Environmental Education and Sustainable Development
Second national conference on:
Environmental Science & Engineering and Sustainable Development
2020 , Tehran, Iran
هفدهم بهمن ماه ۱۳۹۸
انجمن علمی آموزش محیط زیست و توسعه پایدار ایران
دومین کنفرانس ملی علوم و مهندسی محیط زیست و توسعه پایدار
دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

مروری بر نقش نانوفناوری در افزایش بازدهی سلول‌های خورشیدی نسل سوم

مرضیه حاجیلری[۱]، محدثه خیراندیش[۲]، زهرا شعبانی[۳]، معصومه عرب عامری[۴]، رخساره ریاحی‌نیا[۵]، درسا ماه نسایی[۶] و مهدی میرعرب[۷]

[۱] دانش‌آموز دبیرستان دخترانه نمونه دولتی شهرستان گرگان،
Marziehhajilari@gmail.com

[۲] دانش‌آموز دبیرستان دخترانه نمونه دولتی شهرستان گرگان،
Mohadesekheirandish@gmail.com

[۳] دانش‌آموز دبیرستان دخترانه نمونه دولتی شهرستان گرگان،
Zhrashbni80@gmail.com

[۴] دانش‌آموز دبیرستان دخترانه نمونه دولتی شهرستان گرگان،
Masumaharabameri@gmail.com

[۵] دانش‌آموز دبیرستان دخترانه نمونه دولتی شهرستان گرگان،
Riyahiniarn@gmail.com

[۶] فارغ‌التحصیل دبیرستان دخترانه نمونه دولتی شهرستان گرگان، دارنده مدال نقره دهمین المپیاد نانو،
Dooorsa79@gmail.com

[۷] دبیر رسمی آموزش و پرورش شهرستان گرگان، مدرس المپیاد نانو،
Pajoheshgar.m@gmail.com

چکیده

نرخ رشد جمعیت، افزایش تقاضا در بخش انرژی، محدودیت در ذخایر انرژی‌های فسیلی و آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از آن ضرورت انجام تحقیقات در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر را آشکار می‌نماید. در این تحقیق مروری پژوهش‌های انجام شده توسط دانشمندان ایرانی در زمینه‌ی بهبود کارایی سلول‌های خورشیدی نسل سوم با استفاده از نانوفناوری به روش مروری تحلیلی بررسی شد. سلول‌های خورشیدی نسل سوم در واقع سلول‌های فوتوالکتروشیمیایی هستند و از بخش‌های فوتوالکترود، الکترولیت و الکترود تشکیل شده‌اند. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که بکارگیری نقاط کوانتومی در فوتوالکترود منجر به گستردگی طیف جذبی و افزایش فتوجریان می‌شود. همچنین اصلاح لایه متخلخل دی‌اکسید تیتانیوم، تعیین ضخامت بهینه، استفاده از نانوکامپوزیت TiO_2/CNT، افزایش سطح تماس، افزایش جذب رنگ‌دانه و استفاده از نقاط کوانتومی در سطح لایه متخلخل هر یک در کارایی سلول‌های خورشیدی نسل سوم نقش مهمی ایفا می‌کنند.

کلمات کلیدی

سلول‌های خورشیدی نسل سوم، اصلاح لایه متخلخل، نانوکامپوزیت، نقاط کوانتومی، بهبود کارایی

۱- مقدمه

نرخ رشد جمعیت و پیشرفت‌های صنعتی موجب افزایش تقاضا در بخش انرژی الکتریکی شده است (مومنی و کاشفی تربتی، ۱۳۹۴). تغییرات اقلیمی ناشی از مصرف سوخت فسیلی نیز با تاثیرگذاری بر روی اکوسیستم‌ها بر امنیت غذایی، آب و در نتیجه سلامت انسان‌ها اثرگذار می‌باشد (ولایت‌زاده، ۱۳۹۷). در مقابل پاک بودن، پایان‌ناپذیری، انعطاف‌پذیری و عدم نیاز به سیستم‌های پیشرفته انتقال انرژی، از ویژگی‌های انرژی‌های نو به شمار می‌رود (ترابی و پیام، ۱۳۹۶). از این رو به دلیل محدودیت در ذخایر انرژی‌های فسیلی، مصرف روز افزون و آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از آن استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و سرمایه‌گذاری در آنها را توجیه‌پذیر می‌نماید (ترابی و پیام، ۱۳۹۶؛ دوست حسینی و بهجت، ۱۳۹۴). انرژی خورشید بزرگترین منبع انرژی در جهان به شمار می‌رود (آهنگرانی فراهانی و مرندی، ۱۳۹۶) پاک، تجدیدپذیر و رایگان است (مومنی و کاشفی تربتی، ۱۳۹۴) و در بین انرژی‌های تجدیدپذیر بهترین و منطقی‌ترین گزینه می‌باشد (دوست حسینی و بهجت، ۱۳۹۴). به طوریکه اگر تنها ۱۰ درصد از انرژی خورشیدی را بهره‌برداری کنیم، حدود ۶۰ تراوات انرژی یعنی بیش از ۲ برابر انرژی مورد نیاز کره زمین در سال ۲۰۵۰ تولید می‌شود (حسین پناهی و دیگران، ۱۳۹۵). در بین سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۳ ظرفیت فوتوولتائیک فعال در جهان از ۱۰ گیگاوات به ۱۳۶ گیگاوات افزایش یافت که نشان دهنده جهش قابل توجهی در استفاده از این فناوری است (شمس و دیگران، ۱۳۹۲). با توجه به اینکه ایران ۶ برابر کشورهای اروپایی یعنی حدود ۳۰۰ روز آفتابی در سال دارد، به لحاظ پتانسیل تولید برق خورشیدی در زمره برترین کشورهای دنیاست. از طرف دیگر در کشور ما تولید برق به میزان ۹۰ درصد به گاز طبیعی وابسته است و نیروگاه‌های خورشیدی در تامین برق کشور سهم بسیار اندکی دارند (فرقانی، سعدپناه و آخوندی، ۱۳۹۲). این در حالی می‌باشد که بر اساس پروتکل کیوتو ارتقاء و توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر جهت کنترل انتشار گاز CO_2 از جمله تعهدات کشورهای عضو این پیمان بین‌المللی است (رحیمی و بختیار، ۱۳۸۵). پیش‌بینی می‌شود که در آینده هزینه‌های

سرمایه‌گذاری، تعمیر و نگهداری از نیروگاه‌های خورشیدی با انجام پژوهش، بهبود فن‌آوری و روش‌های تولید کاهش یابد (اکرامی و صادقی، ۱۳۸۷).

سلول‌های خورشیدی توسط فرآیند فوتوولتاییک انرژی نور خورشید را به جریان الکتریسیته تبدیل می‌نمایند (آهنگرانی فراهانی و مرندی، ۱۳۹۶). بزرگترین چالش استفاده از سلول‌های خورشیدی جذب بیشتر نور و افزایش فوتوجریان توسط افزایش دادن پهنای جذب نور از مرئی به مادن قرمز نزدیک (دوست حسینی و بهجت، ۱۳۹۴) و ممانعت از بازترکیب حامل‌های بار است (دانشور اصل و صدرنژاد، ۱۳۹۷). اصول کار سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای شبیه فتوسنتز در گیاهان می‌باشد (حسین پناهی و دیگران، ۱۳۹۵). سلول‌های خورشیدی نسل سوم در واقع سلول‌های فوتوالکتروشیمیایی هستند و از بخش‌های فوتوالکترود، الکترولیت و الکترود تشکیل شده‌اند (سلمانی و مشرقی، ۱۳۹۷). در بخش فوتوالکترود نیز از رنگدانه و نقاط کوانتومی استفاده می‌شود (آهنگرانی فراهانی و مرندی، ۱۳۹۶). در سلول خورشیدی رنگدانه‌ای نور از لایه شفاف SnO_2:F عبور کرده (شمس و دیگران، ۱۳۹۲) و با جذب فوتون، الکترون‌ها از بالاترین اوربیتال مولکولی پُر به پایین‌ترین اوربیتال مولکولی خالی در رنگدانه‌ها تهییج می‌شوند (دانشور اصل و صدرنژاد، ۱۳۹۷). الکترون تولیدی نیز در باند رسانش TiO_2 بواسطه گرادیان غلظت به سوی قطب آند حرکت می‌نماید. سپس یک الکترون از یُدید جذب رنگدانه شده و به تری‌یُدید اکسید می‌شود. تری‌یُدید نیز با دریافت الکترون از الکترود مخالف، مدار سلول را کامل می‌کند (شمس و دیگران، ۱۳۹۲). طبق نتایج پژوهش‌ها می‌توان از نقاط کوانتومی برای جذب فوتون‌های خورشیدی استفاده کرد. به عنوان مثال گاف انرژی بالاتر و در نتیجه موقعیت باند رسانش بیشتر نقطه کوانتومی PbS نسبت به TiO_2 سبب تزریق الکترون از نقطه کوانتومی مذکور به TiO_2 در ترکیب TiO_2/PbS می‌شود (دوست حسینی و بهجت، ۱۳۹۴). دی‌اکسید تیتانیوم نور فرابنفش را جذب کرده و نور مرئی را از خود عبور می‌دهد. از طرف دیگر لایه‌ای از رنگدانه بر روی سطح نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم متصل شده و نور مرئی را جذب می‌نماید. لذا میزان تخلخل بالای لایه TiO_2 در افزایش جذب نور توسط رنگدانه نقش دارد. البته باید بین زیرلایه و لایه متخلخل TiO_2 اتصال خوبی برقرار شود تا هدایت الکتریکی افزایش و میزان بازترکیب حامل‌های بار کاهش یابد (مومنی و کاشفی تربتی، ۱۳۹۴). از این رو ساختار بلوری، اندازه ذرات، سطح تماس و ضخامت لایه دی‌اکسید تیتانیوم در بازده سلول خورشیدی نقش مهمی دارند (آنجفی و مرندی، ۱۳۹۵). از آنجایی که در سلول‌های خورشیدی نسل سوم رنگ‌های مولکولی و نه دی‌اکسید تیتانیوم جاذب فوتون‌ها می‌باشند (دوست حسینی و بهجت، ۱۳۹۴)، لذا بهتر است که از ساختار کریستالی آناتاز TiO_2 که دارای گاف انرژی و لبه باند رسانش بزرگتری است استفاده نمود (سلمانی و مشرقی، ۱۳۹۷). مقاله حاضر با هدف تحلیل پژوهش‌های دانشمندان ایرانی در خصوص ارتقاء بازده سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای با استفاده از نانوفناوری انجام شد.

۲- روش پژوهش

یکی از روش‌های جمع آوری اطلاعات و نگارش مقالات، روش اسنادی و بررسی منابع می‌باشد. منابع این تحقیق مروری، پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی بهبود کارایی سلول‌های خورشیدی نسل سوم به کمک نانوفناوری است که از پایگاه مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی تهیه و به روش مروری - تحلیلی بررسی شدند.

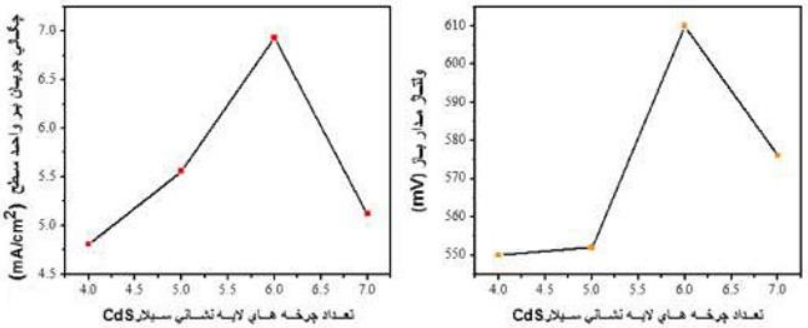
۳- نتایج و بحث

ساختار سلول‌های خورشیدی نسل سوم شامل فوتوالکترود، الکترولیت و الکترود مقابل است. تهییج رنگدانه توسط فوتون منجر به تزریق الکترون به باند رسانش TiO_2 می‌شود (حسین پناهی و دیگران، ۱۳۹۵). الکترون تولیدی نیز در باند رسانش TiO_2 بواسطه گرادیان غلظت به سوی قطب آند حرکت می‌نماید. سپس یک الکترون از یُدید جذب رنگدانه شده و به تری‌یُدید اکسید می‌شود. تری‌یُدید نیز با دریافت الکترون از الکترود مخالف مدار سلول را کامل می‌کند (شمس و دیگران، ۱۳۹۲). اصلاح هر یک از بخش‌های فوتوالکترود مانند لایه متخلخل TiO_2، رنگدانه و استفاده از نقاط کوانتومی می‌تواند منجر به ارتقاء کارایی سلول‌های خورشیدی نسل سوم شود که در ذیل به نتایج پژوهش‌های انجام شده در این زمینه اشاره می‌شود.

۳-۱- افزایش جذب فوتون با استفاده از نقاط کوانتومی

لایه نانوذرات TiO_2 شفافیت بالایی دارد و تقریباً ۸۰ درصد از نور را عبور داده و لبه جذب آن حدوداً ۳۵۰ نانومتر است. اما با لایه نشانی نقاط کوانتومی CdS و PbS لبه جذب به سمت طول موج‌های بزرگتر جابجا می‌شود. با افزایش تعداد چرخه‌های لایه نشانی نقاط کوانتومی به روش سیلار، میزان جذب نور، جریان، ولتاژ و بازده فوتوآند افزایش پیدا می‌کند. البته میزان بهینه چرخه لایه نشانی برای نقاط کوانتومی CdS و PbS به ترتیب ۶ و ۲ چرخه است. چراکه در چرخه‌های بالاتر لایه نشانی نقاط کوانتومی میزان نفوذ الکترولیت در ساختار متخلخل TiO_2 کاهش و

بازترکیب الکترون - حفره افزایش پیدا می‌کند (نمودار ۱). در نتیجه میزان جریان و ولتاژ تولیدی کاهش می‌یابد (آهنگرانی فراهانی و مرندی، ۱۳۹۶). همچنین مشخص شده است که در نمونه با دو نقطه کوانتومی نسبت به نمونه با یک نقطه کوانتومی، چگالی جریان بیشتری حاصل می‌شود (دوست حسینی و بهجت، ۱۳۹۴).

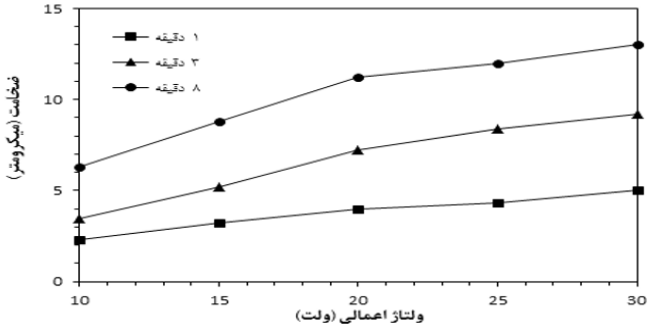


نمودار (۱): وابستگی جریان و ولتاژ سلول خورشیدی به تعداد چرخه‌های لایه نشانی نقاط کوانتومی CdS (آهنگرانی فراهانی و مرندی، ۱۳۹۶)

پوشش سلول فوتوآند با نقاط کوانتومی CdS و سپس PbS نسبت به حالت معکوس آن نشان داد که ترتیب پوشش ابتدا با PdS و سپس CbS بر روی فوتوآند FTO/TiO_2 نتیجه بهتری در پی دارد. از طرف دیگر سازگاری بیشتر CdS با الکترولیت پلی‌سولفید و تشکیل لایه‌ای از نقاط کوانتومی مذکور روی نقاط کوانتومی PbS مانع از خوردگی فوتوشیمیایی PbS شده و منجر به پایداری بیشتر فوتوسل می‌گردد. لذا می‌توان این طور نتیجه گرفت که PbS در افزایش فوتوجریان و CdS در پایدار سازی رفتار سلول و کاهش بازترکیب الکترون - حفره نقش دارند (دوست حسینی و بهجت، ۱۳۹۴). از طرف دیگر مشخص شده است که بازده سلول خورشیدی حاوی نقاط کوانتومی CdS و PbS نسبت به سلول خورشیدی دارای نقاط کوانتومی CdS، به دلیل افزایش جذب نور و طول عمر الکترون حدود ۵۵ درصد افزایش پیدا می‌کند (آهنگرانی فراهانی و مرندی، ۱۳۹۶).

۳-۲- بهبود روش سنتز لایه دی‌اکسید تیتانیوم متخلخل

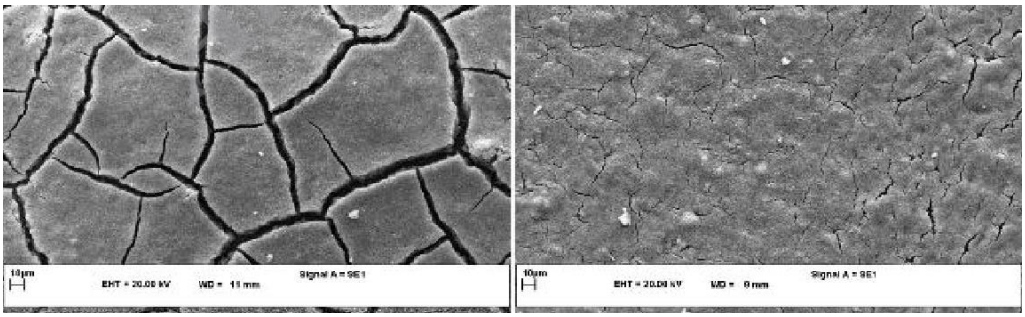
آب دارای ثابت دی‌الکتریک بالایی است و رسانایی سوسپانسیون با ثابت دی‌الکتریک حلال رابطه مستقیم دارد. در روش سنتز الکتروفورتیک در صورت بالا بودن ثابت دی‌الکتریک حلال، غلظت یونی محلول افزایش یافته و این امر سبب کاهش ضخامت لایه دو گانه الکتریکی پیرامون نانوذره و کاهش حرکت الکتروفورتیک، آگلومره شدن نانوذرات و در نتیجه کاهش رسوب‌گذاری نانوذره بر روی فوتوالکترود می‌شود. البته در صورت استفاده از سوسپانسیون بدون آب پوشش TiO_2 تشکیل شده روی سطح فوتوالکترود غیریکنواخت می‌شود. لذا مقدار بهینه آبِ سوسپانسیون در لایه نشانی TiO_2 به روش الکتروفورتیک ۳ میلی‌لیتر بر لیتر تعیین شده است. مطابق با نمودار ۲ با افزایش ولتاژ، ذرات باردار معلق در سوسپانسیون نیروی محرکه بیشتری برای حرکت به الکترود با بار مخالف پیدا نموده و این امر در افزایش رسوب تشکیل شده نقش دارد (سلمانی و مشرقی، ۱۳۹۷).



نمودار (۲): رابطه ولتاژ اعمالی و ضخامت پوشش فوتوالکترود در روش رسوب‌گذاری الکتروفورتیک (سلمانی و مشرقی، ۱۳۹۷)

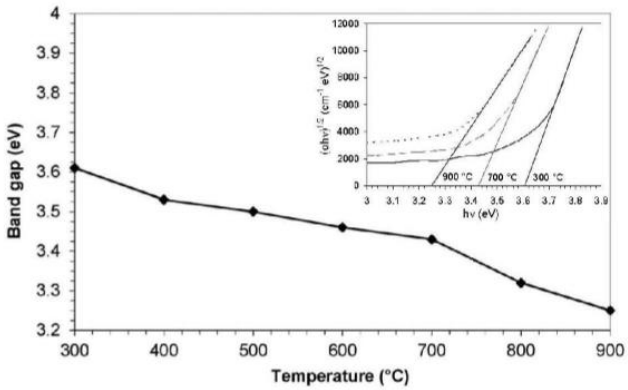
در پژوهش مومنی و کاشفی تربتی (۱۳۹۴) اثر دو روش پوشش‌دهی چرخشی و دکتر بلید در ایجاد لایه TiO_2 با ضخامت مشابه در بازده سلول خورشیدی رنگدانه‌ای بررسی شد. نتایج این پژوهش حاکی از افزایش مساحت سطح لایه TiO_2 بواسطه افزایش تخلخل در روش لایه نشانی دکتر بلید است. همچنین جذب رنگدانه در این نمونه بیشتر از پوشش‌دهی چرخشی می‌باشد. در واقع در روش پوشش‌دهی چرخشی، علی‌رغم ضخامت مشابه با روش دکتر بلید، به دلیل تبخیر حلال در سرعت زیاد چرخش، تخلخل کاهش می‌یابد. از طرف دیگر میزان ترک، عمق و طول آنها در روش پوشش‌دهی چرخشی کمتر از روش دکتر بلید است (شکل ۱). این ترک‌ها سبب نفوذ و تماس بیشتر الکترولیت با زیرلایه FTO و احیاء یون تری‌آیدید الکترولیت و کاهش بازده تولید الکترون می‌شوند. همچنین عمیق و طویل بودن ترک از انتقال الکترون در لایه متخلخل دی‌اکسید تیتانیوم

ممانعت می‌نماید. به طور کلی فشردگی پوشش، میزان تخلخل و جذب رنگ‌دانه در روش پوشش‌دهی چرخشی کمتر است اما به علت داشتن ترک کمتر و کاهش بازترکیب بار، چگالی جریان مدار کوتاه در آن بیشتر از روش پوشش‌دهی دکتر بلید می‌باشد (مومنی و کاشفی تربتی، ۱۳۹۴).



شکل (۱): تصویر SEM از نمونه تولید شده با روش پوشش‌دهی چرخشی (سمت راست) و دکتر بلید (سمت چپ) (مومنی و کاشفی تربتی، ۱۳۹۴)

پوشش TiO_2 در دمای محیط ساختاری آمورف داشته و بنابراین نیاز به آنیل کردن است (یارمند، ۱۳۹۳). ساختار کریستالی آناتاز دارای گاف انرژی و نیزه لبه باند رسانش بزرگتری است و از این رو در سلول‌های خورشیدی رنگ‌دانه‌ای بهتر است از این فرم کریستالی استفاده شود (سلمانی و مشرقی، ۱۳۹۷). در دمای آنیل ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد فاز آمورف به آناتاز تبدیل شده و حداکثر تبلور و ابعاد کریستالیت در فاز مذکور در دمای ۷۰۰ درجه‌سانتی‌گراد رخ می‌دهد. اما با افزایش دمای آنیل از ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه‌سانتی‌گراد به تدریج فاز آناتاز به روتیل تبدیل می‌شود به طوریکه در دمای ۹۰۰ درجه‌سانتی‌گراد فاز آناتاز به کلی ناپدید می‌گردد. از طرف دیگر با افزایش دمای آنیل شاهد کاهش مساحت سطح ویژه و افزایش ابعاد تخلخل‌ها هستیم. لذا دمای آنیل در گاف انرژی لایه متخلخل TiO_2 (نمودار ۳)، نوع فاز و میزان تخلخل آن نقش مهمی بازی می‌کند (یارمند، ۱۳۹۳).

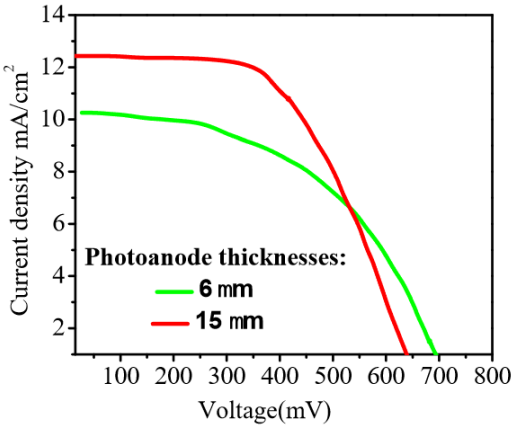


نمودار (۳): تغییرات گاف انرژی پوشش TiO_2 در دماهای مختلف آنیل (یارمند، ۱۳۹۳)

۳-۳- اصلاح عملکرد لایه دی‌اکسید تیتانیوم متخلخل

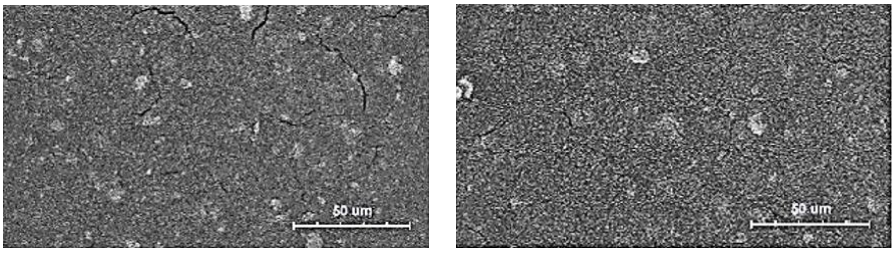
استفاده از نانوساختار مزومتخلخل منظم به دلیل افزایش میزان جذب نور و سهولت جابجایی حامل‌های بار سبب افزایش راندمان سلول‌های خورشیدی رنگ‌دانه‌ای می‌شود (یارمند، ۱۳۹۳). ساختار TiO_2 آمورف به دلیل مکان‌های تله برای بازترکیب الکترون - حفره، قابلیت استفاده در سلول‌های خورشیدی را ندارد و لذا باید توسط تکلیس آن را بلورینه کرد. در استحاله فازی توسط آنیل فاز آمورف به آناتاز با ساختار کریستالی تتراگونال تبدیل می‌شود (دانشور اصل و صدرنژاد، ۱۳۹۷). با افزایش ضخامت لایه متخلخل TiO_2 در الکترود فوتوآند، جریان اتصال کوتاه سلول حدود ۱۶ درصد افزایش پیدا می‌کند. این امر به دلیل افزایش سطح موثر، افزایش جذب رنگ و افزایش بازدهی ناشی از آن می‌باشد (آنجفی و مرندی، ۱۳۹۵). افزایش ضخامت با افزایش سطح ویژه فعال پوشش نانومتخلخل TiO_2 در افزایش جذب رنگینه سلول خورشیدی نقش دارد. در این شرایط فوتون‌های بیشتری جذب شده و جریان مدار کوتاه نیز افزایش پیدا می‌کند. البته افزایش ضخامت پوشش نانومتخلخل TiO_2 از حد بهینه سبب نفوذ محدود فوتون‌ها، افزایش عیوب و افزایش بازترکیب الکترون - حفره و کاهش بازده جریان مدار کوتاه می‌شود. طبق نتایج پژوهش سلمانی و مشرقی (۱۳۹۷) بازده تبدیل انرژی در ضخامت ۱۳ میکرومتر نسبت به نمونه‌های دیگر بیشتر است و به عنوان ضخامت بهینه برای استفاده در سلول‌های خورشیدی رنگینه‌دار تعیین گردید (نمودار ۴). مدت زمان بهینه پوشش‌دهی فوتوالکترود با TiO_2 به روش الکتروفورتیک که منجر به ایجاد پوششی به ضخامت ۱۳ میکرومتر می‌شود ۸ دقیقه تعیین شد. همچنین مشاهده گردید که با کاهش pH مقدار ذرات کمتری از

TiO_2 بر روی FTO رسوب کرده و ضخامت پوشش کاهش می‌یابد. لذا به منظور لایه نشانی TiO_2 بهتر است که pH بهینه مد نظر قرار گیرد (سلمانی و مشرقی، ۱۳۹۷).



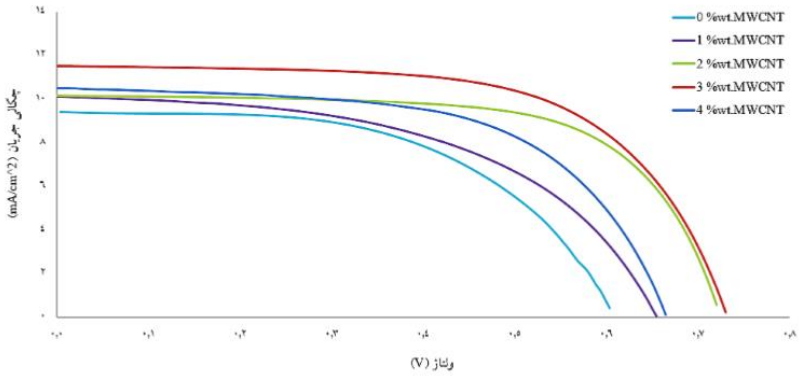
نمودار (۴): ضخامت فوتوالکترود و ولتاژ مرتبط با آن (آنجفی و مرندی، ۱۳۹۵)

حضور نانولوله‌های کربنی در نانوکامپوزیت سبب ممانعت از رشد بلورک‌های فاز آناتاز TiO_2 می‌شود. به صورتی که بلورک‌های دی‌اکسید تیتانیوم خالص حدود ۱۱ نانومتر و بلورک‌های نانوکامپوزیت TiO_2/4%wt.MWCNT به حدود ۵/۵ نانومتر می‌رسد. به لحاظ تکنیکی کاهش ابعاد بلورک-ها و افزایش حجم مرزها همانند تله موجب افزایش بازترکیب الکترون - حفره می‌شوند. از سوی دیگر با افزایش میزان نانولوله‌کربنی چند دیواره، به دلیل آگلومره شدن نانولوله‌های کربنی، میزان ترک در سطح پوشش افزایش پیدا می‌کند (شکل ۲). این امر نیز کاهش مکان‌های جذب رنگ‌دانه، کاهش پیوند رنگ‌دانه با TiO_2 و افت بازدهی سلول خورشیدی رنگ‌دانه‌ای را در پی دارد. لذا به منظور بهره‌برداری از خواص نانولوله‌های کربنی باید میزان حجمی آنها در ساخت سُل TiO_2 بهینه‌سازی شود. دانشور اصل و صدرنژاد (۱۳۹۷) میزان بهینه نانولوله‌های کربنی در ساخت نانوکامپوزیت TiO_2/CNT را سه درصد وزنی اعلام نمودند (دانشور اصل و صدرنژاد، ۱۳۹۷).



شکل (۲): سمت راست TiO_2 خالص و سمت چپ نانوکامپوزیت TiO_2/2%wt.MWCNT (دانشور اصل و صدرنژاد، ۱۳۹۷)

مطابق با نمودار ۵، نسبت به نمونه خالص TiO_2 و شرایط عدم استفاده از نانولوله‌های کربنی، در نانوکامپوزیت TiO_2/3%wt.MWCNT به دلیل افزایش رسانایی پوشش، کاهش مقاومت انتقال بار در فصل مشترک الکترولیت/رنگ‌دانه/دی‌اکسید تیتانیوم و کاهش بازترکیب حامل‌های بار بازدهی تا میزان ۶۹ درصد افزایش می‌یابد. دلیل این امر استفاده از نانوساختار یک بعدی نانولوله کربنی، ارتقاء رسانایی الکتریکی در نانوکاپوزیت، کمک به جمع آوری و انتقال الکترون‌های تولید شده می‌باشد (دانشور اصل و صدرنژاد، ۱۳۹۷).



نمودار (۵): وابستگی چگالی جریان ولتاژ به درصدهای مختلف نانولوله کربنی در نانوکامپوزیت TiO_2/MWCNT (دانشور اصل و صدرنژاد، ۱۳۹۷)

۴- نتیجه‌گیری

بررسی پژوهش‌های انجام شده در زمینه افزایش بازدهی سلول‌های خورشیدی نسل سوم نشان می‌دهد که استفاده از نقاط کوانتومی CdS و PbS در لایه متخلخل TiO_2 سبب جابجایی لبه جذب به سمت طول موج‌های بزرگتر می‌شود (دوست حسینی و بهجت، ۱۳۹۴). همچنین ترتیب صحیح لایه نشانی با نقاط کوانتومی PbS و سپس CdS می‌باشد (دوست حسینی و بهجت، ۱۳۹۴). لایه نشانی پوشش متخلخل TiO_2 بر روی فوتوالکترود با استفاده از پوشش‌دهی چرخشی به دلیل کاهش ترک‌های سطحی، کاهش بازترکیب بار و افزایش چگالی جریان نسبت به پوشش‌دهی دکتر بلید برتری قابل توجهی دارد (مومنی و کاشفی تربتی، ۱۳۹۴). از طرف دیگر درجه کریستالی شدن، نوع فاز و گاف انرژی و میزان تخلخل لایه TiO_2 به دمای آنیل شدن وابسته است. جایگزینی نانوکامپوزیت TiO_2/3%wt.MWCNT با لایه خالص TiO_2 از طریق کاهش مقاومت انتقال بار، کاهش ترکیب حامل‌های بار و افزایش انتقال الکترون‌های تولیدی به میزان ۶۹ درصد بازدهی را ارتقاء می‌دهد (دانشور اصل و صدرنژاد، ۱۳۹۷).

مراجع

اکرامی، عطیه و صادقی، مهدی. (۱۳۸۷). ارزیابی اقتصادی توسعه نیروگاه‌های خورشیدی با توجه به ملاحظات زیست محیطی. *علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۱۰(۲)، ۵۰-۴۳.

آنجفی، زکیه و مرندی، مازیار. (۱۳۹۵). رشد سل ژل نانوبلورهای TiO2 در محیط ان-هپتان و لایه نشانی آنها به منظور استفاده در سلول خورشیدی رنگدانه‌ای. *مجله پژوهش فیزیک ایران*، ۱۶(۲)، ۱۷۷-۱۷۳.

آهنگرانی فراهانی، فرزانه و مرندی، مازیار. (۱۳۹۶). حساس‌سازی همزمان سلول‌های خورشیدی نقاط کوانتومی متشکل از فوتوآند نانوبلوری TiO2 با نانوذرات CdS و PbS و بررسی تاثیر نقاط کوانتومی PbS بر عملکرد سلول خورشیدی. *مجله پژوهش فیزیک ایران*، ۱۷(۳)، ۵۰۷-۴۹۹.

ترابی، قاسم و پیام، فرشته. ۱۳۹۶. چالش انرژی فسیلی و تبیین لزوم سرمایه‌گذاری بر انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران. *فصلنامه سیاست‌های راهبردی و کلان*، ۵(۲۰)، ۱۷۰-۱۵۳.

حسین پناهی، کامبیز؛ عباسپورفرد، محمدحسین؛ فیضی، جواد و گلزاریان، محمودرضا. (۱۳۹۵). استفاده از پوست سبز گردو به عنوان رنگدانه جدید در سلول‌های خورشیدی حساس به رنگدانه، مبتنی‌بر نانوذرات TiO2. *مهندسی بیوسیستم ایران*، ۴۷(۴)، ۷۴۶-۷۳۹.

دانشور اصل، شروین و صدرنژاد، سید خطیب الاسلام. (۱۳۹۷). توسعه عملکرد فتوولتائیک سلول خورشیدی رنگدانه‌ای با به کارگیری فتوآند نانوکامپوزیتی دی-اکسید تیتانیم: نانولوله کربنی. *نشریه مهندسی متالورژی و مواد*، ۳۰(۱)، ۱۱۰-۱۰۱.

دوست‌حسینی، فاطمه و بهجت، عباس. (۱۳۹۴). بهبود عملکرد سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی با حساس کردن الکترودهای TiO2 با دو نوع نقطه کوانتومی PbS و CdS. *نانومقیاس*، ۲(۲)، ۱۱۱-۸۷.

رحیمی، نسترن و بختیار، محسن. (۱۳۸۵). پروتکل کیوتو، رهیافت‌ها و چالش‌ها. *علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۲۹، ۹۳-۷۹.

سلمانی، مهدیه و مشرقی، علی. (۱۳۹۷). بررسی پارامترهای الکتروفورتیک نانوذرات اکسید تیتانیوم در ساخت فوتوآند سلول خورشیدی حساس شده با رنگینه. مجله مواد نوین. ۹(۱): ۲۴- ۱۳.

شمس، محمدحسین؛ خاوری، فرشاد؛ محمدی، مسعود و نوری، جلال. (۱۳۹۲). مروری بر فناوری‌های تولید برق از انرژی خورشیدی و مقایسه آماری بزرگ‌ترین نیروگاه‌های خورشیدی جهان. *دوفصلنامه توسعه تکنولوژی صنعتی*، ۲۱، ۲۲-۱.

فرقانی، علی؛ سعدپناه، بیژن و آخوندی، علی‌رضا. (۱۳۹۲). درآمدی بر تدویل نقشه‌ی راه نیروگاه خورشیدی در ایران. *دو فصلنامه توسعه تکنولوژی صنعتی*، ۲۱، ۱۰۶-۸۷.

مومنی، فرشته و کاشفی تربتی، مهرداد. (۱۳۹۴). بررسی اثر روش لایه نشانی دی‌اکسید تیتانیوم (TiO2) بر عملکرد سلول خورشیدی حساس شده با رنگدانه (DSSC). *فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد*، ۹(۲)، ۴۶-۳۹.

ولایت‌زاده، محمد. (۱۳۹۷). برآورد انتشار کربن حاصل از مصرف سوخت‌های فسیلی در بازه زمانی ۹۴-۱۳۰۶ در ایران. *فصلنامه پژوهش در بهداشت محیط*، ۴(۳)، ۲۴۶-۲۳۷.

یارمند، بنیامین. (۱۳۹۳). ساخت و مشخصه‌یابی سلول خورشیدی رنگینه‌ای توسط پوشش‌های مزومتخلخل منظم دی‌اکسید تیتانیم. *مجله مواد و فناوری‌های پیشرفته*، ۳(۱)، ۲۷-۲۱.