

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Surface Modification of Cotton Fabric via Silica-Aerogel/ Polydimethylsiloxane Composite Coating: Hydrophobicity and Chemical Resistance Analysis

Aysa Ghasemi Koozekonan¹, Somayeh Farhang Dehghan¹, Majid Montazer², Mostafa Pouyakian^{1*}

¹Department of Occupational Health and Safety Engineering, School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

²Department of Textile Engineering, Amirkabir University of Technology, Functional Fibrous Structures and Environmental Enhancement (FFSEE), Amirkabir Nanotechnology Research Institute (ANTRI), Tehran, Iran

Received: 2025/11/23

Accepted: 2026/06/23

ABSTRACT

Introduction: Occupational exposure to hazardous chemicals has created an urgent need for the development of protective clothing with both breathability and effective protection. This research aimed to modify the surface of cotton fabric using a novel composite coating consisting of silica (SiO₂) aerogel and polydimethylsiloxane (PDMS) to achieve breathability, superhydrophobicity, and chemical resistance simultaneously.

Material and Methods: Cotton fabric samples were coated via immersion in suspensions of PDMS and PDMS/SiO₂ composite. The physical, structural, and functional properties of the coated samples (C/PDMS and C/PDMS/SiO₂) and the uncoated control sample (C) were analyzed using FESEM, EDX, XRD, FTIR, air permeability, tensile strength, water contact angle, and chemical resistance tests against four chemicals (water, toluene, acetic acid, and dimethylformamide).

Results: Results demonstrated that the PDMS/SiO₂ composite coating was effectively stabilized on the fabric surface. The composite-coated sample (C/PDMS/SiO₂) achieved superhydrophobicity with a remarkable contact angle of 168°. Furthermore, the coating resulted in a 60% reduction in air permeability compared to the uncoated fabric, indicating the formation of a dense protective structure. In terms of chemical resistance, the composite-coated samples exhibited significant performance improvements. Acetic acid penetration decreased from 17% to 1%, whereas the absorption capacity for toluene increased from 12% to 67%, and for dimethylformamide from 17% to 59%. Additionally, the coating led to a notable enhancement in the fabric's tensile strength.

Conclusion: The findings of this study reveal that the PDMS/SiO₂ composite coating holds high potential for application in protective textiles with multifunctional capabilities, including exceptional water repellency, improved chemical resistance, and retained breathability.

Keywords: Cotton, Silica aerogel, Composite coating, Hydrophobicity, Chemical resistance, Protective textiles

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Ghasemi Koozekonan A., Farhang Dehghan S., Montazer M., Pouyakian M. Surface Modification of Cotton Fabric via Silica-Aerogel/Polydimethylsiloxane Composite Coating: Hydrophobicity and Chemical Resistance Analysis. *J Health Saf Work*. 2026; 16(2): 280-296.

* Corresponding Author Email: pouyakian@sbmu.ac.ir

Copyright © 2026 The Authors.

Published by Tehran University of Medical Sciences

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

1. INTRODUCTION

Occupational exposure to hazardous chemicals in various industrial sectors has created an urgent need for developing advanced protective textiles that offer both effective chemical protection and adequate breathability for wearer comfort. Traditional protective materials often face the challenge of balancing these conflicting requirements. Cotton fabric, while comfortable and breathable, lacks inherent chemical resistance and water repellency. This research addresses this gap by developing a novel composite coating system combining silica (SiO_2) aerogel and polydimethylsiloxane (PDMS) to transform conventional cotton fabric into a high-performance protective material. The unique properties of silica aerogel, including high porosity, large surface area, and exceptional hydrophobicity, combined with PDMS's low surface energy and flexibility, offer a promising approach to creating multifunctional protective textiles. This study systematically investigates the surface modification of cotton fabric through this composite coating approach, with a comprehensive evaluation of its hydrophobicity, chemical resistance, and maintenance of essential textile properties.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1 Materials and Coating Preparation

100% cotton fabric (YazdBaf Company) served as the substrate. Silica aerogel (SiO_2 , average pore diameter 20 nm, Amin Bik Company) and polydimethylsiloxane (PDMS, Sylgard-184, Dow Corning) with its curing agent were used as coating materials. Solvents, including isopropyl alcohol (IPA, Merck), ethanol, toluene, acetic acid, and dimethylformamide (DMF), were of analytical grade.

Fabric samples (10×15 cm) were initially cleaned by immersion in ethanol for 20 minutes, rinsed with distilled water, and dried at 80°C for 30 minutes. The PDMS coating solution was prepared by mixing 4g PDMS and 0.4g curing agent in 100ml IPA, followed by 30-minute ultrasonication. For the PDMS/ SiO_2 composite coating, 4g SiO_2 aerogel was added to this mixture. Coating was performed via immersion for 30 minutes, followed by drying at 80°C for 5 minutes and final curing at 160°C for 60 minutes.

2.2 Characterization Techniques

Multiple analytical techniques were employed

to characterize the coated fabrics. Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM, MIRA2, TESCAN) examined surface morphology and coating distribution. Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) coupled with FESEM, determined elemental composition. Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR, Bruker Tensor27 and Thermo AVATAR) identified chemical bonds and functional groups. X-ray Diffraction (XRD, Philips PW1510) analyzed the crystalline structure.

Physical properties, including thickness (digital thickness gauge, SDL), surface density (EN 12127), air permeability (ASTM D737), and tensile strength (Instron 5566, ISO 13934-1) were measured. Water contact angle was determined using a goniometer (Giga 10-CAG) with $5\mu\text{L}$ droplets. Chemical resistance testing followed Iranian National Standard No. 3237, evaluating penetration, absorption, and repulsion against water, toluene, acetic acid, and DMF.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Coating Deposition and Physical Properties

Gravimetric analysis confirmed successful coating application, with C/PDMS and C/PDMS/ SiO_2 showing weight increases of 9.94% and 31.58%, respectively, compared to uncoated fabric. This substantial increase, particularly for the composite coating, indicated effective deposition and adhesion of the coating materials. Physical property measurements revealed systematic changes: thickness increased from 0.23 mm (uncoated) to 0.27 mm (C/PDMS) and 0.45 mm (C/PDMS/ SiO_2), while surface density increased from 112 g/m^2 to 131 g/m^2 and 170 g/m^2 , respectively. These changes demonstrated the formation of a substantial coating layer that modified the fabric's basic characteristics while maintaining textile integrity.

3.2 Structural and Morphological Characterization

The FESEM images of fabric samples are presented in Figure 1. FESEM analysis provided crucial insights into coating morphology. Uncoated cotton fibers showed characteristic fibrils and surface grooves, while PDMS-coated fibers displayed a smooth, continuous polymer layer that covered surface features. The PDMS/ SiO_2 composite coating presented a dramatically different morphology, with spherical, porous SiO_2 particles firmly anchored to fiber surfaces

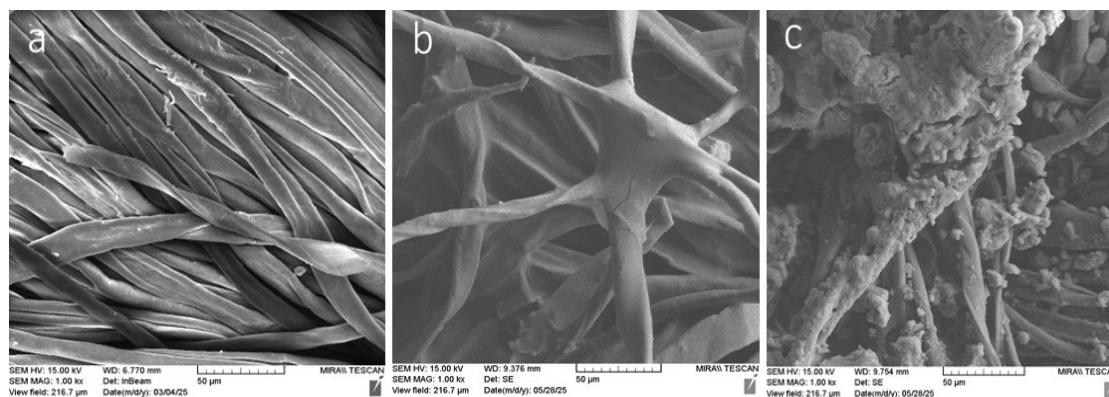


Fig. 1: FESEM images of: a) Sample C, b) Sample C/PDMS, c) Sample C/PDMS/SiO₂

Table 1: Air permeability and tensile strength of fabric samples

Sample	Air permeability (cm ³ /s/cm ²)	Tensile strength (N)
C	190	112.74
C/PDMS	162	124.87
C/PDMS/SiO ₂	76	125.24

and embedded in the PDMS matrix. This created a hierarchical rough structure essential for superhydrophobicity. EDS analysis confirmed the presence of SiO₂ in the coated samples, verifying the successful incorporation of SiO₂. XRD patterns showed characteristic silica peaks at $2\theta = 14.78^\circ$, 16.43° , 22.75° , and 33.79° , confirming the crystalline nature of the deposited SiO₂. FTIR spectroscopy revealed characteristic absorption bands at 794 cm^{-1} (Si-O-Si symmetric stretching), 1258 cm^{-1} (Si-C bending), and 2961 cm^{-1} (C-H stretching), providing chemical evidence of the successful formation of PDMS and SiO₂ coatings.

3.3 Functional Performance Evaluation

3.3.1 Air Permeability and Mechanical Properties

Air permeability and tensile strength of fabric samples are shown in Table 1. The air permeability measurements showed a 14.74% reduction for C/PDMS and a substantial 60% reduction for C/PDMS/SiO₂ compared to uncoated fabric. This decrease resulted from coating materials filling inter-fiber spaces and creating a denser structure. Although reduced, the maintained air permeability indicated preserved breathability, which is crucial for wearer comfort. Tensile strength testing revealed improvements, with C/PDMS and C/PDMS/SiO₂ showing increased strength to 124.87

N and 125.24 N, respectively, compared to 112.74 N for uncoated fabric. This enhancement suggested that the coating acted not only as a protective layer but also as a binding agent, improving fiber-to-fiber stress transfer.

3.3.2 Superhydrophobic Properties

The water contact angle of different fabric samples is indicated in Figure 2. Water contact angle measurements demonstrated remarkable hydrophobicity enhancement. Uncoated cotton showed immediate water absorption (0° effective contact angle), characteristic of its hydrophilic nature. PDMS coating alone achieved a contact angle of 148° , representing significant hydrophobicity due to PDMS's low surface energy. The PDMS/SiO₂ composite coating achieved superhydrophobicity with a contact angle of 168° , approaching the theoretical maximum. This exceptional performance resulted from the combined effect of low surface energy (provided by PDMS) and surface roughness (provided by SiO₂ aerogel particles). Visual observations confirmed complete water repellency, with water droplets rolling off the coated surface without absorption.

3.3.3 Chemical Resistance Performance

Chemical resistance testing revealed dramatic

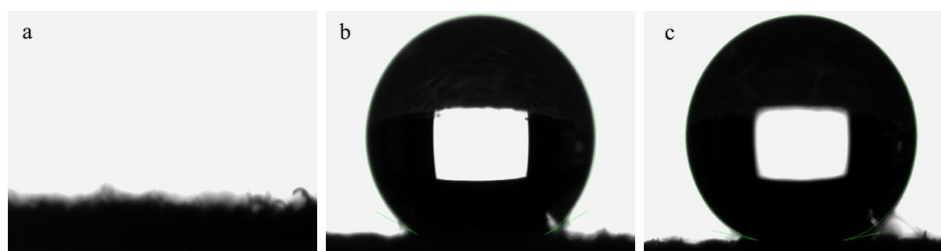


Fig. 2: Images of water droplet contact angle with a) sample C, b) sample C/PDMS, c) sample C/PDMS/SiO₂

improvements in protective performance across all tested chemicals. Against water, the composite coating achieved 100% repulsion, compared to 20% penetration and 5% absorption for uncoated fabric. For toluene (non-polar solvent), penetration decreased from 24% to 2%, while absorption increased from 12% to 67%, indicating the coating's capacity to trap organic solvents within its porous structure rather than allowing penetration. Similar trends were observed for acetic acid, with penetration reduced from 17% to 1% and absorption increased to 65%. For dimethylformamide (polar aprotic solvent), penetration decreased from 17% to 1.8% while absorption increased to 59%.

The mechanism of chemical protection involves both barrier function and absorption capability. The dense PDMS matrix provides a continuous barrier, while the porous SiO₂ aerogel structure offers numerous sites for chemical absorption and retention. This dual mechanism explains the significant reduction in penetration coupled with increased absorption capacity. The variation in performance across different chemicals relates to their surface tension, polarity, and molecular size, influencing their interaction with the coating components.

4. CONCLUSIONS

This research successfully demonstrates the development of a multifunctional protective cotton fabric through surface modification with a PDMS/SiO₂ aerogel composite coating. The coating system creates a hierarchical rough structure that combines the low surface energy of PDMS with the nano-

scale porosity and roughness of SiO₂ aerogel. This synergy results in exceptional superhydrophobicity (168° contact angle), significant chemical resistance against various challenging chemicals, maintained breathability despite reduced air permeability, and enhanced mechanical strength. The composite coating transforms conventional cotton from a hydrophilic, chemically vulnerable material into a high-performance protective textile suitable for applications requiring protection against liquid chemical exposure while maintaining wearer comfort. The successful implementation of this coating strategy opens possibilities for developing advanced protective textiles for industrial, medical, and environmental applications where multifunctional performance is essential.

5. ACKNOWLEDGMENT

This article is derived from a PhD dissertation conducted at the Department of Occupational Health and Safety Engineering, School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran (Dissertation Code: [43005750]). This study was supported by Shahid Beheshti University of Medical Sciences (Pajoohan No: [43006329]).

5. ETHICAL CODE

IR.SBMU.PHNS.REC.1402.031

6. FUNDING

This study was supported by Shahid Beheshti University of Medical Sciences (Grant No: 43006329).

اصلاح سطح پارچه پنبه‌ای با پوشش کامپوزیتی هواژل سیلیکا/ پلی‌دیمتیل‌سیلوکسان: آنالیز آب‌گریزی و مقاومت شیمیایی

آی‌سا قاسمی کوزه‌کنان^۱، سمیه فرهنگ دهقان^۱، مجید منتظر^۲، مصطفی پویاکیان^{۳*}

^۱گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران
^۲آقطب علمی سازه‌های الیافی متعامل و بهبود محیط، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۹/۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۴/۲

چکیده

مقدمه: شغلی با مواد شیمیایی خطرناک، نیاز مبرمی به توسعه پوشاک حفاظتی با قابلیت تنفس پذیری و محافظت مؤثر را ایجاد کرده است. این پژوهش با هدف اصلاح سطح پارچه پنبه‌ای به وسیله یک پوشش کامپوزیتی نوین متشکل از هواژل سیلیکا (SiO_2) و پلی‌دیمتیل‌سیلوکسان (PDMS) برای دستیابی هم‌زمان به خاصیت تنفس پذیری، ابرآب‌گریزی و مقاومت شیمیایی بالا انجام شد.

روش کار: نمونه‌های پارچه پنبه‌ای با استفاده از روش غوطه‌وری در سوسپانسیون PDMS و کامپوزیت PDMS/ SiO_2 پوشش‌دهی شدند. خصوصیات فیزیکی، ساختاری و عملکردی نمونه‌های پوشش‌دار شده (C/PDMS) و (C/PDMS/SiO_2) و نمونه شاهد بدون پوشش (C) با بهره‌گیری از آزمون‌های FESEM, EDX, XRD, FTIR، نفوذپذیری هوا، استحکام کششی، زاویه تماس آب و مقاومت شیمیایی در برابر چهار ماده شیمیایی (آب، تولوئن، اسید استیک و دی‌متیل‌فرماید) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که پوشش کامپوزیتی PDMS/ SiO_2 به‌طور مؤثری بر سطح پارچه تثبیت شده است. نمونه پوشش‌دار شده با این کامپوزیت (C/PDMS/SiO_2) به خاصیت ابرآب‌گریزی با زاویه تماس قابل توجه ۱۶۸ درجه دست یافت. همچنین، این پوشش موجب کاهش ۶۰ درصدی نفوذپذیری هوا نسبت به پارچه بدون پوشش گردید که نشان‌دهنده تشکیل یک ساختار متراکم محافظ است. از جنبه مقاومت شیمیایی، نمونه‌های پوشش‌دار شده با کامپوزیت، بهبود چشم‌گیری در عملکرد نشان دادند. نفوذ اسید استیک از ۱۷٪ به ۱٪ کاهش یافت و در مقابل، ظرفیت جذب تولوئن از ۱۲٪ به ۶۷٪ و ظرفیت جذب دی‌متیل‌فرماید از ۱۷٪ به ۵۹٪ افزایش پیدا کرد. علاوه بر این، پوشش‌دهی منجر به بهبود قابل‌ملاحظه در استحکام کششی پارچه شد.

نتیجه‌گیری: یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که پوشش کامپوزیتی PDMS/ SiO_2 می‌تواند پتانسیل بالایی برای کاربرد در منسوجات حفاظتی با قابلیت‌های چندمنظوره از جمله آب‌گریزی فوق‌العاده، مقاومت شیمیایی بهبودیافته و حفظ قابلیت تنفس‌پذیری داشته باشد.

کلمات کلیدی: پنبه، هواژل سیلیکا، پوشش کامپوزیتی، آب‌گریزی، مقاومت شیمیایی، منسوجات حفاظتی

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: pouyakian@sbmu.ac.ir

مقدمه

سالانه بیش از ۲۰۰۰ ماده شیمیایی جدید به ده‌ها هزار ماده‌ی موجود افزوده می‌شود. تنها حدود ۱٪ از این مواد به‌طور جامع از نظر ایمنی ارزیابی شده‌اند و گمان می‌رود تعداد زیادی از آنان سمی باشند (۱). این شرایط، زمینه را برای بروز گسترده مواجهه پوستی با مواد شیمیایی فراهم می‌سازد. مواجهه‌های شغلی با پوست می‌تواند منجر به بروز بیماری‌های متعددی گردد که این امر به نوبه خود، هم بر سلامت فرد و هم بر توانایی وی برای انجام وظایف شغلی تأثیر منفی گذاشته و در نهایت، خسارات اقتصادی قابل توجهی از جمله کاهش بهره‌وری، هزینه‌های درمانی و غیبت ناشی از بیماری را به دنبال خواهد داشت (۲). در محیط‌های کاری، مواجهه پوستی با مواد شیمیایی می‌تواند از طریق تماس مستقیم با سطوح آلوده، رسوب ذرات آئروسول، غوطه‌وری یا پاشش اتفاق افتد و غالباً بدون آنکه توسط کارگر احساس گردد، رخ می‌دهد مواجهه با مواد شیمیایی می‌تواند کارگرانی که در بخش‌های مختلفی همچون کشاورزی، تولید، آرایشگری، مراقبت‌های بهداشتی، نظافت، نقاشی، مکانیک، چاپ، ساخت‌وساز و .. مشغول به کار هستند را تحت تأثیر قرار دهد (۳).

برای حفاظت از کارگران، محدود کردن میزان مواجهه‌ی آنان با خطرات محیط کار امری حیاتی است. منسوجات و پوشاک حفاظتی فردی، نقشی حیاتی در صیانت از سلامت و ایمنی کارگران ایفا می‌کنند (۴). پوشاکی که به عنوان تجهیزات حفاظت فردی به کار می‌روند، امروزه یکی از کاربردهای مهم منسوجات محسوب شده و در زمره منسوجات فنی یا صنعتی طبقه‌بندی می‌شوند. هدف اصلی این منسوجات، محافظت از بدن انسان در برابر مخاطرات خارجی از قبیل عوامل شیمیایی، حرارتی، مکانیکی، بیولوژیکی و پرتویی است. در میان مخاطرات گوناگون، محافظت در برابر مواد شیمیایی در حال حاضر به عنوان یکی از چالش‌برانگیزترین مسائل تلقی می‌شود (۵). منسوجات طراحی شده برای محافظت شیمیایی، به پوشاک و سایر مواد مرتبط با پارچه اطلاق می‌شود که به

عنوان آخرین خط دفاعی با هدف صیانت از کاربر در برابر مواد شیمیایی خطرناک طراحی شده‌اند (۵، ۶). یک نیاز کلیدی برای چنین پوشاکی، ایجاد سدی مطمئن در برابر نفوذ مایعات مضر به بدن و همچنین به حداقل رساندن تماس انسان با مخاطرات شیمیایی است (۷).

با توجه به تحولات مستمر در نیازهای محیط‌های کاری و نگرانی‌های نوظهور بهداشتی، همواره ضرورت نوآوری و ارتقاء در مواد منسوج و عملکرد آن‌ها احساس می‌شود. این تلاش مستمر با هدف ارتقای راحتی و حفاظت کارگران دنبال می‌گردد (۴). طراحی هر گونه پوشاک حفاظتی دو جنبه متضاد را تشکیل می‌دهد که بتواند حداکثر حفاظت را همراه با بالاترین میزان راحتی در استفاده ارائه دهد، که دستیابی همزمان به این دو ویژگی در تولید پوشاک حفاظتی دشوار است (۸). ارزیابی نفوذپذیری هوا معیاری حیاتی برای سنجش کیفیت و عملکرد پارچه‌های البسه کاری محسوب می‌شود. بر این اساس، تلاش‌های پژوهشی مستمری در سراسر جهان در جریان است تا پوشاک حفاظتی شیمیایی تنفس‌پذیر توسعه یابد که ضمن دارا بودن نفوذپذیری در برابر هوا، در برابر مواد شیمیایی نیز مقاوم باشند. بر این اساس، پوشاک حفاظتی شیمیایی به طور مستمر با به کارگیری مواد و روش‌های مختلف در حال توسعه است تا محافظت مؤثری در برابر مواجهه با مواد شیمیایی فراهم کند. متأسفانه خصوصیات ذاتی الیاف منسوج طبیعی اغلب عملکرد آنها را در جلوگیری از انتقال آب و مواد شیمیایی محدود می‌سازد. با این حال، به موازات پیشرفت‌های فناوری، تلاش‌هایی برای توسعه منسوجات و کاهش نقاط ضعف آنها از طریق روش‌های مختلف از جمله پوشش‌دهی پارچه‌ها با مواد گوناگون بی‌خطر انجام گرفته است. امروزه از فناوری نانو برای اصلاح و ارتقای منسوجات و پوشاک حفاظتی فردی استفاده می‌شود. هواژل‌ها، به عنوان دسته‌ای شگفت‌انگیز از نانومواد، در قرن بیست و یکم توجه زیادی را به دلیل ویژگی‌های استثنایی خود جلب کرده‌اند. این مواد را می‌توان از اجزای مختلفی از جمله کربن، سلولز و سیلیکا سنتز کرد (۹). اولین نمونه از این مواد، سیلیکا بود که به

محقق می‌شود. ساختار باز و متصل حفره‌ها در درون ذرات، جذب شیمیایی را با تسهیل جریان مایعات از یک حفره به حفره دیگر ممکن می‌سازد (۱۲).

منسوجات ترکیب شده با هواژل سیلیکا دو هدف را پوشش می‌دهند: محافظت از کاربر در برابر مخاطرات شیمیایی و همچنین امکان انتقال هوا از منسوج برای دستیابی به آسایش. این ویژگی مستقیماً در حفاظت از کاربر، آسایش حرارتی و سلامت کلی او نقش دارد (۱۸). افزون بر این، پارچه باید از دوام برخوردار بوده و مقاومت در برابر کشش را نیز دارا باشد. مقاومت کششی بالا نشان‌دهنده توانایی پارچه در تحمل نیروهای بیشتر بدون گسیختگی است که برای حفظ شکل و یکپارچگی در طول استفاده ضروری می‌باشد (۱۹). در مجموع، این ویژگی‌ها در دوام و عملکرد کلی پارچه در کاربردهای مختلف نقش ایفا می‌کنند. با وجود مطالعات گسترده در زمینه ادغام هواژل سیلیکا با منسوجات، کاربرد ترکیب هواژل سیلیکا و PDMS در ساختار پارچه برای حفاظت شیمیایی بررسی نشده است. هدف این پژوهش، طراحی و توسعه یک منسوج حفاظتی از طریق پوشش‌دهی پارچه پنبه‌ای با PDMS و هواژل سیلیکا است تا محافظت همزمان در برابر آب و مایعات شیمیایی همراه با قابلیت عبور هوا فراهم گردد. عملکرد این پارچه‌ها از طریق بررسی مقاومت در برابر آب، مواد شیمیایی مایع، نفوذپذیری هوا و استحکام کششی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

روش کار

در ابتدای کار جهت انجام مطالعه، کد اخلاق IR.SBMU.PHNS.REC.1402.031 از سامانه ملی اخلاق در پژوهش‌های زیست پزشکی اخذ گردید.

مواد

در این پژوهش از پلی دی متیل سیلوکسان^۱ (PDMS) و عامل پخت^۲ ساخت شرکت داو^۳، اتانول، تولوئن، اسید

2. Polydimethylsiloxane (Sylgard-184)

3. Curing agent

4. Dow

دلیل برخورداری از طیف وسیعی از ویژگی‌های منحصر به فرد از جمله سطح ویژه بسیار بالا، تخلخل زیاد، چگالی بسیار کم، هدایت حرارتی بسیار پایین، ضریب شکست کم در میان هواژل‌ها و آب‌گریزی عالی از محبوبیت بیشتری برخوردار شده است (۱۰). کاربردهای بالقوه هواژل سیلیکا در حوزه‌های مختلف از جمله عایق‌بندی حرارتی و صوتی، جذب‌کننده انرژی جنبشی و نیز در پوشش‌های نسوز به عنوان عایق حرارتی، در چندین مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌اند (۱۱).

ترکیب تخلخل فوق‌العاده بالا و آب‌گریزی، هواژل سیلیکا را به گزینه‌ای مناسب برای به‌کارگیری در پوشش‌های حفاظتی شیمیایی تبدیل می‌کند. این ویژگی‌ها توسعه پوشاک با محافظت شیمیایی بهبودیافته را ممکن می‌سازد (۱۲). با این حال این هواژل‌ها به دلیل وجود اتصالات ضعیف بین ذرات و تخلخل بالا، شکننده هستند (۱۳). برای ساخت ترکیبات هواژل محکم‌تر، سه روش اصلی به کار می‌رود که شامل ایجاد پیوندهای شیمیایی بین هواژل و پلیمرها، پر کردن هواژل با ذرات ریز تقویت‌کننده و استفاده از شبکه‌های الیافی سه‌بعدی است (۱۴). نتیجه این روش‌ها، تولید ترکیبی است که حتی در سخت‌ترین شرایط هم قابل استفاده هستند. پلی‌دیمتیل‌سیلوکسان^۱ (PDMS) با انرژی سطحی پایین، پلیمر مناسبی برای این هدف محسوب می‌شود، چرا که غیرسمی، بسیار پایدار، ارزان‌تر و بادوام‌تر از اکثر پلیمرها است. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از این پلیمرها منجر به ایجاد پوشش سطحی بالا از ذرات هواژل سیلیکا و آب‌گریزی عالی می‌گردد (۱۵). همچنین ادغام هواژل‌ها در ساختار پارچه‌های متخلخل با پرکردن فضاهای خالی بین الیاف می‌تواند خواص مکانیکی را بهبود بخشد (۱۶). مطالعات Bhuiyan و همکاران نشان داد که با ادغام آئروژل سیلیکا در منسوجات، می‌توان یک لایه محافظ برای پوشاک طراحی کرد که به طور همزمان محافظت شیمیایی و حرارتی را فراهم می‌کند (۱۶، ۱۷). این امر از طریق جذب شیمیایی مایعات در حفره‌های ریز ذرات

1. Polydimethylsiloxane

تهیه و به مدت ۳۰ دقیقه اولتراسونیک گردید. در مرحله بعد، یک نمونه پارچه آماده شده به مدت ۳۰ دقیقه در این سوسپانسیون غوطه‌ور شده و پس از آن، مشابه روش قبل، خشک و پخت گردید (۱۵). در نهایت، جرم نمونه پوشش‌دار شده (M_2) اندازه‌گیری شد. درصد پوشش دهی نمونه‌ها با معادله ۱ محاسبه گردید.

معادله ۱: $\% = [(M_2 - M_1) / M_1] \times 100$ درصد پوشش

M_1 : جرم اولیه نمونه

M_2 : جرم نمونه پوشش دار

تعیین خصوصیات

ضخامت نمونه‌های پارچه با استفاده از یک ضخامت‌سنج دیجیتالی (K094- Shirley Developments Limited (SDL) Shirley, England) تحت فشار ۲۰ گرم بر سانتی‌متر مربع اندازه‌گیری گردید. اندازه‌گیری ضخامت در ۱۰ ناحیه مختلف از پارچه انجام و میانگین ضخامت گزارش شد. جرم سطحی نمونه‌ها مطابق با روش ارائه شده در استاندارد EN 12127، که به تعیین جرم سطحی با استفاده از نمونه‌های کوچک می‌پردازد، اندازه‌گیری گردید. این اندازه‌گیری در ۳ ناحیه مختلف از پارچه‌ها انجام و مقدار میانگین گزارش شد.

خصوصیات ساختاری هواژل SiO_2 و نمونه‌های C، C/PDMS و C/PDMS/ SiO_2 مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور بررسی ریخت شناسی نمونه‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی^۵ FESEM مدل MIRA2 ساخت شرکت TESCAN استفاده گردید. ترکیب عنصری پارچه پنبه‌ای پوشش‌دار شده با SiO_2 به کمک طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس^۶ (EDX) و با استفاده از سامانه XL30 (فیلیپس، هلند) که به دستگاه FESEM متصل بود، تعیین گردید. طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه^۷ FTIR با استفاده از دو دستگاه انجام پذیرفت: آنالیز هواژل SiO_2 با یک طیف‌سنج بروکر مدل TENSOR27 (آلمان) انجام شد. در همین حال، خصوصیات شیمیایی نمونه

استیک، دی متیل فرمامید^۱ (DMF) و ایزوپروپیل الکل^۲ (IPA) ساخت شرکت مرک، هواژل سیلیکا^۳ (SiO_2 -میانگین قطر منافذ ۲۰ نانومتر) ساخت شرکت امین بیک و پارچه پنبه ساخت شرکت یزدباف استفاده گردید.

پوشش دهی پارچه پنبه

آماده‌سازی نمونه‌های پارچه پنبه^۴ (C)

پیش از اعمال پوشش، نمونه‌های پارچه پنبه‌ای در ابعاد 10×15 سانتی‌متر برش داده شده و تحت یک فرآیند آماده‌سازی سطح قرار گرفتند. به منظور زدودن آلاینده‌های سطحی، نمونه‌ها به مدت ۲۰ دقیقه در اتانول غوطه‌ور شده و متعاقباً با آب مقطر شستشو داده شدند. سپس نمونه‌ها در آون در دمای ۸۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه خشک گردیدند. در پایان، جرم اولیه نمونه‌ها (M_1) اندازه‌گیری و ثبت شد.

پوشش پارچه با PDMS (C/PDMS)

برای سنتز پارچه پوشش‌دار با PDMS، محلول پوشش با مخلوط کردن ۴ گرم از پلیمر PDMS و ۰/۴ عامل پخت در ۱۰۰ میلی‌لیتر IPA تهیه گردید. مخلوط به مدت ۳۰ دقیقه تحت اولتراسونیک قرار گرفت تا یکنواختی لازم حاصل شود. سپس یک نمونه پارچه آماده شده به مدت ۳۰ دقیقه در این محلول غوطه‌ور گردید. در ادامه، پارچه پوشش‌داده شده به مدت ۵ دقیقه در دمای ۸۰ درجه سلسیوس خشک و نهایتاً به منظور عمل‌آوری نهایی، به مدت ۶۰ دقیقه در کوره و در دمای ۱۶۰ درجه سلسیوس قرار داده شد (۱۵). پس از خنک‌سازی، جرم نهایی نمونه (M_2) توزین شد.

پوشش پارچه با PDMS/ SiO_2 (C/PDMS/ SiO_2)

به منظور سنتز پارچه پوشش‌دار با کامپوزیت PDMS/ SiO_2 ابتدا سوسپانسیونی حاوی ۴ گرم PDMS و ۰/۴ گرم عامل پخت و ۴ گرم SiO_2 در ۱۰۰ میلی‌لیتر IPA

1. Dimethylformamide
2. Isopropyl Alcohol
3. Silica aerogel
4. Cotton

5. Field emission scanning electron microscopy
6. Energy dispersive X-ray spectroscopy
7. Fourier-Transform Infrared Spectroscopy

استیک (حلال قطبی پروتیک^{۱۱}) و دی متیل فرمامید (حلال قطبی آپروتیک^{۱۲}) در مدت زمان ۱۰ ثانیه بر روی نمونه جاری شده و پس از ۶۰ ثانیه، نسبت مقادیر مایع نفوذ، جذب و دفع شده نسبت به مقدار ماده اولیه توزین و محاسبه شد (۲۲). مقدار ماده شیمیایی از دست رفته در اثر تبخیر در طول آزمون با معادله ۲ محاسبه شد (۸).

معادله ۲

Pe: نفوذ

Re: جذب

Rp: دفع

یافته‌ها

خصوصیات فیزیکی

مقدار پوشش اعمال شده به صورت کمی با آنالیز وزنی مورد ارزیابی قرار گرفت. وزن اولیه پارچه بدون پوشش ۱/۷۱ گرم ثبت گردید که پس از انجام پوشش دهی با PDMS و PDMS/SiO₂ به ترتیب به ۱/۸۸ و ۲/۲۵ گرم رسید. بر اساس آنالیز وزنی، نمونه‌های پوشش‌دار شده با PDMS و PDMS/SiO₂ به ترتیب افزایش وزن ۹/۹۴ و ۳۱/۵۸ درصدی را در مقایسه با پارچه اولیه (۱/۷۱ گرم) نشان دادند که بیانگر موفقیت آمیز بودن فرایند پوشش دهی است. جدول ۱ ضخامت و چگالی سطحی نمونه‌های C، C/PDMS و C/PDMS/SiO₂ را نشان می‌دهد. داده‌های مندرج در جدول ۱ حاکی از روند افزایشی ضخامت و چگالی سطحی نمونه‌ها در اثر اعمال پوشش می‌باشد. نمونه C/PDMS/SiO₂ با رسیدن به میانگین ضخامت ۰/۴۵ میلی‌متر و چگالی سطحی ۱۷۰ گرم بر مترمربع، بیشترین تغییرات را نسبت به نمونه بدون پوشش نشان داد.

خصوصیات ساختاری

خصوصیات ریخت‌شناسی هواژل SiO₂ در شکل ۱a ارائه شده است که بیانگر کروی بودن این ذرات است.

11. Protic
12. Aprotic

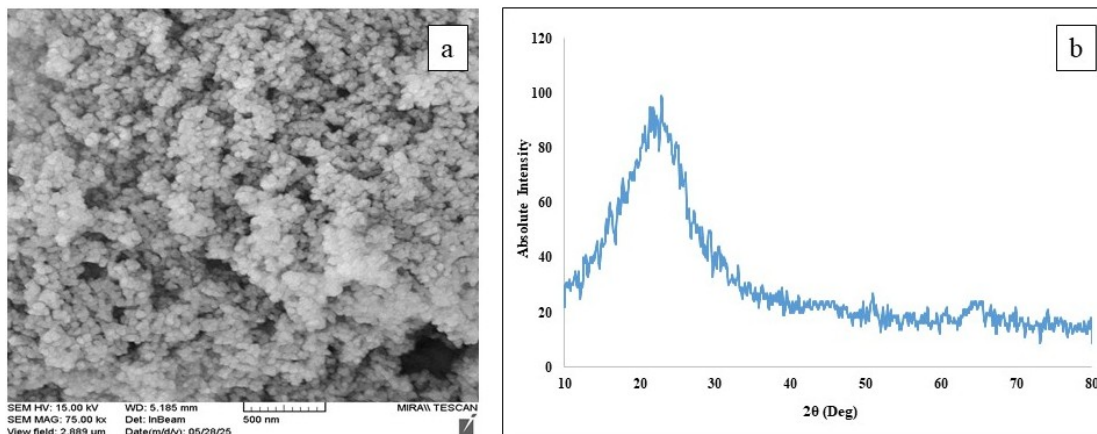
های پارچه به روش FTIR-ATR با استفاده از دستگاه Thermo AVATAR مورد شناسایی قرار گرفتند. به منظور واکاوی ساختار بلوری و ترکیب فازی هواژل SiO₂ و نمونه پارچه پوشش دار شده با SiO₂، از روش پراش پرتو ایکس^۱ (XRD) بهره گیری شد که این آنالیز با استفاده از دستگاه فیلیپس مدل PW1510 به عمل آمد.

به منظور بررسی خصوصیات عملکردی نمونه‌های C، C/PDMS و C/PDMS/SiO₂ از آزمون‌های نفوذپذیری هوا^۲، استحکام کششی^۳، زاویه تماس آب^۴ و مقاومت شیمیایی^۵ استفاده شد. آزمون نفوذپذیری هوا مطابق با استاندارد ASTM D737 با استفاده از دستگاه اندازه گیری عبور هوا از پارچه انجام گرفت (۲۰). میزان حجم هوای عبوری از ۵ نقطه از نمونه‌ها اندازه گیری و میانگین آن گزارش گردید. استحکام کششی نمونه‌ها که به عنوان حداکثر نیروی مورد نیاز برای گسیختگی ماده تعریف می‌شود، با استفاده از دستگاه آزمون کشش اینسترون^۶ (مدل ۵۵۶۶، آمریکا) مطابق با استاندارد-ISO 13934 I اندازه‌گیری شد (۲۱). میزان آب‌گریزی با استفاده از زاویه تماس آب ارزیابی شد که با دستگاه سنجش زاویه تماس ژیکان (مدل ۱۰-CAG) در دمای محیط و با استفاده از قطره آب ۵ میکرولیتری اندازه‌گیری گردید. ده اندازه‌گیری برای هر نمونه انجام و میانگین آن‌ها به عنوان مقدار نهایی زاویه تماس آب در نظر گرفته شد. ارزیابی مقاومت شیمیایی نمونه‌های C و C/PDMS/SiO₂ مطابق با استاندارد ملی ایران شماره ۳۲۳۷^۷ با اندازه گیری همزمان سه پارامتر نفوذ^۸ (مایع آزمون جمع شده توسط کاغذ جاذب زیرین)، جذب^۹ (مایع آزمون جمع شده توسط نمونه) و دفع^{۱۰} (مایع آزمون جمع شده در بشر) انجام شد. بر اساس این استاندارد ۱۰ میلی لیتر از آب (حلال خنثی)، تولوئن (حلال آلی هیدروکربنی)، اسید

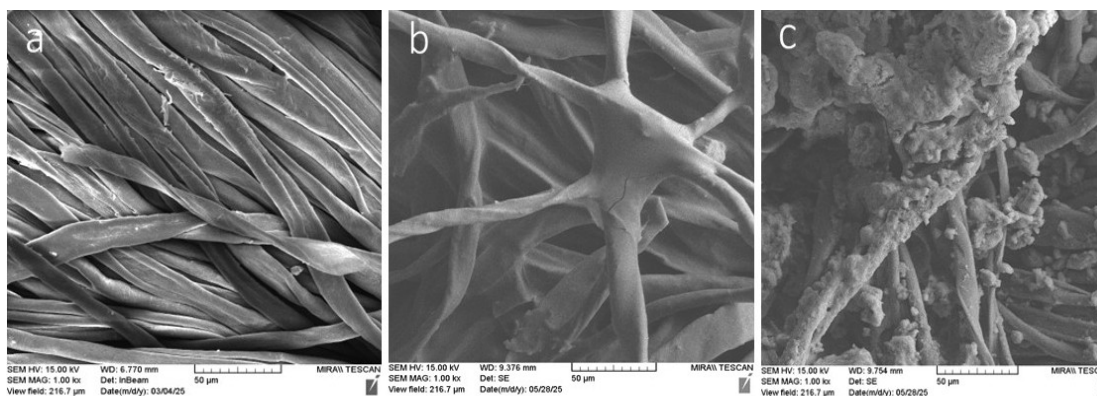
1. X-ray Diffraction
2. Air permeability
3. Tensile strength
4. Water contact angle
5. Chemical Resistance
6. INSTRON
7. Air permeability
8. Penetration
9. Retention
10. Repellency

جدول ۱: خصوصیات فیزیکی نمونه های پارچه

نمونه	ضخامت (میلیمتر)		چگالی سطحی (گرم بر مترمربع)	
	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار
C	۰/۲۳	۰/۰۲	۱۱۲	۵
C/PDMS	۰/۲۷	۰/۰۲	۱۳۱	۶
C/PDMS/SiO ₂	۰/۴۵	۰/۴۳	۱۷۰	۴



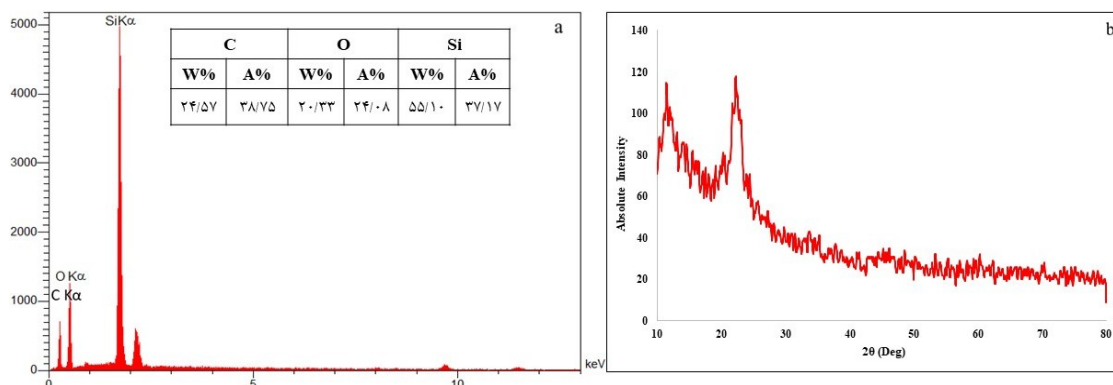
شکل ۱: خصوصیات ساختاری هواژل سیلیکا: (a) تصویر FESEM، (b) طیف XRD



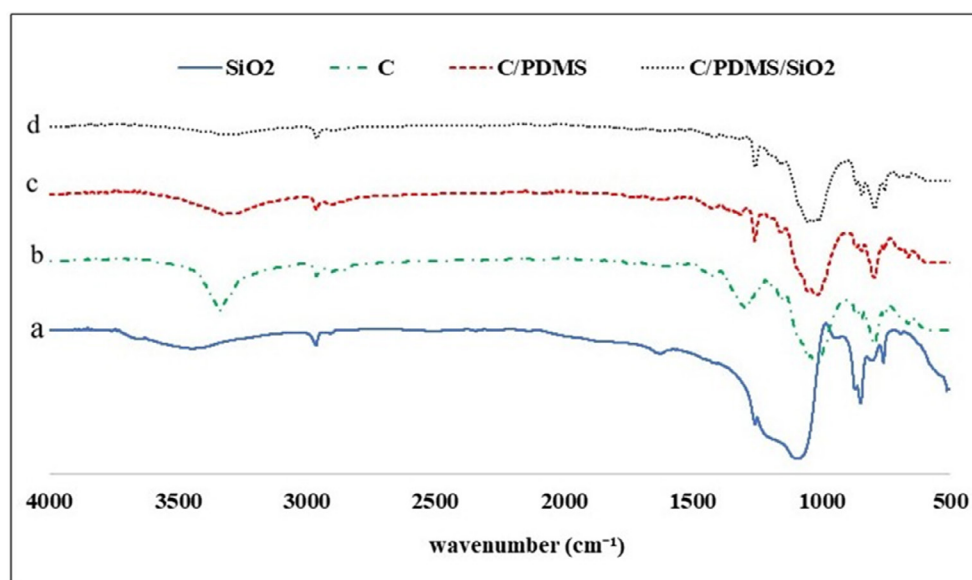
شکل ۲: تصاویر میکروسکوپ الکترونی: (a) نمونه C، (b) نمونه C/PDMS، (c) نمونه C/PDMS/SiO₂

در شکل ۲b نشان می‌دهد که سطح الیاف پوشش داده شده PDMS، به دلیل پوشش یک لایه یکتواخت از این پلیمر، عاری از زبری‌های اولیه و هموار شده است. در مقایسه با دو نمونه پیشین، در شکل ۲c نمایانگر پوشش متراکمی از ذرات کروی و متخلخل SiO₂ بر سطح الیاف پنبه پوشش داده شده با کامپوزیت

شکل ۱b طیف XRD هواژل SiO₂ را نشان می‌دهد که حاوی پیک شدیدی در زوایای پایین است. شکل ۲ تصاویر میکروسکوپی نمونه های پارچه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۲a مشهود است، فیبریل‌ها و شیارهای سطح الیاف پنبه بدون پوشش قابل رؤیت هستند. در مقابل، تصویر ارائه شده



شکل ۳: خصوصیات ساختاری نمونه پارچه پوشش دار شده با SiO_2 (C/PDMS/ SiO_2) (a) طیف EDX، (b) طیف XRD



شکل ۴: طیف FTIR مربوط به (a) ذرات SiO_2 ، (b) نمونه C، (c) نمونه C/PDMS، (d) نمونه C/PDMS/ SiO_2

شکل ۴ طیف FTIR هواژل SiO_2 و نمونه های پارچه C، C/PDMS و C/PDMS/ SiO_2 را نشان می دهد. منحنی ۴a مربوط به هواژل SiO_2 حاوی پیک هایی در 1257 cm^{-1} ، $1016-1126 \text{ cm}^{-1}$ ، 758 cm^{-1} و 2964 cm^{-1} بود. منحنی ۴b مربوط به نمونه پارچه بدون پوشش (C) پیک هایی را در 1297 cm^{-1} و $1016-1126 \text{ cm}^{-1}$ نشان داد. شکل های ۴c و ۴d مربوط به نمونه های C/PDMS و C/PDMS/ SiO_2 نیز پیک هایی در 1258 cm^{-1} ، $1016-1063 \text{ cm}^{-1}$ ، 794 cm^{-1} و 2961 cm^{-1} داشتند.

PDMS/SiO_2 است. این پوشش، منجر به ایجاد یک ساختار سطحی زیر بر روی پارچه شده است. همچنین، مشاهدات حاکی از آن است که این ذرات که با لایه ای از PDMS پوشانده شده اند، به صورت به هم چسبیده بر روی الیاف تثبیت شده اند.

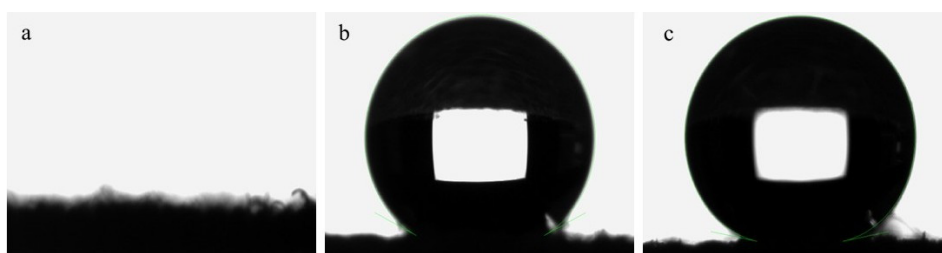
طیف EDX و XRD نمونه پارچه پوشش داده شده با PDMS/SiO_2 در شکل های ۳a و ۳b ارائه شده است. طیف EDX به دست آمده حاوی پیک های مشخصی بین ۰-۳ KeV می باشد. در طیف XRD نیز پیک های شدیدی در بازه $10-30^\circ$ 2θ ظاهر گردید.

جدول ۲: نفوذپذیری هوا و استحکام کششی نمونه های پارچه

نمونه	نفوذپذیری هوا (cm ³ /s/cm ²)	استحکام کششی (N)
C	۱۹۰	۱۱۲/۷۴
C/PDMS	۱۶۲	۱۲۴/۸۷
C/PDMS/SiO ₂	۷۶	۱۲۵/۲۴

جدول ۳: مقاومت نمونه های پارچه بدون پوشش و حاوی پوشش PDMS/SiO₂ در برابر نفوذ، جذب و دفع مواد شیمیایی

ماده شیمیایی	نفوذ (%)	جذب (%)	دفع (%)	تبخیر (%)
C	C/PDMS/SiO ₂	C	C/PDMS/SiO ₂	C
آب	۲۰	۵	۷۵	۱۰۰
تولون	۲۴	۱۲	۶۷	۲۹
استیک اسید	۱۷	۱۸	۶۵	۲۵
دی متیل فرمامید	۱۷	۱۷	۵۹	۳۱

شکل ۵: تصویر تماس قطره آب با (a) نمونه C، (b) نمونه C/PDMS، (c) نمونه C/PDMS/SiO₂

خصوصیات عملکردی

و مواد شیمیایی نشان می دهد. نتایج حاصل از ارزیابی رفتار پارچه در مواجهه با حلال ها و آب، عملکرد چشمگیر پوشش PDMS/SiO₂ را در تغییر خواص عملکردی پارچه در برابر مواد شیمیایی نشان می دهد.

شکل ۵ نحوه تماس قطره آب با نمونه های C، C/PDMS و C/PDMS/SiO₂ را نشان می دهد. همان طور که در شکل ۵a مشخص است، قطره آبی که بر روی پارچه پنبه‌ای بدون پوشش چکیده، به سرعت روی سطح آن نفوذ کرده و ناپدید شده است در حالی که در شکل های ۵b و ۵c قطره بر روی نمونه های پوشش داده شده باقی مانده است.

جدول ۲ خصوصیات نفوذپذیری هوا و استحکام کششی نمونه های C، C/PDMS و C/PDMS/SiO₂ را نشان می دهد. نتایج مندرج در جدول ۲ نشان می دهد که نفوذپذیری هوا در نمونه های پوشش دار C/PDMS و C/PDMS/SiO₂ نسبت به نمونه بدون پوشش C، به ترتیب ۱۴/۷۴ و ۶۰ درصد کاهش یافته است. با توجه به جدول ۲، در مقایسه با پارچه بدون پوشش، استحکام کششی نمونه پوشش داده شده با PDMS افزایش جزئی یافته است.

جدول ۳ مقاومت نمونه های پارچه را در برابر آب

بحث

خصوصیات ساختاری

با توجه به تصویر FESEM در شکل ۱a، ذرات هواژل سیلیکا خصوصیات ریخت‌شناسی کروی، یکنواخت و پراکنده‌ای داشتند. طیف XRD در شکل ۱b پیک شدید و متقارنی را در زاویه $2\theta = 22^\circ$ نشان می‌دهد که نشان‌دهنده ساختار بسیار بلورین هواژل سیلیکاست (۲۳). با توجه به شکل ۲، ذرات هواژل SiO_2 به صورت به هم چسبیده بر روی الیاف پوشش داده شده‌اند. طی فرآیند «غوطه‌وری-پخت»، هواژل SiO_2 موجود در محلول پوششی بر روی سطح الیاف به یکدیگر پیوند خورده و همزمان در حین عمل پخت، توسط لایه‌ای از PDMS پوشش داده می‌شوند. لایه چسبده PDMS بدون نیاز به هیچ افزودنی دیگری، با پیوندی مستحکم به سطح الیاف پنبه و ذرات SiO_2 متصل می‌گردد (۲۴). حاصل این فرآیند، ایجاد اتصال متقابل و تثبیت محکم ذرات SiO_2 و لایه PDMS بر سطح الیاف است. در نهایت، تشکیل یک لایه متراکم PDMS بر روی ذرات متخلخل SiO_2 ، مؤید موفقیت‌آمیز بودن پوشش‌دهی پارچه با کامپوزیت PDMS/ SiO_2 است. تحلیل طیف EDX در شکل ۳a حضور عناصر C، Si و O را تأیید نمود که نشان‌دهنده وجود ذرات SiO_2 است. آنالیز طیف XRD در شکل ۳b نیز پیک‌های پراش مشخص در زوایای $14/78^\circ$ ، $16/43^\circ$ ، $22/75^\circ$ و $33/79^\circ$ $2\theta =$ نشان داد که مؤید پوشش‌دهی موفقیت‌آمیز SiO_2 بر روی پارچه است. این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های پیشین در این حوزه همخوانی دارد (۱۸، ۲۵).

طیف FTIR ثبت‌شده از ذرات SiO_2 در شکل ۴a، نوارهای ارتعاشی مشخصه گروه Si-O-Si را شامل ارتعاش کششی نامتقارن در محدوده $1126 - 1016 \text{ cm}^{-1}$ و ارتعاش کششی متقارن در 758 cm^{-1} نشان می‌دهد. حضور پیک تیز در 1257 cm^{-1} دال بر وجود گروه Si-CH₃ بوده است. همچنین، پیک ارتعاش کششی CH₃- در 2964 cm^{-1} مشاهده گردید. شکل ۴b طیف FTIR پارچه بدون پوشش را نشان می‌دهد. پارچه پنبه عمدتاً از سلولز تشکیل شده است. نوار جذب قوی و گسترده

در 3335 cm^{-1} به پیک جذب ارتعاش کششی مشخصه گروه‌های هیدروکسیل (OH-) در ماکرومولکول سلولز نسبت داده شد. پیک 1297 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات خمشی در ناحیه بلوری پارچه پنبه است. در طیف FTIR نمونه‌های C/PDMS/ SiO_2 و C/PDMS نیز پیک‌های مشابهی مشاهده شد. در مقایسه با طیف پارچه بدون پوشش، شکل‌های ۴c و ۴d، یک پیک جذب مربوط به ارتعاش کششی CH₃- در 2961 cm^{-1} ، یک پیک جذب قوی از ارتعاش خمشی Si-C در 1258 cm^{-1} و یک نوار جذب قوی در 794 cm^{-1} را نشان می‌دهند. این پیک‌ها به ارتعاشات کششی متقارن Si-O-Si ناشی از تعداد زیاد گروه‌های CH₃- و گروه‌های Si-O-Si متعلق به PDMS و SiO_2 نسبت داده شدند. در مقایسه با طیف نمونه C/PDMS، نوارهای جذب در محدوده 1016 تا 1063 cm^{-1} در طیف نمونه C/PDMS/ SiO_2 ، به دلیل جذب مربوط به Si-O-Si موجود در SiO_2 ، شدیدتر بودند (۱۵، ۱۸، ۲۶). این نتایج نشان می‌دهند که ترکیب PDMS/ SiO_2 با موفقیت بر روی پارچه پنبه پوشش داده شده است.

نفوذپذیری هوا

نفوذپذیری هوا به قابلیت عبور هوا از میان پارچه اشاره دارد. با توجه به جدول ۲، نفوذپذیری هوا در نمونه‌های پوشش‌دار به طور چشمگیری کاهش یافته است. کاهش چشمگیر نفوذپذیری هوا در نمونه‌های پوشش‌دار شده را می‌توان عمدتاً به نوع پیوندی نسبت داد که پوشش‌های PDMS و PDMS/ SiO_2 از طریق آن به سطح پنبه می‌چسبند. تقریباً ۷۰٪ از پنبه در حالت بلوری وجود دارد. بین زنجیرهای سلولزی مجاور در نواحی با ساختار بلوری فیبر پنبه، پیوندهای هیدروژنی برقرار می‌گردد. پوشش‌های چسبیده به این نواحی، فضاهای خالی را پر کرده و به طور فشرده درون پارچه جای می‌گیرند و حداقل فضاهای هوایی را بین خود باقی می‌گذارند. در نتیجه، این امر جریان هوا از پارچه را کاهش می‌دهد. در نمونه C/PDMS/ SiO_2 ، حضور همزمان پوشش PDMS و هواژل SiO_2 منجر به پر شدن فضاهای خالی در مقیاس وسیع‌تر

DMF به عنوان یک حلال قطبی قوی، عملکرد مطلوبی از خود بروز نداد. اگرچه میزان دفع سطحی این حلال ۶۰٪ بود، اما مقادیر قابل توجه نفوذ (۱۷٪) حکایت از ناتوانی ذاتی پارچه در ایجاد یک سد محافظتی کارآمد دارد. در مقابل، نمونه پوشش‌دار شده با PDMS/SiO₂ بهبود چشمگیری را در عملکرد نشان داد. کاربرد این پوشش نه تنها موجب کاهش قابل توجه نفوذ حلال از ۱۷٪ به ۱/۸٪ شد، بلکه جذب را نیز از ۱۷٪ به ۵۹٪ رساند (جدول ۳). به‌گونه‌ای که درصد بالایی از حلال در ساختار پوشش به دام افتاد. در مورد تولوئن به عنوان یک حلال غیرقطبی، پارچه بدون پوشش با نفوذ ۲۴٪ و جذب ۱۲٪، آسیب‌پذیری قابل توجهی نشان داد. کاربرد پوشش PDMS/SiO₂ منجر به کاهش نفوذ به ۲٪ همراه با افزایش ۵ برابری در جذب (به ۶۷٪) گردید (جدول ۳). در مورد اسید استیک، پارچه پوشش‌دار با جذب ۶۵٪ از اسید استیک و محدود کردن نفوذ به تنها ۱٪، عملکرد مطلوبی از خود نشان داد (جدول ۳). این یافته نشان می‌دهد که ساختار پوشش PDMS/SiO₂ نه تنها در برابر حلال‌های قطبی و غیرقطبی، بلکه در برابر مایعات خورنده نیز کارایی دارد. تخلخل ایجاد شده امکان جذب سطحی مؤثر مولکول‌های اسید استیک را فراهم می‌کند، در حالی که ساختار شیمیایی پوشش از نفوذ بیشتر جلوگیری می‌نماید. این مشاهدات را می‌توان به تشکیل شبکه‌ای از حفره‌های نانومتری در ساختار پوشش نسبت داد که امکان جذب مولکول‌های حلال را فراهم می‌سازد. بر اساس نتایج مطالعه Bhuiyan در سال ۲۰۲۰، پوشش هواژل SiO₂ نه تنها به عنوان یک سد فیزیکی عمل می‌کند، بلکه با به دام اندازی مولکول‌های حلال در ساختار متخلخل خود، از انتقال آن‌ها به سطح دیگر ممانعت به عمل می‌آورد (۱۶). بر پایه گزارش‌ها، فرآیند جذب مایع توسط جاذب‌ها عمدتاً تحت تأثیر اندازه تخلخل‌ها و توزیع آن‌ها، مساحت سطح و همچنین شیمی سطح تخلخل قرار دارد (۲۸). هواژل سیلیکا ماده‌ای با تخلخل بسیار بالا است که اندازه حفره‌های آن در محدوده ۵ تا ۱۰۰ نانومتر قرار دارد و چیدمان شبکه تخلخلی هواژل سیلیکا دارای

و در نتیجه، کاهش بیشتر نفوذپذیری هوا شده است. مطالعه Bakar در سال ۲۰۲۴ بر روی پوشش دهی پارچه پنبه، ضمن مشاهده روند کاهشی مشابه در نفوذپذیری هوا، نتایج مطالعه حاضر را تایید می‌نماید (۲۷).

استحکام کششی

با توجه به جدول ۲، در مقایسه با پارچه بدون پوشش، استحکام کششی نمونه پوشش داده شده با PDMS با افزایش جزئی همراه بوده است. در این نمونه، یک لایه محافظتی متراکم از PDMS روی سطح الیاف پنبه تشکیل شده که از الیاف پنبه حفاظت نموده است. علاوه بر این، لایه PDMS به عنوان یک لایه چسبنده نیز عمل کرده و اتصال محکم‌تری بین الیاف پنبه ایجاد کرد. نمونه پوشش داده شده با PDMS و نمونه پوشش داده شده با PDMS/SiO₂ دارای خواص مکانیکی تقریباً مشابهی بودند. در نمونه PDMS، C/PDMS/SiO₂ به عنوان لایه چسبنده میانی توانست به طور محکمی به سطح پارچه پنبه و ذرات SiO₂ چسبیده و همچنین اتصال بین الیاف پنبه را مستحکم‌تر نماید. مطالعه Xu و همکاران در سال ۲۰۱۹ که بر روی توسعه پارچه پنبه ابرآب‌گریز با استفاده از هواژل SiO₂ انجام گرفت، نشان داد که خواص مکانیکی پارچه پنبه تحت تأثیر منفی ناشی از پوشش PDMS/SiO₂ قرار نمی‌گیرد. این نتایج با نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر هم‌راستا می‌باشد (۱۵).

مقاومت شیمیایی

تعیین مقاومت شیمیایی نمونه‌های پارچه (جدول ۳) بر اساس سه شاخص جذب (جذب در ضخامت پارچه)، نفوذ (عبور از ضخامت پارچه) و دفع (عبور از سطح بدون جذب یا نفوذ) انجام شد. افزایش در شاخص‌های جذب و دفع و کاهش در شاخص نفوذ ماده شیمیایی نمایانگر حفاظت بیشتر است. هنگامی که ذرات هواژل پس از جذب مایع به حالت اشباع می‌رسند، مواد شیمیایی درون پارچه نفوذ می‌کنند. باتوجه به جدول ۳، پارچه بدون پوشش در مواجهه با

ساختاری باز با اتصالات درونی متقابل است. در نتیجه، این ساختار به مواد شیمیایی مایع اجازه می‌دهد تا با محدودیت کم از طریق شبکه تخلخل باز از یک حفره به حفره دیگر جریان یابند (۱۲). این فرآیند منجر به جذب مقدار بیشتری از مواد شیمیایی می‌شود. علاوه بر این، میزان متفاوت جذب مایع برای مواد شیمیایی مختلف در یک پارچه واحد، ناشی از کشش سطحی مایعات و همچنین چگالی و فراریت آن‌ها بوده است (۱۶).

آب‌گریزی

مقایسه رفتار نمونه‌ها در برابر آب، تحول اساسی ایجاد شده توسط پوشش را به وضوح نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۳، پارچه بدون پوشش با نفوذ ۲۰٪ و جذب ۵٪ از آب رفتار آبدوستی داشت. در مقابل، نمونه پوشش‌دار با PDMS/SiO₂ با دفع ۱۰۰٪ آب رفتار ابرآب‌گریز از خود نشان داد. همان‌طور که در شکل a5 مشخص است، قطره آبی که بر روی پارچه پنبه‌ای بدون پوشش چکیده، به سرعت روی سطح آن نفوذ کرده و ناپدید شده است. پارچه‌های پنبه‌ای به دلیل دارا بودن گروه‌های هیدروکسیل آبدوست فراوان در ساختار الیاف پنبه، به طور کامل توسط آب خیس می‌شوند. در شکل b5، پارچه پنبه‌ای که تنها با PDMS پوشش داده شده بود، زاویه تماس آب معادل ۱۴۸ درجه داشت که نشان می‌دهد صرفاً با کاهش انرژی سطحی و بدون ایجاد توپوگرافی سطحی خاص، دستیابی به ابرآب‌گریزی دشوار است. در مقایسه، نمونه پارچه پنبه‌ای پوشش داده شده با PDMS/SiO₂ (شکل c5) خاصیت ابرآب‌گریزی را با زاویه تماس آب ۱۶۸ درجه از خود نشان داد. در این نمونه PDMS به عنوان یک نوع ماده آلی آب‌گریز، نه تنها سطح پارچه پنبه‌ای را با یک لایه نازک از جنس ماده‌ای با انرژی سطحی پایین پوشش داد، بلکه هواژل SiO₂ را نیز به طور محکمی به سطح فیبر پنبه متصل نمود. هواژل SiO₂ روی سطح پارچه پنبه‌ای، دارای یک ساختار نانویی سه‌بعدی بود که این امر باعث افزایش چشمگیر زبری سطح پارچه پنبه‌ای پوشش‌دار شده و در نتیجه،

بهبود عملکرد آب‌گریزی نمونه گردید (۲۹). مطالعه‌ای که به طور مشابه توسط حسن زاده و همکاران در سال ۲۰۲۰ بر روی توسعه روش ساخت پارچه ابرآب‌گریز با پوشش PDMS/SiO₂ انجام گرفت، نشان داد که سطوح ابرآب‌گریز پنبه‌ای را می‌توان با پوشش دادن PDMS/SiO₂ و از طریق ترکیب توپوگرافی متخلخل سطحی خاص ساخته شده توسط ذرات SiO₂ و لایه PDMS با انرژی سطحی پایین، تولید نمود (۳۰).

مطالعه حاضر با به‌کارگیری توأمان هواژل سیلیکا و PDMS در قالب یک پوشش کامپوزیتی بر روی پارچه پنبه‌ای، راهکاری چندمنظوره با تأکید بر تلفیق مقاومت شیمیایی و ابرآب‌گریزی ارائه نموده است. در این ساختار، لایه چسبنده PDMS علاوه بر ایجاد اتصال مستحکم ذرات هواژل به الیاف پنبه، به‌عنوان پوششی با انرژی سطحی پایین و آب‌گریز عمل می‌کند. این خصوصیت دوگانه، منجر به عملکرد متمایز نمونه کامپوزیتی C/ PDMS/SiO₂ گردیده است. با این حال، علیرغم بی‌خطر شناخته شدن PDMS در کاربردهای پزشکی و آرایشی و همچنین خنثی بودن شیمیایی هواژل سیلیکا، ارزیابی دقیق‌تری در زمینه‌های پتانسیل حساسیت‌زایی کامپوزیت در تماس مستقیم و طولانی مدت با پوست، پایداری آن در برابر شستشو و سایش مکانیکی، مقاومت در برابر تابش فرابنفش، و همچنین احتمال کاهش کارایی ناشی از اشباع تخلخل‌های ساختاری ضروری به نظر می‌رسد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش به‌طور موفقیت‌آمیزی نشان داد که پوشش کامپوزیتی هواژل سیلیکا/پلی‌دیمتیل‌سیلوکسان (PDMS/SiO₂) می‌تواند راهکاری نوین و مؤثر برای تبدیل پارچه پنبه‌ای به یک منسوج حفاظتی چندمنظوره با عملکرد برتر باشد. مطالعات ساختاری، تثبیت یکنواخت و تشکیل یک شبکه متخلخل و ناهموار را بر روی سطح الیاف تأیید کرد. این پوشش متخلخل در ترکیب با انرژی سطحی پایین PDMS، به دستیابی به خاصیت ابرآب‌گریزی با زاویه تماس ۱۶۸ درجه منجر شد. از سوی

پایداری در برابر شستشو و سایش، ارزیابی ناکافی سمیت و سازگاری زیستی، محدود بودن طیف مواد شیمیایی آزمون شده و مقیاس آزمایشگاهی دارد. برای مطالعات آینده، پیشنهاد می‌شود بررسی دوام و پایداری در شرایط واقعی، ارزیابی ایمنی زیستی، توسعه آزمون‌ها برای طیف وسیع‌تری از مواد شیمیایی، شبیه‌سازی شرایط عملیاتی، بهینه‌سازی برای مقیاس‌پذیری و افزودن قابلیت‌های هوشمند (مانند حسگری) در دستور کار قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

این مقاله برگرفته از رساله دکتری تخصصی انجام شده در گروه مهندسی بهداشت حرفه ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران است (کد رساله در سامانه پژوهان: [۴۳۰۰۵۷۵۰]). این مطالعه با حمایت مالی دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی و در قالب یک طرح پژوهشی مصوب انجام شده است (کد پژوهان: [۴۳۰۰۶۳۲۹]).

کد اخلاق

این پژوهش توسط کمیته اخلاق در پژوهش دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی با شماره کد اخلاق IR.SBMU.PHNS.REC.1402.031 تأیید شده است.

REFERENCES

1. Brander SM. Rethinking our chemical legacy and reclaiming our planet. *One Earth*. 2022;5(4):316-9.
2. Cashman MW, Reutemann PA, Ehrlich A. Contact dermatitis in the United States: epidemiology, economic impact, and workplace prevention. *Dermatol Clin*. 2012;30(1):87-98.
3. Anderson SE, Meade BJ. Potential health effects associated with dermal exposure to occupational chemicals. *Environ Health Insights*. 2014;8:EHI. S15258.
4. Rostami J, Khandel O, Sedighardkani R, Sahneh AR, Ghahari S. Enhanced workability, durability, and thermal properties of cement-based composites with aerogel

دیگر، این پوشش با پر کردن فضاهای بین‌الیافی، ضمن ایجاد ساختاری متراکم، نفوذپذیری هوا را تا ۶۰ درصد کاهش داد که نشان‌دهنده ایجاد تعادل قابل‌توجه بین ایجاد سد فیزیکی و حفظ قابلیت تنفس‌پذیری است. ارزیابی‌های عملکردی، پیشرفت نمونه‌های پوشش‌دار شده را در مواجهه با چالش‌های شیمیایی مختلف آشکار ساخت. پوشش توسعه‌یافته نه تنها به عنوان یک سد فیزیکی عمل کرد، بلکه با به دام‌اندازی مؤثر مولکول‌های مواد شیمیایی در ساختار متخلخل خود، مکانیزم حفاظتی فعالی را ارائه نمود. این امر منجر به کاهش قابل‌توجه نفوذ و افزایش چشمگیر جذب و دفع شد. بهبود همزمان استحکام کششی، بر مزیت این پوشش در افزایش دوام منسوج تأکید دارد. در مجموع، این تحقیق پتانسیل بالای پوشش کامپوزیتی PDMS/SiO₂ را در برآورده ساختن نیازهای پیچیده پوشاک حفاظتی مدرن - شامل محافظت شیمیایی گسترده، آب‌گریزی فوق‌العاده، استحکام مکانیکی و راحتی ناشی از تنفس‌پذیری - به اثبات رساند. این راهبرد، گامی مهم در جهت توسعه منسوجات هوشمند برای کاربرد در محیط‌های صنعتی و شیمیایی پرخطر به شمار می‌رود.

از نقاط قوت تحقیق می‌توان به رویکرد چندبُعدی در آزمون‌ها و تأکید بر تعادل حفاظت-راحتی اشاره کرد. با این حال، مطالعه محدودیت‌هایی از جمله عدم بررسی

and paraffin coated recycled aggregates. *J Clean Prod*. 2021;297:126518.

5. Bhuiyan MR, Wang L, Shaid A, Shanks RA, Ding J. Advances and applications of chemical protective clothing system. *J Ind Text*. 2019;49(1):97-138.
6. Truong Q, Wilusz E. Advances in chemical and biological protective clothing. *Smart textiles for protection*. 2013:364-77.
7. Mao N. High performance textiles for protective clothing. *High performance textiles and their applications*: Elsevier; 2014. p. 91-143.
8. Bhuiyan MR, Wang L, Shanks RA, Ding J. Polyurethane-superabsorbent polymer-coated cotton fabric for

- thermophysiological wear comfort. *Journal of Materials Science*. 2019;54(12):9267-81.
9. Barrios E, Fox D, Li Sip YY, Catarata R, Calderon JE, Azim N, et al. Nanomaterials in advanced, high-performance aerogel composites: A review. *Polymers*. 2019;11(4):726.
 10. Wu C-S, Wu D-Y, Wang S-S. Heat-regulating polylactic acid/silica aerogel composite fabric: Preparation and characterization. *Express Polym Lett*. 2022;16(1).
 11. Shaid A, Wang L, Fergusson SM, Padhye R. Effect of aerogel incorporation in PCM-containing thermal liner of firefighting garment. *Clothing and Textiles Research Journal*. 2018;36(3):151-64.
 12. Bhuiyan MR, Wang L, Shaid A, Shanks RA, Ding JJPiOC. Polyurethane-aerogel incorporated coating on cotton fabric for chemical protection. *Prog Org Coat*. 2019;131:100-10.
 13. Xiong X, Yang T, Mishra R, Kanai H, Militky J. Thermal and compression characteristics of aerogel-encapsulated textiles. *J Ind Text*. 2018;47(8):1998-2013.
 14. Parale VG, Kim T, Choi H, Phadtare VD, Dhavale RP, Kanamori K, et al. Mechanically strengthened aerogels through multiscale, multicompositional, and multidimensional approaches: a review. *Advanced Materials*. 2024;36(18):2307772.
 15. Xu L-H, Wang L-M, Pan H, Shen Y, Ding Y, Zhang X-Y, et al. Preparation of superhydrophobic porous SiO₂ aerogel using methyl trimethoxy silane single precursor and superhydrophobic cotton fabric coating from it. *J Nanosci Nanotechnol*. 2019;19(12):7799-809.
 16. Bhuiyan M, Wang L, Shaid A, Jahan I, Shanks RAJJoMS. Silica aerogel-integrated nonwoven protective fabrics for chemical and thermal protection and thermophysiological wear comfort. *Journal of Materials Science*. 2020;55(6):2405-18.
 17. Mazrouei-Sebdani Z, Naeimirad M, Peterek S, Begum H, Galmarini S, Pursche F, et al. Multiple assembly strategies for silica aerogel-fiber combinations—a review. *Materials & Design*. 2022;223:111228.
 18. Akhlaghi Pirposhteh E, Mortazavi SB, Khaloo SS, Hamidi SM, Farhang Dehghan S. Surface modification of cotton-polyester fabric using silica nanoparticles and silica aerogel: UV protection and thermal analysis. *J Ind Text*. 2024;54:15280837241304309.
 19. Dolez PI, Vermeersch O, Izquierdo V. Advanced characterization and testing of textiles: Woodhead Publishing; 2017.
 20. Designation A. Standard Test Method for Air Permeability of Textile Fabrics, 1996, ASTM D737-96, pp. 230–234.
 21. ISO 13934. Textiles — Tensile properties of fabrics— Part 1: Determination of maximum force and elongation at maximum force using the strip method. 2013.
 22. ISIRA3237. Protective clothing - Protection against liquid chemicals - Resistance of materials to penetration by liquids - Test method. 1386.
 23. Adhikary SK, Rudžionis Ž, Tučkutė S, Ashish DK. Effects of carbon nanotubes on expanded glass and silica aerogel based lightweight concrete. *Scientific reports*. 2021;11(1):2104.
 24. Zhu T, Li S, Huang J, Mihailiasa M, Lai Y. Rational design of multi-layered superhydrophobic coating on cotton fabrics for UV shielding, self-cleaning and oil-water separation. *Materials & Design*. 2017;134:342-51.
 25. Lin L, Li Z, Mao H, Li W, Wang C. Optically active polyurethane/silica aerogel coated cotton fabrics for thermal protection. *Front Mater*. 2021;8:681678.
 26. Lee H, Lee D, Cho J, Kim Y-O, Lim S, Youn S, et al. Super-insulating, flame-retardant, and flexible poly (dimethylsiloxane) composites based on silica aerogel. *Compos Part A Appl Sci Manuf*. 2019;123:108-13.
 27. Bakar NHA, Ismail WNW, Yusop HM, Zulkifli NFM. Synthesis of a water-based TEOS-PDMS sol-gel coating for hydrophobic cotton and polyester fabrics. *New J Chem*. 2024;48(2):933-50.
 28. Štandeker S, Novak Z, Knez Ž. Adsorption of toxic organic compounds from water with hydrophobic silica aerogels. *J Colloid Interface Sci*. 2007;310(2):362-8.
 29. Li K, Xu L, Yuan X, Pan H, Wang L, Shen Y, et al. Preparation of self-healing superhydrophobic cotton fabric based on silica aerogel for self-cleaning and oil/ water separation. *J Adhes Sci Technol*. 2023;37(14):2154-74.
 30. Hasanzadeh M, Far HS, Haji A, Rosace G. Facile fabrication of breathable and superhydrophobic fabric based on silica nanoparticles and amino-modified polydimethylsiloxane. 2020.