

اصلاح سطح نانوذرات فیومدسیلیکا جهت ساخت لایه نفوذی ابرآبگریز به

عنوان محافظ نمای ساختمان

مهفام ناصری بروجنی، بهروز موحدی

گروه نانوفناوری، دانشکده شیمی، دانشگاه اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۱۷ - پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۲۵)

چکیده

در این مقاله هدف ساخت لایه نفوذی ابرآبگریز جهت حفظ نمای ساختمان است. در این پژوهش ابتدا سطح نانوذرات فیومدسیلیکا توسط پلیمر پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان اصلاح شد و سپس سوسپانسیون از نانوذرات اصلاح شده بر پایه آب/اتانول و عامل پایدار کننده سدیم دو سیل سولفات ساخته شد. لایه نفوذی ابرآبگریز بر سطح آجر نمای ساختمان با فرایند برس‌زنی و پاششی اعمال شد. به منظور ارزیابی خواص لایه نفوذی ابرآبگریز بر سطح آجر، از آزمون‌های رایلم، قابلیت تنفس، شوره زدگی، زاویه‌ی تماس و زاویه‌ی لغزش قطره آب استفاده شد. نتایج نشان داد پتانسیل زتا برای سوسپانسیون حاوی نانوذرات فیومدسیلیکا آبدوست و سوسپانسیون حاوی نانوذرات فیومدسیلیکا آبرگریز به ترتیب برابر -25.4mV و -55.9mV است. بر اساس آزمون طیف سنتی مادون قرمز تبدیل فوریه چون جابه‌جایی قابل توجه طیف‌ها مشاهده نگردید بنابراین مکانیزم اتصال مولکول‌های اصلاح کننده با سطح نانوذرات از نوع فیزیکی گزارش شد. حداقل و حداکثر مقدار پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان برای آبرگریز کردن سطح نانوذرات فیومدسیلیکا ۵ و ۱۵ درصد وزنی به دست آمد. زاویه‌ی تماس قطره آب بر سطح آجر که با لایه نفوذی آبرگریز آغشته شده است، بیش از 150° و زاویه‌ی لغزش 4° است که نشان دهنده خاصیت ابرآبگریزی این لایه است. این خاصیت ابرآبگریزی طبق مکانیزم کسی-بکستر ناشی از ایجاد سطحی با زبری در مقیاس میکرو/نانو و انرژی سطحی بسیار پایین محقق شد. براساس آزمون رایلم، بعد از گذشت ۲۰ دقیقه، نفوذ آب به داخل آجر آبرگریز شده، صورت نگرفت. همچنین طبق آزمون شوره، بعد از گذشت ۱۵ روز هیچ‌گونه رسوب نمکی بر سطح آجر مشاهده نشد. علاوه بر این، لایه نفوذی ابرآبگریز قابلیت تنفس پذیری مطلوبی را بر سطح آجر نمای ساختمان ایجاد کرد.

واژه‌های کلیدی: ابرآبگریزی، نانوذرات فیومدسیلیکا، پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان، لایه نفوذی.

Surface modification of fumed silica nanoparticles to make a super-hydrophobic diffusion layer as a protection for the building facade

Mahfam Naseri Borujeni, Behrooz Movaheidi

Department of Nanotechnology, Faculty of Chemistry, University of Isfahan, Isfahan, 81746-73441, Iran

(Received 8 March 2022, accepted 16 July 2022)

Abstract

In this article, the goal is to build a super-hydrophobic diffusion layer to preserve the facade of the building. In this research, first, the surface of fumed silica nanoparticles was modified by polydimethylsiloxane polymer, and then a suspension of modified nanoparticles was made based on water/ethanol and the stabilizing agent sodium dodecyl sulfate. The super-hydrophobic diffusion layer was applied on the brick surface of the buildings using brushing and spraying process. In order to evaluate the properties of the super-hydrophobic diffusion layer on the brick surface, Rilem test, breathability, efflorescence, contact angle and water drop sliding angle were used. The results showed that the zeta potential for the suspension containing hydrophilic fumed silica nanoparticles and the suspension containing hydrophobic fumed silica nanoparticles is -25.4 mV and -55.9 mV , respectively. Based on the Fourier transform infrared spectrometry test, since no significant shift of the spectra was observed, therefore, the mechanism of connection of modifier molecules with the surface of nanoparticles was reported as physical. The minimum and maximum amount of polydimethylsiloxane polymer for hydrophobization the surface of fumed silica nanoparticles was 5 and 15% by weight. The contact angle of the water drop on the surface of the brick, which is coated with a hydrophobic diffusion layer, is more than 150° and the sliding angle is 4° , which shows the super-hydrophobic property of this layer. This super-hydrophobic property was achieved according to the Cassie-Baxter mechanism due to the creation of a surface with micro/nano scale roughness and very low surface energy. According to Rilem test, after 20 minutes, water did not penetrate into the hydrophobic brick. Also, according to the efflorescence test, after 15 days, no salt deposits were observed on the surface of the brick. In addition, the super-hydrophobic diffusion layer created a favorable breathability on the brick surface of the building facade.

Keywords: Super-hydrophobicity, Fumed silica nanoparticles, Polydimethylsiloxane, Diffusion layer.

E-mail of corresponding author: b.movaheidi@ast.ui.ac.ir.

مقدمه

سطح زبر به عنوان یک ماده‌ی آبگریز متخلخل مانع نفوذ مایع به داخل ناهمواری‌های سطحی می‌شود. در اینجا بسته‌های هوایی به عنوان یک فاز آبگریز شناخته می‌شوند. این رفتار در طبیعت به اثر لوتوس شناخته شده است. ساختار سطحی گیاه لوتوس دارای زبری‌هایی در مقیاس میکرو و نانو است که امکان حبس شدن هوا را در زیر قطرات آب فراهم می‌کند در نتیجه آب نمی‌تواند سطح گیاه را خیس کند. روش دیگری برای افزایش زاویه تماس، اصلاح شیمیایی سطح به واسطه استفاده از مواد با انرژی سطحی کم است که برای تولید لایه‌های نازک ابرآبگریز استفاده می‌شود [۱-۴].

نانوذرات فیومدسیلیکا دارای گروه‌های سیلانول سطحی بسیاری هستند که این محصول را ذاتاً آبدوست می‌کند. غیر فعالسازی گروه‌های سیلانول سطحی از طریق اصلاح شیمیایی سطح نانوذرات، باعث کاهش انرژی سطحی و آبگریز شدن آنها می‌شود [۵]. تحقیقات انجام شده در این زمینه توسط Basu و همکاران [۶] ساخت پوشش دو لایه‌ی نانوکامپوزیتی سیلیکا/پلی‌دی‌متیل سیلوکسان (PDMS) ابرآبگریز و روغن‌گریز، با به کار گیری یک لایه‌ی نازک از فلورو آلکیل سیلان به عنوان ماده‌ای با انرژی سطحی پایین را نشان می‌دهد. Ke و همکاران [۷] لایه‌های نازک بر پایه PDMS و SiO₂ با زاویه‌تماس ۱۵۵ درجه و زاویه لغزش ۶ درجه با روش پاششی تولید کردند. Tu و همکاران [۸] با استفاده از نانوذرات سیلیکا و پلی‌دی‌متیل سیلوکسان پوششی روی بستر چوب ایجاد کردند. Cholewinski و همکاران [۹] لایه‌ای ابرآبگریز شامل ذرات سیلیکا اصلاح شده با پلی‌دی‌متیل سیلوکسان به عنوان لایه‌ی رویی و یک لایه بستر از جنس اپوکسی ساختند. Lu و همکاران [۱۰] یک سطح ابرآبگریز شفاف و پایدار بر زیر لایه‌های مختلفی مانند کاشی، بتون، چوب و آلیاژ با استفاده از نانوذرات آبگریز سیلیکا اصلاح شده ایجاد کردند. Sun و همکاران [۱۱] به منظور تولید یک سوسپانسیون آبی پراکنده از نانوذرات سیلیکای آبگریز، از

نمای ساختمان‌ها و بناها از گذشته‌های دور دارای اهمیت ویژه‌ای بودند. علت‌های مختلفی در تخریب بناها و ساختمان‌ها موثر هستند از جمله عوامل فیزیکی مانند آلودگی هوا، باران، برف و عوامل دیگری که موجب از بین رفتن و فرسایش نمای ساختمان می‌شود. به دلیل این که شروع فرسایش از خارجی‌ترین لایه‌ها در سطح آغاز می‌شود، عملیات سطحی نقش موثری را در حفظ و جلوگیری از فرسایش و از بین رفتن بنای ساختمان‌ها دارد. در ساختمان‌ها، نفوذ آب به داخل نمای ساختمان ناشی از باران یا هر عامل دیگری، یکی از دلایل اصلی آسیب دیدن بنا است. به همین دلیل ایجاد یک لایه آبگریز روی سطح بنا می‌تواند بسیار موثر باشد چون با آبگریزی سطح فرایند تخریب به تعویق می‌افتد و علاوه بر آن با ایجاد خاصیت خودتمیزشوندگی، ظاهر نمای ساختمان‌ها نیز حفظ می‌شود.

زاویه‌ی تماس برای سطوح آبگریز بیش از ۹۰ درجه و برای سطوح آبدوست کمتر از ۳۰ درجه است. اصطلاح ابرآبگریزی معمولاً برای توصیف سطوح با زاویه‌تماس قطره آب بیش از ۱۵۰ درجه و زاویه‌لغزش کمتر از ۵ درجه استفاده می‌شود. مطالعات نشان داده‌است که ترکیبی از زبری در مقیاس‌های نانو-میکرو و انرژی سطحی پایین برای یک سطح می‌تواند اثر ابرآبگریزی ایجاد کند. دو مدل برای توصیف اثر آبگریزی در حضور زبری‌های سطحی مطرح است. اولی، مدل ونزل^۱ است که مرطوب‌سازی را هنگامی که مایع در پستی و بلندی‌های سطحی قرار دارد توصیف می‌کند. در این مدل زاویه‌تماس به علت افزایش مساحت سطح زبر، در مقایسه با مساحت سطح صاف افزایش می‌یابد. تئوری دیگر مدل کسی-بکستر^۲ است که مربوط به حالتی می‌شود که هوا در بسته‌هایی زیر قطره مایع به دام افتاده‌اند. در این جا

¹ Wenzel

² Cassie-Baxter

ساعت توسط همزن مغناطیسی هم‌زده شد. سوسپانسیون حاصل به منظور ایجاد یک لایه‌ی نفوذی ابر آبگریز، توسط روش‌های برس‌زنی و پاششی بر سطح آجر نمای ساختمان اعمال شد. در این پژوهش آزمون‌هایی همچون طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (JASCO FTIR Nano Partice Analyzer SZ-6300)، زتا پتانسیل (100 و TG-DTG (TGA 209 F3Tarsus) با نرخ گرمایش $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$) موجود در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه اصفهان و FESEM (Leo 1550 Gemini) موجود در مرکز پژوهش متالورژی رازی) برای مشخصه‌یابی نانوذرات و سوسپانسیون، انجام شد. به منظور ارزیابی خواص لایه نفوذی اعمال شده بر سطح آجر از آزمون‌های زاویه تماس و زاویه لغزش (CA-ES10)، آزمون رایلم، قابلیت تنفس و مقاومت در برابر شوره استفاده شد.

نتایج و بحث

الف) اصلاح سطح نانوذرات فیومدسیلیکا

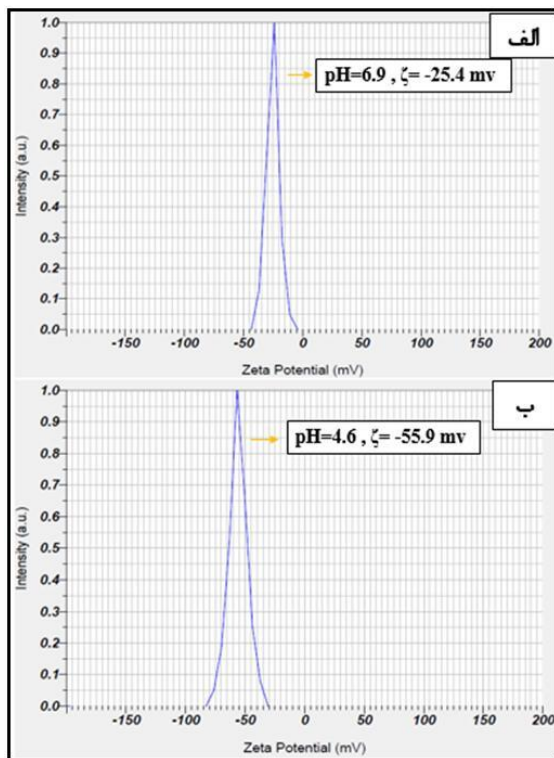
به منظور محاسبه‌ی مقدار PDMS بارگذاری شده بر سطح نانوذرات فیومدسیلیکا آزمون TG-DTG انجام شد. با توجه به نمودار شکل ۱، کاهش اولیه تا دمای حدود 200°C درجه‌ی سانتی‌گراد مربوط به تبخیر آب است که شامل آب جذب شده و ساختاری است. کاهش دوم در دمای $445/5^{\circ}\text{C}$ درجه‌ی سانتی‌گراد مربوط به حذف PDMS جذب شده از سطح نانوذرات است [۱۲]. که حدود ۵ درصد را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که مقدار PDMS به کار رفته برای اصلاح‌سازی سطح نانوذرات حدود ۱۵ درصد وزنی بود که مقدار ۵ درصد به عنوان حداقل مقدار PDMS مورد نیاز جهت اصلاح‌سازی سطح نانوذرات فیومدسیلیکا انتخاب شد.

ماده فعال سطحی سدیم دو دسیل سولفات (SDS) به عنوان پراکنده‌ساز استفاده کردند. در این مقاله به ساخت و ارزیابی لایه نفوذی ابر آبگریز بر سطح آجر نمای ساختمان به منظور حفظ و بالابردن طول عمر نمای ساختمان از عوامل مخربی مانند رطوبت و باران‌های اسیدی پرداخته شده است. با توجه به مطالعات مروری ارائه شده، در این پژوهش ابتدا نانوذرات فیومدسیلیکا با عوامل اصلاح‌کننده سطحی مانند سدیم دو دسیل سولفات و پلی‌دی‌متیل سیلوکسان اصلاح شد و سپس سوسپانسیون حاوی این نانوذرات تهیه و بر سطح آجر نما اعمال گردید. در ادامه خواص فیزیکی و ویژگی‌های ساختاری لایه نفوذی مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت.

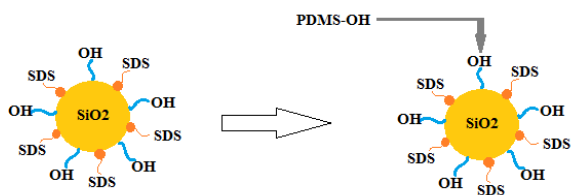
مواد و روش‌ها

نانوذرات فیومدسیلیکا (قطر متوسط 50 nm)، فعال‌کننده سطحی سدیم دو دسیل سولفات و حلال اتانول از شرکت مرک و پلی‌دی‌متیل سیلوکسان دارای گروه هیدروکسیل انتهایی از شرکت سیگما آلدریج تهیه شد. برای اصلاح سطح نانوذرات فیومدسیلیکا، ابتدا محلول اتانول و آب دوبار تقطیر با نسبت ۹ به ۱ تهیه شد و سپس مقدار ۱۵ درصد وزنی پلی‌دی‌متیل سیلوکسان (PDMS) به آن اضافه و با استیک اسید pH محلول روی ۴ الی ۵ تنظیم شد. نانوذرات فیومدسیلیکا به محلول حاصل اضافه گردید و به مدت یک ساعت هم‌زده شد. پس از تمام شدن مراحل، سوسپانسیون در داخل آن در دمای 70°C درجه‌ی سانتی‌گراد برای ۶ الی ۷ ساعت قرار گرفت تا کاملاً خشک شود. به منظور ساخت سوسپانسیون حاوی نانوذرات اصلاح شده (آبگریز) جهت اعمال بر سطح آجر، ابتدا نانوذرات آبگریز با اتانول مرطوب و با آب دوبار تقطیر به غلظت مشخص رسید. سپس مقدار مشخصی از سورفکتانت سدیم دو دسیل سولفات (SDS) به سوسپانسیون اضافه شد و به مدت ۶

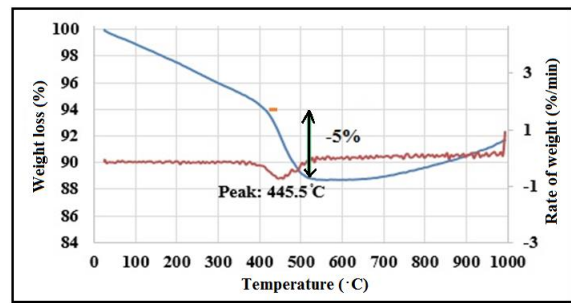
کلوخه‌ای شدن آنها جلوگیری و سوسپانسیون پایداری را ایجاد می‌کند [۱۳-۱۵]. SDS با فرمول شیمیایی $\text{NaC}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4$ در سوسپانسیون، از سر آبدوست یعنی SO_4 بر سطح نانوذرات فیومدسیلیکا جذب می‌شود و سر آبگریز آن یعنی $\text{NaC}_{12}\text{H}_{25}$ را به سمت بیرون می‌گذارد. بنابراین نانوذرات در داخل سوسپانسیون توسط مکانیزم فضایی پایدار می‌شوند. شکل ۴ مکانیزمی از اتصال SDS و PDMS را بر سطح نانوذرات فیومدسیلیکا نشان می‌دهد.



شکل ۳. نمودار پتانسیل زتا نانوذرات فیومدسیلیکا به همراه عامل پایدار کننده SDS (الف) آبدوست، (ب) آبگریز.

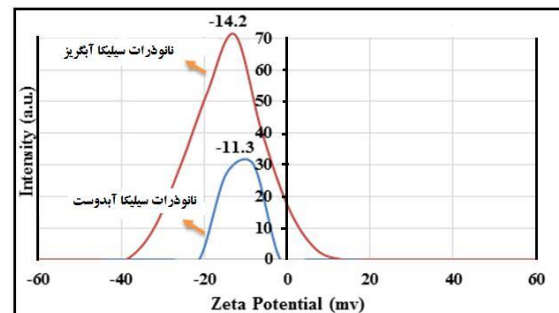


شکل ۴. مکانیزم اصلاح سطح و پایدارسازی نانوذرات فیومدسیلیکا در سوسپانسیون.



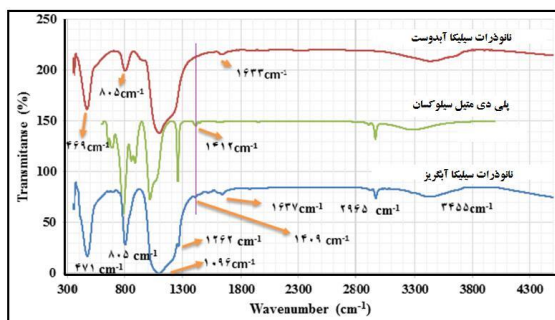
شکل ۱. نمودار TG-DTG نانوذرات فیومد سیلیکا اصلاح شده با PDMS

به منظور ارزیابی پایداری سوسپانسیون‌های حاوی نانوذرات فیومدسیلیکا اصلاح شده (آبگریز) و اصلاح نشده (آبدوست)، پتانسیل زتا آنها به طور مجزا اندازه‌گیری شد (شکل ۲) که به ترتیب برابر $14/2 \text{ mV}$ و $11/3 \text{ mV}$ بود. این نتایج نشان می‌دهد که سوسپانسیون‌ها از پایداری مناسبی برخوردار نیستند.



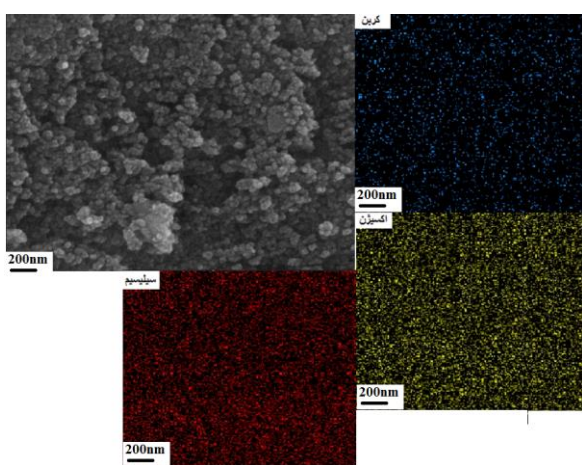
شکل ۲. نمودار پتانسیل زتا نانوذرات فیومدسیلیکا آبدوست و آبگریز.

به منظور بهبود ویژگی پایداری سوسپانسیون‌ها از عامل پراکنده ساز SDS استفاده شد. مطابق نمودار شکل ۳ پتانسیل زتا برای سوسپانسیون حاوی نانوذرات فیومدسیلیکا آبدوست برابر $25/4 \text{ mV}$ و برای سوسپانسیون حاوی نانوذرات فیومدسیلیکا آبگریز برابر $55/9 \text{ mV}$ شد. پس از اضافه کردن SDS به سوسپانسیون حاوی نانوذرات، اندرکنش‌های یونی بین بارهای مثبت و منفی باعث ایجاد زنجیره‌ای از مولکول‌های SDS پیرامون نانوذرات می‌شود که از



شکل ۵. طیف FTIR نانوذرات فیومدسیلیکا آبدوست و آبگریز به

همان عامل اصلاح ساز PDMS



شکل ۶. مورفولوژی نانوذرات فیومدسیلیکا آبگریز با توزیع عناصر

کربن، اکسیژن، سیلیسیم.

ب) خواص ابرآبگریزی لایه نفوذی بر سطح آجر

به منظور ارزیابی ویژگی ابرآبگریزی نانوذرات فیومدسیلیکا اصلاح شده، زاویه تماس و لغزش قطره‌ی آب اندازه‌گیری شد. ابتدا سوسپانسون نانوذرات فیومدسیلیکا تهیه و سپس بر سطح آجر اعمال و پس از گذشت ۲۴ ساعت از زمان اعمال، زاویه تماس و لغزش قطره آب اندازه‌گیری شد (جدول ۱). همچنین اثر قطرات آب بر سطح آجر، مطابق شکل ۷ بدست آمد. همان طور که مشاهده می‌شود لایه نفوذی اعمال شده بر سطح آجر، زبری سطح را افزایش داده که باعث به دام انداختن هوا داخل حفره‌های سطحی می‌شود. در نتیجه کاهش نیروی چسبندگی بین آب و سطح جامد اتفاق می‌افتد که


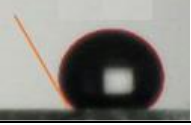
به منظور ارزیابی اندرکنش‌های سطحی در نانوذرات اصلاح شده از آزمون FTIR استفاده شد. طبق شکل ۵ طیف‌های مشاهده شده در نانوذرات آبگریز در عدد موج 3455 cm^{-1} و در نانوذرات آبدوست در عدد موج 3430 cm^{-1} مربوط به لرزش کششی گروه هیدروکسیل موجود در سطح نانوذرات است [۱۷و۱۶]. عدد موج در طیف نانوذرات آبگریز 2965 cm^{-1} و 1409 cm^{-1} را می‌توان به ترتیب به کشش متقارن و نامتقارن پیوندهای C-H در Si-CH₃ نسبت داد که می‌تواند ناشی از واکنش فیزیکی PDMS با سطح نانوذرات باشد [۱۸و۱۹]. در واقع اثر آبگریزی در نانوذرات اصلاح سطح شده به دلیل جایگزینی H در پیوند Si-OH توسط گروه غیرقطبی Si-CH₃ است چون در PDMS گروه CH₃ به عنوان مولفه‌ای با انرژی سطحی پایین برای آبگریزی شناخته می‌شود [۲۰و۱۶]. باند جذب قوی در 1096 cm^{-1} در نانوذرات آبگریز و 1099 cm^{-1} در نانوذرات آبدوست به دلیل لرزش کششی باندهای سیلوکسان Si-O-Si است [۲۱]. عدد موج 805 cm^{-1} در طیف نانوذرات مربوط به جذب توسط پیوند Si-C است [۱۶]. عدد موج 471 cm^{-1} در طیف نانوذرات آبگریز و 469 cm^{-1} در طیف نانوذرات آبدوست مطابق با کشش متقارن SiO₂ است [۲۲]. چون جابه‌جایی قابل توجه طیف‌ها مشاهده نگردید بنابراین می‌توان گفت که مکانیزم اتصال مولکول‌های اصلاح کننده با سطح نانوذرات از نوع فیزیکی است [۲۳]. شکل ۶ مورفولوژی نانوذرات فیومدسیلیکا آبگریز را نشان می‌دهد که شامل نقشه توزیع عناصر کربن، اکسیژن و سیلیسیم است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اندازه متوسط نانوذرات در محدوده ۸۰-۵۰ نانومتر است. کربن موجود روی سطح نانوذرات نشان‌دهنده‌ی حضور مونومرهای PDMS اتصال یافته به طور یکنواخت بر سطح نانوذرات اصلاح شده است.



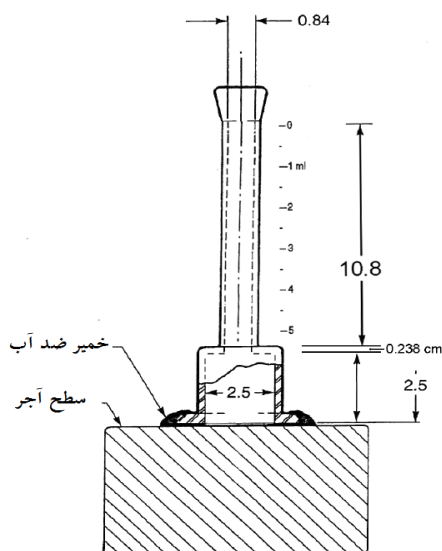
شکل ۷. قطرات آب بر سطح آجر با لایه نفوذی ابر آبگریز.

مقاومت بالایی در برابر خیس شدن دارد و زاویه لغزش پایینی را ایجاد می‌کند. این خاصیت ابر آبگریزی طبق مکانیزم کسی-بکستر ناشی از ایجاد سطحی با زبری در مقیاس میکرو/نانو و انرژی سطحی بسیار پایین است. افزایش زاویه تماس آب برآیند اثر ترکیبی از زبری سطح ناشی از نانوذرات فیومدسیلیکا و انرژی سطحی پایین در نتیجه‌ی تشکیل شبکه‌ی سیلوکسان ناشی از ملکول‌های PDMS است. [۲۴].

جدول ۱. زاویه تماس و لغزش قطره آب بر سطح نانوذرات فیومدسیلیکا اعمال شده بر سطح

زاویه تماس (درجه)	زاویه لغزش (درجه)	تصویر قطره بر سطح	نمونه
۴۶	بیش از ۹۰		فیومدسیلیکا آبدوست
۱۵۳	۴		فیومدسیلیکا آبگریز

حباب‌های خارج شده از سطح آجر در قسمت پوشش داده شده در مقایسه با قسمت پوشش داده نشده گویای قابلیت تنفس پذیری سطح در حضور لایه آبگریز است.



شکل ۸. شماتیک ابعادی لوله رایلم بر سطح آجر با لایه نفوذی ابر آبگریز.

ج) ارزیابی شرایط محیطی بر سطح آجر ابر آبگریز شده
آزمون رایلم، مقاومت در برابر جذب آب تحت فشار هیدرواستاتیک را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر در این آزمون میزان نفوذپذیری و جذب آب توسط آجر را اندازه‌گیری می‌کند. مطابق شکل ۸، یک لوله رایلم به صورت عمودی در قسمت مرکز آجر قرار داده و تا ۵ میلی‌لیتر آن با آب پر می‌شود. این مقدار معادل فشار ایجاد شده توسط باد و باران با سرعت ۱۴۰ کیلومتر بر ساعت است. پس از آن، کاهش سطح آب در مدت ۲۰ دقیقه مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتیجه نشان داد که پس از گذشت این زمان، سطح آب در لوله رایلم برای آجر پوشش داده شده بدون تغییر باقی ماند اما در آجر بدون پوشش پس از گذشت ۵ دقیقه تمامی آب داخل لوله جذب آجر شد.

قابلیت تنفس پذیری آجر طبق استاندارد BS EN ISO 7783-12 ارزیابی می‌شود. طبق این آزمون (شکل ۹)

نتیجه گیری

در این مقاله پژوهشی، لایه نفوذی ابر آبگریز با استفاده از سوسپانسیون حاوی نانوذرات فیومد سیلیکا اصلاح شده با پلیمر پلی دی متیل سیلوکسان ساخته شد. سوسپانسیون حاصل بر سطح آجر نمای ساختمان اعمال شد و خواص سطح ابر آبگریز مورد مطالعه قرار گرفت. این سوسپانسیون حاوی نانوذرات فیومدسیلیکا آبگریز، پتانسیل ذاتی برابر $55/9\text{mV}$ داشت که نشان از پایداری بالای نانوذرات در آن دارد. با اعمال این سوسپانسیون بر سطح آجر، خاصیت ابر آبگریزی با زاویه تماس قطره آب 153° و زاویه لغزش 40° ایجاد شد؛ که این خاصیت طبق مکانیزم کسی-بکستر ناشی از ایجاد سطحی با زبری در مقیاس میکرو/نانو و انرژی سطحی بسیار پایین است. آزمون های ارزیابی شرایط محیطی مانند ریلیم، بعد از گذشت ۲۰ دقیقه، نفوذ حتی قطره ای آب به داخل آجر ابر آبگریز شده را نشان نداد. از طرف دیگر سطح آجر آغشته شده با سوسپانسیون، طبق آزمون شوره، هیچ گونه رسوب نمکی را بعد از گذشت ۱۵ روز نشان نداد که گویای مقاومت بالای آجر ابر آبگریز شده در برابر تشکیل شوره و سفیدک در شرایط جوی و محیطی است.

مراجع

1. R. Lakshmi, P. Bera, C. Anandan, B.J. Basu, *Effect of the size of silica nanoparticles on wettability and surface chemistry of sol-gel superhydrophobic and oleophobic nanocomposite coatings*, Applied Surface Science, 320 (2014) 780-786.
2. E. Bengtsson, *Creating super hydrophobic surfaces for moisture protection of biobased composites*, Master of Science Thesis. Gothenburg. 2013.
3. S.-D. Wang, S.-S. Luo, *Fabrication of transparent superhydrophobic silica-based film on a glass substrate*, Applied Surface Science, 258 (2012) 5443-5450.
۴. بهروز موحدی، سید محمد شکرانی، سعید صناعی، کاربرد نانوفناوری در نمای ساختمان، انتشارات تدبیران، (۱۳۹۷).
5. H. Barthel, L. Rösch, J. Weis, *Fumed Silica-Production, Properties, and Applications*,



شکل ۹. تنفس پذیری آجر پوشش داده شده با لایه نفوذی ابر آبگریز.

مقاومت پوشش های ابر آبگریز در برابر پدیده شوره زدگی یا سفیدک یکی از مهمترین ویژگی های بارز این نوع لایه هایی است که بر سطح آجر و یا سایر مصالح ساختمانی اعمال می شوند. شوره، رسوب نمک های محلول در آب است که در اثر تبخیر آب بر سطح دیواره های نما باقی می ماند. ایجاد پوشش های آبگریز روی سطح آجر می تواند سدی در برابر ایجاد پدیده شوره یا سفیدک باشد. در این آزمون آجر به مدت ۱۵ روز در محلول آبی اشباع شده با سدیم کلراید به گونه ای قرار داده می شود که تنها سطح زیرین آن که فاقد پوشش است، درون محلول قرار گیرد. مطابق شکل ۱۰ بعد از خارج کردن نمونه و خشک کردن آن در دمای محیط، حضور شوره یا سفیدک در اطراف محل های فاقد پوشش کاملا مشهود است ولی در سطح آجر با لایه نفوذی آبگریز، مشاهده نمی شود.



شکل ۱۰. آزمون شوره روی آجر با لایه نفوذی ابر آبگریز و بدون آن.

۱۵. مهدیه محمدی، حمید خرسند، سنتز نانو سیلیکا به روش رسوب گذاری با کاربرد عوامل فعال کننده سطحی، مجله‌ی مواد نوین، جلد ۱، شماره ۳، ۱۳۹۰.

16. V.V. Ganbavle, U.K. Bangi, S.S. Latthe, S.A. Mahadik, A.V. Rao, *Self-cleaning silica coatings on glass by single step sol-gel route*, Surface and Coatings Technology, 205 (2011) 5338-5344.

17. J. Liu, Y. Cheng, K. Xu, L. An, Y. Su, X. Li, Z. Zhang, *Effect of nano-silica filler on microstructure and mechanical properties of polydimethylsiloxane-based nanocomposites prepared by "inhibition-grafting" method*, Composites Science and Technology, 167 (2018) 355-363.

18. S.A. Mahadik, R.S. Vhatkara, D.B. Mahadik, M.S. Kavale, P.B. Wagh, S. Gupta, J. Gurav, *Superhydrophobic silica coating by dip coating method*, Applied Surface Science, 277 (2013) 67-72.

19. S.A. Mahadik, D. Mahadik, M. Kavale, V. Parale, P. Wagh, H.C. Barshilia, S.C. Gupta, N. Hegde, A.V. Rao, *Thermally stable and transparent superhydrophobic sol-gel coatings by spray method*, Journal of sol-gel science and technology, 63 (2012) 580-586.

20. A. Syafiq, B. Vengadaesvaran, N.A. Rahim, A.K. Pandey, A.R. Bushroa, K. Ramesh, S. Ramesh, *Transparent self-cleaning coating of modified polydimethylsiloxane (PDMS) for real outdoor application*, Progress in Organic Coatings, 131 (2019) 232-239.

21. S.A. Mahadik, M.S. Kavale, S. Mukherjee, A.V. Rao, *Transparent superhydrophobic silica coatings on glass by sol-gel method*, Applied Surface Science, 257 (2010) 333-339.

22. R. Lakshmi, T. Bharathidasan, B.J. Basu, *Superhydrophobic sol-gel nanocomposite coatings with enhanced hardness*, Applied Surface Science, 257 (2011) 10421-10426.

23. W. Kaewprachum, S. Wongsakulphasatch, W. Kiatkittipong, A. Striolo, C.K. Cheng, S. Assabumrungrat, *SDS modified mesoporous silica MCM-41 for the adsorption of Cu²⁺, Cd²⁺, Zn²⁺ from aqueous systems*, Journal of Environmental Chemical Engineering, (2019) 102920.

24. R. Lakshmi, T. Bharathidasan, B.J. Basu, *Superhydrophobic sol-gel nanocomposite coatings with enhanced hardness*, Applied Surface Science, 257 (2011) 10421-10426.

Organosilicon chemistry ii: From molecules to materials, (1995) 761-778.

6. B.J. Basu, V.D. Kumar, C. Anandan, *Surface studies on superhydrophobic and oleophobic polydimethylsiloxane-silica nanocomposite coating system*, Applied surface science, 261 (2012) 807-814.

7. Q. Ke, W. Fu, H. Jin, L. Zhang, T. Tang, J. Zhang, *Fabrication of mechanically robust superhydrophobic surfaces based on silica micro-nanoparticles and polydimethylsiloxane*, Surface and Coatings Technology, 205 (2011) 4910-4914.

8. K. Tu, L. Kong, X. Wang, J. Liu, *Semitransparent, durable superhydrophobic polydimethylsiloxane/SiO₂ nanocomposite coatings on varnished wood*, Holzforschung, 70 (2016) 1039-1045.

9. A. Cholewinski, J. Trinidad, B. McDonald, B. Zhao, *Bio-inspired polydimethylsiloxane-functionalized silica particles-epoxy bilayer as a robust superhydrophobic surface coating*, Surface and Coatings Technology, 254 (2014) 230-237.

10. Z. Lu, L. Xu, Y. He, J. Zhou, *One-step facile route to fabricate functionalized nano-silica and silicone sealant based transparent superhydrophobic coating*, Thin Solid Films, 692 (2019) 137560.

11. Q. Sun, Z. Li, J. Wang, S. Li, B. Li, L. Jiang, H. Wang, Q. Lü, C. Zhang, W. Liu, *Aqueous foam stabilized by partially hydrophobic nanoparticles in the presence of surfactant*, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 471 (201) 54-64.

12. G. Camino, S.M. Lomakin, M. Lazzari, *Polydimethylsiloxane thermal degradation Part I. Kinetic aspects*, Polymer 42 (2001) 2395-2402.

۱۳. آزاده سیفی، ایجاد پوشش پلیمری فوق آبگریز بر روی فولاد ساده کرنی به کمک اصلاح شیمیایی نانوذرات سیلیکا، دانشکده‌ی مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۹.

14. Q. Sun, Z. Li, J. Wang, S. Li, B. Li, L. Jiang, H. Wang, Q. Lü, C. Zhang, W. Liu, *Aqueous foam stabilized by partially hydrophobic nanoparticles in the presence of surfactant*, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 471 (2015) 54-64.