

## A Review of the Application of Conductive Carbon Nano-structures in Flexible Printable Photovoltaic Cells

Mojtaba Jalili<sup>1\*</sup>, Mohsen Mohammad Raei Nayini<sup>1</sup>, Farhad Ameri<sup>2</sup>, Narges Ajili<sup>1</sup>

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

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

### ARTICLE INFO

Article history:

Received: 21- 07- 2024

Accepted: 03- 08-2024

Available online: 16 -10-2024

Print ISSN: 2251-7278

Online ISSN: 2383-2223

DOI: 10.30509/JSCW.2024.167347.1198

### Keywords:

Flexible solar cells

Power conversion efficiency

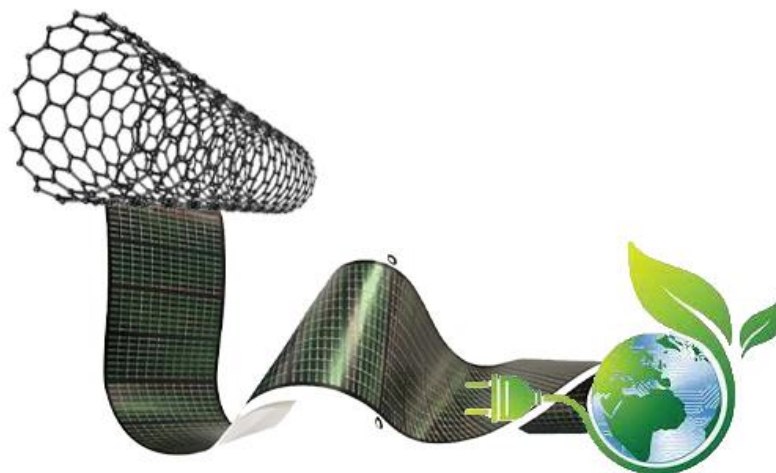
Carbon nanostructures

Printing

Coating

### ABSTRACT

Flexible photovoltaic devices have attracted significant attention due to their lightweight nature, resilience to complex deformations, applicability on curved surfaces, compatibility with roll-to-roll manufacturing, and ease of storage and transportation. These devices hold promising applications in electronics, smart textiles, electric vehicles, and the aerospace industry. This article addresses the necessity of harnessing energy from sustainable resources, considering the limitations of fossil fuels related to both scarcity and environmental concerns. It then introduces various conductive carbon-based nanostructures, such as fullerenes, graphene nanosheets, and carbon nanotubes, followed by an overview of their applications in flexible photovoltaic devices, specifically in dye-sensitized solar cells (DSSC), organic solar cells (OSC), and perovskite solar cells (PSC). The discussion focuses primarily on the impacts of these nanostructures on power conversion efficiency (PCE), flexibility, and the commercialization potential of photovoltaics. Finally, various coating and printing techniques for preparing photovoltaic electrodes using carbon nanostructure-containing ink formulations are reviewed, along with a discussion of their advantages and disadvantages.





## مروری بر کاربرد نانوساختارهای کربنی رسانا در سلول‌های فوتوولتائیک چاپی انعطاف پذیر

مجتبی جلیلی<sup>۱\*</sup>، محسن محمد رائی نائینی<sup>۱</sup>، فرهاد عامری<sup>۲</sup>، نرگس آجیلی<sup>۳</sup>

۱- استادیار، گروه پژوهشی علوم و فناوری چاپ، پژوهشکده فیزیک رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران. صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴.

۲- دانشیار، گروه پژوهشی فیزیک رنگ، پژوهشکده فیزیک رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴.

۳- کارشناسی، گروه پژوهشی علوم و فناوری چاپ، پژوهشکده فیزیک رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴.

### چکیده

دستگاه‌های فوتوولتائیک انعطاف پذیر به دلیل وزن کم، مقاومت در برابر تغییر شکل‌های پیچیده، قابل اجرا بودن در سطوح منحنی، سازگاری با تولید رول به رول و سهولت انبارداری و حمل و نقل و همچنین کاربردهای بالقوه در صنعت الکترونیک، منسوجات هوشمند، خودروهای الکتریکی و صنعت هوافضا، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. در این مقاله، به لزوم تامین انرژی از منابع پایدار و پاک، با توجه به محدودیت‌های منابع فسیلی از جهت کمبود و همچنین اثرات مخرب زیست‌محیطی آنها پرداخته شده است. سپس مشخصات انواع نانوساختارهای کربنی شامل فولرن‌ها، نانولوله‌های کربنی و گرافن معرفی شده و در ادامه، کاربرد آنها در سلول‌های خورشیدی انعطاف پذیر، به ویژه سلول‌های خورشیدی حساس به رنگزا (DSSC)، سلول‌های خورشیدی آلی (OSC) و سلول‌های خورشیدی پروسکایت (PSC) مرور شده است. این بررسی با تاکید بر اثر این نانوساختارها بر بازده تبدیل توان، انعطاف پذیری و قابلیت تجاری‌سازی انواع سلول‌های خورشیدی صورت گرفته است. در نهایت، روش‌های مختلف پوشش و چاپ برای تهیه الکترودهای فوتوولتائیک با استفاده از فرمول‌های جوهر حاوی نانوساختار کربن، همراه با بحث در مورد مزایا و معایب آنها بررسی می‌شود.

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۸

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۳/۰۷/۲۵

شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۷۲۷۸

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۲۲۳

DOI: 10.30509/JSCW.2024.167347.1198

### واژه‌های کلیدی:

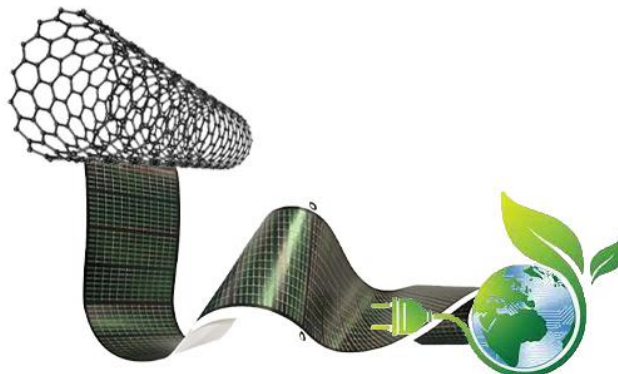
سلول‌های خورشیدی انعطاف پذیر

بازده تبدیل توان

نانوساختارهای کربنی

چاپ

پوشش



## ۱- مقدمه

طی سالین اخیر، «بحران جهانی انرژی»، به عبارتی پر تکرار در رسانه‌ها، محافل سیاسی و تصمیم‌گیری تبدیل شده است. افزایش جمعیت، افزایش سرانه مصرف انرژی و انباشت آلودگی‌های زیست‌محیطی و گازهای گل‌خانه‌ای، عواملی هستند که جهان را درگیر بحران انرژی کرده‌اند. افزایش تقاضا برای منابع انرژی و مشخصاً انرژی الکتریکی، به ویژه پس از انقلاب اطلاعات و افزایش استفاده از سیستم‌های ارتباطی و بانک‌های اطلاعاتی و همچنین سامانه‌های هوش مصنوعی افزایش چشمگیری داشته است (۲، ۱). به طوری که همین امر مراکز پژوهشی و دانشگاهی را نیز به تکاپو انداخته تا بتوانند به صورت‌های مختلف، به این مشکل پاسخ دهند. البته باید توجه داشت که با توجه به بحران‌های زیست محیطی موجود، تمامی این پاسخ‌ها، باید به نحوی باشند که رد پای محیط زیستی کمی نیز بر جای بگذارند. به همین دلیل رویکردهای مبتنی بر استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به طور گسترده مورد اقبال جهانی قرار گرفته‌اند و از میان منابع تجدیدپذیر، استفاده از فوتوولتائیک‌ها برای تبدیل انرژی نور خورشید به الکتریسیته، بیشترین بهره‌وری و ظرفیت اقتصادی را از خود نشان داده است (۳، ۴).

به موازات افزایش تقاضا برای سامانه‌های فوتوولتائیک، تحقیقات برای دستیابی به روش‌های تولید ارزان قیمت، سریع، با قابلیت افزایش مقیاس و همچنین بدون نیاز به تجهیزات تولید تخصصی نیز رشدی چشمگیر داشته است که بیشتر این تحقیقات در حال حاضر بر «الکترونیک چاپی» تمرکز یافته‌اند. «الکترونیک چاپی» عموماً به معنای استفاده از روش‌های چاپی برای ساخت قطعات الکترونیکی است. به طور سنتی، تولید قطعات الکترونیکی با استفاده از روش‌هایی نظیر فوتولیتوگرافی، انباشت در خلا و آب‌کاری بدون برق انجام می‌شود. الکترونیک چاپی در مقایسه با روش‌های سنتی تولید قطعات الکترونیکی از مزایای تولید در زمان کم‌تر (سریع‌تر)، وابستگی کم‌تر به تجهیزات تولید پیچیده و گران قیمت و با رد پای محیط زیستی کم‌تر برخوردار است (۵).

اگرچه دستیابی به روش‌های چاپی برای تولید سامانه‌های فوتوولتائیک می‌تواند به بخش زیادی از نیازها پاسخ دهد، اما همچنان این سوال مطرح است که آیا می‌توان انعطاف‌پذیری را نیز در سلول‌های فوتوولتائیک چاپی تامین نمود؟ این سوال از آن جهت اهمیت دارد که در بسیاری از کاربردها نظیر منسوجات هوشمند، هوافضا، خودروهای الکتریکی و یا هر جایی که نیاز به استفاده از سامانه‌های فوتوولتائیک بر روی سطوح انعطاف‌پذیر مطرح باشد، یا اینکه سطح قابل نصب سلول فوتوولتائیک محدود و نیاز به استفاده از بیشینه سطح در دسترس وجود داشته باید بتوان از سامانه‌های فوتوولتائیک چاپی و انعطاف‌پذیر استفاده کرد (۶-۱۰).

سلول‌های خورشیدی از سه بخش کلیدی، یعنی کاتد، لایه نورفعال<sup>۲</sup> و آند تشکیل شده‌اند. علاوه بر این، لایه انتقال الکترون (ETL) و لایه انتقال حفره (HTL) برای کاهش نوترکیبی بار در سلول‌های خورشیدی آلی (OSC) و سلول‌های خورشیدی پروسکایت (PSC) و الکترولیت‌ها برای انتقال بار و واکنش اکسایش-کاهش در سلول‌های خورشیدی حساس شده با مواد رنگزا (DSSC) مورد نیاز هستند. برای سلول‌های خورشیدی انعطاف‌پذیر، تمام لایه‌های کاربردی باید انعطاف‌پذیر باشند، به ویژه الکترودها، که به عنوان زیرآیند لایه‌های فعال نیز عمل می‌کنند. علاوه بر این، برهم‌کنش بین الکترودهای انعطاف‌پذیر و لایه‌های فعال از طریق پردازش در دمای پایین برای تغییر ریخت و ارتباط با همه لایه‌های موظف بسیار مهم است، بنابراین انعطاف‌پذیری بر عملکرد دستگاه‌های فوتوولتائیک تأثیر می‌گذارد (۱۲، ۱۱). با توجه به اینکه مواد و یا نانوذرات قابل استفاده در سلول‌های خورشیدی باید از ملزوماتی از قبیل شفافیت، انعطاف‌پذیری، رسانایی الکتریکی بالا، خواص فیزیکی-مکانیکی قابل قبول و ثبات جوی و شیمیایی مناسب برخوردار باشند نانوذرات کربنی به طور گسترده جهت تحقق انعطاف‌پذیری و عملکرد بالای سلول‌های خورشیدی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این عملکردهای بالا آن‌ها را مورد مناسبی در سلول‌های خورشیدی انعطاف‌پذیر برای استفاده به عنوان الکترودها، مواد انتقال بار یا لایه‌های نورفعال می‌کند (۱۴، ۱۳).

در این بررسی، به اهمیت تامین انرژی از منابع پایدار و پاک، با توجه به محدودیت‌های منابع فسیلی از جمله کمبود و اثرات مخرب زیست‌محیطی آنها پرداخته شده است. در ادامه انواع نانوساختارهای کربنی شامل فولرن‌ها، نانولوله‌های کربنی و گرافن معرفی شده و در ادامه، نقش و کاربرد آنها در سلول‌های خورشیدی انعطاف‌پذیر، به طور خاص سلول‌های خورشیدی حساس به رنگزا (DSSC)، سلول‌های خورشیدی آلی (OSC) و سلول‌های خورشیدی پروسکایت (PSC) مرور شده است. این بررسی با تاکید بر اثر نانوساختارهای ذکر شده بر بازده تبدیل توان، انعطاف‌پذیری و قابلیت تجاری‌سازی انواع سلول‌های خورشیدی صورت گرفته است. در آخر، به روش‌های پوششی از جمله پوشش‌دهی چرخشی و غوطه‌وری و همچنین روش‌های چاپی شامل چاپ تیغه‌ای<sup>۳</sup> و اسکرین جهت تهیه الکترودها در سلول‌های خورشیدی و مزایا و معایب هر روش پرداخته شده است.

## ۲- نانوساختارهای کربنی

نانوساختارهای کربنی دارای رسانایی بالا، شفافیت و انعطاف‌پذیری

<sup>2</sup> Photoactive

<sup>3</sup> Functional

<sup>4</sup> Doctor blade

<sup>1</sup> Environmental foot print

بود. از اینرو فولرن‌های اصلاح شده با گروه‌های عاملی خاص به کار گرفته شد تا بازده فوتولتایی بهبود یابد.  $C_{60}$  عامل‌دار با گروه‌های جانبی فنیل و متیل بوتیرات که  $PC_{61}BM$  نامیده می‌شود جهت بهبود حلالیت تهیه شد (۱۵). مشخص شد که  $PC_{71}BM$  نامتقارن در مقایسه با  $PC_{61}BM$  حلالیت و جذب نوری بیشتری در ناحیه مرئی دارد (۱۶، ۱۷). مشتقات  $C_{70}$  نیز در OSCs جهت بهبود بازده تبدیل استفاده شدند. همچنین تحقیقات گسترده‌ای در خصوص اصلاح گروه‌های عاملی  $PC_{61}BM$  مانند گروه آریل، طول زنجیر آلکیل و اصلاح گروه‌های عاملی انتهایی زنجیر با نگرش بهبود بازده تبدیل انجام شد. از طرفی ایزومرهای ساختاری  $PC_{61}BM$  جهت افزایش بازده تبدیل بهینه شدند (۱۸).

## ۲-۲- نانولوله‌های کربنی

نانولوله‌های کربنی نماینده نانومواد کربن تک بعدی هستند. از زمان کشف ایجیما در سال ۱۹۹۱ (۱۹)، نانولوله‌های کربنی باعث تحقیقات گسترده‌ای در علم و صنعت شده‌اند. نانولوله‌های کربنی را می‌توان به عنوان استوانه‌های توخالی در نظر گرفت که از پیچیدن صفحات گرافن تک یا چند لایه در جهات مختلف برداری تشکیل شده‌اند (شکل ۱). بسته به تعداد لایه‌ها ( $n$ )، نانولوله‌های کربنی را می‌توان به نانولوله‌های کربنی تک لایه (SWCNT) ( $n=1$ )، دو لایه (DWCNT) ( $n=2$ ) و چند لایه ( $n > 3$ ) (MWCNT) طبقه بندی کرد (۲۰).

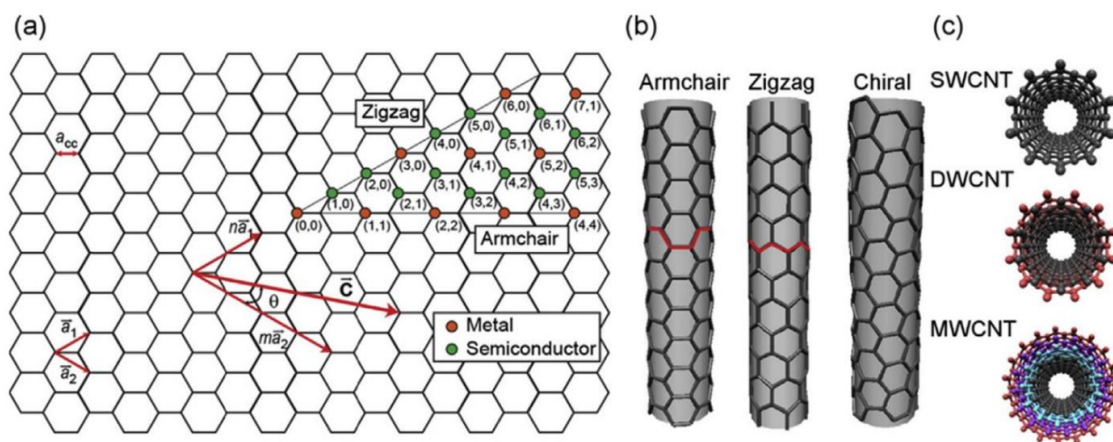
<sup>1</sup> Iijima

خوب، پایداری بالا و سطوح انرژی قابل تنظیم هستند که کاربرد آنها در سلول‌های خورشیدی انعطاف‌پذیر را تسهیل می‌کنند. در ادامه ساختار و خواص فولرن بدون بعد، نانولوله‌های کربنی تک بعدی و گرافن دو بعدی بیان شده است.

## ۲-۱- فولرن‌ها

فولرن‌ها در سال ۱۸۵۹ کشف شدند که از دگرشکل‌های خالص و پایدار کربن هستند (۱۳). فولرن‌های کروی شکل از ترکیب پنج‌ضلعی و شش‌ضلعی‌ها ساخته شده‌اند. فولرن معروف  $C_{60}$  متشکل از ۱۲ پنج‌ضلعی، ۲۰ شش‌ضلعی با ۶۰ پیوند ساده و ۳۰ پیوند دوگانه است و پایداری قابل توجهی در برابر دما، فشار و واکنش‌پذیری دارد (۱۴).  $C_{60}$  نسبتاً شفاف و رسانایی الکتریکی نسبتاً خوبی ( $10^{-10}$  S/cm) دارد. مهم‌تر از همه آن است که این دگرشکل زنجیرهای جانبی حجیم نداشته و می‌تواند به صورت فشرده روی هم قرار گرفته و انتقال بار بین مولکولی را تسهیل کند.

از ترکیبات شاخص در فولرن‌ها می‌توان  $C_{60}$  و  $C_{70}$  را نام برد که از خواص الکترون‌خواهی خوبی برخوردار بوده و در سلول‌های خورشیدی آلی می‌توانند به عنوان لایه‌های نورفعال گیرنده الکترون عمل کنند. از طرف دیگر می‌توانند به عنوان لایه‌های انتقال‌دهنده الکترون در PSCs نقش ایفا کنند، زیرا از سرعت انتقال بار بالایی در شرایط محیطی برخوردار بوده و سطوح انرژی مناسبی دارند. با این حال سلول‌های خورشیدی آلی اولیه مونتاژ شده با دو لایه پلیمر  $C_{60}$  بازده تبدیل کمی داشتند که به علت حلالیت و امتزاج‌پذیری ضعیف و از طرفی تعداد کم اربیتال‌های  $C_{60}$  LUMO



شکل ۱: (a) SWCNT لوله‌نشده که بردار کایرال  $\vec{C}$  را نشان می‌دهد و اینکه چگونه مقادیر مختلف اعداد صحیح  $n$  و  $m$  بر ویژگی الکتریکی SWCNT تأثیر می‌گذارد. (b) جهت بردار کایرال بر ظاهر نانولوله تأثیر می‌گذارد. نمونه‌هایی از نانولوله‌های کربنی، نشان داده شده است. (c) نانولوله‌های کربنی تک لایه (SWCNT)، نانولوله‌های کربنی دو لایه (DWCNT) و نانولوله‌های کربنی چند لایه (MWCNT) (۷).

**Figure 1:** (a) Unrolled SWCNT showing chiral vector  $\vec{C}$  and how different values of the integers  $n$  and  $m$  affect the electrical property of the SWCNT. (b) The direction of the chiral vector affects the appearance of the nanotube. Examples of CNTs are shown (c) single-walled CNT (SWCNT), double-walled CNT (DWCNT), and multi-walled CNT (MWCNT) (7).

گرافن همچنین دارای خواص نوری عالی با میزان عبور نور ۹۷/۷ درصد است که مستقل از طول موج بوده و از این رو می‌تواند جایگزین بسیار خوبی برای ITO به عنوان الکترود شفاف باشد (۳۰). علاوه بر این، گرافن خواص مکانیکی خوبی را با استحکام و مدول به ترتیب ۱۲۵ گیگا پاسکال و ۱۱۰۰ گیگا پاسکال نشان می‌دهد. گرافن همچنین یک ماده فوق سبک با چگالی سطحی  $0.77 \text{ mg/m}^2$  و سطح ویژه  $2630 \text{ m}^2/\text{g}$  است (۳۱). مانند نانولوله‌های کربنی، گرافن با رسانایی الکتریکی و شفافیت بالا به عنوان جایگزینی برای TCO در زمینه سلول‌های خورشیدی انعطاف پذیر در نظر گرفته می‌شود. گرافن همچنین برای استفاده در فوتوآند<sup>۲</sup> DSSCها برای بهبود انتقال الکترون و به عنوان گیرنده الکترون برای جایگزینی فولرن در OSCها گزارش شده است. علاوه بر این، گرافن می‌تواند جایگزین کاتالیزور فلز نجیب به عنوان الکترود کمکی DSSC استفاده شود (۳۴).

### ۳- سلول‌های خورشیدی انعطاف پذیر

سلول‌های خورشیدی، دسته‌های بسیار متنوعی هستند که هریک ویژگی‌های منحصر به فردی دارند. در این بخش ابتدا خانواده‌های مختلف سلول‌های خورشیدی به اختصار معرفی می‌شوند و در ادامه به نقش نانوساختارهای کربنی در هریک از آنها پرداخته خواهد شد. نظر به این که تعریف مشخص و فراگیری برای انعطاف‌پذیری در حوزه الکترونیک ارائه نشده، در اینجا سعی شده است برای مقایسه در مورد ویژگی‌های مکانیکی دستگاه‌های الکترونیکی انعطاف پذیر، تعریفی در مورد انعطاف‌پذیری ارائه شود. به طور کلی، دستگاه‌های الکترونیکی انعطاف پذیر عمدتاً بر روی زیرآیندهای انعطاف پذیر مانند پلیمرها ساخته می‌شوند و معمولاً خم‌شونده، چرخش پذیر یا حتی قابل کشش هستند که بیشتر برای ارزیابی انعطاف‌پذیری، شاخص شعاع انحنا مدنظر قرار می‌گیرد.

<sup>1</sup> Novoselov

<sup>2</sup> Photo anode

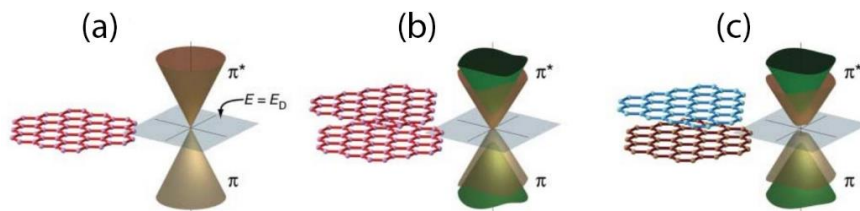
معمولاً نانولوله‌ها دارای قطر ۰/۷ تا ۲۰ نانومتر و طول آنها از چند صد نانومتر تا چند سانتی متر متغیر است. برای کاربردهای سلول خورشیدی، بسیاری از خواص مهم نانولوله‌های کربنی به خوبی مورد مطالعه قرار گرفته است. نانولوله‌های کربنی تک‌لایه دارای جنبش ذاتی بالایی بیش از  $10^5 \text{ (cm}^2/\text{V.s)}$  در دمای اتاق و رسانایی الکتریکی بالا تا  $10^6 \text{ S/cm}$  است (۲۳-۲۱) که برای الکترود مهم است. مدول یانگ، استحکام کششی و ازدیاد طول در هنگام شکستن نانولوله‌های کربنی می‌تواند به ترتیب به  $1 \text{ Tpa}$ ،  $10-100 \text{ Gpa}$  و  $12-6$  درصد برسد (۲۴). علاوه بر این، ساختار لوله‌ای توخالی باعث می‌شود تا نانولوله‌های کربنی از مساحت سطح ویژه بالا معمولاً حدود  $\text{m}^2/\text{g}$   $1600$  و چگالی کم برخوردار باشند. همچنین رسانایی حرارتی عالی تا  $3500 \text{ }^\circ\text{C}$  دارند (۲۶). این ویژگی‌های عالی کاربرد آنها را در سلول‌های خورشیدی به عنوان الکترودهای جلویی شفاف در OSCها و PSCها و الکترودهای کمکی در DSSCها، میسر می‌کند. نانولوله‌های کربنی همچنین می‌توانند به عنوان مواد انتقال الکترون در DSSCها و مواد انتقال حفره در PSCها به دلیل تحرک بالا و مناسب استفاده شوند.

### ۳-۲- گرافن

نانو ساختار کربنی دو بعدی است که توسط نووسلوف<sup>۱</sup> و همکارانش با روش لایه برداری میکرومکانیکی در سال ۲۰۰۴ کشف شد (۲۷). در صفحات گرافن اتم‌های کربن دارای هیبریداسیون  $sp^2$  هستند که با ساختاری مشابه لانه زنبور به یکدیگر متصل شده‌اند.

در ساختار معمولی گرافن، هر اتم کربن با پیوند  $\sigma$  به سه اتم کربن مجاور متصل می‌شود و الکترون‌های مدار  $p$  تمام اتم‌های کربن در کنار هم قرار می‌گیرند تا یک پیوند  $\pi$  مزدوج غیرمستقر ایجاد کنند. ضخامت گرافن  $0.335$  نانومتر است (۲۸) و می‌توان آن را به صورت تک لایه، دو لایه و یا فیلم‌های ضخیم‌تر تهیه و بررسی کرد (شکل ۲).

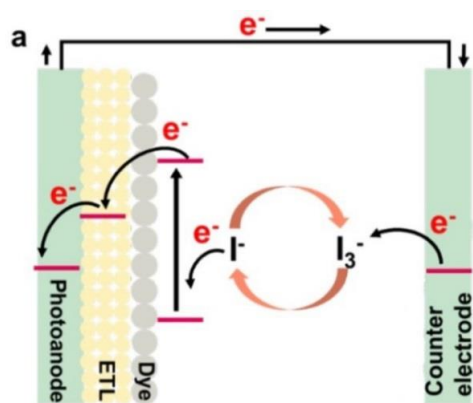
خواص فوق العاده گرافن باعث شده تا از آن در تهیه سلول‌های خورشیدی انعطاف پذیر استفاده شود. گزارش شده است که گرافن بکر دارای جنبش ذاتی الکترون  $2 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{V.s}$  در دمای اتاق، رسانایی الکتریکی  $10^4 \text{ S/cm}$  و رسانایی حرارتی  $5000 \text{ W/(m.K)}$  در دمای اتاق است که بیشتر از SWCNTها ( $3500 \text{ W/(m.K)}$ ) بوده و ۱۲ برابر مس ( $400 \text{ W/(m.K)}$ ) است.



شکل ۲: ساختارهای الکترونیکی گرافن به صورت تک لایه، متقارن دو لایه و نامتقارن دو لایه (۷).

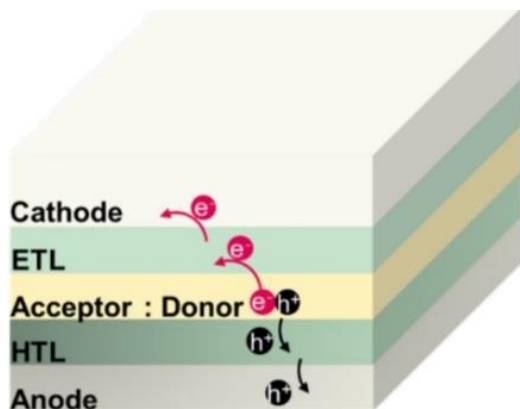
Figure 2: Electronic structures of graphene in single, symmetrically double and unsymmetrically double layer forms (7).

تا به ترتیب اختلاف پتانسیل و جریان الکتریکی بین آند و کاتد برقرار شود (۴۱). با این حال، OSCها معمولاً بازده تبدیل توان نسبتاً پایینی را نشان می‌دهند. به همین دلیل، با ظهور PSCها که بازده تبدیل بسیار بالاتری را تا ۲۲/۱ درصد نشان می‌دهند (۴۲) و همچنین کاملاً حالت جامد دارند (۴۳، ۴۴). توجه بسیاری از پژوهشگران را در سال‌های اخیر به خود جلب نموده‌اند. پروسکاپت به دسته‌ای از ترکیبات با ساختار شیمیایی کلی  $ABX_3$  اطلاق می‌شود که در آن A کاتیون‌های با بار الکتریکی +۱ (نظیر متیل آمونیوم  $(CH_3NH_3^+)$  و فرامایدینوم  $(CH_2(NH_2)_2^+)$ ،  $(Cs^+$ ،  $Rb^+)$ ، B کاتیون‌های فلزی  $(Sn^{2+}$ ،  $Pb^{2+})$  و X آنیون‌های هالیدی  $(Br^-$  و  $Cl^-)$  هستند. همان‌طور که مشخص است، کاتیون‌ها و آنیون‌های مختلفی می‌توانند در ساختار PSCها قرار گیرند که تنوع زیادی را در ساختار این دسته از مواد ایجاد می‌کند. لذا با تغییراتی در ساختار پروسکاپت می‌توان گاف نوار آنها را کنترل نمود که همین امر در کنار انعطاف‌پذیری پروسکاپت‌ها، آنها را به گزینه‌ای جذاب برای استفاده در سلول‌های خورشیدی انعطاف‌پذیر تبدیل کرده است.



شکل ۳: طرحواره ساختار دستگاه و سازوکار DSSC (۳۹).

Figure 3: Schematic of DSSC device structure and mechanism (39).



شکل ۴: طرحواره ساختار دستگاه و سازوکار OSC (۳۹).

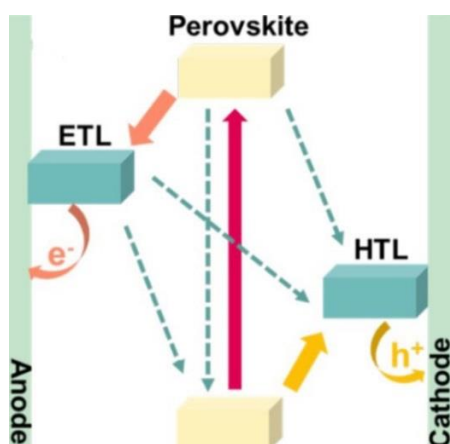
Figure 1: Schematic of OSC device structure and mechanism (39).

بر اساس گزارش‌های موجود، دستگاه‌های الکترونیکی که ۸۰ درصد خواص اولیه را تحت خمش با شعاع انحنای ۱۰ سانتی‌متر تا ۱ میلی‌متر حفظ می‌کنند، می‌توانند انعطاف‌پذیر در نظر گرفته شوند. دستگاه‌های فوتوولتائیک انعطاف‌پذیر عمدتاً شامل DSSCها، OSCها و PSCها هستند که در ادامه مورد بحث قرار خواهند گرفت. از زمان معرفی DSSCها در سال ۱۹۹۱ که توسط گراتزل<sup>۱</sup> و همکارانش صورت گرفت (۳۲) تحقیقات زیادی برای کاهش هزینه، تسهیل فرایند ساخت و فراهم کردن امکان کار در شرایط مختلف نور محیطی انجام شده است (۳۳-۳۶). همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، DSSCها معمولاً از فوتوآند (نیمه رسانای دی اکسید تیتانیم، اکسید روی و یا اکسید قلع)، ماده‌ی رنگزای فعال نوری (به عنوان مثال ماده تجاری N719 که ترکیبی آلی-فلزی از روتنیم است)، الکترولیت حاوی جفت اکسایش-کاهش  $I_3^-/I^-$  یا  $Co^{2+}/Co^{3+}$  و الکتروکاتد (به عنوان مثال پلاتین و مواد کربنی) تشکیل شده‌اند (۳۷). نور مرئی توسط مولکول‌های ماده رنگزا جذب شده و موجب برانگیخته‌شدن الکترون‌های آن می‌شود. الکترون‌های برانگیخته‌شده، به نوار رسانش ساختار نیمه‌رسانا در فوتوآند منتقل شده و از طریق مدار خارجی به سمت فوتوکاتد جریان پیدا می‌کنند. سپس الکترون‌های مدار خارجی از طریق الکتروکاتد به الکترولیت اکسایش-کاهش بازگردانده می‌شوند. مولکول‌های رنگزا با گرفتن الکترون از الکترولیت اکسایش-کاهش برای تکمیل چرخه تبدیل انرژی احیا می‌شوند. به این ترتیب مدار تکمیل گردیده و فرایند تبدیل انرژی نور خورشید به الکتریسیته ادامه می‌یابد. در DSSCهایی که از الکترولیت‌های مایع در ساختارشان استفاده می‌شود، ساخت دستگاه‌های انعطاف‌پذیر به دلیل مشکل در آب بندی آنها سخت‌تر است (۳۸).

به همین دلیل، OSCها که تمام اجزاء آنها جامد است برای ساخت سلول‌های خورشیدی انعطاف‌پذیر بیشتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند (۴۰). ساختار کلی OSCها (شکل ۴) شامل یک لایه فعال متشکل از یک دهنده نوع p و یک گیرنده نوع n مانند پلی (۳-هگزیل تیوفن): فنیل- $C_{61}$ -بوتیریک اسید متیل استر (P3HT:PC<sub>61</sub>BM) است که بین کاتد و آند ساندویچ شده است. همچنین دو لایه انتقال بار، یعنی ETL به عنوان مثال  $(ZnO$  و  $TiO_2)$  بین کاتد و لایه فعال و HTL به عنوان مثال پلی (۳،۴ اتیلن دی اکسی تیوفن) پلی استایرن سولفونات (PEDOT:PSS) بین آند و لایه فعال قرار گرفته‌اند. در طی تحریک نوری، جفت‌های الکترون-حفره که به عنوان اکسیژن‌آنیون شناخته می‌شوند، در جز الکترون‌دهنده لایه فعال تولید می‌شوند و سپس به سطح مشترک بین دهنده و گیرنده الکترون منتقل می‌شوند. الکترون‌ها و حفره‌ها از طریق ETL و HTL به کاتد و آند منتقل شده

1 Grätzel  
2 Exciton

Band gap



شکل ۵: طرحواره ساختار دستگاه و ساز و کار PSC (۳۹).

Figure 5: Schematic of PSC device structure and mechanism (41).

با این حال، این زیرآیندها به اندازه کافی انعطاف‌پذیر نبودند. علاوه بر این، این ساختارها وزن قابل توجهی داشته و این درحالی است که مزیت امیدوارکننده سلول‌های خورشیدی انعطاف‌پذیر، در وزن کم آنها نهفته است. از این رو از الکترودهای مستقل بر پایه سیم‌های فلزی در تهیه سلول‌های خورشیدی انعطاف‌پذیر لیفی شکل استفاده شد. طراحی لیف نازک فوتوولتایی جهت کاهش وزن الکترودهای گامی در راستای ارائه محصولات الکترونیکی قابل پوشش و حمل بود. معمولاً دو رشته سیم فلزی که بین آنها مواد فعال وجود دارد به دور یکدیگر پیچیده می‌شوند تا تشکیل سلول خورشیدی لیف‌مانند دهند. با این وجود بازده فوتوولتایی به علت تماس موثر کمتر بین دو سیم کاهش می‌یابد. از نانوساختارهای کربنی مانند گرافن و نانولوله می‌توان جهت ساخت الکترودهای لیفی و لایه‌ای در سلول‌های خورشیدی لیفی شکل استفاده کرد که قابلیت خمش و پیچ‌خوردن را دارند. همچنین می‌توانند داخل منسوجات بافته شوند (۵۳).

### ۳-۱- سلول‌های خورشیدی انعطاف‌پذیر بر پایه نانوساختارهای کربنی

#### ۳-۱-۱- سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ از انعطاف‌پذیر بر پایه نانوساختارهای کربنی

DSSC‌های انعطاف‌پذیر به خصوص انواع فیبری شکل بانانولوله‌های کربنی ساخته می‌شوند که معمولاً به عنوان جایگزینی برای الکترودهای کاتد پلاتین استفاده می‌شوند و کاهش یون‌های موجود در الکترولیت جهت انتقال الکترون را تسریع می‌کنند (۵۴).

پان<sup>۲</sup> و همکارانش کشف کردند که الیاف نانولوله‌های کربنی تراز شده دارای فعالیت کاتالیزوری بهتری برای زوج اکسایش-کاهش تیولات/دی سولفید نسبت به الکترودهای کمکی پلاتین است.

PSC‌ها با ساندویچ کردن لایه پروسکایت نورفعال بین دو لایه انتقال بار (شکل ۵) ساخته می‌شوند که دو دسته از ساختارها یعنی اتصال n-i-p برای ETL/پروسکایت/HTL و اتصال p-i-n برای HTL/پروسکایت/ETL را اتخاذ می‌کنند (۴۵). در PSC‌ها، پس از جذب فوتون‌ها، الکترون‌ها از لایه ظرفیت پروسکایت به نوار رسانایی برانگیخته می‌شوند (۴۶) و تشکیل زوج الکترون-حفره می‌دهند. الکترون‌ها و حفره‌ها نیز از طریق ETL و HTL منتقل می‌شوند و به ترتیب در آند و کاتد جمع‌آوری می‌شوند.

گام اول جهت ساخت سلول‌های خورشیدی انعطاف‌پذیر تهیه الکترودهای جلویی<sup>۱</sup> انعطاف‌پذیر است که مواد فعال بر روی آن قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر، باید الکترودهای جلویی سخت معمولی، با الکترودهای انعطاف‌پذیر جایگزین شود. البته الکترودهای جلویی انعطاف‌پذیر باید برای انتقال نور خورشید شفاف باشد. باید توجه داشت که اگر الکترودهای پشتی نیز شفاف باشد، می‌توان یک سلول خورشیدی انعطاف‌پذیر نیمه‌شفاف به دست آورد. برای به دست آوردن هم‌زمان شفافیت نوری و رسانایی الکتریکی، اکسیدهای رسانای شفاف (TCO) به طور گسترده‌ای به دلیل مقاومت صفحه‌ای پایین همراه با شفافیت بالا مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۴۷، ۴۱). به عنوان مثال اکسید قلع دوپ شده با ایندیم (ITO) دارای رسانایی الکتریکی ۱۰-۳۰ Ω/sq و شفافیت بیش از ۹۰ درصد است.

زیرآیندهای پلیمری اصلاح شده با TCO به طور گسترده به عنوان الکترودهای جلویی انعطاف‌پذیر مانند پلی اتیلن ترفتالات (۴۴) ITO/PET و پلی اتیلن نفتالات (۴۸) ITO/PEN استفاده شده‌اند. با این حال، TCO از سختی، شکنندگی و چگالی ذاتی بالا برخوردار است که انعطاف‌پذیری محدودی را حتی روی فیلم‌های پلیمری نشان می‌دهد. نانو ساختارهای کربنی به دلیل رسانایی بالا، شفافیت خوب، پایداری و انعطاف‌پذیری بالا می‌توانند جایگزین TCO شوند (۴۹) که در بخش‌های بعدی مورد بحث قرار می‌گیرند.

زیرآیندهای پلیمری برای ساخت سلول‌های خورشیدی که در دمای بالا فراینددهی می‌شوند (جهت دستیابی به بازده تبدیل نامطلوب هستند. به عنوان مثال، برای رسیدن به بازده تبدیل‌های بیشتر در DSSC‌ها به فاز بلوری TiO<sub>2</sub> یا اتصال بین نانوذرات TiO<sub>2</sub> نیاز است که این پدیده‌ها در دمای ۴۵۰-۵۵۰ درجه سانتی‌گراد اتفاق می‌افتند (۵۱، ۵۰). به طور مشابه، TiO<sub>2</sub> فراوری شده در دمای بالا برای PSC‌ها با کارایی بالا مورد نیاز است (۵۲). برای استفاده بهتر از بسترهای پلیمری، TiO<sub>2</sub> فراوری شده در دمای پایین و سایر مواد جایگزین از جمله PC<sub>61</sub>BM و ZnO توسعه یافته‌اند اما موانع جدیدی را ایجاد می‌کنند. برای این منظور، از بسترهای فلزی مستقل به عنوان مثال، فویل تیتانیم استفاده شد.

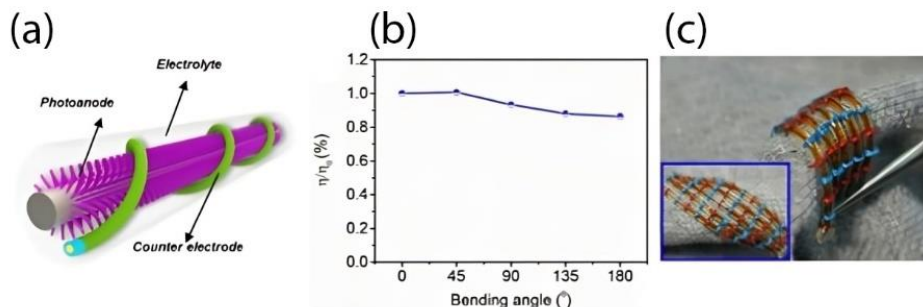
<sup>2</sup> Pan

<sup>1</sup> Front electrode

سطوح آبگریز و آب دوست در دو طرف آن واقع شده بودند. سپس فیبر نانولوله‌های کربنی هسته-پوسته اصلاح‌شده با پلاتین به دور سیم  $Ti/TiO_2$  جذب‌شده با رنگزا پیچیده شد و در ادامه الکترولیت اکسایش-کاهش جهت ساخت DSSC تزریق شد (شکل a). بازده تبدیل سلول طراحی شده با افزایش زاویه خمش از ۰ تا ۱۸۰ درجه کاهش چندانی نشان نداد (شکل b) و از طرفی امکان استفاده از DSSC‌های فیبری شکل در منسوجات الکترونیکی با انعطاف‌پذیری بالا را به راحتی میسر ساخت (شکل c). علاوه بر این، DSSC‌های فیبری شکل انعطاف‌پذیر با خاصیت کشسانی قابل‌ملاحظه نیز تهیه شده‌اند (۵۸). DSSC‌های فیبری شکل حاصل، بازده تبدیل  $7/13$  درصد را نشان دادند که می‌توانست به خوبی تحت کشش نیز حفظ شود. DSSC‌های انعطاف‌پذیر با استفاده از نانولوله‌های کربنی در فوتونان گزارش شده است. شکنندگی مواد  $TiO_2$  نیز یکی از موانعی است که در ساخت دستگاه‌های انعطاف‌پذیر وجود دارد. از این رو چن<sup>۳</sup> و همکارانش DSSC انعطاف‌پذیر با نانولوله‌های کربنی فیبری شکل به عنوان فوتونان و به دنبال آن جذب رنگ N719 روی بستر قابل انعطاف PEN/ITO گزارش نمودند (۵۹). جالب اینجاست که بازده تبدیل‌های DSSC‌های انعطاف‌پذیر هنگام خم شدن به بالا یا پایین اندکی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، یک فوتونان انعطاف‌پذیر شامل ذرات  $TiO_2$  و SWCNT‌های فلزی یا نیمه‌هادی بر روی PET/ITO تهیه شد (۶۰). در مقایسه با SWCNT‌های نیمه‌هادی، SWCNT‌های فلزی به دلیل انتقال الکترون کارآمدتر، بازده تبدیل بیشتری را ارائه می‌دهند. علاوه بر این، شبکه مکانیکی بین ذرات  $TiO_2$  ساخته‌شده توسط SWCNT‌های فلزی به طور موثر انعطاف‌پذیری و دوام را تنها با کاهش اندکی در بازده تبدیل زمانی که کل سلول کمتر از شعاع ۵ میلی‌متر خم می‌شود، ارائه می‌دهد.

DSSC‌های فیبر شکل انعطاف‌پذیر بر پایه الیاف نانولوله‌های کربنی به حداکثر بازده تبدیل  $7/33$  درصد دست یافتند در حالی که تنها حداکثر بازده  $2/06$  درصد با استفاده از الکتروود کمی پلاتین به دست آمد. DSSC‌های انعطاف‌پذیر بر پایه الکترولیت اکسایش-کاهش  $I^-/I_3^-$  نیز با استفاده از نانولوله‌های کربنی توسعه یافته‌اند. با این وجود، نانولوله‌های کربنی دست‌نخورده عملکرد کاتالیزوری پایین‌تری نسبت به پلاتین برای کاهش  $I_3^-$  در DSSC‌ها ارائه می‌دهند. هیبرید شدن یا ترکیب با سایر مواد فعال راه حل‌های موثری هستند. الیاف هیبریدی نانولوله‌های کربنی با نانوذرات CoSe به روش هیدروترمال تهیه شدند (۵۵). رسوب مواد فعال بر روی الیاف نانولوله‌های کربنی می‌تواند قسمت‌های کاتالیزوری جدید ایجاد کند و فعالیت الکتروکاتالیزوری الکتروود کمی در DSSC‌های فیبری شکل را به شدت افزایش دهد. بنابراین، بازده تبدیل  $6/24$  درصد برای الیاف اصلاح‌شده، بالاتر از  $3/4$  و  $5/6$  درصد برای الیاف نانولوله‌های کربنی بکر و سیم‌های پلاتین به ترتیب به دست آمد. جیانگ<sup>۱</sup> و همکارانش الیاف نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده با پلاتین را از طریق روش رسوب الکتروشیمیایی آماده کردند. DSSC فیبری شکل با فیبر مرکب به عنوان الکتروود کمی با بازده تبدیل بسیار بالاتر از  $8/10$  درصد در مقایسه با فیبر نانولوله‌های کربنی تنها ( $4/91$  درصد) به دست آورد. اصلاح سطح نیز یک رویکرد موثر برای بهبود فعالیت کاتالیزوری است. الیاف نانولوله‌های کربنی بکر آبگریز با استفاده از پلاسمای مایکروویو با اتمسفر اکسیژن اصلاح شدند تا با ایجاد نقاط فعال و گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن بر روی سطح، خواص آب دوستی را تا حد زیادی افزایش دهند (۵۶). پردازش پلاسمای می‌تواند فعالیت کاتالیزوری نانولوله‌های کربنی را بهبود بخشد و به رسوب نانوذرات پلاتین کمک کند. فو<sup>۲</sup> و همکارانش رکورد بازده تبدیل  $10$  درصد را در سلول‌های خورشیدی فیبری شکل با عملکرد بهتر را ثبت کردند (۵۷). در پژوهش مذکور فیبر هسته-پوسته نانولوله‌های کربنی با پیچاندن نامتقارن ورق‌های نانولوله‌های کربنی منظم طراحی شد که

<sup>1</sup> Jiang  
<sup>2</sup> Fu  
<sup>3</sup> Chen



شکل ۶: (a) طرحواره DSC‌های فیبر شکل انعطاف‌پذیر بر اساس الیاف مرکب نانولوله‌های کربنی، (b) وابستگی PCE به زاویه خمش و (c) منسوجات فوتولتائیک بر اساس DSC‌های فیبر شکل (۷).

**Figure 6:** (a) Schematic illustration to the flexible fiber-shaped DSCs based on CNT composite fibers, (b) The dependence of PCE on bending angle, and (c) Photovoltaic textile based on the fiber-shaped DSCs (7).

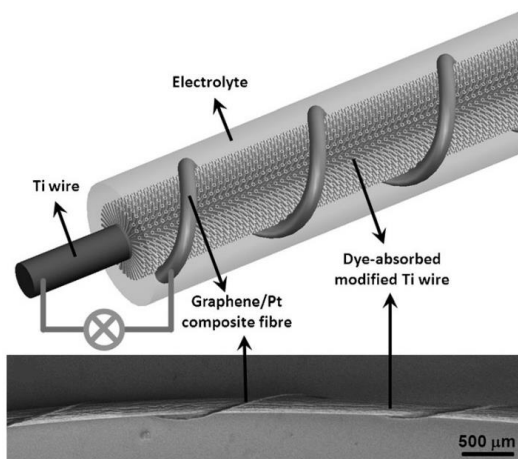


۰/۸۵) درصد وزنی گرافن سه بعدی به اضافه نانوذرات  $\text{TiO}_2$  به بازده تبدیل ۶/۴۱ درصد رسید که در مقایسه با نمونه‌هایی که در ساخت فوتوآند آنها تنها از  $\text{TiO}_2$  استفاده شده بود بیشتر است (۶۲).

### ۳-۱-۲- سلول‌های خورشیدی آلی انعطاف پذیر مبتنی بر نانوساختارهای کربنی

SWCNTهای نیمه رسانا نیز به عنوان گیرنده الکترون برای جایگزینی فولرن در OSCها (۶۳) با هدف سنتز راحت و جذب نوری و پایداری بهتر توسعه یافتند. با این حال، دستگاه به دست آمده بازده تبدیل بسیار پایینی را نشان داد که به دلیل باز ترکیبی شدید حامل بار بود. اخیراً OSC فیبری شکل انعطاف پذیر نیز با  $\text{PC}_{61}\text{BM}$  به عنوان گیرنده الکترون و فیبر نانولوله‌های کربنی به عنوان الکتروود کمکی، انعطاف پذیری خوبی از خود نشان داده است به نحوی که ۸۵ درصد بازده تبدیل اولیه خود را پس از ۱۰۰۰ سیکل خمش حفظ کرد. (۶۴). اغلب این OSCهای فیبری شکل را می‌توان در منسوجات بدون ریسک کاهش انعطاف پذیری کالای بافته شده، استفاده کرد. علاوه بر این، OSC فیبری شکل قابل کشش با سیم پیچی صفحه نانولوله‌های کربنی منظم روی یک الکتروود فتر مانند با موفقیت ساخته شد (۶۵). این دسته از الیاف OSC بازده تبدیل قابل قبولی را نشان دادند که پس از ۱۰۰۰ سیکل خمش و یا تحت کشش با میزان افزایش طول تا ۳۰ درصد، تنها کمتر از ۱۰ درصد از بازده تبدیل اولیه خود را از دست دادند. OSCهای انعطاف پذیر را می‌توان با استفاده از گرافن نیز به دست آورد. OSCهای انعطاف پذیر مبتنی بر آند و کاتد گرافن با بازده‌های تبدیل به ترتیب ۶/۱ و ۷/۱ درصد گزارش شده‌اند (۶۶).

بازده تبدیل‌های بالا از طریق عملیات حرارتی لایه مسدودکننده الکترون  $\text{MoO}_3$  برای آند گرافن یا رسوب مستقیم لایه  $\text{ZnO}$  روی کاتد گرافن به دست آمد.



شکل ۷: الکتروود کمکی DSSC فیبر شکل اصلاح شده با پلاتین (۷).

Figure 7: Pt-modified fiber-shaped DSSC counter electrode (7).

از دست دادن کارایی در درجه اول از ترک خوردگی لایه ITO ناشی می‌شود. سپس یک دستگاه قوی بر پایه یک فویل تیتانیم با استفاده از فوتوآند SWCNT/ $\text{TiO}_2$  فلزی برای دستیابی به انعطاف پذیری بهتر آماده شد و هیچ کاهش در بازده تبدیل حتی پس از ۱۰۰۰ چرخه خمشی رخ نداد که انعطاف پذیری و دوام بالایی را نشان می‌دهد. علاوه بر این، DSSCهای فیبر شکل نیز با استفاده از فیبر نانولوله‌های کربنی به عنوان الکتروود کمکی و فوتوآند گزارش شدند، بنابراین انعطاف پذیری و پایداری عالی را از خود نشان دادند. در DSSCهای انعطاف پذیر، گرافن نیز عمدتاً برای جایگزینی الکتروود کمکی پلاتین سنتی استفاده می‌شود. یک پارچه پنبه‌ای پوشش داده شده با گرافن بسیار رسانا (HC-GCF) با مقاومت سطحی تنها  $7 \Omega/\text{sq}$  به عنوان یک الکتروود کمکی کارآمد در DSSCها استفاده شد (۶۱). این عمل باعث بهبود فعالیت الکتروکاتالیزوری جهت احیای  $\text{I}^-$  و تغییر جزئی مقاومت در زوایای خمشی مختلف شد. علاوه بر این، مقاومت قابل توجهی نسبت به محلول الکتروولیت و آب نشان داد. بازده تبدیل بالای ۶/۹۳ درصد با HC-GCF به عنوان الکتروود کمکی و الکتروولیت پلیمری به دست آمد. در واقع، گرافن بکر ممکن است توانایی کاتالیزوری محدودی برای واکنش احیا داشته باشد زیرا فعالیت الکتروکاتالیستی آن معمولاً به عیوب و موقعیت‌های لبه مربوط می‌شود. بنابراین، برخی از تغییرات ساختاری اغلب برای گرافن مورد نیاز است. روش‌های گزارش شده در مقالات عمدتاً شامل دوپ هترواتم و ترکیب با سولفیدهای فلزی و پلیمرهای رسانا است. به عنوان مثال، DSSCهای انعطاف پذیر بر پایه کامپوزیت‌های نانو گرافن /  $\text{TiC}$  / PEDOT:PSS به عنوان الکتروود کمکی بر روی زیرآیند پلاستیکی به روش اسپری گزارش شده است. این دستگاه به بازده تبدیل ۴/۵ درصد دست یافت که کمی بیشتر از دستگاه مشابه با استفاده از الکتروود کاتد پلاتین (بازده تبدیل ۴/۳ درصد) بود (۶۲). DSSCهای انعطاف پذیر نیز بر اساس گرافن به شکل فیبر ساخته شدند. در اینجا، گرافن به صورت یک فیبر چرخانده شد که چگالی  $0.61 \text{ g/cm}^3$ ، قدرت  $10^2 \text{ mpa}$  تا  $10^2$  و رسانایی الکتریکی  $10^2 \text{ S/cm}$  تا  $10^3$  را نشان داد. سپس با نانوذرات پلاتین اصلاح شد تا به عنوان الکتروود کمکی DSSCهای فیبر شکل انعطاف پذیر عمل کند (شکل ۷) استحکام مکانیکی خوب، هدایت الکتریکی و فعالیت کاتالیزوری الیاف کامپوزیت گرافن منجر به حداکثر بازده تبدیل تایید شده ۸/۴۵ درصد برای DSSC های فیبر شکل در سال ۲۰۱۳ شد. علاوه بر این، گرافن را می‌توان به فوتوآند DSSCها نیز اضافه کرد و انتقال الکترون را تسهیل کرد. هوانگ<sup>۱</sup> و همکارانش یک DSSC بسیار منعطف در دمای اتاق، با استفاده از فیلم نانوبلورینه‌ی  $(\text{TiO}_2 \text{ 3DGT})$  سه بعدی (3D) با گرافن به عنوان فوتوآند بر روی بستر پلاستیکی ساختند. با توجه به افزایش انتقال بار و افزایش سطح تماس با استفاده از گرافن رسانای سه بعدی، DSSC های انعطاف پذیر 3DGT با ضخامت ۱۳ میکرومتر

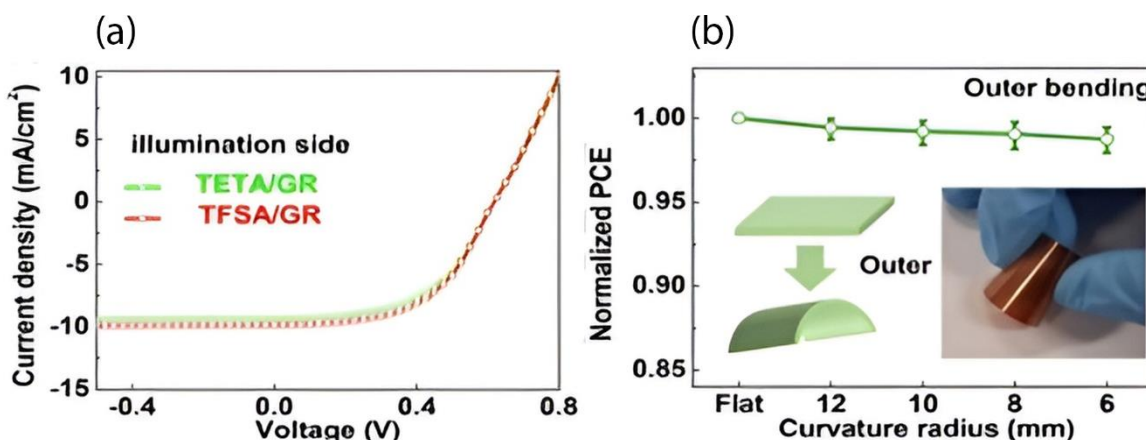
<sup>1</sup> Huang

نسبت داده شود که می‌تواند منجر به کاهش چگالی جریان اتصال کوتاه (JSC) و ضریب پر شدن (FF) شود (۶۸). برای دستیابی به بازده تبدیل بالاتر، ساختار جدیدتر / ساختار جدیدتر PET/Ag-mesh/PH1000/PEDOT:PSS/ perovskite/ PC61BM/Al برای PSC‌های انعطاف‌پذیر پیشنهاد شد که بازده تبدیل آن ۱۴/۲ درصد بود. PCE تهیه شده حتی در شعاع خمشی ۲ میلی‌متر تقریباً هیچ کاهش در بازده تبدیل نشان نداد و ۹۸/۱ درصد از مقدار اولیه را حفظ کرد (شکل ۹). بازده تبدیل و خواص مکانیکی PSC‌های انعطاف‌پذیر را می‌توان با بهینه‌سازی مورفولوژی فیلم و ترکیب PC<sub>61</sub>BM بهبود داد. به عنوان مثال با وارد کردن poly([N,N]bis(2-octyldodecyl)-1,4,5,8-naphthalene bis(dicarboximide)-2,6-diyl)-alt-5,5,0-(2,2,0-bithiophene)) یا به عبارتی (PNDI-2T) در ساختار PC<sub>61</sub>BM نه تنها خواص الکتریکی بلکه پایداری مکانیکی نیز در مقایسه با PC<sub>61</sub>BM خالص افزایش یافت (۶۹). در واقع این نتایج از پراکنش حوزه‌های PC<sub>61</sub>BM در کلاف توده پلیمری PNDI-2T حاصل می‌شود که امکان عبور الکترون‌ها بین حوزه‌ها و رهایش تنش مکانیکی حوزه‌های PNDI-2T را میسر می‌کند. یکی دیگر از موادی که به روش محلول در دمای پایین فراوری شده است مواد کوچک مولکولی بر پایه آرن‌های ستونی به نام C3 هستند که بین PC<sub>61</sub>BM و الکتروود وارد شده تا به عنوان یک بافر تک لایه عمل کند (۷۰). وارد کردن C3 سطح تماس را افزایش داده و مقاومت‌های سطح مشترک بین PC<sub>61</sub>BM و الکتروود را کاهش می‌دهد. همچنین مشخص شد که لایه C3 بلوکه شده می‌تواند کیفیت سطح PC<sub>61</sub>BM را بهبود بخشد و شکل صاف، متراکم و با نقص سطحی کمتری ایجاد کند. بنابراین سلول خورشیدی بر پایه زیرآیند PEN/ITO و با بازده تبدیل ۱۳/۲۷ درصد می‌توان بدست آورد. روش دیگر جهت بهبود بازده تبدیل، وارد کردن یک ماده انتقال‌دهنده الکترون دیگر برای تشکیل لایه دوگانه ETL با PC<sub>61</sub>BM است.

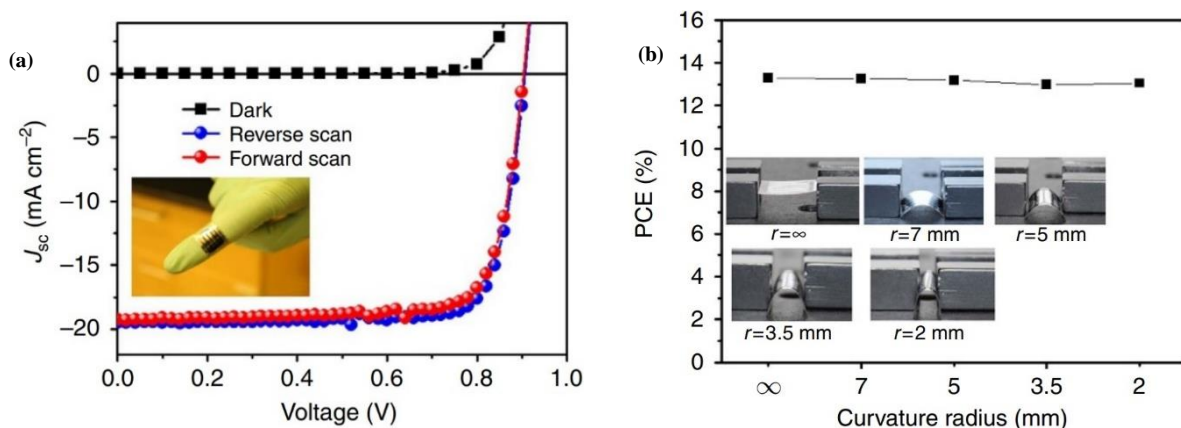
گرافن همچنین به عنوان آند و کاتد برای ساخت OSC‌های انعطاف‌پذیر و نیمه‌شفاف از طریق روش انتقال خشک در دمای اتاق استفاده شد (۶۷). با ترکیب الکتروودهای شفاف و ترکیبات آلی حساس نوری شفافیت تا ۶۱ درصد در بازه طیف مرئی و بازده تبدیل ۲/۸-۴/۱ درصد به دست آمد. مواد آلی مصرفی جذب قوی در ناحیه فرابنفش و نزدیک به فرورسرخ داشتند. OSC‌های نیمه شفاف و انعطاف‌پذیر دیگری نیز از لایه‌های گرافن دوپ شده (الکتروودهای شفاف و آند/کاتد)، (ETL) ZnO، P3HT:PCBM (لایه نورفعال) و PEDOT:PSS (HTL) ساخته شدند. برای آند و کاتد شفاف، گرافن به ترتیب (تری فلورومتان سولفونیل آمید) (TFSA) و تری اتیلن تترامین (TETA) دوپ شد. بازده تبدیل ۳/۱۲ درصد حاصل شد (شکل ۸ a) که با قرارگیری آینه بازتابنده آلومینیمی در پشت سلول به ۴/۲۳ درصد افزایش یافت. همچنین با توجه به آزمون‌های خمش در شعاع‌های انحنا مختلف، انعطاف‌پذیری مکانیکی بالایی به دست آمد (شکل ۸ b).

### ۳-۱-۳- سلول‌های خورشیدی پروسکایت انعطاف‌پذیر بر پایه نانوساختار کربنی

در PSC‌های انعطاف‌پذیر چنانچه لایه ETL از فولرن‌ها و مشتقات آن تهیه شود علاوه بر پایداری محیطی بیشتر امکان تهیه آنها در دماهای کمتر نیز میسر می‌شود. به عنوان مثال چنانچه لایه‌ها از ترکیب PET/ITO/PEDOT:PSS/Perovskite/PC61BM/TiOx/Al باشند می‌توان PCS در دمای پایین‌تر و با مقاومت خمش تا بیست برابر بیشتر را تهیه کرد. دستگاه انعطاف‌پذیر ساخته شده بازده تبدیل ۶/۴ درصد را تولید کرد که پس از انجام برخی تغییرات بازده آن به ۹/۲ درصد افزایش یافت. در مقایسه با سلول‌های مشابه بر پایه ITO/ITO شیشه با بازده تبدیل ۱۱/۵ درصد، بازده تبدیل پایین‌تر دستگاه‌های انعطاف‌پذیر بر پایه PET/ITO ممکن است به مقاومت سری بالاتر



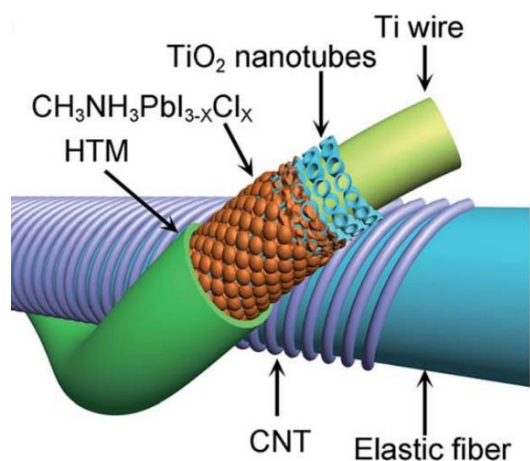
شکل ۸: (a) گرافن دوپ شده با TFSA و TETA، (b) آزمایش‌های خمشی روی الکتروودهای شفاف آند/کاتد گرافن (۷).  
Figure 8: (a) TFSA and TETA doped graphene, (b) Bending tests on transparent graphene anode/cathode electrodes (right) (7).



شکل ۹: (a) نمودار چگالی جریان جهت بررسی عملکرد PSC، (b) بازده تبدیل برای PSC انعطاف پذیر (۷).

Figure 9: (a) Current-voltage density curve for PSC performance evaluation, (b) conversion efficiency for flexible PSC (7).

فبری شکل بودند که پروسکایت روی الکتروود تیتانیم پوشش داده شده بود. (شکل ۱۰) (۷۲). بازده تبدیل را می‌توان به ترتیب در بالای ۸۰ درصد تحت خمش برای ۳۰۰ سیکل و بالای ۹۰ درصد در کرنش کششی ۳۰ درصد نگه داشت (شکل ۱۱)، که عملکرد پایدار فوتوولتائیک را تحت دفعات خمش و کشش نشان می‌دهد. پس از آن PSC تک‌بعدی کارآمدتر با سطح مشترک مسطح ساخته شد که کیفیت پوشش و اندازه بلور لایه پروسکایت را بهبود بخشید. صفحه‌ای از نانولوله‌های کربنی منظم پیوسته روی لایه پروسکایت قرار داده شد که به عنوان الکتروود و HTL عمل می‌کرد. PSC‌های حاصل، بازده تبدیل بالای ۹/۴۹ درصد داشتند که از عملکرد فوتوولتائیک ثابت در حالت‌های خمش و پیچش برخوردار بودند. علاوه بر الکتروود جلویی شفاف، نانولوله‌های کربنی می‌توانند به عنوان الکتروود پشتی نیز عمل کنند، جایی که معمولاً فلزات فراوری شده در خلا استفاده می‌شوند (۷۳).

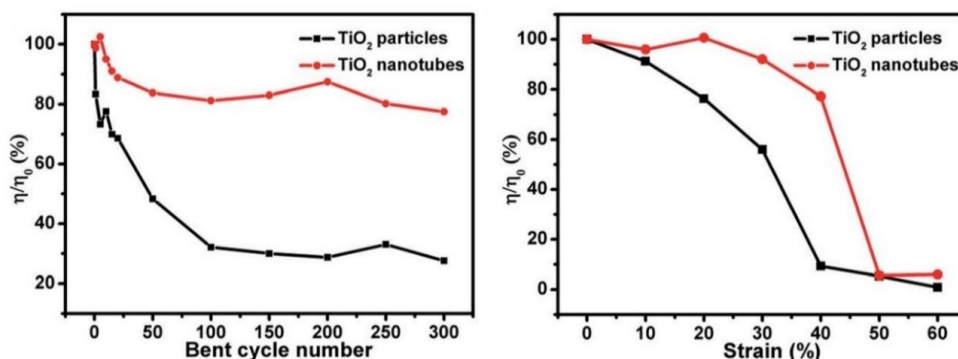


شکل ۱۰: طرحواره نخستین PSC قابل کشش فیبر شکل (۷).

Figure 10: Schematic of the first fiber-shaped stretchable PSC (7).

ریو و همکارانش ذرات آلی-فلزی نانوبلور بر پایه (nTi-MOF) با خاصیت مطلوب برای تزریق بار و انتقال از پروسکایت به الکتروود را سنتز کردند (۷۱). اختلاط PC<sub>61</sub>BM با لایه انتقال الکترون-nTi-MOF، شرایط مناسب جهت انتقال الکترون را فراهم کرد و همچنین تماس مستقیم بین پروسکایت و الکتروود را مهار می‌کند. این رفتار منجر به افزایش بازده تبدیل به ۱۷/۴۳ درصد برای PSC‌های انعطاف‌پذیر شد. با استفاده از لایه‌های فولرن دوگانه متشکل از PC<sub>61</sub>BM و C<sub>60</sub> به عنوان ETL، PSC‌های انعطاف‌پذیر به روش محلول در دمای پایین سنتز شدند که بازده تبدیل ۱۸/۱ درصد را ثبت کردند (۷۱). بازده تبدیل بالا در نتیجه اصلاح شکل و ترکیب فیلم بواسطه تغییر نسبت پیش‌سازهای پروسکایت بر روی بستر PET/ITO حاصل شد. به غیر از C<sub>60</sub> و مشتقات آن، C<sub>70</sub> نیز به عنوان ETL در PSC‌های انعطاف‌پذیر استفاده شد.

لایه‌ای بین TiO<sub>2</sub> و مواد پروسکایت، ETL TiO<sub>2</sub>/C<sub>70</sub> به دست آمده دارای ساختار سطحی خوب، استخراج الکترون کارآمد و فیلم پروسکایت با کیفیت بالا را نشان داد که می‌تواند به ابعاد نانویی مناسب و ویژگی الکترونیکی برتر مولکول‌های C<sub>70</sub> نسبت داده شود. در مقایسه با نمونه‌های مشابه در بین PSC‌های دست‌نخورده بر پایه TiO<sub>2</sub>، بازده تبدیل به میزان ۲۸ درصد افزایش یافت. نانولوله‌های کربنی معمولاً به عنوان الکتروود جلویی شفاف یا لایه انتقال حفره در PSC‌های انعطاف‌پذیر استفاده می‌شوند (۲۹). در سال ۲۰۱۴، نانولوله‌های کربنی رسانای شفاف در بالای پروسکایت قرار گرفت و به عنوان جمع‌کننده حفره و الکتروود شفاف به طور هم‌زمان عمل کرد و PSC انعطاف‌پذیر با بازده تبدیل ۸/۳۱ درصد را تشکیل داد. پس از ۱۰۰ چرخه خمشی PCE از ۶/۰۱ به ۵/۰۶ درصد کاهش یافت که بیانگر انعطاف‌پذیری قابل قبول دستگاه بود. همچنین اولین PSC قابل کشش لیفی شکل بر پایه نانولوله‌های کربنی ساخته شد. در این سلول الکتروودها از لیف رسانای نانولوله کربنی و سیم تیتانیم رسانای



شکل ۱۱: بازده تبدیل تحت خمش و کرنش کششی (۷).

Figure 11: Conversion efficiency under bending and tensile strain (7).

بازده تبدیل ۱۱/۹ و ۸/۴ درصد دست یافتند. این دسته از PSC‌های انعطاف‌پذیر نیز در مقایسه با نمونه‌های متناظر خود که بر روی آند انعطاف‌پذیر بر پایه ITO ساخته شده بودند، استحکام بالاتری در برابر تغییر شکل مکانیکی نشان دادند.

#### ۴- روش‌های پوششی و چاپی ساخت فوتوآند بر پایه نانوساختارهای کربنی

در این بخش آماده‌سازی و فناوری‌های مختلف لایه نشانی فیزیکی برای ساخت الکترودها در سلول‌های خورشیدی مرور خواهد شد. روش‌های فیزیکی در دو فاز مایع و گاز انجام می‌شوند. مطالعات اخیر برای فرایندهای فاز مایع به عنوان فوتوآند بر پایه کامپوزیت گرافن-TiO<sub>2</sub> در DSSC در جدول ۱ خلاصه شده است.

##### ۴-۱- پوشش‌دهی چرخشی

پوشش دهی چرخشی روشی است که در آن ماده شیمیایی/حلال/پلیمر در حین چرخش با هم زدن شدید بر روی مرکز زیرآیند می‌ریزد. یک لایه نازک یکنواخت تشکیل شده و بر روی بستر با زبری سطح کم قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر، حلال با سرعت بالا به طور یکنواخت بر روی بستر تحت چرخش و توسط نیروی گریز از مرکز قرار می‌گیرد (۷۷).

تسای<sup>۳</sup> و همکارانش نشان دادند که کامپوزیت گرافن-TiO<sub>2</sub> را می‌توان با روش پوشش‌دهی چرخشی بر روی بسترهای ITO لایه‌نشانی کرد و به عنوان یک الکتروده کارآمد در سلول‌های خورشیدی استفاده کرد (۷۸). بر این اساس، وجود محتوای بهینه گرافن (۱ درصد وزنی) در TiO<sub>2</sub> می‌تواند بالاترین بازده تبدیل را با ۶/۸۶ درصد در روشنایی ۱۰۰ mWcm<sup>-2</sup> ایجاد کند. این به معنای کاهش اتلاف الکترون‌های فوتوژن شده و نوترکیبی جفت الکترون-حفره است.

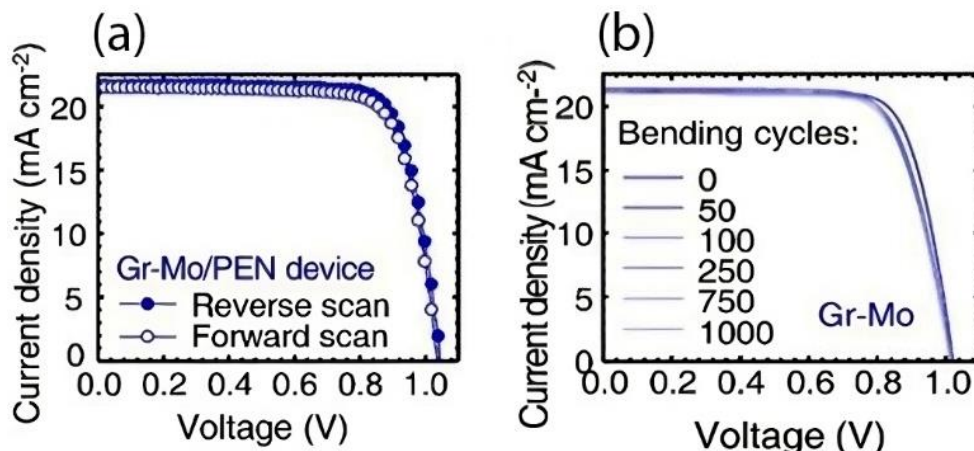
گرافن به عنوان یک الکتروده جلویی شفاف کارآمد و قوی در PSC‌های انعطاف‌پذیر بهتر عمل می‌کند. در سال ۲۰۱۶، یان<sup>۱</sup> و همکارانش با استفاده از الکتروده شفاف بر پایه گرافن در سامانه ساختار لایه‌ای PET/graphene/P3HT/CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>/PC<sub>71</sub>BM/Ag بر روی بستر PET با ضخامت ۲۰ میکرومتر توسط فرایند محلول در دمای پایین، یک PSC فوق‌العاده نازک و انعطاف‌پذیر ساختند (۷۳). دستگاه‌های انعطاف‌پذیر بازده تبدیل ۱۱/۵ درصد و دوام و ثبات جوی بالایی را نشان دادند. تفاوت واضحی با ساخت PSC‌های معکوس منعطف و بدون ایندیم ایجاد شد که در آن ITO با SWCNT یا گرافن جایگزین شد (۷۴). PSC‌های بر پایه SWCNT یا گرافن به ترتیب بازدهی ۱۲/۸ و ۱۴/۲ درصدی را نشان دادند. با این حال، PSC‌های انعطاف‌پذیر بر پایه SWCNT به دلیل پیکربندی درهم تنیده شبکه SWCNT و طبیعت بدون نقص ذاتی آن، پایداری مکانیکی کمی بالاتر از آنهایی که مبتنی بر گرافن هستند، نشان دادند. چو<sup>۲</sup> و همکارانش در تلاشی خستگی‌ناپذیر گرافن تک لایه را به روش لایه‌نشانی بخار شیمیایی تهیه کرده و به عنوان الکتروده شفاف گزارش کردند (۷۵). لایه‌ای نانومتری از MoO<sub>3</sub> برای دوپ کردن حفره در گرافن رسوب داده شد. دستگاه‌های انعطاف‌پذیر با بازده تبدیل بالای ۱۶/۸ درصد و پایداری خمشی قابل توجه با منحنی‌های چگالی جریان - ولتاژ (J-V) تقریباً بدون تغییر پس از خم شدن به میزان ۱۰۰۰ سیکل (شکل ۱۲) حاصل شدند.

با توجه به کاربرد گسترده نانولوله‌های کربنی و گرافن در PSC‌های انعطاف‌پذیر مبتنی بر الکترودهای کربنی، معمولاً از گرافن به عنوان آند شفاف و از لایه‌های نانولوله‌های کربنی منظم به عنوان کاتد استفاده می‌شود. دستگاه‌های منعطف ساخته‌شده با حضور و بدون حضور (4-methoxyphenyl) di tetrakis N,N'-۷,۷',۲,۲' بدون حضور HTL amino9,9'-spirobifluorene (spiro-OMeTAD) به ترتیب به

<sup>1</sup> Yan

<sup>2</sup> Cho

<sup>3</sup> Tsai



شکل ۱۲: منحنی‌های چگالی جریان - ولتاژ دستگاه‌های انعطاف‌پذیر با بازده تبدیل بالای ۱۶/۸ درصد (۷).  
**Figure 12:** Current-voltage density curves of flexible devices with conversion efficiency above 16.8% (7).

جدول ۱: انواع روش‌های چاپی و پوششی به کار گرفته شده جهت تهیه آند در سلول‌های خورشیدی (۷۶).

**Table 1:** Various printing and coating technologies for preparation of anod in solar cells (76).

Deposition Method	Photoanode Materials	PCE, $\eta$ (%)
Electrospray Deposition	TiO <sub>2</sub>	3.65
Spin-Coating	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiO <sub>2</sub>	8.60
Spin-Coating	Luminescent Species TiO <sub>2</sub>	5.02
Spin-Coating	Ga doped ZnO Seed	1.23
Dip-Coating	SnO <sub>2</sub> -MgO	4.14
Screen-Printing	Polyester Mesh	8.70
Electrospray Deposition	TiO <sub>2</sub> NPs	1.674
Spin-Coating	Li-doped ZnO & SnO <sub>2</sub> nanocomposite	2.06
Dip-Coating	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> - TiO <sub>2</sub>	6.31
Dip-Coating	TiO <sub>2</sub>	-
Dip-Coating	AgNPs- TiO <sub>2</sub>	0.0071
Dip-Coating	AgNPs- TiO <sub>2</sub>	0.0091
Doctor-Blade Printing	Mesoporous TiO <sub>2</sub>	4.20
Doctor-Blade Printing	TiO <sub>2</sub>	2.56
Doctor-Blade Printing	TiO <sub>2</sub>	1.14
Spin-Coating	TiO <sub>2</sub>	2.00
Doctor-Blade Printing	ZnO NS	2.00
Doctor-Blade Printing	TiO <sub>2</sub>	5.97
Screen-Printing	Al-doped Hematite	0.198
Screen-Printing	Ag-TiO <sub>2</sub>	-

می‌تواند به طور یکنواخت پس از خشک شدن تشکیل شود. مسعود<sup>۳</sup> و همکارانش روش غوطه‌وری را برای پوشش لایه‌های  $\text{TiO}_2$  اعمال کردند و به دنبال آن فیلم کامپوزیت گرافن- $\text{TiO}_2$  را با استفاده از روش چاپ تیغه ای تهیه کردند. محتوای گرافن ۰/۷۵ درصد وزنی بهینه‌ترین بارگذاری برای دستیابی به بالاترین بازده تبدیل، معادل ۵/۷۷ درصد است (۸۲). محقق دیگری همچنین فرایند پوشش غوطه‌وری را انجام داد که به موجب آن نانوسیم  $\text{TiO}_2$  روتیل روی بستر FTO در rGO غوطه‌ور شد و به دنبال آن در رطوبت ۶۰ درصد خشک شد و در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد پخت شد (۸۳). کامپوزیت هیبریدی rGO- $\text{TiO}_2$  به طور کلی قادر به ارائه یک مسیر مستقیم، ترکیب مجدد الکترون و در نتیجه تنظیم دقیق ساختارهای فوتوآند است که منجر به بازده تبدیل ۷/۵۸ درصد می‌شود. فانگ<sup>۴</sup> و همکارانش فرایندی را گزارش کردند که در آن  $\text{TiO}_2$  در محلول کوانتومی گرافن غوطه‌ور شد و سامانه به دست آمده، بازده تبدیل ۶/۱ درصد را حاصل نمود (۸۴). همچنین گزارش شده است که فرایند پوشش‌دهی با مول‌های مختلف  $\text{TiCl}_4$  برای تعیین ضخامت با استفاده از اتانل، تترا هیدرو فوران و Pluronic F127 می‌تواند در سلول‌های خورشیدی پروسکایت با تنظیم آسان ضخامت بین ۵ تا ۵۰ نانومتر با غلظت  $\text{TiCl}_4$  موثر باشد. سلول‌های خورشیدی پروسکایتی ساخته شده دارای بازده تبدیل ۸/۶ درصد بودند (۸۵).

#### ۴-۳- چاپ تیغه‌ای

به طور کلی روش تیغه‌ای یکی از روش‌های جایگزین برای تولید یک لایه نازک با مساحت بزرگ است. هواوت<sup>۵</sup> و همکارانش اولین گروهی هستند که از فرایند ریخته‌گری نواری گزارش می‌دهند که ورقه‌های نازک خازن‌های سرامیکی را تولید می‌کنند (۸۶). دستگاه چاپ تیغه‌ای برای جابجایی گچ‌ها با استفاده از دوغاب‌های آبی و غیر آبی پس از آن گزارش شد (۸۷).

بر این اساس، روش چاپ تیغه‌ای با سه مرحله ساده انجام می‌شود که در آن (الف) محلول گرافن- $\text{TiO}_2$  در امتداد بستر شیشه اعمال می‌شود، (ب) یک تیغه با حرکت نسبی ثابت برای پخش کردن گرافن- $\text{TiO}_2$  در امتداد ناحیه فعال سطح حرکت می‌کند (کشیدن و فشار دادن). و (ج) لایه نازک گرافن- $\text{TiO}_2$  در یک لایه ژل پس از فرایندهای خشک کردن/ بازپخت تشکیل می‌شود. علاوه بر این، ویجایاکومار<sup>۶</sup> و همکارانش، خمیر محلول  $\text{TiO}_2$  را با روش چاپ تیغه ای روی شیشه FTO برای استفاده در DSSC مورد مطالعه قرار دادند.

چن<sup>۱</sup> و همکارانش همچنین ساختار ساندویچی  $\text{TiO}_2$ /گرافن- $\text{TiO}_2$  را به عنوان فوتوآند از طریق روش پوشش‌دهی چرخشی بررسی کردند. بازده تبدیل ایده آل DSSCها ۳/۹۳ درصد بود (۷۹).

لیو<sup>۲</sup> و همکارانش با استفاده از روش پوشش‌دهی چرخشی گزارش دادند که نقاط کوانتومی گرافن که با فوتوآند  $\text{TiO}_2$  ترکیب شده‌اند، می‌توانند بازده تبدیل ۷/۹۵ درصد را ایجاد کنند (۸۰). اخیراً، یائو و همکارانش ساختارهای متناوبی از لایه‌های گرافن- $\text{TiO}_2$  را بر روی بستر FTO با فرایند پوشش‌دهی چرخشی ایجاد کردند به طوری که لایه  $\text{TiO}_2$  حاوی یون‌های  $\text{Er}^{3+}$  و  $\text{Yb}^{3+}$  بود. بازده تبدیل نانومیله  $\text{TiO}_2$ : گرافن- $\text{TiO}_2$ :  $\text{Er}^{3+}$ ،  $\text{Yb}^{3+}$ ، ۴/۵۸ درصد در مقایسه با ۳/۳۸ درصد برای نانومیله‌های  $\text{TiO}_2$  خالص گزارش شده است. اصلاح  $\text{TiO}_2$  با  $\text{TiO}_2$ :  $\text{Er}^{3+}$ ،  $\text{Yb}^{3+}$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$ :  $\text{Eu}^{3+}$  به ترتیب منجر به تشکیل مواد (UC) up-conversion و (DC) down conversion شد. همچنین، قابلیت انتشار نور DSSCها را می‌توان از طریق افزایش جذب نور، انتقال بار سریع‌تر و همچنین تحرک سریع‌تر حامل بار با استفاده از مشتقات گرافن بهبود بخشید. جدای از آن، یکی دیگر از مزایای استفاده از نانومیله‌های  $\text{TiO}_2$  به نانوساختار تک بعدی آن نسبت داده می‌شود که می‌تواند مسیر مستقیمی را برای الکترون‌های تولید شده ارائه دهد. با این وجود، طبق گزارش‌های ارائه شده ساخت فیلم‌های گرافن- $\text{TiO}_2$  با استفاده از پوشش‌دهی چرخشی و پوشش اسپری می‌تواند فاز  $\text{TiO}_2$  را تحت ارتعاش اولتراسونیک از طریق بستر رسوب مربوطه اصلاح کند (۸۱). ارتعاش اولتراسونیک برای تبدیل پیش‌سازهای Ti به  $\text{TiO}_2$  مفید است و بنابراین شکستن پیوندهای فیزیکی فاز ژل  $\text{TiO}_2$  را تسهیل می‌کند.

اگرچه استفاده از روش پوشش‌دهی چرخشی جهت ساخت سلول‌های خورشیدی انعطاف‌پذیر به صورت گسترده در مقیاس آزمایشگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد، ولی هنوز این روش فاصله‌ی زیادی تا تجاری شدن دارد.

#### ۴-۲- پوشش‌دهی غوطه‌وری

یک فیلم نازک یکنواخت از رسوب مایع بر روی بستر شیشه‌ای FTO/ITO را می‌توان با فرایند پوشش‌دهی غوطه‌وری به دست آورد. به طور معمول، بستر FTO/ITO به صورت عمودی در محلول پوشش برای غوطه‌وری فرو می‌رود. ضخامت فیلم را می‌توان با نیروی ویسکوز، نیروی کشش سطحی و گرانش محلول تعیین کرد. به عبارت دیگر، ضخامت لایه را می‌توان با (الف) سرعت جمع شدن بستر FTO/ITO و (ب) رابطه بین گرانش محلول و گرانشی کنترل کرد. در نهایت، یک لایه نازک بر روی بستر شیشه‌ای FTO/ITO

<sup>3</sup> Masood

<sup>4</sup> Fang

<sup>5</sup> Howatt

<sup>6</sup> Vijayakumar

<sup>1</sup> Chen

<sup>2</sup> Liu

طبقه‌بندی کرد. برای شکل مسطح، نانوساختار کربنی به عنوان الکترودهای انعطاف‌پذیر بر روی لایه‌های پلیمری اعمال می‌شوند. توسعه فیلم پلیمری انعطاف‌پذیر و نازک مناسب برای فرایند ساخت دستگاه فوتوولتائیک، می‌تواند برای انعطاف‌پذیری بالا مفید باشد. در مورد کاربردهای مهم نوظهور مانند وسایل الکترونیکی پوشیدنی، سلول‌های خورشیدی فیبری شکل برای انعطاف‌پذیری بهتر و مقاومت بالاتر در برابر خم شدن، پیچش و حتی کشش توسعه داده شده‌اند. سلول‌های خورشیدی فیبر شکل اغلب بر روی سیم‌های فلزی نازک ساخته می‌شوند. با بهره‌مندی از انعطاف‌پذیری خوب، رسانایی بالا و استحکام مکانیکی، الیاف بر پایه نانوساختارهای کربنی می‌توانند به عنوان الکترودهای فیبری انعطاف‌پذیر عمل کنند. علاوه بر این، الیاف پلیمری بسیار انعطاف‌پذیر یا قابل کشش را می‌توان با نانوساختار کربنی اصلاح کرد. اما چگونگی ایجاد لایه‌ای از نانوساختارهای کربنی در سلول‌های خورشیدی خود چالش دیگری است. ساخت آسان و خالص سازی نانوساختار کربنی برای دستیابی به بازده بالا در رسانایی الکتریکی بسیار مهم است. چنانچه رشد دادن مستقیم نانوساختارهای کربنی بر روی زیرآیند مورد نیاز، مد نظر باشد، فرایند بسیار پیچیده، پرهزینه و غیر قابل تجاری سازی می‌شود. مورد دیگر که مورد توجه قرار گرفت، فراوری و فرایند تولید سلول‌های خورشیدی بود. در مقایسه با سلول‌های خورشیدی انعطاف‌پذیر با بسترهای پلیمری، بسترهای فلزی به‌ویژه سیم‌های فلزی، الکترودهای موثری برای تحمل دمای فراوری بالا و تحقق انعطاف‌پذیری خوب به طور هم‌زمان دارند. اما استفاده از این بسترها، هم انعطاف‌پذیری را به شدت کاهش می‌دهد و هم مستلزم بهره‌گیری از فرایندهای تولیدی پیچیده و پرهزینه است.

به همین دلیل، تلاش‌ها به سمت استفاده از روش‌هایی سوق پیدا کرده است که بتوان با استفاده از آنها، نانوساختارهای کربنی از پیش سنتز شده را در قالب یک فرمول‌بندی جوهر چاپ یا پوشش، به روش‌های ارزان‌قیمت بر روی زیرآیند مورد نظر اعمال کرد و نهایتاً فراوری آن هم به اعمال دما یا خلا بالا نیاز نداشته باشد. روش‌های لایه نشانی/پوششی به کار گرفته شده، پیش‌نیازهای مشابهی از جمله دمای پایین، هزینه کم و توان عملیاتی بالا برای تجاری سازی دارند. اگرچه استفاده از روش پوشش‌دهی چرخشی جهت ساخت سلول‌های خورشیدی انعطاف‌پذیر به صورت گسترده در مقیاس آزمایشگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد، ولی هنوز این روش فاصله‌ی زیادی تا تجاری شدن دارد. پوشش‌دهی به روش‌های غوطه‌وری و چاپ تیغه‌ای به دلیل فرایندهای ساده، جایگزین‌های جذابی برای پوشش‌دهی چرخشی هستند و برای تحقق پوشش کارآمد به پیش‌سازهای مناسب نیاز دارند. شایان ذکر است که این روش‌های پوشش برای سلول‌های خورشیدی مسطح و فیبر شکل مناسب هستند. از روش‌های چاپ در شرایط محیطی مانند اسکرین و چاپ

در کاربرد DSSC، نقاط کوانتومی گرافن الیاف نانو  $\text{TiO}_2$  را با روش چاپ تیغه‌ای بر روی بستر FTO پوشاندند که تقریباً ۱۲-۱۰ میکرومتر ضخامت دارد و بازده تبدیل بالایی در حدود ۶/۲۲ درصد را می‌توان به دست آورد (۸۸). برهمکنش قوی بین نقاط کوانتومی گرافن و نانوالیاف  $\text{TiO}_2$  یک بعدی در نتیجه اسکن الکترونی فوتو مولد را تسریع کرده است. تیمی پژوهشی فرایندی رامطالعه و بررسی کردند که در آن صفحات  $\text{TiO}_2$  و گرافن برای تشکیل خمیر گرافن- $\text{TiO}_2$  مخلوط می‌شوند. سپس خمیر به روش چاپ تیغه ای بر روی بستر FTO اعمال شد (۸۹). با این حال، بازده تبدیل کمتر، یعنی ۰/۷ درصد حتی اگر ۱ درصد وزنی از محتوای گرافن استفاده شود، به دست آمد.

#### ۴-۴- چاپ اسکرین

فناوری‌های چاپ اسکرین یک روش چاپ لایه دوبعدی است که در طیف بسیار متنوعی از کاربردها و بر روی انواع بسترها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش چاپ اسکرین، می‌توان لایه نازک گرافن- $\text{TiO}_2$  چند لایه برای بهبود بازده تبدیل تولید کرد. به همین ترتیب، ژانگ<sup>۱</sup> و همکارانش فیلم  $\text{TiO}_2$  را با روش چاپ اسکرین تهیه کرده و تا ۱۰ لایه روی بستر FTO چاپ انجام دادند. سلول حاصل شده از چاپ ۸ لایه بازده تبدیل ۵/۵۲ درصد را حاصل کرد. سپس گرافن ۸ لایه چاپ شده، روی فیلم  $\text{TiO}_2$  اضافه شد. بازده تبدیل قابل توجه ۶/۴۹ به دست آمد (۸۷). دلیل این واقعیت، بهبود توانایی جذب نور، افزایش سرعت انتقال الکترون حامل‌های بار و بهبود جفت الکترون-حفره برای کاهش نیاز ترکیب بار در فیلم‌های چند لایه می‌باشد. یو و همکارانش دو لایه از نانو کامپوزیت  $\text{TiO}_2\text{-NaYF}_4\text{:Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  از طریق روش چاپ اسکرین تهیه کردند. نانو کامپوزیت  $\text{TiO}_2\text{-NaYF}_4\text{:Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  از طریق روش چاپ اسکرین تهیه کردند. نانو کامپوزیت  $\text{TiO}_2\text{-NaYF}_4\text{:Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  به عنوان فوتوآند به بازده تبدیل ۷/۳۷ درصد در مقایسه با فوتوآند خالص  $\text{TiO}_2$  با ۶/۸۲ درصد رسید. علاوه بر این، گزارش شده که خمیر  $\text{TiO}_2$  روی شیشه FTO شفافیتی در حدود ۸۰ تا ۸۳ درصد جهت کاربرد DSSC‌ها می‌تواند حاصل کند. آنها دریافتند که چاپ اسکرین به دلیل یکنواختی لایه‌نشانی، عملکرد کلی مناسب‌تری در مقایسه با روش پوشش‌دهی چرخشی دارد (۹۰).

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مروری بر انواع سلول‌های خورشیدی نسل سوم و ویژگی‌های هر دسته صورت گرفت و در ادامه، به پژوهش‌های انجام شده برای استفاده از نانوساختارهای کربنی در انواع این سلول‌ها پرداخته شد. آنگونه که گفته شد به طور معمول، سلول‌های خورشیدی انعطاف‌پذیر را می‌توان به شکل‌های مسطح و لیفی شکل

<sup>1</sup> Zhang

جوهرافشان می‌توان برای ساخت سلول‌های خورشیدی انعطاف پذیر با طراحی آسان استفاده کرد.

### تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان از پشتیبانی و حمایت پژوهشگاه رنگ جهت انجام این مطالعه تشکر و قدردانی می‌نمایند.

### ۶- مراجع

1. Debus C, Piraud M, Streit A, Theis F, Götz M. Reporting electricity consumption is essential for sustainable AI. *Nat Mach Intell.* 2023;5(11):1176–8. <https://doi.org/10.1038/s42256-023-00750-1>.
2. Zhou SL, Shah AA, Leung PK, Zhu X, Liao Q. A comprehensive review of the applications of machine learning for HVAC. *DeCarbon.* 2023;2:100023.
3. Moore K, Wei W. Applications of carbon nanomaterials in perovskite solar cells for solar energy conversion. *Nano Mater Sci.* 2021;3(3):276–90.
4. 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):377–406. <https://dori.net/dor/20.1001.1.22517278.1402.13.4.3.1>.
5. Mohammad Raei Nayini M, Jalili M, Ranjbar Z. Printed electronics, based on carbon nanotubes and graphene nanosheets. *J Stud Color World.* 2020;10(3):29–42. <https://dori.net/dor/20.1001.1.22517278.1399.10.3.3.8>
6. Nayini MMR, Ranjbar Z. Carbon nanotubes: dispersion challenge and how to overcome it bt- handbook of carbon nanotubes. In: Abraham J, Thomas S, Kalarikkal N, editors. Cham: Springer International Publishing; 2020. p. 1–52. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-70614-6\\_64-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70614-6_64-1).
7. Li Y, Meng L, Yang Y (Michael), Xu G, Hong Z, Chen Q, et al. High-efficiency robust perovskite solar cells on ultrathin flexible substrates. *Nat Commun.* 2016;7(1):10214. <https://doi.org/10.1038/ncomms10214>.
8. Chen J, Huang Y, Zhang N, Zou H, Liu R, Tao C, et al. Micro-cable structured textile for simultaneously harvesting solar and mechanical energy. *Nat Energy.* 2016;1(10):16138. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.138>.
9. Zhang K, Gao K, Xia R, Wu Z, Sun C, Cao J, et al. High-performance polymer tandem solar cells employing a new n-type conjugated polymer as an interconnecting layer. *Adv Mater.* 2016;28(24):4817–23. <https://doi.org/10.1002/adma.201506270>
10. Jung S, Lee J, Seo J, Kim U, Choi Y, Park H. Development of annealing-free, solution-processable inverted organic solar cells with n-doped graphene electrodes using zinc oxide nanoparticles. *Nano Lett.* 2018;18(2):1337–43. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b05026>
11. Tan H, Jain A, Voznyy O, Lan X, García de Arquer FP, Fan JZ, et al. Efficient and stable solution-processed planar perovskite solar cells via contact passivation. *Sci.* 2017;355(6326):722–6.
12. Bi C, Chen B, Wei H, DeLuca S, Huang J. Efficient flexible solar cell based on composition-tailored hybrid perovskite. *Adv Mater.* 2017;29(30):1605900. <https://doi.org/10.1002/adma.201605900>.
13. Kroto HW, Heath JR, O'Brien SC, Curl RF, Smalley RE. C60: Buckminsterfullerene. *Nature.* 1985;318(6042):162–3.
14. Ganesamoorthy R, Sathiyam G, Sakthivel P. Review: Fullerene based acceptors for efficient bulk heterojunction organic solar cell applications. *Sol Energy Mater Sol Cells.* 2017;161:102–48.
15. Yu G, Gao J, Hummelen JC, Wudl F, Heeger AJ. Polymer Photovoltaic Cells: Enhanced Efficiencies via a Network of Internal Donor-Acceptor Heterojunctions. *Sci.* 1995;270(5243):1789–91.
16. Cui C, Li Y, Li Y. Fullerene Derivatives for the Applications as Acceptor and Cathode Buffer Layer Materials for Organic and Perovskite Solar Cells. *Adv Energy Mater.* 2017;7(10):1601251.
17. Wienk MM, Kroon JM, Verhees WJH, Knol J, Hummelen JC, van Hal PA, et al. Efficient Methano[70]fullerene/MDMO-PPV Bulk Heterojunction Photovoltaic Cells. *Angew Chemie Int Ed.* 2003;42(29):3371–5.
18. Shao Y, Yuan Y, Huang J. Correlation of energy disorder and open-circuit voltage in hybrid perovskite solar cells. *Nat Energy.* 2016;1(1):15001.
19. Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature.* 1991;354(6348):56–8. <https://doi.org/10.1038/354056a0>
20. Yu L, Shearer C, Shapter J. Recent Development of Carbon Nanotube Transparent Conductive Films. *Chem Rev.* 2016;116(22):13413–53. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00179>
21. Mann D, Javey A, Kong J, Wang Q, Dai H. Ballistic Transport in Metallic Nanotubes with Reliable Pd Ohmic Contacts. *Nano Lett.* 2003;3(11):1541–4. <https://doi.org/10.1021/nl034700o>
22. Chen G, Futaba DN, Sakurai S, Yumura M, Hata K. Interplay of wall number and diameter on the electrical conductivity of carbon nanotube thin films. *Carbon N Y.* 2014;67:318–25.
23. Panhuis M. Carbon nanotubes: enhancing the polymer building blocks for intelligent materials. *J Mater Chem.* 2006;16(36):3598–605. <http://dx.doi.org/10.1039/B606959B>.
24. Zhou P, Yang X, He L, Hao Z, Luo W, Xiong B, et al. The Young's modulus of high-aspect-ratio carbon/carbon nanotube composite microcantilevers by experimental and modeling validation. *Appl Phys Lett.* 2015;106(11):111908. <https://doi.org/10.1063/1.4915514>.
25. Cinke M, Li J, Chen B, Cassell A, Delzeit L, Han J, et al. Pore structure of raw and purified HiPco single-walled carbon nanotubes. *Chem Phys Lett.* 2002;365(1):69–74.



26. Kim P, Shi L, Majumdar A, McEuen PL. Thermal transport measurements of individual multiwalled nanotubes. *Phys Rev Lett*. 2001;87(21):215502. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.87.215502>
27. Novoselov KS, Geim AK, Morozov S V, Jiang D, Zhang Y, Dubonos S V, et al. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Sci*. 2004;306(5696):666–9. <https://doi.org/10.1126/science.1102896>
28. Chen J-H, Jang C, Xiao S, Ishigami M, Fuhrer MS. Intrinsic and extrinsic performance limits of graphene devices on SiO<sub>2</sub>. *Nat Nanotechnol*. 2008;3(4):206–9. <https://doi.org/10.1038/nnano.2008.58>
29. Afre RA, Pugliese D. Perovskite Solar Cells: A Review of the Latest Advances in Materials, Fabrication Techniques, and Stability Enhancement Strategies. *Micromachines*. 2024 Jan 27;15(2):192.
30. Selopal GS, Milan R, Ortolani L, Morandi V, Rizzoli R, Sberveglieri G, et al. Graphene as transparent front contact for dye sensitized solar cells. *Sol Energy Mater Sol Cells* . 2015;135:99–105.
31. Roy-Mayhew JD, Aksay IA. Graphene Materials and Their Use in Dye-Sensitized Solar Cells. *Chem Rev* . 2014 Jun 25;114(12):6323–48. <https://doi.org/10.1021/cr400412a>
32. O'Regan B, Grätzel M. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films. *Nature*. 1991;353(6346):737–40. <https://doi.org/10.1038/353737a0>
33. Muchuweni E, Martincigh B, Nyamori V. Recent advances in graphene-based materials for dye-sensitized solar cell fabrication. *RSC Adv*. 2020;10:44453–69.
34. Freitag M, Teuscher J, Saygili Y, Zhang X, Giordano F, Liska P, et al. Dye-sensitized solar cells for efficient power generation under ambient lighting. *Nat Photonics*. 2017;11(6):372–8. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2017.60>
35. Zhang N, Chen J, Huang Y, Guo W, Yang J, Du J, et al. A Wearable All-Solid Photovoltaic Textile. *Adv Mater* . 2016 Jan 1;28(2):263–9. <https://doi.org/10.1002/adma.201504137>
36. Song L, Guan Y, Du P, Yang Y, Ko F, Xiong J. Enhanced efficiency in flexible dye-sensitized solar cells by a novel bilayer photoanode made of carbon nanotubes incorporated TiO<sub>2</sub> nanorods and branched TiO<sub>2</sub> nanotubes. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2016;147:134–43.
37. Bella F, Lamberti A, Bianco S, Tresso E, Gerbaldi C, Pirri CF. Floating, Flexible Polymeric Dye-Sensitized Solar-Cell Architecture: The Way of Near-Future Photovoltaics. *Adv Mater Technol*. 2016;1(2). <https://doi.org/10.1002/admt.201600002>
38. Mehmood U, Rahman S, Harrabi K, Hussein IA, Reddy BVS. Recent Advances in Dye Sensitized Solar Cells. Chow C-W, editor. *Adv Mater Sci Eng*. 2014; 2014:974782. <https://doi.org/10.1155/2014/974782>
39. Fu X, Xu L, Li J, Sun X, Peng H. Flexible solar cells based on carbon nanomaterials. *Carbon N Y* . 2018;139:1063–73.
40. Gasparini N, Lucera L, Salvador M, Prosa M, Spyropoulos GD, Kubis P, et al. High-performance ternary organic solar cells with thick active layer exceeding 11% efficiency. *Energy Environ Sci*. 2017;10(4):885–92. <http://dx.doi.org/10.1039/C6EE03599J>
41. Angmo D, Sweelssen J, Andriessen R, Galagan Y, Krebs FC. Inkjet Printing of Back Electrodes for Inverted Polymer Solar Cells. *Adv Energy Mater*. 2013(9):1230–7. <https://doi.org/10.1002/aenm.201201050>
42. Li Y, Xu G, Cui C, Li Y. Flexible and Semitransparent Organic Solar Cells. *Adv Energy Mater*. 2018;8(7):1701791. <https://doi.org/10.1002/aenm.201701791>
43. Yang WS, Park B-W, Jung EH, Jeon NJ, Kim YC, Lee DU, et al. Iodide management in formamidinium-lead-halide-based perovskite layers for efficient solar cells. *Sci*. 2017;356(6345):1376–9. <https://doi.org/10.1126/science.aan2301>
44. Roldán-Carmona C, Malinkiewicz O, Soriano A, Mínguez Espallargas G, Garcia A, Reinecke P, et al. Flexible high efficiency perovskite solar cells. *Energy Environ Sci* . 2014;7(3):994–7. <http://dx.doi.org/10.1039/C3EE43619E>
45. Zhang H, Cheng J, Lin F, He H, Mao J, Wong KS, et al. Pinhole-Free and Surface-Nanostructured NiOx Film by Room-Temperature Solution Process for High-Performance Flexible Perovskite Solar Cells with Good Stability and Reproducibility. *ACS Nano*. 2016;10(1):1503–11. <https://doi.org/10.1021/acsnano.5b07043>
46. Di Giacomo F, Fakharuddin A, Jose R, Brown TM. Progress, challenges and perspectives in flexible perovskite solar cells. *Energy Environ Sci*. 2016;9(10):3007–35. <http://dx.doi.org/10.1039/C6EE01137C>
47. Wang D, Wright M, Elumalai NK, Uddin A. Stability of perovskite solar cells. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2016;147:255–75.
48. Rana K, Singh J, Ahn J-H. A graphene-based transparent electrode for use in flexible optoelectronic devices. *J Mater Chem C*. 2014;2(15):2646–56. <http://dx.doi.org/10.1039/C3TC32264E>
49. Yin X, Chen P, Que M, Xing Y, Que W, Niu C, et al. Highly Efficient Flexible Perovskite Solar Cells Using Solution-Derived NiOx Hole Contacts. *ACS Nano*. 2016 Mar 22;10(3):3630–6. <https://doi.org/10.1021/acsnano.5b08135>
50. Jeon I, Chiba T, Delacou C, Guo Y, Kaskela A, Reynaud O, et al. Single-Walled Carbon Nanotube Film as Electrode in Indium-Free Planar Heterojunction Perovskite Solar Cells: Investigation of Electron-Blocking Layers and Dopants. *Nano Lett*. 2015 Oct 14;15(10):6665–71. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b02490>
51. Macak JM, Tsuchiya H, Ghicov A, Yasuda K, Hahn R, Bauer S, et al. TiO<sub>2</sub> nanotubes: Self-organized electrochemical formation, properties and applications. *Curr Opin Solid State Mater Sci*. 2007;11(1):3–18.
52. Chen T, Qiu L, Cai Z, Gong F, Yang Z, Wang Z, et al. Intertwined aligned carbon nanotube fiber based dye-sensitized solar cells. *Nano Lett*. 2012;12(5):2568–72. <https://doi.org/10.1021/nl300799d>
53. You J, Hong Z, Yang Y (Michael), Chen Q, Cai M, Song TB, et al. Low-temperature solution-processed perovskite solar cells with high efficiency and flexibility. *ACS Nano*. 2014;8(2):1674–80. <https://doi.org/10.1021/nn406020d>
54. Ali A, Shehzad K, Ur-Rahman F, Shah SM, Khurram M, Mumtaz M, et al. Flexible, low cost, and platinum-free counter electrode for efficient dye-sensitized solar cells. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2016;8(38):25353–60. <https://doi.org/10.1021/acsmi.6b08826>
55. Pan S, Yang Z, Li H, Qiu L, Sun H, Peng H. Efficient dye-sensitized photovoltaic wires based on an organic redox electrolyte. *J Am Chem Soc*. 2013;135(29):10622–25.
56. Jiang Y, Sun H, Peng H. Synthesis and photovoltaic application of platinummodified conducting aligned nanotube fiber. *Sci China Mater*. 2015;58(4):289–93.
57. Fu X, Sun H, Xie S, Zhang J, Pan Z, Liao M, et al. A fiber-

- shaped solar cell showing a record power conversion efficiency of 10%. *J Mater Chem A*. 2018;6(1):45–51. <http://dx.doi.org/10.1039/C7TA08637G>
58. Lee J, Kang H, Hwang J-Y, Kim SW, Baik S. Flexible photoanodes of TiO<sub>2</sub> particles and metallic single-walled carbon nanotubes for flexible dye-sensitized solar cells. *Carbon N Y*. 2014;79:337–45.
  59. Chen T, Wang S, Yang Z, Feng Q, Sun X, Li L, et al. Flexible, light-weight, ultrastrong, and semiconductive carbon nanotube fibers for a highly efficient solar cell. *Angew Chemie Int Ed*. 2011;50(8):1815–9. <https://doi.org/10.1002/anie.201003870>
  60. Sahito IA, Sun KC, Arbab AA, Qadir MB, Choi YS, Jeong SH. Flexible and conductive cotton fabric counter electrode coated with graphene nanosheets for high efficiency dye sensitized solar cell. *J Power Sources*. 2016;319:90–8.
  61. Peng Y, Zhong J, Wang K, Xue B, Cheng Y-B. A printable graphene enhanced composite counter electrode for flexible dye-sensitized solar cells. *Nano Energy*. 2013;2(2):235–40.
  62. J. Zhi, H. Cui, A. Chen, Y. Xie, F. Huang, Efficient highly flexible dye sensitized solar cells of three dimensional graphene decorated titanium dioxide nanoparticles on plastic substrate, *J Power Sources*. 2015;281:404-10
  63. Zhang Z, Yang Z, Wu Z, Guan G, Pan S, Zhang Y, et al. Weaving Efficient Polymer Solar Cell Wires into Flexible Power Textiles. *Adv Energy Mater*. 2014;4(11):1301750. <https://doi.org/10.1002/aenm.201301750>.
  64. Zhang Z, Yang Z, Deng J, Zhang Y, Guan G, Peng H. Stretchable polymer solar cell fibers. *Small*. 2015;11(6):675–80. <https://doi.org/10.1002/smll.201400874>.
  65. Park H, Chang S, Zhou X, Kong J, Palacios T, Gradečak S. Flexible graphene electrode-based organic photovoltaics with record-high efficiency. *Nano Lett*. 2014;14(9):5148–54. <https://doi.org/10.1021/nl501981f>
  66. Song Y, Chang S, Gradečak S, Kong J. Visibly-transparent organic solar cells on flexible substrates with all-graphene electrodes. *Adv Energy Mater*. 2016;6(20):1600847. <https://doi.org/10.1002/aenm.201600847>.
  67. Docampo P, Ball JM, Darwich M, Eperon GE, Snaith HJ. Efficient organometal trihalide perovskite planar-heterojunction solar cells on flexible polymer substrates. *Nat Commun*. 2013;4(1):2761. <https://doi.org/10.1038/ncomms3761>.
  68. Heo JH, Jahandar M, Moon S-J, Song CE, Im SH. Inverted CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> perovskite hybrid solar cells with improved flexibility by introducing a polymeric electron conductor. *J Mater Chem C*. 2017;5(11):2883–91. <http://dx.doi.org/10.1039/C6TC05081F>.
  69. Lei H, Chen X, Xue L, Sun L, Chen J, Tan Z, et al. A solution-processed pillar[5]arene-based small molecule cathode buffer layer for efficient planar perovskite solar cells. *Nanoscale*. 2018;10(17):8088–98. <http://dx.doi.org/10.1039/C8NR00898A>.
  70. Ryu U, Jee S, Park J-S, Han IK, Lee JH, Park M, et al. Nanocrystalline titanium metal-organic frameworks for highly efficient and flexible perovskite solar cells. *ACS Nano*. 2018;12(5):4968–75. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b02079>.
  71. Deng J, Qiu L, Lu X, Yang Z, Guan G, Zhang Z, et al. Elastic perovskite solar cells. *J Mater Chem A*. 2015;3(42):21070–6. <http://dx.doi.org/10.1039/C5TA06156C>.
  72. Qiu L, He S, Yang J, Jin F, Deng J, Sun H, et al. An all-solid-state fiber-type solar cell achieving 9.49% efficiency. *J Mater Chem A*. 2016;4(26):10105–9. <http://dx.doi.org/10.1039/C6TA03263J>.
  73. Liu Z, You P, Xie C, Tang G, Yan F. Ultrathin and flexible perovskite solar cells with graphene transparent electrodes. *Nano Energy*. 2016;28:151–7.
  74. Tyagi P, Lai CW, Johan MR Bin. Chapter 15 - Titanium dioxide/graphene composites for dye-sensitized solar cell applications. In: Altalhi T, Inamuddin BT-GSP for C and EE and S, editors. Elsevier; 2022. p. 313–39.
  75. Yoon J, Sung H, Lee G, Cho W, Ahn N, Jung HS, et al. Superflexible, high-efficiency perovskite solar cells utilizing graphene electrodes: towards future foldable power sources. *Energy Environ Sci*. 2017;10(1):337–45. <http://dx.doi.org/10.1039/C6EE02650H>
  76. Lee E, Ryu J, Jang J. Fabrication of graphene quantum dots via size-selective precipitation and their application in upconversion-based DSSCs. *Chem Commun*. 2013;49(85):9995–7. <http://dx.doi.org/10.1039/C3CC45588B>
  77. Chen L-C, Hsu C-H, Chan P-S, Zhang X, Huang C-J. Improving the performance of dye-sensitized solar cells with TiO<sub>2</sub>/graphene/TiO<sub>2</sub> sandwich structure. *Nanoscale Res Lett*. 2014;9(1):380. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-380>
  78. Tsai T-H, Chiou S-C, Chen S-M. Enhancement of Dye-Sensitized Solar Cells by using Graphene-TiO<sub>2</sub> Composites as Photoelectrochemical Working Electrode. *Int J Electrochem Sci*. 2011;6(8):3333–43.
  79. Zabihi F, Ahmadian-Yazdi M-R, Eslamian M. Photocatalytic Graphene-TiO<sub>2</sub> Thin Films Fabricated by Low-Temperature Ultrasonic Vibration-Assisted Spin and Spray Coating in a Sol-Gel Process. Vol. 7, *Catalysts*. 2017.
  80. Fan J, Liu S, Yu J. Enhanced photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells based on TiO<sub>2</sub> nanosheets/graphene composite films. *J Mater Chem*. 2012;22(33):17027–36. <http://dx.doi.org/10.1039/C2JM33104G>.
  81. Chen AR, Zhao W, Cui HL, Zhi J, Huang FQ. TiO<sub>2</sub> nanowires infiltrated with graphene-decorated mesoporous TiO<sub>2</sub> for enhanced dye-sensitized solar cell. *Wuji Cailiao Xuebao/J Inorg Mater*. 2015;30(8):891–6.
  82. Masood MT, Weinberger C, Sarfraz J, Rosqvist E, Sandén S, Sandberg OJ, et al. Impact of Film Thickness of Ultrathin Dip-Coated Compact TiO<sub>2</sub> Layers on the Performance of Mesoscopic Perovskite Solar Cells. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2017;9(21):17906–13. <https://doi.org/10.1021/acsmi.7b02868>
  83. Howatt GN, Breckenridge RG, Brownlow JM. Fabrication of thin ceramic sheets for capacitors. *J Am Ceram Soc*. 1947;30(8):237–42. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1947.tb18889.x>
  84. Fang X, Li M, Guo K, Li J, Pan M, Bai L, et al. Graphene quantum dots optimization of dye-sensitized solar cells. *Electrochim Acta*. 2014;137:634–8.
  85. Eshaghi A, Aghaei A. Effect of TiO<sub>2</sub>-graphene nanocomposite photoanode on dye-sensitized solar cell performance. *Bull Mater Sci*. 2015;38(5):1177–82. <https://doi.org/10.1007/s12034-015-0998-5>
  86. Howatt GN. Method of producing high dielectric high insulation ceramic plates. US Patent 2,582,993. 1952.
  87. Zhang H, Wang W, Liu H, Wang R, Chen Y, Wang Z. Effects of TiO<sub>2</sub> film thickness on photovoltaic properties of dye-sensitized solar cell and its enhanced performance by graphene combination. *Mater Res Bull*. 2014;49:126–31.

88. Salam Z, Vijayakumar E, Subramania A, Sivasankar N, Mallick S. Graphene quantum dots decorated electrospun TiO<sub>2</sub> nanofibers as an effective photoanode for dye sensitized solar cells. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2015;143:250–9.
89. Pishdar A, Samadpour M. TiO<sub>2</sub>/Graphene nanocomposites for enhancing the performance of dye sensitized solar cells. *Current Nanosci*. 2017;13(1):84-91.
90. Husain AAF, Hasan WZW. Transparent solar cell using spin coating and screen printing. *Pertanika J Sci Technol*. 2017;25(S):225–34.

**How to cite this article:**

Jalili M, Mohammad Raei Nayini M, Ameri F, Ajili N. A Review of the application of conductive carbon nano-structures in flexible printable photovoltaic cells. *J Stud Color World*. 2024;14(3):265-283.

<https://doi.org/10.30509/JSCW.2024.167347.1198> [In Persian].