم با پلیمرهایی مانند PTB7-TH می‌باشند. فیلم پلیمر نهایی PTB7-TH:ITIC تهیه شده به دلیل طیف جذبی پهن، انتقال بار متعادل، خواص الکترون دهنده/کشندگی خوب و اندازه فازی مناسب، بازدهی معادل ۶/۸ درصد در ساختار سلول خورشیدی نشان داده که از بازده سلول خورشیدی پلیمری شاهد بر پایه PTB7-TH:PC61BM با عملکرد ۶/۰۵ درصد بالاتر است. نتایج نشان می‌دهد که ساختار تهیه شده برای توسعه سلول‌های خورشیدی پلیمری عاری از فلورن بسیار مناسب هستند [۱۸].

یکی از مولکول‌های مورد استفاده برای سنتز پلیمرهای شفاف اینداسنودی تیوفن (IDT) بوده که دارای ویژگی مسطح بودن خوب است. در صورت جایگزینی این واحد با تینو [۲، ۳-b] تیوفن، توانایی الکترون دهنده/کشندگی و مسطح بودن مونومر افزایش یافته که سبب تولید یک پلیمر با زنجیره‌های مزدوج طولانی و قابلیت انتقال بار قوی و مطلوب برای کاربردهای فوتوولتائیک می‌گردد. وانگ و همکارانش با استفاده از این واحد یک گروه الکترون گیرنده عاری از فلورن تحت عنوان IHIC تهیه نمودند (شکل ۶). فیلم نازک تهیه شده از IHIC جذب قوی در ناحیه ۶۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر و یک لبه باند در حدود ۱/۳۸ الکترون ولت دارد. سطوح انرژی HOMO و LUMO مربوط به IHIC به ترتیب ۵/۵- و ۳/۹ الکترون ولت تخمین زده شده است که نشان می‌دهد این ترکیب برای کاربرد به عنوان گروه الکترون گیرنده در سلول‌های خورشیدی پلیمری شفاف بسیار مناسب است. پلیمر PTB7-Th تهیه شده با این واحد در سلول خورشیدی اعمال شده و بازده ۹/۸ درصد را ارائه می‌دهد [۱۹].

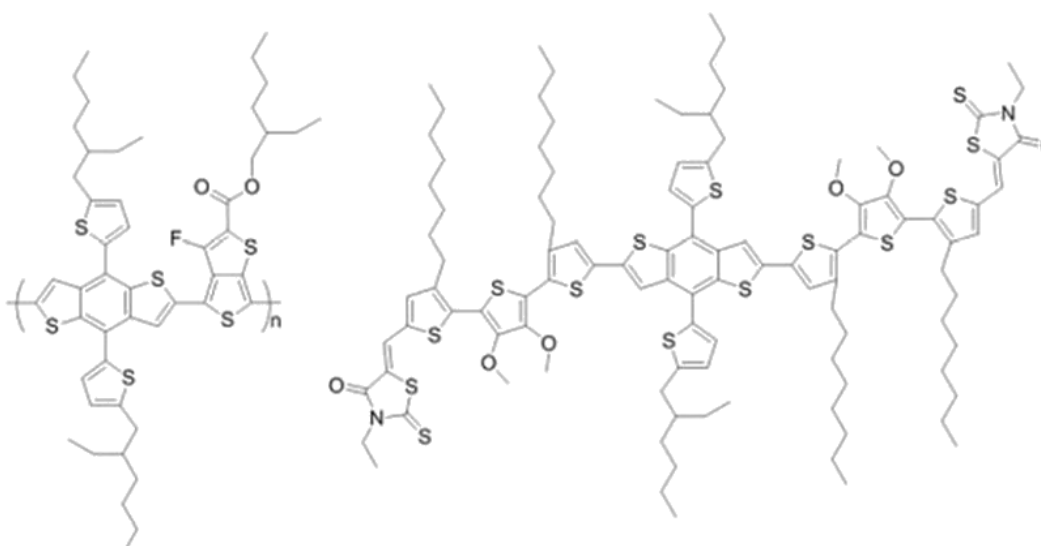
لی و همکارانش پلیمر BT-CIC را که شامل چهار اتم کربن در گروه انتهایی INCN متصل به واحد الکترون دهنده قوی بنزو تیوفن را سنتز نمودند. اتم‌های کلر با افزایش امکان انتقال بار درون مولکولی و برهم‌کنش‌های بین مولکولی، سبب کاهش لبه باند می‌شوند. باند گپ و بیشینه طول موج جذب این ترکیب به ترتیب ۱/۳ الکترون ولت و ۹۵۰ نانومتر است. سلول خورشیدی پلیمری شفاف تهیه شده بر پایه این ترکیب به ترتیب دارای بازده و فوتوجریان معادل ۷/۱ درصد و $22/5 \text{ mAcm}^{-2}$ است [۲۰].

یک سلول خورشیدی پلیمری باید دارای خواص بلوری خوبی باشد تا قابلیت جداسازی فازی مطلوبی بین بخش الکترون گیرنده و الکترون دهنده فراهم شود [۱۶]. برای کسب شکل بلوری خوب، ضمن حفظ قابلیت پردازش مناسب، یک طرح پلیمری PDPP4T پیشنهاد شده است که دارای یک واحد DPP و چهار گروه تیوفن به عنوان بخش الکترون دهنده در بدنه مولکول و همچنین زنجیره‌های بلند آلکیل متصل به واحد DPP برای حلالیت عالی باشد. گرازینگ و همکارانش، ساختاری با این ویژگی‌ها سنتز نموده که سلول خورشیدی تهیه شده با آن بازدهی در حدود ۸/۲ درصد نشان داد [۱۱]. علاوه بر این ساختار، گروه‌های تحقیقاتی دیگر ساختار پلیمری شفاف دارای ساختار الکترون گیرنده قوی-الکترون دهنده قوی با استفاده از گروه‌های الکترون دهنده مثل دی‌تینوپیران، سیکلوپنتادی تیوفن و بنزو تیوفن را تهیه و در ساختار سلول خورشیدی اعمال نمودند. بازده افزاره تولید شده در حدود ۸ درصد گزارش شد. ساختار پلیمر سنتز شده در شکل ۳ نشان داده شده است [۱۷].

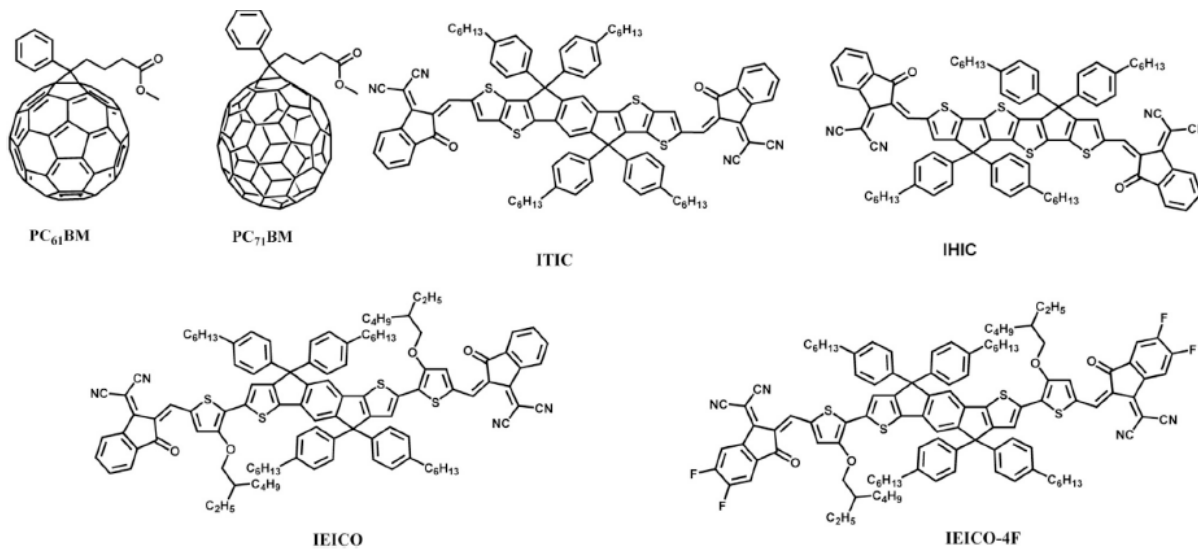
۲-۳- گروه‌های الکترون گیرنده کوچک مولکول

فولرین و مشتقات آن به دلیل پردازش آسان و خواص انتقال الکترون عالی، یک گزینه مناسب برای کاربرد در افزاره‌های پلیمری شفاف هستند اما توسعه آن‌ها به دلیل ساختار توده‌ای و سختی تنظیم طیف جذبی آن‌ها به کندی پیش رفته است. بنابراین برای طراحی و ارائه ترکیبات الکترون گیرنده جدید، علاوه بر خواص انتقال الکترون خوب، باید به خواص ساختاری و جذبی نیز توجه شود. به عنوان مثال، حلقه‌های جوش خورده حلقوی دارای ساختار مزدوج طولانی که به دلیل برهم‌کنش‌های $\pi-\pi$ ، دارای توانایی انتقال بار موثر هستند، برای تهیه گروه‌های الکترون گیرنده کوچک پیشنهاد می‌شوند. در شکل ۴، نمونه‌های از گروه‌های الکترون گیرنده کوچک مولکول نشان داده شده است [۱۱].

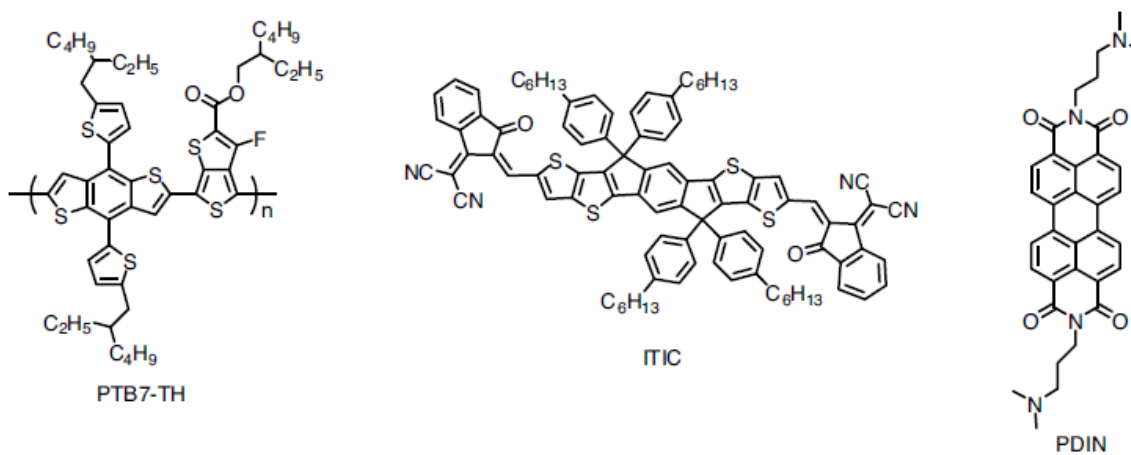
لین و همکارانش یک گروه الکترون گیرنده جدید (ITIC) بر پایه هسته حلقوی جوش خورده با واحدهای انتهایی ۲-(۳-اکسو-۳،۲-دی‌هیدروایندن-۱-یلیدن) مالونونیتریل طراحی و سنتز نمودند (شکل ۵). گروه ITIC دارای طیف جذبی قوی و پهن در ناحیه مرئی و زیرقرمز نزدیک



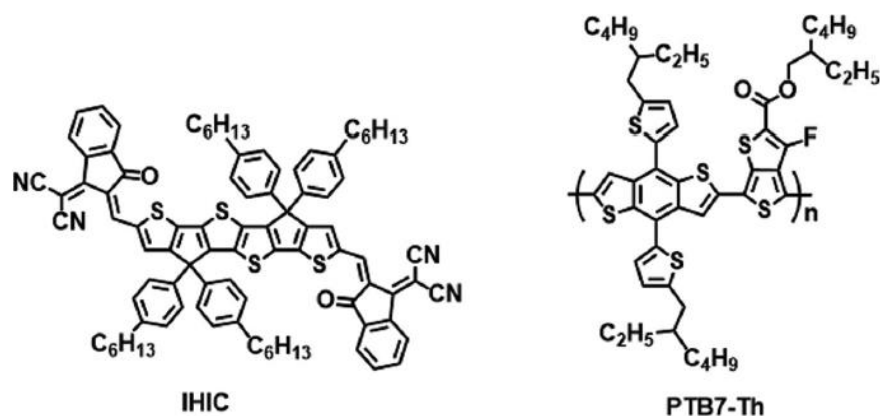
شکل ۳- ساختار پلیمر با ساختار الکترون گیرنده قوی-الکترون دهنده قوی [۱۴].



شکل ۴- ساختار گروه‌های الکترون گیرنده کوچک مولکول برای کاربرد دستگاه‌های فوتوولتائیک شفاف [۱۱].



شکل ۵- ساختار شیمیایی پلیمر عاری از فلورن و واحد الکترون گیرنده جدید [۱۸].



شکل ۶- ساختار شیمیایی گروه IHIC و پلیمر PTB7-Th [۱۹].

۴- الکترودهای شفاف

پلیمریزه گردید و در سلول خورشیدی اعمال شد. افزاره تهیه شده با این الکترودهای شفاف، بازدهی در حدود ۵/۹۷ درصد نشان داد [۲۳]. لایه‌های پلی‌آلفانفتیل آمین به عنوان الکترودهای مقابل انعطاف‌پذیر تهیه و در سلول خورشیدی اعمال گردید. ضخامت لایه تهیه شده در حدود ۱/۷۶ میکرومتر بوده و بازده سلول خورشیدی در حدود ۱/۹۹ درصد است [۲۴].

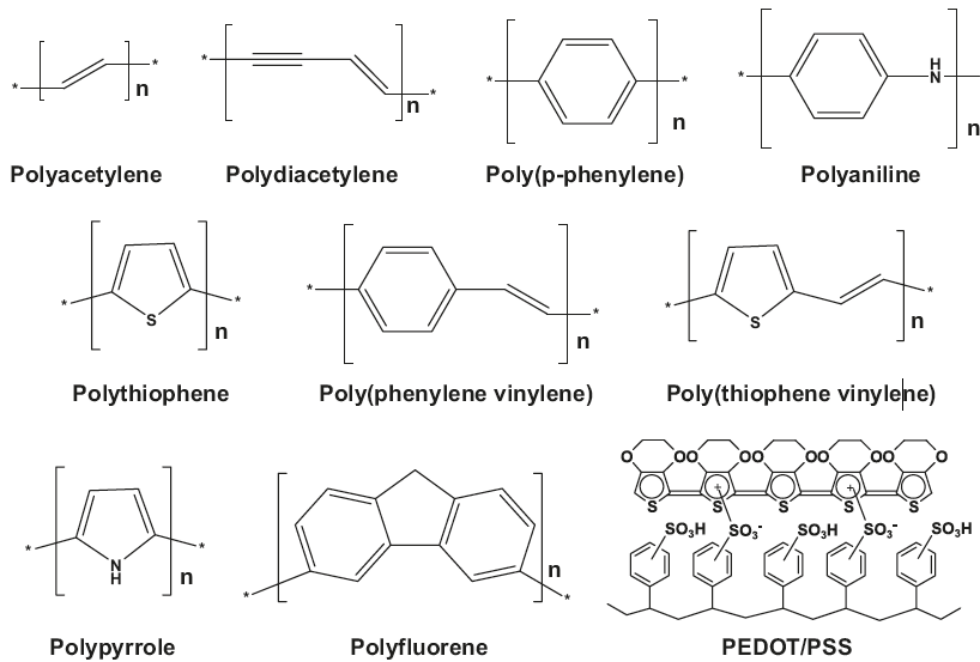
پلیمرهای رسانا به دلیل قدرت مکانیکی بالا و پایداری نوری و الکتریکی در حین تولید، به عنوان جایگزین بالقوه ITO در بسیاری از افزاره‌های الکترونیکی و اپتوالکترونیکی به ویژه برای دستگاه‌های منعطف بسیار مورد توجه هستند. پلی‌تیوفن، به ویژه پلی (۳،۴-اتیلن‌دی‌اکسی‌تیوفن) (PEDOT) به طور گسترده به عنوان آند مورد استفاده هستند. مشکل حلالیت توسط پلیمریزاسیون PEDOT با پلی (استایرن اسید سولفونیک) (PSS) و تهیه PEDOT/PSS حل می‌شود. این ترکیب یک پلی‌الکترولیت محلول در آب با ویژگی‌های تشکیل فیلم خوب، رسانایی بالا، انتقال نور مرئی بالا و پایداری عالی ارائه می‌دهد. فیلم PEDOT/PSS می‌تواند بدون تغییر چشمگیر در رسانایی در هوا تحت ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد برای ۱۰۰۰ ساعت حرارت داده شود [۲۵، ۲۱]. این فیلم برای کاربرد در سلول خورشیدی در تحقیقات متعددی گزارش شده است، به عنوان مثال احمد و همکارانش با استفاده از این فیلم، بازده ۷/۱۶ درصد را به دست آوردند [۲۶].

۵- کاربردها

ماژول‌های فوتوولتائیک شفاف را می‌توان در چندین حوزه مهم از حسگرهای داخلی برای سیستم اینترنت تا ساخت سیستم‌های فوتوولتائیک یک‌پارچه به کار برد. توجه به این نکته ضروری است که در کاربردهای داخل محیط کار یا منزل، افزاره باید حساس به نور کم باشد و معمولاً انرژی کمی تولید می‌کند. در مقابل، سیستم‌های فوتوولتائیک یک‌پارچه قابلیت استفاده در سقف و پنجره‌ها را داشته که با جذب نور آفتاب در فضای باز، می‌تواند انرژی بیشتری فراهم کند. در کاربردهای فضای بسته، بازدهی افزاره‌های پلیمری شفاف معادل انواع معدنی بوده اما به دلیل پایداری نوری کمتر ترکیبات آلی نسبت به مواد معدنی، عمر این دستگاه‌ها نیز کمتر خواهد بود. در مقابل بازدهی افزاره‌های فضای باز بیشتر است.

اغلب دستگاه‌های اپتوالکترونیک مانند OLED، LCD و سلول‌های خورشیدی نیاز به الکترودهای رسانا و شفاف دارند. فیلم نازک ایندیم اکسید قلع (ITO) پوشش داده شده بر روی زیرآیند شیشه به صورت گسترده به عنوان الکترودهای شفاف با رسانایی بالا، در بسیاری از افزاره‌های اپتوالکترونیک استفاده می‌شود. اما این فیلم‌ها دارای معایبی نیز می‌باشد که عبارتند از: قیمت بالا (ایندیم یک عنصر نادر و گران قیمت طبیعی است)، فرآیندپذیری مشکل (نیاز به دمای بالا برای تولید یک پوشش با کیفیت بر روی شیشه دارد) و شکنندگی و عدم کاربرد در افزاره‌های منعطف. در نتیجه تحقیقات زیادی برای تولید و توسعه الکترودهای شفاف جدید و ارزان قیمت، به ویژه الکترودهای پلیمری که قابلیت استفاده در دستگاه‌های منعطف را دارند، در حال انجام است [۲۱].

از دیرباز ویژگی‌های عایق انواع پلیمرها بر همگان روشن بود اما برای اولین بار در سال ۱۹۷۶، پلی‌استیلن به عنوان یک پلیمر رسانا توسط هگر معرفی گردید. از آن پس هزاران محقق شروع به تحقیق برای توسعه پلیمرهای رسانا پایدار با هزینه کم پردازش شدند که از آن میان، می‌توان به پلی‌استیلن، پلی‌سیانلین، پلی‌پیرول، پلی‌فنیل، پلی (فنیل‌وینیل) و پلی‌تیوفن اشاره نمود (شکل ۷). البته برخی از کوپلیمرها مانند پلی‌آنیلین دوپ شده با اسید سولفونیک کافور (CSA)، رسانایی در حد فلزات نشان می‌دهند. از میان پلیمرهای رسانا، پلی‌آنیلین و پلی‌پیرول برای کاربردهای حفاظت در برابر خوردگی، مواد ضدالکتریسته و حسگرهای نوری، کاربردهای صنعتی دارند. پلی‌فنیل و پلی (فنیل‌وینیل) به عنوان مواد نشر دهنده در دیودهای نورتاب مورد استفاده هستند. درحالی‌که مشتقات تیوفن با کنترل طیف نوری و شفافیت از طریق سازمان‌دهی زنجیر تیوفن، به عنوان مواد پاسخگو در ترانزیستورهای آلی و سلول‌های خورشیدی مورد مطالعه هستند [۲۱]. در تحقیقی دیگر نانوکامپوزیت‌های پلی‌آنیلین پوشانیده شده با اکسید گرافن احیایی از طریق پلیمریزاسیون امولسیون درجا و کاربرد آن به عنوان الکترودهای شمارنده برای سلول‌های خورشیدی حساس به ماده رنگزا گزارش شده است. سلول خورشیدی تهیه شده با این لایه دارای بازدهی در حدود ۳/۹ درصد است [۲۲]. یک منومر جدید، تحت عنوان بیس‌فنل DOT طراحی و در حلال‌های مختلف به صورت الکتروشیمیایی



شکل ۷- انواع پلیمرهای رسانا [۲۱].

انواع فناوری‌های فوتوولتائیک (تبدیل نور به جریان الکتریکی) هستند، طبیعی است که فرض شود، آن‌ها می‌توانند جایگزین فناوری‌های فوتوولتائیک موجود شوند. در این صورت فرصت‌های شغلی و تولیدی متعددی پدید می‌آید، زیرا بازار براساس دو عامل برنامه‌های کاربردی و مصرف‌کنندگان کنترل می‌شود. در حال حاضر کاربرد تجاری سلول‌های خورشیدی پلیمری بسیار محدود است. در این شرایط دو راه کار وجود دارد که عبارتند از: (۱) صبر کردن و (۲) بهره‌برداری از فناوری‌های موجود با هدف کشف بازارهای تازه. در این جا رویکرد دوم انتخاب می‌گردد و سوال آن خواهد بود که فرصت‌های تجاری فعلی چیست و چگونه باید توسعه پیدا کند تا همسو با تحولات مورد انتظار آینده باشد. محدوده بازده عملکرد فناوری‌های فوتوولتائیک کنونی از ۵ تا ۲۰ درصد است. بهترین بازده تایید شده سلول خورشیدی سیلیکونی بی‌شکل $9/5 \pm 0/3$ درصد بوده اما مقدار بازده استاندارد در مقیاس تجاری ۸-۵٪ بوده که قیمت آن ۲-۱/۲ دلار آمریکا به ازای یک متر است. میانگین بازده سلول‌های خورشیدی CdTe تجاری در دسترس در حدود ۱۱-۹ درصد بوده و قیمت آن حدود ۲/۳-۲/۵ دلار آمریکا به ازای یک وات برق تولیدی است. سلول‌های خورشیدی پلیمری باید از نظر هزینه و کارایی با این فناوری‌ها رقابت نمایند. تحقیقات نشان می‌دهد که بازده سلول‌های خورشیدی پلیمری در اندازه آزمایشگاهی از ۵ تا ۸ درصد متغیر است اما نوع تجاری آن با اندازه نیمه‌صنعتی بیشینه دارای بازده ۳٪ و قیمت ۱۲-۱۱ دلار آمریکا به ازای یک وات برق تولیدی است. جزئیات هزینه برای تهیه سلول خورشیدی پلیمری در اندازه آزمایشگاهی در جدول ۲ خلاصه شده است. چنین اعدادی باعث می‌شود، حتی بدون در نظر گرفتن طول عمر دستگاه، رقابت برای سلول‌های خورشیدی پلیمری در مقایسه با فناوری‌های کنونی بسیار سخت باشد.

از بین کاربردهای فضای باز، استفاده از سامانه‌های فوتوولتائیک پلیمری شفاف در حوزه کشاورزی و ساخت گلخانه‌ها به دلیل توانایی کنترل طیفی، مزایای بارزتری نسبت به ماژول‌های سنتی دارد. البته دستگاه‌های فوتوولتائیک می‌توانند برای جذب انرژی الکترومغناطیس در مناطقی از طیف که مورد استفاده نیستند یا کمتر استفاده می‌شوند، برای تسهیل فرآیند فوتوستنتز طراحی و تولید شوند. برای مثال ناحیه ۴۰۰-۵۰۰ نانومتر، برای استفاده گیاهان یک ناحیه مرزی است. در نتیجه سیستم فوتوولتائیک می‌تواند با جذب در این ناحیه، انرژی اضافی در گلخانه‌ها فراهم کند. بنابراین از این فناوری برای بهره‌وری بیشینه از انرژی خورشیدی استفاده می‌شود. در نتیجه، یک گلخانه ایده‌آل باید کمینه ۵۰-۲۰ درصد شفافیت در برابر نور مرئی خورشید (در ناحیه ۴۰۰-۷۰۰ نانومتر) داشته باشد. بنابراین کاربرد ترکیبات جذب در ناحیه مرئی و نزدیک زیرقرمز از اهمیت بالایی برخوردار خواهد بود. آن‌ها می‌توانند از طریق طراحی مولکولی، محدوده جذب را تغییر دهند و به راحتی با بسترهای قابل انعطاف سازگار باشند درحالی‌که هنوز دارای انتقال خوب در ناحیه مرئی بوده و بازده آن در مقایسه با سیستم معدنی قابل قبول است. به بیان دیگر، سامانه‌های فوتوولتائیک پلیمری شفاف می‌توانند مواد فعال با جذب مکمل را برای دستیابی به تولید برق بیشتر در زمان مشابه را نسبت به سامانه‌های معدنی فراهم کنند. افزوده‌های پلیمری با جذب در ناحیه نزدیک قرمز می‌توانند بازده عملکرد را نسبت به مواد دارای جذب در ناحیه مرئی به میزان ۱۰ درصد افزایش دهند. نمایی از گلخانه‌های مجهز به سامانه فوتوولتائیک شفاف در شکل ۸ نشان داده شده است [۲۷، ۲۸].

۶- فرصت‌های تجاری‌سازی سلول‌های خورشیدی پلیمری

از آنجاکه سلول‌های خورشیدی پلیمری قادر به ارائه عملکردی مشابه



شکل ۸- نمایی از گلخانه‌های مجهز به سیستم فوتولتائیک پلیمری شفاف [۲۷، ۲۸].

جدول ۲- ساختار هزینه برای تهیه سلول خورشیدی پلیمری [۲۹].

تصویر	مجموع (€)	قیمت فرایند (€)	قیمت مواد (€)	مواد
	۲/۸۱۸۸	۰/۲۱۱۱۱	۲/۶۰۷۷	PET-ITO
	۰/۲۲۴۹	۰/۱۶۶۶۷	۰/۱۰۵۸۲	ZnO
	۰/۶۱۵۹	۰/۱۶۶۶۷	۰/۴۴۹۲	P3HT-PCBM
	۰/۳۹۷۸	۰/۱۶۶۶۷	۰/۲۳۱۱	PEDOT:PSS (EL-P5010)
	۰/۵۷۸۷	۰/۱۶۶۶۷	۰/۴۱۲۰	الکترو د نقره
	۰/۴۸۹۲	۰/۰۳۱۷۳	۰/۴۵۷۵	ماده سدکننده
	۰/۲۲۳۶	۰/۰۳۱۷۳	۰/۱۹۱۹	چسب حساس به فشار
	۰/۳۴۹۱	۰/۹۴۱۲	۴/۴۰۷۸	مجموع

متمرکز شده است که عبارتند از: طراحی مواد فوتولتائیک، طراحی الکترو و کاربردهای نوین. براساس حوزه اول، هدف دستیابی هم‌زمان به بازده بالا و حفظ شفافیت قابل مشاهده است که می‌توان با جابجایی طیف جذب مواد به ناحیه IR به این مهم دست یافت. طراحی کوپلیمرهای الکترون‌دهنده-الکترون‌گیرنده که امکان کنترل جداگانه سطح انرژی HOMO و LUMO را فراهم می‌کند، یک ماده فوتولتائیک مناسب برای این منظور است. واحدهای الکترون‌گیرنده جدید عاری از فلورن نیز برای طراحی و ساخت مواد نوع P بسیار مناسب بوده و عملکرد خوبی نیز در ناحیه IR دارند. براساس رویکرد دوم، هدف از تحقیق در مورد مواد الکترو شفاف، جابجایی طیف مواد و حفظ رسانایی آن‌ها است. PEDOT:PSS، نقره در اندازه نانو، بلورهای فوتونی یک‌بعدی و لایه‌های انتقال دهنده برپایه کربن، گزینه‌های مناسبی برای الکترودهای شفاف قابل قبول هستند. در بین این مواد، لایه‌های بازتابنده کامپوزیتی مانند ساختارهای بلوری فوتونیک به دلیل طیف بازتابنده قابل تنظیم برای ساخت سلول‌های فوتولتائیک پلیمری شفاف بسیار مناسب

این احتمال بسیار منطقی است که سلول‌های خورشیدی پلیمری بتوانند برق بسیار ارزان قیمت را در اختیار کاربران قرار دهند اما برای این امر، تولید پیوسته این افزاره در مقیاس بسیار بزرگ ضروری است. بدیهی است که باید بودجه تحقیقات در حوزه انرژی خورشیدی و البته سلول‌های خورشیدی پلیمری افزایش یافته تا این فناوری پخته‌تر شده و در نتیجه به بازار نزدیک‌تر شود. این یک چالش مهم است که باید هزینه تحقیقات از بخش عمومی و مالیات تامین شود زیرا منافع آن در دراز مدت از نظر کاهش آلاینده‌گی و دسترسی دائمی، همگان را منتفع می‌کند [۲۹].

۷- نتیجه‌گیری

سلول‌های خورشیدی پلیمری به دلیل توسعه مواد مورد نیاز و گسترش کاربردهای آن بسیار مورد توجه قرار گرفته است. برای ساخت یک دستگاه فوتولتائیک شفاف پلیمری، بازده بالا، شفافیت بالا و پردازش اجزا به یک اندازه اهمیت دارد. تحقیقات پژوهشگران در این حوزه بر روی سه هدف

مقاله

مولکولی، معرفی الکترودهای شفاف جدید با هردو ویژگی رسانایی بالا و شفافیت خوب، استفاده از اثرات پلاسمونیک مانند بلورهای فوتونیک و پوشش‌های دارای الگو بر روی افزارها که سبب افزایش جذب انتخابی فوتون‌ها در محدوده خاص می‌شود و اصلاح ضخامت‌های هرلایه در افزاره برای تنظیم توزیع میدان نور. از طرف دیگر محققان باید روش‌های توسعه این فناوری از اندازه آزمایشگاهی به صنعتی را تدوین کرده و کاربردهای نوین آن در کشاورزی، ساخت‌وساز، اتومبیل و حمل و نقل را مورد ارزیابی قرار دهند.

هستند که می‌توانند هم‌زمان پراکنش و انتقال نور را کنترل کنند. در مورد جنبه سوم ایده‌های جدید و منحصربه‌فردی در مورد استفاده بیشتر از این فناوری به ویژه در صنایع کشاورزی ارائه می‌شود. با توجه به اثر چندگانه نور بر روی رشد گیاهان و فوتوستتزی، این فناوری می‌تواند ضمن تولید برق اضافی، چنین محیطی را برای رشد گیاهان فراهم کند. چندین مسیر کلیدی برای تحقیق بیشتر بر روی پلیمرهای فوتولتائیک شفاف وجود دارد که عبارتند از: گسترش ناحیه جذب مواد آلی بیش از ۱۰۰۰ نانومتر، تهیه مواد فعال نوری با واحدهای الکترون‌دهنده و الکترون‌گیرنده نوین به منظور انتقال طیف جذب به ناحیه IR، مطالعه رابطه بین کاهش ولتاژ نوری و ساختار

۸- مراجع

- G. Li, R. Zhu, Y. Yang, "Polymer solar cells", *Nat. Photonics*, 6, 153-161, **2012**.
- J. Zhao, Y. Li, G. Yang, K. Jiang, H. Lin, H. Ade, W. Ma, H. Yan, "Efficient organic solar cells processed from hydrocarbon solvent", *Nat. Energy*, 1, 15027, **2016**.
- C. Sun, F. Pan, H. Bin, J. Zhang, L. Xue, B. Qiu, Z. Wei, Z. G. Zhand, Y. Li, "A low cost and high performance polymer donor material for polymer solar cells", *Nat. Commun.* 9, 743-752, **2018**.
- G. Xu, L. Shen, C. Cui, S. Wen, R. Xue, W. Chen, H. Chen, J. Zhang, H. Li, Y. Li, "High performance colorful semitransparent polymer solar cells with ultrathin hybrid-metal electrodes and fine-tuned dielectric mirrors", *Adv. Funct. Mater.* 27, 1605908-1605917, **2017**.
- R. Tipnis, D. Lair, M. Mathai, "Polymer-based materials for printed electronics: enabling high efficiency solar power and lighting", *Mater. Matters*, 3, 92-95, **2016**.
- A.A.F. Husain, W.Z. Hasan, S. Shafie, M.N. Hamidon, S.S. Pandey, "A review of transparent solar photovoltaic technologies", *Renew. Sustain. Energy Rev.* 94, 779-791, **2018**.
- G. Li, C.W. Chu, V. Shrotriya, J. Huang, Y. Yang, "Efficient inverted polymer solar cells", *Appl. Phys. Lett.* 88, 23502-23509, **2006**.
- H. Cao, W. He, Y. Mao, X. Lin, K. Ishikawa, J.H. Dicherson, W.P. Hess, "Recent progress in degradation and stabilization of organic solar cells", *J. Power Sources*, 264, 168-183, **2014**.
- M. Jogensen, K. Norrman, S.A. Gevorgyan, T. Tromholt, B. Anderson, F.C. Krebs, "Stability of polymer solar cells", *Adv. Mater.* 24, 580-612, **2012**.
- M.M. Wienk, M. Turbiez, J. Gilot, R.A. Janssen, "Narrow-bandgap diketopyrrolo-prrole of processing on the performance", *Adv. Mater.* 20, 2556-2560, **2008**.
- L. Huo, J. Huo, H.Y. Chen, S. Zhang, Y. Jiang, T.L. Chen, Y. Yang, "Bandgap and molecular level control of the low-bandgap polymers based on 3,6-dithiophene-2-yl-2,5-dihydropyrrolo[3,4-c]pyrrole-1,4-dione toward highly efficient polymer solar cells", *Macromolecules* 42, 6564-6571, **2012**.
- S.Y. Chang, P. Cheng, G. Li, Y. Yang, "Transparent polymer photovoltaics for solar eEnergy harvesting and beyond", *Joule*, 2, 1039-1054, **2018**.
- Y.C. Lin, H.W. Cheng, Y.M. Su, B.H. Lin, Y.J. Lu, C.H. Chen, H.C. Chen, Y. Yang, K.H. Wei, "Molecular engineering of conjugated polymers enhances blend structures", *Nano Energy* 43, 138-148, **2018**.
- A.J. Kronemeijer, E. Gili, M. Shahid, J. Rivnay, A. Salleo, "A selenophene-based low-bandgap donor-acceptor polymer leading to fast ambipolar logic", *Adv. Mater.* 24, 1558-1565, **2012**.
- C.C. Chen, L. Dou, J. Gao, W.H. Chang, G. Li, Y. Yang, "High-performance semi-transparent polymer solar cells possessing tandem structure", *Energy Environ. Sci.* 6, 2714-2720, **2013**.
۱۶. م. حسین‌نژاد، م. قهاری، "مروری بر نانوکامپوزیت‌های دی‌اکسید تیتانیوم مورد استفاده در سلول خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا"، *نشریه علمی مطالعات در دنیای رنگ*، ۳، ۶۴-۵۵، **۱۳۹۸**.
17. Y. Lin, Y. Su, J. Li, B. Lin, C. Chen, H. Chen, K. Wu, Y. Yang, K. Wei, "Energy transfer within small molecule/conjugated polymer blends enhances photovoltaic efficiency", *J. Mater. Chem. A*, 5, 18053-18063, **2017**.
18. Z. Lin, J. Wang, Z.G. Zhang, H. Bai, Y. Li, D. Zhu, X. Zhan, "An electron acceptor challenging fullerenes for efficient polymer solar cells", *Adv. Mater.* 27, 1170-1174, **2015**.
19. W. Wang, C. Yan, T.K. Law, J. Wang, K. Liu, Y. Fan, X. Lu, "Fused hexacyclic nonfullerene acceptor with strong near-infrared absorption for semitransparent organic solar cells with 9.77% efficiency", *Adv. Mater.* 29, 1701308-1701314, **2017**.
20. Y. Li, J.D. Lin, X. Che, Y. Du, F. Liu, L.S. Liao, S.R. Forrest, "High efficiency near-infrared and semitransparent non-fullerene acceptor organic photovoltaic cells", *J. Am. Chem. Soc.* 139, 17114-17119, **2017**.
21. M.C. Choi, Y. Kim, C.S. Ha, "Polymers for flexible displays: from materials selection to device application", *Prog. Polym. Sci.* 33, 581-630, **2008**.
22. H. Seema, Z. Zafar, A. Samreen, Evaluation of solution processable polymer reduced graphene oxide transparent films as counter electrodes for dye-sensitized solar cells, *Arabian. J. Chem.* 10, 70-78, **2020**.
23. J. Zhang, Y. Hao, L. Yang, H. Mohammadi, N. Vlachopoulos, L. Sun, A. Hagfeldt, E. Sheibani, "Electrochemically polymerized poly (3, 4-phenylenedioxythiophene) as efficient and transparent counter electrode for dye sensitized solar cells", *Electrochim. Acta.* 300, 482-488, **2019**.
24. S. Mozaffari, J. Behdani, Mesoporous poly α -naphthylamine film as platinum-free counter electrode in dye sensitized solar cell, *Optik*, 182, 282-294, **2019**.
25. G. Li, L. Sheng, T. Li, J. Hu, P. Li, K. Wang, "Engineering flexible dye-sensitized solar cells for portable electronics", *Sol. Energy*, 174, 80-98, **2019**.
26. A.S.A. Ahmed, W. Xiang, X. Hu, C. Qi, S.I. Amiin, X. Zhao, "Si₃N₄/MoS₂/PEDOT/PSS composite counter electrode for bifacial dye-sensitized solar cells", *Sol. Energy*, 173, 1135-1143, **2018**.
27. C.S. Allardye, C. Fankhauser, S.M. Zakeeruddin, M. Gratzel, P.J. Dyson, "The influence of greenhouse-integrated photovoltaics on crop production", *Sol. Energy*, 155, 517-522, **2017**.
28. C. Corrado, S.W. Leow, M. Osbom, I. Carbone, K. Hellier, M. Short, G. Alers, S.A. Carter, "Power generation study of luminescent solar concentration greenhouse", *J. Renew. Sustain. Energy*, 8, 04352, **2016**.
29. T.D. Nielsen, C. Cruickshank, S. Foged, J. Thorsen, F.C. Krebs, "Business, market and intellectual property analysis of polymer solar cells", *Sol. Energy Mater. Sol. Cell* 94, 1553-1571, **2010**.

۱۶. م. حسین‌نژاد، م. قهاری، "مروری بر نانوکامپوزیت‌های دی‌اکسید تیتانیوم مورد

