نشریه مباحث برگزیده در انرژی، سال اول، شماره دوم ۱۳۹۶

نسل‌های مختلف سلول‌های خورشیدی و مکانیسم عملکرد آن‌ها

برهان آذرم

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق، دانشگاه ارومیه
پست الکترونیک نویسنده مسئول: mb_azarm@yahoo.com

دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۲۸ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۲۸

چکیده

انرژی خورشید از مهم‌ترین انواع انرژی‌های نو و تجدیدپذیر است که چنانچه جایگزین سوخت‌های فسیلی شود، می‌تواند به نگرانی‌های موجود درباره پایان‌پذیری و نیز آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از حامل‌های انرژی فسیلی و نوسان قیمت‌ها و بحران‌های انرژی خاتمه دهد. با توجه به پتانسیل بالای انرژی خورشیدی در مناطق وسیعی از کشور ایران ، از میان منابع انرژی، انرژی خورشیدی دارای جذابیت بیشتری برای محققان است. در فناوری فتوولتائیک اساس تبدیل نور خورشید به الکتریسیته می‌باشد و امروزه کشورهای زیادی از آن در قالب متصل به شبکه و مستقل از شبکه استفاده می‌کنند. در حال حاضر چندین فناوری در ساخت سلول‌های خورشیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که بازده سلول‌های نسل اول به دلیل کیفیت بالای مواد از بازدهی سلول‌های نسل‌های دیگر بیشتر است. انتظار می‌رود اختلاف بازده میان سلول‌های نسل‌های مختلف با گذشت زمان کمتر شده و تکنولوژی نسل دوم و سوم جایگزین تکنولوژی نسل اول شوند. در این مقاله ضمن بررسی کلی ساختارهای این سلول‌ها، راه‌های ممکن جهت بهبود عملکرد سلول‌های خورشیدی مورد مطالعه قرار گرفته است.

کلیدواژگان: انرژی تجدیدپذیر، سلول خورشیدی، سیلیکون بلوری، لایه نازک، فناوری‌های نوظهور

Different Generations Of Solar Cells and Mechanisms of Their Performance

Burhan Azarm

M.Sc. Student of Electrical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran
Corresponding author, E-mail address: mb_azarm@yahoo.com

Received: 18.06.2017 Accepted: 20.10.2017

Abstract

Solar energy is the most important type of modern and renewable energies. If it displace fossil fuels, can bring an end to concerns about finiteness of fuels, environmental pollution caused by the fossil fuels, price fluctuations and energy crisis. Among the energy sources, due to the high potential of solar energies in wide areas of the Iran, it has a great importance to researchers. The base of Photovoltaic technology is to converting sunlight into electricity and nowadays, most of the countries utilize it in the forms of grid-connected and off-grid. In recent years, few technologies are used for manufacturing of solar cells. The results of investigating show that the efficiency of the first generation in comparison to the other technologies are high due to the high quality raw materials which are used in the fabrication. It is expected that the differences between the efficiency of these for technologies will be decreased by the time and other technologies will be replaced by the first generation. In this paper, the structure of different technologies has been studied and the possible methods for improvement of the solar cells efficiency have been introduced.

Keywords: Renewable energy, Solar cells, Crystalline silicon, Thin layer, Emerging technologies

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-31]

۱- مقدمه

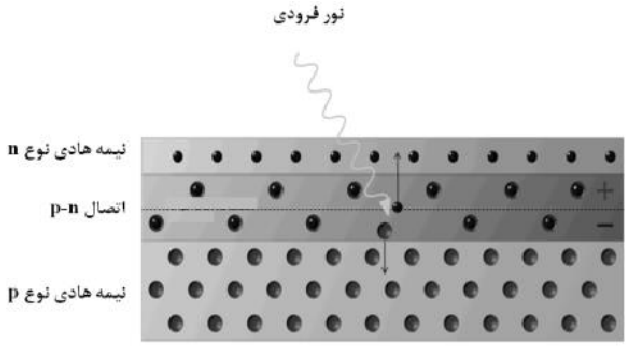
میزان مصرف انرژی جهان در آینده بسیار بالا می‌باشد و همواره این سؤال مهم مطرح می‌باشد که آیا منابع انرژی‌های فسیلی در قرن‌های آینده، جوابگوی نیاز انرژی جهان برای بقا، تکامل و توسعه خواهند بود یا خیر؟ حداقل به دو دلیل عمده، پاسخ این سؤال منفی است و باید منابع جدید انرژی را جایگزین این منابع نمود. این دلایل عبارت‌اند: محدودیت و در عین حال مرغوبیت انرژی‌های فسیلی، چرا که این سوخت‌ها از نوع انرژی شیمیایی متمرکز بوده و مسلماً کاربردهای بسیار بهتر از احتراق دارند؛ و مورد دیگر نیز، مسائل و مشکلات زیست‌محیطی می‌باشد، به‌طوری که امروزه حفظ سلامت اتمسفر از مهم‌ترین پیش‌شرط‌های توسعه اقتصادی پایدار جهانی به شمار می‌آید. از این رو دهه‌های آینده به‌عنوان سال‌های تلاش مشترک جامعه انسانی برای کنترل انتشار کربن، کنترل محیط‌زیست و در واقع تلاش برای تداوم انسان بر روی کره زمین خواهد بود؛ بنابراین استفاده از منابع جدید انرژی به‌جای منابع فسیلی امری الزامی است. پیش‌بینی می‌شود که میزان تقاضای جمعیت جهانی به انرژی در سال ۲۰۵۰ به حدود ۱۳ تراوات برسد [۱]. دستاوردهای جدید بایستی توانایی پاسخگویی به این تقاضا را داشته باشند. از میان منابع انرژی تجدیدپذیر، خورشید با یک ساعت تابش $۸/۳\times۱۰^{۲۳}$ کیلووات انرژی تولید می‌نماید که می‌تواند تقاضای انرژی مورد مصرف جهان را تأمین کند [۲]. تولید انرژی از طریق خورشید برای زمین بسیار عظیم است (سالانه معادل ۳×۱۰^{۲۴} ژول). این مقدار ۱۰۰۰۰ برابر، بیشتر از مقدار انرژی مصرفی توسط جمعیت جهان است. اگر تنها ۰/۱٪ از سطح زمین با استفاده از سلول‌های خورشیدی با بازدهی ۱۰٪ پوشیده شود انرژی موردنیاز جهان تأمین می‌شود [۳]؛ بنابراین می‌توان با سرمایه‌گذاری و تجارت سالم در زمینه انرژی خورشیدی میزان سرمایه هزینه شده در این صنعت را سریعاً بازگرداند. کاربرد انرژی خورشید و استفاده بهینه از آن گامی مطمئن به‌سوی آینده‌ای است که مسئله بحران انرژی در آن حل می‌شود. از این رو در ادامه به معرفی سلول‌های خورشیدی که راهکاری اساسی در استفاده مؤثر از انرژی خورشید می‌باشند پرداخته می‌شود.

۲- فناوری فتوولتائیک

در فناوری فتوولتائیک پرتوهای خورشیدی توسط صفحات سلول کوچکی از نیمه‌رساناهای فتوولتائیک، موسوم به (سلول خورشیدی)، به الکتریسیته تبدیل می‌شود. سلول‌های فتوولتائیک به دو شکل صفحه تخت و متمرکزکننده ساخته می‌شوند. نوع صفحه تخت همان سلول‌های خورشیدی رایج است که نور را بی‌واسطه به نیمه‌رسانا می‌رساند و به الکتریسیته تبدیل می‌کند. ولی سلول‌های متمرکزکننده ابتدا نور خورشید را به کمک یک بازتابنده متمرکز و سپس آن را به سمت سلول خورشیدی هدایت می‌کنند. از اتصال سلول‌های خورشیدی با هم یک مدول خورشیدی تشکیل می‌شود. سلول‌های خورشیدی قادرند انرژی تابشی خورشیدی را با بازدهی معادل ۵ تا ۲۰ درصد مستقیماً به الکتریسیته تبدیل کنند. اگرچه انرژی الکتریکی تابشی هنوز به میزان کافی از لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نمی‌باشد، ولی در سال‌های اخیر کاهش چشمگیری در هزینه‌های مربوط به بهره‌برداری از این سیستم‌ها مشاهده گردیده و انتظار می‌رود در آینده نیز با تحقیقات لازم کاهش قیمت ادامه یابد. در شکل ۱، شماتیکی از اثر فوتوولتائیک نمایش داده شده است. در دستگاه‌های فوتوولتائیک الکترون‌های حالت برانگیخته و حفرات تولید شده در حالت پایه باید به‌طور جداگانه برای تولید الکتریسیته جمع‌آوری شوند. اثر فوتوولتائیک در اثر تماس دونیمه‌هادی نوع n و نوع p ایجاد می‌شود.

توان تولیدی سلول و مدول خورشیدی به‌تنهایی ممکن است فقط برای شارژ یک باتری کوچک کافی باشد. برای ساختن سامانه‌ای با خروجی قابل‌توجه، نیاز است که چند مدول با هم و به‌صورت هم‌زمان کار کنند. همان‌طور که سلول‌های خورشیدی به هم وصل می‌شوند تا مدول‌ها را بسازند، مدول‌ها هم باید برای ایجاد میزان مناسبی از ولتاژ و جریان، به‌صورت سری و موازی به هم متصل شوند. واحد ساخته شده به این طریق آرایه خورشیدی نامیده می‌شود. طرح‌واره‌ای از سلول، مدول و آرایه خورشیدی در شکل شماره ۲ نشان داده شده است.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-31]



شکل ۱- شماتیکی از اثر فوتوولتائیک



شکل ۲- طرحواره سلول، مدول و آرایه خورشیدی

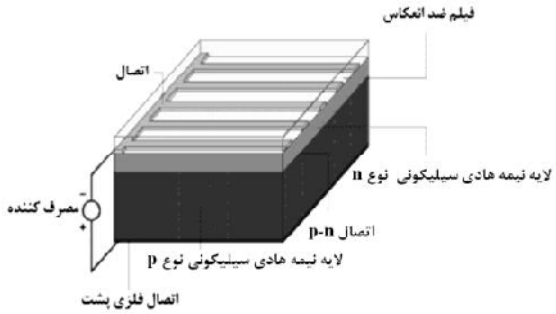
اثر فوتوولتائیک از چهار مرحله اساسی شامل جذب نور، تولید الکترون- حفره، انتقال بار و جمع‌آوری آن تشکیل شده است [۴]. جذب نور هنگامی رخ می‌دهد که مواد دارای خصلت نیمه‌هادی باشند به‌گونه‌ای که بتوانند به نور ورودی پاسخ دهند. خصوصیات جذبی به ضریب جذب ذاتی آن‌ها بستگی دارد. مرحله بعدی تولید الکترون-حفره می‌باشد. هنگامی که نور ورودی به الکترون‌های حالت پایه در ترکیبات نیمه‌هادی معدنی برخورد می‌کند، حاملان بار شامل الکترون‌ها و حفره‌های آزاد تولید می‌کند. در حالی که در مواد نیمه‌هادی آلی الکترون‌های برانگیخته به‌آرامی به آسایش رسیده و اکسایتون را تولید می‌کنند. برای ساخت یک سلول فوتوولتائیک آلی کارآمد تفکیک مناسب اکسایتون کلید اصلی است زیرا انرژی پیوندی اکسایتون بسیار بزرگ است. مرحله بعدی پس از تفکیک اکسایتون، انتقال الکترون حفره می‌باشد. این مرحله شامل انتقال بارهای تفکیک شده به الکترودها از طریق مسیرهای انتقال بار است. اگر مسیر انتقال بار دارای نقص‌هایی مانند دام‌های بار یا سدهایی که از انتقال بار ممانعت می‌کنند باشد عملکرد مناسب سلول خورشیدی کاهش می‌یابد. هنگامی که فصل مشترک به‌درستی طراحی و بهینه نشده باشد منجر به هدر رفت بار جمع‌آوری شده می‌گردد [۵].

۳- نسل‌های مختلف سلول‌های خورشیدی

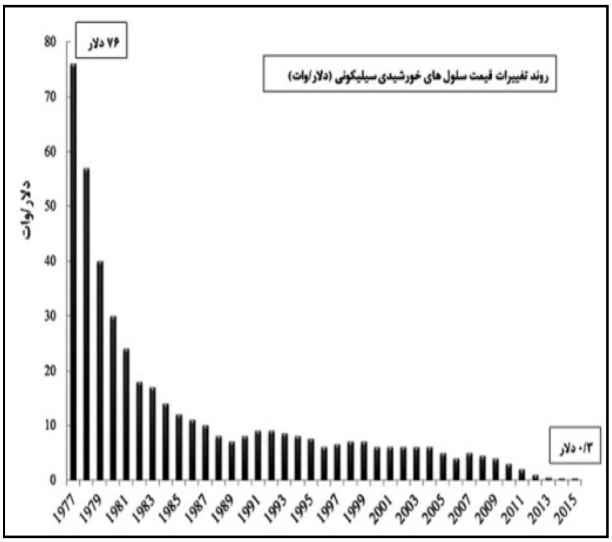
پس از کشف اثر فوتوولتائیک زمینه‌ی طراحی و ساخت سلول‌های خورشیدی فراهم شد. بررسی روند پیشرفت سلول‌های خورشیدی از گذشته تا امروز نشان می‌دهد که در طول زمان ترکیبات مختلفی که خصوصیات فوتوولتائیک را از خود نشان می‌دهند طراحی و سنتز شده و در ساختار سلول‌های خورشیدی به کار گرفته شده‌اند. در ادامه به معرفی آن‌ها پرداخته می‌شود. اولین سلول خورشیدی سیلیکونی توسط آزمایشگاه بل در سال ۱۹۵۳ در آمریکا ساخته شد. این دستگاه‌ها در آن زمان به بازده ۴/۵٪ رسیدند و اندکی بعد در سال ۱۹۵۴ به بازده ۶٪ دست یافتند [۶]. تحقیقات بسیاری پیرو این دستاورد جدید به انجام رسید زیرا سیلیکون ایمن بوده و دومین عنصر فراوان بر روی کره زمین می‌باشد. سلول‌های خورشیدی سیلیکونی کریستالی به‌عنوان اولین نسل از سلول‌های خورشیدی شناخته می‌شوند. این دستگاه‌ها به دلیل استفاده از سیلیکون خالص در ساختارشان بسیار گران‌قیمت هستند. سلول‌های خورشیدی سیلیکونی کریستالی در سال ۲۰۰۸ بر بیش از ۹۰٪ بازار فوتوولتائیک جهان حکم‌فرما بودند [۷]. در شکل ۳ ساختار یک سلول خورشیدی سیلیکونی نشان داده شده است.

پیشرفت در جهت کاهش قیمت سلول‌های خورشیدی سیلیکونی به ساخت نسل دوم از این سلول‌ها منجر شد که شامل فیلم‌های نازک کادمیم تلوراید، کادمیم سلنید، مس ایندیوم گالیم دی سلنید، سلول‌های خورشیدی سیلیکونی آمورف و سلول‌های خورشیدی سیلیکونی کریستالی لایه نازک می‌باشد. نسل دوم سلول‌های خورشیدی در مقایسه با نسل اول دارای بازده کمتر و در مقابل قیمت پایین‌تر هستند. نسل سوم از سلول‌های خورشیدی با هدف بازدهی بالاتر و قیمت پایین‌تر در مقایسه با نسل اول و دوم طراحی شدند. سلول‌های خورشیدی دوتایی، سلول‌های خورشیدی نانو ساختار و سلول‌های خورشیدی چند اتصالی نمونه‌ای از این دستگاه‌ها می‌باشند. همچنین انواع دیگر سلول‌های خورشیدی شامل سلول‌های خورشیدی مایع حساس شده به رنگ‌دانه، سلول‌های خورشیدی حالت جامد حساس شده به رنگ‌دانه، سلول‌های حساس شده به نقاط کوانتومی و سلول‌های خورشیدی آلی نیز طراحی و ساخته شده‌اند [۸، ۹]. سلول‌های خورشیدی بر پایه‌ی سیلیکون به دلیل طول عمر بالاتر و بازده بیشتر همچنان بخش عمده بازار فوتوولتائیک جهان را در دست دارند.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-31]



شکل ۳- شماتیکی از یک سلول خورشیدی سیلیکونی



شکل ۴- تغییرات قیمتی سلول‌های خورشیدی سیلیکونی [۱۰]

هزینه‌ی یک ماژول خورشیدی بستگی به‌اندازه‌ی پنل ساخته شده دارد. ۵۰ تا ۶۰ درصد هزینه‌ی بالای سلول‌های خورشیدی سیلیکونی به فرآیند نصب و راه‌اندازی و ۴۰ درصد هزینه‌ها به مواد و فرآیند ساخت آن‌ها نسبت داده می‌شود [۱۰]. قیمت تمام شده با کاهش یا افزایش رشد بازار تغییر می‌کند. شکل ۴ تغییر قیمت‌ها در دهه‌ی اخیر را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است قیمت‌ها در آمریکا از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۵ به‌طور چشمگیری کاهش‌یافته است.

۴- فناوری ساخت سلول‌های خورشیدی

از زمان شناخت پدیده فتوولتائیک در نیمه اول قرن نوزدهم تاکنون، روش‌ها و فناوری‌های مختلفی برای ساخت و تولید سلول‌های خورشیدی ابداع و اجرا شده است. تا پیش از دهه ۱۹۸۰ میلادی، اغلب این روش‌ها به دلیل بازده کم، در سطح فعالیت‌های آزمایشگاهی و تحقیقاتی باقی‌مانده و جز کاربردهای خاص (مثل ماهواره‌ها و فضانوردها) و محدود (مثل



شکل ۵- دسته‌بندی فناوری‌های مختلف سلول خورشیدی

سیستم‌های فتوولتائیک کوچک و خانگی چند کیلوواتی) حضور جدی در عرصه صنعتی نیافته بودند. از میانه دهه ۱۹۸۰ که اولین سلول‌های خورشیدی با بازده ۲۰ درصد ساخته شد و 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. با نگاهی به روند توسعه فناوری‌های سلول خورشیدی می‌توان آن‌ها را به سه نسل زیر تقسیم کرد:

۱- فناوری‌های نسل اول مانند سلول‌های سیلیکون بلوری

۲- فناوری‌های نسل دوم، لایه نازک سیلیکونی و غیرسیلیکونی

۳- فناوری‌های نسل سوم، موسوم به فناوری‌های نوظهور بر پایه مواد آلی و چندپیوندی

این فناوری‌ها در نمودار شکل شماره ۵ دسته‌بندی شده‌اند.

۵- فناوری سلول خورشیدی سیلیکون بلوری

سلول‌های سیلیکون بلوری نخستین نسل از سلول‌های خورشیدی هستند. اولین سلول سیلیکون بلوری در سال ۱۹۵۴ در آزمایشگاه بل آمریکا ساخته شد و تا دهه ۱۹۸۰ بیشترین کاربرد این سلول‌ها محدود به فضاپیماها و ماهواره‌ها می‌شد. با توسعه این سلول‌ها و کار روی بازدهی آن‌ها از سال ۱۹۸۰ تا به امروز، بازده ۲۵٪ در شرایط آزمایشگاهی برای سلول‌های سیلیکون تک‌بلوری نیز حاصل شده است. یک سلول خورشیدی سیلیکون بلوری معمولاً از لایه‌های زیر تشکیل شده است.

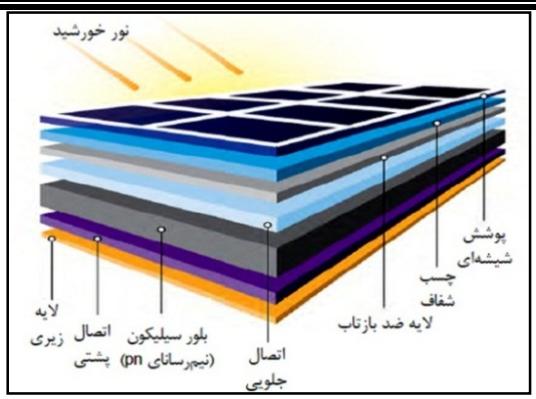
[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-31]

یک لایه بلور سیلیکون در میانه سلول که در یک طرف آن ناخالصی نوع منفی و در طرف دیگر ناخالصی نوع مثبت قرار دارند؛ دو لایه اتصال الکتریکی در دو طرف نیم‌رسانا؛

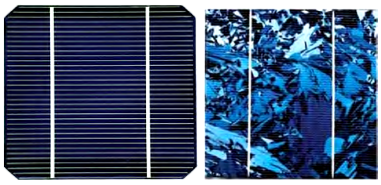
یک لایه روکش ضد بازتاب روی اتصال جلویی و یک لایه پوشش شیشه‌ای که با یک لایه چسب شفاف از جنس پلی وینیل استات روی روکش ضد بازتاب نصب می‌شود.

۶- یک لایه محافظ زیرین

در شکل ۶ ساختمان لایه چینی سلول خورشیدی سیلیکون بلوری نشان داده شده است. سلول‌های سیلیکون بلوری به دو صورت (تک‌بلوری) و (چند بلوری) تولید می‌شوند. نوع تک‌بلوری این سلول‌ها به دلیل برخورداری از بالاترین بازده در میان انواع سلول‌ها، بیشترین استفاده را در بازار دارد. بازده این سلول در شرایط مطلوب آزمایشگاهی ۲۵٪، در تولید صنعتی بین ۱۸ تا ۲۲٪ و بازده بهترین مدول‌های صنعتی آن نیز بین ۱۶ تا ۲۰٪ است. سلول‌های تک‌بلوری با وجود برخورداری از بازدهی بالا، هزینه تولید بسیار زیادی دارند. از این رو، تولیدکنندگان برای کاهش هزینه‌ها، به استفاده از سیلیکون چند بلوری روی آوردند. در این روش که سیلیکون جامد از انجماد سریع و کنترل شده سیلیکون مذاب حاصل می‌شود، انبوهی از بلورهای کوچک با ابعاد مختلف به یکدیگر متصل می‌شوند و سیلیکون چندبلوری را تشکیل می‌دهند. این ماده که به‌مراتب ساده‌تر و ارزان‌تر از سیلیکون تک‌بلوری به دست می‌آید، به دلیل نقص ساختار بلوری خود بازده کمتری هم در تبدیل نور خورشید به الکتریسیته دارد. از این رو، بازده سلول‌های خورشیدی سیلیکون چندبلوری در شرایط مطلوب آزمایشگاهی به ۲۰٪ و در تولید صنعتی به ۱۵٪ می‌رسد. شکل ۷ نمونه‌ای از سلول‌های خورشیدی تک‌بلوری و چند بلوری را نشان می‌دهد. به لحاظ ظاهری، ساختار یکدست و برش هشت‌ضلعی سلول تک‌بلوری که از شمش بلور استوانه‌ای به همین قطر بریده می‌شوند، آن را از سلول‌های چند بلوری با ساختار نامنظم و برش چهارضلعی که از شمش‌های مکعب با مقاطع خیلی بزرگ‌تر بریده می‌شوند، متمایز می‌کند. تولید سلول‌های سیلیکون بلوری فرآیندی پیچیده و طولانی دارد که با صرف هزینه زیاد همراه است. با این حال، بلوغ فناوری و برتری چشمگیر بازدهی این سلول‌ها، ادامه روند تولید و توسعه آن‌ها را همچنان توجیه‌پذیر می‌کند.



شکل ۶- ساختمان لایه چینی سلول خورشیدی سیلیکون بلوری



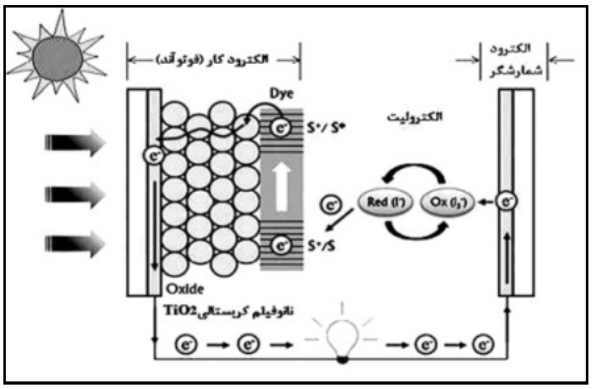
شکل ۷- سلول خورشیدی سیلیکونی تک‌بلوری و چند بلوری

۷- سلول‌های خورشیدی غیرسیلیکونی

سلول‌های خورشیدی حساس شده به رنگ‌دانه ارزان‌قیمت و با کارایی بالا توسط گراتزل و همکاران با استفاده از تیتانیوم دی اکسیدکلوئیدی برای تقلید از فرآیند طبیعی فتوسنتز ارائه شدند که در واقع راهکاری نوین جهت جایگزینی سلول‌های خورشیدی سیلیکونی بودند [۱۱]. حساس سازی نوری کلوئیدی با استفاده از رنگ‌دانه‌هایی که از مشتقات کلروفیل و پورفیرین‌های طبیعی بودند بازده کوانتومی بالایی مشابه آنچه که در فرآیند فتوسنتز رخ می‌دهد را نشان می‌دهد [۱۲]. سلول‌های خورشیدی حساس شده به رنگ‌دانه از یک فوتوآند متشکل از نانوذره نیمه‌هادی مانند TiO_2، ZnO، SnO_2، Nb_2O_5 [۱۳، ۱۴]. الکترودهای شفاف نوری، رنگ‌دانه‌های حساس ساز نوری، نمک‌های معدنی، حلال‌ها و الکترودهای فلزی تشکیل شده‌اند که بهینه‌سازی هر جزء می‌تواند در افزایش بازده تبدیل انرژی این سلول‌ها نقشی مهم ایفا کند. با این حال، سلول‌های خورشیدی حساس شده به رنگ‌دانه معایبی مانند پایداری کم، کپسوله شدن و نشت حلال را دارند. نشت حلال منجر به کاهش غلظت الکترولیت و درنتیجه کاهش عملکرد دستگاه می‌گردد [۱۳، ۱۵، ۱۶].

برای جایگزین نمودن الکترولیت مایع فرار در سلول‌های خورشیدی حساس شده به رنگ‌دانه نسل جدیدی از سلول‌ها با عنوان سلول‌های خورشیدی شبه جامد حساس شده به رنگ‌دانه توسعه یافتند که در ساختار آن‌ها از انتقال‌دهنده‌های

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-31]

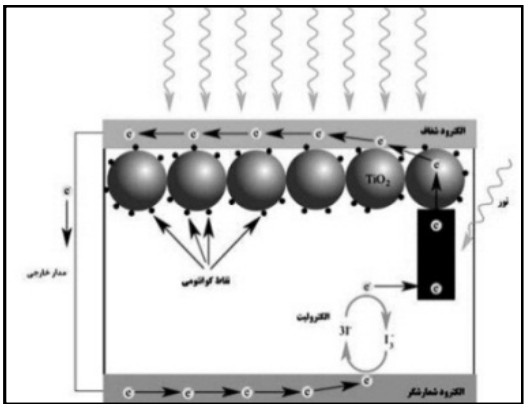


شکل ۸- طرح شماتیکی از عملکرد سلول حساس شده به رنگ‌دانه [۲۱]

حفره در حالت جامد یا شبه جامد استفاده می‌گردد و شامل ترکیبات نیمه‌هادی نوع p یا مواد آلی انتقال‌دهنده حفره، الکترولیت مایع یونی یا الکترولیت پلیمری می‌باشند.

این مواد بایستی در محدوده مرئی تابش شفاف بوده، رنگ‌دانه حساس‌کننده نوری را در خود حل نموده و همچنین قابلیت لایه نشانی در شبکه‌ی نانو متخلخل TiO2 حساس شده به رنگ‌دانه را داشته باشند. این دستاورد برای حل مشکلاتی مانند نشت حلال، کپسوله شدن و خوردگی سلول‌های حساس شده به رنگ‌دانه مناسب است. سلول‌های حالت جامد کارایی کمتری در مقایسه با سلول‌های حساس شده به رنگ‌دانه مایع از خود نشان می‌دهند [۱۷، ۱۸]. این گروه از سلول‌های خورشیدی نیز معایبی دارند که برخی از آن‌ها عبارت‌اند: ناپایدار بودن ژل بکار گرفته شده که منجر به رسانش پایین و نشت حلال در این ساختارها می‌گردد؛ همچنین دماهای بالا که منجر به تخریب و دگرگونی ساختار کپسوله شده می‌گردد [۱۹، ۲۰]. شکل ۸ عملکرد یک سلول خورشیدی حساس شده به رنگ‌دانه را نشان می‌دهد.

گروه دوم سلول‌های خورشیدی نقاط کوانتومی می‌باشند که بر پایه سلول‌های خورشیدی گراتزل یا حساس به رنگ‌دانه طراحی شده‌اند این گروه از ترکیبات نیمه‌هادی با باند گپ پایین استفاده می‌کنند تا بتوان از آن‌ها برای تهیه نقاط کوانتومی مانند CdS، CdSe، Sb2S3، PbS، استفاده نمود. در این دستگاه‌ها بجای کاربرد رنگ‌دانه‌های آلی یا آلی فلزی جاذب نور از نقاط کوانتومی استفاده می‌شود. تغییرات در اندازه نقاط کوانتومی منجر به تغییرات شدت طول موج جذب نور شده در این سلول‌ها می‌گردد [۲۲]. در سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی نیز مانند سلول‌های حساس شده به رنگ‌دانه، لایه TiO2 اسکلت اصلی سلول را تشکیل می‌دهد و لایه نشانی ذرات کوانتومی بر روی لایه



شکل ۹- طرح شماتیکی از یک سلول خورشیدی حساس شده به نقاط کوانتومی

TiO2 منجر به حساسیت نوری در این ساختارها می‌گردد. پوشش دهی ذرات کوانتومی بر روی لایه‌ی TiO2 با استفاده از روش‌های مختلفی مانند رسوب‌دهی حمام شیمیایی، لایه نشانی الکتروفورتیک و یا جذب و واکنش لایه یونی متوالی امکان‌پذیر است. مدار الکتریکی در نهایت با استفاده از زوج کاهنده/اکسنده جامد و یا مایع بسته می‌شود. بازدهی سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی در سلول‌های اتصال مایع و سلول‌های حالت جامد به بیشتر از ۵٪ رسیده است [۲۳، ۲۴]. شکل ۹ طرح شماتیکی از ساختار یک QDSSC را نمایش می‌دهد.سلول‌های خورشیدی آلی پلیمری نسل دیگری از انواع سلول‌های خورشیدی غیرسیلیکونی هستند که امروزه توسعه فراوانی یافته‌اند. لایه فعال سلول خورشیدی آلی از دو ترکیب آلی الکترون دهنده و الکترون پذیرنده تشکیل می‌شود که بین یک اتصال نیمه‌رسانا مانند ایندیوم قلع اکسید (ITO) با تابع کار بالا و یک اتصال فلزی با تابع کار پایین مانند Ca، Al و Mg ساندویچ شده است. سلول‌های خورشیدی آلی به لحاظ علمی بسیار جذاب هستند زیرا به‌راحتی و با هزینه‌ای پایین ساخته می‌شوند. از ویژگی بارز این دستگاه‌ها سبکی و انعطاف‌پذیری است که آن‌ها را برای کاربردهای مختلف قابل استفاده می‌نماید. در نهایت می‌توان گفت که عملکرد آن‌ها با طراحی‌های مولکولی، سنتز پلیمرهای جدید یا ترکیبات نیمه‌هادی آلی، قابل‌تغییر و افزایش می‌باشد. بازده سلول‌های خورشیدی پلیمری در مقایسه با سلول‌های سیلیکونی و سلول‌های خورشیدی حساس شده به رنگ‌دانه پایین‌تر است. این به دلیل عدم تطابق طیفی بین ترکیبات جاذب نور در این سلول‌ها و طیف تابشی خورشید می‌باشد. همچنین تحرک پایین حاملان بار و جمع‌آوری ناکارآمد الکترون و حفره توسط الکترودها به‌عنوان

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-31]

مهم‌ترین چالش در این مسیر مطرح می‌گردد. تاکنون انواع مختلفی از این سلول‌ها شامل سلول‌های خورشیدی آلی تک لایه، اتصال ناهمگن دولایه و اتصال ناهمگن توده‌ای طراحی و ساخته شده‌اند [۲۵، ۲۶].

۷-۱- فناوری سلول خورشیدی لایه نازک

در این فناوری با استفاده از روش‌های تبخیر، لایه‌ای نازک در حدود چند میکرون بر روی سطوحی مانند شیشه، پلیمر یا فلز تشکیل می‌شود. فناوری لایه نازک، علاوه بر راحت و ارزان‌تر کردن فرآیند تولید، به دلیل استفاده لایه بسیار نازکی از مواد نیمه‌رسانا، هزینه‌های مواد اولیه را نیز کاهش می‌دهد. نیمه‌رساناهای متعددی برای کاربرد در سلول‌های لایه نازک پیشنهاد شده‌اند؛ اما سه نوع از آن‌ها بیشترین کاربرد را در صنعت پیدا کرده‌اند که عبارت‌اند: سیلیکون غیربلوری (آمورف)، کادمیوم تلوراید ترکیب مس، ایندیوم، گالیوم و سلنیوم (موسوم به CIGS).

۷-۲- سلول خورشیدی لایه نازک سیلیکون غیر بلوری (آمورف)

اولین سلول‌های لایه نازک، سلول‌های سیلیکون غیربلوری موسوم به آمورف هستند که هنوز هم در مقیاس تجاری تولید می‌شوند و بیشترین سهم را از بازار انواع سلول‌های لایه نازک دارند. برای تولید این سلول‌ها لایه نازکی از سیلیکون با ضخامت چند میکرون در طی عملیاتی موسوم به (رسوب شیمیایی در فاز بخار) از گاز سیلان و هیدروژن بر روی شیشه، پلاستیک یا فلز نشانده می‌شود. مصرف سیلیکون در این روش حدود ۱٪ سلول‌های بلوری است که هزینه تولید را به‌شدت کاهش می‌دهد [۲۷، ۲۸]. البته، ساختار غیربلوری این نوع سلول باعث کاهش بازده آن شده است؛ به‌طوری‌که بهترین بازده آزمایشگاهی و صنعتی به دست آمده از آن به ترتیب حدود (٪۱۳- ۸٪) است. شکل ۱۰ پهن کردن آرایه خورشیدی لایه نازک را روی پشت بام نشان می‌دهد [۲۹].

۷-۳- سلول خورشیدی لایه نازک کادمیوم تلوراید

سلول‌های کادمیوم تلوراید تنها سلول‌های لایه نازک موجود هستند که توانسته‌اند از نظر هزینه تولید بر رقیب اصلی این صنعت، یعنی سیلیکون پیشی بگیرند. ماده مرکب بلوری کادمیوم تلوراید، یک نیمه‌رسانا با شکاف انرژی ۱/۴۴ الکترون ولت است که معمولاً با سولفید کادمیوم اتصال p-n یک سلول خورشیدی فتوولتائیک را تشکیل می‌دهد [۳۰، ۳۱].

بهترین بازده به دست آمده از سلول‌های کادمیوم تلوراید در تولیدات صنعتی، حدود ۱۷٪ و مدول‌های آن بین ۱۲٪ تا ۱۴٪ بوده است و بهترین بازده آزمایشگاهی این سلول‌ها امروزه به ۱۹/۵٪ رسیده است [۲۹، ۳۲]. این نوع سلول خورشیدی در زمره ارزان‌ترین سلول‌های خورشیدی است. در سال ۲۰۱۲ کادمیوم تلوراید تولید شد و انتظار می‌رود با رشد قابل توجهی در سال‌های آتی همراه باشد [۳۳]. با وجود این، محدودیت دسترسی به تلوراید و آلایندگی زیست‌محیطی کادمیوم دو عامل تأثیرگذار بر آینده این نوع سلول خواهد بود.

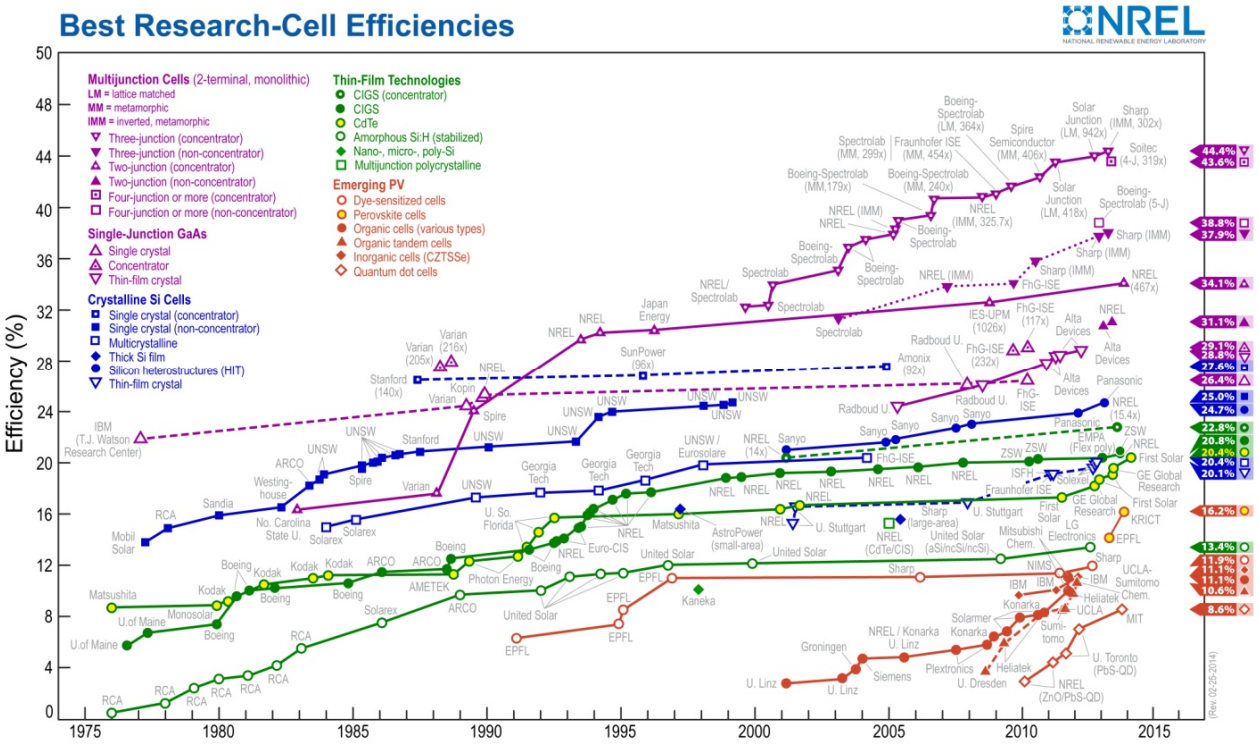
۷-۴- سلول‌های خورشیدی پروسکایتی

جدیدترین نسل از سلول‌های خورشیدی که حدوداً از سال ۲۰۱۴ موردتوجه جوامع علمی در سراسر دنیا قرار گرفت، سلول‌های خورشیدی پروسکایتی می‌باشند. این گروه از سلول‌های خورشیدی از ترکیبات پروسکایت که عموماً یک هیبرید آلی– معدنی سرب و یا موادی بر پایه هالیدهای قلع هستند تشکیل شده‌اند. مواد پروسکایت دارای دو مزیت بسیار مهم هستند: ارزانی در تولید و آسانی در ساخت. نکته‌ی حائز اهمیت در ارتباط با این گروه از سلول‌های خورشیدی بازده بسیار بالای آن‌ها است، به‌گونه‌ای که از بازده ۳/۸ درصد در سال ۲۰۰۹ به بازده ۲۰/۱ درصد در سال ۲۰۱۵ رسیدند که تا امروز به‌عنوان سریع‌ترین تکنولوژی در حال پیشرفت در زمینه‌ی سلول‌های خورشیدی شناخته می‌شود. قیمت پایین در ساخت و بازده بالا در این گروه از سلول‌های خورشیدی منجر به ایجاد یک بازار بزرگ در سال ۲۰۱۷ برای این سلول‌های خورشیدی شده است [۳۴، ۳۵].



شکل ۱۰- آرایه خورشیدی لایه نازک و انعطاف‌پذیر سیلیکون آمورف در حال پهن شدن روی پشت بام

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-31]



شکل ۱۱- بازده سلول‌های خورشیدی به‌عنوان تابعی از زمان با استفاده از تکنولوژی‌های مختلف فتوولتائی در طول فرآیند پیشرفت (منبع: آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر ایالات متحده)

۷-۵- سلول خورشیدی لایه نازک CIGS

نوع دیگر مواد غیرسیلیکونی که در فناوری لایه نازک استفاده می‌شود، ماده‌ای مرکب از عناصر گروه‌های یک، سه و شش جدول تناوبی شامل مس، ایندیوم، گالیوم و سلنیوم، موسوم به CIGS است. این سلول‌ها به دلیل بالا بودن بازده و پایین بودن هزینه مواد مصرفی، از امیدبخش‌ترین فناوری‌های لایه نازک هستند [۳۶]. این سلول‌ها نیز مانند سایر انواع سلول‌های لایه نازک از رسوب روی شیشه یا پلاستیک ساخته می‌شوند [۳۷]. بهترین بازده سلول‌های CIGS حدود ۲۰٪ و بازدهی مدول‌های آن بین ۱۳ تا ۱۵٪ است که بیشترین مقدار در میان انواع سلول‌های لایه نازک به‌حساب می‌آید [۳۸، ۳۹، ۴۰].

شکل ۱۱ بازده سلول‌های خورشیدی مختلف را به‌عنوان تابعی از سال پیشرفت و تکامل انواع نسل‌های سلول خورشیدی در دانشگاه‌های تراز اول دنیا نمایش می‌دهد. همان‌گونه که در تصویر مشخص است در سال ۱۹۷۶ اولین نسل از سلول‌های خورشیدی سیلیکونی شامل سیلیکون‌های بی‌شکل مورد مطالعه قرار گرفتند.

طی سال‌های بعدی نسل‌های مختلفی از سلول‌های سیلیکونی و سپس سلول‌های خورشیدی لایه نازک در دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی تراز اول دنیا مانند RCA، ماتسوشیتا، دانشگاه مین، دانشگاه IBM طراحی و ساخته شدند.

۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش عملکرد نسل‌های مختلف سلول‌های خورشیدی، مزایا و معایب هر کدام مورد بررسی قرار گرفته است و تفاوت این پژوهش با کارهای قبل در این است که در این پژوهش نسل‌هایی جدید سلول‌های خورشیدی همانند سلول‌های پروسکایتی، لایه نازک CIGS و دیگر سلول‌های نسل اول و دوم به‌صورت کامل مقایسه و هزینه ساخت و بازده هر کدام مورد بررسی قرار گرفته است.

در میان سلول‌های خورشیدی بررسی شده فناوری لایه نازک، علاوه بر راحت و ارزان‌تر کردن فرآیند تولید، به دلیل استفاده لایه بسیار نازکی از مواد نیمه‌رسانا، هزینه‌های مواد اولیه را نیز کاهش می‌دهد. سلول‌های نسل اول دارای بازده پایین‌تری نسبت به سلول‌های خورشیدی نسل سوم می‌باشند، اما به دلیل فراوانی مواد اولیه و در دسترس بودن تکنولوژی ساخت، اکثر سلول‌های تولید شده در جهان در این دسته قرار می‌گیرند. استفاده از سلول‌های نسل دوم علی‌رغم هزینه‌های بالای استحصال و ساخت، با موفقیت‌های زیادی درکاربردهای

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-31]

فضایی همراه بوده است؛ اما این نسل از سلول‌ها، بازده پایینی نسبت به نسل‌های اول دارند.

مهم‌ترین عیب سلول‌های خورشیدی آلی پایداری کم آن‌ها در شرایط محیطی مختلف و همچنین بازده پایین این سلول‌ها می‌باشد. در سلول‌های خورشیدی معدنی مهم‌ترین عیب هزینه‌ی بالا و فرآیند دشوار تولید این گروه از سلول‌های خورشیدی می‌باشد. لازم به ذکر است که هردو گروه از سلول‌های خورشیدی از مزایای بسیاری برخوردار هستند و معایب موجود در هردو گروه از سلول‌های خورشیدی راه را برای تحقیقات بیشتر دانشمندان در برطرف کردن این معایب باز نگه می‌دارد.

با توجه به مزایا و معایب ذکر شده برای نسل‌های مختلف از سلول‌های خورشیدی می‌توان با توجه به کاربرد، امکانات طبیعی و غیرطبیعی، نیازمندی‌ها، مواد اولیه و مواد دردسترس، تکنولوژی و صنعت مربوطه، بومی بودن یا وارداتی بودن تکنولوژی ساخت و درنهایت عرضه و تقاضا، به‌طور آکادمیک و یا صنعتی بر روی طراحی و ساخت سلول‌های خورشیدی تحقیقات وسیعی خصوصاً در کشور ایران اسلامی انجام داد.

منابع

[1] P. V. Kamat, Meeting the clean energy demand: nanostructure architectures for solar energy conversion, *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 111, No. 7, pp. 2834-2860, 2007.

[2] C. Li, M. Liu, N. G. Pschirer, M. Baumgarten, K. Mullen, Polyphenylene-based materials for organic photovoltaics, Chemical Reviews, vol. 110, pp. 6817-6855, 2010.

[3] B. Li, L. Wang, B. Kang, P. Wang, Y. Qiu, Review of recent progress in solid-state dye-sensitized solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 90, No. 5, pp. 549-573, 2006.

[4] S. R. Forrest, The limits to organic photovoltaic cell efficiency, *MRS Bulletin*, Vol. 30, No. 1, pp. 28-32, 2005.

[5] M. Knupfer, Exciton binding energies in organic semiconductors, *Materials Science and Processing*, Vol. 77, No. 5, pp. 623-626, 2003.

[6] E. Ernst, H. VonFoerster, Electron bunches of short time duration, *Journal of Applied Physics*, Vol. 25, No. 5, pp. 674-675, 1954.

[7] T. Saga, Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production, *NPG Asia Mater*, Vol. 2, No. 3, pp. 96-102, 2010.

[8] P. Sirimanne and V. Perera, Progress in dyesensitized solid state solar cells, *Physica Status Solidi (b)*, Vol. 241, pp. No. 9, 1828-1833, 2008.

[9] D. Eder and A. H. Windle, carbon–inorganic hybrid materials: the carbon nanotube/TiO2 interface, *Advanced Materials*, Vol. 20, No. 9, pp. 1787-1793, 2008.

[10] W. Schnabel, *Polymers and light: fundamentals and technical applications*. John Wiley & Sons. 2007.

[11] B. O'regan, M. Grätzel, A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO2 films, *Nature*, Vol. 353, No. 6346, pp. 737-740, 1991.

[12] A. Kay, M. Graetzel, Artificial photosynthesis. 1. Photosensitization of titania solar cells with chlorophyll derivatives and related natural porphyrins, *The Journal of Physical Chemistry,* Vol. 97, pp. No. 23, 6272-6277, 1993.

[13] K. Sayama, H. Sugihara, H. Arakawa, Photoelectrochemical properties of a porous Nb2O5 electrode sensitized by a ruthenium dye, *Chemistry of Materials*, Vol. 10, No. 12, pp. 3825-3832, 1998.

[14] Q. Wang, S. Ito, M. Grätzel, F. Fabregat-Santiago, I. Mora-Sero, J. Bisquert, T. Bessho, H. Imai, Characteristics of high efficiency dye-sensitized solar cells, *The Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 110, No. 50, pp. 25210-25221, 2006.

[15] E. Palomares, J. N. Clifford, S. A. Haque, T. Lutz, and J. R. Durrant, Control of charge recombination dynamics in dye sensitized solar cells by the use of conformally deposited metal oxide blocking layers, *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 125, No. 2, pp. 475-482, 2003.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-31]

heterojunction photovoltaic cells, *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 17, No. 23, pp. 2406-2411, 2007.

[25] J. Y. Kim, K. Lee, N. E. Coates, D. Moses, T.-Q. Nguyen, M. Dante, A. J. Heeger, Efficient tandem polymer solar cells fabricated by all-solution processing, *Science*, Vol. 317, No. 5835, pp. 222-225, 2007.

[26] A. Goetzbergera, C. Heblinga, H. W. Schockb, Photovoltaic Materials, History, Status and Outlook, *Materials Science and Engineering R: Reports*, Vol. 40, No. 1, pp. 1-46, 2003.

[27] A. Shah, J. Meier, A. Buechel, U. Kroll, J. Steinhauser, F. Meillaud, H. Schade, D. Dominé, Towards very low-cost mass production of thin-film silicon photovoltaic (PV) solar modules on glass, *Thin Solid Films*, Vol. 502, No. 1-2, pp. 292–299, 2006.

[28] NREL, Best Research-Cell Efficiencies, US Department of Energy, April 2013.

[29] A. Al-Ghamdi, A. Khan, A. Shamshad, A. Nagat, M. S. Abd El-Sadek, Synthesis and optical characterization of Nanocrystalline CdTe thin films, *Optics & Laser Technology*, Vol. 42, No. 8, pp. 1181–1186, 2010.

[30] R. W. Birkmire, B. E. McCandless, CdTe thin film technology: Leading thin film PV into the future, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Vol. 14, No. 6, pp. 139-142, 2010.

[31] Solar in Depth: Cadmium Telluride (CdTe), sited on Sep. 2013; Available in: http://solarcellcentral.com/solar_page.html #tf_cells

[32] Top Solar Module Manufacturers Worldwide, sited on Sep. 2013, Available in: http://solarcellcentral.com/companies_page.html.

[33] S. Collavini, S. F. Völker, J. L. Delgado, Understanding the outstanding power conversion efficiency of perovskite based solar cells, *Angewandte Chemie International Edition*, Vol. 54, No. 34, pp. 9757-9759, 2015.

[34] E. Wei, X. Ren, L. Chen, W. C. Choy, The efficiency limit of CH3NH3PbI3 perovskite

[16] K. Tennakone, V. Perera, I. Kottegoda, G. Kumara, Dye-sensitized solid state photovoltaic cell based on composite zinc oxide/tin (IV) oxide films, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 32, No. 4, p. 374, 1999.

[17] G. Kumara, M. Okuya, K. Murakami, S. Kaneko, V. Jayaweera, K. Tennakone, Dye-sensitized solid-state solar cells made from magnesiumoxide-coated nanocrystalline titanium dioxide films: enhancement of the efficiency, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, Vol. 164, No. 1, pp. 183-185, 2004.

[18] J. Bouclé, P. Ravirajan, J. Nelson, Hybrid polymer–metal oxide thin films for photovoltaic applications, *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 17, No. 30, pp. 3141-3153, 2007.

[19] A. Hagfeldt, M. Graetzel, Light-induced redox reactions in nanocrystalline systems, Chemical Reviews, Vol. 95, No. 1, pp. 49-68, 1995.

[20] Q. Zhang, D. Myers, J. Lan, S. A. Jenekhe, G. Cao, Applications of light scattering in dye-sensitized solar cells, *Physical Chemistry Chemical Physics*, Vol. 14, No. 43, pp. 14982-14998, 2012.

[21] O. E. Semonin, J. M. Luther, S. Choi, H.-Y. Chen, J. Gao, A. J. Nozik, M. C. Beard, Peak external photocurrent quantum efficiency exceeding 100% via MEG in a quantum dot solar cell, Science, Vol. 334, No. 6062, pp. 1530-1533, 2011.

[22] P. V. Kamat, Boosting the efficiency of quantum dot sensitized solar cells through modulation of interfacial charge transfer, *Accounts of Chemical Research*, Vol. 45, No. 11, pp. 1906-1915, 2012.

[23] S. J. Moon, Y. Itzhaik, J. H. Yum, S. M. Zakeeruddin, G. Hodes, M. Gratzel, Sb2S3-based mesoscopic solar cell using an organic hole conductor, *The Journal of Physical Chemistry Letters*, Vol. 1, No. 10, pp. 1524-1527, 2010.

[24] C. Li, Y. Chen, Y. Wang, Z. Iqbal, M. Chhowalla, S. Mitra, A fullerene–single wall carbon nanotube complex for polymer bulk

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-31]

solar cells, *Applied Physics Letters*, Vol. 106, No. 22, p. 221104, 2015.

[35] T. Tinoco, C. Rincón, M. Quintero, G. S. Pérez, Phase diagram and optical energy gaps for cuinyga1−ySe2 alloys, *Physica Status Solidi (a)*, Vol. 124, No. 2, pp. 427-434, 1991.

[36] J. Hedström, H. Ohlsen, M. Bodegard, A. Kylner, L. Stolt, D. Hariskos, M. Ruckh, H. W. Schock, *ZnO/CdS/Cu(In,Ga)Se2 thin film solar cells with improved performance.* Proceedings of 23rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 364–371, 1993.

[37] Empa takes thin film solar cells to a new level- A new world record for solar cell efficiency, Empa,18 Januray, 2013.

[38] Top 10 World's Most Efficient CI(G)S Modules, Solarplaza.com. Retrieved on 2013.

[39] Miasole. MiaSolé Achieves 15.7% Efficiency with Commercial-Scale CIGS Thin Film Solar Modules, Retrieved 30 November 2012.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-31]