https://doi.org/10.22034/jrenew.2026.234428

سال سیزدهم، شماره اول، بهار و تابستان 1405، ص ص 164- 172

فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir

Online ISSN 2676-2994 Print ISSN 2423-4931

مقاله ترویجی

تاریخ دریافت: 1403/08/06

تاریخ پذیرش: 404/06/13

نگاهی نو بر استفاده از نانومواد و بیو نانومواد در ساخت سلول‌های خورشیدی و تأثیر آن بر بازده آنها

علی قربانی[1]*، ترحم مصری گندشمین[2]

1- دانشجوی دکتری انرژی‌های تجدیدپذیر، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

2- استاد گروه آموزشی مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

*میاندوآب، 5971934535، Ali.ghorbani@uma.ac.ir

چکیده

با افزایش روزافزون تقاضا بر میزان انرژی، نرخ عرضه آن در آینده نزدیک کاهش می‌یابد. ازآنجایی‌که ذخایر سوخت‌های فسیلی به‌سرعت در حال کاهش است، راندمان پایین تبدیل انرژی و بازیافت آن‌ها، فن آوری‌های پیچیده ساخت و هزینه بالای سلول‌های خورشیدی به محدودکننده‌ترین پارامتر سلول‌های خورشیدی است. نانوتکنولوژی پیشرفت‌های شگرفی را در سبک زندگی انسان به ارمغان آورده است که می‌توانیم از نانوتکنولوژی برای اهداف انرژی سبز و ساخت سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر استفاده کنیم. این روزها مواد بیو نانو (نانو زیستی) وسعت بیشتری از نانوتکنولوژی را دربرگرفته و تأثیرات باورنکردنی خود را در کاهش چالش‌های مخاطره‌آمیز مختلف کوتاه‌مدت و بلندمدت شکوفا می‌کند. از دلایلی که انرژی خورشیدی را بسیار محبوب کرده مقرون‌به‌صرفه بودن، تعمیر و نگهداری کم و قابلیت اطمینان منبع انرژی است. مواد طبیعی مقرون‌به‌صرفه و سازگار با محیط‌زیست جایگزین بسیاری از مواد شیمیایی مورداستفاده در سلول‌های خورشیدی به‌عنوان برداشت‌کننده نور خورشیدی شده است. علاوه بر این، مواد بیولوژیکی هیبرید شده در سلول‌های خورشیدی نیمه‌هادی قادر به ارائه بازدهی بالا هستند. بیو نانومواد‌های مختلفی مانند نانو سلولز، پروتئین‌های باکتری رودوپسین، مواد زیستی پیزوالکتریک و ترموالکتریک آلی به‌عنوان مواد سلول خورشیدی نسل جدید در حال بررسی هستند. سلول‌های خورشیدی حساس شده با مولکول‌های زیستی نیز به‌عنوان مولدهای برق فتوولتائیک مقرون‌به‌صرفه محبوب شده و مشکل بازیافت آن‌ها را مرتفع می‌کند. دلیل اصلی در استفاده از مواد گیاهی در سلول‌های خورشیدی، نیاز به جایگزینی اجزای گران‌قیمت، انرژی بر، کمیاب و یا تجدیدناپذیر است.

کلیدواژگان: سلول‌های خورشیدی، نانومواد، سوخت پاک، بیو نانومواد، انرژی‌های تجدیدپذیر، بازیافت سلول خورشیدی

A new perspective on the use of nanomaterials and bio-nanomaterials in the construction of solar cells and their impact on efficiency

Ali Ghorbani[1] *, Tarhom Mesri Gndushmian[2]

1- PhD Student in Renewable Energy, Department of Biosystem Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Professor of the Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran

*Miandoab, 5971934535, Ali.ghorbani@uma.ac.ir

Received: 27 October 2024 Accepted: 04 August 2025

Abstract

With the increasing demand for energy, the supply rate is expected to decline in the near future. As fossil fuel reserves are rapidly depleting, the low efficiency of energy conversion and recycling, along with the complex technologies and high costs of solar cells, have become the most limiting factors for solar cells. Nanotechnology has brought remarkable advancements to human lifestyles, and we can utilize nanotechnology for green energy purposes and the construction of renewable energy systems. Nowadays, bio-nano materials (biological nanomaterials) encompass a broader scope of nanotechnology and are demonstrating their incredible impacts in reducing various short-term and long-term hazardous challenges. One of the reasons solar energy has become very popular is its cost-effectiveness, low maintenance, and reliability as an energy source. Affordable and environmentally friendly natural materials have replaced many of the chemical substances used in solar cells as light harvesters. Additionally, hybrid biological materials in semiconductor solar cells are capable of providing high efficiency. Various bio-nanomaterials such as nanocellulose, bacteriorhodopsin proteins, and organic piezoelectric and thermoelectric biomaterials are being investigated as next-generation solar cell materials. Solar cells sensitized with biological molecules have also gained popularity as cost-effective photovoltaic generators, addressing their recycling issues. The main reason for using plant materials in solar cells is the need to replace expensive, energy-intensive, scarce, or non-renewable components.

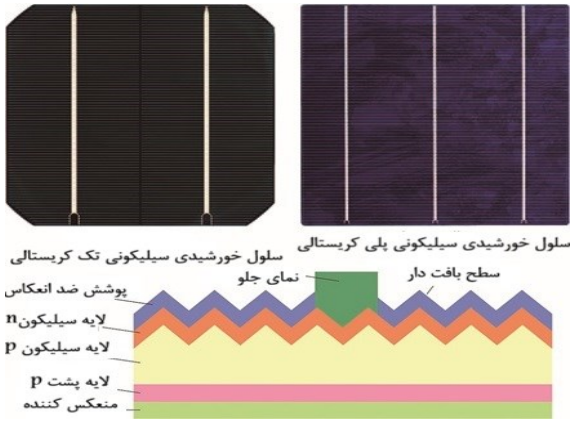
Authors retain the copyright and full publishing rights. This article is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Keywords: Solar cells, nanomaterials, clean fuel, bio-nanomaterials, renewable energies, solar cell recycling

1- مقدمه

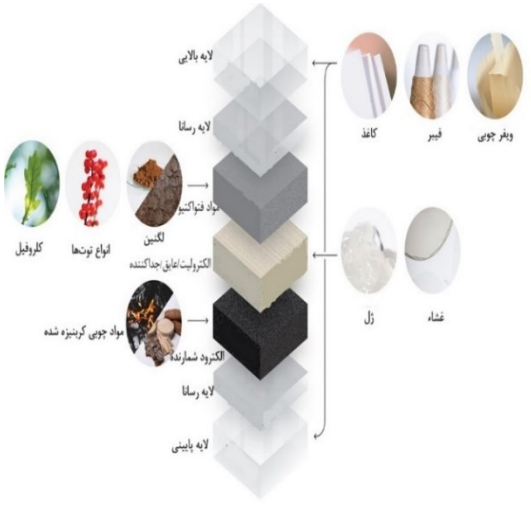
مواد مبتنی بر زیست، از جمله زیست توده گیاهی، منبع اصلی انرژی برای بشر در طول حیات خود بوده است. در جامعه مدرن، انرژی خورشیدی یکی از منابع مهم انرژی محسوب می‌شود که پتانسیل برآورده کردن تقاضای جهانی انرژی را دارد. در همین حال، در کنار استفاده سنتی از انرژی خورشید، مواد گیاهی تجدیدپذیر می توانند به عنوان قسمت پایه برای سلول های خورشیدی عمل کنند. به‌طورکلی، امکان دریافت انرژی خورشیدی در اغلب نقاط جهان جهت استفاده در انواع روش‌های تبدیل انرژی وجود دارد. به‌عنوان‌مثال، در فناوری فتوولتائیک امکان تبدیل مستقیم نور خورشید به جریان الکتریکی و استحصال کربوهیدرات‌های پیچیده از گیاهان مختلف برای تولید برق یا سوخت‌های زیستی وجود دارد [1]. طبق پیش‌بینی‌های اخیر، جهان تا سال 2050 به 50 تریلیون وات انرژی برای حفظ پیشرفت اقتصادی نیاز دارد. با توجه به شواهد، انرژی خورشیدی بهترین منبع برای حل بحران انرژی است[2].

فتوولتائیک به‌عنوان یک فرآیند تبدیل انرژی، محوری در تولید و انتقال انرژی در جهانی ظاهر شده است و گام‌های قابل‌توجهی در پیشرفت روش‌های تولید و مواد به دست آورده است. مسیر تکاملی فناوری سلول خورشیدی از زمان اختراع آن سه نسل اصلی را در برمی‌گیرد. نسل اول سلول‌های خورشیدی، عمدتاً از سیلیکون تک کریستالی و پلی کریستالی تشکیل شده که بیش از 80٪ از پنل‌های خورشیدی مسکونی را تشکیل می‌دهد. قابل‌ذکر است که رکورد کارایی سلول‌های خورشیدی کریستالی 27.6 درصد است (شکل 1)[3]. سلول‌های خورشیدی نسل دوم که به‌عنوان سلول‌های خورشیدی لایه‌نازک نیز شناخته می‌شوند، از لایه‌های بسیار نازک ساخته شده‌اند که معمولاً تنها چند میکرومتر ضخامت دارند. در حال حاضر، تحقیقات قابل‌توجهی به توسعه سلول‌های خورشیدی نسل سوم اختصاص‌داده‌شده است. این فناوری‌های نوظهور مجموعه متنوعی از نیمه‌هادی‌ها را در برمی‌گیرند که شامل رنگ‌های آلی، پروسکایت‌ها، پلیمرهای آلی و نقاط کوانتومی است [4]. هدف اصلی نسل سوم سلول‌های خورشیدی، دستیابی به راندمان تبدیل توان بالا و درعین‌حال اطمینان از مقرون‌به‌صرفه بودن در فرایندهای تولیدی مختلف مانند چاپ، سلول‌های خورشیدی پروسکایت طراحی، تولید و به راندمان 26.1 درصد دست می‌یابند [3].



شکل 1 سلول های خورشیدی سیلیکونی تک کریستالی و پلی کریستالی معمولی (بالا) و سطح مقطع ساده شده یک سلول خورشیدی سیلیکونی تک کریستالی تجاری (پایین).

مواد گیاهی می‌توانند عملکردهایی را ارائه دهند که برای مواد معمولی امکان‌پذیر نیست. به‌عنوان‌مثال، خواص نوری ساختارهای مبتنی بر چوب و نانوالیاف سلولزی را می‌توان به‌گونه‌ای طراحی کرد که از شیشه و پلاستیک‌های معمولی پیشی بگیرد. آئروژل‌ها[1] به علت ویژگی‌های خاص خود، مانند ساختار سبک، سطح بزرگ و توانایی جذب و نگهداری مایعات، می‌توانند به بهبود انتقال یون‌ها و کاهش تبخیر در سیستم‌های الکترولیتی کمک کنند. این ویژگی‌ها می‌تواند به کاهش تلفات انرژی و بهبود کارایی سلول‌های خورشیدی منجر شود. الیاف گیاهی، کاغذ، چوب و کامپوزیت های چوبی، منسوجات بافته شده و نبافته، و همچنین نانوسلولزهای نوظهور به شکل ژل های هیدرو ارگانوژل[2]، غشاء و لایه های نازک، می توانند برخی از الزامات فتوولتائیک را برآورده کنند (شکل 2) [48].



شکل 2 تصویر شماتیکی از اجزای ممکن فعال و غیرفعال مبتنی بر گیاه در فتوولتائیک

1 Aerogels

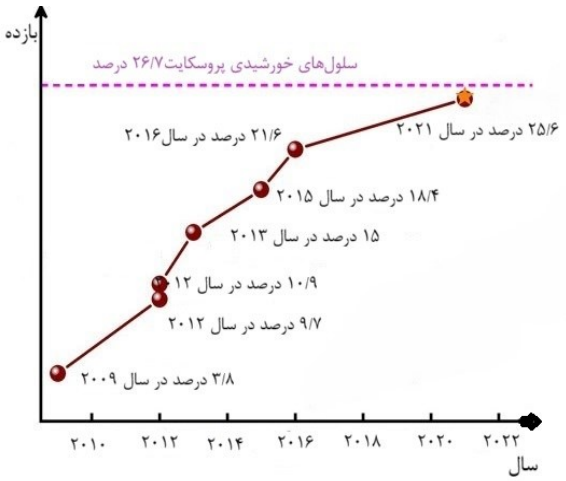
2 Hydro-organogel

نانومواد زیستی، مواد مولکولی که به طور کامل یا جزئی از مولکول‌های زیستی فرموله شده‌اند و باعث تشکیل ساختارهای مولکولی با ابعاد نانو می‌شوند. مواد ساخته شده کاربردهای زیادی اعم از تولید انرژی یا اتصال مواد، الیاف و حسگرها دارند [4]. از طرفی نگرانی حاصل از مشکل بازیافت سلول‌های خورشیدی معمولی و استفاده روزافزون انرژی برای پیشرفت جامعه، بشر را ملزم به جایگزینی نانو مواد زیستی به جای نانو مواد نموده است تا محیط‌زیست در امان باشد [5]. نانومواد زیستی همراه با انرژی خورشیدی (به عنوان یک منبع تجدیدپذیر) یکی از بهترین منابع جایگزین انرژی‌های تجدیدناپذیر بشمار می‌رود [6]. استفاده از این مواد در ساخت سلول‌های خورشیدی باعث افزایش رسانایی الکتریکی و کاهش تلفات انرژی حرارتی می‌شود. نانو مواد کربنی در سلول‌های فتوولتائیک به دلیل پایداری طولانی‌مدت، شفافیت بهتر، رسانایی عالی و انعطاف‌پذیری مکانیکی مورد توجه قرار گرفته‌اند [7]. سلول‌های خورشیدی پروسکایت آلی- معدنی مبتنی بر هالید سرب (PSCs)[1] به دلیل دمای کارکرد پایین و توانایی تبدیل انرژی بالا محبوبیت دارند [8]. برای استفاده از انرژی خورشیدی در طول دوره‌های طولانی نیاز به ادغام سیستم های ذخیره انرژی حرارتی در ساختمان دارد. این ادغام نه تنها در دسترس بودن پایدار انرژی حرارتی خورشیدی را تضمین می کند، بلکه به طور قابل توجهی به پایداری انرژی کمک می کند[9].

2- پیشینه تحقیق انواع سلول‌های خورشیدی

2-1- سلول‌های خورشیدی پروسکایت

نوعی از سلول‌های خورشیدی ساخته شده از مواد پروسکایت در سال ۲۰۰۹ با راندمان ۳.۸ درصد بوده که محققان جهت بهبود، از الکترولیت مایع استفاده کردند که باعث تجزیه سریع مواد پروسکایت در سلول‌ها شد. در سال 2021، رکورد جدید 25.6 درصدی برای سلول‌های خورشیدی پروسکایت تک اتصاله (PSC) ثبت گردید. اخیراً، یک سلول خورشیدی پروسکایت با راندمان تایید شده 26.4 درصد ساخته شده است که بعد از گذشت 40 سال از ساخت اولین سلول خورشیدی پروسکایت به این سطح رسید که در شکل 3 بازده سلول‌های خورشیدی پروسکایت را در سال‌های مختلف نشان می‌دهد [10، 11].



شکل 3 بازده سلول‌های خورشیدی پروسکایت در بازه زمانی سال 2009 تا 2022

2-2- سلول‌های خورشیدی سیلیکون کریستالی

امروزه سیلیکون کریستالی (Si-C) محبوب‌ترین فناوری سلول خورشیدی مورداستفاده است. برای بهبود کارایی و افزایش ظرفیت جذب نور در سلول‌های خورشیدی سیلیکون کریستالی می‌توان نانوذرات $B\text{-}TiO_2$ را اضافه کرد. این ماده در هنگام کاهش انعکاس نور و افزایش جذب نورتابشی به‌عنوان یک پوشش ضد انعکاس عمل می‌کند که با افزایش جذب فوتون سبب افزایش راندمان تبدیل انرژی کل می‌شود. به‌طورکلی می‌توان گفت، با کاهش انعکاس نور و افزایش جذب نور عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند [12-13]. در پژوهشی چگونگی جداسازی و انتقال بهتر بار در سلول‌های خورشیدی سیلیکون کریستالی توسط نانوذرات مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نانو ذرات سبب بهبود عملکرد سیستم می‌شود [14]. در پژوهشی دیگر آرایه‌های نانو مواد به عنوان پوشش‌های ضد انعکاس مورد بررسی قرار گرفت که افزایش کارایی سلول‌های خورشیدی سیلیکون کریستالی مشاهده گردید[15].

2-3- سلول‌های خورشیدی لایه‌نازک

از مزایای سلول‌های خورشیدی لایه‌نازک می‌توان به کاهش قیمت مواد و انعطاف‌پذیری اشاره کرد. نمونه‌هایی از این سلول‌ها، تلوراید کادمیوم (CdTe)[2]، سیلیکون آمورف (Si-A)[3]، مس ایندیم گالیم دی سلنید (CIGS)[4] و سلنید ایندیم مس (CIS) می‌باشند. مطالعات اخیر نشان داده است که استفاده از نانوذرات به طور قابل‌توجهی باعث پیشرفت فناوری سلول‌های خورشیدی لایه‌نازک شده است [16]. وانگ و همکاران استفاده از نانوذرات در سلول‌های خورشیدی لایه‌نازک ساخته شده از تلوراید کادمیوم (CdTe)[5] به روشی مشابه بررسی کردند. علاوه بر این، ادغام نانوذرات در سلول‌های خورشیدی سلنید ایندیم مس (CIS)[6] توسط چن و همکاران موردمطالعه قرار گرفت [17].

3- انرژی خورشیدی زیستی

1 Perovskite solar cells
2 Cadmium telluride
3 Amorphous silicon
4 Copper indium gallium diselenide
5 Cadmium telluride
6 Copper indium selenide

سلول زیستی خورشیدی از یک‌لایه رسانای شفاف تشکیل شده بود که با لایه‌ای از نانوکریستال‌های سلولزی[1] پوشانده شده بود. سبزینه (Chlorophyll) علاوه بر اینکه به‌عنوان حساس‌کننده به نور کار می‌کند، وظیفه جذب نور و ایجاد الکتریسیته را بر عهده دارد [18].

سیستم‌های بررسی‌شده در اکثر داده‌های موجود، 5/6 درصد راندمان تبدیل توان را نشان دادند که قابل توجه‌تر از اکثر اعداد منتشر شده برای سلول های خورشیدی با مواد نانو زیستی است. مشخص شد که زیرلایه پلیمر ارگانیک به طور کامل در خاک در حدود دو ماه حل می‌شود و دستگاه ها از پایداری و دوام خوبی برخوردار هستند[49]. سلول بیوفتوولتائیک با استفاده از تکنیک های مختلفی از جمله طیف سنجی (UV-vis)[2] ، طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS)[3]، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)[4] و اندازه گیری جریان-ولتاژ (I-V) مورد ارزیابی قرار گرفته است [19]. بازده الکتریکی یک سلول خورشیدی معمولی با یک سلول زیستی خورشیدی مقایسه شد. طبق آزمون EIS[5]، سلول زیست خورشیدی مقاومت انتقال بار کمتری نسبت به سلول خورشیدی استاندارد دارد که نشان دهنده راندمان جمع آوری بار بیشتر است. سلول خورشیدی زیستی بر اساس اندازه‌گیری‌های I-V عملکرد بهتری داشت، که با افزایش چگالی جریان کوتاه‌مدت و ضریب پر شدن (fill factor) مشهود است [19]. پلیمر (3،4 - اتیلن دی اکسی تیوفن) ممکن است به تولید پنل‌های خورشیدی بسیار کارآمد کمک کند؛ زیرا پلیمر حامل حفره های عالی بوده که در نتیجه افزودن آنها نیز می‌تواند بسیار مقرون‌به‌صرفه باشد [43]. در مؤسسه فناوری ماساچوست، ایالات متحده، دانشمندان با توسعه سلولی که دولایه مجزا از مواد را برای جذب نور خورشید استفاده می‌کند، انرژی خورشیدی گسترده‌ای را به طور کامل استخراج کردند. آنها از یک دستگاه عایق ساخته شده از لایه‌های تنگستن و آلومینا استفاده کردند و مشاهده کردند که این دستگاه می‌تواند با جذب تابش طیف گسترده از خورشید، الکتریسیته تولید کند [44].

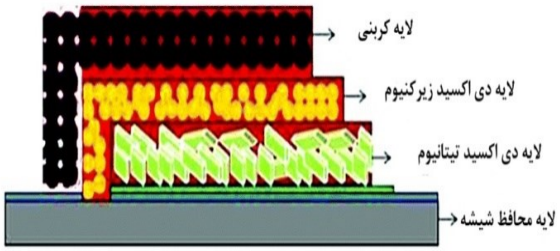
تحقیقات اخیر بر توسعه معماری‌های نانوساختار جدید، به حداکثر رساندن راندمان تبدیل نور توسط طراحی مولکولی، و ایجاد فرایندهای اساسی مونتاژ برداشت نور تمرکز دارد. برای توسعه DSSC حالت جامد، نقش مایعات یونی به‌عنوان جایگزینی برای حلال‌های معمولی نتایج فوق‌العاده‌ای به همراه داشته است [45].

اصول اساسی شامل استفاده از موجودات زیستی؛ مانند گیاهان، باکتری‌ها و جلبک‌ها برای جمع‌آوری و تبدیل نور خورشید به انرژی مفید به‌صورت غیرفعال است. درک فتوسنتز، متابولیسم میکروبی و بیو لومینسانس برای ایجاد سیستم‌های انرژی خورشیدی بیولوژیک کارآمد ضروری است [20].

3-1- بیو کاتالیز

محصولات زیستی مانند کربن‌های حاصل از پیرولیز[6] می‌توانند به عنوان جایگزینی برای فلزات گران‌بها در سلول‌های خورشیدی مورد استفاده قرار بگیرند. این امر می‌تواند هزینه تولید سلول‌های خورشیدی را کاهش دهد. پیرولیز فرآیندی است که در آن مواد آلی با اعمال حرارت بالا در غیاب اکسیژن یا در محیطی با اکسیژن بسیار کم تجزیه شیمیایی می‌شود.

کربن‌های حاصل از پیرولیز می‌توانند خواص رسانایی خوبی داشته باشند. این کربن‌ها می‌توانند در لایه‌های تجمع الکترون (electrode layers) سلول‌های خورشیدی استفاده شوند تا فرآیند تبدیل نور به الکتریسیته را بهبود ببخشند. این مواد می‌توانند به عنوان الکترود در سلول‌های خورشیدی پرکاربرد (مانند سلول‌های خورشیدی با پایه دی‌اکسید تیتانیوم) عمل کنند. شکل 4 [47]. لایه‌های نازک بر پایه کربن که از محصولات چوبی استخراج شده‌اند، می‌توانند به عنوان لایه‌های فعال در سلول‌های خورشیدی لایه نازک مورد استفاده قرار بگیرند. این لایه‌ها می‌توانند کارایی بالایی را با کاهش وزن و هزینه‌های کلی به ارمغان آورند [21]. کاتالیست به افزایش طیف جذب، هدایت نور مرئی، افزایش عملکرد سلول و افزایش انتقال الکترون ها به الکترود کمک می کند. باز ترکیب لکترون ها با حفره ها کاهش یافته، تولید انرژی افزایش و قابلیت انتقال انرژی نیز افزایش می یابد [22].



شکل 4 تصویری از لایه‌های سلول خورشیدی

3-2- سلول‌های خورشیدی مبتنی برمواد نانویی زیستی

3-2-1- سلول‌های خورشیدی هیبریدی

سلول‌های خورشیدی هیبریدی به‌نوعی از سلول‌های خورشیدی گفته می‌شود که در طراحی آنها ترکیبی از مواد مختلف را برای تولید انرژی خورشیدی استفاده می‌کنند. این سلول‌ها عموماً شامل ترکیبی از مواد آلی و معدنی هستند یا اینکه از فناوری‌های مختلف مانند سیلیکون و مواد آلی بهره می‌برند. هدف از طراحی این نوع سلول‌ها بهبود کارایی و کاهش هزینه تولید است. سلول‌های هیبریدی می‌توانند به بهبود جذب نور و افزایش بازده تبدیل نور خورشید به برق کمک کنند. در دستگاه‌های فتوولتائیک هیبریدی، جفت الکترون - حفره با تأثیر نور جذب شده در پلیمر مزدوج تشکیل می‌شوند. سپس الکترون‌ها به ماده گیرنده معدنی منتقل می‌شوند، درحالی‌که حفره‌ها در پلیمر باقی می‌مانند. حامل‌های بار در پلیمرها به دلیل تمایل انحرافات شبکه به همراه بارهای موجود در مواد آلی، به‌عنوان پولارون[7] شناخته می‌شوند، پولارون ناشی از تعامل بین بارهای الکترونی و تغییرات ساختاری در ماده است این پدیده در مواد نیمه رسانا و پلیمرها دیده می شودکه بار الکتریکی همراه با تغییر شکل موضعی در ساختار ماده حرکت می‌کند. به همین دلیل، انتقال الکترون در رابط ناهمگن

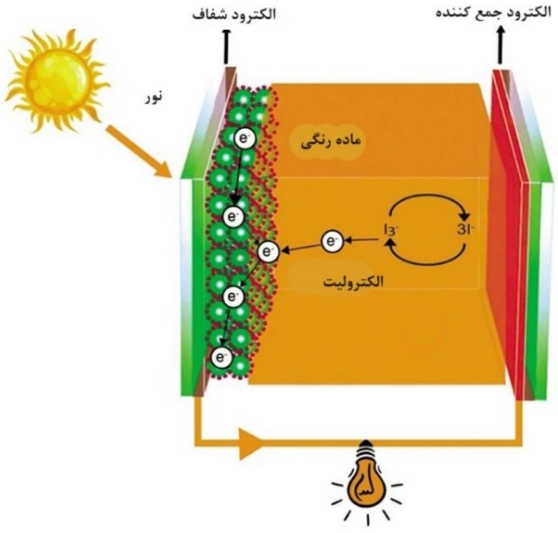
1 Cellulose nanocrystals
2 Ultraviolet-visible spectroscopy
3 Electrochemical impedance spectroscopy
4 Scanning electron microscope
5Electrochemical Impedance Spectroscopy
6 Pyrolysis
7 Polaron

آلی یا معدنی تأثیر مهمی بر عملکرد صحیح سلول‌های خورشیدی هیبریدی دارد [23].

3-2-2- سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ

محققین مؤسسه Drexel با استفاده از مدل‌های کامپیوتری، نانومواد، انعطاف‌پذیری، قدرت و مقرون‌به‌صرفه بودن دستگاه‌های فتوولتائیک را بررسی کردند [24]. تمرکز آنها بر روی آزمایش DSSC[1]ها با هدف تسریع مکانیسم تبادل الکترون در صفحه خورشیدی و افزایش تبدیل فوتون ها به انرژی است. در حال حاضر، 11 تا 12 درصد از نور خورشید از طریق پنل های فتوولتائیک حساس به رنگ به انرژی تبدیل می شود. مهندسین فعالانه درتلاش هستند تا این پنل ها برای رقابت با پنل‌های فتوولتائیک مبتنی بر سیلیکون درست کنند. پیش‌بینی می‌شود که ادغام نانوساختارهای کربنی به طور قابل‌توجهی قابلیت حامل بار کل سلول فتوولتائیک را افزایش داده و بهبود قابل‌توجهی را در عملکرد کلی آن ارائه کند[25].

در ادامه این تحقیق که شامل پیداکردن یک ترکیب پلیمری مناسب‌تر برای جایگزینی مخلوط الکترولیت است که الکترودها را در پنل فتوولتائیک جدا می‌کند، انتظار می‌رود که باعث افزایش بیشتر عملکرد سلول خورشیدی شود [26]. در تلاشی پیشگامانه، دانشمندان دانشگاه نورث وسترن، مکانیزم جدیدی را برای از بین بردن «الکترولیت» مایع مشکل‌ساز و مستعد نشتی معرفی کرده‌اند [27]. الکترولیت مایع را در سلول های رنگی با یک نیمه هادی جامد مبتنی بر ید جایگزین می کند. این نیمه هادی ساخته شده از کلسیم، قلع و ید نه تنها جایگزین الکترولیت ها می شود، بلکه به بهبود انرژی نیز کمک می کند. جذب نور و در نتیجه به طور قابل توجهی عملکرد کلی دستگاه را افزایش می دهد. پرداختن به نگرانی‌های زیست‌محیطی نیازمند یک حرکت اساسی به سمت منابع انرژی تجدیدپذیر است و انرژی خورشیدی به عنوان یک تکنیک فوق‌العاده سریع و پایدار ظاهر شده که قادر است بخش قابل توجهی از نیازهای تولید برق آینده جهان را برآورده کند [28]. نوآوری های مختلف فتوولتائیک نسل سوم به طور گسترده مورد تحقیق قرار گرفته، از جمله مزایای بسیاری که DSSC ها ارائه می دهند هزینه ساخت پایین، طراحی و روش های ساخت ساده، استفاده از مواد ارزان قیمت و به راحتی قابل دسترسی (مانند TiO_2 و اجزای مبتنی بر کربن)، توانایی استفاده از تکنیک های عالی منابع قابل انطباق در انواع مختلف بوده که زیرلایه ها (بسترها) و عملکرد بهتر نسبت به سایر سیستم های خورشیدی در محیط های کم نور و داخلی است [29]. علاوه بر این، DSSCها در ساخت دستگاه تطبیق پذیری[2] نشان می دهند، طیف وسیعی از مواد، ساختارها، رنگ ها و به ویژه شفافیت را در خود جای می دهند، و کاربردهایی با پتانسیل قابل توجه مانند صفحه نمایش های فتوولتائیک و محصولات یکپارچه را باز می کنند [30]. در شکل 5 نمونه سلول‌های خورشیدی حساس بهه رنگ ارائه می‌گردد.



شکل 5 نمودار شماتیک DSSC

3-2-3- سلول‌های خورشیدی حساس به نقاط کوانتومی

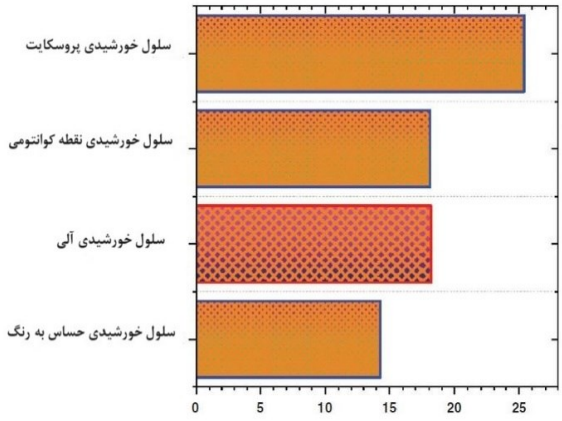
ایده سلول‌های خورشیدی حساس به نقاط کوانتومی (QDSSC)[3] عمدتاً از سلول خورشیدی حساس به رنگ سرچشمه گرفته است. به دلیل ویژگی‌های فوتو الکترونیک برتر نقاط کوانتومی آنها برای جذب نور استفاده می‌شوند، بر خلاف سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ که در آن‌ها رنگ آلی به عنوان جاذب نور استفاده می‌شود فتوآنود مؤلفه‌ای است که در آن نور توسط مولکول‌های رنگ یا نقاط کوانتومی جذب می‌شود. حسگرها روی سطح نیمه‌هادی (معمولاً TiO_2) متصل می‌شوند. باند رسانا (CB) ماده نیمه‌رسانا باید در سطحی پایین‌تر از پایین‌ترین مداری مولکولی غیرمجاز مولکول‌های رنگ برای انتقال سریع الکترونی باشد. با یک ساختار مشابه، مکانیسم کار QDSSC مشابه DSSC است. الکترون‌ها از طریق الکترود کار به الکترود شمارنده از یک مدار خارجی عبور می‌کنند. الکترولیت که معمولاً محلول زوج‌های ردوکس یا هادی سوراخ است، به‌عنوان واسطه حامل بار عمل می‌کند [31]. سال‌ها تحقیق در مورد سلول‌های خورشیدی حساس به نقاط کوانتومی منجر به افزایش موفقیت‌آمیز راندمان تولید فعلی بیش از 12درصد از زیر 1درصد شده است [32].

3-2-4- فتوولتائیک آلی

فناوری خورشیدی به لطف گام‌های روبه‌جلو در فناوری نانو در حال دستیابی به آینده‌ای جدید است یکی از پیشرفت‌ها در این زمینه، استفاده از زیست پلیمرها (بیوپلیمر) در سلول‌های خورشیدی است که نسل جدید فناوری خورشیدی را تشکیل می‌دهد این نوع سلول‌های خورشیدی که از زیست پلیمرهای رشد کرده به‌صورت آلی استفاده می‌کند، به لحاظ نوع منابع مورداستفاده، مقرون‌به‌صرفه بودن، بهینه بودن انتقال انرژی و دوستدار محیط‌زیست بودن بسیار موردتوجه قرار گرفته‌اند. بر خلاف سلول‌های خورشیدی سیلیکون که شکننده و گران‌قیمت هستند و فرایند تولید پیچید ای دارند، بکار گیری فیلم نازک پلیمری، محصول را انعطاف‌پذیرتر می‌کند این

1Dye-Sensitized Solar Cells
2 Versatility device
3 Quantum Dot Sensitized Solar Cells

نوع فناوری که فتوولتائیک آلی (OPV)[1] نامیده می‌شود را مانند فیلم نازک می‌توان روی سطوح مختلف مانند سقف بام‌ها و وسایل نقلیه استفاده کرد [33]. این فناوری قابلیت ایجاد نسل جدیدی از محصولات مقرون‌به‌صرفه باانرژی خورشیدی با فاکتورهای شکل نازک و انعطاف‌پذیر را دارد. در این سلول فتوولتائیک از پلیمرهای آلی رسانا یا مولکول‌های آلی به‌عنوان مواد جاذب استفاده می‌شود. پردازش در دمای پایین یک مزیت بزرگ فتوولتائیک آلی نسبت به همتایان غیرآلی است. ویژگی‌های وزن سبک‌تر، انعطاف‌پذیر و هزینه پایین از مزیت‌های قابلیت‌استفاده برای محصولات است [34]. شکل 6 مقایسه بازده چهار مدل از سلول‌های خورشیدی را نشان می‌دهد.



شکل 6 بازده سلول‌های خورشیدی [35].

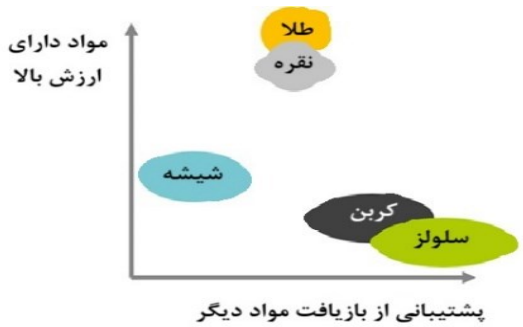
4- تأثیر مواد زیستی بر بازیافت در پنل‌های فتوولتائیک

پنل‌های فتوولتائیک در پایان عمر خود با چالش مهمی به نام بازیافت روبرو هستند که یکی از موانع اصلی آن، سودآوری اقتصادی این فرایند است. در کشورهای توسعه‌یافته، قوانین بازیافت می‌توانند به اجرای بهتر این فرایند کمک کنند، اما مهم‌ترین تضمین برای افزایش نرخ بازیافت، سودآوری مالی کلی است. فلزات گران‌بها مانند نقره، که تنها حدود 0.1 درصد از وزن پنل‌های سیلیکونی را تشکیل می‌دهد، حدود 47 درصد ارزش مواد آن‌ها را به خود اختصاص می‌دهد و به همین دلیل انگیزه اقتصادی اصلی برای بازیافت‌کنندگان محسوب می‌شود.

فرآیند بازیافت پنل‌های خورشیدی شامل جداسازی دقیق قطعات مختلف پنل است؛ ابتدا قاب آلومینیومی و شیشه جدا می‌شوند، سپس با حرارت‌دهی پوشش‌های پلیمری از بین رفته و سلول‌های سیلیکونی و فلزات بازیابی می‌شوند. این جداسازی تخصصی باعث می‌شود مواد بازیافتی کیفیت بالایی داشته باشند و بتوانند مجدداً در تولید پنل‌های جدید یا کاربردهای دیگر استفاده شوند. در حالی که بازیافت فلزات مانند آلومینیوم، مس و نقره به دلیل ارزش بالای آن‌ها به صرفه است، بازیافت سایر مواد پنل‌ها مانند سیلیکون نیازمند فناوری‌های پیشرفته‌تر برای رسیدن به خلوص مطلوب است. به همین دلیل، فرایندهای مکانیکی به تنهایی کافی نیستند و ترکیب آن‌ها با روش‌های شیمیایی و حرارتی ضروری است. بازیافت پنل‌های فتوولتائیک اهمیت زیادی دارد، زیرا این پنل‌ها حاوی فلزات گران‌بها هستند و همچنین حفظ محیط زیست را تضمین می‌کند.

با این حال، موفقیت در بازیافت این پنل‌ها به دو عامل اصلی شامل: اول سودآوری اقتصادی فرآیند بازیافت و دوم پیشرفت فناوری‌های نوین برای جداسازی و بازیافت مواد موجود در پنل‌ها بستگی دارد[36]. علاوه بر این، طبق پیش‌بینی‌ها، تولید فتوولتائیک تا سال 2050 تا 10 درصد نقره در جهان مصرف خواهد کرد [37]. بر اساس مطالعات اخیر، بسترها نقش مهمی در قابلیت بازیافت دارند. به‌عنوان‌مثال، هنگامی که از زیرلایه‌های شیشه‌ای رسانا معمولی استفاده می‌شود، غلظت فلزات نادر (مانند طلا، نقره و پلاتین) در دستگاه به‌قدری کم است که بازیابی آن‌ها از نظر اقتصادی ممکن نخواهد بود [38،39]. بستر های (زیرلایه‌های) گیاهی را می توان به راحتی سوزانده تا فلزات گران بها را جمع اوری کرده و بازیابی آن‌ها را انجام داد. علاوه بر این، این فرآیند به عنوان یک منبع انرژی عمل می‌کند [40]. به عنوان مثال، در سلول‌های خورشیدی مبتنی بر زیرلایه‌های گیاهی، غلظت فلزات نادر و گرانبها می‌تواند حدود ۱۰۰ برابر اقتصادی تر بازیابی شوند [41]. تأثیر مشابهی از زیرلایه قابل اشتعال برای سلول‌های خورشیدی پرکاربرد (PSCs)[2] مشاهده می‌شود. با این حال، همراه با افزایش قابل توجه در غلظت فلزات گرانبها، افزایش به‌همان اندازه‌ای در غلظت سرب سمی نیز وجود دارد[39].

این غلظت بالای سرب می‌تواند چالش‌های بیشتری را برای اجرای فرآیند بازیافت ایجاد کند.علاوه بر زیرلایه‌های جایگزین، پژوهشگران به دنبال جایگزینی فلزات گران‌بهایی مانند پلاتین، طلا و نقره با مواد مقرون‌به‌صرفه و فراوان‌تر هستند. کربن یکی از گزینه‌های امیدوارکننده برای کاهش هزینه‌های تولید و قیمت کلی ماژول‌ها است [42]. علاوه بر این، روش‌های بازیافت در پایان عمر چنین دستگاه‌هایی، به‌ویژه اگر زیرساخت لایه ها نیزبر پایه مواد زیستی باشد، می‌تواند به سادگی به سوزاندن یک‌مرحله‌ای محدود شود. البته استفاده از کربن ارزان و فراوان، کاهش انگیزه برای بازیافت است، زیرا مواد با ارزش کمتری برای بازیابی وجود دارد. (شکل 7)



شکل 7 ارزش مواد و نحوه پشتیبانی آنها از بازیابی سایر مواد

5- چشم‌انداز آینده انرژی خورشیدی

انرژی خورشیدی به دلیل فراوانی و کارایی ثابت آن از سایر منابع انرژی پیشی می‌گیرد و نوآوری مستمر در فناوری‌های خورشیدی مانند سلول‌های فتوولتائیک، سیستم‌های انرژی خورشیدی متمرکز و غیره را سبب افزایش

1 organic photovoltaic

2 Perovskite Solar Cells

تحقیقات و استفاده از آن می‌شود. تلاش‌های تحقیقاتی اخیر به توسعه سلول‌های خورشیدی رقابتی، جستجو در موادی مانند لایه‌های سیلیکونی ضخیم، فتوولتائیک آلی و سلول‌های خورشیدی مبتنی بر بیو نانومتریال اختصاص‌داده‌شده است. باتوجه‌به عوامل کلیدی مانند دردسترس‌بودن، ظرفیت، مقرون‌به‌صرفه بودن و کارایی در مقایسه با سایر منابع انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی مبتنی بر خورشید بدون شک یکی از بهترین فناوری‌ها برای مقابله با چالش‌های قریب‌الوقوع بهران انرژی و محیط زیست است. اخیراً گروهی از محققان میزان جریان انرژی خورشیدی را در مناطق مختلف موجودات فتوسنتزی اختراع کردند این تحقیق ممکن است در توسعه روش‌هایی که از انرژی خورشیدی برای دستیابی به کارایی بیشتر استفاده می‌کنند انقلابی باشد.

دراین‌بین، محققان به پیشرفت بیشتر خود برای نوآوری سلول‌های خورشیدی با بازده بالاتر و ادامه خواهند داد زمانی خواهد رسید که استفاده از سیلیکون در مزارع خورشیدی و پشت‌بام‌ها متوقف می‌شود و به بجای آن به طور گسترده‌ای از بیو نانومواد به‌عنوان جایگزینی کارآمد استفاده می‌شود. این نوآوری‌ها و پیشرفت‌ها با ساخت تصاعدی منابع انرژی خورشیدی به‌زودی امکان‌پذیر خواهد شد. منشأ انرژی‌های خورشیدی چند سال بعد توسط بیو نانومواد ارزان‌تر و کارآمدتر خواهد بود. [46].

6- نتیجه گیری

در این مقاله، تلاش‌های فعلی برای استفاده از مواد نانوساختار زیستی برای بهبود عملکرد سلول‌های خورشیدی بررسی شده است. برخی از روش‌های مختلف موجب افزایش کارایی و کاهش هزینه سلول‌های خورشیدی شده است. از بحث فوق، نانومواد موجود در سلول‌های خورشیدی نوید رویکردهای جدید برای تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریسیته را با امکان راندمان بالاتر و هزینه کمتر را می‌دهند. بااین‌حال، چالش‌های پیشروی این فناوری، ظرفیت محدود برای دست‌کاری نور مانند کریستال‌های فوتونی و تقویت پلاسمونیک[1] است.

از طرفی بحران انرژی، نیاز روزافزون جوامع بشری به منابع انرژی، محدود بودن ذخایر سوخت‌های فسیل و افزایش آلاینده‌های زیست‌محیطی و لزوم بهره‌گیری از انرژی‌های پاک، عواملی هستند که کشورهای دنیا را به سمت استفاده از سلول‌های خورشیدی که یکی از مهم‌ترین فناوری‌های قرن حاضر است سوق داده است. طی سال‌های گذشته فناوری‌های مختلف برای ساخت سلول‌های خورشیدی بکار گرفته شده است که هدف تمام آنها کاهش هزینه تولید، افزایش بازده و دوام این سلول‌ها و نیز کاهش اثرات سوء احتمالی زیست‌محیطی حاصل از آن‌هاست. در چند دهه اخیر فناوری نانو نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود عملکرد سلول‌های خورشیدی نسل اول سیلیکون و نیز معرفی سلول‌های خورشیدی نسل‌های جدید بر پایه لایه‌های نازک و نانومواد‌ها داشته است. تلفیق فناوری نانو و بهره‌گیری از زیست پلیمرها چشم‌انداز تازه‌ای در راه استفاده از این انرژی پاک فراهم نموده است انواع مختلف از سلول‌های خورشیدی نانومواد تاکنون رونمای شده‌اند و پژوهشگران متعددی در سراسر دنیا در حال تحقیق و توسعه آنها هستند. از عمده کاربردهای اصل فناوری نانو در سلول‌های خورشیدی نسل‌های مختلف پوشش‌های لایه‌نازک، خودتمیزشونده و آب‌گریز هستند که به بهبود بازده و دوام سلول‌ها کمک می‌کنند. باتوجه‌به پیشرفته‌های حاصل شده در این حوزه به نظر می‌رسد آینده تولید انرژی الکتریکی ارزان‌قیمت و پاک از خورشید بی شک بر پایه فناوری مواد نانو و مواد نانو زیستی خواهد بود. ازآنجا که در کشور ما ایران به لحاظ موقعیت جغرافیایی و قرارگرفتن در کمربند تابش نور خورشید، از پتانسیل بالایی در زمینه بهره‌برداری از این موهبت خدادادی و موقعیت برتر اکوسیستم برخوردار است و نیز پیشرفت تحقیقات در زمینه کاربردهای متعدد فناوری نانو در کشور، جا دارد تا پژوهش‌ها در زمینه مطالعات مرتبط با این انرژی پاک با جدیت و توان بیشتری در کشور دنبال شود.

دلیل اصلی در استفاده از مواد گیاهی در سلول‌های خورشیدی، نیاز به جایگزینی اجزای گران‌قیمت، انرژی بر، کمیاب و یا تجدیدناپذیر است. در این راستا، داشتن نگاهی جامع به معیارهای اصلی پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی دستگاه‌های فتوولتائیک بسیار مهم است، شاخص انرژی‌های تجدیدپذیر[2] آنها است. شاخص انرژی‌های تجدیدپذیر شاخصی است که عملکرد شرکت‌ها یا کشورها در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر را اندازه‌گیری و رصد می‌کند. این شاخص‌ها معمولاً شرکت‌هایی را شامل می‌شوند که در تولید، توزیع، انتقال یا زیرساخت‌های مرتبط با انرژی‌های تجدیدپذیر فعالیت دارند این معیار به ارزیابی عملکرد و پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر، از جمله سلول‌های خورشیدی، کمک می‌کند.

تجزیه‌وتحلیل REI می‌تواند بر اساس برآورد بازده تبدیل توان، طول عمر و انرژی تعبیه شده اجزای اعمال شده باشد. بر اساس این تجزیه‌وتحلیل، اجزای گیاهی به سه دسته تقسیم می‌شوند:

نزدیک به پیاده‌سازی: مواد الکترود کربنی و ژلاتورهای الکترولیت عملکرد و یا طول عمر مشابه یا حتی بالاتری را در مقایسه با همتایان معمولی ارائه می‌دهند و این پتانسیل را دارند که پیشرفت‌های متوسط تا کوچک را در انرژی تعبیه شده کل دستگاه ارائه دهند. PSCهای دارای الکترودهای کربنی برای جذب تجاری جالب هستند، درحالی‌که DSC[3]ها هنوز در موقعیت خاص باقی می‌مانند. تحقیقات بیشتری موردنیاز است: بسترهای گیاهی این امکان را دارند که به عملکرد نوری برتر و کاهش عمده انرژی تعبیه شده دست یابند، اما پایداری باید بهبود یابد. زبری سطح، اکسیژن و انتقال آب باید به حداقل برسد - همه اینها بدون به خطر انداختن یکپارچگی ساختاری آنها. بسترهای گیاهی برای کاربردهای جدید فتوولتائیک مانند الکترونیک چاپی جالب هستند.

چالش‌های عمده، دستاوردهای جزئی: مواد فوتو اکتیو هم از نظر کارایی و هم از نظر طول عمر چالش‌های بزرگی دارند و در سطح دستگاه، پتانسیل کاهش انرژی تعبیه شده حاشیه‌ای است. DSCها با رنگ‌های طبیعی برای اهداف بسیار تخصصی، به‌عنوان‌مثال آموزش، کاربردهایی دارند.

فراتر از جایگزینی صرف اجزای سلول خورشیدی، مواد گیاهی عملکردهایی را نیز ارائه می‌دهند که با موارد معمولی قابل‌دستیابی نیست. به‌عنوان‌مثال، خواص نوری سازه‌های مبتنی بر CNC[4]، CFM[5] و چوب را می‌توان طوری تنظیم کرد که از شیشه و پلاستیک پیشی بگیرد. مثال دیگر چارچوب‌های آئروژل

[1] تقویت پلاسمونیک به خودی خود به فرآیندهایی اشاره دارد که در آن نانوذرات فلزی (مثل نقره یا طلا) می‌توانند میدان‌های الکترو مغناطیسی را در نزدیکی سطح خود تقویت کنند. این پدیده می‌تواند باعث شود که جذب نور بیشتری در سلول‌های خورشیدی ایجاد شود.

2 Renewable Energy Index
3 Dye-Sensitized Cells
3 Cellulose NanoCry
5 carbon fiber materials

سلولزی است که می‌تواند راهی برای نیمه جامد کردن الکترولیت برای کاهش تلفات عمده عملکرد مربوط به ارتقای مقیاس سلول‌های خورشیدی رنگی ارائه دهد. مواد گیاهی همچنین دارای امکانات بکر در فتوولتائیک هستند، به‌عنوان‌مثال مواد کربن فیبری می‌توانند برای استفاده در منسوجات فتوولتائیک عملکردی بهتر داشته که یکی دیگر از زمینه‌های جدید تحقیق است. علاوه بر این، استفاده از مواد زیستی به‌عنوان یک بستر می‌تواند مزایای قابل‌توجهی را در کاهش اثرات زیست‌محیطی دستگاه‌ها و بهبود بازیابی فلزات گران‌قیمت و کمیاب به همراه داشته باشد.

7- مراجع

[1] E. Serrano, G. Rus, J. García-Martínez, Nanotechnology for sustainable energy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, No. 9, pp. 2373–2384, 2009.

[2] Z. Abdin, M. A. Alim, R. Saidur, M. R. Islam, W. Rashmi, S. Mekhilef, A. Wadi, Solar energy harvesting with the application of nanotechnology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 26, No. 2, pp. 837–852, 2013.

[3] K. T. Miettunen, E. D. Cranston, J. M. Moran-Mirabal, J. Vapaavuori, Cellulose nanocrystal aerogels as electrolyte scaffolds for glass and plastic dye-sensitized solar cells, *ACS Applied Energy Materials*, Vol. 2, No. 8, pp. 5635–5642, 2023.

[4] H. Khodkam, R. Pourdarbani, H. Ghaebi, M. Hernandez-Hernandez, Investigating the environmental impacts of different approaches of agricultural waste management using AHP technique, *Acta Technologica Agriculturae*, Vol. 27, No. 4, pp. 242-250, 2024.

[5] E. Bagheri, H. Khodkam, Smart Farming: How Drones Are Transforming the Future of Food Production?, *Biosystems Engineering and Sustainable Technologies*, Vol. 1, No. 1, pp. 49-67, 2025

[6] H. Khodkam, R. Pourdarbani, J. L. Hernandez-hernandez, Selection of the Most Appropriate Vehicles with the Aim of Decarbonising the Transportation Sector Using AHP, *Acta Technologica Agriculturae*, Vol. 28, No. 2, pp. 63-70, 2025.

[7] A. Ghorbani, T. Mesri Gundoshmian, H. Khodkam, H. Ghaebi, Comparison of vehicles with biofuel, electric, fuel cell and solar energy for decarbonization of the transportation sector, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 12, No. 1, pp. 200-208, 2025.

[8] Y. Qiao, S. Li, W. Liu, M. Ran, H. Lu, Y. Yang, Recent advances of rareearth ion doped luminescent nanomaterials in perovskite solar cells, *Nanomaterials*, Vol. 8, No. 1, pp.1-11, 2018.

[9] M. M. A. Khan, N. I. Ibrahim, I. M. Mahbubul, H. M. Ali, R. Saidur, F. A. Al-Sulaiman, Evaluation of solar collector designs with integrated latent heat thermal energy storage, *Energy*, Vol. 166, No. 1, pp. 334–350, 2018.

[10] X. Li, S. Aftab, A. Abbas, S. Hussain, M. Aslam, F. Kabir, H.S. Abd-Rabboh, H.H. Hegazy, F. Xu, M.Z. Ansari, Advances in mixed 2D and 3D perovskite heterostructure solar cells: a comprehensive review, *Nano Energy*, Vol, 118 No. 1, pp. 108979-108989, 2023.

[11] P. Zhang, M. Li, W.C. Chen, A perspective on perovskite solar cells: emergence, progress, and commercialization, *Front Chem*, Vol. 10, No. 1, pp. 802890-802899, 2022.

[12] T. C. Selema, T. D. Malevu, M. R. Mhlongo, S. V. Motloung, T. E. Motaung, Advancements in black titanium dioxide nanomaterials for solar cells: a comprehensive review, *Emergent Materials*, Vol. 7, No. 6, pp. 2163-2188, 2024.

[13] H. Khodkam, A review of the effective factors involved in the production of biogas from biomass waste, *Biosystems Engineering and Renewable Energies*, Vol. 1, No. 1, pp. 51-58, 2025.

[14] M. M. Olaimat, L. Yousefi, O. M. Ramahi, Using plasmonics and nanoparticles to enhance the efficiency of solar cells: review of latest technologies, *Journal of the Optical Society of America B*, Vol. 38 No. 2, pp. 638-651, 2021.

[15] T. C. Selema, T. D. Malevu, M. R. Mhlongo, S. V. Motloung, T. E. Motaung, Advancements in black titanium dioxide nanomaterials for solar cells: a comprehensive review, *Emergent Materials*, Vol. 7, No. 6, pp. 2163-2188, 2024.

[16] T. C. Selema, T. D. Malevu, M. R. Mhlongo, S. V. Motloung, T. E. Motaung, Advancements in black titanium dioxide nanomaterials for solar cells: a comprehensive review, *Emergent Materials*, Vol. 7, No. 6, pp. 2163-2188, 2024.

[17] J. Wang, Z. Wang, W. Wang, Y. Wang, X. Hu, J. Liu, J. Tang, Synthesis, modification and application of titanium dioxide nanoparticles: a review, *Nanoscale*, Vol. 14, No. 18, pp. 6709-6734, 2022.

[18] L. Ye, S. Zhang, W. Ma, From Binary to Ternary Solvent: Morphology Fine-tuning of D/A Blends in PDPP3T-based Polymer Solar Cells, *Advanced Materials*, Vol. 24, No. 47, pp. 6335-6341, 2012.

[19] S. Roy, G. G. Botte, Perovskite solar cell for photocatalytic water splitting with a TiO2/Co-doped hematite electron transport bilayer, *RSC Advances*, Vol. 8, No. 10, pp. 5388-5394, 2018.

[20] W. Zhao, C. Dall'Agnese, S. Duan, Trilayer Chlorophyll-Based Cascade Biosolar Cells, *ACS Energy Letters*, Vol. 4, No. 2, pp. 384-389, 2019.

[21] A. Kuang, T. Zhou, G. Wang, Y. Li, G. Wu, H. Yuan, X. Yang, Dehydrogenation of ammonia borane catalyzed by pristine and defective h-bn sheets, *Applied Surface Science*, Vol. 362, No. 1, pp. 562–571, 2016.

[22] F. Ghasemzadeh, S. M. Esmaeili, Nanotechnology in the service of solar energy systems, *Nanotechnology and the Environment*, Vol. 1, No. 1, pp. 1–15, 2020.

[23] J. W. P. Hsu, M. T. Lloyd, Organic/Inorganic hybrids for solar energy generation, *MRS Bulletin*, Vol. 35, No. 6, pp. 422–428, 2010.

[24] C. C. Raj, R. A. Prasanth, critical review of recent developments in nanomaterials for photoelectrodes in dye sensitized solar cells, *J Power Sources*, Vol. 317, No. 1, pp. 120–132, 2016.

[25] T. S. Kumaran, A. Prakasam P. Vennila, New carbazole-based organic dyes with various acceptors for dye-sensitized solar cells: synthesis, characterization, DSSCs fabrications and DFT study, *Asian J Chem*, Vol. 33, No. 1, pp. 1541–1550, 2021.

[26] E. Figgemeier, A. Hagfeldt, Are dye-sensitized nano-structured solar cells stable? An overview of device testing and compo nent analyses, *Int J Photoenergy*, Vol. 6, No. 1, pp. 127–140, 2004.

[27] J. Y. Kim, J. W. Lee, H. S. Jung, H. Shin, N. G. Park, High-efficiency perovskite solar cells. *Chemical reviews*, Vol. 120, No. 15, pp. 7867-7918, 2020.

[28] A. Venkateswararao, J. K. Ho, S. K. So, Device characteristics and material developments of indoor photovoltaic devices, *Mater Sci Eng R Rep,* Vol. 139, No. 1, pp.100517-100528, 2019.

[29] G. Boschloo, Improving the performance of dye-sensitized solar cells, *Front Chem*, Vol. 7, No. 1, pp. 77-88, 2019.

[30] A. W. M. V. Ekanayake, G. R. A. Kumara, R. M. G. Rajapaksa, A. Pallegedara, Increasing the efficiency of a dye-sensitized solid-state solar cell by iodine elimination process in hole conductor material, *In International Conference on Sustainable Built Environment*, Vol. 22, No. 1, pp. 282-287, 2018.

[31] Z. Pan, H. Rao, I. Mora-Seró, J. Bisquert, X. Zhong, Quantum dot-sensitized solar cells, *Chemical Society Reviews*, Vol. 47, No. 20, pp. 7659–7702, 2018.

[32] A. Sahu, A. Garg, A. Dixit, A review on quantum dot sensitized solar cells: Past, present, and future towards carrier multiplication with a possibility for higher efficiency, *Solar Energy*, Vol. 203, No. 1, pp. 210–239, 2010.

[33] A. Farokhi, H. Shahroosvand, F. Zisti, M. Pilkington, M. K. Nazeeruddin, Influence of triphenylamine derivatives in efficient dye-sensitized/organic solar cells, *Journal of Materials Chemistry A*, Vol. 11, No. 46, pp. 25136-25215, 2023.

[34] B. Kippelen, J. L. Brédas, Organic photovoltaics, *Energy and Environmental Science*, Vol. 2, No. 3, pp. 251–261, 2009.

[35] S. N. Tamilselvan, S. Shanmugan, Towards sustainable solar cells: unveiling the latest developments in bio-nano materials for enhanced DSSC efficiency, *Clean Energy*, Vol. 8, No. 3, pp. 238–257, 2024.

[36] G. Jacucci, L. Schertel, Y. Zhang, H. Yang, S. Vignolini, Light management with natural materials: From whiteness to transparency, *Advanced Materials*, Vol. 33, No. 28, pp. 2001215-2001224, 2021.
[37] P. Dias, S. Javimczik, M. Benevit, H. Veit, A. M. Bernardes, Recycling WEEE: Extraction and concentration of silver from waste crystalline silicon photovoltaic modules, *Waste Management*, Vol. 57, No. 1, pp. 220–225, 2016.
[38] K. Miettunen, A. Santasalo-Aarnio, Eco-design for dye solar cells: From hazardous waste to profitable recovery, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 320, No. 1, pp.128743, 2021.
[39] E. S. Akulenko, M. Hadadian, A. Santasalo-Aarnio, K. Miettunen, Eco-design for perovskite solar cells to address future waste challenges and recover valuable materials, *Heliyon*, Vol. 9, No. 2, pp. 13584-13597, 2023.
[40] J. J. Kaschuk, Y. Al Haj, O. J. Rojas, K. Miettunen, T. Abitbol, J. Vapaavuori, Plant-based structures as an opportunity to engineer optical functions in next-generation light management, *Advanced Materials*, Vol. 34, No. 6, pp. 2104473- 2104483, 2022.
[41] K. Miettunen, A. Santasalo-Aarnio, Eco-design for dye solar cells: From hazardous waste to profitable recovery, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 320, No. 1, pp. 128743-128756, 2021.
[42] I. Celik, R. Hosseinian Ahangharnejhad, Z. Song, M. Heben, D. Apul, Emerging photovoltaic (PV) materials for a low carbon economy, *Energies*, Vol. 13, No. 16, pp. 4131-4141, 2020.
[43] E. Solomon, New solar cell is more efficient, costs less than its counterparts, *MIT News Office*, Vol. 2, No. 6, pp. 1–4, 2016.
[44] E. Kabir, P. Kumar, S. Kumar, A. A. Adelodun, K. H. Kim, Solar energy: Potential and future prospects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82, No. 1, pp. 894–900, 2018.
[45] D. Shi, Y. Cao, N. Pootrakulchote, Z. Yi, M. Xu, S. M. Zakeeruddin, P. Wang, New organic sensitizer for stable dye-sensitized solar cells with solvent-free ionic liquid electrolytes, *Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 112, No. 44, pp. 17478–17485, 2008.
[46] S. J. Alsultany, A. A. Mohaimeed, Role of Nanoparticles Synthesized from Bacteria as Antimicroorganism: A Review, *Journal of Nanotechnology*, Vol. 5, No. 1, pp. 44-53, 2021.
[47] Y. Rong, Z. Ku, A. Mei, T. Liu, M. Xu, S. Ko, H. Han, Hole-conductor-free mesoscopic TiO2/CH3NH3PbI3 heterojunction solar cells based on anatase nanosheets and carbon counter electrodes, *The journal of physical chemistry letters*, Vol. 5, No. 12, pp. 2160-2164, 2014.
[48] K. Miettunen, M. Hadadian, J. V. García, A. Lawrynowicz, E. Akulenko, O. J. Rojas, M. Hummel, J. Vapaavuori, Bio-based materials for solar cells, *WIREs Energy and Environment*, Vol. 13, No. 1, pp. 508-519, 2024.
[49] S. Agarwal, Biodegradable polymers: Present opportunities and challenges in providing a microplastic-free environment, *Macromolecular Chemistry and Physics*, Vol. 221, No. 6, pp. 200-217, 2020.