

تأثیر ماده پلی دی متیل سیلوکسان (PDMS) بر پوشش سیلیکا تولید شده به روش سل-ژل

چکیده:

به منظور کاهش بازتاب نور و افزایش بهره‌وری سلول‌های خورشیدی، استفاده از پوشش سیلیکا بر سطح شیشه رایج است. با این حال، شکنندگی ذاتی این پوشش‌ها می‌تواند عملکرد مکانیکی آن‌ها را محدود کند. در این پژوهش، پلیمر پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (PDMS) به عنوان ماده‌ای با پیوندهای پلیمری منعطف و خاصیت آب‌گریزی، به منظور بهبود خواص مکانیکی و سطحی پوشش‌ها مورد بررسی قرار گرفت. دو رویکرد برای اعمال PDMS ارزیابی شد: نخست، استفاده از آن در فرآیند ساخت سل، و دوم، لایه‌نشانی مستقیم بر روی پوشش سیلیکا. برای تحلیل عملکرد نمونه‌ها، از روش‌های طیف‌سنجی عبوری در ناحیه مرئی-فرابنفش (UV-Vis)، طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوری (FT-IR)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آزمون زاویه تماس بهره گرفته شد. نتایج نشان دادند که هر دو نوع پوشش دارای عبور نوری حدود ۹۳٪ هستند که نسبت به شیشه بدون پوشش (۹۰٪) بهبود قابل توجهی دارد. همچنین، زاویه تماس قطره آب با سطح پوشش برابر با ۹۵ درجه اندازه‌گیری شد که نشان‌دهنده آب‌گریزی مطلوب سطح است. این ویژگی ناشی از حضور PDMS بوده و انتظار می‌رود که جذب رطوبت در طول زمان کاهش یافته و خواص نوری پوشش پایدار باقی بماند.

کلید واژه: پوشش ضد بازتاب، آب‌گریز، سیلیکا، پلی دی متیل سیلوکسان، سل-ژل.

Effect of polydimethylsiloxane (PDMS) on silica coating produced by sol-gel method

Abstract:

To reduce light reflection and enhance the efficiency of solar cells, silica coatings are commonly applied to glass surfaces. However, the inherent brittleness of these coatings can limit their mechanical performance. In this study, polydimethylsiloxane (PDMS), a flexible polymer with hydrophobic properties, was investigated to improve both mechanical and surface characteristics of the coatings. Two approaches were evaluated: incorporating PDMS during the cell fabrication process, and directly depositing it onto the silica coating. The performance of the samples was assessed using UV-Visible transmission spectroscopy, Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR), scanning electron microscopy (SEM), and contact angle measurement using deionized water droplets. The results showed that both types of coatings exhibited approximately 93% light transmittance, which is a significant improvement compared to uncoated glass (90%). Additionally, the contact angle of water droplets on the coated surface was measured at 95°, indicating excellent hydrophobicity. This property is attributed to the presence of PDMS, suggesting that moisture absorption over time will be minimized and the optical performance of the coating will remain stable.

Keywords: Anti-reflective coating, hydrophobicity, silica, polydimethylsiloxane, sol-gel.

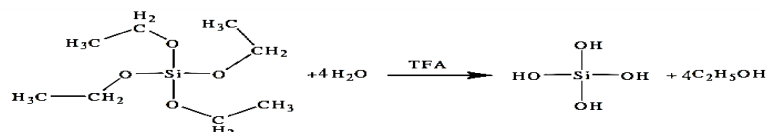
در دهه‌های اخیر، نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از استفاده گسترده از سوخت‌های فسیلی، از جمله گرم شدن زمین و باران‌های اسیدی، توجه جهانی را به سوی منابع انرژی تجدیدپذیر معطوف کرده است. در این میان، انرژی خورشیدی به‌عنوان منبعی پاک، پایدار و در دسترس در تمام طول سال، جایگاه ویژه‌ای در میان فناوری‌های نوین تولید انرژی یافته است [۱]. در این میان، پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک (PV) به‌عنوان یکی از مؤثرترین ابزارهای تبدیل انرژی خورشیدی به برق، نقش کلیدی ایفا می‌کنند. با این حال، بازدهی این پنل‌ها به شدت تحت تأثیر میزان عبور نور به سطح سلول‌های خورشیدی قرار دارد. به منظور کاهش بازتاب نور و افزایش جذب آن، پوشش‌های ضدبازتاب^۱ توسعه یافته‌اند. پوشش‌های ضدبازتاب با بهبود عبور نور در محدوده طول موج مرکزی ۵۵۰ نانومتر، که بیشترین حساسیت سلول‌های PV در آن قرار دارد، عملکرد نوری پنل‌ها را بهینه می‌سازند. ضریب شکست^۲ یکی از پارامترهای کلیدی در طراحی پوشش‌های ضدبازتاب است، چرا که شفافیت محیط و میزان عبور نور را تعیین می‌کند. بر اساس معادله لرد ریلی^۳، ضریب شکست ایده‌آل برای کاهش بازتاب باید در حدود ۱.۲۲ باشد. دستیابی به چنین ضریب شکستی معمولاً از طریق ایجاد ساختارهای متخلخل یا چندلایه امکان‌پذیر است. در این راستا، دی‌اکسید سیلیکون (SiO_2) به دلیل ضریب شکست پایین، پایداری شیمیایی بالا، فراوانی در طبیعت و شفافیت مناسب، به‌عنوان ماده‌ای پرکاربرد در ساخت پوشش‌های ضدبازتاب شناخته می‌شود [۴-۲]. با این حال، یکی از چالش‌های مهم در عملکرد بلندمدت پوشش‌های ضدبازتاب تجمع گرد و غبار و رطوبت بر سطح آن‌هاست که می‌تواند عبور نور را کاهش داده و خواص نوری و مکانیکی پوشش را تخریب کند. تخلخل پوشش به‌منظور ضریب شکست کمتر باید توسط هوا پر شده باشد. اگر با اشیای دیگر پر شوند، ضریب شکست و بازتاب افزایش می‌یابد. از این‌رو، افزودن ویژگی‌هایی نظیر مقاومت در برابر سایش و خاصیت خودتمیزشوندگی، به‌ویژه خودتمیزشوندگی آب‌گریز، به‌عنوان راهکاری مؤثر در افزایش دوام و کارایی این پوشش‌ها مطرح شده است [۵-۸]. در این راستا، پلیمرهای آب‌گریز متعددی از جمله پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (PDMS)، پلی‌متیل‌متاکریلات (PMMA) و پلی‌تترافلوئورواتیلن (PTFE) در ساخت این پوشش‌ها به‌کار گرفته شده‌اند. در میان این مواد، PDMS به دلیل دارا بودن ضریب شکست پایین، شفافیت بالا در ناحیه فرابنفش-مرئی (بیش از ۸۵٪)، و قابلیت ایجاد پیوندهای قوی با زیرلایه‌های شیشه‌ای، به‌عنوان یکی از گزینه‌های برجسته در طراحی پوشش‌های خودتمیزشونده شناخته می‌شود [۹]. واکنش‌های هیدرولیز و چگالش PDMS و TEOS در شکل ۱ مشاهده می‌شود. مولکول پلی دی متیل سیلوکسان (PDMS) گروه‌های هیدروکسیل و متیل بسیاری دارد. گروه‌های هیدروکسیل PDMS می‌توانند با گروه‌های هیدروکسیل سطح ذرات سیلیکا دهیدراته و در نتیجه پیوند کووالانسی مابین ذرات سیلیکا ایجاد می‌شود. همچنین گروه‌های آب‌گریز متیل وارد پوشش می‌کند و در نتیجه آب‌گریزی پوشش‌ها بهبود می‌یابد [۱۰]. براساس مطالعات انجام شده، PDMS رفتار مکانیکی، انعطاف‌پذیری و شکل‌پذیری را بهبود می‌دهد و تردی را حذف می‌کند. برای ساختار متخلخل، این ماده به شدت سطح ویژه را کاهش می‌دهد و در نتیجه تخلخل‌ها یکنواخت و آن‌ها را بهم پیوند می‌دهند. درجه کاهش بستگی به مقدار PDMS دارد. هر چه مقدار بیشتر، سطح ویژه بیشتر کاهش می‌یابد [۱۱]. پژوهشگران نشان دادند، PDMS چقرمگی و انعطاف‌پذیری شبکه ژل را با کاهش در فشار کاپیلاری افزایش می‌دهد. لذا می‌توان پوشش‌هایی با ضخامت بیشتر و بدون ترک تولید کرد [۱۲].

¹ Anti-Reflective Coatings - ARCs

² Refractive Index - RI

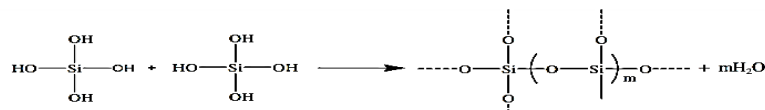
³ Lord Rayleigh

(۱) هیدرولیز TEOS



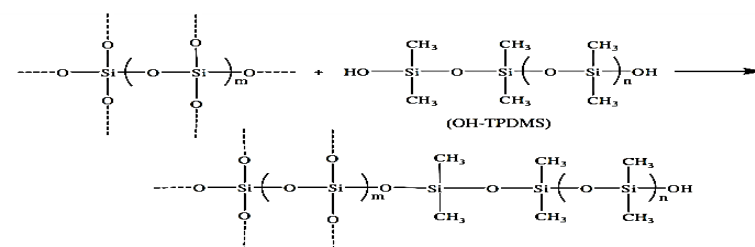
(۲) چگالش TEOS

هیدرولیز شده



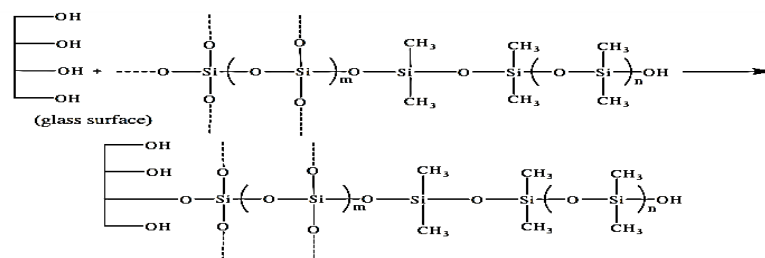
(۳) واکنش چگالش با OH-

TPDMS



(۴) پیوند شیمیایی TEOS-

PDMS با سطح شیشه



شکل ۱: واکنش‌های هیدرولیز و چگالش PDMS و TEOS [۱۲].

در این پژوهش، به منظور افزایش پایداری عملکرد پوشش‌های ضدبازتاب، دو هدف هم‌زمان دنبال شد: (۱) دستیابی به خاصیت ضدبازتابی و (۲) ایجاد خاصیت آب‌گریزی سطح. برای تحقق این اهداف، از دی‌اکسید سیلیکون (SiO_2) به دلیل برخورداری از ضریب شکست پایین جهت بهبود عبور نور، و از پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (PDMS) به عنوان ماده‌ای با ویژگی آب‌گریزی، استفاده گردید. فرآیند پوشش‌دهی با بهره‌گیری از روش غوطه‌وری (Dip-Coating) انجام شد؛ این روش به دلیل سادگی اجرا، قابلیت پوشش‌دهی سطوح با هندسه پیچیده، و امکان دستیابی به لایه‌ای یکنواخت و همگن، انتخاب گردید [۲، ۹].

۲- روش پژوهش

برای ساخت سل سیلیکا از مواد زیر استفاده شد:

تترا اتیل ارتوسیلیکات (TEOS , Merck Chemicals (800658), purity > 98%) یک آلکوکسید است. در این پژوهش آلکوکسید به دلیل دارا بودن حلقه هیدروکربنی بلند، متقارن و توانایی بهتر مخلوط شدن و شرکت در واکنش‌ها، انتخاب گردید. اتیل استواسات (Ethyl acetate) (EAA), Sigma-Aldrich Chemicals (809622), purity 99% به عنوان عامل جمع کننده^۵ و پایدارکننده ترکیبات آلی

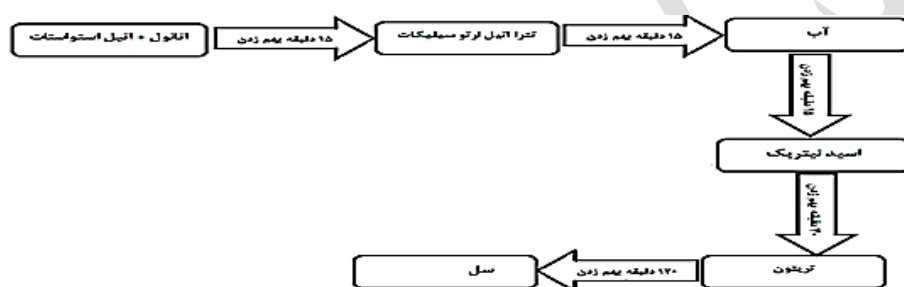
^۴ Polydimethylsiloxane

^۵ Chelating agent

مورد استفاده قرار می‌گیرد. عامل جمع کننده همانند چنگک ترکیبات آلی سیلسیم را جذب کرده و از پراکندگی، رسوب و عدم یکنواختی در سطح پوشش جلوگیری می‌کند. اتانول (EtOH, absolute grade, IRAN) به عنوان حلال ترکیبات آلی و آلکوکسیدی و آب مقطر (H₂O, distilled water) به منظور واکنش‌های هیدرولیز و چگالش استفاده می‌شود. اسید نیتریک (HNO₃, Merck Chemicals (100456) purity 65%) به عنوان کاتالیست و تسریع کننده استفاده می‌شود. پلی دی متیل سیلوکسان (PDMS, Sigma-Aldrich Chemicals (482005) purity 99%) به عنوان ماده پیوند دهنده و آب‌گریز استفاده گردید. تریتون (TX-100, Sigma-Aldrich Chemicals, purity 99%) به عنوان افزودنی تخلخل زا به مقدار ۴۰ گرم بر لیتر مورد استفاده قرار گرفت. زیرا تخلخل منجر به کاهش ضریب شکست و در نتیجه افزایش عبور نور می‌شود.

سل‌های سیلیکا با نسبت های مولی و دیاگرام شکل ۲ آماده شدند:

H₂O: EtOH: TEOS: HNO₃ = 1:3.5:0.175:0.01



شکل ۲: نحوه آماده سازی سل های سیلیکا

برای آماده‌سازی محلول، از دستگاه هیتر مگنت ساخت ایران (برند آلفا) با سرعت چرخش ۲۵۰ دور بر دقیقه (rpm) استفاده شد. پس از هم‌زدن کامل، محلول به مدت ۲۴ ساعت در شرایط محیطی جهت انجام فرآیند پیرسازی نگهداری گردید. در مرحله بعد، محلول پیرشده در بشر مخصوص به دستگاه پوشش‌دهی غوطه‌وری ساخت ایران منتقل شد. پیش از انجام عملیات پوشش‌دهی، لام‌های آزمایشگاهی ابتدا با آب مقطر و سپس با اتانول شستشو داده شده و در دمای محیط خشک شدند. لام‌های خشک‌شده در دستگاه غوطه‌وری قرار گرفتند و فرآیند پوشش‌دهی با سرعت رفت و برگشت ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه و زمان غوطه‌وری ۳۰ ثانیه انجام شد. پس از اعمال پوشش، نمونه‌ها برای مدت کوتاهی در هوای آزاد قرار گرفتند تا خشک شوند. در نهایت، جهت تثبیت پوشش، نمونه‌ها به کوره برنامه‌دار ساخت ایران منتقل گردیدند.

برای ارزیابی اثر ماده پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان، دو روش متفاوت مورد استفاده قرار گرفت:

۱. روش اول – افزودن PDMS به سل سیلیکا گروه (h):

در این روش، مقدار ۲ میلی‌لیتر پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان به ۵۰ میلی‌لیتر محلول سل سیلیکا اضافه شد. نمونه‌های تهیه‌شده با این روش تحت عنوان گروه h نام‌گذاری شدند.

۲. روش دوم – اصلاح پوشش تک‌لایه سیلیکا با PDMS گروه (a):

در این روش، پس از آماده‌سازی پوشش تک‌لایه سیلیکا، نمونه‌ها به مدت ۳۰ ثانیه و با سرعت غوطه‌وری ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه در محلول آب‌گریز حاوی پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان غوطه‌ور شدند. این گروه با پسوند a شناخته می‌شود.

فرآیند عملیات حرارتی نمونه‌ها:

بر اساس نتایج تحقیقات و با در نظر گرفتن دمای تبخیر آب و تجزیه ماده تریتون، عملیات حرارتی به صورت زیر انجام می‌شود:

۱. مرحله اول:

در مدت ۳۰ دقیقه، دمای نمونه‌ها به ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. سپس به مدت ۱۵ دقیقه در این دما باقی می‌مانند تا رطوبت موجود کاملاً تبخیر شود.

۲. مرحله دوم:

دما در مدت ۳۰ دقیقه به ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. در این دما نیز نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه نگهداری می‌شوند تا فرآیند تجزیه تریتون آغاز گردد.

۳. مرحله سوم:

طی ۴۵ دقیقه، دما به ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. سپس نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در این دما باقی می‌مانند تا واکنش‌های نهایی کامل شده و ساختار ماده تثبیت شود.

۴. مرحله پایانی:

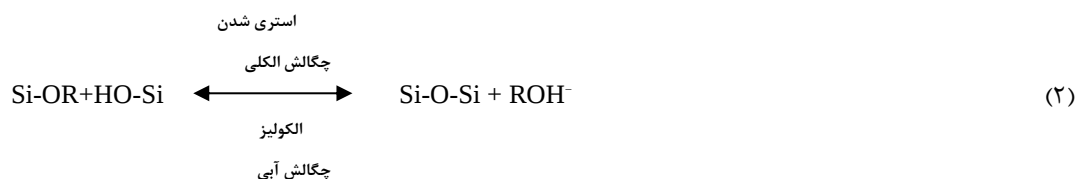
پس از اتمام مراحل حرارتی، نمونه‌ها به صورت تدریجی و کنترل‌شده درون کوره سرد می‌شوند تا از بروز شوک حرارتی و ترک‌خوردگی جلوگیری شود.

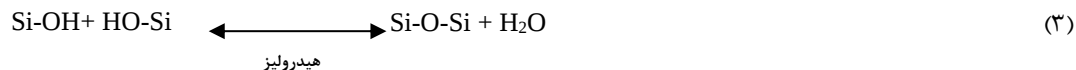
پس از آماده سازی نمونه‌ها به منظور بررسی رفتار نوری پوشش‌ها از دستگاه طیف سنجی (UV-VIS (Jasco V-570 استفاده گردید. به منظور بررسی گروه‌های عاملی به وجود آمده بر سطح پوشش از دستگاه طیف نگاری مادون قرمز (FT-IR (Jasco v-550 استفاده شد. طیف نگاری مادون قرمز یک ابزار قدرتمند برای بررسی گروه‌های شیمیایی موجود در پوشش‌ها می‌باشد [۱۳]. طیف نگاری جذب در محدوده 400 cm^{-1} - 4000 cm^{-1} انجام گردید. برای بررسی پیوندهای پوشش، شیشه بدون پوشش به عنوان مرجع در نظر گرفته شد. به منظور بررسی مورفولوژی، اندازه ذرات و ضخامت از میکروسکوپ الکترونی روبشی (FE-SEM (MIRA II LMU بهره گرفته شد. برای آماده سازی نمونه‌ها به ابعاد 1×1 سانتی متر مربع برش داده شدند. به منظور بررسی خاصیت خود تمیز شوندگی از تست ترشوندگی استفاده شد. برای این تست از دستگاه Contact angle instrument (Data Physics OCA 15 plays) استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

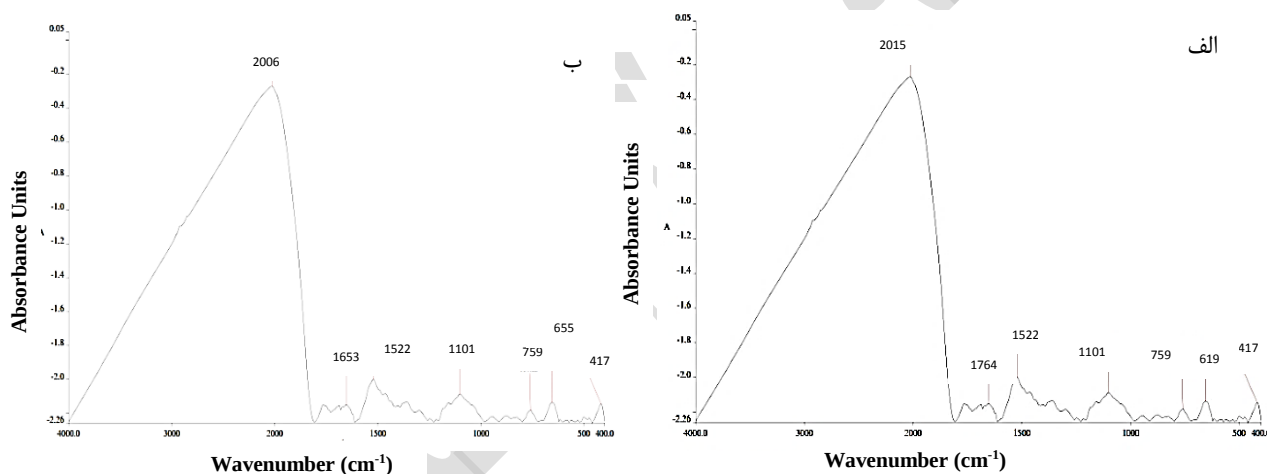
۳-۱- طیف نگاری مادون قرمز

منحنی‌های طیف نگاری مادون قرمز (FT-IR) نمونه‌های تک لایه سیلیکا دو سری a و h تولید شده در شکل ۳ دیده می‌شود. مشخصاً پیک‌ها در 1080 cm^{-1} و $800, 450\text{ cm}^{-1}$ به ترتیب مربوط به ارتعاشات کششی جنبشی یا نوسانی، خمشی و نامتقارن پل‌های سیلیکا هستند [۱۴-۱۵]. در پوشش‌های سیلیکا پیوند سیلیکا در 1100 cm^{-1} و 415 cm^{-1} رخ داده است. ارتفاع پیک‌ها نشان از شدت و میزان گروه‌های عاملی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پیک‌های s-a نسبت به پیک‌های s-h دارای شدت بیشتری است. واکنش‌های هیدرولیز و چگالش سیلیسیم در رابطه‌های ۱، ۲ و ۳ ملاحظه می‌شوند [۱۶-۲۰].

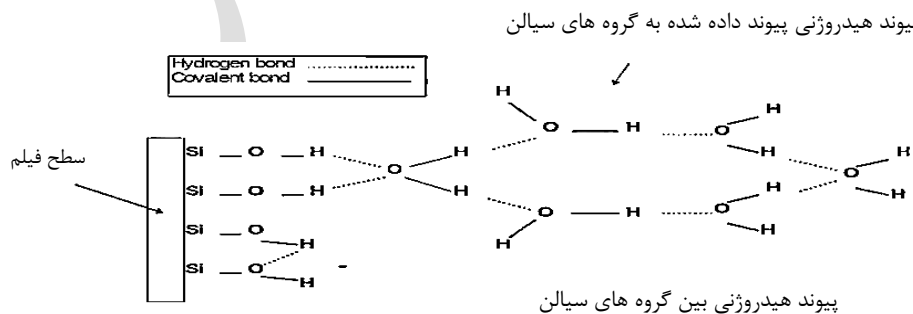




در فرآیند هیدرولیز TEOS، گروه‌های هیدروکسیل سیلیکاتی (Si-OH) تشکیل می‌شوند. در صورتی که این گروه‌ها به‌طور کامل وارد واکنش‌های چگالش نشوند، به‌صورت گروه‌های سیلان باقی مانده و در سطح پوشش نهایی حضور خواهند داشت. این گروه‌های سیلان با ایجاد پیوندهای هیدروژنی با مولکول‌های آب، موجب افزایش آب‌دوستی سطح می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است [۲۱]، این پدیده منجر به جذب قابل‌توجه آب از محیط می‌گردد. افزودن PDMS به سیستم، از طریق فرآیند دهیدراته‌سازی، موجب کاهش تعداد گروه‌های هیدروکسیل سطحی شده و در عوض، گروه‌های متیل آب‌گریز ($-\text{CH}_3$) را به ساختار پوشش معرفی می‌کند [۲۲]. این تغییر شیمیایی باعث کاهش تمایل سطح به جذب آب و افزایش خاصیت آب‌گریزی پوشش می‌شود. در هر دو نمونه پوشش s-a و s-h، حضور پیک‌های مشخصه گروه Si-CH_3 در نواحی طیفی 1260 cm^{-1} و همچنین بین $900-920 \text{ cm}^{-1}$ مشاهده شده است، که نشان‌دهنده وقوع واکنش‌های کووالانسی بین PDMS و ذرات سیلیکا است. همچنین، پیک جذب در 1640 cm^{-1} که مربوط به جذب فیزیکی آب از محیط است، در نمونه s-h دیده می‌شود اما در نمونه s-a وجود ندارد. این تفاوت نشان می‌دهد که فرآیند لایه‌نشانی در نمونه s-a مؤثرتر بوده و منجر به کاهش جذب رطوبت سطحی شده است.



شکل ۳: طیف جذب پوشش‌های تک لایه سیلیکا (الف) s-h، (ب) s-a

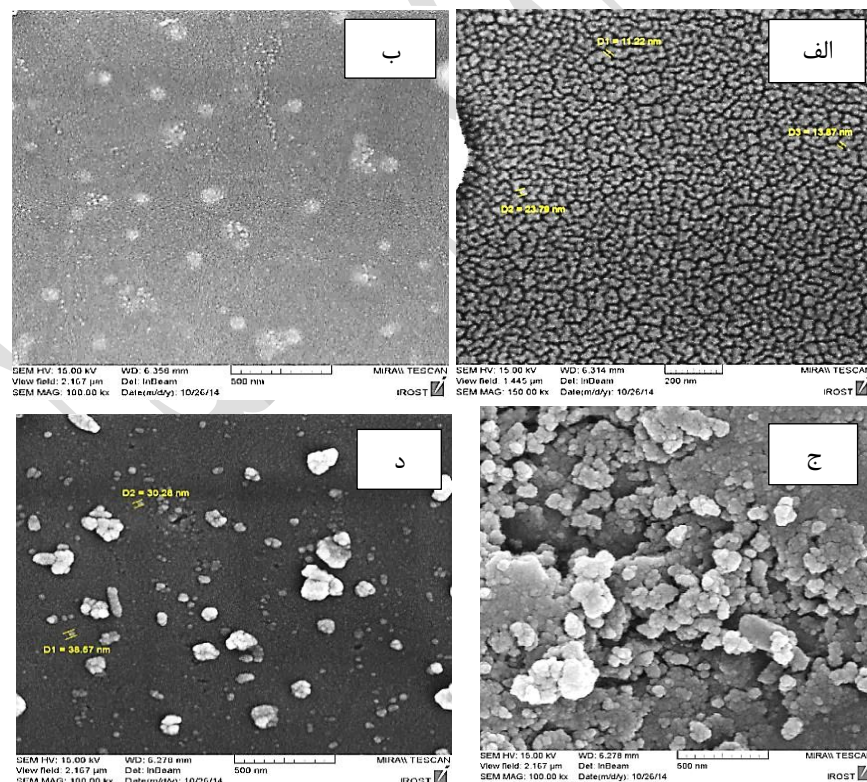


شکل ۴: شماتیک آب دوستی سطح پوشش‌های TEOS [۲۱].

۲-۳ تصاویر میکروسکوپی

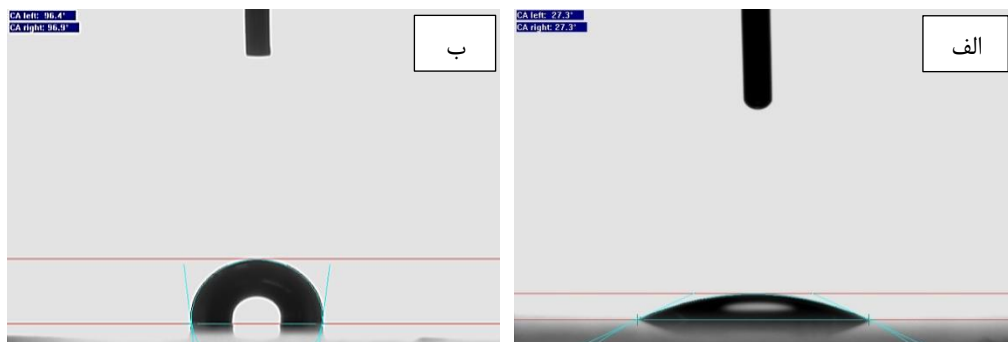
تصاویر میکروسکوپی پوشش‌های s-a و s-h در شکل ۵ مشاهده می‌شود. بر سطح پوشش s-a جزایر سفید رنگی دیده می‌شود. این ناخالصی‌ها به علت غوطه‌وری پوشش در محلول PDMS و عدم عملیات حرارتی پس از غوطه‌وری تشکیل شده است. با چشم غیر مسلح نیز می‌توان وجود لکه‌ها را مشاهده کرد. اما در حالت s-h چون در محلول سل از PDMS استفاده شده، این لکه‌ها بر سطح دیده نشده و پوشش یکنواخت‌تر به نظر می‌رسد. بر اساس تصاویر، اندازه ذرات در پوشش s-a حدود ۱۵ نانومتر و در پوشش s-h حدود ۳۰ نانومتر تخمین زده شده است. این تفاوت اندازه به دلیل واکنش بین ذرات سیلیکا و گروه‌های فعال ارگانوسیلیکون موجود در PDMS است که در شکل ۶ نیز به آن اشاره شده است. [۲۳]

گروه‌های هیدروکسیل موجود در مولکول پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (PDMS) با گروه‌های هیدروکسیل سطحی ذرات سیلیکا واکنش می‌دهند. این واکنش‌ها منجر به تشکیل پیوندهای کووالانسی قوی بین ذرات شده و در نتیجه، ساختارهایی با اندازه بزرگ‌تر و انسجام بیشتر ایجاد می‌شود. در نمونه‌ای که PDMS در مرحله سل‌سازی به محلول حاوی TEOS افزوده شده حالت (s-h)، واکنش بین این دو ترکیب باعث تشکیل پیوندهای سیلیکاتی از نوع Si-O-Si در اطراف ذرات سیلیکا می‌گردد. این فرآیند نه تنها موجب رشد اندازه ذرات می‌شود، بلکه به افزایش زبری سطح پوشش نیز منجر می‌گردد. افزایش اندازه ذرات تأثیر قابل توجهی بر پراکندگی نور دارد؛ به‌طوری‌که سطح زبرتر باعث افزایش پراکندگی و کاهش یکنواختی نوری می‌شود. بررسی نواحی ترک‌خورده یا شکسته‌شده پوشش نیز نشان‌دهنده ساختار کروی ذرات است، که تأییدی بر نحوه تجمع و رشد آن‌ها در فرآیند پوشش‌دهی می‌باشد.



شکل ۵: تصاویر میکروسکوپی پوشش‌های سیلیکا حاوی پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (الف و ب) پوشش s-a، (ج و د) پوشش s-h

نشان می‌دهند که حضور PDMS باعث افزایش اندازه ذرات سیلیکا در سل شده و در نتیجه زبری سطح افزایش یافته است. این افزایش زبری، همراه با کاهش انرژی سطحی، نقش مهمی در تقویت خاصیت آب‌گریزی ایفا می‌کند. لذا پوشش به دست آمده به علت خواص آب‌گریزی پایدار است.



شکل ۷: زاویه تماس (الف) شیشه بدون پوشش، (ب) پوشش سیلیکا حاوی پلی دی متیل سیلوکسان

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، پوششی بر پایه سیلیکا حاوی پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (PDMS) با استفاده از روش ساده و مقرون‌به‌صرفه سل-ژل، به‌طور موفقیت‌آمیز بر سطح شیشه لایه‌نشانی شد. به‌منظور بررسی تأثیر PDMS، دو رویکرد مورد ارزیابی قرار گرفت: نخست، افزودن PDMS به سل سیلیکا و دوم، اعمال آن بر روی پوشش سیلیکا پس از تشکیل. نتایج تجربی نشان دادند که هر دو روش موجب افزایش حدود ۳ درصدی عبور نور نسبت به شیشه بدون پوشش شدند. زاویه تماس سطح پوشش‌دار حدود ۹۵ درجه اندازه‌گیری شد که بیانگر خاصیت آب‌گریزی قابل توجه آن است. این ویژگی به حضور گروه‌های آلی آب‌گریز در پیش‌ماده PDMS نسبت داده می‌شود که با کاهش ترشوندگی سطح، موجب افزایش مقاومت در برابر جذب آب می‌گردند. با توجه به ماهیت آب‌گریز و پیوندهای شیمیایی قوی‌تر، انتظار می‌رود این پوشش در طول زمان پایداری مناسبی از نظر عملکرد نوری و ساختاری داشته باشد.

واژه نامه

فارسی	English Term
پوشش ضد بازتاب	Anti-reflective coating (ARC)
سلول های فتوولتائیک	Photovoltaic (PV) cells
سیلیکا	Silica (SiO_2)
روش سل-ژل	Sol-gel method
پلی دی متیل سیلوکسان	Polydimethylsiloxane (PDMS)
آبگریزی	Hydrophobicity
زاویه تماس	Contact angle
طیف سنجی عبوری (UV-Vis)	Transmission spectroscopy (UV-Vis)
طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه	Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR)
میکروسکوپ الکترونی روبشی	Scanning electron microscopy (SEM)
ضریب شکست	Refractive index (RI)
خاصیت خود تمیز شونده	Self-cleaning property
گروه های هیدروکسیل	Hydroxyl groups ($-\text{OH}$)
گروه های متیل	Methyl groups ($-\text{CH}_3$)
پیوند کووالانسی	Covalent bond
تخلخل	Porosity
پوشش دهی غوطه وری	Dip-coating
عملیات حرارتی	Thermal treatment
جذب رطوبت	Moisture absorption
عملکرد نوری	Optical performance

۵- منابع

1. M. S. Mozumder, A. H. I. Mourad, H. Pervez, and R. Surkatti, "Recent developments in multifunctional coatings for solar panel applications: A review", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 189, pp. 75–102, 2019.
2. L. A. N. Aspa, and C. M. L. Escutin, "A Review of additives and their effects on the hydrophobicity and abrasion resistance of dip-coated silica-based anti-reflective coatings for solar panels", *Materials Science Forum*, vol 1076, pp. 83-88, 2022.
3. Q. Zhang, H. Liu, S. Zhao, and W. Dong, "Hydrophobic and optical properties of silica antireflective coating prepared via sol-gel method", *Mater. Res. Express*, vol. 8, no. 4, p. 046403, 2021.
4. Y. Zhu, L. Chen, C. Zhang, and Z. Guan, "Preparation of hydrophobic antireflective SiO_2 coating with deposition of PDMS from water-based SiO_2 -PEG sol", *Applied Surface Science*, vol. 455, pp. 103–110, 2018.

5. G. San Vicente, R. Bayón, N. Germán, Morales, "A Long-term durability of sol–gel porous coatings for solar glass covers", *Thin Solid Films*, vol. 517, pp. 3157–3160, 2009.
6. W. Zhang, C. Ye, and Q. Liu, "Development of anti-reflective coatings with photocatalytic and hydrophobic self-cleaning property for solar cells", *Surfaces and Interfaces*, vol. 65, Art. no. 106454, 2025.
7. H. Salehi, A. Eshaghi, M. Rezazadeh, and H. Zabolian, "Antireflective and anti-dust modified silica based thin film on solar cell cover glass", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 892, Art. no. 162228, 2022.
8. J. Zhi and L. Z. Zhang, "Durable superhydrophobic surface with highly antireflective and self-cleaning properties for the glass covers of solar cells", *Applied Surface Science*, vol. 454, pp. 239–248, 2018.
9. A. Syafiq, V. Balakrishnan, M. S. Ali, S. J. Dhoble, N. A. Rahim, A. Omar, and A. H. Abu Bakar, "Application of transparent self-cleaning coating for photovoltaic panel: a review", *Chemical Engineering*, vol. 36, Art. no. 100801, 2022.
10. A. Wan I. Wan, N. Wan I. Wan, S. Abdul K. Aemi, and M. M. Sanagi, "Preparation and characterization of a new sol–gel hybrid based tetraethoxysilane-polydimethylsiloxane as a stir bar extraction sorbent material", *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, vol. 58, no. 3, pp. 602–611, 2011.
11. K. Sinko, "Influence of chemical conditions on the nanoporous structure of silicate aerogels", *Materials*, vol. 3, pp. 704–740, 2010.
12. Y. Zhang, X. Zhang, H. Ye, B. Xiao, L. Yan, Jiang. Bo, "A simple route to prepare crack-free thick antireflective silica coatings with improved antireflective stability", *Materials Letters*, vol. 69, pp. 86–88, 2012.
13. V. V. Ganbavle, U. K. H. Bangi, S. S. Latthe, S. A. Mahadik, and A. V. Rao, "Self-cleaning silica coatings on glass by single step sol–gel route", *Surface & Coatings Technology*, vol. 205, pp. 5338–5344, 2011.
14. S. E. Babayan, J. Y. Jeong, A. Schutze, V J. Tu, M. Moravej, G S. Selwyn, R F. Hicks, "Deposition of silicon dioxide films with a non-equilibrium atmospheric-pressure plasma jet", *Plasma Sources Sci. Technol*, vol. 10, pp. 573–57, 2001.
15. V. Purcar, I. Stamatin, O. Cinteza, C. Petcu, V. Raditoiu, M. Ghiurea, T. Miclaus, A. Andronie. "Fabrication of hydrophobic and antireflective coatings based on hybrid silica films by sol–gel process", *Surface & Coatings Technology*, vol. 206, pp. 4449–4454, 2012.
16. C. J. Brinker, "Hydrolysis and condensation of silicates: effects on structure", *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 100, pp. 31–50, 1988.
17. C. Milea, A. Bogatu, and A. Duta, "Silica sol-gel process", *Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series I: Engineering Sciences*, vol. 4, no. 1, pp. 59–66, 2011.
18. X. Shi, D. Graiver, and R. Narayan, "Hydrolysis and condensation of hydrophilic alkoxysilanes under acidic conditions", *Silicon*, vol. 4, pp. 109–119, 2012.
19. M. M. Adnan, A. R. M. Dalod, M. H. Balci, M. A. Einarsrud, and J. Glaum, "In situ synthesis of hybrid inorganic–polymer nanocomposites", *Polymers*, vol. 10, no. 10, pp. 1129, 2018.
20. A. M. Abebe, G. D. Soraru, G. Thothadri, D. M. Andoshe, A. Zambotti, G. M. S. Ahmed, V. Tirth, and A. Algahtani, "Synthesis and characterization of high surface area transparent SiOC aerogels from hybrid silicon alkoxide: A comparison between ambient pressure and supercritical drying", *Materials*, vol. 15, no. 4, pp. 1277, 2022.
21. P. Lavin, "Optimization of ormosil thin films for sensor applications", *School of Physical Sciences, Dublin City University*, 1997.
22. O. Kesmez, H. Erdem, E. Burunkaya, E. Arpac, "Preparation of antireflective SiO₂ nanometric films", *Ceramics International*, vol. 36, pp. 391–394, 2010.
23. X. Wang, J. Shen. "A review of contamination-resistant antireflective sol–gel coatings", *J Sol-Gel Sci Technol*, vol. 61, pp. 206–212, 2012.
24. S. Cai, Y. Zhang, H. Zhang, H. Yan, H. Lv, B. Jiang. "Sol–Gel preparation of hydrophobic silica antireflective coatings with low refractive index by base/acid two-step catalysis", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 6, pp. 11470–11475, 2014.