

Printed Solar Cells, an Inevitable Remedy for the Global Energy Crisis

Mohsen Mohammad Raei Nayini^{1*}, Mojtaba Jalili¹, Saeed Bastani^{1,2}, Sara Khamseh³

1- Department of Printing Science and Technology, Faculty of color physics, Institute for Color Science and Technology, P. O. Box: 16765-654, Tehran, Iran.

2- Department of Surface Coating and Corrosion, Institute for Color Science and Technology, P. O. Box: 16765-654, Tehran, Iran.

3- Department of Nanomaterials and Nanocoatings, Institute for Colour Science and Technology, Tehran, Iran, P. O. Box: 16765-654.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 17-09-2023

Accepted: 08-10-2023

Available online: 31-12-2023

Print ISSN: 2251-7278

Online ISSN: 2383-2223

DOR: 20.1001.1.22517278.1402.13.4.3.1

Keywords:

Global energy crisis

Environmental foot print

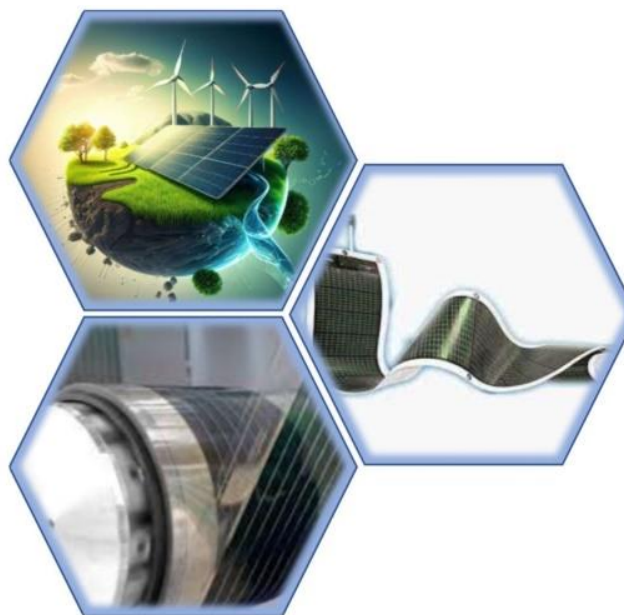
Global warming

Printed solar cells

Printed electronics

ABSTRACT

The ever-increasing human need for energy and the increase in the world's population have caused significant demand increases. This has created a global movement toward new energy sources, especially green energies with minimal negative environmental effects, with solar energy on top. On the other hand, an important requirement in the growth and consolidation of the position of solar cells is the reduction of the production cost of these cells and the increase in the speed of their production on a large scale, which can be achieved by using printing methods. The global energy crisis and its significance are first discussed in this study, after which the solutions are briefly discussed. Additionally, the different types of solar cells and their most recent advancements have been reviewed, and different printing techniques that may be exploited in each form of solar cell have been explained. Finally, the market forecasts for solar cells have been studied.



Corresponding author: mnnayini@icrc.ac.ir



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



سلول‌های خورشیدی چایی، چاره غیرقابل انکار بحران جهانی انرژی

محسن محمد رائی نائینی^{۱*}، مجتبی جلیلی^۱، سعید باستانی^۲، سارا خمسه^۴

۱- استادیار، گروه پژوهشی علوم و فناوری چاپ، پژوهشکده فیزیک رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵۴-۶۵۴.

۲- استاد، گروه پژوهشی علوم و فناوری چاپ، پژوهشکده فیزیک رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵۴-۶۵۴.

۳- استادیار، گروه پژوهشی پوشش‌های سطح و خوردگی، پژوهشکده پوشش‌های سطح و فناوری‌های نوین، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵۴-۶۵۴.

۴- دانشیار، گروه پژوهشی نانو فناوری رنگ، پژوهشکده پوشش‌های سطح و فناوری‌های نوین، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵۴-۶۵۴.

چکیده

نیاز روزافزون بشر به انرژی، در کنار افزایش جمعیت جهان موجب افزایش جهانی تقاضا برای انرژی در سطح جهانی شده است. همین امر یک حرکت جهانی به سوی منابع جدید انرژی و به ویژه انرژی‌های سبز با حداقل عوارض منفی برای محیط زیست رقم زده است که در راس آنها انرژی خورشیدی است. از سوی دیگر، یک پیش‌نیاز مهم در رشد جایگاه سلول‌های خورشیدی، کاهش هزینه تولید این سلول‌ها و همچنین افزایش سرعت تولید آنها در مقیاس وسیع است، موضوعی که با بهره‌گیری از روش‌های چایی به خوبی قابل حصول است. در این مقاله، موضوع بحران جهانی انرژی و اهمیت آن معرفی شده و در ادامه، روش‌های مواجهه با این بحران به اختصار بیان شده‌اند. همچنین انواع سلول‌های خورشیدی و آخرین دستاوردها در مورد آنها مرور شده‌اند و ظرفیت انواع روش‌های چایی برای بهره‌گیری در تولید هر دسته از انواع سلول‌های خورشیدی بررسی شده‌اند. در پایان به پیش‌بینی‌ها از آینده‌ی بازار سلول‌های خورشیدی پرداخته شده است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۶

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۲/۱۰/۱۰

شاپا چایی: ۲۲۵۱-۷۲۷۸

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۲۲۳

DOR: 20.1001.1.22517278.1402.13.4.3.1

واژه‌های کلیدی:

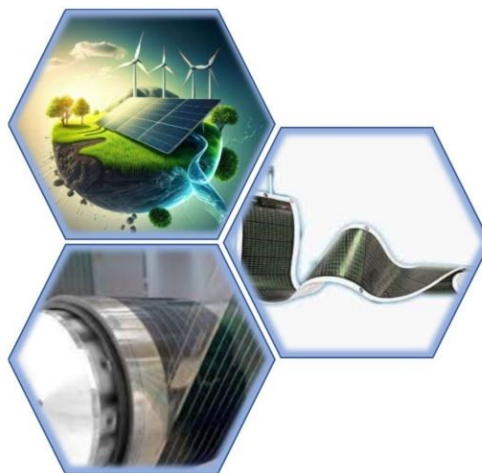
بحران جهانی انرژی

ردپای زیست محیطی

گرمايش جهانی

سلول‌های خورشیدی چایی

الکترونیک چایی



۱- مقدمه

بحران جهانی انرژی، طی سالیان اخیر، به عبارتی پر تکرار در رسانه‌ها، محافل سیاسی و تصمیم‌گیری تبدیل شده است. افزایش جمعیت، افزایش سرانه مصرف انرژی و انباشت آلودگی‌های زیست‌محیطی و گازه‌های گل‌خانه‌ای، عواملی هستند که جهان را درگیر بحران انرژی کرده‌اند. عوامل متعددی وجود دارند که ضرورت انجام تغییر اساسی در رویکرد جهانی به موضوع انرژی را نشان می‌دهند. در این بخش به اختصار به این عوامل اشاره می‌شود تا وضعیت کنونی جهان به لحاظ انرژی تصویر شود و ضرورت افزایش سهم انرژی‌های سبز در سبد انرژی جهانی روشن گردد.

۱-۱- افزایش تقاضا برای بهره‌مندی از انرژی

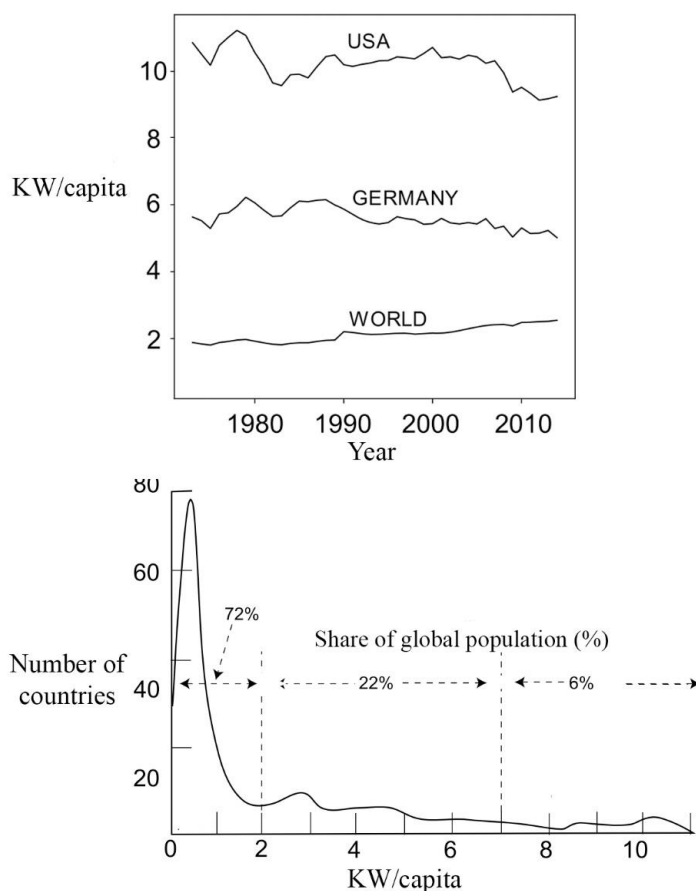
سرانه بهره‌گیری از انرژی در جهان در طی زمان به طور پیوسته روند رو به رشد داشته است. کهن‌ترین نشانه‌های یافته شده از انسان مربوط به حدود ۱۴۰ هزار سال پیش است. در آن زمان، تمام انرژی استفاده شده توسط هر فرد، محدود به مواد غذایی بوده که وی مصرف می‌نموده. با توجه به اینکه در جوامع گردآورنده-شکارچی آن زمان، میزان دسترسی به مواد غذایی بسیار محدود بوده، می‌توان با اطمینان عنوان کرد که میزان سرانه مصرف انرژی در آن دوران، کمتر از میزان انرژی دریافتی است که انسان امروزی تنها از طریق خوراک دریافت می‌کند. این در حالیست که در حال حاضر، سهم انرژی موجود در خوراک از کل سرانه مصرف انرژی هر فرد، میزان بسیار محدود و ناچیزی است. در حال حاضر متوسط جهانی دریافت انرژی از طریق مواد غذایی، حدود ۲۰۰۰ کیلوکالری در روز (معادل توان مصرفی ۱۰۰ وات) است که بیش از کل استفاده بشر اولیه از انرژی بوده است. روند رو به رشد بهره‌گیری انسان از منبع انرژی به صورت پیوسته ادامه داشته و در مقطعی با جهش روبرو بوده است. با کشف آتش و بهبود تغذیه و بهره‌مندی انسان از مواد غذایی پخته شده و همچنین توسعه فناوری‌های مبتنی بر حرارت دادن مواد نظیر پخت آجر و خالص‌سازی و شکل‌دهی به فلزات، این میزان تا بیش از ۵ برابر هم افزایش می‌یابد. با توسعه کشاورزی و افزایش سطح زمین‌های زیر کشت، بهره‌گیری انسان‌ها از نیروی حیوانات و استفاده محدود از انواع آسیاب‌ها و توسعه دریانوردی با کشتی بادبانی، به نظر می‌رسد که میزان بهره‌گیری انسان‌ها از انرژی تا اواخر قرن سیزدهم میلادی، به معادل بیش از ۲۰۰۰ وات به ازاء هر نفر افزایش یافته باشد. اما با آغاز انقلاب صنعتی و رواج استفاده از سوخت‌های فسیلی، نرخ رشد سرانه‌ی مصرف انرژی به شدت افزایش یافته است و در حال حاضر این میزان در ایالات متحده به حدود ۱۰۰۰۰ وات به ازاء هر نفر افزایش یافته است. این میزان مصرف از یک سو، رقابت بر سر دستیابی به منابع انرژی

را افزایش داده که منجر به بی‌ثباتی سیاسی و حتی درگیری‌های نظامی در کشورهای دارنده‌ی این ذخایر گردیده، و از سوی دیگر موجب نوسانات شدید قیمتی در این ذخایر شده است. این نوسانات به حدی است که قیمت هر بشکه نفت خام را از حدود ۳/۶ دلار در هر بشکه در دهه ۱۹۷۰ میلادی (پیش از شکل‌گیری آپک) به بیش از ۱۶۰ دلار در سال ۲۰۰۸ افزایش داد که با وجود افت قابل توجه ارزش دلار طی این سال‌ها، باز هم مبین یک رشد چند صد درصدی در قیمت نفت است. همین امر بسیاری از معادلات اقتصادی و محاسبات هزینه تولید را دچار اختلال می‌کند و اتکا به منابع سوخت فسیلی به عنوان منابع پایدار تامین انرژی را با تردید جدی مواجه می‌سازد (۱).

علاوه بر این، میزان مصرف انرژی با میزان رشد یافتگی کشورها ارتباط تنگاتنگ دارد، به نحوی که سرانه مصرف انرژی در ایالات متحده، بیش از ۵ برابر متوسط جهانی این میزان است. به همین دلیل در حالی که کشورهای توسعه یافته در حال مهار سرانه‌ی مصرف انرژی در جوامع خود هستند، کشورهای در حال توسعه به سرعت در حال افزایش میزان سرانه مصرف انرژی خود به منظور پر کردن عقب‌ماندگی موجود می‌باشند. همین امر یک عامل موثر بر افزایش تقاضای جهانی برای انرژی است. این موضوع در شکل ۱ به خوبی نمایش داده شده است. بر اساس برآورد اداره‌ی اطلاعات انرژی ایالات متحده، تا سال ۲۰۳۵، تقاضا برای بهره‌مندی از انرژی، به طور متوسط سالانه ۱/۶٪ رشد خواهد داشت که این میزان برای کشورهای توسعه یافته نظیر ایالات متحده کمتر از این مقدار و برای اقتصادهای نوظهور و کشورهای در حال توسعه بسیار بیشتر است به طوری که این میزان برای چین حدود ۲/۱٪ برآورد می‌شود (۲). همچنین همان‌طور که به خوبی در این شکل دیده می‌شود، توزیع بهره‌مندی سرانه از منابع انرژی بسیار نامتوازن است به نحویکه سرانه‌ی استفاده از انرژی برای ۷۲٪ جمعیت جهان، معادل کمتر از ۲ کیلووات است و همزمان این رقم برای حدود ۶٪ جمعیت جهان بیش از ۷ کیلووات است (۳، ۴).

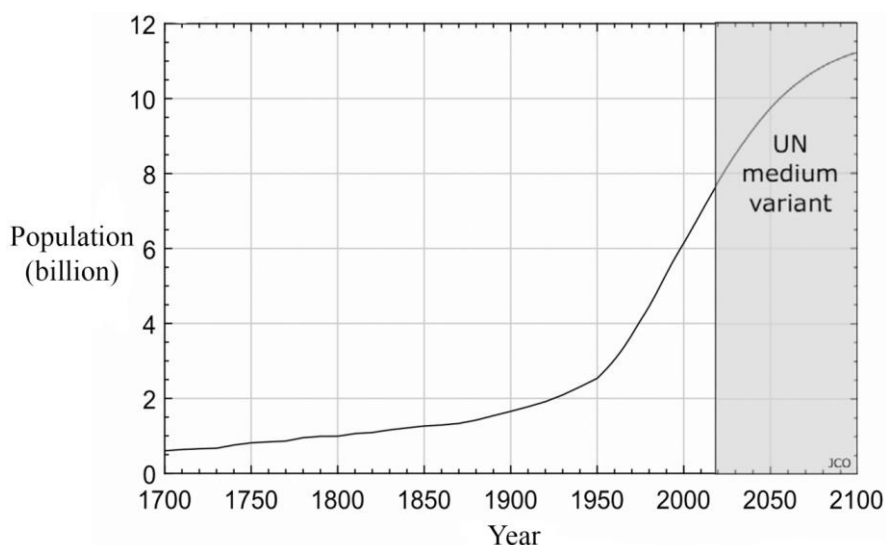
علاوه بر این موارد که مؤید رشد سرانه استفاده جهانی از منابع انرژی است، جمعیت جهان نیز به طور فزاینده در حال رشد است. متوسط جهانی نرخ رشد جمعیت از میانه‌ی قرن بیستم میلادی به سرعت رو به افزایش نهاد و در سال ۱۹۶۲ به بیشینه‌ی تاریخی خود یعنی ۲/۱٪ رسید. پس از آن این نرخ کاهش یافت و در حال حاضر کمی بیش از ۱٪ است. این بدان معناست که حتی با فرض متوقف کردن رشد استفاده سرانه از منابع انرژی، باز هم فقط به واسطه رشد جمعیت، سالانه ۱٪ رشد نیازمندی به منابع انرژی را شاهد خواهیم بود. این در حالی است که متوسط، سرانه‌ی جهانی استفاده از منابع انرژی، نرخ رشد بیش از ۱٪ را نشان می‌دهد. تخمین‌های صورت گرفته، افزایش جمعیت کره‌ی زمین به بیش از ۱۱ میلیارد نفر را تا سال ۲۱۰۰ پیش‌بینی می‌کنند (شکل ۲) (۵، ۱).

^۱ در این نوشتار، به منظور نزدیکی مقادیر به ذهن، در اغلب موارد به جای مقدار انرژی که واحد آن بر حسب ژول (J) است، نرخ مصرف آن با واحد وات (W) نمایش داده شده است.



شکل ۱: (بالا) محدود شدن سرانه استفاده از انرژی در کشورهای توسعه یافته در عین رشد متوسط جهانی آن (پایین) توزیع نامتوازن سرانه استفاده از انرژی در بین کشورهای مختلف و بخش‌های مختلف جمعیت جهان (۳، ۴).

Figure 1: (Top) Limitation of per capita energy use in developed countries while its global average growth (Bottom) Uneven distribution of per capita energy use among different countries and different parts of the world's population (3, 4).



شکل ۲: روند تغییرات جمعیت جهان طی سه قرن گذشته و پیش‌بینی روند آن تا پایان قرن حاضر (۵).

Figure 2: The trend of world population changes during the last three centuries and its forecast until the end of this century (5).

هزینه‌های متغیر مرتبط با سوخت بخش کمی از هزینه تمام شده را شامل می‌شود. بنابراین تمامی عوامل موثر بر نرخ بهره سرمایه و قیمت سوخت، قیمت نیروی الکتریکی نهایی را تحت تاثیر قرار داده و در جدول رده‌بندی روش‌های تولید الکتریسیته جایجایی‌هایی را ایجاد کند. به همین دلیل و به جهت اینکه مقایسه‌ی قیمتی بین انواع فناوری‌های تولید الکتریسیته امکان‌پذیر شود، اداره‌ی اطلاعات انرژی ایالات متحده، معیاری را تحت عنوان LCOE ارائه کرده. این معیار، در واقع بر اساس قیمت نهاده‌ها و نرخ بهره در سال ۲۰۱۷ در ایالات متحده محاسبه شده و قیمت الکتریسیته را بر مبنای سنت دلار بر کیلووات ساعت (cent/kWh) معرفی می‌کند. این مقادیر در جدول ۱ نمایش داده شده است. از این معیار در ادامه این نوشتار هم برای مقایسه‌های فناوری‌های مختلف سلول‌های خورشیدی چاپی استفاده خواهد شد.

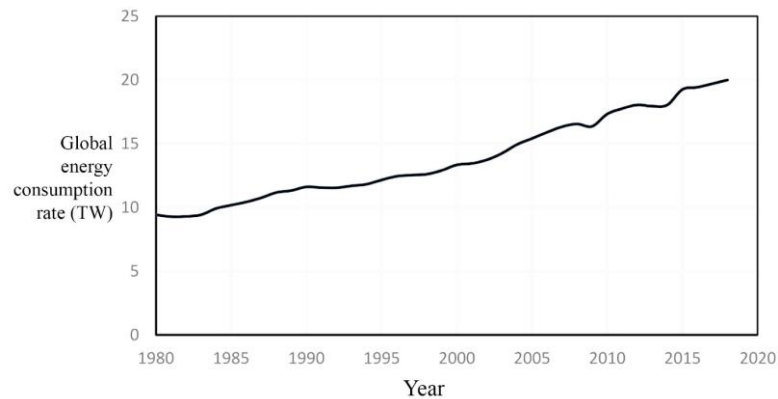
همانطور که مشخص است، هزینه تولید نیروی الکتریسیته با استفاده از انرژی‌های سبز نظیر سلول‌های فتوولتائیک و یا بادی، کاملاً قابل رقابت با هزینه تولید نیروی الکتریسیته با استفاده از سوخت‌های فسیلی یا هسته‌ای است. در این بین باید این موضوع را نیز مورد توجه قرار داد که بخش ذخایر انرژی فسیلی که استخراج ساده و کم‌هزینه‌ای داشتند تاکنون برداشت شده‌اند و بیشتر چیزی که باقی مانده، با هزینه استخراج بسیار بیشتری قابل استحصال است. به این ترتیب این رقابت قیمتی باز هم به سود انرژی‌های سبز جابجا خواهد شد. البته از دیگر سو، انرژی‌های سبز در مقایسه با نیروگاه‌های حرارتی و هسته‌ای، ضریب ظرفیت^۱ پایینتری دارند و همین امر تا حدی هزینه‌ی انرژی الکتریسیته تولیدی توسط آنها را افزایش داده است.

بنابراین، هم‌زمان با رشد متوسط جهانی سرانه بهره‌برداری از انرژی، جمعیت نیز با نرخ قابل توجهی در حال افزایش است. طی سالیان گذشته، این دو عامل در کنار یکدیگر موجب افزایش شدید نیاز به انرژی، در جهان طی سالیان شده‌اند. علاوه بر این، برآوردها نشان می‌دهند که بر اساس قیمت‌های ثابت سال ۱۹۸۰ میلادی، به ازاء هر یک دلار تولید ناخالص ملی، به معادل حدود ۲/۲W انرژی نیاز است. البته بخشی از این نیاز از محل صرفه‌جویی ناشی از افزایش بازدهی صنایع تامین می‌شود. ولی برای دستیابی به نرخ رشد اقتصادی مطلوب، باز هم نیاز به مقدار قابل توجهی از انرژی خواهد بود. روند جهانی مصرف انرژی طی چهار دهه‌ی گذشته در شکل ۳، نمایش داده شده است. سازمان اطلاعات انرژی ایالات متحده، تا سال ۲۰۴۰، رشد متوسط سالانه‌ی ۱٪ را برای مصرف جهانی انرژی پیش‌بینی کرده است. به این ترتیب، کل نیاز جهانی انرژی که در حال حاضر معادل کمی بیش از ۲۰TW است، تا سال ۲۰۴۰ به ۲۴/۶TW افزایش خواهد یافت که تامین چنین توان بالایی بسیار دشوار خواهد بود (۴).

۱-۲- نفوذ فناوری جدید و قیمت انرژی

بیشتر انرژی که توسط بشر استفاده می‌شود، به شکل الکتریسیته است. بنابراین برای پیش‌بینی روند بهره‌گیری از انواع منابع انرژی در آینده شاید ساده‌تر آن باشد که از روند تغییرات فناوری و قیمت در حوزه تولید نیروی برق پرسش به عمل آید.

محاسبات قیمتی نیروی الکتریسیته، تابع عوامل متعدد و محاسبات پیچیده‌ی اقتصادی است. در برخی از روش‌های تولید الکتریسیته نظیر نیروگاه‌های گازی، هزینه‌های متغیر تولید که مرتبط با مصرف گاز است، بخش بزرگی از هزینه تمام شده را تشکیل می‌دهند و در نقطه مقابل، در نیروگاه‌های هسته‌ای، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه^۱ بخش عمده هزینه تمام شده را شکل می‌دهد و



شکل ۳: نرخ جهانی مصرف انرژی طی چهار دهه‌ی گذشته (۴).

Figure 3: The trend of global energy consumption rate in the last four decades (4).

¹ Capital

² Capacity factor

جدول ۱: میزان «هزینه‌ی انرژی هم‌تراز شده»^۱ (LCOE) برای انواع انرژی، پیش‌بینی شده برای سال ۲۰۲۲ در ایالات متحده آمریکا (۴)

Table 1: The levelized cost of energy (LCOE) for various energy sources, forecasted in united states in 2022 (4).

| Plant type | Capacity factor (%) | US levelized cost 2017 (cents/kWh) | | | | |
|---------------------|---------------------|------------------------------------|------------|--------------|-------------------------|-------------------------|
| | | Capital | Fixed O&M* | Variable O&M | Transmission investment | LCOE without tax credit |
| Coal | 85 | 8.4 | 0.95 | 3.56 | 0.11 | 13.01 |
| Conventional CT** | 30 | 3.72 | 0.67 | 5.16 | 0.32 | 9.87 |
| Advanced CT | 30 | 2.36 | 0.26 | 5.57 | 0.32 | 8.51 |
| Nuclear | 90 | 6.94 | 1.29 | 0.93 | 0.10 | 9.26 |
| Conventional CC*** | 87 | 1.26 | 2.5 | 3.49 | 0.11 | 5.01 |
| Advanced CC | 87 | 1.44 | 1.3 | 3.22 | 0.11 | 4.90 |
| Wind onshore | 41 | 4.31 | 1.34 | 0.0 | 0.25 | 5.91 |
| Wind offshore | 45 | 11.58 | 1.99 | 0.0 | 0.23 | 13.80 |
| Solar photovoltaics | 29 | 5.12 | 0.87 | 0.0 | 0.33 | 6.32 |

* Operation and maintenance

** Combustion turbine

*** Combined cycle

حوزه‌های گوناگون فناوری توسط این مدل صورت گرفته از جمله در حوزه‌ی فناوری تولید فولاد و همچنین کاهش مصرف زغال سنگ و افزایش مصرف گاز طی اوایل قرن بیست و یکم. در حال حاضر، الگوهای ارائه شده توسط این مدل در حوزه‌ی انرژی، حکایت از افزایش سریع سهم بازار انرژی‌های سبز از کل بازار انرژی دارد. در بین انرژی‌های سبز نیز پیش‌بینی این مدل آن است که سهم بازار نیروگاه‌های برقی‌آبی کاهش یافته و سهم سایر انواع انرژی سبز نظیر نیروگاه‌های بادی و فتوولتاییک افزایش خواهد یافت (۱، ۶).

۱-۳- رد پای زیست‌محیطی^۳

از اواخر قرن هجدهم میلادی و با آغاز عصر صنعتی شدن، به ناگاه نرخ بهره‌کشی انسان از منابع طبیعی فزونی یافت و به گونه‌های ناپایدار، به دگرگونی طبیعت منجر شد. میزان استفاده انسان از زمین، منابع طبیعی و به خصوص آب و در عین حال میزان تولید ضایعات و پسماند به شدت و با نرخی غیرقابل جبران توسط طبیعت افزایش یافت. با این حال تنها از اواسط قرن بیستم بود که به تدریج، آسیب‌های وارد شده به محیط‌زیست به دغدغه‌ی انسان‌ها تبدیل شد. عبارت ردپای زیست‌محیطی، معیاری از میزان فشار انسان‌ها بر طبیعت تعریف می‌شود تا بتواند جنبه‌های گوناگون این فشار در حوزه‌های برداشت منابع، تولید و پراکنده‌سازی مواد ضایعات و مواد مضر و برداشت از سهم سایر گونه‌های طبیعی را پوشش دهد (۷). از مهم‌ترین مزیت‌های

ضریب ظرفیت یک نیروگاه، بیانگر مقدار انرژی تولیدی آن نیروگاه در حالت واقعی است، نسبت به مقدار انرژی تولیدی در همان نیروگاه، با این فرض که آن نیروگاه با تمام توان و به صورت تمام وقت فعالیت می‌کند. طبیعی است که به خاطر نوسان شدت تابش نور خورشید و چرخه‌های شب و روز، تابستان و زمستان، ابر و آفتاب و یا تغییر شدت وزش باد و غیره، این ضریب برای نیروگاه‌های فتوولتاییک و بادی در مقایسه با نیروگاه‌های حرارتی و هسته‌ای بسیار پایینتر باشد. اما با این وجود، باز هم الکتروسیته تولیدی توسط این نیروگاه‌ها با نیروگاه‌های وابسته به سوخت‌های فسیلی و منابع تجدیدناپذیر قابل رقابت است. همچنین باید توجه داشت که انرژی‌های سبز، هم از آن جهت که وابستگی کمتری به منابع هیدروکربنی دارند و از منظر امنیت انرژی ارجح هستند و هم از جهت عوارض زیست‌محیطی بسیار اندکی که دارند، مورد حمایت‌های تعرفه‌ای دولت‌ها از جمله حمایت‌های مالیاتی هم هستند که همین امر حتی مطلوبیت قیمتی آنها را افزایش نیز می‌دهد (۴).

موضوع دیگر، میزان نفوذ انرژی‌های سبز، به عنوان نسل جدید فناوری‌های حوزه انرژی در بازار است. یکی از مدل‌های شناخته شده برای تخمین نرخ نفوذ یک فناوری جدید به جای یک فناوری قدیمی و جایگزین شدن آن، تابع لاجستیک ورهالست^۲ است. این مدل، روند افزایش سهم بازار فناوری جدید و کاهش سهم بازار فناوری قدیمی در طی زمان را پیش‌بینی می‌کند. تاکنون پیش‌بینی‌های موقفی در

¹ Levelized cost of energy

² Verhulst

³ Environmental footprint

مناسب‌ترین منابع انرژی برای تولید نیروی الکتریسیته، با توجه به معیار ردپای آبی است.

۱-۳-۲- قانون بقای انرژی و گرم شدن زمین

اگر به موضوع انرژی و مصرف آن به صورت کلان نگریسته شود، می‌توان اصل بقای انرژی را برای کل سیاره اعمال کرد. کل انرژی وارد شده به زمین، شامل انرژی تابشی از سوی خورشید (انرژی دریافتی از سوی سایر اجرام آسمانی بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است) حدوداً معادل 173000 TW است. حدود ۳۰٪ از این میزان با توجه به ضریب سپیدایی^۴ متوسط زمین، مستقیماً به فضا انعکاس داده می‌شود. باقی این انرژی توسط زمین جذب شده و نهایتاً به صورت انواع انرژی نظیر انرژی حرارتی، انرژی شیمیایی (با فتوسنتز و غیره) و انرژی امواج (باد و آب) در می‌آید. تمامی این انواع انرژی در کنار انرژی حاصل از سوختن و همچنین انرژی زمین‌گرمایی، نهایتاً به صورت حرارت در آمده و به شکل امواج فروسرخ ساطع می‌شوند. با افزایش نرخ مصرف انواع سوخت و همچنین گیاهان، میزان این انرژی که به صورت حرارت و امواج فروسرخ باید تخلیه شوند افزایش یافته است. این موضوع خطر گرم شدن زمین را در پی دارد. اول اینکه چرخه‌های تاریخی آب و هوایی سیاره‌ی زمین نشان می‌دهند که چرخه‌ی متناوب و تکرار شونده‌ای بین افزایش تابش انرژی از سطح زمین و انرژی تابیده شده از فضا به سطح زمین وجود دارد. از سوی دیگر، خود مصرف بیشتر انرژی، موازنه انرژی زمین را بر هم زده و می‌تواند موجب افزایش دمای زمین شود (۱).

جدول ۲: میزان ردپای آبی مصرفی کل (مشمول بر فرآیند تولید تجهیزات، بهره‌برداری از آنها و تامین سوخت واحد نیروگاهی) به ازای واحد تولید انرژی الکتریسیته از منابع انرژی مختلف (۹).

Table 2: The total amount of water footprint consumed (including the process of producing equipment, using them and supplying fuel to the power plant unit) per unit of electricity production from different energy sources (9).

| Energy source | Total water footprint, including fuel supply, construction and operation (m^3/GWh) |
|------------------|--|
| Conventional oil | 777 – 4464 |
| Oil shale | 1280 – 7990 |
| Natural gas | 273 – 4464 |
| Coal | 284 – 7560 |
| Nuclear | 72 – 5420 |
| Hydro power | 1090 – 3096000 |
| Photovoltaics | 27 – 1278 |
| Wind | 0.72- 42 |

⁴ Albedo

انرژی‌های سبز، کاهش ردپای زیست‌محیطی است. این موضوع در ادامه به شکل مفصل‌تری توضیح داده خواهد شد.

۱-۳-۱- ردپای آبی^۱

آب به عنوان یکی از مهم‌ترین نیازهای توسعه در جوامع انسانی از گذشته مطرح بوده است. با افزایش جمعیت و افزایش مطالبه انسان‌ها برای دستیابی به رفاه و سطح بالاتر بهداشت، تغذیه و انرژی، میزان مصرف آب در جوامع به سرعت رو به رشد نهاده است. در حال حاضر بیشترین مصرف آب در جهان مربوط به بخش کشاورزی است و پس از آن بخش صنعت-انرژی با ۲۰٪ مصرف آب جهانی، در رده‌ی دوم قرار دارد و البته بیشترین نرخ رشد مصرف آب در جهان مربوط به همین بخش است (۸). در گزارشی که آژانس بین‌المللی انرژی (IEA^۲) در سال ۲۰۱۲ منتشر کرد، پیشبینی کرد که میزان مصرف آب در بخش انرژی، در بازه‌ی بیست ساله منتهی به سال ۲۰۳۲، رشد بیش از ۸۵٪ را تجربه خواهد نمود (۹). این درحالیست که در حال حاضر نیز بخش بزرگی از جمعیت جهان تحت تنش آبی قرار دارند. در واقع بر اساس مطالعات صورت گرفته، بیش از دو سوم مردم جهان، حداقل یک بار در ماه با کمبود آب مواجه می‌شوند و بیش از نیم میلیارد نفر از جمعیت جهان، تمام سال را با کمبود آب روبرو هستند (۱). بنابر این در توسعه‌ی واحدهای تولید الکتریسیته، به عنوان مهم‌ترین گونه انرژی مصرفی در حال حاضر، باید به میزان ردپای آبی آنها توجه نمود. در سایه‌ی همین نوع نگاه است که مشخص می‌شود برخی گونه‌های انرژی تجدیدپذیر نظیر زیست‌سوخت‌ها^۳ که در سالیان گذشته به شدت مورد حمایت دولت‌ها نیز قرار گرفتند، میزان ردپای آبی مصرفی بسیار زیادی دارند که مطلوبیت زیست‌محیطی آنها را به شدت با تردید روبرو می‌سازد. در جدول ۲، ردپای آبی مصرفی واحد انرژی تولیدی در انواع واحدهای تولید الکتریسیته با هم مقایسه شده است. باید توجه داشت که میزان ردپای آبی، صرفاً مربوط به مرحله‌ی بهره‌برداری از واحد نیروگاهی نیست و بخشی از آب مصرفی، مربوط به فرآیند تولید تجهیزات نیروگاهی و همچنین فرآیند تولید و تامین سوخت احتمالی مورد نیاز آنها است. آنچه در این جدول مورد اشاره قرار گرفته، مجموع کل ردپای آبی مصرفی مربوط به هر یک از این نوع واحدها است. همانطور که مشخص است، نیروگاه‌های خورشیدی و بادی در مقایسه با انواع نیروگاه‌های حرارتی و هسته‌ای، ردپای آبی بسیار اندکی دارند. همچنین باید به نیروگاه‌های برق‌آبی به عنوان قدیمیترین منبع انرژی سبز نیز توجه کرد که میزان ردپای آبی بسیار بالایی دارد. و از سوی دیگر، انرژی خورشیدی یکی از

¹ Water footprint

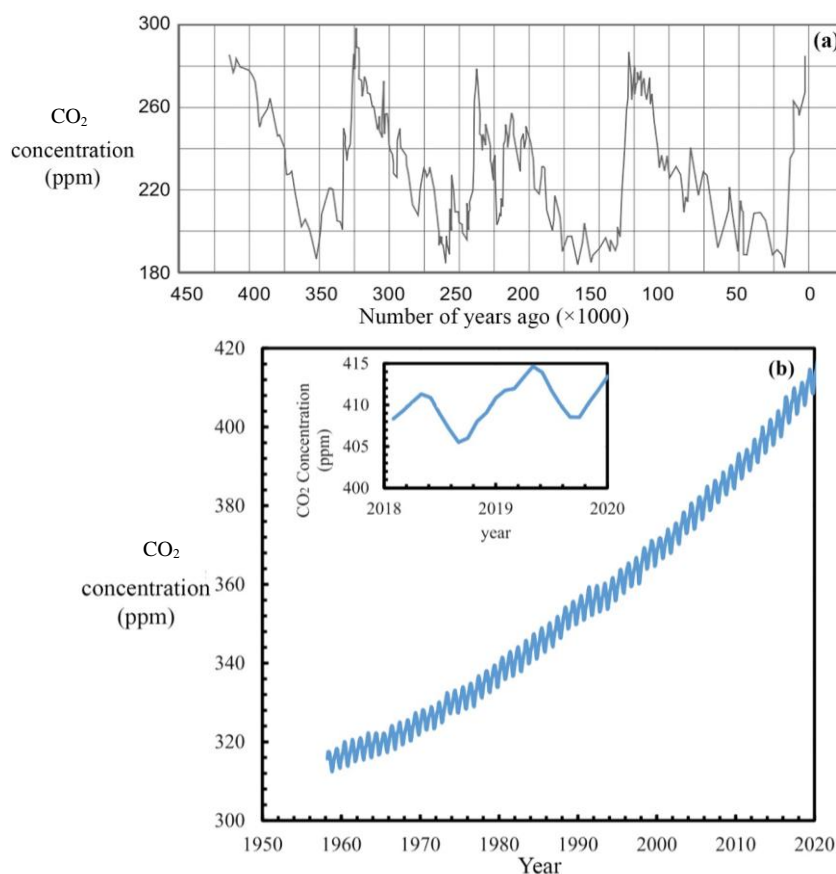
² International energy agency

³ Biofuels

۳-۳-۱- گازهای گلخانه‌ای

به هر صورت، تغییر غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو، چه موجب افزایش و چه موجب کاهش دمای سیاره شود، نهایتاً بقای حیات در زمین و گونه‌ی انسان را با مخاطره مواجه خواهد ساخت. اما نکته اینجاست که با فعالیت‌های صنعتی گسترده بشر طی دو قرن گذشته، غلظت این گازها و مشخصاً دی‌اکسید کربن به بیشترین مقدار تاریخی خود در سطح سیاره زمین رسیده است. همان‌طور که در شکل ۴ نمایش داده شده است، غلظت دی‌اکسید کربن در جو، طی نیم میلیون سال گذشته در بازه‌ی ۱۸۰-۳۰۰ ppm در نوسان بوده است. اما در حال حاضر نرخ افزایش این گاز در جو به شدت افزایش یافته به نحوی که مقدار آن از حدود ۳۱۵ ppm در سال ۱۹۵۰ میلادی، به حدود ۴۱۵ ppm در سال ۲۰۲۰ رسیده است که نسبت به سقف تاریخی پیشین نیز رشد چشمگیری نشان می‌دهد. این روند برای سایر گازهای گلخانه‌ای نیز قابل مشاهده است. در شکل ۵ روند تغییرات غلظت دو گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید نیتروژن و متان، که بعد از CO_2 ، بیشترین سهم را در بین گازهای گلخانه‌ای جو دارند نمایش داده شده است.

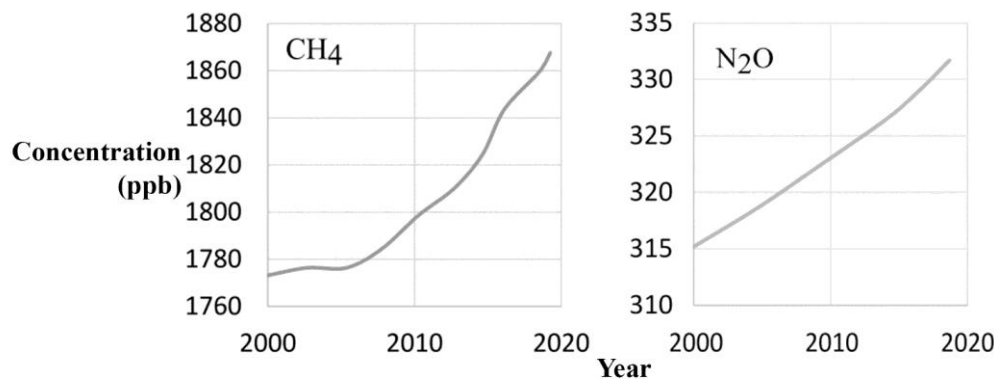
گازهای گلخانه‌ای به مجموعه‌ای از گازها در جو زمین گفته می‌شود که با جذب انرژی خورشید، ذخیره‌سازی آن و بازنشر آن در قالب امواج بلند فروسرخ (هم‌زمان به سمت فضا و به سطح زمین)، موجب حفظ دمای زمین و کاهش نوسانات دمایی آن می‌شوند. مهم‌ترین این گازها با اختلاف دی‌اکسید کربن است و بعد از آن گازهای متان، دی‌اکسید نیتروژن و ترکیبات فلئوئور قرار دارند. غلظت این ترکیبات در اتمسفر، برای حفظ الگوی دمایی و بوم‌شناسی زمین بسیار مهم است. افزایش غلظت این ترکیبات در جو، می‌تواند موجب گرم شدن و افزایش دمای زمین شود. هرچند که برخی پیشبینی‌ها حکایت از آن دارد که با عبور دمای زمین از یک مقدار مشخص، با افزایش تبخیر آب اقیانوس‌ها در مدارهای نزدیک به خط استوا و بارش آب تیخیر شده در قطب‌های زمین به صورت برف، ضریب سپیدایی زمین افزایش یافته و بخش بیشتری از انرژی خورشید را به خارج از جو منعکس می‌کند. همین امر، به وقوع عصر یخبندان جدیدی در عمر زمین منتج خواهد شد.



شکل ۴: روند تغییرات غلظت دی‌اکسید کربن در جو (الف) طی دوره تاریخی بلند مدت ۴۲۰ هزار سال گذشته (۱۰) و

(ب) از ۱۹۵۸ تاکنون (داخل: از ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۰) (۱۱)

Figure 4: Changes in the concentration of carbon dioxide in the atmosphere (a) during the long-term historical period of the last 420 thousand years (10) and (b) from 1958 until now (inset: from 2018 to 2020) (11).



شکل ۵: روند تغییرات غلظت گازهای گلخانه‌ای دی‌اکسید نیتروژن و متان در جو، طی بازه‌ی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ میلادی (۱).

Figure 5: Changes in the concentration of greenhouse gases, nitrogen dioxide and methane in the atmosphere, during the period from 2000 to 2020 (1).

زمین گرمایی، مبداء انرژی‌شان خورشید است. بخشی از انرژی خورشید که به سطح زمین می‌رسد، به شکل باد، موج دریا و چرخه‌ی باران تبدیل می‌شود که می‌تواند توسط نیروگاه‌های بادی، برق‌آبی و غیره برداشت شود. بخشی نیز با فتوسنتز به شکل ساختارهای زیستی در می‌آید که می‌تواند به زیست‌سوخت و چوب برای سوزاندن تبدیل شود. بهره‌گیری مستقیم از انرژی خورشیدی اما ظرفیت بسیار زیادی برای تامین انرژی مورد نیاز جهان خواهد داشت. میزان انرژی خورشیدی که به سطح زمین می‌رسد، در یک روز آفتابی و در آسمان صاف، به طور متوسط در حدود 1000 W/m^2 است که عدد بسیار بزرگی است. این انرژی به صورت امواج الکترومغناطیس به زمین می‌رسد. این امواج، محدوده‌ی بزرگی از طول‌موج‌ها از امواج گاما تا امواج رادیویی را شامل می‌شوند اما ۴۵٪ از کل این انرژی، در قالب امواج مرئی، به زمین می‌رسد.

چنانچه بتوان این منبع عظیم انرژی را به کار بست، می‌توان بخش زیادی از سبد انرژی مصرفی را به این نوع از انرژی سبز اختصاص داد. این موضوع به ویژه از آن جهت اهمیت دارد که کشور ایران، در منطقه‌ی جغرافیایی، با بیشترین میزان تابش سالیانه انرژی خورشید قرار گرفته است (شکل ۶). راه‌کارهای متفاوتی برای بهره‌برداری از این انرژی توسعه یافته که به طور کلی، یا از انرژی خورشید برای گرم کردن سیال و مشخصاً آب استفاده می‌کنند و یا اینکه انرژی دریافتی از خورشید را به شکل الکتریسیته درآورده و در طیف وسیعی از کاربردها از آن بهره می‌برند. استفاده حرارتی از انرژی خورشید، اگرچه سهولت بیشتری دارد ولی تنها در مصارف محدود و محلی قابل بهره‌برداری است و امکان انتقال انرژی به دست آمده نیز تقریباً غیرممکن است. به همین دلیل توسعه‌ی واحدهای تولید نیروی فتوولتاییک جذابیت کاربردی، اقتصادی و صنعتی بسیار بیشتری دارند.

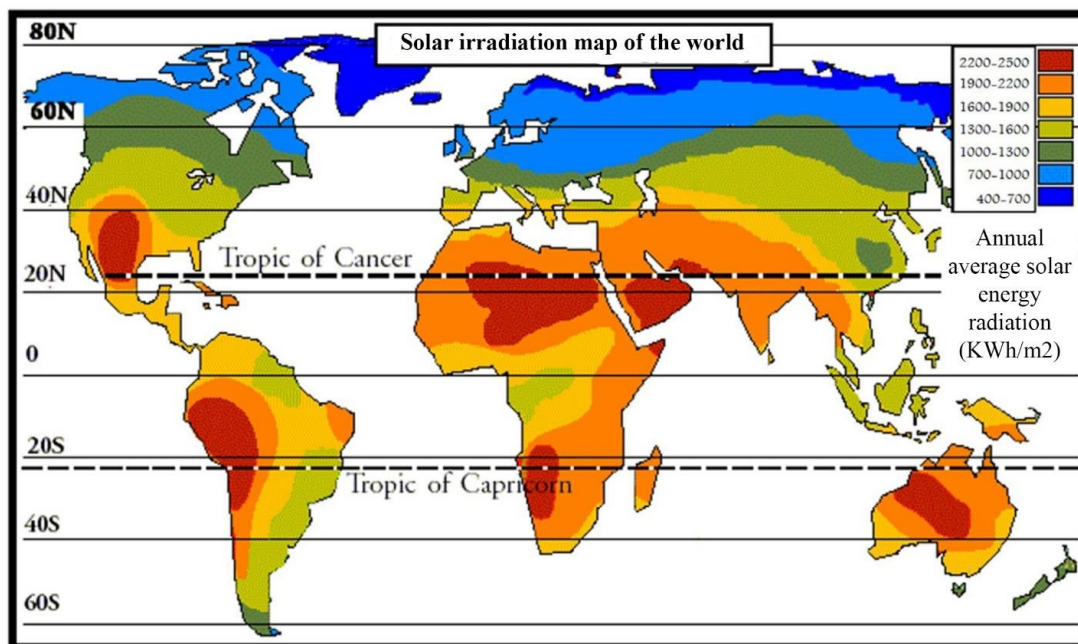
با توجه به ابعاد جهانی بحران تغییرات اقلیمی، و اینکه این تغییرات به حد غیرقابل چشم‌پوشی رسیده است، قوانین و پیمان‌های بین‌المللی متعددی - نظیر توافق پاریس - در حال شکل‌گیری است تا کشورهایی که به این تغییرات بی‌توجهی کنند را با تنبیه‌های جدی مواجه سازد. با توجه به اینکه بخش عمده‌ی انتشار گازهای گلخانه‌ای و به خصوص دی‌اکسید کربن در جو ناشی از صنعت انرژی است، برای خلاصی از شر این تنبیه‌ها و همچنین عوارض ناشی از گرم شدن زمین، چاره‌ای جز اصلاح رویکرد در توسعه‌ی انرژی وجود ندارد.

۲- انرژی خورشید، منبع انرژی عظیم، پایدار، ارزان و در دسترس

همانطور که عنوان گردید، از زوایای گوناگون اقتصادی و هزینه‌ای، سیاسی و امنیتی و همچنین بوم‌شناسی و زیست محیطی، وضعیت انرژی در جهان بحرانی است و در نقطه‌ای است که باید به طور جدی و با فوریت به آن توجه نمود. رویکردهای گوناگونی برای مواجهه با این چالش مطرح شده که از راه‌های رادیکالی نظیر کاهش جهانی مصرف انرژی تا افزایش بهره‌وری صنایع و بهره‌گیری از منابع انرژی سبز را شامل می‌شود. تمامی راه‌کارهای علم‌یاتی اما بر افزایش سهم انرژی‌های سبز از سبد انرژی مصرفی جهان به عنوان یک شرط لازم تاکید دارند. در حال حاضر تنها در حدود ۱۳/۷ درصد انرژی مصرفی جهان از منابع تجدیدپذیر تامین می‌شود. از این میزان نیز، بیش از نیمی را زیست‌سوخت، چوب و نیروگاه‌های برق‌آبی تشکیل می‌دهند که به واسطه‌ی ردپای آبی زیاد و همچنین انتشار گازهای گلخانه‌ای، مطلوبیت کمتری در مقایسه با انواع انرژی‌های سبز نظیر خورشیدی، بادی و زمین‌حرارتی^۱ دارند.

بخش عمده انرژی که به سطح سیاره زمین می‌رسد، از خورشید است. تمامی انواع انرژی سبز و تجدیدپذیر، به استثناء انرژی

¹ Geothermal



شکل ۶: نقشه‌ی توزیع جغرافیایی میزان تابش انرژی خورشید (۱۲).

Figure 6: Map of the geographical distribution of solar radiation (12).

سایه‌ی کاهش قیمت تمام شده برق تولیدی به وسیله سامانه‌های فتوولتاییک بود که روند توسعه این ساختارها رشد فزاینده‌ای را تجربه کند.

شکل ۷ روند افزایش ظرفیت نصب شده‌ی واحدهای تولید برق فتوولتاییک در جهان را طی سه دهه‌ی گذشته نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، این روند از سال ۲۰۰۲ به ناگه با یک جهش بسیار بزرگ روبرو شده است. این شیب تند افزایش ظرفیت نصب شده‌ی واحدهای فتوولتاییک، به شکل فزاینده تا امروز ادامه یافته به نحوی که از ۱ گیگا وات در سال ۲۰۰۷ ظرف تنها ۱۳ سال، به بیش از ۶۰۰ گیگاوات در سال ۲۰۱۹ رسیده است که نشان از یک افزایش خیره کننده دارد.

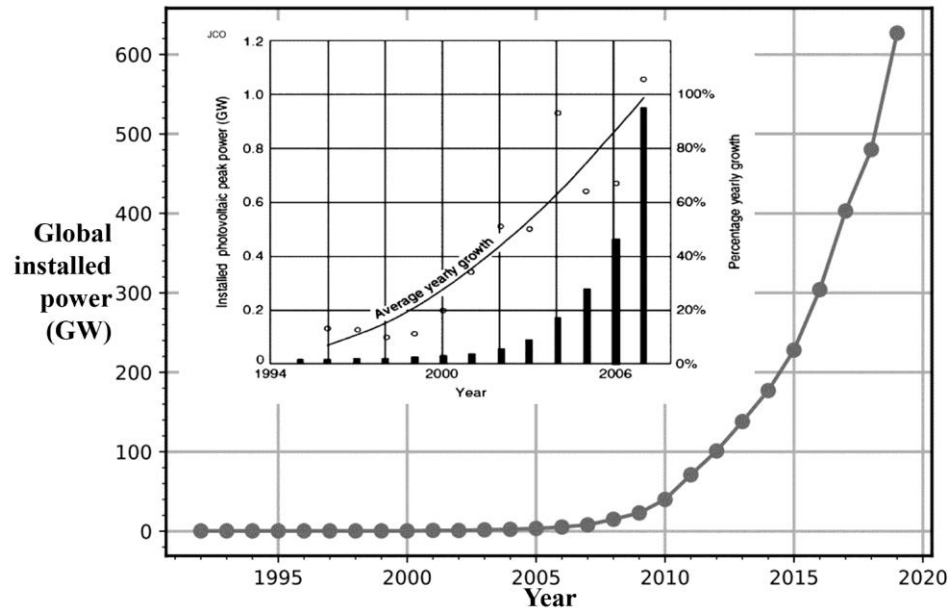
مهم‌ترین عامل این افزایش اقبال جهانی به فتوولتاییک‌ها، کاهش قیمت تمام‌شده‌ی برق تولیدی به وسیله‌ی آنها و افزایش بازده عملکرد آنها است. این روند به ویژه بعد از گسترش شدید نیروگاه‌های فتوولتاییک در چین شدت گرفته است. روند این تغییرات در کشور آمریکا از سال ۲۰۱۰ به بعد در شکل ۸ نمایش داده شده است. همانطور که مشخص است، به غیر از هزینه‌های نرم که مستقل از مسائل فنی است، قیمت ماژول^۱ صفحه فتوولتاییک، بیشترین سهم را از قیمت تمام شده برق فتوولتاییک تولیدی دارند.

۳- فتوولتاییک، تبدیل انرژی خورشید به انرژی کاربردی تر الکتریکی

همانطور که پیشتر عنوان شد، عمده‌ی انرژی مصرفی امروز جهان در قالب الکتریسیته است. تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریسیته نیز مهم‌ترین راهکار صنعتی-خانگی برای بهره‌برداری از انرژی خورشید است. این فرایند با سلول‌های فتوولتاییک صورت می‌پذیرد. سلول‌های فتوولتاییک یا سلول‌های خورشیدی سیستم‌هایی هستند که به طور مستقیم نور خورشید را به الکتریسیته تبدیل می‌کنند. مدت زیادی است که از این سلول‌ها در صنعت هوا فضا استفاده می‌شود و استفاده آن‌ها در ساعت و ماشین حساب برای همگان آشنا است. اما فناوری سلول‌های فتوولتاییک هزینه بر است و در گذشته استفاده از این فناوری محدود بود. اما با پیشرفت این سلول‌ها و به وجود آمدن نسل‌های جدید آن‌ها امید بیشتری در ترویج این فناوری ایجاد شده است (۱۴، ۱۳).

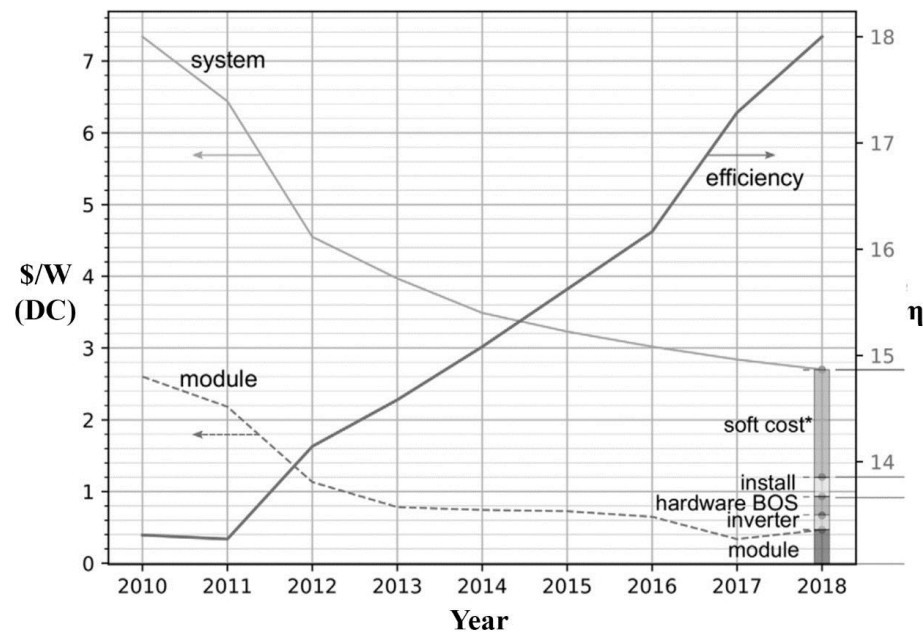
توسعه تولید الکتریسیته از انرژی خورشید تنها در صورتی می‌تواند رشد معنی‌دار داشته باشد که به لحاظ اقتصادی با انواع روش‌های دیگر تولید الکتریسیته قابل رقابت و نسبت به آنها برتری داشته باشد. به این ترتیب مهم‌ترین معیار مقایسه، قیمت تمام شده‌ی برق تولیدی با فتوولتاییک‌ها یا همان LOCE است. در واقع مهم‌ترین مولفه‌ای که برای سنجش کارایی یک سامانه‌های فتوولتاییک باید مورد توجه قرار گیرد، نه مولفه‌هایی نظیر بازده تبدیل، بلکه قیمت تمام شده‌ی برق تولیدی است. به همین دلیل، در

¹ Module



شکل ۷: روند افزایش ظرفیت نصب شده‌ی فتولتاییک‌ها در جهان (۱).

Figure 7: The trend of increasing the installed capacity of photovoltaics in the world (1).



شکل ۸: روند تغییرات متوسط قیمت تمام شده‌ی برق تولیدی توسط فتولتاییک و بازده این سامانه‌ها طی سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۱۸ در ایالات متحده‌ی آمریکا (منظور از هزینه نرم در قیمت تمام شده عبارت است از مالیات، نرخ بهره‌ی سالانه‌ی سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه اخذ مجوز و ... است) (۱۵).

Figure 8: The trend of changes in the average cost price of electricity produced by photovoltaics and the efficiency of these systems during the years 2010-2018 in the United States (soft cost in the cost price means taxes, the annual interest rate of the initial investment, the cost of obtaining a permit, etc.) (15).

مطلوبیت اقتصادی، این رشد صنعت برق خورشیدی را میسر ساخته‌اند. چاپ سلول‌های خورشیدی، یکی از ابزارهای کارآمد و موثر برای کاهش هزینه تمام شده‌ی آنهاست. در ادامه، انواع روش‌های

توسعه‌ی نسل‌های جدید سلول‌های خورشیدی که بازده بالاتری دارند و در عین حال، ابداع روش‌های جدید و سریع‌تر تولید که قیمت تمام شده‌ی این سلول‌ها را کاهش می‌دهند، دو عامل اصلی هستند که موجب کاهش قیمت برق تولیدی شده‌اند و با افزایش

می‌گرفت، اما روش‌های مورد استفاده معمولاً پرهزینه است. علاوه بر این چون زوج الکترون و حفره در یک ماده تولید می‌شود و در همان ماده حمل می‌شود امکان باز ترکیب آن‌ها زیاد می‌باشد. برای رفع این نقص باید تک‌بلوری با خلوص بالا تهیه شود. لذا تهیه سلول‌های خورشیدی پیوند گاه p-n همیشه سخت و پرهزینه است. بنابراین محدودیت‌ها، نسل‌های جدیدی از سلول‌های خورشیدی شکل گرفت که منجر به ساخت سلول‌های خورشیدی نسل سوم که شامل سلول‌های لایه نازک، مانند سلول‌های حساس شده به مواد رنگزا و سلول‌های پلیمری شدند. در این دسته از سلول‌ها بیشتر از از مواد آلی و پلیمری استفاده می‌گردد (۱۷، ۱۸).

در انواع دیگر سلول‌های خورشیدی نظیر سلول‌های خورشیدی حساس شده با مواد رنگزا (DSSC)، سازوکاری متفاوت ولی کماکان مبتنی بر جدایش الکترون‌ها و حفره‌ها بر اثر دریافت فوتون‌های انرژی بیش از کاف نوار و جریان یافتن آنها در مدار الکتریکی برقرار است.

۳-۲- نسل‌های مختلف سلول‌های فتوولتاییک

سلول‌های خورشیدی را به طور کلی بر اساس ساختارشان به سه دسته می‌توان تقسیم نمود. سلول‌های خورشیدی پیوندگاه n-p و یفر سیلیکون به سلول‌های خورشیدی نسل اول معرف هستند و رایج‌ترین نوع سلول‌های خورشیدی می‌باشند.

¹ Acceptor level

² Donor level

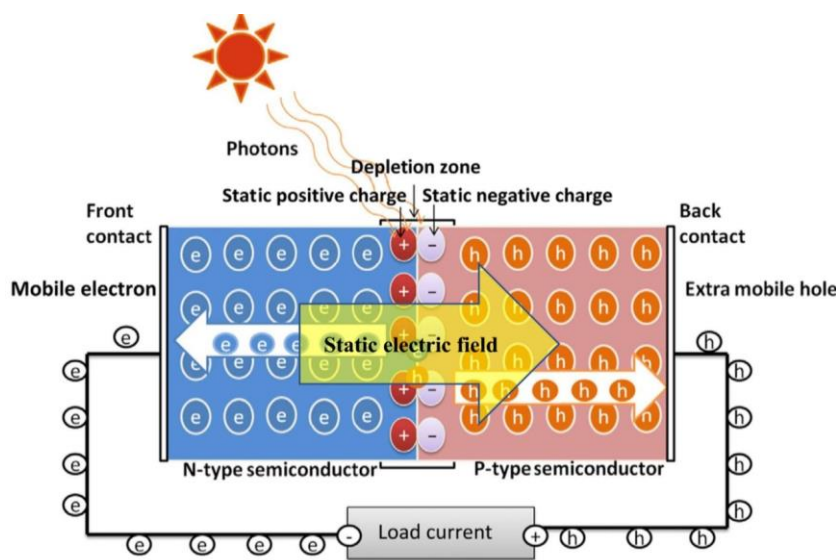
³ Band gap

چاپی که برای ساخت سلول‌های فتوولتاییک مورد استفاده قرار گرفته‌اند به اختصار اشاره شده است.

۳-۱- سازوکار کلی سلول‌های فتوولتاییک

هنگامی که دو نیمه‌رسانای نوع n و p در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند، در محل تماس این دو نیمه‌رسانا، الکترون‌های نیمه‌رسانای n وارد تراز پذیرنده^۱ در نیمه‌رسانای p شده و بار مثبت ایستا بر جای می‌گذارد. از سوی دیگر، در نیمه‌رسانای p نیز حفرات وارد تراز دهنده نیمه‌رسانای n^۲ می‌شوند و بار منفی ایستا بر جای می‌گذارند. این لایه‌ی دوگانه الکتریکی یک میدان الکتریکی ایجاد می‌کند که با انتقال مقدار مشخصی بار، این میدان به اندازه‌ای بزرگ می‌شود که جلوی انتقال بیشتر الکترون‌ها و حفرات بین دو نیمه‌رسانا را می‌گیرد. این میدان الکتریکی اما نقش حیاتی در انتقال بارها در مدار خارجی این اتصال p-n را ایفا می‌کند. هنگامی که نور خورشید به این اتصال p-n تابیده می‌شود، چنانچه انرژی فوتون‌هایی که با این اتصال p-n برخورد می‌کنند به اندازه کافی - یعنی بیش از کاف نوار^۳ این اتصال - بزرگ باشد، می‌تواند الکترون‌ها را وارد نوار رسانش نماید که در نتیجه یک حفره نیز در نوار ظرفیت تشکیل می‌دهد. این دو حامل بار، تحت اثر میدان الکتریکی پیش گفته، در دو جهت مخالف حرکت کرده و در مدار خارجی جریان می‌یابند. به همین ترتیب انرژی خورشید به جریان الکتریسیته بدل می‌شود. این ساز و کار در شکل ۹ نمایش داده شده است.

این سازوکار، در انواع سلول‌های خورشیدی، نسل اول و دوم برقرار است. به طور کلی در نسل اول و دوم سلول‌های خورشیدی اصول کار بر اساس تشکیل پیوندگاه p-n استوار بود، بنابر این تلاش‌های انجام شده مبنی بر تولید یک پیوندگاه مناسب صورت



شکل ۹: توصیف تصویری سازوکار کلی سلول‌های فتوولتاییک نسل اول (۱۶).

Figure 9: Schematic description of general mechanism of the first generation photovoltaic cells (16).

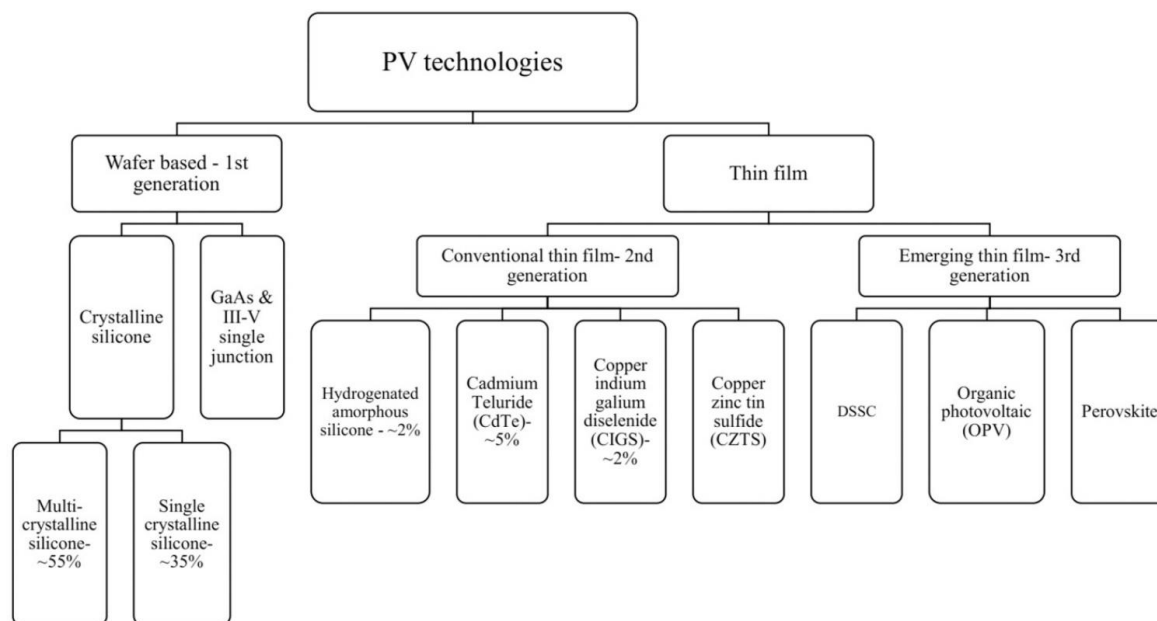
مدل‌های تجاری بازده ۱۴ درصد را از خود نشان داده‌اند. علی‌رغم قیمت بالا و روش‌های ساخت مشکل، سلول‌های سلیکونی در بازار پیشتانزد (۱۷، ۱۸).

نسل دوم سلول‌های خورشیدی را سلول‌های خورشیدی لایه نازک شکل می‌دهند. ساختارهای به کار رفته در این دسته از سلول‌ها به واسطه‌ی جذب بالایی که در محدوده‌ی تابش نور خورشید دارند، می‌توانند در ضخامت‌های بسیار کمتری در مقایسه با سلول‌های نسل اول ساخته شوند. این دسته از سلول‌های خورشیدی ضخامتی بین چندصد نانومتر تا چند ده میکرون دارند و گونه‌های متفاوتی نظیر کادمیم تلورید (CdTe)، سلیکون بی‌شکل، سولفید مس روی قلع (CZTS) و غیره در این دسته قرار می‌گیرند. این دسته از سلول‌های خورشیدی بازدهی تبدیل انرژی کمتری در مقایسه با سلول‌های خورشیدی سلیکونی تک‌بلوری دارند ولی قیمت آنها بسیار پایین‌تر است. نسل سوم سلول‌های خورشیدی که آنها هم از نوع لایه نازک هستند، شامل انواع DSSC، سلول‌های آلی، سلول‌های هیبرید آلی- معدنی نظیر سلول‌های پروسکایتی^۲ و سلول‌های نقطه کوانتومی هستند (۱۲). در شکل ۱۰ و ۱۱، به ترتیب تقسیم‌بندی انواع نسل‌های سلول‌های خورشیدی و منحنی رادار مقایسه‌ی جنبه‌های مختلف عملکردی و اقتصادی آنها قابل مشاهده است.

¹ Doped

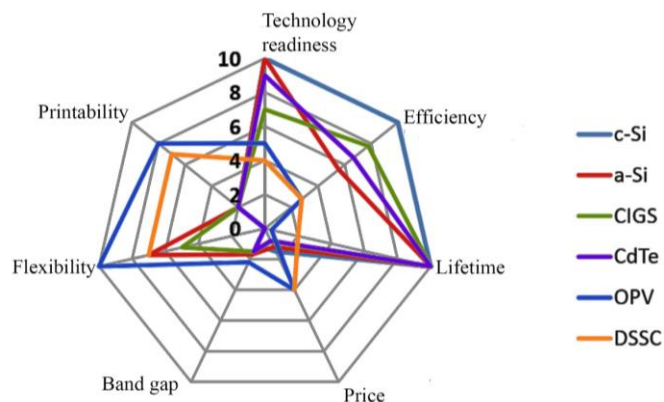
² Provkite

برای ساخت این نوع از سلول‌های خورشیدی از سلیکون آلییده^۱ استفاده می‌شود. ظاهر این دسته از سلول‌ها به رنگ پوشش ضدانعکاسی آنها بستگی دارد. این پوشش‌ها محدوده نوری را که می‌تواند به سلول راه پیدا کند، مشخص می‌کنند و طراح سلول با انتخاب رنگ مورد نظر مقدار نور ورودی را تنظیم می‌کند. رنگ آبی به دلیل بازده بالا رایج‌ترین رنگ است و سلول‌های خورشیدی با رنگ‌های دیگر نسبت به آن بازده پایین‌تری دارند. این خانواده از سلول‌های خورشیدی به دو دسته تک‌بلوری و چند بلوری تقسیم می‌شوند (۱۹، ۱۷). سلیکون تک‌بلوری به لحاظ تاریخی مرسوم‌ترین ماده برای تهیه سلول‌های خورشیدی است و بیشترین آزمایش‌ها برای استفاده در صنایع الکترونیک روی آنها انجام شده است. این نوع از سلول‌ها کارآمدترین و در عین حال گران‌ترین نوع از سلول‌های خورشیدی می‌باشند و استفاده از آنها در فضاهایی که از نظر مساحت دچار مشکل هستند توصیه می‌شوند. سلول‌های خورشیدی تهیه شده از تک بلورهای سلیکون، در آزمایشگاه‌ها بازده ۲۴ درصدی و در صنعت به بازده ۱۵ درصدی رسیده‌اند. سلول‌های تک بلوری سلیکون بین ۲۰ تا ۲۵ سال پایدار هستند و مهم‌ترین - و نه تنها- مشکل آنها در گران بودن قیمت آنها است (۱۷، ۱۹). سلول‌های خورشیدی چند بلوری سری دیگری از سلول‌های خورشیدی ویفر سلیکونی نسل اول هستند که نسبت به سلول‌های تک بلوری از قیمت ارزان‌تر برخوردار هستند. علت این اختلاف قیمت در نحوه تهیه آنها می‌باشد، اما این سری از سلول‌های خورشیدی با وجود قیمت پایین‌تر، از بازده کمتری نیز دارند. در این نوع سلول‌ها نمونه‌های آزمایشگاهی بازده ۱۸ درصدی و



شکل ۱۰: نسل‌های مختلف سلول‌های فتوولتائیک به همراه سهم تقریبی هر یک از آنها از کل بازار (۱۲، ۲۰).

Figure 10: different generations of photovoltaic cells along with the approximate share of each of them in the total market (12, 20).



شکل ۱۱: منحنی مقایسه‌ی کیفی ابعاد مختلف فنی و اقتصادی نسل‌های مختلف سلول‌های خورشیدی (۲۱).

Figure 11: Qualitative comparison curve of different technical and economic dimensions of different generations of solar cells (21).

ارزان قیمت انعطاف‌پذیر به روش R2R^۳ را فراهم می‌سازد. علاوه بر این، با بهره‌گیری از زیرآیندهای انعطاف‌پذیر، همچنین می‌توان دوام قطعه‌ی الکترونیکی را افزایش داد. همین عوامل سبب شده تا آینده‌ی روشنی پیش روی این حوزه باشد، به نحوی که تخمین زده می‌شود حجم بازار جهانی الکترونیک چاپی تا سال ۲۰۲۷ به بیش از ۷۳ میلیارد دلار (۲۲) و تا سال ۲۰۳۵ به بیش از ۳۰۰ میلیارد دلار (۲۳) برسد که رقم قابل توجهی است (۲۴).

دستیابی به عملکرد چاپی مناسب و تولید قطعات الکترونیک چاپی با مشخصات مطلوب (هدایت الکتریکی، شفافیت نوری، پایداری حرارتی، انعطاف‌پذیری، امکان تا شدن و پایداری در برابر خم شدن‌های مکرر)، مستلزم انتخاب دقیق روش چاپ، ماده‌ی رسانا، فرمول‌بندی جوهر و زیرآیند خواهد بود.

برای استفاده از هریک از روش‌های چاپ برای اعمال مواد موظف^۴، باید فرمول‌بندی جوهر، متناسب با آن روش چاپ، تنظیم و بهینه‌سازی شود. به عنوان مثال، جوهرهای چاپ جوهرافشان، باید زمان انبارداری طولانی مدت و پایداری مناسب در داخل چاپگر داشته باشند، از چسبندگی مناسب به زیرآیند برخوردار باشند، کمترین آسیب را به چاپگر وارد کنند و در عین حال از وضوح چاپ مناسبی برخوردار باشند. بنابراین، باید ویژگی‌هایی نظیر، خاص رئولوژیکی، کشش سطحی، تر کنندگی و میزان چسبندگی به زیرآیند در آنها به دقت کنترل شود (۲۵). به عنوان مثال در روش چاپ جوهرافشان، جوهر رسانا باید کاملاً الزامات یک جوهر رسانای مناسب چاپ گرافیکی را دارا باشد. جوهر باید رفتار نیوتونی، با گرانروی در حدود ۱-۱۵ cP و کشش سطحی ۷-۲۰ dyne/cm داشته باشد (۲۶). این مولفه‌ها، کاملاً بر فرمول‌بندی جوهر تاثیرگذارند و تعیین کننده‌ی نوع و میزان اجزاء در فرمول‌بندی و به ویژه جزء عملگر رسانا هستند. چیزی که بر این پیچیدگی می‌افزاید،

همانگونه که در شکل ۱۱ به اختصار نمایش داده شده است، در سلول‌های خورشیدی نسل سومی DSSC و OPV، علیرغم آنکه طول عمر سلول به شدت کاهش پیدا کرده که همین امر موجب افزایش هزینه تولید انرژی در این دسته از سلول‌های خورشیدی شده است، اما مزیت بزرگی که در این دسته از سلول‌ها وجود دارد، امکان تولید به روش‌های ساده‌ی چاپی و همچنین امکان دستیابی به سلول‌های خورشیدی انعطاف‌پذیر است که می‌تواند بر روی بستری که در نسل‌های قبلی امکان‌پذیر نبود نیز آنها را نصب کرد.

۳-۳- الکترونیک چاپی، ابزاری مناسب و روزآمد برای تولید سلول‌های فتوولتائیک

«الکترونیک چاپی^۱»، فناوری ساخت تجهیزات الکترونیکی با روش‌های مرسوم چاپی نظیر چاپ اسکرین، آفست و جوهرافشان است. چاپ تجهیزات در حوزه‌ی الکترونیک چاپی با استفاده از جوهرهای موظف^۲ با عملکرد الکتریکی ویژه و بر روی زیرآیندهایی نظیر کاغذ، پلاستیک و منسوجات صورت می‌پذیرد. الکترونیک چاپی، در حال حاضر یکی از حوزه‌های به شدت در حال رشد در زمینه علم و فناوری مواد به شمار است. آینده‌ی الکترونیک چاپی، به طور مشخص به قطعات الکترونیکی انعطاف‌پذیر دوبعدی و سه‌بعدی، با قابلیت حمل آسان، قابلیت تا شدن و طول عمر زیاد گره خورده است. این موضوع با توجه به روند رو به رشد تعداد مقالات چاپ شده در زمینه‌ی الکترونیک انعطاف‌پذیر، طی ۱۰-۱۵ سال گذشته، قابل تایید به نظر می‌رسد. انعطاف‌پذیری قطعات الکترونیکی، به مفهوم قابلیت این قطعات برای خم و تا شدن مکرر و در عین حال، حفظ عملکرد قطعه است. این ویژگی، یکی از مهم‌ترین جنبه‌های الکترونیک جدید است که قابلیت ساخت قطعات الکترونیکی پوشیدنی و همچنین تولید ساختارهای الکترونیکی با ابعاد بزرگ، بر روی زیرآیندهای

³ Roll-to-roll

⁴ Functional Materials

¹ Printed electronics

² Functional inks

تولیدی توسط آنها، این موقعیت ممتاز را به این دسته از سلول‌های بخشیده‌اند. فرایند تولید سلول‌های خورشیدی بلوری سیلیکونی، یک فرایند پیچیده و چند مرحله‌ای است که از تولید سیلیکون فلزی خالص یا شمش^۴ سیلیکون آغاز شده و با شکل‌دهی آن، پردازش سطح، دوپ کردن و تشکیل اتصال n-p، و همچنین فلزی‌سازی^۵، سوزاندن و نهایتاً ساخت ماژول ادامه پیدا می‌کند (۳۲). در مرحله‌ی فلزی‌کردن، اتصالات فلزی در پشت و جلوی سلول خورشیدی تشکیل می‌شوند که وظیفه جمع‌آوری و انتقال حامل‌های بار یا همان الکترون‌ها و حفره‌ها را در مدار خارجی و به عبارت دیگر، تکمیل مدار الکتریکی را بر عهده دارند. این اتصالات به طور معمول با استفاده از روش چاپ اسکرین و با استفاده از جوهرهای حاوی ذرات فلزی انجام می‌شود (۳۳). در این فرایند برای تشکیل اتصالات فلزی بر روی سلول، معمولاً از خمیر نقره و در پشت سلول معمولاً از خمیر آلومینیم استفاده می‌شود. تلاش‌های زیادی در این مسیر برای کاهش میزان استفاده از ذرات فلزی و به ویژه نقره و همچنین افزایش سرعت تولید صورت گرفته است. همچنین مطالعات زیادی برای کاهش بهینه‌سازی عرض این اتصالات و کاهش مقاومت اتصال صورت گرفته است (۳۴، ۳۳) زیرا با افزایش عرض، مقاومت انتقال بار کاهش می‌یابد ولی از سوی دیگر، سایه ناشی از این الگوهای فلزی، موجب کاهش جذب نور می‌شود.

مرور جامع استفاده از روش‌های چاپی در تولید سلول‌های خورشیدی، بسیار مفصل خواهد بود و در یک مقاله‌ی مجزا صورت خواهد پذیرفت، اما در اینجا به اختصار به انواع سلول‌های خورشیدی، مزیت‌ها و محدودیت‌های هر کدام، کاربردهای مناسب برای هر یک، امکان استفاده از روش‌های چاپی در تولید آنها و همچنین پیش‌بینی روند آینده هر دسته مورد اشاره قرار خواهد گرفت.

لزوم استفاده از مقادیر بالای ذرات رسانا یا نیمه‌رسانای موظف در فرمول‌بندی این جوهرها است که هم عملکرد الکتریکی آنها حفظ شود و هم خواص یک جوهر مناسب را تامین کنند (۲۷). در ادامه مشخصاً به استفاده از روش‌های چاپی در ساخت فتوولتائیک‌ها پرداخته خواهد شد.

۳-۴- انواع روش‌های چاپی برای تولید سلول‌های فتوولتائیک

تاکنون روش‌های چاپی متنوعی برای تولید سلول‌های خورشیدی مورد استفاده قرار گرفته است. از میان آنها، چاپ اسکرین و inkjet پیشرو هستند ولی در کنار آنها، روش‌های چاپی فلکسوگرافی (۲۸)، گراور و حتی افست نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. هر یک از این روش‌های چاپی، از جهت نوع فرآیند، مشخصات جوهری که امکان اعمال آن را دارند و همچنین محدودیت‌های ابعادی که امکان چاپ آن را دارند، ویژگی‌هایی دارند که آنها را برای استفاده در بخشی از الکترونیک چاپی و سلول‌های خورشیدی مناسب می‌سازند. در جدول ۳، به ویژگی‌های هر یک از این روش‌های چاپی اشاره شده است. برای انتخاب روش چاپ مناسب در هر کاربرد، موارد طرح شده در این جدول اثرگذاری جدی دارند. به عنوان مثال، چنانچه تولید مدارهای چاپی مورد نظر باشد که در آنها وضوح چاپ و عرض خطوط چاپی بسیار مهم هستند، باید از روش‌های چاپی با وضوح بالاتر نظیر چاپ جوهرافشان استفاده کرد. البته باید توجه داشت در مدارهای میکروالکترونیکی، وضوح بسیار بالاتری مورد نیاز خواهد بود که در این موارد باید از روش‌های دیگر چاپی که مشخصاً برای همین منظور توسعه یافته‌اند استفاده کرد که از آن جمله می‌توان به لیتوگرافی نوری^۱، E-Jet^۲ و AJP^۳ اشاره کرد (۲۷).

۳-۴-۱- سلول‌های خورشیدی سیلیکونی بلوری

علیرغم توسعه‌ی سریعی که در نسل‌های جدید سلول‌های خورشیدی رخ داده است، اما هنوز هم بازیگر اصلی این صنعت، سلول‌های خورشیدی سیلیکونی بلوری هستند. بلوغ فنی حاصل شده در این سلول‌ها، در کنار طول عمر بالا و همچنین قیمت ارزان‌تر انرژی

جدول ۳: مقایسه مشخصات جوهر و مشخصات ابعاد قابل چاپ الکترونیکی با روش‌های مختلف چاپی (۲۹-۳۱).

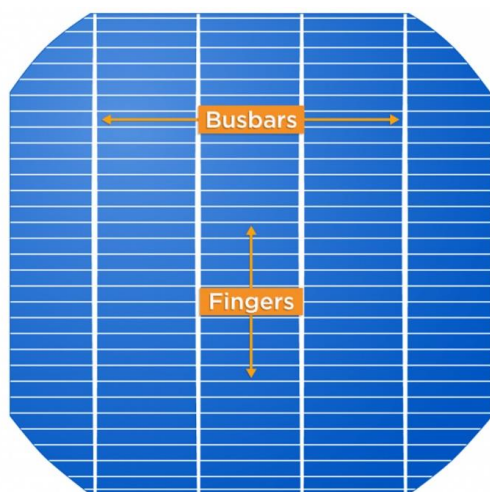
Table 3: Comparison of ink characteristics and limitations of electronic printable dimensions with different printing methods (29-31).

| Printing method | Ink viscosity (Pa.S) (29) | Printing thickness (μm) (29) | Printing width (μm) (28) | Resolution (μm) (28) | Printing rate (m ² /S) (30) |
|-----------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------|----------------------|--|
| Offset | 1 – 10 | 0.5 – 2.5 | 10 | 80 | 0.4 – 40 |
| Screen | 0.5 – 5 | < 12 | 30 – 50 | 100 | 0.008 – 10 |
| Flexography | 0.05 – 0.2 | 0.8 – 1 | 45 – 100 | 50 | 0.2 – 20 |
| Gravure | 0.05 – 0.2 | 0.8 – 1 | 10 – 50 | 30 | 0.1 – 70 |
| inkjet | 0.005 – 0.02 | < 0.5 | 30 – 50 | 20 | 0.001 – 3 |

به صفر می‌رسد (۳۸، ۳۹). با توجه به اینکه هنوز هم سلول‌های خورشیدی سیلیکونی بازیگر اصلی حوزه فتوولتائیک‌ها هستند، به نظر می‌رسد کماکان این دسته از جوهرهای رسانای اسکرین، بیشترین سهم را از بازار جوهرهای مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی برخوردار باشند.

۳-۴-۲- سلول‌های خورشیدی لایه نازک نسل دومی

سلول‌های خورشیدی نسل اول یا همان سیلیکون بلورها، ضخامت بالایی دارند و اصطلاحاً پایه ویفری^۱ هستند. ضخامت معمول این سلول‌ها در حال حاضر حدود ۱۸۰ میکرون است که البته تلاش‌ها برای کاهش این میزان ادامه دارد.

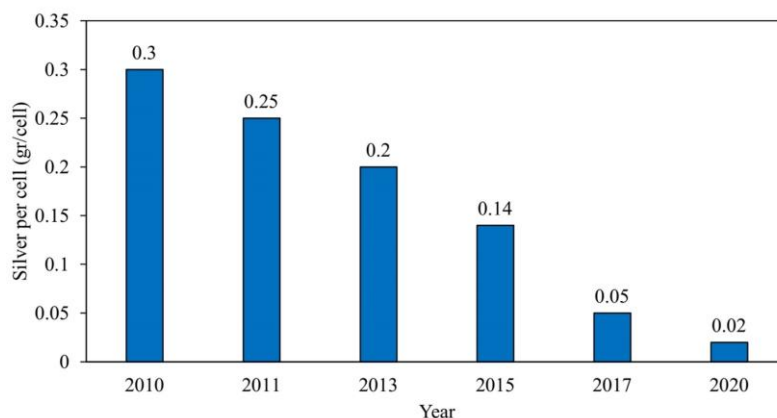


شکل ۱۲: موقعیت باسبارها و انگشتان در سلول‌های خورشیدی سیلیکونی.
Figure 12: the position of busbars and fingers in silicon solar cells.

¹ Wafer-based

بعد از این مرحله، سلول در داخل کوره‌ای با دمای بسیار بالا قرار داده می‌شود تا اجزاء آلی جوهر رسانای اعمال شده بسوزد و تفجوشی آنها هم با موفقیت انجام پذیرد. به این ترتیب مسیرهای رسانایی بر روی سطح جلویی و پشتی سلول تشکیل می‌شوند که در واقع همان busbarها و انگشت‌ها هستند (شکل ۱۲). جوهرهایی رسانایی که در مرحله فلزی‌سازی سلول‌های خورشیدی سیلیکونی مورد استفاده قرار می‌گیرند، در حال حاضر حجم بازاری در حدود ۱/۸ میلیارد دلار دارند. با توجه به سهم بسیار بالای سلول‌های خورشیدی سیلیکونی از بازار سلول‌های خورشیدی، این جوهرها بیشترین سهم را از بازار جوهرهای مورد استفاده در ساخت انواع سلول‌های خورشیدی دارند. علاوه بر این، با پیشرفت‌هایی که در توسعه و بهبود این جوهرها پدید آمده، حجم بازار جوهرهای رسانای مورد استفاده در فلزی‌سازی این سلول‌ها، یک جهش را پیش روی خود دارند. پیشرفت‌هایی که در این زمینه پدید آمده عمدتاً در سه حوزه زیر است.

۱. افزایش دقت چاپ و کاهش کمینه عرض الگوهای قابل چاپ توسط این جوهرها. با توجه داشت که فلزی‌سازی، بخشی از سطح سلو خورشیدی را می‌پوشاند و جلوی دریافت نور در آن نقاط را می‌گیرد. لذا چنانچه بتوان با کاهش عرض باسبارها و انگشتان، انتقال بار و هدایت الکتریکی مناسبی را تامین کرد، بازده سلول افزایش پیدا می‌کند (۳۵، ۳۶).
۲. کاهش میزان نقره موجود در این جوهرها و همچنین استفاده از نانوذرات نقره به جای پرک نقره (۲۸، ۳۷). به این ترتیب هم جرم سلو کاهش می‌یابد و هم قیمت ساخت آن که هر دو مطلوب است. در شکل ۱۳ روند تغییرات میزان نقره موجود در این جوهرها طی سالیان گذشته قابل مشاهده است (۲۱).
۳. ایجاد مسیرهای انتقال بار شفاف. به این ترتیب، ضمن حفظ عملکرد سلول، عملاً میزان پوشانده شدن سطح سلول به واسطه فلزی شدن



شکل ۱۳: روند تغییرات میزان مصرف نقره در سلول‌های خورشیدی سیلیکونی به تفکیک سال (۲۱).
Figure 13: Changes in the amount of silver used in silicon solar cells by year (21).

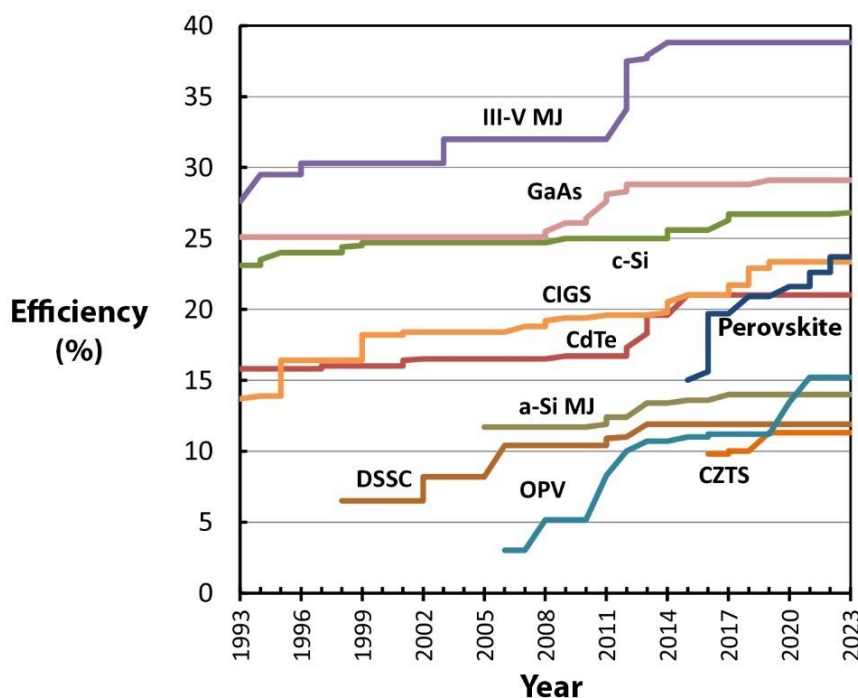
می‌دهند، بازده بسیار بالا و بیش از ۴۷٪ را نیز تامین می‌کنند، اما هزینه ساخت این دسته از سلول‌ها به اندازه‌ای زیاد است که تنها آنها را برای استفاده در کاربردهای خاص فضایی توجیه‌پذیر می‌کند (۴۳). مقایسه بازده نسل‌های مختلف سلول خورشیدی و روند پیشرفت آنها طی سال‌های گذشته در شکل ۱۴ نمایش داده شده است.

از روش‌های چاپی در ساخت بخش‌های مختلف این دسته از سلول‌ها استفاده شده است. لایه جاذب نور در سلول‌های خورشیدی نسل دوم، از مواد نیمه‌رسانای ترکیبی نظیر مس-گالیم-ایندیم-سلنید یا کادمیم-تلورید تشکیل شده که عمدتاً به روش‌هایی تحت خلاء نظیر CVD^1 و PVD^2 بر روی زیرآیند مورد نظر اعمال می‌شوند. این روش‌ها پر هزینه هستند و مصرف بالای انرژی در این فرآیندها، با یکی از اهداف اصلی استفاده از سلول‌های خورشیدی که همان کاهش ردپای زیست‌محیطی است در تضاد است. به همین دلیل روش‌های چاپی گوناگونی در این زمینه مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از آن جمله می‌توان به استفاده از چاپ اسکرین جوهرهای حاوی پیشسازهای نیمه‌رساناهای ترکیبی (۴۴) و یا نانوذرات این نیمه‌رساناها (۴۵) اشاره کرد.

¹ Chemical vapor deposition

² Physical vapor deposition

سلول‌های نسل دومی ضخامت بسیار کمتر و از مرتبه چند میکرون دارند و به همین دلیل به آنها سلول‌های لایه نازک گفته می‌شود. با توجه به اینکه در ساخت سلول‌های خورشیدی سیلیکونی، به سیلیکون خالص نیاز خواهد بود که قیمت بالایی دارد، ۲۵٪-۲۰٪ هزینه ساخت سلول‌ها خورشیدی سیلیکونی مربوط به تامین همین جزء است. با توجه به ضخامت بالای این سلول‌ها، هزینه تمام شده این نسل از سلول‌های خورشیدی زیاد خواهد بود. لذا، در تلاش برای کاهش قیمت این دسته از سلول‌های خورشیدی، تلاش برای توسعه‌ی مواد نیمه‌رسانا با قابلیت جذب نور بالاتر تشدید شد که همین امر به توسعه‌ی نسل دوم سلول‌های خورشیدی بر پایه‌ی نیمه‌رساناهایی نظیر سیلیکون بی‌شکل و غیره انجامید (۴۱، ۴۰). در نسل دوم سلول‌های خورشیدی، تنها کمتر از ۲٪ هزینه ساخت سلول مربوط به نیمه‌هادی به کار رفته در آن است (۲۰). این سلول‌ها مزایایی از جمله انعطاف‌پذیری بیشتر در مقایسه با سلول‌های نسل اول و همچنین وزن کمتر دارند (۴۲) اما بازده آنها کمتر و مقاومت آنها در برابر رطوبت و شرایط محیطی پایین‌تر است. همین امر سبب شده است که کماکان هزینه تمام شده‌ی انرژی تولیدی به وسیله‌ی سلول‌های نسل اول کمتر باشد و بیش از ۹۰٪ بازار را در اختیار داشته باشند (۲۰). البته در سلول‌های خورشیدی لایه نازک تشکیل شده از نیمه‌رساناهای ترکیبی و به ویژه ترکیبات گروه‌های ۳ و ۵ جدول تناوبی که اصطلاحاً سلول‌های خورشیدی III-V را تشکیل



شکل ۱۴: روند رشد بیشترین بازده تایید شده‌ی انواع سلول‌های خورشیدی طی سی سال گذشته (۴۳).

Figure 14: Highest confirmed efficiencies for cells, fabricated using the different technologies shown (43).

این لایه عبارت است از ایجاد شرایط مناسب برای جمع‌آوری و انتقال بهتر حامل‌های بار (الکترون‌ها و حفره‌ها) که از جذب نور در لایه جذب نور ایجاد می‌شوند (۵۴، ۵۳). ترکیب این لایه معمولاً سولفید کادمیوم، سولفید روی، اکسید روی یا سولفید ایندیوم (In_2S_3) است و به روش لایه نشانی شیمیایی حمامی (CBD^2) اعمال می‌شود (۵۵). در یک نمونه از تلاش‌هایی که برای اعمال این لایه به روش چاپی صورت گرفته، یک مرکب جوهرافشان پایه الکلی حاوی تیاور و نیترات ایندیوم تهیه و به روش جوهرافشان بر روی لایه‌ی جذب CIGS اعمال شد و مشخص شد که بازده سلول نهایی، مشابه سلول CIGS استاندارد، با لایه بفری سولفید کادمیم اعمال شده به روش CBD مشابه است (۵۶). در پژوهشی دیگر نیز که مرکب جوهرافشان بر پایه‌ی آب/الکل و حاوی پیش‌سازهای مشابه تهیه شده بود نیز نتایج مشابهی به دست آمد. علاوه بر اینکه مشخص شد که آماده‌سازی سطح لایه‌ی CIGS به با استفاده از آن، با بهبود ترشوندگی سطح زیرآیند، بازده را حتی بهبود نیز می‌بخشد (۵۷).

در سلول‌های لایه نازک نیز مانند سلول‌های سیلیکونی، نهایتاً نیاز به مسیرهای رسانایی در پشت و جلوی سلول خواهد بود که انتقال حامل‌های بار در مدار خارجی را صورت دهند. به همین منظور در سلول‌های CIGS به طور معمول بر روی الکتروود شفاف رویی، یک ساختار دولایه از بخار فلزات آلومینیم و نیکل پوشش داده می‌شود تا جمع‌آوری بار را صورت دهد. تلاش‌هایی برای جایگزینی این لایه با ساختار مشابه انگشتان و باسبارها در سلول‌های سیلیکونی انجام شده است. این ساختارها می‌توانند با چاپ اسکرین و یا ریزش مستقیم^۳ جوهر انجام شود (۵۸). همچنین از چاپ جوهرافشان مرکب حاوی پیش‌سازهای نقره -نظیر نیترات نقره- بر روی سطح و در ادامه تفجوشی آنها انجام شده که نتایج مناسبی را به دنبال داشته. همچنین مشخص شده که فرمول‌بندی مرکب مورد استفاده و به ویژه کشش سطحی، ریخت ذرات نقره‌ی مورد استفاده، نوع حلال مورد استفاده، بر میزان هدایت در نقطه‌ی اتصال و همچنین مقاومت سطحی و نهایتاً بازده سلول کاملاً اثرگذار است (۵۹). البته تلاش‌های بعدی برای چاپ مستقیم نانوذرات پایدار شده‌ی نقره، توانست حتی هدایت الکتریکی و مقاومت در نقطه اتصال مطلوب‌تری را نیز تامین کند (۶۰).

۳-۴-۳- سلول‌های خورشیدی نسل سومی

۳-۴-۳-۱- DSSC

در سلول‌های نسل سومی DSSC، اساس کار بر جذب نور توسط ماده رنگزای جذب شده بر روی سطح نانوذرات TiO_2 و انتقال الکترون

الته در این پژوهش‌ها، یا فرآیند تولید همراه با مراحل خطرناک و پیچیده بوده و یا اینکه بازده سلول‌های به دست آمده پایین و در حد کمتر از ۵٪ بوده است که همین امر سبب شده استفاده از این روش‌ها در تولید سلول‌های خورشیدی نسل دومی هنوز محدود به فعالیت‌های پژوهشی و آزمایشگاهی باشد.

استفاده از چاپ جوهرافشان نیز برای چاپ لایه‌ی جذب از نیمه‌رساناهای ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته است. ساخت لایه جذب در سلول‌های خورشیدی CIGS، با استفاده از مرکب‌های جوهرافشان حاوی نمک‌های فلزات مس، گالیم و ایندیوم، با نسبت استوکیومتری توسعه یافتند. از سیستم‌های حلالی مختلفی نظیر حلال‌های الکلی-تری (۴۶، ۴۷) و یا آبی (۴۸) استفاده شد که البته و پس از چاپ، لایه چاپی در اتمسفر بخار سلنیم و در دمای بالا تاب‌کاری^۱ می‌شود تا ساختار بلوری مد نظر حاصل شود (۴۹). دمای نوع پایه حلال و همچنین سایر اجزا فرمول‌بندی چاپ، تاثیر زیادی بر عملکرد سلول چاپی نهایی داشتند. کیفیت تر شدن سطح زیرآیند، میزان خارج شدن حلال‌ها، میزان باقیماندن خاکستر اجزاء آلی و لیگندهای نمک‌های فلزی، بر نحوه‌ی شکل‌گیری و رشد ساختار بلوری و به تبع آن، عملکرد و بازده سلول تولید شده‌ی نهایی تاثیرگذارند. به نحویکه اصلاح این موارد می‌تواند منجر به افزایش بازده سلول CIGS نهایی که لایه‌ی جذب در آن به روش جوهرافشان اعمال شده، بازده سلول را از حدود ۵٪ (۴۶) به بیش از ۱۱٪ (۴۷) افزایش می‌دهد. در سلول‌های CZTS نیز لایه‌ی جذب به روش جوهرافشان اعمال شده است. در پژوهش‌های متعددی، از نمک‌های فلزی مس، روی و قلع به همراه ترکیبات گوگرد، مرکب جوهرافشان بر پایه‌ی DMSO توسعه یافته است و با اعمال بر روی زیرآیند مورد نظر و فرارگیری در دمای بالای ۲۵۰ درجه، ساختار بلوری مورد نظر حاصل شده است (۵۱، ۵۰). البته مشخص شده است که ذر این نوع از لایه‌ی جذب نیمه‌رسانای ترکیبی، وجود ترکیباتی نظیر NaF می‌تواند به بهبود ساختار بلوری، یکنواختی آن، انتقال بار و نهایتاً افزایش بازده نهایی سلول کمک کند (۵۲). در حال حاضر بازده سلول‌های CZTS با لایه‌ی جذب چاپ شده به روش جوهرافشان در حدود ۶٪ است و تلاش برای بهبود عملکرد، از طریق اصلاح فرمول‌بندی جوهر، رتولوزی جوهر، نسبت اجزاء پیش‌ساز فلزی در داخل فرمول‌بندی، دمای خشک کردن سلول و همچنین وارد کردن جزئی ترکیبات فلزی دیگر ادامه دارد (۵۱).

تلاش‌هایی نیز برای اعمال لایه‌ی بافر در سلول‌های لایه نازک نسل دوم، به روش جوهرافشان صورت گرفته است. لایه بافر در سلول‌های خورشیدی لایه‌ای نازک عبارت است از یک لایه نیمه‌هادی میانی که در میان لایه جذب نور و الکتروود شفاف قرار می‌گیرد. وظیفه اصلی

² Chemical bath deposition

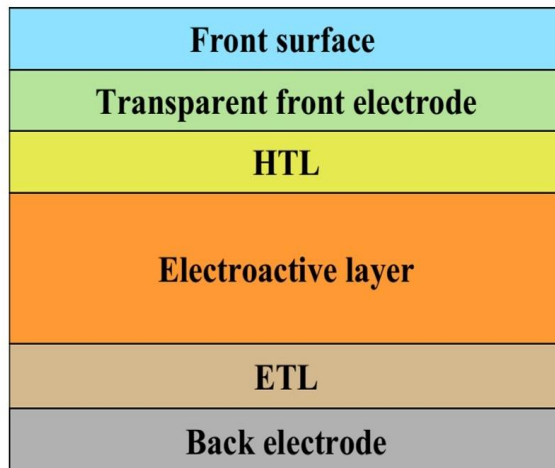
³ Direct dispensing

¹ Annealing

واسطه‌ی سهولت فرایند و همچنین هزینه کمتر، می‌تواند بسیار سودمند باشد.

۳-۴-۳-۲-OPVها

سلول‌های خورشیدی آلی در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از پژوهشگران بوده‌اند. عامل جلب توجه پژوهشگران به این دسته از سلول‌های خورشیدی، انعطاف‌پذیری، سبک بودن، ارزان قیمت بودن و فرآیند تولید بسیار ساده و ارزان قیمت آنها است. این سلول‌ها از یک ساختار چند لایه تشکیل شده‌اند که به ترتیب عبارتند از زیرآیند شفاف که می‌تواند انعطاف‌پذیر و یا سخت باشد، الکتروود جلویی (معمولاً از جنس FTO یا ITO^۴، لایه‌ی انتقال حفره (HTL^۵)، لایه‌ی جاذب نور که از ترکیبات آلی تشکیل شده، لایه‌ی انتقال دهنده الکترون (ETL^۶) و الکتروود پشتی که فلزی و معمولاً از جنس طلا، پلاتین و یا نقره است (شکل ۱۵) لایه فعال نوری که از دو بخش اصلی دهنده الکترون - که معمولاً ترکیبات پلیمری ذاتا رسانا هستند - و پذیرنده الکترون - که معمولاً ترکیبات کربنی فولرنی هستند - تشکیل شده‌اند. با تابش نور به این لایه، زوج الکترون-حفره‌هایی در این لایه تشکیل و از هم تفکیک می‌شوند. الکترون از طرق ETL به الکتروود پشتی و حفره از طریق HTL به الکترون جلویی می‌روند (۷۱، ۷۰). این لایه‌ها در ضخامت بسیار پایین اعمال می‌شوند و استفاده از روش‌هایی نظیر پوشش‌دهی دورانی^۷ برای اعمال آنها، هدر رفت بسیار زیاد مواد، سرعت تولید پایین و آلاینده‌ی محیطی قابل توجهی را به دنبال دارد (۷۲).



شکل ۱۵: توصیف تصویری چینش کلی لایه‌ها در OPVها (۷۰، ۷۱).

Figure 15: Schematic description of layers alignment in OPVs (70, 71).

⁴ Indium tin oxide

⁵ Hole transporting layer

⁶ Electron transporting layer

⁷ Spin coating

تهیج یافته به نوار رسانش این ذرات نیمه رسانا و نهایتاً انتقال آن به الکتروود است. همچنین به یک الکتروولیت برای تکمیل چرخه و احیاء مجددا ماده‌ی رنگزا جهت ادامه چرخه‌ی جذب نور و انتقال الکترون است (۶۲، ۶۱). البته در گونه‌های دیگری از سلول‌های خورشیدی که ساختار کلی مشابه DSSCها دارند، از مواد فعال نوری زیستی و باکتری‌ها برای جذب فوتون و انتقال الکترون به نوار رسانش TiO₂ استفاده می‌شود (۶۳).

اعمال لایه نازک فتو الکتروود از نانوذرات TiO₂، با روش‌های مختلف چاپی نظیر اسکرین و چاپ جوهر افشان و همچنین روش‌های شبه چاپی نظیر doctor blade انجام گرفته است. اخیراً در یک کار مقایسه‌ای، دو روش چاپ اسکرین و doctor blade برای اعمال لایه‌ی نازک ذرات TiO₂ مورد استفاده قرار گرفته و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شده است. بر اساس نتایج این پژوهش، سلول‌های DSSC که لایه فتوالکتروود آنها با روش اسکرین چاپ شده بود، بازده ۶/۷۲٪ داشتند که در مقایسه با بازده ۴/۸۶٪ سلول ساخته شده با روش doctor blade، بازدهی بهتری بود (۶۴). البته از روش چاپ جوهرافشان نیز برای ساخت این لایه استفاده شده است که مشخص شده محدودیت چاپ جوهرافشان در اعمال جوهرهای با گرانیوی بسیار پایین، مستلزم استفاده از مقادیر زیادی از محمل برای دستیابی به گرانیوی به اندازه کافی پایین است و همین امر، موجب می‌شود که پس از مرحله‌ی تاب‌کاری، چسبندگی مناسبی بین این لایه و الکتروود رسانای شفاف ایجاد نکند که همین امر میزان بازترکیبی بارها در داخل فتوالکتروود را افزایش می‌دهد (۶۵). به همین دلیل، روش‌های چاپی جدیدتری ابداع شده‌اند که بتوانند این مشکل را مرتفع سازند. به عنوان مثال، روش DMD^۱ که به نوعی تلفیق چاپ جوهرافشان و چاپ سه‌بعدی است و می‌تواند جوهرهایی با گرانیوی‌های بسیار زیاد را نیز اعمال کند. در پژوهشی، لایه‌ی فتوالکتروود را به دو روش چاپ اسکرین و چاپ DMD اعمال کردند و مشخص شد که لایه‌ی چاپ شده به روش DMD، در عین داشتن ضخامت کمتر، بازدهی بالاتری را به واسطه ریخت و شکل بهینه تامین کرده می‌کند (۶۶). استفاده از روش چاپ جوهرافشان برای ساخت الکتروود مخالف^۲ نیز گزارش شده است که توانسته بازدهی سلول مشابه با سلولی که الکتروود مخالف در آن به روش معمول لایه‌نشانی انجام شده تامین کند (۶۷، ۶۸). در ادامه، با اعمال جوهر رسانای حاوی نانولوله‌هایی کربنی بر روی شیشه‌ی FTO^۳ در ساخت الکتروود مخالف، حتی توانستند بازده بالاتری در مقایسه با سلول دارای الکتروود مخالف معمولی به دست آورند (۶۹). استفاده از روش چاپ جوهرافشان برای ساخت الکتروود مخالف در ساخت DSSCها، به

¹ Direct material deposition

² Counter electrode

³ Fluorine doped tin oxide

همچنین عرض و ارتفاع آنها بهینه‌سازی شود، نهایتاً بازده بالای ۱/۶٪ حاصل شد (۷۹).

استفاده از روش‌های چاپی برای ایجاد لایه‌ی HTL نیز گزارش شده است. در یک نمونه از این پژوهش‌ها، لایه‌ی PEDOT:PSS، در قالب یک جوهر فلکسوگرافی آب‌پایه با فرمول‌بندی متشکل از PEDOT، PSS، اتیلن گلاکول، ایزوپروپیل الکل، آب، سطح فعال‌ها و غیره، به روش چاپ فلکسوگرافی بر روی لایه‌ی فعال نوری قرار گرفت. در این پژوهش، لایه‌ی فعال نوری هم به روش چاپ گراور اعمال شده بود و الکتروپشتی نیز از جنس اکسید روی و زیر آیند نیز کاغذ بود. به این ترتیب، یک سلول خورشیدی انعطاف‌پذیر، عاری از اجزاء گران‌بها نظیر ITO، و به صورت تماماً چاپی به دست آمد که نهایتاً بازده حدود ۱/۳٪ را ارائه می‌کرد (۸۰). روش چاپ جوهرافشان هم برای ایجاد این لایه گزارش شده است. در یک نمونه از این پژوهش‌ها، مرکب جوهرافشان آب‌پایه، حاوی پیش‌سازهای PEDOT:PSS، گلیسرین، بوتیل گلیکول و مواد سطح فعال، بر روی زیرآیند ITO چاپ شدند تا لایه‌ی HTL را شکل دهند. آنها توانستند با بهینه‌سازی فرمول‌بندی بازدهی حدود ۳/۱۶٪ را به دست آورند (۸۱). در ادامه مشخص شد که شرایط چاپی نیز نقش مهمی در یکنواختی لایه‌ی اعمالی PEDOT:PSS بر روی ITO دارد. با تنظیم بهینه‌ی دمای سطح زیرآیند و همچنین فاصله‌ی پاشش قطرات جوهر، بافتار سطحی یکنواخت‌تر و به تبع آن انتقال موثرتر حفره و بازدهی بالاتر سلول حاصل می‌شود (۸۲). با این وجود، پایداری کم ساختار PEDOT:PSS سبب شده است که تلاش‌هایی برای یافتن جایگزین مناسب برای این لایه صورت بگیرد. در همین راستا، یکی از جایگزین‌های مطرح برای PEDOT:PSS، اکسید نیکل است. مرکب جوهرافشان حاوی نانوذرات NiO، بر روی بستر الکتروود ITO اعمال شده است. به منظور بهبود تر شونده‌گی سطح الکتروود و یکنواختی لایه‌ی نازک چاپی NiO (ضخامت فیلم خشک حدود ۱۸ nm)، سطح زیرآیند با استفاده از ازون اصلاح شد. نهایتاً سلول خورشیدی به دست آمده، شفافیت بسیار بالای ۸۹٪ از خود نشان می‌داد و با بازدهی ۳/۶٪، عملکردی مشابه سلول متناظر استاندارد داشت که HTL آن به روش پوشش‌دهی چرخشی اعمال شده بود (۸۳).

اعمال لایه جاذب نور در OPV‌ها، با استفاده از روش‌های چاپی نیز مورد توجه پژوهشگران بوده است (۸۴، ۸۵). در یک پژوهش، توانستند با استفاده از چاپ اسکرین پایه حلال، لایه فعال متشکل از دو پلیمر رسانای دهنده و پذیرنده‌ی الکترون، بازده کل سلول حدود ۴/۵٪ را به دست آورند. آنها همچنین توانستند با استفاده از مزیت ذاتی روش‌های چاپی و از جمله چاپ اسکرین که همان کنترل بالا بر روی الگوی چاپی است، سلول‌ها را به صورت سری چاپ کنند و به این ترتیب ولتاژ مطلوب را که در حالت عادی و با استفاده از تک‌سلول قابل استحصال نبود را به دست بیاورند (۸۶). چاپ گراور

به همین دلیل از روش‌های مختلف چاپی و یا روش‌های مشابه آن نظیر slot die ساخت این دسته از سلول‌های خورشیدی استفاده می‌شود (۷۳). استفاده از روش‌های چاپی و با سرعت بالا برای ساخت این نوع سلول‌ها ممکن است. مهم‌ترین نکته در رابطه اعمال لایه‌های مختلف OPV‌ها، تکرار پذیری، ثبات فرآیند، امکان اعمال لایه‌ای یکنواخت و بدون نقص و ترک، با سرعت بالا، در مقیاس وسیع و هزینه کم است. تمامی این موارد در کنار یکدیگر، استفاده از روش‌های چاپی برای ساخت این دسته از سلول‌های خورشیدی را توجیه‌پذیر می‌سازد (۷۴).

استفاده از روش‌های چاپی برای ساخت الکتروودهای سلول خورشیدی آلی، در پژوهش‌های مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از روش slot die برای ساخت OPV‌ها نخستین بار توسط Krebs در دانشگاه فنی دانمارک انجام شد. وی موفق شد تمامی لایه‌های یک سلول آلی را با روش slot die و بدون نیاز به لایه‌نشانی تحت خلاء اعمال کند. وی همچنین موفق شد الکتروود رسانای پشتی از جنس نقره را با استفاده از جوهر slot die حاوی نانوذرات نقره، به عنوان جایگزین الکتروودهای ITO استفاده کند. اگرچه این پژوهش به ساخت سلول‌هایی با بازدهی بسار پایین حدود ۰/۳٪ منجر شد، ولی امیدواری بسیاری را برای استفاده موفق از روش‌های چاپی در ساخت OPV برانگیخت (۷۵). از چاپ اسکرین هم برای ساخت الکتروودها استفاده شده است. انواع جوهر اسکرین حاوی نانوذرات نقره برای ساخت الکتروود پشتی توسعه یافتند. در یکی از این پژوهش‌ها مشخص شد که جوهر اسکرین پایه حلال در مقایسه با جوهرهای اسکرین پایه آب و پخت شونده با UV، عملکرد ضعیفتری دارد (۷۶). از چاپ اسکرین مرکب پایه نقره هم برای اعمال مسیره‌های رسانا برای جایگزینی الکتروود جلویی ITO استفاده شده که البته در استفاده از این جوهرها، باید الگوی چاپ هم به شکلی بهینه‌سازی شود که بتواند هم جمع‌وری بار را به نحو موثری انجام دهد و هم اینکه بیش از اندازه بر روی سطح سلول ایجاد سایه نکند (۷۷). به عنوان مثال در یکی از پژوهش‌ها تلاش شد تا الکتروود جلویی ITO، با استفاده از یک لایه‌ی رسانای PEDOT:PSS^۱ و شبکه‌ی رسانا از جنس نقره، که با چاپ اسکرین قابل اعمال است جایگزین شود و مشخص شد که با یک الگوی مشخص که کمتر از ۸٪ سطح سلول را پوشش می‌دهد، می‌توان عملکردی معادل سلول مشابه حاوی الکتروود ITO را به دست آورد (۷۸). از روش چاپ فلکسوگرافی نیز برای اعمال جوهرهای حاوی نانوذرات نقره به منظور ایجاد این مسیره‌های رسانا استفاده شده است. با بهینه‌سازی الگوی چاپی این مسیره‌های رسانا به نحوی که فاصله خطوط از هم و

^۱ Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate)

البته علیرغم تمامی این موارد، هنوز هم با توجه به عمر کمتر سلول‌های خورشیدی آلی (۹۴) که در شکل ۱۱، نیز نمایش داده شده است، قیمت انرژی تولید شده با این سلول‌ها قابل رقابت با سلول‌های فعلی موجود در بازار نیست و برای اینکه بتوان از این سلول‌ها به صورت گسترده در صنعت انرژی استفاده کرد، باید باز هم توسعه آنها و به ویژه افزایش طول عمر آنها کار شود (۹۶، ۹۵).

۳-۴-۳- سلول‌های پروسکایتی

پیدایش سلول‌های خورشیدی پروسکایتی، حکم یک نفس تازه را برای حوزه‌ی فناوری سلول‌های خورشیدی داشت و از زمانی که نخستین بار، استفاده از پروسکایت به عنوان لایه فعال نوری در سلول‌های خورشیدی مطرح شد، به شدت مورد توجه پژوهشگران قرار گرفت. این سلول‌ها، به روش‌های ساده‌تری در مقایسه با سلول‌های معمول سیلیکونی قابل تولید هستند، هزینه تولید کمتری دارند، با روش‌های قابل ساخت در مقیاس وسیع و با سرعت بالا سازگارند و برای تولید آنها به روش‌های انرژی‌بر نیازی نیست و به همین دلیل ردپای محیط زیستی کمی بر جای می‌گذارند. بازدهی این دسته از سلول‌های خورشیدی نیز به واسطه‌ی ضریب جذب بالای پروسکایت در محدوده طول موج نور مرئی و همچنین نرخ بالای انتقال بار در این ساختار زیاد است. این مزیت‌های ذاتی پروسکایت با تلاش‌های محققان برای توسعه‌ی سلول‌های خورشیدی همراه شد و به همین سبب، بازده آنها از زمانی که برای نخستین بار مطرح شدند (۹۷) از حدود ۳/۳٪، به نزدیک ۲۴٪ در حال حاضر افزایش یابد (۴۳) که کاملاً قابل رقابت با سلول‌های خورشیدی سیلیکون ویفری است. علاوه بر این، این دسته از سلول‌های خورشیدی می‌توانند به صورت شفاف تولید شوند و بر روی زیرآیندهای انعطاف‌پذیر هم اعمال شوند و به این ترتیب امکان استفاده از آنها در کاربردهایی نظیر الکترونیک پوشیدنی^۳ و یا پنجره‌های خورشیدی فراهم است که استفاده از سلول‌های سیلیکونی در آنها امکان‌پذیر نیست (۹۸). تمامی این موارد، موجب شده است که بسیاری از محققین، شانس بالایی را برای این دسته از سلول‌های خورشیدی به عنوان مهم‌ترین بازیگر آینده‌ی سلول‌های خورشیدی قائل باشند. البته در این مسیر چالش‌هایی نیز وجود دارند که از آن جمله می‌توان به حساسیت پروسکایت به رطوبت و نور که عمر این سلول‌های را کاهش می‌دهد، وجود مقدار قابل توجه سرب در ساختار پروسکایت که مخاطرات سلامت و زیست‌محیطی را به دنبال دارد و دستیابی به روش‌های ارزان قیمت، پایدار و تکرارپذیر برای تولید مهم‌ترین آنهاست (۹۹).

نیز برای اعمال لایه‌ی فعال نوری در OPVها مورد استفاده قرار گرفته. کاپولا^۱ و همکارانش از شاخص‌ترین افراد در استفاده از چاپ گراور برای تولید OPV هستند. آنها توانستند مرکب حلال پایه گراور، حاوی اجزا دهنده و پذیرنده الکترون در لایه فعال نوری را توسعه داده و با استفاده از آن و همچنین چاپ لایه HTL متشکل از PEDOT:PSS، ماژول‌های چندگانه از سلول‌های خورشیدی با بازده کل ۱/۶-۱/۹٪ بسازند (۸۷). آنها همچنین توانستند ارتباط موثری بین ریخت‌سطحی لایه فعال نوری و بازده کل سلول بیابند و با بهینه‌سازی فرمول‌بندی جوهر سلول واحدی با بازده کل ۲/۸٪ نیز با روش چاپ گراور تهیه کنند (۸۸). همچنین چاپ هر سه لایه ETL، HTL و لایه فعال نوری به روش گراور نیز صورت گرفته است. در این پژوهش، با بهینه‌سازی انرژی سطحی هر لایه و به تبع آن، برهم‌کنش بین سطحی این سه لایه با یکدیگر و همچنین با الکترودهای جلویی و پشتی، با سرعت بالای ۴۰ متر بر دقیقه، سلول‌های خورشیدی تولید شد که بازدهی حدود ۰/۶٪ داشتند (۸۹). از چاپ جوهرافشان هم برای ایجاد لایه‌ی فعال نوری استفاده شده است. بهینه‌سازی ترکیب حلالی در مرکب جوهرافشان این لایه بسیار مورد توجه بوده است. به خاطر حلالیت بسیار اندک پلیمرهای دهنده و ترکیبات فولرنی گیرنده الکترون در این لایه، عموماً از حلال‌های هالوژنه و به ویژه کلروبنزن در این جوهرها استفاده شده است (۹۰). همچنین تلاش شده است تا از ترکیبات و نسبت‌های مختلف دهنده و گیرنده الکترون در این لایه استفاده شود و با همین رویکرد، بازدهی سلول تا ۳/۸٪ نیز گزارش شده است (۹۱). باید توجه داشت که به ویژه در سلول‌های آلی BHJ، الگوی جدایش فازی و ریخت که به تبع آن حاصل می‌شود، کاملاً بر عملکرد نهایی سلول اثرگذار است. به همین دلیل نیز بهینه‌سازی ترکیب حلالی به منظرو دستیابی به ریخت مناسب کاملاً مورد توجه است. به عنوان مثال در یکی از این پژوهش‌ها، بخشی از کلروبنزن به عنوان حلال اصلی جوهر، با یک حلال دیر تبخیر نظیر اکتان‌دی‌تیول، دی‌کلروبنزن یا کلروفتالین جایگزین گردید. همین امر منجر به بهبود ریخت نهایی و افزایش بازدهی سلول شد، به نحویکه حتی بازده سلول با فرمول‌بندی حلالی بهینه، بازده حدود ۳/۷۱٪ را نشان داد که در مقایسه با سلول ساخته شده به روش پوشش دهی دروانی با بازدهی ۲/۷۹٪ هم عملکرد بسیار بهتری داشت (۹۲). همچنین به منظور اصلاح گرانروی و بهبود چاپ پذیری، پلیمرهای با جرم مولکولی بالا نظیر پلی‌استایرن وارد فرمول‌بندی شدند این کار اگرچه چاپ‌پذیری را بهبود داد، ولی به واسطه‌ی ایجاد یک فاز سوم در لایه‌ی فعال نوری و در سطح تماس این لایه به لایه‌ی بعد، انتقال بار را با اختلال مواجه کرده و نهایتاً به کاهش ۲۰٪ بازدهی سلول انجامید (۹۳).

¹ Kopola

² Bulk heterojunction

³ Wearable electronics

با توجه به تخریب حرارتی پروسکایت در دماهای بالا، این امکان در مورد پروسکایت وجود ندارد (۱۰۶). با این وجود، در یک پژوهش، از روش چاپی فلکسوگرافی برای چاپ لایه HTL در سلول پروسکایتی استفاده شد. در این پژوهش، سعی شد تا به جای استفاده از ترکیبات پلیمری برای تنظیم خواص رئولوژیکی، با کنترل ترکیب حلالی و همچنین نسبت حل شونده و حلال، رئولوژی کنترل شود و نهایتاً با یک فرآیند حرارت‌دهی خیلی کوتاه و سریع آن اجزاء پلیمری نیز از ساختار خارج شوند. به این ترتیب سلول پروسکایتی با بازده بیش از ۱۵٪ حاصل شد (۱۰۷).

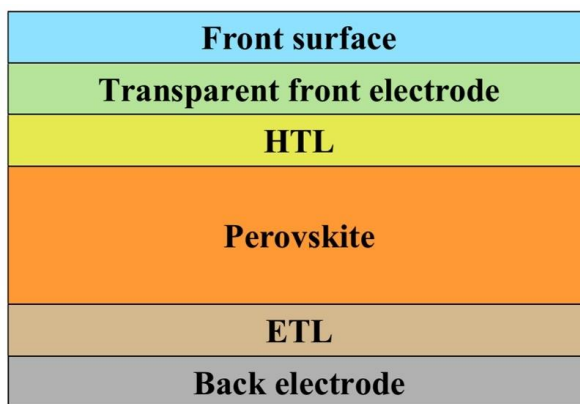
در میان روش‌های چاپ تماسی، چاپ گراور با توجه به گرانروی جوهر پایین که دارد، ظرفیت مناسبی برای استفاده در ساخت سلول‌های خورشیدی پایه پروسکایتی دارد. در یکی از نمایان‌ترین پژوهش‌ها که در این زمینه صورت گرفته است، یک فرآیند چاپ گراور برای ساخت سلول پایه پروسکایتی در مقیاس پیلوت گزارش شد که طی آن، پیش‌سازهای پروسکایت سه‌کاتیونی به روش گراور بر روی الکتروود ITO چاپ شد و فیلم چاپی، با عبور از داخل یک حمام حاوی ضدحلال بوتیل آمین و نهایتاً تاب‌کاری^۱ حرارتی، به ریخت و ساختار بلوری مورد نظر رسید. به این ترتیب سلول خورشیدی پروسکایتی با بازده بسیار مناسب ۱۹/۱٪ با سرعت بالا و در مقیاس نیمه‌صنعتی تولید شد (۱۰۸).

روش‌های چاپ جوهرافشان به طور گسترده برای چاپ لایه فعال نوری در سلول‌های خورشیدی پروسکایتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در یکی از نخستین گزارشات ثبت شده در این حوزه، مرکب جوهرافشان حاوی پیش‌ساز ساختار پروسکایتی متیل‌آمونیم، تری‌یدید سرب (MAPbI_3)، یعنی متیل آمونیوم مونو یدید (MAI)، به همراه ترکیبات کربنی به عنوان استخراج‌کننده حفرات پایه کربنی تهیه شد. جوهر مورد اشاره پس از اعمال در حضور یدید سرب (PbI_2) ساختار بلوری MAPbI_3 را ایجاد کرد که توانست بازده کل سلول معادل ۱۱/۶٪ را به دست دهد (۱۰۹). همچنین مشخص شد که ساختار بلوری پروسکایت تشکیل شده، کاملاً بر عملکرد نهایی آن اثرگذار خواهد بود. به همین جهت، در پژوهشی دیگر، فرمول‌بندی مرکب جوهر افشان و وارد کردن افزودنی‌های اصلاح‌کننده ساختار بلوری پروسکایت و همچنین دمای سطح الکتروود تیتانی مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، در مرکب جوهرافشان بر پایه بوتیرولاکتون، علاوه بر پیش‌سازهای MAI و PbI_2 ، افزودنی متیل مونو کلرید آمونیم (MACl) نیز وارد شد. همچنین دمای سطح الکتروود نیز مورد بررسی قرار گرفت. مشخص شد که با بهینه‌سازی مقدار حضور افزودنی MACl و همچنین دمای زیرآیند (حدود 50°C)، می‌توان به ساختار بلوری مناسبی از پروسکایت دست یافت

ساختار کلی سلول‌های پروسکایتی، بسیار شبیه به سلول‌های خورشیدی آلی است. این سلول‌ها از یک ساختار چند لایه تشکیل شده‌اند که به ترتیب عبارتند از زیرآیند شفاف که می‌تواند انعطاف‌پذیر و یا سخت باشد، الکتروود جلویی (معمولاً از جنس FTO یا ITO)، لایه‌ی HTL، لایه‌ی جاذب نور که یک ساختار پروسکایتی هیبریدی آلی-معدنی است، لایه‌ی ETL از جنس اکسید روی یا اکسید تیتانیم و الکتروود پشتی که فلزی و معمولاً از جنس طلا، نقره یا آلومینیم است (شکل ۱۶). با تابش نور به لایه فعال نوری پروسکایتی، زوج الکترون-حفره‌هایی در این لایه تشکیل و از هم تفکیک می‌شوند. الکترون از طریق ETL به الکتروود پشتی و حفره از طریق HTL به الکتروود جلویی می‌روند (۱۰۱، ۱۰۰). البته باید توجه داشت که این ساختار کلی این سلول‌ها است و برخی از لایه‌های می‌توانند حذف یا دچار تغییر شوند (۱۰۲).

از مهم‌ترین نقاط ضعف سلول‌های پروسکایتی، حساسیت آنها به رطوبت است. علاوه بر آسیب‌هایی که تمامی سلول‌های خورشیدی از رطوبت می‌بینند، خود لایه‌ی پروسکایت در معرض رطوبت دچار افت عملکرد شدید می‌شود. از یک سو، ساختار پروسکایت به آبکافت حساس است و در معرض رطوبت دچار آبکافت می‌شود. از سوی دیگر، ورود رطوبت به داخل ساختار پروسکایت، موجب جابجایی یون‌ها در داخل ساختار لایه‌ای پروسکایت، آسیب به ساختار بلوری آن (۱۰۳) و نهایتاً افت چشمگیر عملکرد جذب نور و انتقال زوج الکترون-حفره در داخل این لایه می‌شود (۱۰۵، ۱۰۴).

استفاده از جوهرهای حاوی مقدار قابل توجه پیوندهای پلیمری در سلول‌های پروسکایتی ممکن نیست زیرا باقی ماندن اجزاء پلیمری موجود در جوهر بر عملکرد نهایی آن اثر منفی دارد و نهایتاً باید به روش‌های حرارتی جزء پلیمری را از ساختار خارج کرد.



شکل ۱۶: توصیف تصویری نحوه قرارگیری لایه‌های مختلف در سلول‌های خورشیدی پروسکایتی (۱۰۱، ۱۰۰).

Figure 16: Schematic description of various layers alignment in perovskite solar cells (100, 101).

¹ Annealing

بر اساس گزارش یک مرکز تخصصی مطالعات بازار، ظرفیت نیروگاهی نصب شده سلول‌های خورشیدی که در سال ۲۰۱۲ معادل ۱۰۰ گیگاوات بود، طی یک روند نزدیک به ۱۰ ساله و تا سال ۲۰۲۲ به حدود یک تراوات افزایش یافت. اما تنها سه سال زمان نیاز است تا این رقم بیش از دو برابر شود و به حدود ۲/۳ تراوات افزایش پیدا کند. پیش‌بینی می‌شود که این روند شتابان افزایش ظرفیت نصب شده سلول‌های خورشیدی، تا سال ۲۰۲۹ نیز با نرخ رشد مرکب سالانه‌ی بیش از ۶٪ ادامه پیدا کند. این موضوع نشان از رشد صنعت سلول‌های خورشیدی در زمان حاضر و سال‌های پیش رو دارد (۱۱۴).

آژانس ملی انرژی ایالات متحده در سال ۲۰۱۶، هدف‌گذاری خود را در زمینه توسعه فناوری‌های فتوولتاییک منتشر کرد. بر اساس این سند، LOCE انرژی خورشیدی تولیدی در مقیاس صنعتی در این کشور، باید تا سال ۲۰۳۰ به $0.3 \text{ \$/kWh}$ برسد (۱۱۵). تا سال ۲۰۲۰، LOCE تولید انرژی با استفاده از سلول‌های خورشیدی سیلیکونی بلوری، به عنوان بازیگر اصلی بازار سلول‌های خورشیدی تجاری، با در نظر گرفتن حاشیه سود ۱۵٪ - کمینه حاشیه سود ممکن برای بقای یک کسب و کار - حدود $0.25 \text{ \$/kWh}$ بوده است که در بین نسل‌های مختلف سلول‌های خورشیدی کمترین مقدار و بیشترین مطلوبیت را داشته. پس از آن، سلول‌های خورشیدی نسل دومی CdTe با حدود $0.28 \text{ \$/kWh}$ کمترین LOCE را داشتند (۱۱۶). به همین دلیل هم با اینکه در حال حاضر بیش از ۹۵٪ بازار سلول‌های خورشیدی در انحصار سیلیکون‌های بلوری است، تخمین زده می‌شود که تا سال ۲۰۲۷ حداقل ۱۲٪ از سهم بازار به سلول‌های CdTe اختصاص پیدا کند (۲۱). نکته اینجاست که بر اساس مطالعات صورت گرفته، تخمین زده می‌شود که حتی طی سالیان آینده و با پیشرفت فناوری هم، میزان LOCE برای سلول‌های خورشیدی سیلیکونی بلوری و CdTe به ترتیب به حدود $0.17 \text{ \$/kWh}$ و $0.19 \text{ \$/kWh}$ خواهند رسید که با هدف‌گذاری صورت گرفته فاصله دارند. به نظر می‌رسد که این فناوری‌ها برای رسیدن به هدف‌گذاری‌های مطلوب با موانع ذاتی در حوزه‌ی فناوری مواجهند. اما سلول‌های نسل سومی نظیر سلول‌های پروسکایت که در حال حاضر با LOCE بسیار بالا و در حد $0.38 \text{ \$/kWh}$ رقابت‌پذیری مناسبی برای گرفتن بازار سلول‌های خورشیدی سیلیکونی بلوری را ندارند، تخمین زده می‌شود که بتوانند به LOCE معادل $0.18 \text{ \$/kWh}$ و حتی کمتر از آن برسند که از رقابت‌پذیری مناسبی برخوردار است (۱۱۵). به ویژه که سلول‌های پروسکایتی، می‌توانند به صورت انعطاف‌پذیر و شفاف تولید شوند که مزیت بسیار بزرگی برای آنها به ارمغان می‌آورد. به همین دلیل هم برآوردها حکایت از آن دارد که علیرغم LOCE بالای سلول‌های خورشیدی نسل سومی، این سلول‌های در آینده سهمی از بازار را به خود اختصاص دهند و به همین دلیل، نرخ رشد مرکب

که بازده سلول حدود ۱۲/۳٪ را تامین می‌نماید (۱۱۰). گروهی از پژوهشگران آمریکایی هم در اقدامی خلاقانه، کارتریج‌های یک چاپگر جوهرافشان چهار رنگ را با جوهرهای حاوی پیش‌سازهای کاتیون‌های مختلف پر کردند و با کنترل نحوه پاشش هر یک از مرکب‌ها توانستند سلول‌های پروسکایتی با ترکیب شیمیایی و ساختار بلوری متفاوت بسازند و از این طریق، به روشی ساده و سریع برای بهینه‌سازی ترکیب شیمیایی سلول پروسکایت دست یافتند (۱۱۱). البته بعداً مشخص شد که تاثیر نمک‌های پیش‌ساز پروسکایتی بر ریخت و ساختار بلوری لایه پروسکایت، تنها از جهت ساختار شیمیایی و الگوی الکترونی نیست، بلکه این نمک‌ها و همچنین دوپ‌کننده‌هایی که در داخل فرمول‌بندی جوهر مورد استفاده قرار می‌گیرند، بر رفتار ترشوندگی زیرآیند توسط مرکب نیز اثر می‌گذارند و همین امر می‌تواند ساختار بلوری و ریخت لایه پروسکایتی را متاثر نماید. با بهینه‌سازی فرمول‌بندی جوهر به منظور بهبود تر کنندگی آن، نهایتاً سلول‌هایی با بازده نزدیک به ۱۸٪ به دست آمد (۵۱). علاوه بر فرمول‌بندی جوهر و دمای زیرآیند، فاصله‌ی پرتاب قطرات^۱ و ضخامت لایه‌ی پروسکایت نیز بر ریخت لایه پروسکایت و عملکرد نهایی سلول اثرگذار است. ضخامت سلول با افزایش تعداد لایه‌های چاپ شده از جوهر قابل کنترل است و با کنترل همین دو مولفه، بازده کل نزدیک به ۱۳٪ به دست آمد (۱۱۳).

۴- جمع‌بندی و پیش‌بینی آینده و روند بازار

در این مقاله، در ابتدا به موضوع بحران جهانی انرژی پرداخته شد و اهمیت این موضوع، از زوایای مختلف مواجهه با این بحران از جهات مختلف زیست‌محیطی، افزایش تقاضای جهانی انرژی و همچنین نفوذ فناوری‌های جدید و به تبع آن نیاز به اشکال جدید انرژی مورد اشاره قرار گرفت. در ادامه روش‌های مختلف تولید انرژی و مزیت فتولتاییک‌ها به سایر روش‌های تولید انرژی مورد اشاره قرار گرفتند. این مزیت چه از جهت اقتصادی و چه از جهت ردپای زیست‌محیطی مورد تاکید قرار گرفت. ساز و کار فتوولتاییک‌ها و مزیت استفاده از روش‌های چاپی برای تولید آنها، به عنوان راه حلی برای رفع موانع گسترش بهره‌گیری از سلول‌های خورشیدی در صنعت انرژی دنیا مورد بعدی بود که در این نوشتار به آن پرداخته شد و نهایتاً، نسل‌های مختلف سلول‌های خورشیدی و تحقیقاتی که در زمینه‌ی استفاده از روش‌های چاپی برای ساخت سلول‌های هر نسل صورت گرفته مورد مرور گردیدند. پایان‌بخش این نوشتار، بررسی دورنمای بازار برای سلول‌های خورشیدی و به خصوص آن دسته از سلول‌های خورشیدی است که به روش‌های چاپی تولید می‌شوند.

¹ Drop spacing

به عنوان الکتروود جلویی (۱۱۸). در یک نمونه از این پژوهش‌ها که در سال ۲۰۱۸ منتشر شد، روندهای توسعه‌ی فناوری در زمینه سلول‌های خورشیدی پروسکایتی بررسی شد و با فرض به نتیجه رسیدن این روندها و تجاری‌سازی آنها، بازده این سلول‌ها در مقیاس تجاری و همچنین هزینه انرژی تولیدی توسط آنها مشخص گردید (۱۱۹). بر اساس نتایج این پژوهش، هنوز هزینه ساخت و همچنین LCOE سلول‌های پروسکایتی برای ورود به بازار مناسب نبود. همین گروه از پژوهشگران اما یک سال بعد مجدداً روندها را بررسی کردند و اعلام نمودند که اگر از روش‌های تولید R2R برای ساخت لایه‌های HTL، ETL و لایه‌ی فعال نوری استفاده شود، می‌توان انتظار داشت که سلول با عمر ۳ سال، بازدهی ۱۰٪ و نسبت پر کردن هندسی ماژول (MGFF¹) ۶۸٪ با هزینه تولید ۳۷\$/m² قابل استحصال خواهد بود که هزینه تولید انرژی را به حدود ۱/۱\$/W خواهد رساند. این مقدار در آن زمان برای رقابت با سلول‌های خورشیدی قابل حمل مطلوب تشخیص داده شد ولی نتایج نشان داد که برای رقابت با سلول‌های بلوری سیلیکونی ثابت، با فرض ثابت ماندن هزینه ساخت سلول، به بازده بیش از ۱۵٪ و عمر بالای ۱۵ سال نیاز خواهد بود (۱۱۸). با پیشرفت‌های سریعتر از حد انتظار در توسعه‌ی سلول‌های پروسکایتی، این پیشبینی‌ها مکرراً اصلاح شد و در پژوهشی که نتایج آن در اواخر سال ۲۰۲۱ منتشر شد، مشخص شد که با برخی اصلاحات و از جمله استفاده از چاپ اسکرین برای اعمال الکتروودها، می‌توان به LCOE حدود ۰/۰۳۵-۰/۰۳ \$/kWh دست یافت که بسیار بهتر از پیشبینی‌های قبلی بود (۱۲۰). البته این پیشبینی با فرض عمر ۱۰ ساله‌ی سلول بود که امکان‌پذیر بودن آن در شرایط واقعی محل تردید است. در یکی از جدیدترین بررسی‌ها از این دست، گروهی از پژوهشگران ایتالیایی به LCOE در حدود ۰/۰۶ \$/kWh - رسیدند که البته در همین پژوهش هم عنوان شده بود با توجه به اینکه سلول‌های خورشیدی پروسکایتی در ابتدای مسیر تجاری‌سازی هستند، عدم قطعیت زیادی در این ارقام وجود دارد و ممکن است در فرایند افزایش مقیاس تولید، هزینه تولید انرژی در عمل افزایش یابد (۱۲۱). مهم‌ترین اقداماتی که در مسیر توسعه و تجاری‌سازی سلول‌های خورشیدی پروسکایتی باید صورت پذیرد، عبارتست از اصلاح فرمول‌بندی جوهر و طراحی سلول به نحوی که چاپ‌پذیری آن بهبود یابد و ترتیب فاصله‌ی نواری لایه‌های مختلف به نحو بهینه تنظیم شود و همچنین توسعه روش‌هایی برای روئین کردن سلول نهایی در برابر عوامل تخریب‌کننده و کاهش دهنده عمر سلول و نهایتاً ترکیب روش‌های چاپی برای اعمال لایه‌های مختلف به منظور دستیابی به روش بهینه تولید که نهایتاً بتواند هزینه تولید ماژول‌های سلول خورشیدی پروسکایتی با هزینه تمام شده \$/W

سالانه‌ی این دسته از سلول‌های خورشیدی، بیشتر از متوسط بازار سلول‌های خورشیدی تخمین زده می‌شود.

بر اساس گزارش یک مرکز تخصصی مطالعات بازار، ظرفیت نیروگاهی نصب شده سلول‌های خورشیدی که در سال ۲۰۱۲ معادل ۱۰۰ گیگاوات بود، طی یک روند نزدیک به ۱۰ ساله و تا سال ۲۰۲۲ به حدود یک تراوات افزایش یافت. اما تنها سه سال زمان نیاز است تا این رقم بیش از دو برابر شود و به حدود ۲/۳ تراوات افزایش پیدا کند. پیشبینی می‌شود که این روند شتابان افزایش ظرفیت نصب شده‌ی سلول‌های خورشیدی، تا سال ۲۰۲۹ نیز با نرخ رشد مرکب سالانه (CAGR) ۶/۹٪ ادامه پیدا کند. این موضوع نشان از رشد صنعت سلول‌های خورشیدی در زمان حاضر و سال‌های پیش رو دارد (۱۱۴). برای سلول‌های خورشیدی نسل دومی یا همان سلول‌های خورشیدی لایه نازک، CAGR بالاتری تخمین زده می‌شود. بر اساس برآوردهای صورت گرفته، نرخ رشد سالانه بازار سلول‌های خورشیدی نسل دومی در بازه‌ی ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۰ میلادی، معادل ۸/۴٪ تخمین زده می‌شود که اندکی بیشتر از نرخ رشد مجموع بازار سلول‌های خورشیدی است (۱۱۷). این نرخ رشد برای سلول‌های نسل سومی آلی و DSSC بیشتر است. CAGR برای سلول‌های آلی و DSSC در بازه‌ی سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۲۷ به ترتیب ۱۲/۳٪ و ۱۲/۴٪ تخمین زده می‌شود (۱۱۴). البته همان‌طور که پیشتر گفته شد سهم سلول‌های خورشیدی آلی و DSSC از بازار سلول‌های خورشیدی بسیار ناچیز است. در حالیکه کل حجم بازار جهانی سلول‌های خورشیدی معادل ۲۳۴ میلیارد دلار است، سهم سلول‌های خورشیدی آلی و DSSC از این بازار، مجموعاً کمتر از ۱۶۰ میلیون دلار است (۱۱۴). تخمین‌های آینده‌نگرانه از وضعیت آتی بازار سلول‌های خورشیدی، بیشترین نرخ رشد را متعلق به سلول‌های نسل سومی پایه پروسکایتی می‌دانند. بر اساس تخمین‌ها، CAGR سلول‌های پایه پروسکایتی بین ۳۲/۵٪ (۱۱۷) و ۵۶/۵٪ (۱۱۴) تخمین زده می‌شود و بر همین اساس پیشبینی می‌شود که تا سال ۲۰۳۰، حجم بازار ۶/۶ میلیارد دلاری را برای این دسته از سلول‌ها شاهد باشیم (۱۱۷).

در پیش‌بینی روند بازار سلول‌های خورشیدی، سه مولفه اصلی مد نظر هستند که عبارتند از ۱- بازده -۲- قیمت -۳- عمر کاری. این سه مولفه، مثلث طلایی موفقیت سلول‌های خورشیدی هستند. در میان انواع سلول‌های خورشیدی نسل جدید، سلول‌های نسل سومین بیشترین ظرفیت را در بهره‌گیری از روش‌های چاپی در فرآیند تولید دارا هستند. از سوی دیگر، در بین سلول‌های نسل سومی، بهترین وضعیت را در مثلث طلایی عملکردی، سلول‌های پروسکایتی دارند. در مطالعات صورت گرفته مشخص شده است که در مسیر تجاری‌سازی سلول‌های خورشیدی پروسکایتی سه مانع مهم وجود دارد: وجود عناصر گران‌قیمت در لایه انتقال دهنده الکترون، پوشش فلزات نیب بر الکتروود پشتی و نهایتاً الکتروود گران قیمت ITO

¹ Modulus geometric fell factor

تقدیر و تشکر

نویسندگان از حمایت‌های آقایان دکتر علی مسعود پیمان‌نیا و علی آشتیانی عبدی، نهایت تشکر را دارند.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان عنوان نشده است.

۰/۳۰ - ۰/۲۵ را میسر سازد (۱۱۵). باید توجه داشت که بسیاری از بازده‌هایی که در حال حاضر برای سلول‌های پروسکایتی چاپی گزارش می‌شود، برای سلول‌های واحد و با سطح بسیار کوچک است و تهیه ماژول‌های سلول خورشیدی با همین روش‌ها در سطوح بزرگ‌تر، بازده بسیار کمتری را تامین می‌کند. همین امر لزوم ادامه توسعه در این حوزه را بیشتر پررنگ می‌کند (۱۰۶).

۵- مراجع

1. Da Rosa AV, Ordóñez JC. Fundamentals of renewable energy processes. 2022.
2. Ahmad T, Zhang D. A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: The story told so far. *Energy Reports*. 2020;6:1973-91 <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.07.020>.
3. BP. Statistical Review of World Energy. 2018 June. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf>EIA. Annual Energy Outlook. Energy Information Administration; 2018.
4. EIA. Annual Energy Outlook. Energy Information Administration; 2018.
5. Klein Goldewijk K, Beusen A, Janssen P. Long-term dynamic modeling of global population and built-up area in a spatially explicit way: HYDE 3.1. *The Holocene*. 2010;20(4):565-73 <https://doi.org/10.1177/095968360935658>.
6. Skoczkowski T, Bielecki S, Wojtyńska J. Long-Term Projection of Renewable Energy Technology Diffusion. *Energies*. 2019;12(22):4261 <https://doi.org/10.3390/en12224261>.
7. Hoekstra AY. The water footprint of modern consumer society. 2nd ed. London, UK.: Routledge; 2020. <https://doi.org/10.4324/9780429424557>.
8. Hadian S, Madani K. The water demand of energy: implications for sustainable energy policy development. *Sustainability*. 2013;5(11):4674-87. <https://doi.org/10.3390/su5114674>.
9. Mekonnen MM, Gerbens-Leenes P, Hoekstra AY. The consumptive water footprint of electricity and heat: a global assessment. *Environmental Science: Water Research & Technology*. 2015;1(3):285-97. <https://doi.org/10.1039/C5EW00026B>.
10. Keeling CD, Piper SC, Bacastow RB, Wahlen M, Whorf TP, Heimann M, et al. Atmospheric CO₂ and 13CO₂ exchange with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000: observations and carbon cycle implications. A history of atmospheric CO₂ and its effects on plants, animals, and ecosystems: Springer; 2005. p. 83-113 https://doi.org/10.1007/0-387-27048-5_5.
11. Friedlingstein P, O'sullivan M, Jones MW, Andrew RM, Hauck J, Olsen A, et al. Global carbon budget 2020. *Earth System Science Data*. 2020;12(4):3269-340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>.
12. Ansari MIH, Qurashi A, Nazeeruddin MK. Frontiers, opportunities, and challenges in perovskite solar cells: A critical review. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*. 2018;35:1-24 <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2017.11.002>.
13. Hosseinezhad M, Moradian S. Organic dyes for Using in Dye-sensitized solar cells. *Journal of Studies in Color World*. 2011;1(3):29-32 <https://dor.net/20.1001.1.22517278.1390.1.3.5.7>.
14. Grätzel M. Conversion of sunlight to electric power by nanocrystalline dye-sensitized solar cells. *J Photochem Photobiol A: Chem*. 2004;164(1-3):3-14 <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2004.02.023>.
15. Fu R, Feldman DJ, Margolis RM. US solar photovoltaic system cost benchmark: Q1 2018. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States); 2018.
16. Simya O, Radhakrishnan P, Ashok A, Kavitha K, Althaf R. Engineered Nanomaterials for Energy Applications. *Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications*. In: Mustansar Hussain C, editor. *Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier BV; 2018. p. 751-67 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813351-4.00043-2>.
17. Nazeeruddin MK, Zakeeruddin S, Lagref J-J, Liska P, Comte P, Barolo C, et al. Stepwise assembly of amphiphilic ruthenium sensitizers and their applications in dye-sensitized solar cell. *Coord Chem Rev*. 2004;248(13-14):1317-28 <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2004.03.012>.
18. O'regan B, Grätzel M. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films. *Nature*. 1991;353(6346):737-40 <https://doi.org/10.1038/353737a0>.
19. Bach U, Lupo D, Comte P, Moser J-E, Weissörtel F, Salbeck J, et al. Solid-state dye-sensitized mesoporous TiO₂ solar cells with high photon-to-electron conversion efficiencies. *Nature*. 1998;395(6702):583-5 <https://doi.org/10.1038/26936>.
20. Płaczek-Popko E. Top PV market solar cells 2016. *Opto-Electronics Review*. 2017;25(2):55-64

- <https://doi.org/10.1016/j.opelre.2017.03.002>.
21. Printed, Organic & Flexible Electronics Forecasts, Players & Opportunities 2017-2027 [Internet]. IDTechEx. 2017. Available from: <https://www.idtechex.com/en/research-report/printed-organic-and-flexible-electronics-forecasts-players-and-opportunities-2017-2027/510>.
 22. Kamyshny A, Magdassi S. Conductive nanomaterials for 2D and 3D printed flexible electronics. *Chem Soc Rev*. 2019;48(6):1712-40 <https://doi.org/10.1039/C8CS00738A>.
 23. Singh M, Haverinen HM, Dhagat P, Jabbour GE. Inkjet printing—process and its applications. *Adv Mater*. 2010;22(6):673-85 <https://doi.org/10.1002/adma.200901141>.
 24. Kamyshny A, Magdassi S. Conductive Nanomaterials for Printed Electronics. *Small*. 2014;10(17):3515-35. <https://doi.org/10.1002/sml.201303000>.
 25. Tam SK, Fung KY, Poon GSH, Ng KM. Product design: Metal nanoparticle-based conductive inkjet inks. *AIChE J*. 2016;62(8):53-2740. <https://doi.org/10.1002/aic.15271>.
 26. Liu Y-F, Tsai M-H, Pai Y-F, Hwang W-S. Control of droplet formation by operating waveform for inks with various viscosities in piezoelectric inkjet printing. *Appl Phys A*. 2013;111(2):509-16. <https://doi.org/10.1007/s00339-013-7569-7>.
 27. Mohsen MRN, Mojtaba J, Zahra R. Printed Electronics, Based on Carbon Nanotubes and Graphene Nanosheets. *Journal of studies in color world*. 2020;10(3):29-42 <https://dor.net/20.1001.1.22517278.1399.10.3.3.8>.
 28. Bhatnagar M, Jha S, Pattnaik A. Analysis of different printing technologies for metallization of crystalline silicon solar cells. *International Journal of Materials Research*. 2023 <https://doi.org/10.1515/ijmr-2021-8686>.
 29. Ganesan S, Mehta S, Gupta D. Fully printed organic solar cells – a review of techniques, challenges and their solutions. *Opto-Electronics Review*. 2019;27(3):298-320 <https://doi.org/10.1016/j.opelre.2019.09.002>.
 30. Kipphan H. Fundamentals. In: Kipphan H, editor. *Handbook of Print Media: Technologies and Production Methods*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2001. p. 1-202 https://doi.org/10.1007/978-3-540-29900-4_1.
 31. Southee D, York N, editors. Printed electronics, product design and the education of future industrial designers. DS 82: Proceedings of the 17th International Conference on Engineering and Product Design Education (E&PDE15), Great Expectations: Design Teaching, Research & Enterprise, Loughborough, UK, 03-0409 2015; 2015.
 32. Saga T. Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production. *NPG Asia Materials*. 2010;2(3):96-102. <https://doi.org/10.1038/asiamat.2010.82>.
 33. Tepner S, Wengenmeyr N, Linse M, Lorenz A, Pospischil M, Clement F. The Link between Ag-Paste Rheology and Screen-Printed Solar Cell Metallization. *Adv Mater Technol*. 2020;5(10):2000654. <https://doi.org/10.1002/admt.202000654>.
 34. Erath D, Filipović A, Retzlaff M, Goetz AK, Clement F, Biro D, et al. Advanced screen printing technique for high definition front side metallization of crystalline silicon solar cells. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2010;94(1):57-61 <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.05.018>.
 35. Messmer C, Tutsch L, Pingel S, Erath D, Schön J, Fell A, et al. Optimized front TCO and metal grid electrode for module-integrated perovskite-silicon tandem solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2022;30(4):374-83 <https://doi.org/10.1002/pip.3491>.
 36. Jost N, Askins S, Dixon R, Ackermann M, Dominguez C, Anton I. Array of micro multijunction solar cells interconnected by conductive inks. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2022;240:111693. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111693>.
 37. Wu X, Zhou Z, Wang Y, Li J. Syntheses of Silver Nanowires Ink and Printable Flexible Transparent Conductive Film: A Review. *Coatings*. 2020;10(9):865. <https://www.mdpi.com/2079-6412/10/9/865>
 38. Li D, Lai W-Y, Zhang Y-Z, Huang W. Printable Transparent Conductive Films for Flexible Electronics. *Adv Mater*. 2018;30(10):1704738. <https://doi.org/10.1002/adma.201704738>.
 39. Ostfeld AE, Arias AC. Flexible photovoltaic power systems: integration opportunities, challenges and advances. *Flexible Printed Electron*. 2017;2(1):013001 <https://doi.org/10.1088/2058-8585/aa5750>.
 40. Han G, Zhang S, Boix PP, Wong LH, Sun L, Lien S-Y. Towards high efficiency thin film solar cells. *Prog Mater Sci*. 2017;87:246-91 <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.02.003>.
 41. Stuckelberger M, Biron R, Wyrsh N, Haug F-J, Ballif C. Progress in solar cells from hydrogenated amorphous silicon. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;76:1497-523 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.190>.
 42. Ramanujam J, Bishop DM, Todorov TK, Gunawan O, Rath J, Nekovei R, et al. Flexible CIGS, CdTe and a-Si: H based thin film solar cells: A review. *Prog Mater Sci*. 2020;110:100619 <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100619>.
 43. Green MA, Dunlop ED, Siefert G, Yoshita M, Kopidakis N, Bothe K, et al. Solar cell efficiency tables (Version 61). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2023;31(1):3-16 <https://doi.org/10.1002/pip.3646>.
 44. Faraj M, Ibrahim K, Salhin A. Fabrication and characterization of thin-film Cu (In, Ga) Se₂ solar cells on a PET plastic substrate using screen printing. *Mater Sci Semicond Process*. 2012;15(2):165-73 <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2011.10.006>.
 45. Dai P, Zhang Y, Xue Y, Jiang X, Wang X, zhan J, et al. Nanoparticle-based screen printing of copper zinc tin sulfide thin film as photocathode for quantum dot sensitized solar cell. *Mater Lett*. 2015;158:198-201 <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.06.016>.

46. Wang W, Su Y-W, Chang C-h. Inkjet printed chalcopyrite $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$ thin film solar cells. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2011;95(9):2616-20
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.05.011>.
47. Lin X, Klenk R, Wang L, Köhler T, Albert J, Fiechter S, et al. 11.3% efficiency $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})(\text{S}, \text{Se})_2$ thin film solar cells via drop-on-demand inkjet printing. *Energy & Environmental Science*. 2016;9(6):2037-43
<https://doi.org/10.1039/C6EE00587J>.
48. Yadav BS, Dey SR, Dhage SR. Effective ink-jet printing of aqueous ink for $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ thin film absorber for solar cell application. *Solar Energy*. 2019;179:363-70
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.003>.
49. Karunakaran SK, Arumugam GM, Yang W, Ge S, Khan SN, Lin X, et al. Recent progress in inkjet-printed solar cells. *Journal of Materials Chemistry A*. 2019;7(23):13873-902. <https://doi.org/10.1039/C9TA03155C>.
50. Lin X, Kavalakkatt J, Lux-Steiner MC, Ennaoui A. Inkjet-Printed $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}, \text{Se})_4$ Solar Cells. *Advanced science*. 2015;2. <https://doi.org/10.1002/advs.201500028>.
51. Colina M, Bailo E, Medina-Rodríguez B, Kondrotas R, Sánchez-González Y, Sylla D, et al. Optimization of ink-jet printed precursors for $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}, \text{Se})_4$ solar cells. *J Alloys Compd*. 2018;735:2462-70
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.035>.
52. Lin X, Madhavan VE, Kavalakkatt J, Hinrichs V, Lauer mann I, Lux-Steiner MC, et al. Inkjet-printed CZTSSe absorbers and influence of sodium on device performance. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2018;180:373-80. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.09.003>.
53. Nakada T, Mizutani M, Hagiwara Y, Kunioka A. High-efficiency $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ thin-film solar cells with a CBD-ZnS buffer layer. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2001;67(1-4):255-60 <https://doi.org/10.1016/S0927-0248>.
54. Mughal MA, Engelken R, Sharma R. Progress in indium (III) sulfide (In_2S_3) buffer layer deposition techniques for CIS, CIGS, and CdTe-based thin film solar cells. *Solar Energy*. 2015;120:131-46
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.07.028>.
55. Mohammed IM, Gubari GM, Huse NP, Dive AS, Han S-H, Sharma R. Effect of Cd/S ratio on growth and physical properties of CdS thin films for photosensor application. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2020;31:9989-96.
<https://doi.org/10.1007/s10854-020-03543-z>.
56. Wang L, Lin X, Ennaoui A, Wolf C, Lux-Steiner MC, Klenk R. Solution-processed In_2S_3 buffer layer for chalcopyrite thin film solar cells. *EPJ Photovoltaics*. 2016;7:70303 <https://doi.org/10.1051/epjpv/2016001>.
57. Debot A, Chu VB, Adeleye D, Guillot J, Arl D, Melchiorre M, et al. Inkjet-printed indium sulfide buffer layer for $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})(\text{S}, \text{Se})_2$ thin film solar cells. *Thin Solid Films*. 2022;745:139096
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2022.139096>.
58. Gensowski K, Jimenez A, Freund T, Wengenmeyr N, Tepner S, Pospischil M, et al. CIGS Mini-Modules with Dispensed Metallization on Transparent Conductive Oxide Layer. *Solar RRL*. 2020;4(12):2000475
<https://doi.org/10.1002/solr.202000475>.
59. Hersh PA, Curtis CJ, van Hest MF, Kreuder JJ, Pasquarelli R, Miedaner A, et al. Inkjet printed metallizations for $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ photovoltaic cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2011;19(8):973-6. <https://doi.org/10.1002/pip.1105>.
60. Hao Y, Gao J, Xu Z, Zhang N, Luo J, Liu X. Preparation of silver nanoparticles with hyperbranched polymers as a stabilizer for inkjet printing of flexible circuits. *New J Chem*. 2019;43(6):2797-803.
<https://doi.org/10.1039/C8NJ05639K>.
61. Hosseinezhad M. Review on Metal-based Complex Dyes for Dye-sensitized Solar Cells. *Journal of Studies in Color World*. 2021;11(3):45-54
<https://doi.org/10.1001.1.22517278.1400.11.3.4.6>.
62. Rouhani S, Hosseinezhad M, Sohrab N, Gharanjig K, Salem A, Ranjbar Z. Investigation of the Effect of rGO/TiO₂ on Photovoltaic Performance of DSSCs Devices. *Progress in Color, Colorants and Coatings*. 2022;15(2):123-31
<https://doi.org/10.30509/pccc.2021.166738.1094>.
63. Hosseinezhad M, Masoud Etehad S. A Review of Bacterial-sensitizers for Photovoltaic Devices. *Journal of Studies in Color World*. 2021;11(1):1-10
<https://doi.org/10.1001.1.22517278.1400.11.1.1.9>.
64. Agrawal A, Siddiqui SA, Soni A, Khandelwal K, Sharma GD. Performance analysis of TiO₂ based dye sensitized solar cell prepared by screen printing and doctor blade deposition techniques. *Solar Energy*. 2021;226:9-19
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.08.001>.
65. Cherrington R, Hughes DJ, Senthilarasu S, Goodship V. Inkjet-Printed TiO₂ Nanoparticles from Aqueous Solutions for Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs). *Energy Technology*. 2015;3(8):866-70
<https://doi.org/10.1002/ente.201500096>.
66. Raïssi M, Pellegrin Y, Lefevre F-X, Boujtita M, Rousseau D, Berthelot T, et al. Digital printing of efficient dye-sensitized solar cells (DSSCs). *Solar Energy*. 2020;199:92-9
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.004>.
67. Hashmi SG, Ozkan M, Halme J, Paltakari J, Lund PD. Highly conductive, non-permeable, fiber based substrate for counter electrode application in dye-sensitized solar cells. *Nano Energy*. 2014;9:212-20
<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2014.07.013>.
68. Özkan M, Hashmi SG, Halme J, Karakoc A, Sarikka T, Paltakari J, et al. Inkjet-printed platinum counter electrodes for dye-sensitized solar cells. *Org Electron*. 2017;44:159-67 <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2017.02.015>.
69. Hashmi SG, Sonai GG, Iftikhar H, Lund PD, Nogueira AF. Printed single-walled carbon-nanotubes-based counter electrodes for dye-sensitized solar cells with copper-based redox mediators. *Semicond Sci Technol*. 2019;34(10):105001.
<https://doi.org/10.1088/1361-6641/ab39f0>.
70. Abdulrazzaq OA, Saini V, Bourdo S, Dervishi E, Biris AS. Organic solar cells: a review of materials, limitations, and

- possibilities for improvement. *Particulate science and technology*. 2013;31(5):427-42
<https://doi.org/10.1080/02726351.2013.769470>.
71. Xu H, Yuan F, Zhou D, Liao X, Chen L, Chen Y. Hole transport layers for organic solar cells: recent progress and prospects. *Journal of Materials Chemistry A*. 2020;8(23):11478-92
<https://doi.org/10.1039/D0TA03511D>.
 72. Ashtiani Abdi A, Nourmohammadian F, Mohammadi Y, Saeb MR. Control over Power Conversion Efficiency of BHJ Solar Cells: Learn more from Less, with Artificial Intelligence. *Progress in Color, Colorants and Coatings*. 2019;12(1):1-14
<https://doi.org/10.30509/pccc.2019۸۰۳۰.8303>.
 73. Benganem M, Almohammed A. Organic Solar Cells: A Review. In: Mellit A, Benganem M, editors. *A Practical Guide for Advanced Methods in Solar Photovoltaic Systems*. Cham: Springer International Publishing; 2020. p. 81-106. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97887-1_1-43473-030-3-97887
 74. Krebs FC, Gevorgyan SA, Alstrup J. A roll-to-roll process to flexible polymer solar cells: model studies, manufacture and operational stability studies. *J Mater Chem*. 2009;19(30):5442-51. <https://doi.org/10.1039/B823001C>.
 75. Krebs FC. All solution roll-to-roll processed polymer solar cells free from indium-tin-oxide and vacuum coating steps. *Org Electron*. 2009;10(5):761-8.
<https://doi.org/10.1016/j.orgel.2009.03.009>.
 76. Krebs FC, Søndergaard R, Jørgensen M. Printed metal back electrodes for R2R fabricated polymer solar cells studied using the LBIC technique. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2011;95(5):1348-53.
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.11.007>.
 77. Manceau M, Angmo D, Jørgensen M, Krebs FC. ITO-free flexible polymer solar cells: From small model devices to roll-to-roll processed large modules. *Org Electron*. 2011;12(4):566-74
<https://doi.org/10.1016/j.orgel.2011.01.009>.
 78. Galagan Y, J.M. Rubingh J-E, Andriessen R, Fan C-C, W.M. Blom P, C. Veenstra S, et al. ITO-free flexible organic solar cells with printed current collecting grids. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2011;95(5):1339-43
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.08.011>.
 79. Deganello D, Cherry JA, Gethin DT, Claypole TC. Patterning of micro-scale conductive networks using reel-to-reel flexographic printing. *Thin Solid Films*. 2010;518(21):6113-6
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.05.125>.
 80. Hübler A, Trnovec B, Zillger T, Ali M, Wetzold N, Mingeback M, et al. Printed Paper Photovoltaic Cells. *Advanced Energy Materials*. 2011;1(6):1018-22.
<https://doi.org/10.1002/aenm.201100394>.
 81. Eom SH, Senthilarasu S, Uthirakumar P, Yoon SC, Lim J, Lee C, et al. Polymer solar cells based on inkjet-printed PEDOT:PSS layer. *Org Electron*. 2009;10(3):536-42
<https://doi.org/10.1016/j.orgel.2009.01.015>.
 82. Steirer KX, Berry JJ, Reese MO, van Hest MFAM, Miedaner A, Liberatore MW, et al. Ultrasonically sprayed and inkjet printed thin film electrodes for organic solar cells. *Thin Solid Films*. 2009;517(8):2781-6
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.10.124>.
 83. Singh A, Gupta SK, Garg A. Inkjet printing of NiO films and integration as hole transporting layers in polymer solar cells. *Scientific Reports*. 2017;7(1):1775
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-01897-9>.
 84. Krebs FC, Spanggaard H, Kjær T, Biancardo M, Alstrup J. Large area plastic solar cell modules. *Materials Science and Engineering: B*. 2007;138(2):106-11
<https://doi.org/10.1016/j.mseb.2006.06.008>.
 85. Krebs FC, Jørgensen M, Norrman K, Hagemann O, Alstrup J, Nielsen TD, et al. A complete process for production of flexible large area polymer solar cells entirely using screen printing—first public demonstration. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2009;93(4):422-41
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.12.001>.
 86. Zhang B, Chae H, Cho SM. Screen-printed polymer: fullerene bulk-heterojunction solar cells. *Jpn J Appl Phys*. 2009;48(2R):020208
<https://doi.org/10.1143/JJAP.48.020208>.
 87. Kopola P, Aernouts T, Sliz R, Guillerez S, Ylikunnari M, Cheyns D, et al. Gravure printed flexible organic photovoltaic modules. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2011;95(5):1344-7
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.12.020>.
 88. Kopola P, Aernouts T, Guillerez S, Jin H, Tuomikoski M, Maaninen A, et al. High efficient plastic solar cells fabricated with a high-throughput gravure printing method. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2010;94(10):1673-80
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.05.027>.
 89. Voigt MM, Mackenzie RCI, Yau CP, Atienzar P, Dane J, Keivanidis PE, et al. Gravure printing for three subsequent solar cell layers of inverted structures on flexible substrates. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2011;95(2):731-4
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.10.013>.
 90. Jung J, Kim D, Lim J, Lee C, Yoon SC. Highly Efficient Inkjet-Printed Organic Photovoltaic Cells. *Jpn J Appl Phys*. 2010;49(5S1):05EB3
<https://doi.org/10.1143/JJAP.49.05EB03>.
<https://doi.org/10.1143/JJAP.49.05EB03>.
 91. Hermerschmidt F, Papagiorgis P, Savva A, Christodoulou C, Itskos G, Choulis SA. Inkjet printing processing conditions for bulk-heterojunction solar cells using two high-performing conjugated polymer donors. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2014;130:474-80
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.07.050>.
 92. Eom SH, Park H, Mujawar S, Yoon SC, Kim S-S, Na S-I, et al. High efficiency polymer solar cells via sequential inkjet-printing of PEDOT: PSS and P3HT: PCBM inks with additives. *Org Electron*. 2010;11(9):1516-22
<https://doi.org/10.1016/j.orgel.2010.06.007>.
 93. Lamont CA, Eggenhuisen TM, Coenen MJJ, Slaats TWL, Andriessen R, Groen P. Tuning the viscosity of halogen free bulk heterojunction inks for inkjet printed organic

- solar cells. *Org Electron.* 2015;17:107-14
<https://doi.org/10.1016/j.orgel.2014.10.052>.
94. Arredondo B, Romero B, Beliatís MJ, del Pozo G, Martín-Martín D, Blakesley JC, et al. Analysing impact of oxygen and water exposure on roll-coated organic solar cell performance using impedance spectroscopy. *Sol Energy Mater Sol Cells.* 2018;176:397-404
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.10.028>.
 95. Krebs FC, Tromholt T, Jørgensen M. Upscaling of polymer solar cell fabrication using full roll-to-roll processing. *Nanoscale.* 2010;2(6):873-86
<https://doi.org/10.1039/B9NR00430K>
 96. Machui F, Hösel M, Li N, Spyropoulos GD, Ameri T, Søndergaard RR, et al. Cost analysis of roll-to-roll fabricated ITO free single and tandem organic solar modules based on data from manufacture. *Energy & Environmental Science.* 2014;7(9):2792-802
<https://doi.org/10.1039/C4EE01222D>.
 97. Kojima A, Teshima K, Shirai Y, Miyasaka T. Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells. *Journal of the American Chemical Society.* 2009;131(17):6050-1
<https://doi.org/10.1021/ja809598r>.
 98. Shi B, Duan L, Zhao Y, Luo J, Zhang X. Semitransparent perovskite solar cells: from materials and devices to applications. *Adv Mater.* 2020;32(3):1806474
<https://doi.org/10.1002/adma.201806474>.
 99. Djurišić AB, Liu FZ, Tam HW, Wong MK, Ng A, Surya C, et al. Perovskite solar cells - An overview of critical issues. *Progress in Quantum Electronics.* 2017;53:1-37
<https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2017.05.002>.
 100. Fu F, Feurer T, Weiss Thomas P, Pisoni S, Avancini E, Andres C, et al. High-efficiency inverted semi-transparent planar perovskite solar cells in substrate configuration. *Nature Energy.* 2016;2(1):16190
<https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.190>.
 101. Fallahdoust Moghadam S, Gilani N, Yousefi Aa. A Review of Recent Progress in Fabrication of Perovskite Solar Cells. *J Stud Color World.* 2023;13(2):159-84
<https://dor.net/20.1001.1.22517278.1402.13.2.3.7>.
 102. Maleki E, Ranjbar M, Kahani SA. The Effect of Antisolvent Dropping Delay Time on The Morphology and Structure of the Perovskite Layer in the Hole Transport Material Free Perovskite Solar Cells. *Progress in Color, Colorants and Coatings.* 2021;14(1):47-54
<https://doi.org/10.30509/pccc.2021.81671>.
 103. You J, Yang Y, Hong Z, Song T-B, Meng L, Liu Y, et al. Moisture assisted perovskite film growth for high performance solar cells. *Appl Phys Lett.* 2014;105(18)
<https://doi.org/10.1063/1.4901510>.
 104. Xiong J, Qi Y, Zhang Q, Box D, Williams K, Tatum J, et al. Enhanced moisture and water resistance in inverted perovskite solar cells by poly (3-hexylthiophene). *ACS Applied Energy Materials.* 2021;4(2):1815-23
<https://doi.org/10.1021/acsaem.0c02941>.
 105. Salado M, Contreras-Bernal L, Calìò L, Todinova A, López-Santos C, Ahmad S, et al. Impact of moisture on efficiency-determining electronic processes in perovskite solar cells. *Journal of Materials Chemistry A.* 2017;5(22):10917-27
<https://doi.org/10.1039/C7TA02264F>.
 106. Parida B, Singh A, Kalathil Soopy AK, Sangaraju S, Sundaray M, Mishra S, et al. Recent developments in upscalable printing techniques for perovskite solar cells. *Advanced Science.* 2022;9(14):2200308
<https://doi.org/10.1002/advs.202200308>.
 107. Huddy JE, Ye Y, Scheideler WJ. Eliminating the Perovskite Solar Cell Manufacturing Bottleneck via High-Speed Flexography. *Adv Mater Technol.* 2022;7(7):2101282
<https://doi.org/10.1002/admt.202101282>.
 108. Kim YY, Yang T-Y, Suhonen R, Kempainen A, Hwang K, Jeon NJ, et al. Roll-to-roll gravure-printed flexible perovskite solar cells using eco-friendly antisolvent bathing with wide processing window. *Nature Communications.* 2020;11(1):5146
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-18940-5>.
 109. Wei Z, Chen H, Yan K, Yang S. Inkjet printing and instant chemical transformation of a CH₃NH₃PbI₃/nanocarbon electrode and interface for planar perovskite solar cells. *Angew Chem Int Ed.* 2014;53(48):13239-43
<https://doi.org/10.1002/anie.201408638>.
 110. Li S-G, Jiang K-J, Su M-J, Cui X-P, Huang J-H, Zhang Q-Q, et al. Inkjet printing of CH₃NH₃PbI₃ on a mesoscopic TiO₂ film for highly efficient perovskite solar cells. *Journal of Materials Chemistry A.* 2015;3(17):9092-7
<https://doi.org/10.1039/C4TA05675B>.
 111. Bag M, Jiang Z, Renna LA, Jeong SP, Rotello VM, Venkataraman D. Rapid combinatorial screening of inkjet-printed alkyl-ammonium cations in perovskite solar cells. *Mater Lett.* 2016;164:472-5
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.11.058>.
 112. Mathies F, Abzieher T, Hochstuhl A, Glaser K, Colsmann A, Paetzold UW, et al. Multipass inkjet printed planar methylammonium lead iodide perovskite solar cells. *Journal of Materials Chemistry A.* 2016;4(48):19207-13
<https://doi.org/10.1039/C6TA07972E>.
 113. Mathies F, Eggers H, Richards BS, Hernandez-Sosa G, Lemmer U, Paetzold UW. Inkjet-printed triple cation perovskite solar cells. *ACS Applied Energy Materials.* 2018;1(5):1834-9
<https://doi.org/10.1021/acsaem.8b00222>.
 114. Solar Power Market Size, Share & Industry Analysis, By Technology, By Application and Regional Forecast, 2021-2028. -Fortune Business Insights; 2021. Contract No.: 103761. <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/solar-power-market-100764>
 115. Smith BL, Woodhouse M, Horowitz KA, Silverman TJ, Zuboy J, Margolis RM. Photovoltaic (PV) module technologies: 2020 benchmark costs and technology evolution framework results. *National Renewable Energy*

- Lab.(NREL), Golden, CO (United States); 2021. <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/78173.pdf>
116. Feldman D, Ramasamy V, Margolis R. US Solar photovoltaic BESS system cost Benchmark Q1 2020 report. National Renewable Energy Laboratory-Data (NREL-DATA), Golden; 2021. <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/80694.pdf>
117. Thin-film solar cell market by type, installation, end-user, and region: Global opportunity analysis and industry forecast, 2020–2030. . Allied Market Research; 2022. <https://www.alliedmarketresearch.com/thin-film-solar-cell-market>
118. Chang NL, Ho-Baillie AWY, Vak D, Gao M, Green MA, Egan RJ. Manufacturing cost and market potential analysis of demonstrated roll-to-roll perovskite photovoltaic cell processes. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2018;174:314-24 <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.08.038>.
119. Chang NL, Yi Ho-Baillie AW, Basore PA, Young TL, Evans R, Egan RJ. A manufacturing cost estimation method with uncertainty analysis and its application to perovskite on glass photovoltaic modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2017;25(5):390-405 <https://doi.org/10.1002/pip.2871>.
120. Kajal P, Verma B, Vadaga SGR, Powar S. Costing Analysis of Scalable Carbon-Based Perovskite Modules Using Bottom Up Technique. *Global Challenges*. 2022;6(2):2100070 <https://doi.org/10.1002/gch2.202100070>.
121. De Bastiani M, Larini V, Montecucco R, Grancini G. The levelized cost of electricity from perovskite photovoltaics. *Energy & Environmental Science*. 2023;16(2):421-9 <https://doi.org/10.1039/D2EE03136A>.

How to cite this article:

Mohammad Raei Nayini M, Jalili M, Bastani S, Khamseh S. Printed Solar Cells, an Inevitable Remedy for the Global Energy Crisis. *J Stud color world*. 2023;13(4):343-358. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22517278.1402.13.4.3.1> [In Persian].