

Enhancing Anti-Reflective and Photocatalytic Performance of Titanium Dioxide Coatings via Controlled Surface Porosity and Roughness for Solar Cell Applications

Pouya Jafari^{1,2}, Ali Asghar Sabbagh Alvani^{1,2,*}, Hassan Sameie²

1- Department of Polymer and color Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

2- Color and Polymer Research Center (CPRC), Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

This study investigates the role of controlled surface roughness and porosity in enhancing the anti-reflective (AR) properties of titanium dioxide (TiO_2) coatings, synthesized via the sol-gel method and deposited on glass substrates. The degree of porosity and surface roughness were systematically modulated by incorporating varying concentrations of Pluronic F127, a pore-forming agent, and through subsequent etching with hydrofluoric acid (HF). Comprehensive characterization techniques, including scanning electron microscopy (SEM), atomic force microscopy (AFM), and UV-Vis spectroscopy, were employed to analyze the surface morphology and optical performance of the coatings. The results demonstrated that increasing surface roughness, in combination with the formation of ordered porous structures, significantly improved light absorption and reduced reflection in the visible spectrum. Furthermore, the enhanced porosity and increased active surface area contributed to improved photocatalytic activity; photocatalytic tests using a model pollutant under UV irradiation revealed that coatings with higher porosity exhibited superior activity compared to less porous coatings. This feature, along with self-cleaning behavior, is crucial for photovoltaic applications and maintaining long-term coating transparency.

This study highlights the importance of precisely controlling surface roughness and porosity as key parameters for optimizing AR performance, photocatalytic efficiency, and self-cleaning properties, ultimately enhancing the efficiency of solar cells. The findings provide not only a solid scientific basis for the design of advanced coatings but also a cost-effective, reproducible, and scalable approach to improve the performance of photovoltaic systems.

Keywords

TiO_2 , Anti-Reflective Coatings, Surface Roughness, Solar Cells, Sol-Gel Method

Article history:

Received: 03-09-2025

Accepted: 05-10-2025

Corresponding author:

*sabbagh_alvani@aut.ac.ir

بهبود خواص ضد بازتاب و عملکرد فتوکاتالیستی پوشش‌های دی‌اکسید تیتانیوم از طریق کنترل تخلخل و زبری سطح برای کاربردهای سلول خورشیدی

پویا جعفری^۱، علی اصغر صباغ الوانی^{۱*}، حسن سامعی^۲

۱- دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲- پژوهشکده رنگ و پلیمر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

این پژوهش به بررسی نقش کنترل شده‌ی زبری و تخلخل سطح در بهبود خواص ضد بازتاب و عملکرد فتوکاتالیستی پوشش‌های دی‌اکسید تیتانیوم می‌پردازد. پوشش‌ها با استفاده از روش سل-ژل بر روی زیرلایه‌های شیشه‌ای اعمال شده و میزان تخلخل و زبری سطح از طریق افزودن مقادیر مختلف عامل حفره‌ساز Pluronic F127 و همچنین فرآیند حکاکی شیمیایی با اسید هیدروفلوریک به‌طور دقیق تنظیم گردید. برای ارزیابی مورفولوژی سطح و خواص نوری پوشش‌ها، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) و طیف‌سنجی UV-Vis استفاده شد.

نتایج نشان داد که افزایش زبری سطح، همراه با ایجاد ساختارهای متخلخل منظم، منجر به بهبود قابل توجه جذب نور و کاهش بازتاب در محدوده طیف مرئی می‌شود. علاوه بر این، افزایش تخلخل و سطح فعال پوشش‌ها، امکان بهبود عملکرد فتوکاتالیستی را نیز فراهم می‌کند؛ به‌طوری که آزمون‌های فتوکاتالیستی انجام شده با استفاده از تجزیه مدل آلاینده‌ها تحت تابش نور فرابنفش نشان داد که پوشش‌ها با میزان تخلخل بیشتر فعالیت فتوکاتالیستی بالاتری نسبت به پوشش‌ها با تخلخل کمتر از خود نشان می‌دهند. این ویژگی، همراه با اثر خودتمیزشوندگی، برای کاربردهای فوتولتائیک و حفظ شفافیت طولانی مدت پوشش اهمیت بالایی دارد. این مطالعه اهمیت تنظیم دقیق زبری و تخلخل سطح را به‌عنوان پارامتری کلیدی در بهبود عملکرد پوشش‌های ضدبازتاب، افزایش کارایی فتوکاتالیستی و خودتمیزشوندگی و ارتقای بهره‌وری سلول‌های خورشیدی برجسته می‌سازد. یافته‌ها نه تنها پایه علمی جامعی برای طراحی پوشش‌های پیشرفته فراهم می‌آورند، بلکه راهکاری اقتصادی، قابل تکرار و مقیاس‌پذیر برای ارتقای عملکرد سیستم‌های خورشیدی ارائه می‌کنند.

مقاله

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۶/۱۲

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۷/۱۳

دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2)، پوشش‌های ضد بازتاب، سلول‌های خورشیدی،

روش سل-ژل

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

افزایش روزافزون تقاضای جهانی برای انرژی‌های تجدیدپذیر، به ویژه انرژی خورشیدی، موجب شده است تا پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه ارتقای کارایی سلول‌های خورشیدی انجام شود. سلول‌های خورشیدی که انرژی نور را به طور مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند، به عنوان یکی از فناوری‌های کلیدی در تولید انرژی پاک شناخته می‌شوند. مزایای اصلی این فناوری شامل تولید انرژی بدون انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و قابلیت استفاده در مقیاس‌های مختلف است [۴-۱]. با این حال، عملکرد بهینه سلول‌های خورشیدی با دو محدودیت اصلی مواجه است، یکی بازتاب نور ورودی از سطح سلول که جذب فوتون توسط لایه فعال را کاهش می‌دهد و دیگری تجمع گرد و غبار یا آلاینده‌ها روی سطح که با گذشت زمان موجب کاهش شفافیت و بازدهی نوری می‌شود. بنابراین، برای حفظ عملکرد بلند مدت و افزایش کارایی سلول‌ها، پوشش‌های اعمال شده باید هم خواص ضدبازتاب و هم ویژگی خودتمیزشوندگی داشته باشند [۵، ۹].

پوشش‌های ضدبازتاب^۱ با کاهش میزان نور بازتابی، جذب فوتون‌ها توسط لایه فعال را افزایش داده و در نتیجه بازده تبدیل انرژی سلول‌های خورشیدی را بهبود می‌بخشند [۱۰، ۱۳]. دی‌اکسیدتیتانیوم (TiO_2) به دلیل ترکیب منحصر به فردی از خواص نوری، پایداری حرارتی و شیمیایی، هزینه نسبتاً پایین و سازگاری با روش‌های مختلف ساخت، ماده‌ای کلیدی برای تولید این پوشش‌ها محسوب می‌شود [۱۴، ۲۰]. خاصیت فتوکاتالیستی TiO_2 باعث تجزیه ترکیبات آلی و آلاینده‌ها روی سطح می‌شود، که زمینه‌ساز اثر خودتمیزشوندگی پوشش است. تحت تابش نور فرابنفش، TiO_2 می‌تواند با تولید رادیکال‌های هیدروکسیل و اکسیژن فعال، آلاینده‌ها و ذرات جذب شده روی سطح را تجزیه کرده و سطح پوشش را بدون نیاز به شستشوی مکانیکی یا مواد شیمیایی اضافی تمیز نگه دارد. این ویژگی‌ها، پوشش‌های TiO_2 را به گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربرد در سلول‌های خورشیدی شفاف و پیشرفته تبدیل می‌کند [۲۱، ۲۸].

با این حال، طراحی پوشش‌های تک‌لایه با کاهش بازتاب در طیف وسیع نور و پایداری طولانی مدت چالش‌هایی دارد. پوشش‌های تک‌لایه معمولاً کاهش بازتاب را تنها در طیف محدودی از نور خورشید فراهم می‌کنند و تولید پوشش‌های چند لایه پیچیده و پرهزینه است [۲۹، ۳۱]. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، ایجاد ساختارهای سطحی با زبری کنترل شده و تخلخل بهینه مطرح

شده است [۳۲، ۳۷]. زبری سطح باعث پراکندگی چند جهته‌ی نور و افزایش مسیر نوری در داخل پوشش و زیرلایه می‌شود، که در نهایت منجر به افزایش جذب و کاهش بازتاب می‌گردد. این اثر زمانی به حداکثر می‌رسد که ابعاد ویژگی‌های سطحی (حفره‌ها و برجستگی‌ها) در مقیاس طول موج نور مرئی باشد، زیرا پراکندگی نور در این حالت تقویت شده و جذب بهینه می‌شود [۳۸، ۴۱]. علاوه بر این، استفاده از عامل حفره‌ساز Pluronic F127 باعث ایجاد ساختارهای متخلخل در پوشش می‌شود که علاوه بر کاهش ضریب شکست مؤثر و بهبود شفافیت، سطح فعال بیشتری برای واکنش‌های فتوکاتالیستی فراهم می‌آورد. این ویژگی باعث می‌شود که پوشش‌ها علاوه بر عملکرد ضدبازتاب و خودتمیزشوندگی، در کاربردهای فتوکاتالیستی مانند تجزیه آلاینده‌های سطحی یا مدیریت انرژی فوتون نیز کارآمد باشند [۳۷، ۴۵].

در این پژوهش، با تنظیم میزان Pluronic F127 و به کارگیری فرآیند حکاکی شیمیایی با اسید هیدروفلوریک، ساختارهایی با تخلخل و زبری بهینه ایجاد شد که موجب افزایش تله‌گذاری نور و کاهش چشمگیر بازتاب گردید. این رویکرد، علاوه بر ارتقای عملکرد نوری و ضدبازتاب، روشی اقتصادی و مقیاس‌پذیر برای تولید پوشش‌های پیشرفته، بادوام و خودتمیزشونده فراهم می‌کند. ترکیب کنترل زبری سطح، تخلخل و خواص فتوکاتالیستی TiO_2 ، امکان تولید پوشش‌هایی با شفافیت بالا و کارایی نوری بهینه را فراهم ساخته و محدودیت‌های پوشش‌های سنتی ضدبازتاب را کاهش می‌دهد [۴۱، ۴۵].

به‌طور کلی، این پیشرفت‌ها نقش کلیدی در توسعه فناوری‌های مدیریت نور، بهبود عملکرد و دوام سلول‌های خورشیدی و افزایش طول عمر سامانه‌های انرژی خورشیدی پایدار ایفا می‌کنند و مسیر جدیدی برای طراحی پوشش‌های چند کاربرد و پیشرفته در صنعت انرژی‌های تجدیدپذیر فراهم می‌آورند.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد اولیه

تیتانیوم ایزوپروپوکسید^۲ (درجه خلوص ۹۷٪، شرکت سازنده: سیگما-آلدريج^۳) به عنوان پیش‌ماده در فرآیند سنتز سل-ژل و استیل استون^۴ (درجه خلوص ۹۹٪، شرکت سازنده: سیگما-آلدريج) برای کنترل سرعت واکنش هیدرولیز و تثبیت پیش‌ماده استفاده شد. از اتانول مطلق^۵ (درجه خلوص ۹۹/۸٪، شرکت

2- Titanium(IV) isopropoxide (TTIP)

3- Sigma- Aldrich

4- Acetylacetone (AcAc)

5- Absolute ethanol

1- Anti-Reflective (AR) Coatings

جدول ۱. مشخصات پوشش‌های TiO_2 تهیه شده با غلظت‌های مختلف Pluronic F127.

Table 1. Properties of TiO_2 Coatings Prepared with Different Concentrations of Pluronic F127.

Sample	Pluronic F127 Concentration (M)
C-1	0
C-2	1.2×10^{-3}
C-3	2×10^{-3}

ثابت و سرعت اعمال آن بر روی زیرلایه و تکرار پوشش‌دهی، تغییر داده شد. به این ترتیب نمونه‌های S-1، S-2، S-3 و S-4 تهیه شدند که مشخصات آن‌ها در جدول ۲ بیان شده است. نمونه‌های پوشش‌دهی شده پس از خشک شدن در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه و در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت کلسینه شدند تا ساختار پوشش تثبیت شود. برای اصلاح زبری سطح، پوشش‌ها به مدت ۱۰ ثانیه در محلول ۵ درصد اسید هیدروفلوریک حکاکی شیمیایی شدند.

جدول ۲. مشخصات نمونه‌های S-1، S-2، S-3 و S-4.

Table 2. Properties of Samples S-1, S-2, S-3, and S-4.

Sample	Application Speed (mm/s)	Number of Dipping Cycles
S-1	2	1
S-2	2	2
S-3	5	1
S-4	5	2

۲-۴- مشخصه‌یابی

به منظور تعیین ساختار بلوری پوشش‌ها از آزمون پراش اشعه ایکس^۵ (XRD, MIRA3 TESCAN) استفاده شد. نمودارهای مربوطه در بازه 20° تا 70° با نرخ پویش ۲ درجه بر دقیقه ثبت شدند. این دستگاه در ولتاژ ۴۰ کیلوولت و تحت جریان ۳۰ میلی‌آمپر با تشعشع $K\alpha$ -Cu radiation (1.54 Å) آنگستروم تنظیم شده بود. جهت تحلیل الگوهای آزمون پراش اشعه ایکس نیز از مجموعه مطالعات^۶ JCPDS2 استفاده شد. مورفولوژی سطح و ضخامت پوشش‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی^۷ (SEM, JEOL JSM-7600F)، مورد بررسی قرار گرفتند. زبری سطح با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی^۸ (AFM, Bruker Dimension Icon) اندازه‌گیری شد و خواص نوری پوشش‌ها (انتقال و بازتاب نور)

سازنده: سیگما-آلدریج) به عنوان حلال اصلی واکنش استفاده شد و به منظور تنظیم pH محلول و تسریع فرآیند هیدرولیز و تراکم، اسید نیتریک ۶۵٪ (شرکت سازنده: مرک) به عنوان کاتالیست اسیدی به محلول اضافه گردید. برای ایجاد ساختار متخلخل و تنظیم زبری سطح پوشش‌ها، از Pluronic F127 به عنوان ماده حفره‌ساز استفاده شد. فرآیند حکاکی شیمیایی^۲ جهت اصلاح ساختار سطح و افزایش زبری، با استفاده از اسید هیدروفلوریک^۳ ۴۸٪ (شرکت سازنده: سیگما-آلدریج) انجام شد. این اسید قوی توانایی حل کردن مواضع خاص در سطح TiO_2 را داشته و ساختار نانومقیاس ایجاد می‌کند. از لام‌های شیشه‌ای میکروسکوپی تمیز و استاندارد (ابعاد: 25×75 میلی‌متر، ضخامت: ۱ میلی‌متر، ضریب شکست: $1/5$) به عنوان زیرلایه‌های شفاف استفاده شد. شایان ذکر است که کلیه مواد به همان شکلی که خریداری شده بودند، مصرف شدند.

۲-۲- سنتز پوشش TiO_2

پوشش TiO_2 از طریق روش سل-ژل سنتز شد. ابتدا 0.75 میلی‌لیتر تیتانیوم ایزوپروپوکسید و 0.25 میلی‌لیتر استیل استون در 10 میلی‌لیتر اتانول مطلق، تحت هم‌زدن شدید ترکیب شدند. سپس محلولی جداگانه شامل Pluronic F127 با غلظت‌های مختلف (صفر، $10^{-3} \times 1/2$ و $10^{-3} \times 2$ مولار) و 9 میلی‌گرم بر لیتر اسید نیتریک در 15 میلی‌لیتر اتانول مطلق تهیه گردید. این محلول به صورت قطره قطره به محلول TTIP اضافه شد در حالی که هم‌زدن در دمای 35 درجه سانتی‌گراد ادامه داشت. پس از آن، محلول حاصل به مدت 30 دقیقه دیگر مخلوط شد و سپس به مدت 24 ساعت در دمای اتاق استراحت داده شد تا برای فرآیند پوشش‌دهی آماده شود. مشخصات پوشش‌های TiO_2 تهیه شده با غلظت‌های مختلف Pluronic F127 در جدول ۱ خلاصه داده شده است.

۲-۳- روش پوشش‌دهی

زیرلایه‌های شیشه‌ای قبل از پوشش‌دهی با استفاده از سونیکاسیون به ترتیب در حلال‌های استون، اتانول مطلق و آب مقطر شسته شدند و سپس با هوای گرم خشک شدند. محلول TiO_2 بر روی این زیرلایه‌ها توسط روش غوطه‌وری^۴ رسوب داده شد؛ در این فرآیند، جهت دستیابی به ضخامت بهینه که بر خاصیت فتوکاتالیستی و شفافیت پوشش تاثیرگذار است، غلظت سل تیتانیا

5- X-Ray Diffraction (XRD)

6- Joint Committee on Powder Diffraction Standards

7- Scanning Electron Microscope (SEM)

8- Atomic force microscopy (AFM)

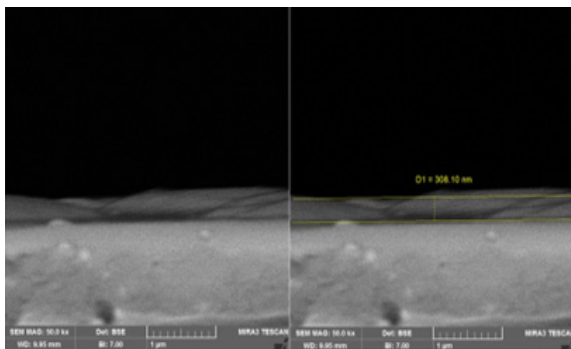
1- Merck

2- Etching

3- Hydrofluoric acid (HF)

4- Dip-Coating

مشاهده می‌شود، افزایش ضخامت پوشش‌ها موجب بهبود عملکرد فتوکاتالیستی پوشش‌ها گردید. یکی از علل این پدیده را می‌توان به این صورت بیان کرد که با افزایش ضخامت نمونه‌ها تا یک حد مشخص، مقدار TiO_2 موجود بر روی سطح و در نتیجه مقدار ماده فوتوکاتالیست افزایش و در نتیجه خاصیت فتوکاتالیستی این پوشش‌ها افزایش می‌یابد. از این رو نمونه‌ی دارای بیشترین ضخامت یعنی S-4 به عنوان نمونه‌ای با بالاترین عملکرد فتوکاتالیستی شناسایی شد، اما به علت دارا بودن ویژگی‌های ظاهری نامناسب از جمله کدر بودن مورد تایید قرار نگرفت و S-3 یعنی نمونه پوشش داده شده (تک لایه) به عنوان نمونه بهینه فتوکاتالیستی معرفی گردید. به این ترتیب پارامترهای پوشش‌دهی بهینه سازی شد و مبنای فعالیت‌های بعدی در این مطالعه قرار گرفت. برای تعیین ضخامت نمونه S-3، از سطح مقطع نمونه با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی تصویر گرفته شد که در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. تصویر FESEM نمونه پوشش داده شده با TiO_2 خالص.

Figure 2. FESEM Image of the Pure TiO_2 Coated Sample.

همان طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود ضخامت پوشش ایجاد شده بر روی زیرلایه‌ی شیشه حدوداً ۳۰۸ نانومتر تعیین شده است. به منظور بررسی ترکیب فازی پوشش‌های TiO_2 تهیه شده، از آزمون XRD استفاده شد. نمودارهای پراش اشعه ایکس پوشش‌های تهیه شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

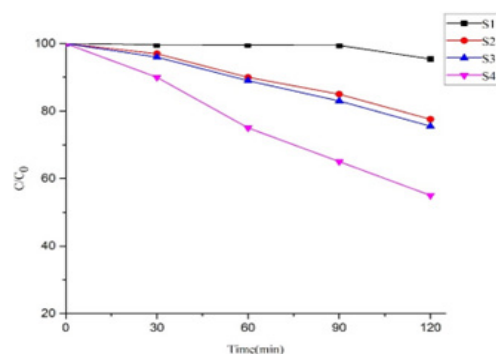
همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، ترکیب فازی پوشش‌های تهیه شده (C-1، C-2، و C-3) تنها از فاز آاناتاز تشکیل شده است که مربوط به دسته صفحات (۱۰۱) بوده و به ترتیب در زاویه‌های $25/482^\circ$ ، $25/153^\circ$ و $25/438^\circ$ مشاهده می‌شود. این فاز یکی از فازهای مهم TiO_2 شناخته می‌شود که به دلیل خواص نوری و فتوکاتالیستی مطلوب، کاربرد زیادی در پوشش‌های ضدبازتاب و سیستم‌های انرژی خورشیدی دارد [۱۲].

مورفولوژی سطح پوشش‌ها می‌تواند نقش مهم و تاثیرگذاری در تعیین عملکرد فتوکاتالیستی و در نهایت، خاصیت خودتمیزشوندگی

در بازه طول موج ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر با طیف‌سنج UV-Vis (Perkin Elmer Lambda 950) تحلیل شد. به منظور انجام آزمون فتوکاتالیستی، ۵۵ میلی لیتر محلول متیلن بلو^۲ با غلظت ۳ ppm تهیه شد و درون محفظه فتوکاتالیستی ساخته شده در آزمایشگاه بر روی یک همزن قرار گرفت. هر یک از نمونه‌ها ابتدا به مدت ۳۰ دقیقه در مقابل لامپ‌های UV قرار گرفت تا از نظر عملکرد فتوکاتالیستی (تهییج حامل‌های بار ایجاد شده بر اثر تابش نور) فعال شوند و پس از آن، درون محلول متیلن بلو و در مقابل لامپ‌ها قرار داده شد. قبل از وارد شدن نمونه به محلول و پس از آن، هر بار با فاصله‌های زمانی ۳۰ دقیقه، ۲ میلی‌لیتر از محلول به عنوان نمونه برداشته شد و پس از آزمون این نمونه‌ها توسط اسپکتروفوتومتری UV-Vis و رسم نمودار طول موج بر حسب جذب برای متیلن بلو، با محاسبه میزان c (غلظت متیلن بلو پس از زمان t) به c_0 (غلظت متیلن بلو بدون کاتالیست) میزان تخریب آلاینده بر حسب زمان گزارش شد.

۳- نتایج و بحث

برای بررسی تاثیر ضخامت پوشش بر خاصیت فتوکاتالیستی پوشش‌های TiO_2 خالص، میزان تجزیه نوری متیلن بلو توسط نمونه‌های S-1، S-2، S-3، S-4، پس از ۱۲۰ دقیقه تابش نور فرابنفش اندازه‌گیری و گزارش شد. نتایج آزمون فتوکاتالیستی این نمونه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. مقایسه عملکرد فتوکاتالیستی پوشش‌های TiO_2 خالص با ضخامت‌های مختلف تحت تابش فرابنفش.

Figure 1. Photocatalytic Performance Comparison of Pure TiO_2 Coatings of Various Thicknesses under UV Irradiation.

نتایج آزمون فتوکاتالیستی تحت تابش فرابنفش برای TiO_2 خالص حاکی از آن است که میزان تجزیه نوری متیلن بلو پس از ۱۲۰ دقیقه تابش فرابنفش در نمونه‌های S-1، S-2، S-3، S-4 به ترتیب، $4/55\%$ ، $22/43\%$ ، $24/48\%$ و 45% می‌باشد. همان طور که

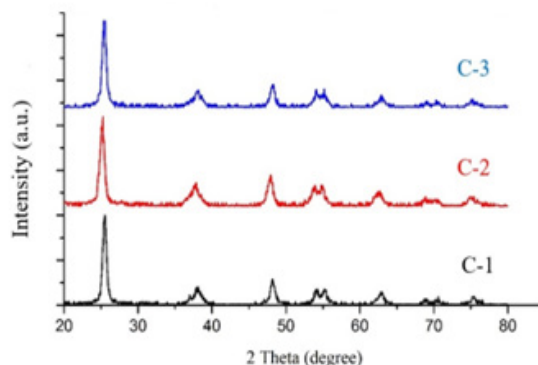
1- Ultraviolet (UV)- visible light spectroscopy
2- Methylene Blue (MB)

پوشش‌های C-1 با C-2 و C-3 مشاهده می‌شود که مورفولوژی سطح پوشش بدون عامل حفره‌ساز Pluronic F127، ساختار یکنواخت‌تری دارد، به طوری که فاصله موجود میان مرز جزیره‌های پوشش کمتر شده و بخش‌های بدون پوشش و دارای کندگی، کمتر مشاهده می‌شود. در میان پوشش‌های C-2 و C-3، با افزایش غلظت Pluronic F127، ساختارهای مزوحفره در پوشش‌ها ایجاد می‌شود که این ساختارهای مزوحفره به دلیل سطح تماس نسبتاً بالا و تخلخل مناسب، تاثیر مستقیمی بر بهبود فعالیت فتوکاتالیستی پوشش‌ها، کاهش ضریب شکست و بهبود خواص نوری آن‌ها دارد. اندازه حفره‌های ایجاد شده در پوشش‌های C-2 و C-3 کمتر از ۳۰ نانومتر گزارش شده است.

جهت بررسی تاثیر ساختارهای مزوحفره بر خاصیت فتوکاتالیستی پوشش‌ها، میزان تجزیه نوری متیلن بلو توسط آن‌ها به مدت ۱۲۰ دقیقه تحت تابش نور فرابنفش اندازه‌گیری شد که نتایج آن در شکل ۵ نشان داده شده است.

همان طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود عملکرد فتوکاتالیستی پوشش‌های حاوی C (Pluronic F127-۲ و C-3) تحت تابش نور فرابنفش در مقایسه با پوشش TiO_2 خالص (C-1)

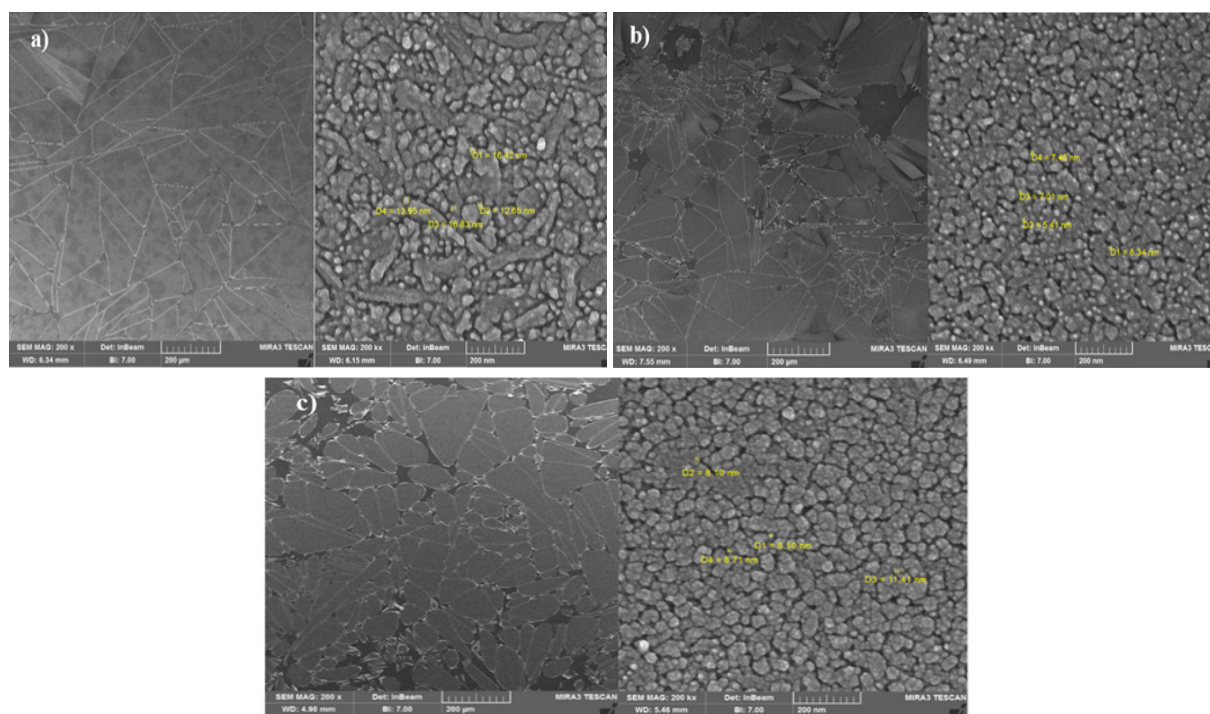
آن‌ها داشته باشد. از این رو مورفولوژی سطح پوشش‌های اعمال شده روی زیرلایه‌ی شیشه‌ای با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۴ تصاویر SEM پوشش‌های تهیه شده را نشان می‌دهد.



شکل ۳. نمودارهای XRD پوشش‌های تهیه شده با غلظت‌های مختلف Pluronic F127.

Figure 3. XRD Patterns of Coatings Prepared with Different Concentrations of Pluronic F127.

همان طور که در تصاویر SEM پوشش‌ها مشخص است، پوشش‌های C-1، C-2 و C-3 بر روی سطح زیرلایه به صورت



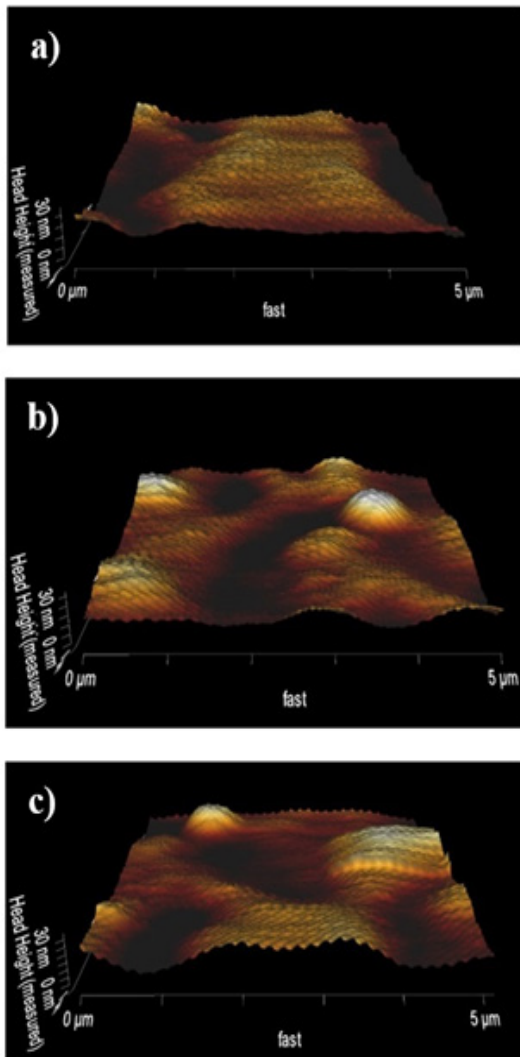
شکل ۴. تصاویر SEM پوشش (SEM a پوشش C-1، b پوشش C-2 و c پوشش C-3 در دو مقیاس ۲۰۰ میکرون و ۲۰۰ نانومتر.

Figure 4. SEM Images of a) C-1, b) C-2, and c) C-3 at Two Scales: 200 µm and 200 nm.

افزایش یافته است. با افزایش غلظت ماده حفره‌ساز Pluronic F127، تخلخل و مساحت سطح ویژه پوشش به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. ایجاد ساختار مزوحفره‌ای

جزیره‌ای دیده می‌شوند. در برخی از قسمت‌های پوشش، فاصله بین جزیره‌ها زیاد بوده و در بخش‌هایی کندگی و ریختگی پوشش مشاهده می‌شود. از مقایسه تصاویر میکروسکوپی مربوط به

۲/۴ نانومتر در پوشش C-3 افزایش یافته است.

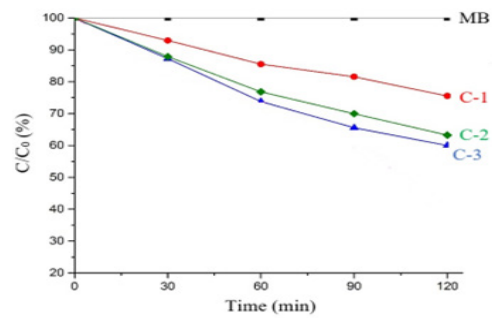


شکل ۶. تصاویر AFM (a) پوشش C-1، (b) پوشش C-2 و (c) پوشش C-3.

Figure 6. AFM Images of a) C-1, b) C-2, and c) C-3.

از آنجایی که هدف این مطالعه استفاده از این پوشش‌ها به عنوان لایه‌ی شفاف و محافظ سلول‌های خورشیدی است، خواص نوری آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پوشش‌های مناسب این کاربرد علاوه بر دارا بودن فعالیت فتوکاتالیستی و خودتمیزشوندگی، باید شفافیت بالا و عبور نور موثر در محدوده‌ی نور مرئی (۴۰۰-۷۰۰ نانومتر) را حفظ کنند تا از کاهش جذب فوتون در لایه‌ی فعال سلول جلوگیری شود. بنابراین بررسی میزان عبور نور و شفافیت پوشش‌ها به عنوان یکی از معیارهای کلیدی برای ارزیابی آن‌ها در کاربردهای فتوولتائیک ضروری است.

نتایج حاصل از طیف‌سنجی UV-Vis پوشش‌های تهیه شده در بازه‌ی طول موج ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده از آزمون عبور نوری نشان داد که با



شکل ۵. مقایسه عملکرد فتوکاتالیستی پوشش‌های تهیه شده با غلظت‌های مختلف Pluronic F127 تحت تابش نور فرابنفش.

Figure 5. Comparison of the Photocatalytic Performance of Coatings Prepared with Different Concentrations of Pluronic F127 under UV Irradiation.

منظم باعث می‌شود تعداد بیشتری از مراکز فعال فتوکاتالیستی در دسترس قرار گیرد و نفوذ نور و انتقال گونه‌های واکنش دهنده (مانند مولکول‌های آلاینده) به درون ساختار بهبود یابد. در نتیجه سطح تماس بین فتوکاتالیست و محیط واکنش بیشتر شده و فرآیند جداسازی بارهای نوری و تولید رادیکال‌های فعال تسهیل می‌گردد که نهایتاً منجر به افزایش بازدهی فتوکاتالیستی می‌شود. میزان تجزیه متیلن بلو تحت تابش نور فرابنفش توسط پوشش‌های C-1 با C-2 و C-3 در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳. میزان تجزیه متیلن بلو تحت تابش نور فرابنفش توسط پوشش‌های تهیه شده با غلظت‌های مختلف Pluronic F127.

Table 3. Degradation Rate of Methylene Blue under UV Irradiation by Coatings Prepared with Different Concentrations of Pluronic F127.

Sample	MB Degradation (%)
C-1	24
C-2	40
C-3	60

از سوی دیگر افزایش غلظت Pluronic F127 و حاکاکی شیمیایی پوشش‌ها با HF، باعث رشد زبری سطح نیز می‌شود. به گونه‌ای که ناهمواری‌های سطحی ایجاد شده علاوه بر افزایش مساحت موثر تماس، موجب پراکندگی بهتر نور و فراهم شدن سایت‌های فعال بیشتر برای جذب مولکول‌های آلاینده می‌گردند. ترکیب این دو عامل یعنی افزایش سطح ویژه ناشی از تخلخل و افزایش زبری سطح در نهایت منجر به ارتقای چشمگیر عملکرد فتوکاتالیستی پوشش‌ها می‌شود. نتایج حاصل از بررسی زبری سطح با آزمون میکروسکوپ نیروی اتمی در شکل ۶ نشان داده شده است. مقدار زبری مدل ریشه میانگین مربعی^۱ از ۱/۵ نانومتر در پوشش C-1 به

1- Root Mean Square (RMS)

با ضخامت بیش از حد ممکن است به دلیل کاهش شفافیت و ویژگی‌های ظاهری نامطلوب، برای کاربرد در سلول‌های خورشیدی مناسب نباشند. بر این اساس، پوشش تک‌لایه با ضخامت حدود ۳۰۸ نانومتر به‌عنوان نمونه بهینه انتخاب شد که بالاترین عملکرد فتوکاتالیستی را همراه با شفافیت مناسب نشان داد.

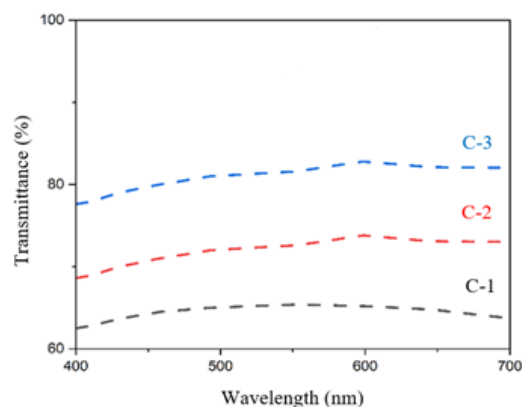
نتایج آزمون‌های فتوکاتالیستی نشان داد که افزودن عامل حفزه‌ساز Pluronic F127 و ایجاد ساختارهای مزوحفره با منافذی زیر ۳۰ نانومتر، منجر به افزایش چشمگیر سطح فعال و تخلخل پوشش شد. این امر موجب در دسترس بودن تعداد بیشتری مراکز فتوکاتالیستی و بهبود نفوذ نور و انتقال گونه‌های واکنش‌دهنده به درون پوشش گردید. به تبع آن، بازدهی تجزیه نوری آلاینده‌ها تحت تابش فرابنفش به شکل قابل توجهی افزایش یافت و پوشش‌های حاوی Pluronic F127 عملکرد بهتری نسبت به پوشش‌های TiO_2 خالص نشان دادند. علاوه بر افزایش فعالیت فتوکاتالیستی، حکاکی شیمیایی و افزایش غلظت Pluronic F127 موجب افزایش زبری سطح شد. بررسی‌های AFM نشان داد که ریشه میانگین مربعی زبری سطح از ۱/۵ نانومتر در پوشش بدون حفزه‌ساز به ۲/۴ نانومتر در پوشش متخلخل افزایش یافته است. این زبری کنترل شده، بدون کاهش عبور نور مرئی، موجب پراکندگی ملایم نور در داخل پوشش و افزایش مسیر نوری شد، که در نهایت شفافیت و میزان عبور نور را در محدوده ۴۰۰-۷۰۰ نانومتر بهبود داد.

در مقایسه با بهترین نمونه‌های گزارش شده برای پوشش‌های ضد بازتاب و فتوکاتالیستی TiO_2 تک لایه در مطالعات پیشین، اگرچه این پوشش از نظر عددی به حداکثر عبور نور گزارش شده در آن مطالعات نرسیده است، اما عملکرد بسیار متعادل و همزمانی را در هر دو ویژگی ضد بازتاب و فتوکاتالیستی ارائه می‌دهد. برتری و نوآوری اصلی کار حاضر در روش ساده و کم‌هزینه سل-ژل/غوطه‌وری به است که با تنها استفاده از یک افزودنی (Pluronic F127) و یک مرحله حکاکی شیمیایی پسین، توانسته است پوششی با عملکرد ترکیبی بسیار مطلوب (ضد بازتاب قابل قبول و فعالیت فتوکاتالیستی بالا) ایجاد کند. این در حالی است که بسیاری از مطالعات مذکور برای دستیابی به چنین نتایجی از روش‌های پیچیده‌تر، چندمرحله‌ای یا با هزینه بالاتر بهره برده‌اند. بنابراین، این تحقیق راهکاری کارآمد و مقرون به صرفه برای دستیابی همزمان به دو ویژگی کلیدی در پوشش‌های نازک TiO_2 ارائه می‌دهد.

به طور کلی، این پژوهش نشان داد که ترکیب بهینه تخلخل و زبری سطح در پوشش‌های TiO_2 ، علاوه بر ارتقای عملکرد فتوکاتالیستی و خودتمیزشوندگی، خواص نوری پوشش را برای

افزایش میزان تخلخل ناشی از حضور Pluronic F127، شفافیت و میزان عبور نور پوشش‌ها در محدوده‌ی مرئی بهبود یافته است. ایجاد ساختار متخلخل باعث نزدیک‌تر شدن ضریب شکست لایه به ضریب شکست هوا می‌شود. این پدیده منجر به کاهش اختلاف ضریب شکست در مرز فیلم-هوا و به تبع آن کاهش بازتاب نور می‌گردد، که در نهایت عبور نور از پوشش افزایش یافت و شفافیت آن بهبود می‌یابد. بنابراین افزایش تخلخل علاوه بر ارتقای عملکرد فتوکاتالیستی، به بهینه‌سازی خواص نوری و شفافیت پوشش نیز کمک می‌کند که برای کاربرد در سلول‌های خورشیدی اهمیت بسزایی دارد.

افزایش غلظت Pluronic F127 و حکاکی شیمیایی پوشش‌ها با HF، منجر به افزایش زبری سطح پوشش شده است. با وجود این، نتایج عبور نوری نشان داد که زبری ایجاد شده در مقیاس نانومتری بوده و مانعی برای عبور نور در محدوده‌ی مرئی محسوب نمی‌شود. در واقع چنین ناهمواری‌هایی به جای کاهش شفافیت، می‌توانند با ایجاد پدیده‌ی پراکندگی ملایم، مسیر نور را درون لایه افزایش داده و عبور موثر آن را تقویت کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که زبری کنترل شده سطح در کنار افزایش تخلخل، نه تنها باعث افت شفافیت پوشش نشده، بلکه به حفظ یا حتی بهبود خواص نوری آن برای کاربردهای فتوولتائیک کمک نموده است.



شکل ۷. طیف‌های عبور نور پوشش‌های تهیه شده با غلظت‌های مختلف Pluronic F127.

Figure 7. Transmission Spectra of Coatings Prepared with Different Concentrations of Pluronic F127.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه نشان داده شد که کنترل همزمان تخلخل و زبری سطح پوشش‌های TiO_2 می‌تواند نقش مهمی در بهبود خواص ضد بازتابی و عملکرد فتوکاتالیستی آن‌ها ایفا کند. افزایش ضخامت پوشش تا حد بهینه موجب افزایش میزان TiO_2 در سطح و در نتیجه ارتقای فعالیت فتوکاتالیستی می‌شود؛ با این حال، نمونه‌هایی

۵- مراجع

- [1] J. Qin, H. Lu, A review of self-cleaning coatings for solar photovoltaic systems: theory, materials, preparation, and applications. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 30(40) (2023), 91591-91616.
- [2] A. Syafiq, V. Balakrishnan, M.S. Ali, S.J. Dhoble, N. Abd Rahim, A. Omar, Application of transparent self-cleaning coating for photovoltaic panel: a review. *Curr. Opin. Chem. Eng.* 36(2022), 100801.
- [3] A.S. Sarkın, N. Ekren, Ş. Sağlam, A review of anti-reflection and self-cleaning coatings on photovoltaic panels. *Sol. Energy.* 199(2020), 63-73.
- [4] T. Sarver, A.A. Qaraghuli, L. Kazmerski, A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 22(2013), 698-733.
- [5] J. Zhou, L. Ci, J. Hu, S. Lin, Y. Hou, Y. Wang, F. Li, Preparation and characterization of superhydrophilic self-cleaning coating for solar cell cover glass applications. *J. Adhes. Sci. Technol.* 37(17)(2023), 2524-2536.
- [6] W. Glaubitt, P. Löbmann, Antireflective coatings prepared by sol-gel processing: Principles and applications. *J. Eur. Ceram. Soc.* 32(2012), 2995-2999.
- [7] L. Miao, L.F. Su, S. Tanemura, C.A. Fisher, L.L. Zhao, Q. Liang, G. Xu, Cost-effective nanoporous SiO₂-TiO₂ coatings on glass substrates with antireflective and self-cleaning properties. *Appl. Energy.* 112(2013), 1198-1205.
- [8] I. Arabatzis, N. Todorova, H. Fasaki, C. Tselmeli, A. Peppas, W.X. Li, Z. Zhao, Photocatalytic, self-cleaning, antireflective coating for photovoltaic panels: Characterization and monitoring in real conditions. *Sol. Energy.* 159(2018), 251-259.
- [9] D.F. Zambrano-Mera, R. Espinoza-Gonzalez, A. Rosenkranz, Enhanced erosion resistance of anti-reflective TiO₂/SiO₂ coatings induced by Zr-oxide doping. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 250(2023), 112079.
- [10] R. Swathi, J. Shanthi, K.K. Anoop, Design and fabrication of broadband omnidirectional antireflec-

کاربرد در سلول‌های خورشیدی حفظ و حتی بهبود می‌بخشد. این نتایج، پایه علمی جامعی برای طراحی پوشش‌های ضد بازتاب و چند کاربرده فراهم کرده و راهکاری اقتصادی، مقیاس‌پذیر و قابل تکرار برای افزایش کارایی و دوام سامانه‌های انرژی خورشیدی ارائه می‌دهد.

- tion coating for solar cell applications. *Opt. Mater.* 118(2021), 111246.
- [11] J. Wu, J. Tu, K. Hu, Sol-gel-derived bayberry-like $\text{SiO}_2@ \text{TiO}_2$ multifunctional antireflective coatings for enhancing photovoltaic power generation. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 654(2022), 130173.
- [12] E.A. Shchelokova, V.V. Tyukavkina, A. V. Tsyryatyeva, A. G. Kasikov, synthesis and characterization of $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ nanoparticles and their effect on the strength of self-cleaning cement composites. *Constr. Build. Mater.* 283(2021), 122769.
- [13] A.M. Law, L.O. Jones, J.M. Walls, The performance and durability of Anti-reflection coatings for solar module cover glass—a review. *Sol. Energy.* 261(2023), 85-95.
- [14] k. Ali, S.A. Khan, M.Z.M Jafri, Effect of double layer ($\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$) anti-reflective coating on silicon solar cells. *Int. J. Electrochem. Sci.* 9(2014), 7865-7874.
- [15] R. Salimi, A.A. Sabbagh Alvani, N. Naseri, S. Du, D. Poelman, Visible-enhanced photocatalytic performance of $\text{CuWO}_4/\text{WO}_3$ hetero-structures: Incorporation of plasmonic Ag nanostructures. *New J. Chem.* 42(2018), 11109-11116.
- [16] A. Rad, A. Afshar, M. Azadeh, Anti-reflection and self-cleaning meso-porous TiO_2 coatings as solar systems protective layer: Investigation of effect of porosity and roughness. *Opt. Mater.* 107(2020), 110027.
- [17] C. Tao, L. Zhang, Fabrication of multifunctional closed-surface $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ antireflective thin films. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 585(2020), 124045.
- [18] F. Chi, D. Liu, H. Wu, J. Lei, Mechanically robust and self-cleaning antireflection coatings from nanoscale binding of hydrophobic silica nanoparticles. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 200(2019), 109939.
- [19] L. Yao, J. He, Z. Geng, T. Ren, Fabrication of mechanically robust, self-cleaning and optically high-performance hybrid thin films by $\text{SiO}_2\&\text{TiO}_2$ double-shelled hollow nanospheres. *Nanoscale.* 7(2015), 13125-13134.
- [20] N. Chundi, E. Ramasamy, S. Koppoju, S. Mallick, A. Kottantharayil, S. Sakthivel, Quantum-sized TiO_2 particles as highly stable super-hydrophilic and self-cleaning antisoiling coating for photovoltaic application. *Sol. Energy.* 258(2023), 194-202.
- [21] A. Baqaei, A.A. Sabbagh Alvani, H. Sameie, Preparation of one-dimensional reduced titanium dioxide; A candidate for photocatalytic applications. *Adv. Mater. New Coatings.* 10(2022), 2872-2880.
- [22] A. Baqaei, A.A. Sabbagh Alvani, H. Sameie, F. Rosei, Role of pH in the Hydrothermal Synthesis of TiO_2 Nanorod Photocatalysts. *ChemistrySelect.* 8(2023), e202300792.
- [23] M. Amanulla, C.M. Magdalane, G. Ramalingam, R. Sundaram, N. Tamam, H.H. Somaily, M.S. Al-Buriahi, Fabrication and characterization of Th (MoO_4)₂/ TiO_2 nanocomposite for potential use in photocatalytic degradation of toxic pollutants. *Appl. Phys. A.* 128(2022), 397.
- [24] V.A. Ganesh, A.S. Nair, H.K. Raut, T.M. Walsh, S. Ramakrishna, Electrospun SiO_2 nanofibers as a template to fabricate a robust and transparent super-amphiphobic coating. *RSC Adv.* 2(2012), 2067-2072.
- [25] K. Guan, Relationship between photocatalytic activity, hydrophilicity and self-cleaning effect of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ films. *Surf. Coat. Technol.* 191(2005), 155-160.
- [26] R. Sivakumar, P. Gopalakrishnan, M. Sikkander Abdul Razak, Comparative analysis of anti-reflection coatings on solar PV cells through TiO_2 and SiO_2 nanoparticles. *Pigment Resin Technol.* 51(2022), 171-177.
- [27] D. Adak, S. Ghosh, P. Chakrabarty, A. Mondal, H. Saha, R. Mukherjee, R. Bhattacharyya, Self-cleaning V- TiO_2 : SiO_2 thin-film coatings with enhanced transmission for solar glass cover and related applications. *Sol. Energy.* 155(2017), 410-418.
- [28] A. Soklič, M. Tasbihi, M. Kete, U.L. Štangar, Deposition and Possible Influence of a Self-Cleaning Thin $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ Film on a Photovoltaic Module Efficiency. *Catal. Today.* 252(2015), 54-60.
- [29] W. Lin, X. Hu, X. You, L. Yan, X. Zhang, H.

- Chen, Design of four-layer tri-wavelength silica antireflective coatings with vector method containing absentee layer. *Results Phys.* 13(2019), 102203.
- [30] H. Khmissi, B. Azeza, M. Bouzidi, Z. Al-Rashidi, Investigation of an Antireflective Coating System for Solar Cells based on Thin Film Multilayers. *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.* 14(2024), 14374-14379.
- [31] H. Zhong, Y. Hu, Y. Wang, H. Yang, TiO_2 /silane coupling agent composed of two layers structure: A super-hydrophilic self-cleaning coating applied in PV panels. *Appl. Energy.* 204(2017), 932-938.
- [32] M.A.M.L. de Jesus, G. Timò, C. Agustín-Sáenz, I. Braceras, M. Cornelli, A. de Mello Ferreira, Anti-soiling coatings for solar cell cover glass: Climate and surface properties influence. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 185(2018), 517-523.
- [33] X. Wang, H. Ding, G. Lv, R. Zhou, R. Ma, X. Hou, W. Li, Fabrication of superhydrophilic self-cleaning SiO_2 - TiO_2 coating and its photocatalytic performance. *Ceram. Int.* 48(2022), 20033-20040.
- [34] P. Cai, M. Xu, M. Wei, T. Zhang, F. Yao, Preparation and characterization of SiO_2 - TiO_2 superhydrophilic coatings with photocatalytic activity induced by low temperature. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 686(2024), 133264.
- [35] L. Yang, J. Yang, D. Yang, A durable superhydrophilic self-cleaning coating based on TiO_2 - SiO_2 -PAA nanocomposite for photovoltaic applications: Long-term outdoor study. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 268(2024), 112731.
- [36] V. Purcar, V. Rădițoiu, A. Dumitru, C.A. Nicolae, A.N. Frone, M. Anastasescu, S. Căprărescu, Antireflective coating based on TiO_2 nanoparticles modified with coupling agents via acid-catalyzed sol-gel method. *Appl. Surf. Sci.* 487(2019), 819-824.
- [37] W. Lin, J. Zheng, L. Yan, X. Zhang, Sol-gel preparation of self-cleaning SiO_2 - TiO_2 / SiO_2 - TiO_2 double-layer antireflective coating for solar glass. *Results Phys.* 8(2018), 532-536.
- [38] T. Adachi, S.S. Latthe, S.W. Gosavi, N. Roy, N. Suzuki, H. Ikari, C. Terashima, Photocatalytic, superhydrophilic, self-cleaning TiO_2 coating on cheap, light-weight, flexible polycarbonate substrates. *Appl. Surf. Sci.* 458(2018), 917-923.
- [39] L. Ye, Y. Zhang, X. Zhang, T. Hu, R. Ji, B. Ding, B. Jiang, Sol-gel preparation of SiO_2 / TiO_2 / SiO_2 - TiO_2 broadband antireflective coating for solar cell cover glass. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 111(2013), 160-164.
- [40] Y.E. Ahmed, M.R. Maghami, J. Pasupuleti, S.H. Danook, F. Basim Ismail Overview of recent solar photovoltaic cooling system approach. *Technologies.* 12(2024), 171.
- [41] S. Nundy, A. Ghosh, T.K. Mallick, Hydrophilic and superhydrophilic self-cleaning coatings by morphologically varying ZnO microstructures for photovoltaic and glazing applications. *ACS Omega.* 5(2020), 1033-1039.
- [42] G. Wei, D. Yang, T. Zhang, X. Yue, F. Qiu, Fabrication of multifunctional coating with high luminous transmittance, self-cleaning and radiative cooling performances for energy-efficient windows. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 202(2019), 110125.
- [43] L. Yao, Z. Qu, Z. Pang, J. Li, S. Tang, J. He, L. Feng, Three-layered hollow nanospheres based coatings with ultrahigh-performance of energy-saving, antireflection, and self-cleaning for smart windows. *Small.* 14(2018), 1801661.
- [44] M.J. Powell, R. Quesada-Cabrera, A. Taylor, D. Teixeira, I. Papakonstantinou, R.G. Palgrave, I.P. Parkin, Intelligent multifunctional VO_2 / SiO_2 / TiO_2 coatings for self-cleaning, energy-saving window panels. *Chem. Mater.* 28(2016), 1369-1376.
- [45] B.G. Priyadarshini, A.K. Sharma, Design of multi-layer anti-reflection coating for terrestrial solar panel glass. *Bull. Mater. Sci.* 39(2016), 683-689.