در دسترس بصورت الکترونیک @ www.jscw.icrc.ac.ir

نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، جلد ۷، شماره ۴، (۱۳۹۶) ۵۴-۴۷

نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ
Journal of Studies in Color World
www.jscw.icrc.ac.ir

وزارت علوم تحقیقات و فناوری
موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش

سامانه‌های متمرکزکننده در سلول‌های خورشیدی

جمال محمدیان[۱]، بهزاد شیرکوند هداوند[۲*]

۱- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد آبادان، آبادان، ایران، صندوق پستی: ۶۶۶-۳۶۵۳۱.

۲- دانشیار، گروه رزین و افزودنی‌ها، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۱۶ تاریخ بازبینی نهایی: ۱۳۹۶/۱۱/۰۹ تاریخ پذیرش:۹۶/۱۱/۱۷ در دسترس به‌صورت الکترونیک:۱۳۹۶/۱۲/۰۷

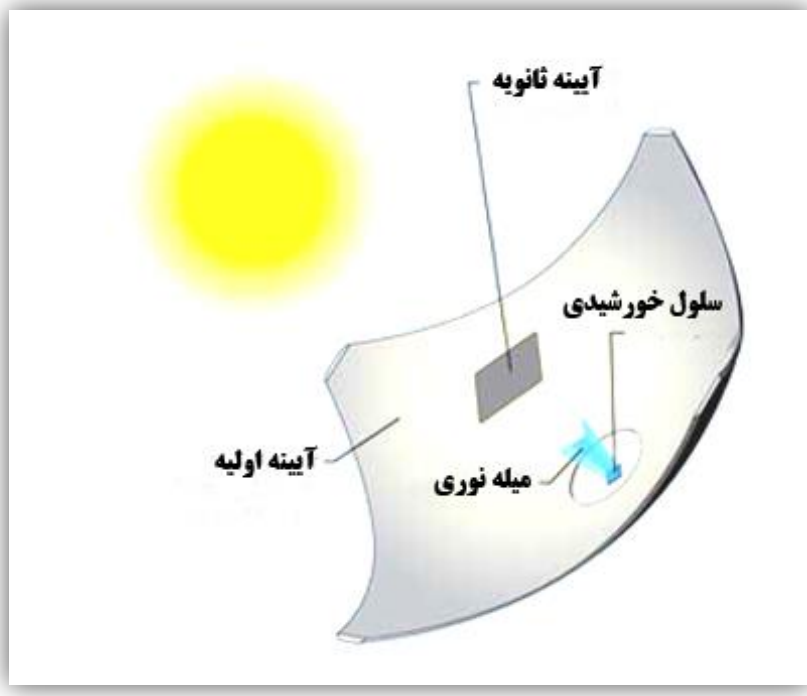
چکیده

از دیر باز انرژی یکی از مسائل مهم بشر بوده است. راه‌ها و روش‌های متفاوتی برای تولید انرژی وجود دارد که مهم‌ترین آنها سوخت‌های فسیلی می‌باشند که موجب آلودگی محیط‌زیست می‌شوند. امروزه تولید انرژی پاک و بدون آلایندگی به مهم‌ترین اولویت پژوهشگران در سرتاسر دنیا تبدیل شده است. منابع مختلفی برای تولید انرژی پاک وجود دارد که در این میان انرژی خورشیدی به دلیل عدم تولید آلایندگی به عنوان یکی از پاک‌ترین انرژی‌ها دارای جایگاه ویژه‌ای است. مشکل اصلی سلول‌های خورشیدی بازده کم و قیمت بالای آنها است. سلول‌های خورشیدی رایج دارای بازده حداکثری ۲۰ درصدی هستند. اما دسته دیگری از سلول‌های خورشیدی که به سلول‌های خورشیدی متمرکز معروف هستند دارای بازده ۴۰ درصدی و بیشتر می‌باشند. هدف از این مقاله معرفی و بحث بیشتر در مورد ساختار، مزایا و معایب این دسته از سلول‌های خورشیدی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی

انرژی خورشیدی، سلول خورشیدی، سامانه‌های خورشیدی متمرکز، انرژی پاک.

چکیده تصویری



نویسنده مسئول: shirkavand@icrc.ac.ir

Ministry of Science, Research and Technology
Institute for Color Science and Technology

Available online @ www.jscw.icrc.ac.ir

Journal of Studies in Color World, Vol. 7, No. 4, (2018) 47-54

نشریه علمی ترویجی
مطالعات در دنیای رنگ
Journal of Studies in Color World
www.jscw.icrc.ac.ir

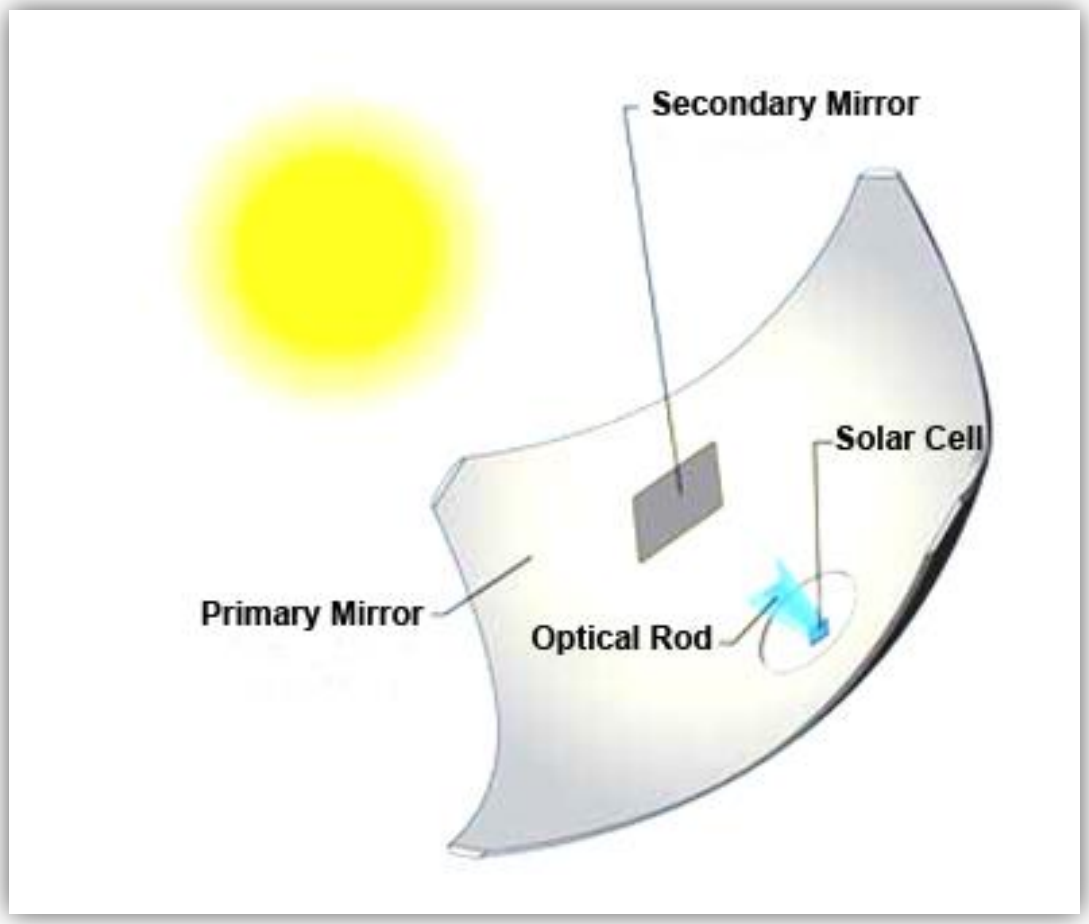
Concentrator in Photovoltaic Systems

Jamal Mohammadian[1], Behzad Shirkavand Hadavand[2*]
1- Department of Chemical Engineering, Islamic Azad University, Abadan Branch, P. O. Box: 36531-666, Abadan, Iran.
2- Department of resin and Additives, Institute for Color Science and Technology, P. O. Box: 16765-654, Tehran, Iran.

Abstract
Since a long time, energy has been one of the important problems of humanity. There are various sources to generate energy which fossil fuels are more common, but they are polluting the environment. Today clean and non-polluting energy production has become the most important priority of researchers around the world. There are different methods for producing clean energy, which solar energy has a special site due to the lack of pollutants. The main problem with solar cells is the low efficiency and high cost. The common solar cells have a maximum yield of 20% but there are another category of solar cells that are known as concentrated photovoltaic has a yield of 40% or more. This paper decided to introduce and discuss about the structure, advantages and disadvantages of this group of solar cells.

Keywords
Solar energy, Solar cell, Concentrate photovoltaic systems, Clean energy.

Graphical abstract



Corresponding author: shirkavand@icrc.ac.ir

۱- مقدمه

در ساخت سلول‌های خورشیدی از مواد نیمه‌رسانا استفاده می‌شود. مواد نیمه‌رسانا دارای دو نوع n و p هستند،که با اتصال آنها به هم می‌توان جریان الکتریکی ایجاد کرد. نیمه‌رساناهای نوع n به دلیل داشتن الکترون بیشتر دارای بارنسبی منفی هستند و نیمه‌رساناهای نوع p به دلیل کمبود الکترون دارای بار نسبی مثبت و در اصطلاح یک حفره مثبت هستند. آنچه باعث ایجاد این نیمه‌رساناهای نوع n و p می‌شود افزودن برخی عناصر به عنوان ناخالصی به ماده نیمه‌رساناست. در اثر برخورد نور به سطح نیمه‌رسانای نوع PN و کسب گپ انرژی[1] کافی، حامل‌های بار (الکترون - حفره) بوجود می‌آید که می‌توانند در داخل نیمه‌هادی حرکت نموده و تولید الکتریسیته نمایند. به این پدیده اثر فتوولتاییک نیز می‌گویند که در حقیقت نام دیگر سلول‌های خورشیدی نیز به حساب می‌آید. بر اساس این پدیده الکترون‌ها با دریافت انرژی کافی توسط فوتون‌های انرژی نورانی از مدار خود خارج شده و جریان می‌یابند و انرژی الکتریکی بوجود می‌آید. عملکرد سلول‌های خورشیدی به یک عامل مهم در نیمه‌رساناها به نام گپ انرژی وابسته است. گپ انرژی اختلاف انرژی میان نوار والانس و نوار هدایت است. هرچه این گپ کوچک‌تر باشد الکترون‌ها با دریافت انرژی کمتری می‌توانند از لایه والانس به هدایت منتقل شده و از اتم جدا شوند. این گپ در مواد نارسانا بسیار زیاد و در مواد رسانا بسیار ناچیز است. در مواد نیمه‌رسانا مقدار این گپ انرژی کوچک است و این نشان می‌دهد که این مواد با دریافت انرژی اندکی از اتم جدا شده و جریان می‌یابند. در جدول ۱ مقدار گپ انرژی، برای برخی نیمه‌رساناهای رایج، آورده شده است [۱]. در این جدول مشاهده می‌شود که مواد نیمه‌رسانا دارای گپ انرژی کوچک‌تری هستند و این بدان معناست که حامل‌های بار در این مواد با دریافت انرژی کمتری می‌توانند به آسانی از اتم خارج شوند [۱].

امروزه سلول‌های خورشیدی رایج که در آنها از ویفرهای سیلیکونی استفاده می‌شود، در نمونه‌های تک بلوری به بازده ۲۵/۶٪ رسیده‌اند، البته بازده نظری آنها که به وسیله حد شوکی- کوییسر (SQ[2]) تعیین می‌شود و تا ۲۹٪ گزارش شده است [۲، ۳]، حد SQ نشان‌دهنده بالاترین بازده تولید انرژی در سلول‌های خورشیدی سیلیکونی است. سامانه‌های فتوولتاییک سیلیکونی علیرغم مزایای متعدد دارای مشکلات و معایبی نیز هستند، به عنوان مثال این سامانه‌ها در اثر روشنایی‌های طولانی خراب می‌شوند و از عوامل اصلی محدودکننده برای آنها به شمار می‌آید که به اثر استابلر - ورونسکی (SWE[3]) معروف است. این اثر به تغییرات متاستاز ناشی از نور در خواص سیلیکون بی‌شکل[4] اشاره دارد [۴]. نسل‌های جدید سامانه‌های خورشیدی به نام سامانه‌های خورشیدی متمرکز (CPV[5]) دارای بازده‌های بسیار بالاتری هستند که توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده‌اند. شکل ۱ مقایسه این سلول‌ها با سلول‌های رایج را نشان می‌دهد [۵].

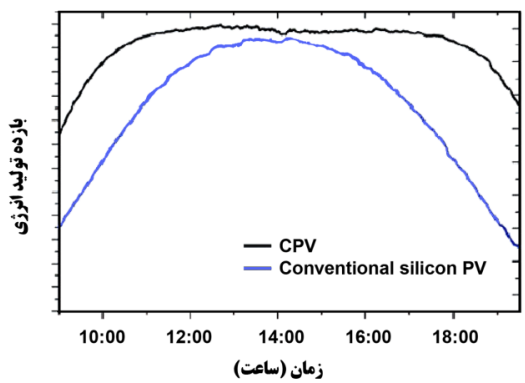
شکل ۱ نشان می‌دهد که در ساعات مختلف شبانه روز میزان تولید انرژی سامانه‌های متمرکز خورشیدی بیشتر از سامانه‌های رایج خورشیدی است، همچنین این شکل نشان می‌دهد که در ساعات میانی روز که میزان دما به بیشینه خود نزدیک می‌شود، مقدار بازده تولید انرژی سامانه‌های متمرکز به سامانه‌های معمول نزدیک می‌شود اما با این حال باز هم این سامانه‌های متمرکز هستند که بازده تولید انرژی بیشتری دارند [۵]. امروزه اکثر پژوهشگران به دنبال ساختن سلول‌هایی با بازده بالاتر هستند که برخی از این تلاش‌ها تاکنون به مراحل خوبی رسیده است. در این مقاله سعی شده است تا عملکرد و ساختار این سامانه‌ها را که دارای بازده بسیار بالاتری هستند، بررسی شود.

۲- انواع سلول‌های خورشیدی

سلول‌های خورشیدی موجود عمدتا از جنس سیلیکون هستند، ساختارهای سلیکونی خورشیدی دارای انواع مختلفی بوده که سلول‌های سیلیکونی تک‌بلوری، سلول‌های چند بلوری و سیلیکونی بی‌شکل از آن جمله هستند. از این میان ساختارهای سیلیکونی تک‌بلوری دارای بیشترین بازده گزارش شده‌اند، جدول ۲ تقسیم‌بندی برخی انواع سلول‌های خورشیدی را نشان می‌دهد. نتایج جدول ۲ به خوبی نشان می‌دهد که سلول‌های خورشیدی با اتصالات چندگانه[6] دارای بالاترین میزان بازده تولید انرژی هستند.

جدول ۱- میزان گپ انرژی برای برخی از مواد نیمه‌رسانا [۱].

نیمه‌رسانا	گپ انرژی (الکترون ولت)
سیلیکون	۱۱/۱
کادمیم تلورید	۴۴/۱
کادمیم ارسنیک	۴۳/۱
مس ایندیم گالیم دی‌سلنید	۹/۰-۷/۱



شکل ۱- مقایسه میزان تولید انرژی روزانه سامانه‌های خورشیدی رایج سیلیکونی با سامانه‌های خورشیدی متمرکز [۵].

[1] Bandgap
[2] Shockely - Queisser limit
[3] Staebler - Wronski effect
[4] Amorphous
[5] Concentrator Photovoltaic
[6] Multi Junction Solar Cell

جدول ۲- مقایسه میزان تولید انرژی نسل‌های مختلف انرژی خورشیدی.

نوع سلول خورشیدی	بالاترین بازده گزارش‌شده	بازده استاندارد گزارش‌شده	مرجع
سیلیکونی (تک بلوری)	۲۹	۲۵/۶	۲،۹
CdTe/CIGS	۱۷/۲-۲۰	۱۴-۱۵	۵، ۹، ۱۰
سلول‌های خورشیدی با اتصالات چندگانه (CPV-3j)	۴۴/۴-۵۲	۲۷-۳۳	۵-۷، ۱۶، ۱۷

۳- سامانه‌های خورشیدی متمرکز

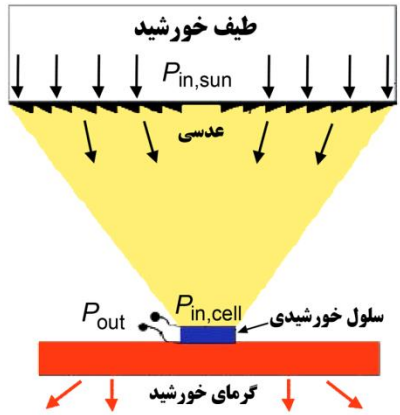
ساختار این سامانه‌ها شامل دو مرحله عملیاتی است که در شکل ۲ نشان داده شده است. در این سلول‌ها ابتدا نور خورشید به وسیله یک ابزار نوری بر روی یک سطح متمرکز می‌شود، کار این ابزار نوری متمرکزکردن نور بر روی یک سطح کوچک‌تر است این سطح کوچک یک سلول خورشیدی است که کار تبدیل انرژی را انجام می‌دهد، این کار باعث می‌شود شدت نور متمرکزشده بر روی سلول خورشیدی افزایش یابد. ابزارهای متمرکزکننده نور معمولا عدسی‌های فرنل[1] یا آینه‌های سهموی شکل هستند [۵].

نسبت سطح آیینه متمرکزکننده به سطح سلول خورشیدی را ضریب تمرکز هندسی و نسبت توان نور ورودی به خروجی را ضریب تمرکز الکتریکی می‌گویند و خارج قسمت ضریب تمرکز الکتریکی به ضریب تمرکز هندسی را بازده نوری نامیده می‌شود. این سامانه‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۱- سامانه‌های با ضریب تمرکز هندسی پایین (LCPV[2]) در محدوده ۱ الی ۳۰.

۲- سامانه‌های با ضریب تمرکز هندسی بالا (HCPV[3]) بیشتر از ۳۰۰.

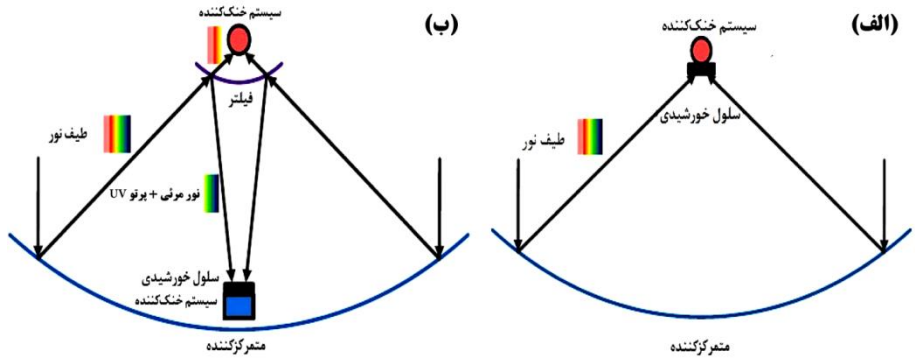
لازم به ذکر است که سامانه‌هایی با ضریب تمرکز ۳۰ الی ۳۰۰ در بازار وجود ندارند زیرا دارای قیمت رقابتی نیستند [۵]. سامانه‌های LCPV معمولا بر پایه سلول‌های خورشیدی سیلیکونی و آینه‌های سهموی شکل ساخته می‌شوند، البته ممکن است در آن‌ها از سلول‌های با اتصالات چندگانه هم استفاده شود. در سامانه‌های HCPV سلول‌های خورشیدی با اتصالات چندگانه یا ترکیبی و عدسی‌های فرنل استفاده می‌شوند. نکته مهم در این سامانه‌های با بازده بالا آن است که باید سلول خورشیدی در سطحی قرار گیرد تا گرمای آن گرفته شده و پخش شود زیرا هر سلول خورشیدی می‌تواند فقط طول موج خاصی از فوتون‌های تابشی را جذب نماید. فوتون‌های دارای انرژی خارج از محدوده گپ انرژی، باعث تولید گرما و افزایش دما در سطح سلول خورشیدی می‌شوند. افزایش دمای سلول خورشیدی باعث کاهش عملکرد تولید انرژی می‌شود و بنابراین به یک سامانه خنک‌کننده یا چاهک گرمایی نیاز دارند که عموما یک سطح پخش‌کننده گرماست، معمولا از آب یا هوا به عنوان عامل خنک‌کننده استفاده می‌شودکه به آن سیال انتقال حرارت (HTF[4]) گفته می‌شود و به به همین دلیل به آنها سامانه‌های HCPVT نیزگفته می‌شود که منظور از T، همان دماست.



شکل ۲- نحوه عملکرد سلول‌های خورشیدی متمرکز [۵].

وجود سامانه‌های خنک‌کننده در آنها باعث پیچیدگی آنها می‌شود اما این کار بازده تبدیل انرژی آنها را افزایش می‌دهد. به‌منظور کاهش دما در این سامانه‌های خورشیدی از دو شیوه بازیافت حرارت تلف شده (WHR[5]) و جداسازی طیفی (SBS[6]) استفاده می‌شود [۶]. شکل ۳ ساختار شمایی این دو نوع سامانه را نشان می‌دهد. سامانه‌های WHR شامل یک متمرکزکننده، سلول‌های خورشیدی و یک سامانه خنک‌کننده هستند که کار آن جمع‌آوری گرما و ایجاد یک دمای مناسب و بهینه برای شرایط عملکردی سلول خورشیدی است. سامانه‌های SBS علاوه بر متمرکزکننده نور، سلول خورشیدی و سامانه خنک‌کننده، دارای یک فیلتر جذب طیف نور هستند، کار این فیلتر جذب طیف‌های در محدوده گپ انرژی سلول خورشیدی است، با این کار همه طیف‌های در محدوده گپ انرژی سلول خورشیدی به سمت آن هدایت می‌شود و به طیف‌های غیرقابل جذب اجازه نفوذ به سلول خورشیدی داده نمی‌شود و سپس این طیف‌های غیرقابل جذب به سمت یک سامانه جاذب پرتو منعکس می‌شوند. بسته به نوع فیلتر، نوع متمرکزکننده و نوع سلول خورشیدی این سامانه‌ها دارای انواع مختلفی هستند. اگرچه سامانه‌های SBS نسبت به WHR به‌دلیل تجهیزات بیشتر هزینه بیشتری دارند. اما بطور کلی نسبت به آنها برتری‌های بیشتری دارند، زیرا بکار بردن فیلتر در آنها باعث می‌شود تا طیف‌های خارج از محدوده جذب به سلول خورشیدی وارد نشده و دمای آن را بیش از حد بالا نبرند و این کار باعث عمر بیشتر سلول خورشیدی می‌شود [۶].

[1] Fernsel lens
[2] Low Concentration Photovoltaic
[3] High Concentration Photovoltaic
[4] Heat Transfer Fluid
[5] Waste Heat Recovery
[6] Spectral Beam Splitting

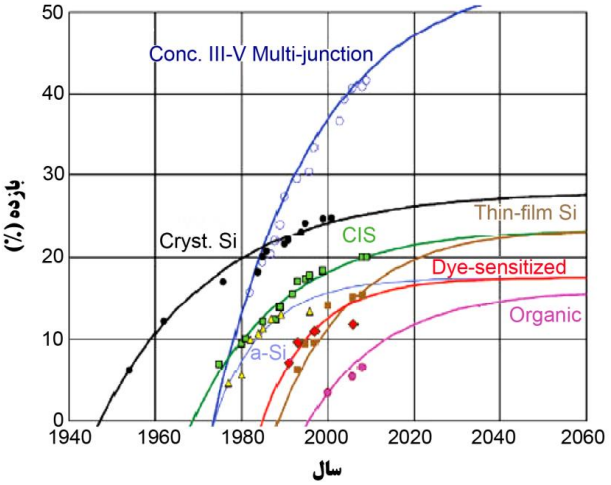


شکل ۳- ساختار شمایی سامانه‌های CPVT: الف) سامانه WHR و ب) سامانه SBS [۶].

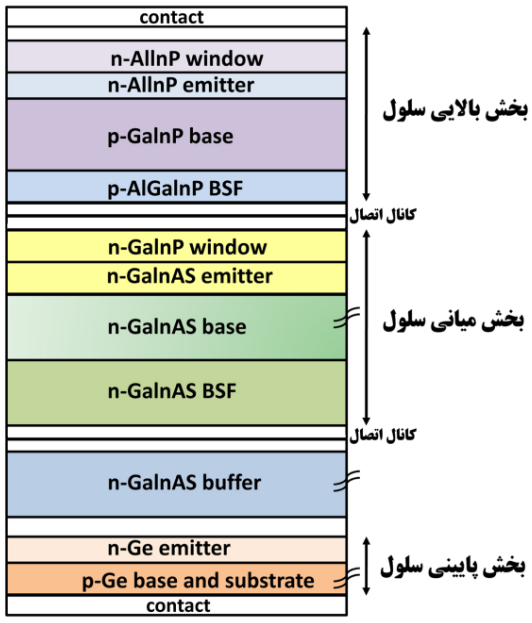
۴- سلول‌های خورشیدی با اتصالات چندگانه یا ترکیبی

همانگونه که گفته شد یکی از مشخصه‌های سامانه‌های HCPV، وجود سلول‌های خورشیدی با اتصالات و پیوندهای چندگانه (MJSC) از عناصر مختلف است، این سلول‌های خورشیدی از بین سایر فناوری‌های دیگر دارای بیشترین بازده تولید انرژی هستند. شکل ۴ مقایسه‌ای از روند پیشرفت بازده تولید انرژی آنها را با دیگر سلول‌های خورشیدی نشان می‌دهد. شکل ۴ نشان می‌دهد که سلول‌های خورشیدی با اتصالات چندگانه در مقایسه با نسل‌های دیگر خورشیدی بازده تولید انرژی بیشتری را دارند و پیشرفت آنها در سال‌های آینده بسیار بیشتر از سایر فناوری‌های خورشیدی است. علت این امر نیاز شدید به تولید انرژی پاک می‌باشد که باعث شده است تا در سالیان اخیر توجه بسیاری از محققان به عرصه سامانه‌های خورشیدی و بویژه سلول‌های با اتصالات چندگانه بیشتر جلب شود. پژوهش‌ها و یافته‌های اخیر محققان باعث شده است تا بازده این سلول‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد. در حال حاضر موسسات و دانشگاهای زیادی در نقاط مختلف جهان بر روی توسعه این فناوری‌ها مشغول به تحقیق می‌باشند [۶]. شکل ۵ نمونه‌ای از ساختارهای با اتصالات سه‌گانه را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشخص است ساختار اصلی این سلول‌ها متشکل از چندین بخش ترکیب شده از مواد نیمه‌رسانا است که توسط بخش‌هایی به نام تونل[1] یا کانال اتصال به صورت بسیار محکم به یکدیگر متصل شده‌اند [۷]. این ساختارها به دلیل بازده بالای خود در سامانه‌های فضایی برای تامین انرژی کاربرد دارند اما علیرغم پیشرفت‌های انجام شده این فناوری‌ها هنوز نیاز به توسعه و افزایش بازده تولید انرژی دارند، امروزه بازده نظری نمونه‌های ساخته شده با اتصالات چهارگانه جدیدتر تا ۴۶ درصد رسیده است اما بازده تجاری آنها هنوز بین ۲۵ تا ۳۰ درصد است و این بدان معناست که بیشتر انرژی به صورت گرما پخش‌شده و از دست می‌رود [۶،۷].

شکل ۶ به خوبی روند افزایش بازده سلول‌های ترکیبی را در سالیان اخیر نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشخص است، بازده این سلول‌ها از حدود ۳۳ درصد سال ۲۰۰۲ میلادی تا حدود ۴۷ درصد در سال ۲۰۱۵ میلادی افزایش یافته است.

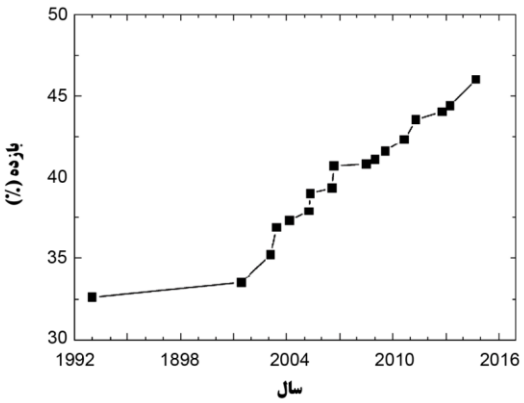


شکل ۴- نمودار مقایسه‌ای عملکرد انواع سلول‌های خورشیدی [۷].



شکل ۵- ساختار یک نمونه سه‌گانه [۷].

[1] Tunnel



شکل ۶– میزان افزایش بازده سلول‌های با اتصالات چندگانه در طی سالیان اخیر [۹].

جدول ۳- مقایسه بازده نیمه‌رساناهای مختلف [۱۰].

نوع نیمه‌رسانا	تعداد اتصال‌ها	بازده (درصد)
Si	۱	۲۵/۰ ± ۰/۵
GaAs	۱	۲۶/۴ ± ۰/۸
CIGS	۱	۱۹/۴ ± ۰/۶
CdTe	۱	۱۶/۷ ± ۰/۵
GaInP/GaAs/GaInAs	۳	۳۵/۸ ± ۱/۵
GaAs	۱	۲۹/۱ ± ۱/۳
GaInP/GaInAs/Ge	۳	۴۱/۶ ± ۲/۵

این سلول‌ها طوری طراحی شده‌اند که طیف‌های بیشتری از نور را جذب و به انرژی تبدیل کنند. در ساختار این نوع سلول‌ها ترکیب‌هایی از عناصر مختلف نیمه‌رسانا از گروه‌های ۳ الی ۵ جدول تناوبی عناصر بکار رفته است [۹]. در حقیقت علت بکارگیری این عناصر آن است که این عنصرها با داشتن محدوده گپ انرژی وسیع می‌توانند محدوده طیف بیشتری از نور خورشید را جذب کنند و این امر باعث افزایش بازده آنها می‌شود. جدول ۳ مقایسه‌ای از بازده این سلول‌ها را نشان می‌دهد. همان طور که در این جدول دیده می‌شود سلول‌های با اتصالات چندگانه دارای بازده بیشتری نسبت به سایر انواع سلول‌های خورشیدی دارند و افزایش اتصالات در این ساختارها می‌تواند باعث افزایش بازده شود و پیش‌بینی می‌شود با پیشرفت‌های این فناوری و افزایش اتصالات در آنها، این بازده در سالیان آینده تا حدود ۸۶/۸ درصد نیز افزایش یابد [۹، ۱۰].

ساختارهای GaInP/GaInAs/Ge با فرمول کلی $Ga_{1-y}InyP/Ga_{1-x}In_xAs/Ge$ از دسته پربازده‌ترین سلول‌های خورشیدی هستند که در آنها $Ga_{1-y}In_yP$ در لایه بالایی، $Ga_{1-x}In_xAs$ در لایه میانی و Ge لایه پایینی می‌باشد [۱۱]. نمونه‌ای از این ساختارهای سه‌گانه در شکل ۶ نشان داده شده است. یکی از این ساختارها $Ga_{0.51}In_{0.49}P/Ga_{0.99}In_{0.01}As/Ge$ است که به دلیل بازده بالای خود به یکی از پرکاربردترین سلول‌های خورشیدی در سامانه‌های فضایی تبدیل شده است [۱۲]. در ساختار این سلول‌های خورشیدی عناصری نظیر گالیم، ایندیم، فسفر، ایندیم ارسنیک و ژرمانیم بکار رفته است. عناصری مانند S, Se, Te, Sn به عنوان نیمه‌رسانای نوع n و عناصری مانند Zn, Be, Mg, Cd به عنوان نیمه‌رسانای نوع p به کار می‌روند [۱۳].

در این ساختار لایه اول گالیم- ایندیم - فسفر (GaInP) کار جذب طول موج‌های کوتاه نور مانند پرتو فرابنفش (UV) را انجام می‌دهد (حدود ۱/۸۷ الکترون ولت)، ناحیه میانی نورهای ناحیه زیر قرمز (IR) را جذب می‌کند (۱/۴۱ الکترون ولت) و لایه Ge فوتون‌های کم انرژی‌تر (حدود ۰/۶۶ الکترون ولت) یعنی زیر قرمز را جذب می‌کند [۲، ۸، ۱۰].

علیرغم بازده بالای تولید انرژی در این سلول‌ها، این ساختارهای خورشیدی دارای محدودیت هایی هستند، یکی از محدودیت‌های این ساختارها مقدار گپ انرژی است که در طراحی‌ها باید به آن توجه ویژه‌ای شود، میزان گپ انرژی لایه‌های GaInP و GaInAs نسبت به Ge بسیار بالاتر است. این تفاوت باعث می‌شود طیف جذب شده جریان اضافی در لایه Ge تولید کرده و این امر باعث کاهش بازده می‌گردد. یک راه برای حل این مشکل کاهش گپ انرژی است، این کار با بکارگیری طراحی‌هایی ویژه تحت عناوین طراحی‌های LM[1] و MM[2] انجام می‌پذیرد که با کاهش گپ انرژی میزان جریان افزایش می‌یابد. همچنین در ساختار GaInP/GaInAs/Ge میزان جریان تولیدشده در لایه بالایی بسیار بیشتر از لایه میانی است، برای جبران این امر ضخامت لایه بالایی کاسته می‌شود. همچنین کاهش گپ انرژی لایه میانی باعث افزایش جریان تولیدی در آن می‌گردد و این امکان فراهم می‌شود تا این لایه ضخیم‌تر شود. در حقیقت واردکردن ایندیم در ساختار GaAs و تبدیل آن به GaInAs به منظور کاهش گپ انرژی انجام می‌شود [۱۲].

یکی از محدودیت‌های دیگر در این روش ساختار بلوری لایه‌ها است. به منظور دستیابی به بازده بیشینه می‌بایست تمامی لایه‌ها ساختار بلوری یکسانی داشته باشند، هرگونه نابجایی‌ها و نقص شبکه بلوری در ساختار آنها حتی تا ۰/۰۱٪ می‌تواند باعث کاهش بازده و کاهش جریان در آنها شود. در بسیاری از سلول‌های خورشیدی یک‌پارچه که از لایه نازک n بر روی p تشکیل شده‌اند اتصال نیمه‌رساناهای n بر روی نیمه‌رساناهای نوع p باعث ایجاد دیودهای p-n در زیر سلول‌ها می‌شود و این کار باعث ایجاد جریان معکوس و قطع جریان موجود می‌گردد، برای پیشگیری از این رویداد از قطعاتی به نام تونل‌ها یا همان کانال اتصال بین زیرسلول‌ها به عنوان اتصال‌دهنده استفاده می‌شود. یک تونل مناسب باید مقاومت الکتریکی پایین و قابلیت عبور نوری مناسب داشته باشد و به خوبی در ساختار سلول ادغام و متصل شود. اتصال‌دهنده‌های موسوم به اساکی[3] برای این کار مناسب هستند [۱۳]. همچنین در این ساختارها که از چندین سلول کوچک یا زیرسلول حاوی مواد نیمه‌هادی مختلف ساخته شده‌اند ضخامت هر بخش اهمیت خاصی دارد. ضخامت هر زیرسلول باید به قدری ضخیم باشد که بتواند فوتون‌های نور را جذب کند و همچنین باید به قدری نازک باشد که حامل‌های بار[4] را جمع‌آوری کند [۱۴]، در

[1] Lattice mismatch design
[2] Metamorphic design
[3] Esaki
[4] Carriers

حقیقت ضخامت هر لایه بستگی به میزان جذب فوتون‌های نور دارد و لایه‌هایی که جذب کمی دارند باید ضخامت بیشتری داشته باشند.
نکته کلیدی دیگر در ساخت این سلول‌ها انتخاب مناسب از عناصر نیمه‌رسانا می‌باشد، در هنگام بکارگیری این عناصر، موادی که گپ انرژی بیشتری دارند در لایه‌های بالاتری قرار می‌گیرند و لایه‌های پایین‌تر گپ انرژی کمتری دارند، این کار باعث می‌شود که هر بخش انرژی متناسب با میزان گپ انرژی خود را دریافت کند، همچنین میزان اتلاف انرژی کمتر می‌شود. روش‌های مختلفی برای ساخت این سلول‌ها وجود دارد که از مهم‌ترین آنها می‌توان به روش‌های اپیتاکسی[1] فاز بخار فلزی (MOVPE[2])، اپیتاکسی پرتوهای مولکولی (MBE[3]) و رسوب‌دهی بخار شیمیایی فلز- آلی (MOCVD[4]) اشاره کرد [۱۵، ۱۳، ۹].
این روش‌ها شیوه رشد بلور در یک جهت خاص به صورت فیلم نازک است و بصورت‌های مختلف انجام می‌شوند که هرکدام قابلیت‌های ویژه‌ای دارند. روش MOVPE شیوه اصلی تولید مواد نیمه‌رسانا می‌باشد. در این روش از یک راکتور شامل یک محفظه که زیرلایه[5] گرم‌شده در آن قرار دارد استفاده می‌شود. زیرلایه معمولا از مواد نیمه‌رسانا است و ماده واکنش‌دهنده توسط یک گاز حامل به درون راکتور منتقل می‌شوند. دمای گاز درحدود دمای محیط یا نزدیک به آن است و دیوارهای راکتور گرم نمی‌شوند یا حتی گاهی آنها را خنک می‌کنند. دمای زیرلایه معمولا بین ۲۰۰ الی ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بسته به نوع مواد سامانه تغییر می‌کند. این روش یک فرآیند بسیار پرکاربرد اما پیچیده برای تولید نیمه‌هادی‌ها می‌باشد و در بسیاری از صنایع از جمله ساخت صنایع ارتباطات و الکترونیک کاربرد دارد [۱۶]. روش MBE یک روش رشد دقیق مواد است و نیاز به شرایط خلا بالا[6] دارد. شرایط خلا بکار رفته در حدود 10^{-14} توریچلی است. شرایط خلا بالا کمک به انجام بهتر و دقیق‌تر این فرآیند می‌کند. در این روش ملکول‌های واکنش نیافته تبخیر می‌شوند و ملکول‌های گازی در شرایط خلا به صورت یک پرتو یا جریان ملکولی عمل کرده و بر روی زیرلایه از پیش‌گرم شده واکنش می‌دهند، وجود شرایط خلا باعث خلوص بیشتر محصول نهایی می‌شود [۱۶]. در روش MOCVD، گازهای فوق‌العاده خالص به یک راکتور تزریق می‌شود و یک لایه بسیار نازک از اتم‌ها را بر روی ویفر نیمه‌هادی رسوب می‌دهد. واکنش سطحی ترکیبات آلی یا آلی- فلزی و هیدریدهای حاوی عناصر شیمیایی مورد نیاز، شرایطی برای رشد بلورین مواد نیمه‌هادی را بوجود می‌آورد. برخلاف نیمه‌رسانای سیلیکونی سنتی، این نیمه‌هادی‌ها ممکن است ترکیبی از گروه III و گروه V، گروه دوم و گروه VI، گروه IV یا گروه IV، عناصر گروه V و VI را داشته باشند [۱۵].

۵- مزایا و معایب

به طور کلی سامانه‌های سلول‌های خورشیدی در قیاس با زغال‌سنگ برای تولید هر گیگاوات ساعت انرژی الکتریکی از انتشار ۱۰ تن SO_2 ، ۴ تن NO_x ، ۰/۷ تن ریز ذرات و تا حدود ۱۰۰۰ تن CO_2 جلوگیری می‌کنند [۹]. یکی از مزایای سلول‌های خورشیدی متمرکز نسبت به سلول‌های خورشیدی معمولی این است که این سامانه‌ها برای اجرا، فضای کمتری نیاز دارند، به عنوان مثال یک نیروگاه یک گیگا واتی با سلول‌های خورشیدی با بازده ۲۰ درصدی نیازمند مساحت تقریبی ۵ کیلومتر مربع است، حال آنکه با سلول‌های خورشیدی متمرکز با بازده ۴۰ درصدی فقط به یک هزارم این مساحت نیاز است [۱۰]. همچنین پیش‌بینی می‌شود با پیشرفت فناوری و ایجاد اتصالات شش‌تایی و حتی بیشتر بازده این سلول‌ها افزایش چشمگیری در آینده داشته باشد.
شاید بتوان گفت که گران‌بودن از بزرگ‌ترین مشکلات سلول‌های خورشیدی است که علت آن بکارگیری فناوری پیچیده و بکارگیری عناصر کمیاب طبیعت برای تولید آنهاست. همچنین سلول‌های خورشیدی متمرکز شدیدا تحت تاثیر شرایط دمایی هستند و بازده آنها تحت تاثیر افت نوری و با تغییر شرایط دمایی تغییر می‌کند [۱۷]. سلول‌ها خورشیدی به صورت کلی در هنگام استفاده محیطی ممکن است در اثر جذب رطوبت، یخزدگی، تابش فرابنفش، خوردگی، خستگی و رعدوبرق دچار تخریب شوند [۱۸]. همچنین در برخی از آنها از مواد سمی و قابل‌اشتعال استفاده می‌شود. به عنوان مثال وجود ارسنیک می‌تواند باعث مشکلات کلیوی، خونی و سرطان شود، ترکیبات ایندیم نیز می‌توانند باعث مشکلات استخوانی و کلیوی شوند و هر چند این مقدارها کم باشد اما گسترش روزافزون استفاده از سلول‌های خورشیدی می‌تواند باعث خطرات بیشتر زیست‌محیطی در طول زمان شوند [۹].
امروزه استفاده از مواد نانویی نیز در تهیه سلول‌های خورشیدی متداول شده که با تلفیق آنها در ساختارهای متداول تحولات چشمگیری بوجود آمده است [۱۹].

۶- نتیجه‌گیری

باتوجه به نیاز روزافزون تولید انرژی و محدودیت‌های منابع سوخت‌های فسیلی به نظر می‌رسد انرژی خورشید یکی از گزینه‌های اصلی و مناسب برای تولید انرژی باشد. سلول‌های خورشیدی متمرکز با تکیه بر سلول‌های خورشیدی با پیوندهای چندگانه روز به روز در حال توسعه هستند. به نظر می‌رسد استفاده از این سلول‌های خورشیدی با توجه به بازده بالا و دوست‌دار محیط‌زیست بودن آنها از گزینه‌های مناسب در این عرصه می‌باشند. توجه به توسعه و تولید آنها می‌تواند کمک شایانی به پیشرفت و تولید انرژی‌های نو در کشور نماید.

---

[1] فرآیند رشد بلور در یک جهت خاص در بالای یک بلور دیگر
[2] Metalorganic Vapor Phase Epitaxy
[3] Molecular Beam Epitaxy
[4] Metal-Organic Chemical Vapor Deposition
[5] Substrate
[6] Ultra High Vacuum (UHV)

۷- مراجع

1. P.Breeze, "*Solar Power Generation*", Academic Press, Elsevier, **2016**.
2. E. Veinberg-Vidal, C. Dupré, P. Garcia-Linares, C. Jany, R. Thibon, T. Card, T. Salvetat, P. Scheiblin, C. Brughera, F. Fournel, Y. Desieres, Y. Veschetti, V. Sanzone, P. Mur, J. Decobert, A. Datas, "Manufacturing and characterization of iii-v on silicon multijunction solar cells", Energy Procedia, 92, 242-247, **2016**.

۳. ش. موسی‌خانی، ع. ا. صباغ الوانی، ع. ا. سرابی، س. کیانی، ح. سامعی، "نسل‌های مختلف سلول‌های خورشیدی و روش‌های بهبود بازدهی"، نشریه مطالعات در دنیای رنگ، ۱، ۸-۳، **۱۳۹۱**.

4. V. Smirnov, F. Urbain, A. Lambertz, F. Finger, "High stabilized efficiency single and multi-junction thin film silicon solar cells", Energy Procedia, 102, 64-69, **2016**.
5. N. Pearsall, "*The Performance of Photovoltaic (PV) Systems, Modeling, Measurment and Assessment*", WoodHead Publishing, **2017**.
6. X. Ju, C. Xu , X. Han, X. Du, G. Wei, Y. Yang, "A review of the concentrated photovoltaic/thermal (CPVT)hybrid solar systems based on the spectral beam splitting technology", Appl. Energy. 187, 534-563, **2017**.
7. M. Moczała, N.Sosa, A.Topol, T.Gotszalk,"Investigation of multi junction solar cells using electrostatic force microscopy methods", Ultramicroscopy, 141, 1-8, **2014**.
8. M. Yamaguchi, "*Multiple Junction Solar Cell*",Comprehensive Renew. Energy, 1, 497-514, **2012.**

A. McEvoy, T. Markvart, L. Castaner, "*Practical Handbook of Photovoltaics, Fundamentals and Applications*", Academic press,**2012**.

9. D.J. Friedman, "Progress and challenges for next-generation high-efficiency multijunction solar cells", Curr. Opin. Solid State Mater. Sci., 14,131-138, **2010**.
10. F. Oimroth, W. Guter, J. Schone, E. Welser, M. Steiner, E. Oliva, A. Wekkeli, G. Siefer, S. P. Philipps, A. W. Bett,"Metamorphic GalnP/GalnAs/Ge triple-junctionsolar cell with> 41 % efficiency",34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), **2009**.
11. C.M. Fetzera, R.R. Kinga, P.C. Coltera, K.M. Edmondsona, D.C. Lawa, A.P. Stavridesa, H. Yoona, J.H. Ermera, M.J. Romerob, N.H. Karama, "High-efficiency metamorphic GaInP/GaInAs/Ge solar cells grown by MOVPE", J. Cryst. Growth, 261, 341-348, **2004**.
12. N. V. Yastrebova,"High-efficiency multi-junction solar cells: Current status and future potential", Centre for Research in Photonics, University of Ottawa, **2007**.
13. A.Mellor, N.P.Hylton,S.A.Maier,N.Ekins-Daukes, "Interstitial light-trapping design for multi-junction solar cells", Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 159, 212-218, **2017**.
14. S.P. Tobin, S.M. Vernon, C. Bajgar, S. Wojtczuk, M.R. Melloch, A. Keshavarzi, T.B. Stellwag, S. Venkatensan, M. Lundstrom, K.A. Emery, "Assessment of MOCVD- and MBE-growth GaAs for high-efficiency solar cell applications", IEEE Trans. Electron Devices, 37(2), 469-477, **1990**.
15. T. Nishinga, "Handbook of Crystal Growth, Second Edition, Thin Films and Epitaxy", Handbook of Crystal Growth, Elsevier and Book aid international, **2015**.
16. H. Lv , F.Sheng, J. Dai, W. Liu, C. Cheng, J. Zhang, "Temperature-dependent model of concentrator photovoltaic modules combining optical elements and III–V multi-junction solar cells", Sol. Energy, 112, 351-360, **2015**.
17. J. Brebels, K.C.C.W.S. Klider, M. Kelchtermans, P. Verstappen, M. Van Landeghem, S. Van Doorslaer, E. Goovaerts, J.R. Garcia, J. Manca, L. Lutsen, D. Vanderzande, W. Maes, "Low bandgap polymers based on bay-annulated indigo for organic photovoltaics: Enhancedsustainability in material design and solar cell fabrication", Org. Electron., 50, 264-272, **2017**.

۱۸. ع. حنیفه‌زاده، ع. ا. صباغ الوانی، م. محسنی بزرگی، ش. موسی‌خانی، ع. امیری زرندی، ف. کوچک، ح. سامعی، ر. سلیمی، "معرفی انواع حساس‌کننده‌های سلول‌های خورشیدی نانوساختاری"، نشریه مطالعات در دنیای رنگ، ۳، ۳۸-۳۱، **۱۳۹۵**.