



## مروری بر سلول‌های خورشیدی دوپشته حساس شده به مواد رنگزا

مژگان حسین‌نژاد<sup>۱\*</sup>، سیامک مرادیان<sup>۲</sup>، کمال‌الدین قرن‌جیگ<sup>۳</sup>

۱- استادیار، گروه پژوهشی مواد رنگزای آلی، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳.

۳- استادیار، گروه پژوهشی مواد رنگزای آلی، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴.

۴- قطب علمی رنگ، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴.

تاریخ دریافت: ۹۵/۸/۲ تاریخ بازبینی نهایی: ۹۶/۱/۲۶ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱/۲۶ در دسترس به صورت الکترونیک: ۹۶/۱/۲۹

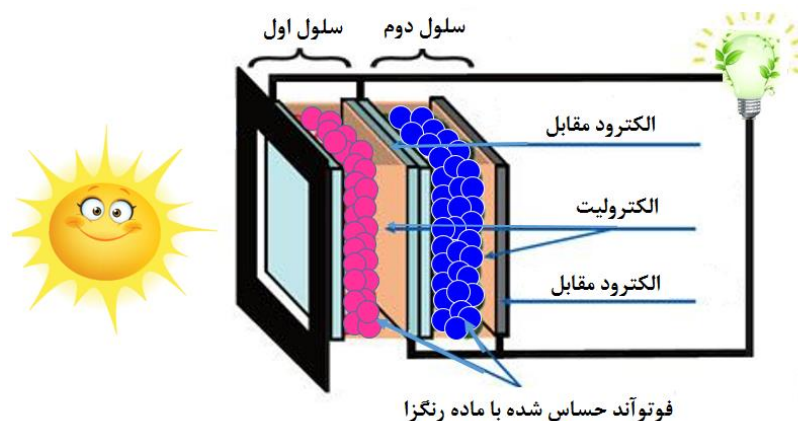
### چکیده

سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا به دلیل قیمت پایین و سهولت تولید مورد توجه می‌باشند. رویکرد جدید در این فناوری استفاده هم‌زمان از دو یا چند ماده رنگزا در یک سلول خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا تحت عنوان سلول خورشیدی دوپشته است. یک سلول خورشیدی دوپشته متشکل از حداقل دو زیر سلول بوده که هم‌زمان نور خورشید را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند، در نتیجه سلول خورشیدی دوپشته دارای بازده بالاتری نسبت به سلول‌های خورشیدی یکتا هستند. هدف از این مقاله ارائه آخرین دستاوردها در فناوری تولید سلول‌های خورشیدی دو پشته شامل مواد، اجزاء و اتصال آن‌ها است. در نهایت مختصری درباره چشم‌اندازها و عملکرد سلول‌های دوپشته بحث می‌شود.

### واژه‌های کلیدی

سلول خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا، دوپشته، فوتوکاتد، لایه میانی، ناهمگون.

### چکیده تصویری





## Review on Tandem Dye-Sensitized Solar Cells

Mozhgan Hosseinezhad<sup>\*1,3</sup>, Siamak Moradian<sup>2,3</sup>, Kamaladin Gharanjig<sup>1,3</sup>

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

2- Faculty of Polymer and Color Engineering, Amirkabir University of Technology, P. O. Box. 15875-4413, Tehran, Iran.

3- Center of Excellence for Color Science and Technology, Institute for Color Science and Technology, P. O. Box. 16765-654, Tehran, Iran.

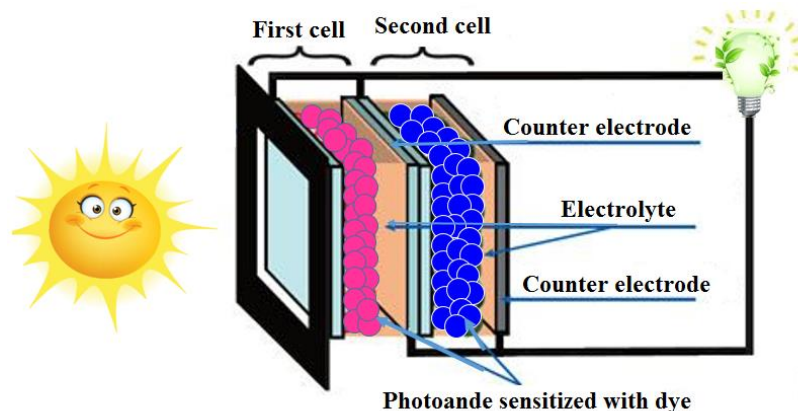
### Abstract

Dye-sensitized solar cells have attracted a great attention due to low cost and preparation facility. A novel advance in this technology is simultaneous use of two or further dyes of a solar cells namely tandem solar cells. A Tandem solar cell is a unique of solar cells form consisting of two sub-cells, which together convert sunlight into electricity energy and therefore tandem solar cells have higher power conversion efficiency than single solar cells. The purpose of this article is providing the latest progress in tandem solar cell technology with a focus on materials, ingredient and their interconnection. Finally, some brief outlook and performance of tandem solar cells are presented.

### Keywords

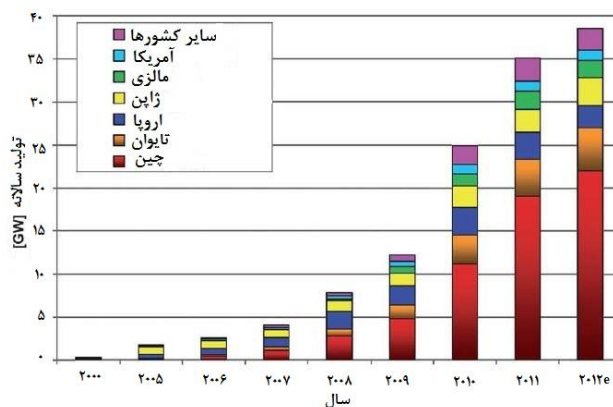
dye-sensitized solar cells, Tandem, photocathode, Interconnection layer, Heterojunction.

### Graphical abstract



## ۱- مقدمه

امروزه استفاده از انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر به دلیل آلودگی سوخت‌های فسیلی و پایان‌پذیر بودن آن‌ها، مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از مهم‌ترین منابع انرژی‌های تجدیدپذیر خورشید بوده که انرژی آن با استفاده از افزاره‌های فوتولتائیک به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود [۱]. افزاره‌های فوتولتائیک براساس جذب فوتون از نور خورشید، جدایش بار و در نهایت جمع‌شدن الکترون در فوتوآند، جریان الکتریکی تولید می‌کنند [۲]. تولید انرژی الکتریکی پاک مورد توجه جامعه پژوهشگران و صنعتگران است بطوریکه رشد مقالات پژوهشی در این حوزه در سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۴ بیش از ۱۰٪ بوده و رشد تجارت در همین بازه زمانی بیش از ۴۰٪ می‌باشد. شکل ۱ روند توسعه صنعت فوتولتائیک را نشان می‌دهد. بیش از ۸۰٪ این تجارت مربوط به نسل اول و دوم سلول‌های خورشید می‌باشد [۳]. چالش اصلی در این صنعت کاهش قیمت برای در دسترس قرار گرفتن این فناوری برای عموم مردم بخصوص برای استفاده خانگی می‌باشد. برای این منظور استفاده از سلول‌های خورشید آلی اهمیت چشمگیری یافته است [۴].

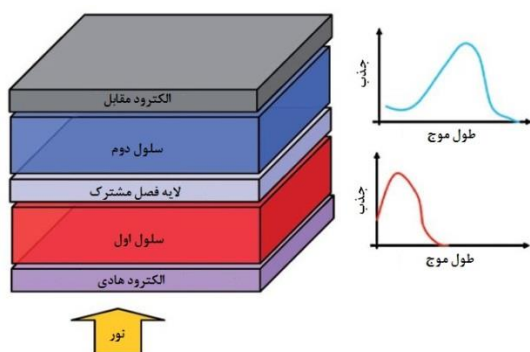


شکل ۱- روند توسعه صنعت فوتولتائیک [۳].

برای تولید سلول‌های خورشیدی نسل سوم از روش‌های متنوع لایه‌نشانی و چاپ استفاده می‌شود. با استفاده از یک خط تولید پیوسته برای تهیه سلول خورشیدی با میانگین بازده تبدیل ۵٪ می‌توان در یک روز در حدود  $50 \text{ W m}^{-2}$  انرژی الکتریکی تولید نمود. بدیهی است استفاده از روش‌های لایه‌نشانی مناسب تاثیر چشمگیری در بازده تولید دارد. به‌علاوه سرمایه‌گذاری در بسیاری از تجهیزات چاپ و لایه‌نشانی برای تولید این افزاره‌ها بسیار ارزان‌تر از سلول‌های خورشیدی معدنی است [۵]. یکی از جدیدترین فناوری‌ها در این حوزه سلول‌های خورشیدی دو پشته است. هدف این مقاله ارائه مهم‌ترین و آخرین دستاوردها در حوزه سلول‌های خورشیدی دوپشته است. برای این منظور ابتدا سلول‌های خورشیدی دوپشته را معرفی کرده سپس به تشریح آن‌ها می‌پردازیم. در پایان پیشنهادات برای بهبود مواد و طراحی ساخت این سلول‌ها ارائه می‌گردد.

## ۲- سلول‌های خورشیدی دو پشته

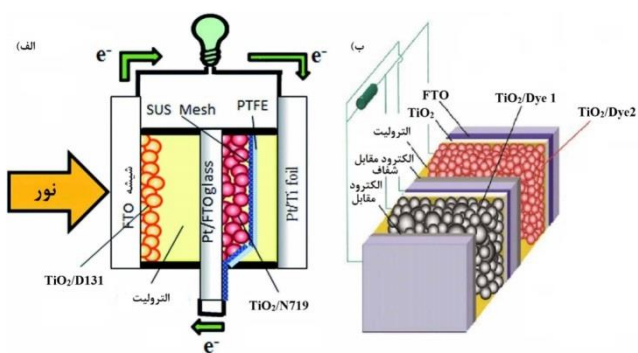
اساس عملکرد سلول خورشید بر پایه انتقال بار از بخش تولیدکننده الکترون به بخش جمع‌آوری‌کننده الکترون است. به صورت تجربی مشخص شده است که حداقل انرژی لازم برای انتقال بار در حدود  $1.3 \text{ eV}$  است [۶]. مهم‌ترین موانع در انتقال موثر بار ناشی از پدیده انتقال بین سیستمی و پدیده بازترکیب است. یکی از راه‌حل‌های برطرف نمودن هم‌زمان این دو نقص، سلول‌های خورشیدی دو پشته هستند. به عبارت دیگر استفاده از دو یا چند سلول خورشیدی به صورت پشت سرهم سبب تجمع پتانسیل بار تولیدی می‌گردد. تصویر شمایی سلول خورشیدی دو پشته در شکل ۲ نشان داده شده است [۷].



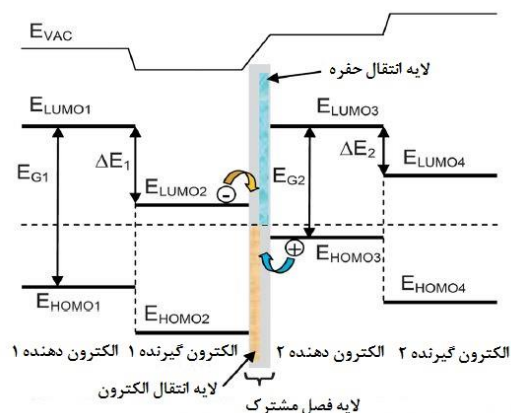
شکل ۲- تصویر شمایی سلول خورشیدی دو پشته [۷].

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، سلول خورشیدی دو پشته متشکل از دو سلول مجزا بوده که هر یک دارای سیستم الکترون‌دهنده الکترون‌گیرنده مستقل می‌باشند. نوری که در سلول اول جذب نمی‌شود در سلول دوم جذب می‌گردد [۷]. اتصال دو سلول با توجه به ماهیت لایه فصل مشترک به صوت سری یا موازی انجام می‌شود اما در اغلب موارد سلول‌ها به صورت سری به یکدیگر متصل می‌شوند [۸]. نمودار انرژی سلول‌های خورشیدی دوپشته در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، سطح فرمی لایه فصل مشترک باید مشابه سطح شبه فرمی بخش الکترون‌گیرنده سلول اول و بخش الکترون‌دهنده سلول دوم و افزاره سری باشد. به عبارت دیگر لایه فصل مشترک باید بتواند باترکیبی از حفره تولید شده توسط یک سلول، الکترون تولیدی سلول دیگر را فراهم کند [۹، ۴].

براساس قانون کیریشف، ولتاژ کل سیستم در این نوع اتصالات معادل مجموع ولتاژ هر یک از اجزاء می‌باشد اما جریان سلول خورشیدی دوپشته معادل جریان بدست آمده از جزء انتهایی است و عامل پرکنندگی کاملاً وابسته به افزاره تهیه شده است [۱۰]. محاسبات تئوری نشان می‌دهد افزایش بازده تبدیل در سلول‌های خورشیدی دوپشته حداقل ۴٪ بالاتر از بازده تبدیل هر یک از اجزاء به صورت یکتا است و در شرایط مناسب سلول‌های خورشیدی دوپشته توانایی ارائه بازده تبدیل بیش از ۱۵٪ را دارند. برای بدست آوردن این بازده لازم است یک سلول با شکاف باند  $1/6$  ولت به عنوان سلول پایینی با یک افزاره با شکاف باند  $1/3$  ولت به عنوان سلول بالایی سری شود [۱۱].



شکل ۴- سلول خورشیدی دوپشته حساس شده به مواد رنگزا، الف) سری و ب) موازی [۱۴].



شکل ۳- نمودار انرژی سلول خورشیدی دوپشته [۴].

دیور و همکارانش با استفاده از مواد رنگزای آلی با فام قرمز و مشکی، سلول خورشیدی دوپشته موازی با بازده تبدیل ۱۰/۵ درصد تهیه نمودند [۱۷]. مطالعات متعددی نیز بر روی ساخت سلول‌های خورشیدی سری/موازی انجام شده است. طراحی و ساخت این افزاره‌ها با عملکرد بهینه بسیار حساس است. زیرا اجزاء باید به گونه‌ای انتخاب و مجتمع شوند که حداکثر عبور نور انجام شود [۱۸].

سلول‌های خورشیدی دو پشته<sup>۱</sup> ترکیب سری فوتوکاتد نوع p و فوتوآند نوع n است. نمودار شمایی این نوع از سلول‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. نمودار انرژی نشان می‌دهد که ولتاژ مدار باز<sup>۲</sup> افزاره وابسته به اختلاف پتانسیل بین نوار ظرفیت فوتوالکترون نوع p و باند هدایت فوتوالکترون نوع n است [۱۹]. چنین سلول‌هایی برای اولین بار توسط هی و همکارانش ساخته شد [۲۰]. در این پژوهش یک الکترون با استفاده از دی‌اکسید تیتانیم حساس شده به ماده رنگزای N3 و یک الکترون دوم شامل اکسید نیکل پوشش داده شده با اریتروسین B تهیه و به صورت سری مجتمع گردید. ویژگی‌های فوتوولتائیک این سلول عبارتند از  $V_{oc}=732 \text{ mV}$ ،  $J_{sc}=2/26 \text{ mA cm}^{-2}$ ، بازده ۰/۳۹٪. مقدار فوتوجریان پایین این سلول ناشی از تطبیق نوری ضعیف فوتوکاتد می‌باشد. برای حل این نقص، ناتستاد و همکارانش سه ماده رنگزای آلی بدون فلز مناسب برای اکسید نیکل تهیه نمودند. در این مواد رنگزا از ترکیبات تیوفن در قسمت پل مزدوج استفاده شد. این ماده رنگزا دارای گروه‌های الکترون‌دهنده جدید از نوع سیانیدین بوده که پیوندهای تشکیل شده بر روی سطح فوتوآند را بهبود می‌دهد که این پیوندها سبب افزایش دودرصدی در بازده تبدیل می‌شود [۲۱].

بازده تبدیل در افزاره‌های pn-DSSC نسبت به روش حساس‌سازی چندگانه پایین‌تر است [۲۲]. به عنوان مثال دو ماده رنگزای سنتز شده بر پایه ایندولین [۲۳] دارای بازده تبدیل در ۶٪ در روش حساس‌سازی دوگانه دارند [۲۴] اما بازده تبدیل آنها در سلول خورشیدی دوپشته در حدود یک درصد پایین‌تر است. برای حل این نقص اغلب مطالعات بر روی تهیه فوتوکاتد بهینه متمرکز شده است [۲۵-۲۸].

### ۳- سلول‌های دوپشته حساس شده به مواد رنگزا

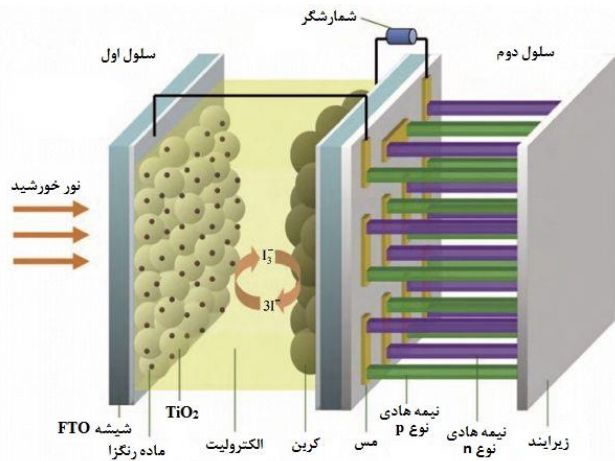
یکی از روش‌های موثر برای افزایش بازده سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا جایگزینی پیکربندی یگانه با چند سلول سری است. در این حالت برداشت نور فرودی به دلیل استفاده هم‌زمان چند ماده رنگزا با طیف جذبی مکمل افزایش یافته در نتیجه بازده تبدیل در سلول‌های خورشیدی دوپشته بهبود می‌یابد. به عبارت دیگر محدودیت‌هایی که برای دستیابی به بازده بالا (بیش از ۲۰٪) که در سلول‌های خورشیدی یکتا وجود دارد در این افزاره‌ها دیده نمی‌شود [۱۲]. در مجموع سلول‌های خورشیدی دو پشته حساس شده به مواد رنگزا به سه طبقه کلی طبقه‌بندی می‌شوند که عبارتند از: ۱- دو و یا چند سلول خورشیدی حساس شده به مواد رنگزای یگانه که به یکدیگر متصل شده‌اند. ۲- ترکیبی از فوتوکاتد حساس شده به ماده رنگزا و فوتو آند حساس شده به ماده رنگزا (pn-DSSC) و ۳- ترکیبی از سلول خورشیدی حساس شده به ماده رنگزا با سایر انواع سلول‌های خورشیدی (هیبریدی) [۱۳].

ساده‌ترین ساختار سلول خورشیدی دو پشته، اتصال دو سلول خورشیدی یگانه به یکدیگر است. این اتصال ممکن است به صورت سری (ST-DSSC) و یا موازی (PT-DSSC) باشد که هر یک دارای مزایای منحصر به فردی است (شکل ۴). با توجه به اینکه فوتون با طول موج کوتاه‌تر دارای انرژی بالاتری است، می‌توان سلول‌های دوپشته سری را طوری تنظیم کرد که ولتاژ بالایی بدست آید و در سلول‌های موازی با استفاده از مواد مناسب فوتوجریان بدست آمده را در بالاترین مقدار تنظیم نمود [۱۴].

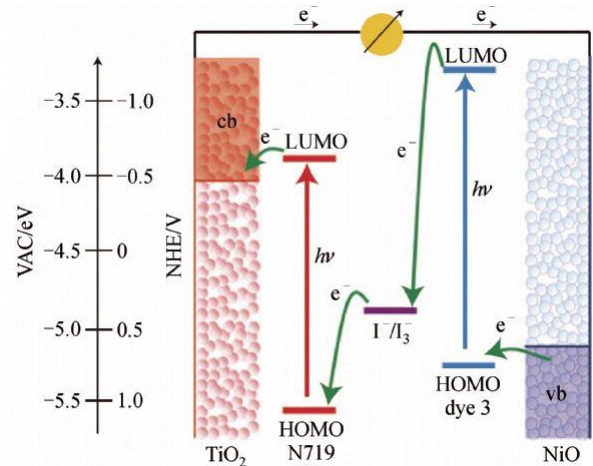
یاماگوچی و همکارانش ترکیبات متنوعی از مواد رنگزا را در ساخت سلول‌های خورشیدی دوپشته سری بکار بردند و بازده ۱۰/۴ درصد را بدست آوردند [۱۵]. کینوشیتا و همکارانش با استفاده از مواد رنگزای آلی بر پایه مواد تیوفن و کمپلکس آلی-معدنی روتنیم موفق به ساخت سلول‌های خورشیدی دوپشته سری با بازده ۱۲٪ شدند. تحقیقات نشان می‌دهد در سلول‌های دوپشته سری ضخامت سلول بالا تاثیر مستقیمی بر روی فوتوولتاژ و در نتیجه بازده تبدیل دارد [۱۶].

<sup>1</sup> pn-DSSC

<sup>2</sup>  $V_{oc}$



شکل ۶- تصویر شمایی سلول خورشیدی دوپشته هیبریدی [۳۱].



شکل ۵- نمودار شمایی سلول خورشیدی دو پشته npDSSC [۱۹].

بر اساس همین روش موون و همکارانش یک سلول خورشیدی دوپشته هیبریدی با بازده بیش از ۱۳٪ تهیه نمودند درحالیکه بازده تبدیل سلول خورشیدی حساس شده به ماده رنگزای ایندولینی معادل ۷/۲۵٪ و بازده تبدیل سلول معدنی ۶/۲٪ بود [۳۶]. در سلول خورشیدی هیبریدی می‌توان از ترکیب آرسنید گالیم در بخش معدنی استفاده نمود. در شرایط مشابه بازده تبدیل سلول خورشیدی هیبریدی در حدود ۱۴٪ خواهد بود [۳۷].

باید توجه نمود که کاربرد یک ماده رنگزای مناسب در ساخت سلول‌های دوپشته حساس شده به مواد رنگزا به اندازه لایه‌نشانی، الکترولیت، اتصال مناسب دارای اهمیت است. براساس مطالعات انجام شده بهترین مواد رنگزای مناسب برای کاربرد در سلول‌های دوپشته حساس شده به مواد رنگزا در جدول ۱ خلاصه شده‌اند.

#### ۴- چشم‌انداز سلول خورشیدی دوپشته

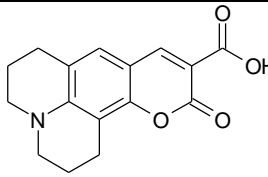
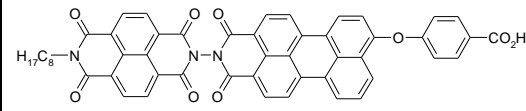
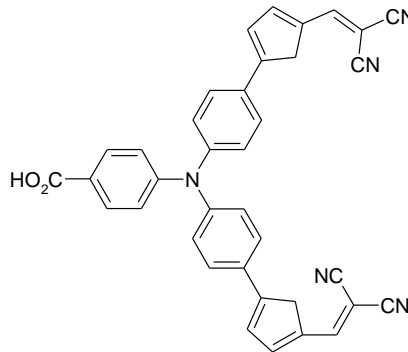
بدیهی است چالش‌هایی در مورد افزایش بازده تبدیل سلول‌های خورشیدی دوپشته حساس شده به مواد رنگزا وجود دارد. بخش عمده این چالش‌ها مربوط به تهیه فوتوکاتد است. اهداف مورد نظر، تهیه مواد رنگزای مناسب جاذب ناحیه زیرقرمز و نیمه‌هادی‌های مطلوب، برای تولید ولتاژهای بالاتر است. پیشرفت در زمینه تهیه مواد رنگزای آلی با سرعت بیشتری پیش می‌رود اما جایگزینی دی‌اکسید تیتانیم با ترکیبی که دارای باند هدایت مناسب باشد نسبتاً پیچیده است. گزینه‌ای که امروزه مورد توجه می‌باشد، اکسید نیکل است. هرچند این ترکیب نیز دارای معایبی می‌باشد [۴۰]. علاوه بر موارد بالا تحقیقات متعددی بر روی مباحث برداشت نور پارازیتی [۴۱]، بهینه‌سازی الکترولیت [۴۲]، کاهش بازترکیب، افزایش عامل پرشوندگی [۴۳] و پایداری افزاره [۴۴] در حال انجام است تا بتوان یک سلول خورشیدی دوپشته بهینه تهیه نمود.

البته تمام اجزاء سلول‌های خورشیدی دوپشته از جمله مواد رنگزا، نیمه‌هادی نوع p و الکترولیت نقش تعیین‌کننده‌ای بر روی بازده تبدیل این نوع از سلول‌های خورشیدی دارد. با توجه به اینکه این رویکرد یک فناوری بسیار جدید است، نتایج بدست آمده هرچند ضعیف بسیار امیدوار کننده است [۲۹]. به‌علاوه در فناوری pn-DSSC الکتروند شمارنده پلاتین استفاده نمی‌شود. با این تغییر فرآیندها و هزینه‌های تولید این الکتروند حذف می‌شود که نقش چشمگیری در کاهش قیمت سلول‌های خورشیدی برای کاربرد عمومی دارد [۳۰].

سلول‌های خورشیدی دوپشته هیبریدی یک گزینه فوق‌العاده ایده‌آل برای دستیابی به بازده‌های تبدیل بالا (۲۰٪) است. در این افزاره‌ها شکاف باند سلول اول در حدود ۱/۷ ولت و سلول دوم ۱/۱ ولت است [۳۱]. لیسکا و همکارانش برای اولین بار در سال ۲۰۰۶ یک سلول خورشیدی دوپشته هیبریدی شامل یک سلول خورشیدی حساس شده به ماده رنگزا در سلول بالا برای جذب فوتون‌های پرنانرژی و فیلم نازک سلنید گالیم به عنوان سلول پایین برای جذب فوتون‌های کم انرژی تهیه نمودند. بازده تبدیل این سلول خورشیدی در حدود ۱۵٪ گزارش شد که نتیجه‌ای امیدوارکننده برای دستیابی به بازده بالا در این فناوری است [۳۲]. نکته مهم در این افزاره‌ها، عدم هماهنگی در زمان پاسخ و محدوده جذب دو سلول سری شده است. برای حل این مشکل، ژئونگ و همکارانش شرایط این افزاره‌ها را در حالت AC شبیه‌سازی نمودند. نتایج نشان داد که بیشترین هماهنگی در بسامد ۱۰ هرتز بدست می‌آید [۳۳].

یکی از عوامل کلیدی محدودکننده کاربرد سلول‌های خورشیدی دوپشته هیبریدی، محدودیت بازده تبدیل آن‌ها به دلیل محدودیت عبور نور از دومین سلول سری شده می‌باشد [۳۴]. وانگ و همکارانش با استفاده از بسترهای اکسید هادی شفاف که یک جاذب قوی در ناحیه زیرقرمز هستند، این مشکل را برطرف نمودند. این بستر با استفاده از روش قوس پلاسما بر روی زیرآیند، لایه نشانی گردید که در این حالت آسیب به سلنید گالیم به حداقل می‌رسد. بازده تبدیل این افزاره ۱۴/۶ درصد گزارش شد [۳۵].

جدول ۱- مواد رنگزای آلی منتخب برای کاربرد در سلول‌های خورشیدی دوپشته.

شماره	نام	ساختار شیمیایی	توضیح	راندمان تبدیل (%)	مرجع
۱	کومارین ۳۴۳		ماده رنگزای تجاری قابل استفاده در pnDSSC	۱۰/۵	[۳۸]
۲	پرلین ایمید نفتالیمید PI-NDI		اولین ماده رنگزای دهنده-گیرنده تهیه شده برای افزاره های pnDSSC	۶/۸	[۲۶]
۳	PI		بالاترین IPCE در افزاره-های pnDSSC و این ترکیب به صورت تجاری موجود است.	۳/۸	[۳۹]

## ۵- نتیجه گیری

موازی تهیه می‌گردد که هر یک مزایا و معایب مخصوص به خود را دارند. سلول‌های خورشیدی دوپشته به سه طبقه کلی تقسیم می‌شوند که عبارتند از: ۱- دو یا چند سلول خورشیدی یگانه متصل به یکدیگر، ۲- ترکیبی از فوتوکاتد و فوتوآنود حساس شده به مواد رنگزای متفاوت و ۳- سلول‌های خورشیدی دوپشته هیبریدی. سلول‌های خورشیدی دوپشته هیبریدی یک گزینه فوق‌العاده عالی برای دستیابی به بازده‌های تبدیل بالا هستند. در این فناوری یک سلول خورشیدی حساس شده به ماده رنگزا با یک سلول خورشیدی فیلم نازک سری می‌شود که اغلب بازده آن‌ها بیش از ۱۵٪ است. امروزه تحقیقات متعددی برای تهیه یک سلول خورشیدی بهینه بر روی تمام اجزاء آن در حال انجام است.

سلول‌های خورشیدی نسل سوم به عنوان یک فناوری رقابتی بسیار مهم برای تولید انرژی در نظر گرفته می‌شود. مطالعات و پژوهش‌های متعددی به منظور بهبود بهره‌وری سلول خورشیدی، افزایش ثبات و کاهش هزینه‌ها در حال انجام است. برای دستیابی به این اهداف ضروری است تمام اجزاء سلول خورشیدی شامل نیمه‌هادی‌ها، مواد رنگزا و الکترولیت و البته مونتاژ این افزاره‌ها توسعه پیدا کند. مدل‌های توسعه یافته بهینه می‌تواند انرژی را در زمان کمتر و با هزینه پایین‌تر تولید کند. سلول‌های خورشیدی دوپشته یک گزینه عملی برای بهبود بهره‌وری و افزایش ثبات است. سلول‌های خورشیدی از اتصال دو افزاره مجزا به صورت سری و یا

## ۶- مراجع

۱. م. حاتموند، س. ع. میرجلیلی، م. شرزئی، ن. ترابی میرزایی، "سلول‌های خورشیدی لیفی شکل: ساختار، عملکرد، محدودیت‌ها و چالش‌ها"، نشریه علمی-ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، ۶، ۴۸-۳۹، ۱۳۹۵.
۲. س. کیانی، ع. صباغ الوانی، م. خراسانی، ش. موسی‌خانی، "سلول‌های خورشید پلیمری: ساختار، عملکرد و روش‌های بهبود بازدهی"، نشریه علمی-ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، ۲، ۱۱-۶، ۱۳۹۱.

3. A. Jager-Waldau, "PV Status Report 2007: Institute for Environment and Sustainability", European Commission, 2007.
4. T. Ameri, N. Li, C.J. Brabec "Highly efficient organic tandem solar cells: a follow up review", Energy Environ. Sci.6, 2390-2413, 2013.
5. C. J. Brabec, J. A. Hauch, P. Schilinsky, C. Waldauf, "Production Aspect of organic photovoltaic and their impact on the commercialization of device", MRS Bull. 30, 50-52, 2005.
6. G. Dennler, N. S. Saricific, C. J. Brabec, "Conjugated

- polymer based organic solar cells in semiconducting polymers”, 2<sup>nd</sup> edit., Wiley-VCH verlag GmbH, Weinheim, **2006**.
7. T. Ameri, G. Dennler, C. Lungenschmied, C. J. Brabec, “Organic tandem solar cells: A review”, *Energy Environ. Sci.*, 2, 347-363, **2009**.
  8. G. Li, Y. Yang, “Recent trends in polymer tandem solar cells”, *Prog. Poly. Sci.*, 38, 1909-1928, **2013**.
  9. V. Steinmann, T. E. Umbach, M. Schadel, J. Krumarine, M. R. Lenze, H. Burckstummer, F. Wurthner, K. Meerholz, “An efficient merocyanin/zinc phthalocyanine tandem solar cell”, *Org. Electron.*, 14, 2029-2033, **2013**.
  10. A. Hadipour, B. deBoer, P. W. M. Blom, “Device operation of organic tandem solar cells”, *Org. Electron.*, 9, 617-624, **2008**.
  11. G. Dennler, M. C. Scharber, T. Ameri, P. Denk, K. Forberich, C. Waldauf, C. J. Brabec, “Design rules for donor in bulk heterojunction tandem solar cell: towards 15% energy conversion efficiency”, *Adv. Mater.*, 20, 579-583, **2008**.
  12. J. Gong, K. Sumathy, Q. Qiao, Z. Zhou, “Review on advanced and research trends”, *Rev. Sustain. Energy Rev.*, 68, 234-246, **2017**.
  13. M. Yanagida, N. Onozawa-Komatsuzaki, M. Kurashige, K. Sayama, H. Sugihara, “Optimization of tandem-structured dye-sensitized solar cells”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cell*, 94, 297-302, **2010**.
  14. A. K. Baranwal, T. Shiki, Y. Ogomi, S. S. Pandey, T. Ma, S. Hayase, “Tandem dye-sensitized solar cells with a black-contact bottom electrode without a transparent conductive oxide layer”, *RCS Adv.*, 4, 47735-47742, **2014**.
  15. T. Yamaguchi, Y. Uchida, S. Agatsuma, H. Arakawa, “Series connected tandem dye-sensitized solar cell for improving efficiency to more than 10%”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cell*, 93, 733-736, **2009**.
  16. T. Kinoshita, J. T. Dy, S. Uchida, T. Kubo, H. Segawa, “Wideband dye-sensitized solar cells employing a phosphine coordinated ruthenium sensitizer”, *Nat. Photonics*, 7, 535-539, **2013**.
  17. M. Durr, A. Bamedi, A. Yasuda, G. Nelles, “Tandem dye-sensitized solar cell for improved power conversion efficiencies”, *Appl. Phys. Lett.*, 84, 3397-3399, **2004**.
  18. P. Qin, H. Zhu, T. Edvinsson, G. Boschloo, A. Hagfeldt, L. Sun, “Design of an organic chromophore for p-type dye-sensitized solar cells”, *J. Am. Chem. Soc.*, 130, 8570-8572, **2008**.
  19. V. V. Travkin, G. L. Pakhomov, A. Y. Lukyanov, D. Ma, “Fully organic dye based tandem photovoltaic cell”, *Synthetic Met.*, 200, 99-101, **2015**.
  20. J. He, H. Lindstrom, S. E. Linquist, “Dye-sensitized nanostructured tandem cell-first demonstrated cell with a dye sensitized solar cells”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cell*, 62, 265-273, **2000**.
  21. A. Nattestad, A. J. Mozer, M. K. Fischer, Y. B. Cheng, A. Mishra, P. Bauerle, U. Bach “Highly efficient photocathodes for dye-sensitized tandem solar cells”, *Nat. Mater.*, 9, 31-5, **2010**.
  22. L. Li, E. A. Gibson, P. Qing, G. Boschloo, M. Gorlov, A. Hagfeldt, “Double-layered NiO photocathode for p-types DSSCs with record IPCE”, *Adv. Mater.*, 22, 1759-1762, **2010**.
  23. M. Hosseinezhad, S. Moradian, K. Gharanjig, “Synthesis and application of two organic dyes based on indoline in dye-sensitized solar cells”, *Prog. Color Colorants Coat.*, 8, 309-315, **2015**.
  ۲۴. م. حسین نژاد، س. مرادیان، ک. قرنچیگ، “بررسی خواص فوتوولتائیک سلول‌های خورشیدی بر پایه مواد رنگزای ایندولینی”، نشریه علمی-پژوهشی علوم و فناوری رنگ، ۹، ۳۰۷-۳۱۲، **۱۳۹۴**.
  25. M. Borgstrom, E. Blart, G. Boschloo, E. Muktar, A. Hagfeldt, L. Hammarstrom “Sensitized hole injection of phosphorus porphyrin into NiO; Toward new photovoltaic devices”, *J. Phys. Chem. B.*, 109, 22928-22934, **2005**.
  26. A. Morandeira, J. Fortage, T. Edvinsson, L. Lepleux, E. Blart, G. Boschloo, A. Hagfeldt, L. Hammarstrom, F. Odobel, “Improved photon-to-current conversion efficiency with a nanoporous p-type NiO electrode by the use of a sensitizer-acceptor dyad”, *J. Phys. Chem. C.*, 112, 1721-1728, **2008**.
  27. S. Mori, S. Fukuda, S. Sumikura, Y. Takeda, Y. Tamaki, E. Suzuki, T. Abe, “Charge-transfer processes in dye-sensitized NiO solar cells”, *J. Phys. Chem. C.*, 112, 16134-16139, **2008**.
  28. F. Vera, R. Schrebler, E. Munoz, C. Suarez, P. Cury, H. Gomez, R. Cordova, “Preparation and characterization of eosin b and erythrosine jisensitized nanostructured NiO thin film photocathodes”, *Thin Solid Film*, 490, 182-188, **2005**.
  29. H. Zhu, A. Hagfeldt, G. Boschloo, “Photoelectrochemistry of mesoporous NiO electrodes in iodide/triiodide electrolyte”, *J. Phys. Chem. C*, 111, 17455-17458, **2007**.
  30. P. Ho, L. Q. Bao, K. S. Ahn, R. Cheruku, J. H. Kim, “P-type dye-sensitized solar cells: enhanced performance with NiO compact blacking layer”, *Synthetic Met.*, 217, 314-321, **2016**.
  31. D. Xiang, W. Chen, “Recent progress on tandem structured dye-sensitized tandem solar cells”, *Front Optoelec.*, 5, 371-389, **2012**.
  32. P. Liska, T. Thampi, M. Gratzel, H. Upadhyaya “Nanocrystalline dye-sensitized solar cell/copper indium gallium selenide thin film tandem showing greater than 15% conversion efficiency”, *Appl. Phys. Lett.*, 88, 203103, **2006**.
  33. W. S. Jeong, J. W. Lee, S. Jung, J. H. Yum, N. G. Park, “Evaluation of external quantum efficiency of 12.35% tandem solar cell comprising dye-sensitized and CIGS solar cells”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cell*, 95, 3419-3423, **2011**.
  34. S. Albrecht, B. Grootoonk, S. Neubert, S. Roland, J. Wordenweber, M. Meier, R. Schlattmann, A. Gordijin, D. Neher, “Efficient hybrid inorganic/organic tandem solar cells with tailored recombination contacts”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cell*, 127, 157-162, **2014**.
  35. W. Wng, H. Lin, J. Zhang, X. Li, A. Yamada, M. Konagsim J. B. Li, “Experimental and simulation analysis of the dye-sensitized solar cell/Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cell tandem structure”, *Sol. Energy Mater. Solar Cell*, 94, 1753-1758, **2010**.
  36. S. H. Moon, S. J. Park, S. H. Kim, M. W. Lee, J. Han, J. Y. Kim, H. Kim, Y. J. Hwang, D. Lee, B. K. Min, “Monolithic DSSC/CIGS tandem solar cell fabrication by a solution process”, *Sci. Rep.*, 5, 8500-8511, **2015**.
  37. W. Tang, W. Yang, Y. Yang, C. Sun, Z. Cai, “GaAs film for photon-enhanced thermionic emission solar harvesters”, *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 25, 142-147, **2014**.
  38. A. Nakasa, E. Suzuki, H. Usami, H. Fujimatsu, “Synthesis of porous nickel oxide nanofiber”, *Chem. Lett.*, 34, 428-429, **2005**.
  39. P. Qin, M. Linder, T. Brink, G. Boschloo, A. Hagfeldt, L. Sun, “High incident photon-to-current conversion efficiency of p-type dye-sensitized solar cells based on NiO and organic chromophores”, *Adv. Mater.*, 21, 2993-2996, **2009**.
  40. L. Qin-Ping, H. Hui-Jang, Z. Yang, D. Yan, S. Qin-Wen, L. Yuan, “Photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells based on Al-doped TiO<sub>2</sub> thin film”, *ACTA Phys. Chim. Sin.*, 28, 591-595, **2012**.
  41. T. Daeneke, Z. Yu, G. P. Lee, D. Fu, N. W. Duffy, S. Makuta, Y. Tachibana, A. Mishra, P. Bauerle, U. Bach, “Dominating energy losses in NiO p-type dye-sensitized solar cells”, *Adv. Energy Mater.*, 5, 1-9, **2015**.
  42. I. Perera, T. Daeneke, S. Makuta, Z. Yu, Y. Tachibana, A.

- Mishra, P. Bauerle, A. Ohlin, U. Bach, L. Spiccia, "Application of the Tri(acetylacetonato)iron (II) redox couple in p-type dye-sensitized solar cells", *Angew. Chem. Ed.* 54, 3758-3762, **2015**.
43. L. D-Amario, G. Boschloo, A. Hagfeldt, L. Hammarstrom, "Tuning of conductivity and density of state of NiO mesoporous films used in p-type DSSCs", *J. Phys. Chem. C* 118, 19556-19564, **2014**.
44. L. Zhang, G. Boschloo, L. Hammarstrom, H. Tian, "Solid state p-type dye-sensitized solar cells: concept, experimental and mechanism", *Phys. Chem. Chem. Phys.* 18, 5080-5085, **2016**.