

Development and Evaluation of a Bio-based Paint Coating Containing PVA Hydrogel–Chitosan for Passive Humidity Regulation and Antibacterial Performance in Indoor Building Environments

Amirhoushang Soleimanizadeh ¹, Mahtiam Shahbazi ^{2*}

¹ M.Sc. Student, Department of Architecture, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

² Assistant Professor, Department of Architecture, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

*Corresponding Author's Email: mahtiamshahbazi@iaui.ac.ir (Mahtiam Shahbazi)

Paper History:

Received: 2026-07-13

Revised: 2026-07-18

Accepted: 2026-08-16

Keywords:

PVA/Chitosan Hydrogel,
Bio-Based Coating,
Passive Humidity Control,
Antibacterial Activity,
Sustainable Architecture

Abstract Indoor humidity control in contemporary architecture mainly depends on mechanical HVAC systems, which are energy-intensive and often insufficient to prevent moisture-induced microbial growth on interior surfaces. This research explores the transfer of part of the environmental regulation function from mechanical systems to building materials through a bio-based architectural coating that incorporates Polyvinyl Alcohol/Chitosan (PVA/Chitosan) hydrogel into a water-based paint matrix. FTIR, SEM, DVS (isotherm analysis/GAB modeling), and CFU counting were used to evaluate the coating's structure, moisture-buffering behavior, and antibacterial performance. FTIR confirmed hydrogen bonding within a stable polymer network, while SEM revealed a porous microstructure that facilitates vapor transport and temporary moisture storage. DVS results showed enhanced moisture uptake: the control absorbed 4.5% moisture at 90% RH, while Sample 2 and Sample 3 reached 7.5% and 19%, respectively, with Sample 3 approaching 26% near 100% RH. Antibacterial tests against *Escherichia coli* showed that Sample 3 reduced the bacterial load from 1.5×10^6 to 8.5×10^5 CFU/ml, corresponding to 43.33% growth inhibition. These findings demonstrate the potential of PVA/Chitosan-based coatings as multifunctional architectural materials for passive indoor humidity regulation and improved environmental hygiene.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2026.591546.1369>

URL: https://www.jamt.ir/article_251343.html

1. INTRODUCTION

With the intensification of environmental crises and climate change driven by human activities (Royal Society, 2021), the need for sustainable strategies in architectural design and the construction industry has become increasingly critical (Sassi, 2006). The global construction sector accounts for more than 13% of the world's gross domestic product and plays a fundamental role in economic development (World Economic Forum, 2025). In response to environmental challenges, ecological architecture has emerged as an important approach that emphasizes reducing environmental impacts, optimizing resource consumption, and improving indoor environmental quality (IEQ) (Yu & Abola, 2023). In this context, the use of advanced and sustainable materials has gained growing attention in architectural applications (Firoozi et al., 2024).

Among emerging material technologies, smart and responsive coatings have attracted significant interest due to their ability to react to environmental stimuli and dynamically regulate certain building functions. In architectural applications, one of the key areas of interest is the development of passive strategies for indoor humidity regulation and the improvement of IEQ. Fluctuations in indoor relative humidity can promote the growth of microorganisms, fungi, and bacteria on interior surfaces, potentially affecting occupants' health and indoor hygiene (Arundel et al., 1986; Fisk et al., 2007;

Mendell et al., 2011). Conventional humidity control in buildings largely depends on mechanical heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems, which are associated with considerable energy consumption. Consequently, the development of passive material-based solutions capable of moderating indoor humidity has become an important research focus (Simonson et al., 2004; Rode et al., 2005).

Hygroscopic materials can absorb and release moisture in response to environmental humidity changes, a property known as moisture-buffering capacity (Osanyintola & Simonson, 2006). However, many conventional building materials exhibit limited moisture storage capacity and slow responses to rapid environmental fluctuations. In recent years, hydrogels have emerged as promising materials due to their three-dimensional polymer networks and high water absorption capability (Peppas et al., 2006; Ahmed, 2015).

Among bio-based polymers, chitosan has attracted considerable attention because of its biodegradability, biocompatibility, and inherent antimicrobial properties (Rinaudo, 2006; Kong et al., 2010). However, pure chitosan hydrogels often suffer from limited mechanical stability. To overcome these limitations, hybrid hydrogel systems combining natural polymers with synthetic polymers such as polyvinyl alcohol (PVA) have been developed. PVA provides improved structural stability, hydrophilicity, and film-forming capability, while



chitosan contributes antimicrobial activity and biocompatibility (Tripathi et al., 2009; Wang et al., 2024).

Despite these advantages, the integration of PVA/Chitosan hydrogels into architectural coating matrices and the simultaneous evaluation of moisture-regulating behavior and antimicrobial performance remain relatively underexplored. Therefore, this study aims to develop and evaluate a functional architectural coating based on a PVA/Chitosan hydrogel incorporated into a water-based paint matrix. The research investigates the potential of this hybrid system to provide passive humidity regulation and antimicrobial performance, contributing to the development of multifunctional bio-based coatings for healthier indoor environments and more sustainable architectural materials.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Materials

Polyvinyl alcohol (PVA) powder was purchased from Merck (Germany, product code 821038), and medium-molecular-weight chitosan was obtained from Sigma-Aldrich (USA). Glacial acetic acid (99.5%, laboratory grade) was supplied by DAEJUNG Chemicals (South Korea) and used as the solvent for chitosan. All aqueous solutions were prepared using distilled water. To simulate typical indoor architectural finishes, a commercial water-based plastic paint (Momtaz Sahar, Iran) was utilized as the base coating.

2.2. Preparation of Gypsum Substrates

Gypsum substrates were prepared using commercial gypsum powder (Semnan Espandar Gypsum Co., Iran). The water-to-gypsum ratio was selected in accordance with ASTM C472 within the range of 0.33–0.40 by weight. The slurry was poured into silicone molds ($5 \times 2.5 \times 0.3$ cm) and cured under ambient laboratory conditions (25 ± 2 °C) for 24 h to ensure complete setting before coating application.

2.3. Preparation of PVA/Chitosan Hydrogel-Based Coatings

A 5 wt% PVA solution was prepared by dissolving 5 g of PVA in 100 mL of distilled water at 85 °C for 2 h. For the 3 wt% chitosan solution, 0.6 g of chitosan was dispersed in 0.75 mL of glacial acetic acid, followed by the addition of 20 mL of distilled water, and stirred at 50 °C for 2 h.

Two categories of formulations were prepared: (1) a control coating (base paint) and (2) modified coatings containing the PVA/chitosan hydrogel system. The modified coatings were prepared by adding specific amounts of the polymer solutions to 50 g of the base paint as follows: Sample 1 (1.5 g chitosan solution and 1 g PVA solution), Sample 2 (1 g chitosan solution and 2 g PVA solution), and Sample 3 (1.5 g chitosan solution and 3 g PVA solution).

After thorough stirring to achieve uniformity, the coatings were applied to the gypsum substrates using a brush and dried at 25 ± 2 °C for 24 h. For DVS analysis, the dried coatings were ground into powder to eliminate substrate interference.

2.4. Characterization Methods

2.4.1. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

To identify functional groups and investigate molecular interactions in the hydrogel system, FTIR spectroscopy was performed using a Tensor 27 Fourier transform infrared spectrometer (Bruker, Germany) equipped with an ATR accessory. Spectra were recorded in the wavenumber range of 4000 to 400 cm^{-1} with a resolution of 4 cm^{-1} and 32 scans for each sample.

2.4.2. Scanning Electron Microscopy (SEM)

Prior to imaging, the specimens were mounted on aluminum stubs. The surface morphology was examined using scanning electron microscopy (SEM, FEI Quanta 200, USA) at an accelerating voltage of 20.0 kV. Micrographs were obtained at magnifications of 2000 $\times$ and 5000 $\times$.

2.4.3. Moisture Sorption Behavior

Moisture sorption and desorption behavior were investigated using a Dynamic Vapor Sorption analyzer (DVS Advantage, UK) at 25 °C. The relative humidity (RH) was adjusted stepwise (0, 10, 30, 50, 70, 90, and 100%) to record the moisture sorption isotherms.

2.4.4. Antibacterial Evaluation

The antibacterial activity was quantitatively evaluated against *Escherichia coli* (ATCC 25922). A bacterial suspension (1.5×10^6 CFU/mL) was placed in direct contact with the coatings and incubated for 24 h. The viable colonies were then counted (CFU/mL) to determine the growth inhibition rate. All experiments were performed in triplicate to ensure reproducibility.

3. RESULTS AND DISCUSSION

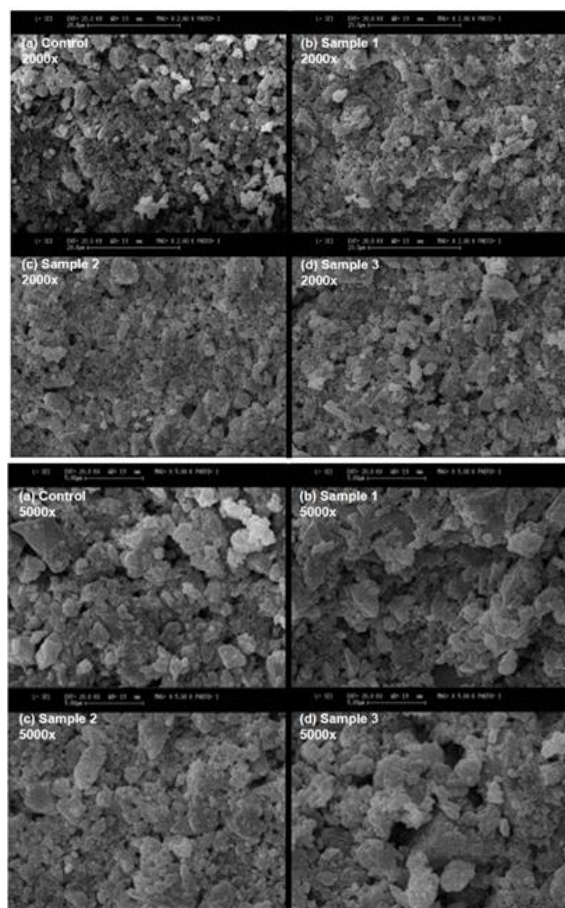


Figure 1. Coating microstructures obtained via Scanning Electron Microscopy (SEM) at 2000 $\times$ and 5000 $\times$ magnifications, illustrating the impact of PVA/chitosan hydrogel incorporation on the paint film's internal architecture.

SEM analysis (Figure 1) revealed that PVA/chitosan hydrogel incorporation transformed the dense control matrix ($CV \approx 0.679$) into an open, void-like architecture. Sample 2 exhibited optimal morphological uniformity ($CV \approx 0.47$) due to balanced PVA–chitosan hydrogen bonding, which prevented phase separation. Conversely, the higher polymer loading in Sample 3 increased microscale heterogeneity ($CV \approx 0.520$). Therefore, Sample 2 provided the most favorable porous structure for moisture buffering.

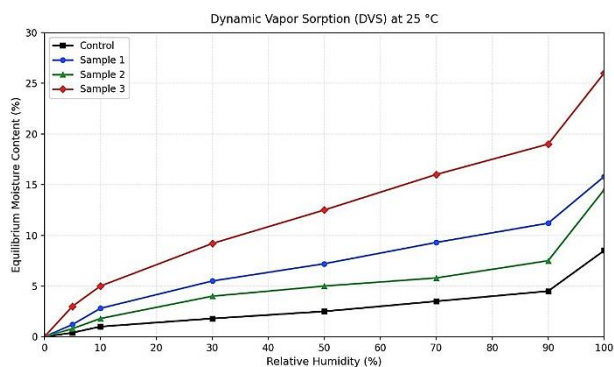


Figure 2. To quantitatively characterize the moisture sorption behavior and interpret the molecular mechanisms of water uptake within the coatings, the Dynamic Vapor Sorption (DVS) isotherm data were fitted using the Guggenheim–Anderson–de Boer (GAB) model.

To characterize moisture sorption behavior and elucidate the underlying water sorption mechanisms in the coatings, DVS isotherms at 25 °C were analyzed within the GAB framework. The results showed that the equilibrium moisture content increased with relative humidity in all samples, while the control sample consistently exhibited the lowest moisture uptake across the entire RH range. Specifically, the moisture uptake of the control increased from approximately 1% at low RH to approximately 8.5% at 100% RH, whereas Sample 3 reached approximately 26% under the same conditions. At intermediate humidity (50% RH), Sample 3 showed the highest uptake, reaching approximately 12.5%, compared with only approximately 2.5% for the control. Likewise, at 90% RH, the moisture uptake of Sample 3 increased to approximately 19%, while that of the control remained around 4.5%. Water sorption at low humidity was mainly attributed to monolayer adsorption on polar groups, followed by multilayer adsorption at intermediate humidity and possible capillary condensation within the polymeric network at high humidity. Overall, incorporation of the PVA/chitosan hydrogel significantly enhanced the moisture sorption capacity, with Sample 3 exhibiting the best performance due to its higher abundance of hydrophilic groups and more porous structure.

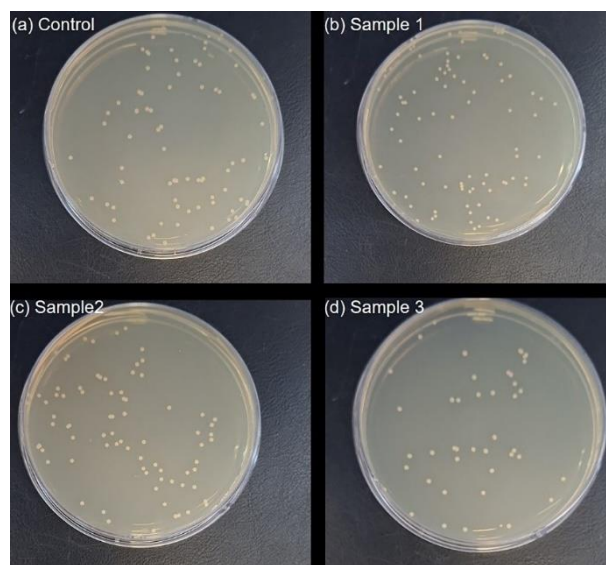


Figure 3. Representative *Escherichia coli* culture plates after antibacterial evaluation by the colony-forming unit (CFU) counting method: (a) control, (b) Sample 1, (c) Sample 2, and (d) Sample 3. The progressive reduction in colony density, especially in Sample 3, indicates a formulation-dependent antibacterial effect.

The antibacterial activity of the coatings modified with PVA/chitosan hydrogel was evaluated against *Escherichia coli* using a quantitative colony-forming unit (CFU) assay. The control sample exhibited the highest bacterial load (1.5×10^6 CFU/mL), indicating that the neat water-based plastic paint matrix had no significant antibacterial effect. In contrast, the modified formulations showed a gradual reduction in viable bacterial cells. The CFU values decreased to 1.3×10^6 CFU/mL for Sample 1, 1.2×10^6 CFU/mL for Sample 2, and 8.5×10^5 CFU/mL for Sample 3, corresponding to antibacterial activities of 13.33%, 20.00%, and 43.33%, respectively.

This increasing trend demonstrates that modification with the PVA/chitosan formulation improved the biological performance of the coating. The superior performance of Sample 3 is likely associated with greater accessibility of chitosan amino groups, a more favorable distribution of the active phase within the polymer matrix, and enhanced contact between the coating surface and bacterial cells. Protonated amino groups in chitosan can electrostatically interact with anionic components of the bacterial membrane, leading to disruption of membrane permeability and reduced *E. coli* viability. Considering that *E. coli* is a Gram-negative bacterium with a relatively resistant outer membrane, the highest antibacterial activity observed for Sample 3 is noteworthy. However, the inhibition value of 43.33% indicates a moderate antibacterial effect rather than complete bacterial elimination or strong bactericidal activity.

Overall, the CFU results confirm that modification of the water-based plastic paint with PVA/chitosan hydrogel imparted measurable antibacterial functionality against *E. coli*, with Sample 3 representing the most effective formulation among the tested samples.

4. CONCLUSION

In summary, this study demonstrates that integrating a PVA/chitosan hydrogel system into water-based paint transforms conventional architectural coatings into active functional materials. Moisture sorption analysis showed a concentration-dependent increase in hygroscopic capacity. Specifically, moisture absorption at RH = 90% increased from approximately 4.5% (Control) to approximately 7.5% (Sample 2) and approximately 19% (Sample 3), reaching a maximum of approximately 26% at RH $\approx$ 100% for Sample 3. The presence of a distinct hysteresis loop confirms a stable moisture-buffering mechanism within the coating microstructure. Furthermore, antimicrobial assessment against *E. coli* (1.5×10^6 CFU/mL) revealed that the inhibition rate increased from approximately 13.33% (Sample 1) to approximately 20.00% (Sample 2) and reached 43.33% (Sample 3), corresponding to a reduction in viable cells to approximately 8.5×10^5 CFU/mL. Consequently, the PVA/chitosan coating provides a robust passive design strategy for hygrothermal and microbial regulation, effectively improving indoor environmental quality (IEQ) and reducing reliance on mechanical HVAC systems.

ACKNOWLEDGEMENT

The author extends his gratitude to the Architecture and Urban Planning Research Center, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

REFERENCES

- Ahmed, E. M. (2015). Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. *Journal of Advanced Research*, 6(2), 105–121. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.07.006>
- Arundel, A. V., Sterling, E. M., Biggin, J. H., & Sterling, T. D. (1986). Indirect health effects of relative humidity in indoor environments. *Environmental Health Perspectives*, 65, 351–361. <https://doi.org/10.1289/ehp.8665351>
- Firoozi, A. A., Firoozi, A. A., Oyejobi, D. O., Avudaiappan, S., & Flores, E. S. (2024). Emerging trends in sustainable building materials: Technological innovations, enhanced performance, and future directions. *Results in Engineering*, 24, 103521. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103521>
- Fisk, W. J., Lei-Gomez, Q., & Mendell, M. J. (2007). Meta-analyses of the associations of respiratory health effects with dampness and mold in homes. *Indoor Air*, 17(4), 284–296. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2007.00475.x>
- Kong, M., Chen, X. G., Xing, K., & Park, H. J. (2010). Antimicrobial properties of chitosan and mode of action: A state-of-the-art review. *International Journal of Food Microbiology*, 144(1), 51–63. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2010.09.012>
- Mendell, M. J., Mirer, A. G., Cheung, K., Tong, M., & Douwes, J. (2011). Respiratory and allergic health effects of dampness, mold, and dampness-related agents: A review of the epidemiologic evidence. *Environmental Health Perspectives*, 119(6), 748–756. <https://doi.org/10.1289/ehp.1002410>
- Osanyintola, O. F., & Simonson, C. J. (2006). Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact. *Energy and Buildings*, 38(10), 1270–1282. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.026>
- Peppas, N. A., Hilt, J. Z., Khademhosseini, A., & Langer, R. (2006). Hydrogels in biology and medicine: From molecular principles to bionanotechnology. *Advanced Materials*, 18(11), 1345–1360. <https://doi.org/10.1002/adma.200501612>
- Rinaudo, M. (2006). Chitin and chitosan: Properties and applications. *Progress in Polymer Science*, 31(7), 603–632. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.06.001>
- Rode, C., Peuhkuri, R., Mortensen, L. H., Hansen, K. K., Time, B., Gustavsen, A., ... & Arfvidsson, J. (2005). Moisture buffering of building materials, Report BYG-DTU R-126. *Report of the Nordisk Innovations Center, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark*.
- Royal Society. (2021). *Climate change: Evidence and causes*. <https://royalsociety.org/news-resources/projects/climate-change-evidence-causes/>
- Sassi, P. (2006). *Strategies for sustainable architecture*. Routledge.
- Simonson, C. J., Salonvaara, M., & Ojanen, T. (2004). Heat and mass transfer between indoor air and a permeable and hygroscopic building envelope: Part I—Field measurements. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 28(1), 63–101. <https://doi.org/10.1177/1097196304044390>
- Tripathi, S., Mehrotra, G. K., & Dutta, P. K. (2009). Chitosan based antimicrobial films for food packaging applications. *e-Polymers*, 9(1), 1021–1025. <https://doi.org/10.1515/epoly.2009.9.1.1021>
- Wang, Z., Mahmood, N., Budhathoki-Uprety, J., Brown, A. C., King, M. W., & Gluck, J. M. (2024). Preparation and Characterization of Hydrogels Fabricated from Chitosan and Poly(vinyl alcohol) for Tissue Engineering Applications. *ACS Applied Bio Materials*, 7(8), 3763–3776. <https://doi.org/10.1021/acsabm.4c00642>
- World Economic Forum. (2025). *3 key insights on the digital transformation of construction*. <https://www.weforum.org/stories/2025/07/construction-sector-digital-transformation/>
- Yu, Y., & Abola, M. (2023). Ecological architecture – A perfect interpretation of the harmonious coexistence of architecture and nature. In *2023 2nd International Conference on Urban Planning and Regional Economy (UPRE 2023)* (pp. 302–306). Atlantis Press. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-218-7_34



مقاله ی کامل پژوهشی

توسعه و ارزیابی پوشش رنگی زیست پایه ی حاوی هیدروژل PVA و کیتوسان برای تنظیم غیرفعال رطوبت و عملکرد آنتی باکتریال در فضاهای داخلی ساختمان

امیر هوشنگ سلیمانی زاده^۱، مه تیام شهبازی^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه معماری، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲ استادیار گروه معماری، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخچه ی مقاله:

ثبت اولیه: ۱۴۰۵/۰۴/۲۲

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۲۷

پذیرش قطعی: ۱۴۰۵/۰۵/۲۵

کلیدواژه ها:

هیدروژل PVA/ کیتوسان،

پوشش رنگی زیست پایه،

تنظیم غیرفعال رطوبت،

عملکرد آنتی باکتریال،

معماری پایدار

چکیده در معماری معاصر، کنترل رطوبت و پیشگیری از آلودگی میکروبی سطوح داخلی، اغلب متکی به سامانه های انرژی بر HVAC است. این پژوهش، با هدف انتقال عملکرد تنظیم محیطی و ضد عفونی کنندگی به مصالح، نوعی پوشش معماری زیست پایه ی مبتنی بر هیدروژل PVA/ کیتوسان را در ماتریس رنگ پایه آب توسعه داده است. ویژگی های ساختاری و عملکردی پوشش ها با استفاده از FTIR، SEM، آزمون جذب بخار آب دینامیکی (DVS) همراه با مدل GAB و آزمون کمی شمارش کلنی (CFU) بررسی شد. نتایج FTIR تشکیل پیوندهای هیدروژنی و شبکه ی پلیمری پایدار را تأیید کرد و تصاویر SEM ساختار متخلخل و پیوسته ی آن را نشان داد که مسیرهای فعال انتقال و ذخیره ی بخار را فراهم می کند. نتایج DVS حاکی از آن است که ظرفیت جذب رطوبت در رطوبت نسبی ۹۰ درصد، از ۴/۵ درصد در نمونه ی کنترل به ۷/۵ درصد در نمونه ی ۲ و ۱۹ درصد در نمونه ی ۳ افزایش می یابد و در شرایط اشباع برای نمونه ی ۳ به ۲۶ درصد می رسد. این رفتار، با حلقه های هیستریزس پایدار، توانایی بافرینگ رطوبت را اثبات می کند. همچنین، ارزیابی آنتی باکتریال در برابر *Escherichia coli* نشان داد که نمونه های اصلاح شده کاهش قابل سنجشی در بار میکروبی ایجاد می کنند که بیشترین مهار رشد در نمونه ی ۳ به میزان ۴۳/۳۳ درصد ثبت شد. این یافته ها ادغام هیدروژل PVA/ کیتوسان را راهکاری پایدار برای تبدیل سطوح داخلی به مؤلفه هایی فعال در تنظیم غیرفعال رطوبت، بهبود بهداشت سطحی و ارتقای کیفیت محیط داخلی (IEQ) در ساختمان های کم مصرف معرفی می کند.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2026.591546.1369>

URL: https://www.jamt.ir/article_251343.html

۱- مقدمه

اصلی رشد و توسعه ی اقتصادی مطرح است ([World](#)). [\(Economic Forum, 2025\)](#) در چنین شرایطی، معماری اکولوژیک به عنوان رویکردی نوین در طراحی معماری مطرح شده است که بر کاهش آثار منفی ساختمان ها بر محیط زیست، بهینه سازی مصرف منابع طبیعی و ارتقای کیفیت محیط داخلی تمرکز دارد ([Yu & Abola, 2023](#)). به منظور تحقق این اهداف، حوزه ی ساخت و ساز به طور فزاینده ای به سوی استفاده از فناوری های نوین و مواد پایدار برای کاربردهای معماری حرکت کرده است ([Firoozi et al., 2024](#)). در این میان، پوشش های هوشمند، به عنوان نسل نوینی از مواد عملکردی، توجه

با تشدید بحران های زیست محیطی و تغییرات اقلیمی ناشی از فعالیت های انسانی ([Royal Society, 2021](#))، نیاز به راهکارهای پایدار و کارآمد در حوزه ی طراحی معماری و صنعت ساخت و ساز بیش از پیش احساس شده است ([Sassi, 2006](#)). صنعت ساخت و ساز در مقیاس جهانی به عنوان یکی از بزرگ ترین بخش های اقتصادی شناخته می شود و بیش از ۱۳ درصد از تولید ناخالص داخلی جهان را به خود اختصاص می دهد. از این رو، در بسیاری از کشورها به عنوان یکی از ارکان

عهده دار مکاتبات: مه تیام شهبازی

نشانی: ایران، تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران، دانشکده ی عمران هنر معماری

پیام نگار: mahtiamshahbazi@iaui.ac.ir

گسترده‌ای را به خود جلب کرده‌اند (Milan et al., 2022)؛ زیرا این سامانه‌ها قادر هستند به محرک‌های محیطی واکنش نشان دهند و بخشی از عملکرد ساختمان را به صورت پویا تنظیم کنند. بازار جهانی پوشش‌های هوشمند در ۲۰۲۳ ارزشی در حدود ۲/۷ میلیارد دلار داشته و پیش‌بینی می‌شود این رقم تا ۲۰۳۲ به حدود ۱۱/۷ میلیارد دلار برسد؛ رشدی که عمدتاً ناشی از گسترش کاربرد این پوشش‌ها در صنایع گوناگون از جمله پوشش‌های معماری و رنگ‌های عملکردی است (IMARC, 2024). در چهارچوب کاربردهای معماری، یکی از مهم‌ترین حوزه‌های مورد توجه برای این سامانه‌ها توسعه‌ی راهکارهای غیرفعال کنترل رطوبت و بهبود کیفیت محیط داخلی است. در این زمینه، نانو مواد و مواد پاسخ‌پذیر به محیط به عنوان نسل جدیدی از سامانه‌های عملکردی مطرح شده‌اند که قادر هستند، در واکنش به تغییرات محیطی، ویژگی‌های فیزیکی و عملکردی خود را تغییر دهند (Banerjee et al., 2020). اگرچه پژوهش‌های متعددی به توسعه‌ی پوشش‌های هوشمند مبتنی بر ترکیبات سنتزی پرداخته‌اند، بسیاری از این سامانه‌ها با چالش‌هایی نظیر نگرانی‌های زیست‌محیطی و پیامدهای بالقوه سلامتی همراه هستند (Banerjee et al., 2020). در مقابل، مواد زیست‌پایه، به دلیل سازگاری زیست‌محیطی و قابلیت‌های عملکردی متنوع، توجه فزاینده‌ای را به خود جلب کرده‌اند؛ با این حال، پژوهش‌های محدودی به بررسی سامانه‌های پوششی زیست‌پایه‌ای پرداخته‌اند که هم‌زمان دارای رفتار رطوبت‌پذیر، عملکرد ضد میکروبی و قابلیت کاربرد در فضاهای معماری باشند. کنترل شرایط رطوبتی در فضاهای داخلی ساختمان از چالش‌های مهم مرتبط با کیفیت محیط داخلی (IEQ) شناخته می‌شود. نوسانات رطوبت نسبی می‌تواند زمینه‌ی رشد میکروارگانیسم‌ها، قارچ‌ها و باکتری‌ها را بر روی سطوح داخلی فراهم کند و در نتیجه به کاهش کیفیت بهداشتی فضاهای داخلی منجر شود. علاوه بر این، کنترل رطوبت در ساختمان‌ها معمولاً به سامانه‌های فعال تهویه و تهویه‌ی مطبوع (HVAC) وابسته است که مصرف انرژی قابل توجهی دارند. از این رو، توسعه‌ی مصالح و پوشش‌هایی که بتوانند به صورت غیرفعال رطوبت محیط داخلی را تنظیم کنند و هم‌زمان ویژگی‌های ضد میکروبی داشته باشند از چالش‌های مهم در پژوهش‌های مرتبط با مصالح

ساختمانی پایدار مطرح شده است (Simonson et al., 2004)؛ Rode et al., 2005; Janssen et al., 2007; Qin et al., 2009; Viitanen et al., 2010). در این خصوص، پوشش‌های رطوبت‌پاسخ‌گو و چندعملکردی می‌توانند با تعدیل غیرفعال رطوبت در سطح مصالح به ایجاد شرایط پایدارتر و سالم‌تر در محیط‌های داخلی کمک کنند. کیفیت محیط داخلی از مهم‌ترین شاخص‌های طراحی پایدار و سلامت‌محور در ساختمان شناخته می‌شود و تأثیر مستقیمی در آسایش، سلامت، بهره‌وری و رفاه کاربران دارد. در میان عوامل مختلف مؤثر در کیفیت محیط داخلی، رطوبت نسبی هوا بسیار مهم است؛ زیرا افزایش یا کاهش بیش از حد رطوبت می‌تواند آسایش حرارتی، کیفیت هوای داخلی و فعالیت‌های میکروبی را تحت تأثیر قرار دهد (Arundel, 2007; Fisk et al., 1986). مطالعات نشان داده‌اند که رطوبت بالای محیط داخلی زمینه‌ی رشد قارچ‌ها، کپک‌ها و تخریب مصالح را فراهم می‌کند، در حالی که رطوبت بسیار پایین نیز می‌تواند موجب خشکی مجاری تنفسی، تحریک پوستی و کاهش آسایش کاربران شود (Mendell et al., 2011; Wolkoff, 2018). از این رو، حفظ تعادل رطوبتی در فضاهای داخلی از اهداف مهم طراحی معماری معاصر و ساختمان‌های سالم به شمار می‌رود. در این چهارچوب، سطوح و پوشش‌هایی که قادر هستند به صورت پویا با رطوبت محیط تعامل داشته باشند می‌توانند با جذب و آزادسازی رطوبت در مرز ماده و هوا به کاهش نوسانات رطوبت نسبی و پایداری بیشتر شرایط محیطی کمک کنند. در سال‌های اخیر، راهکارهای غیرفعال کنترل رطوبت به عنوان جایگزینی کم‌مصرف و پایدار برای سیستم‌های مکانیکی تهویه و تهویه‌ی مطبوع مورد توجه قرار گرفته‌اند (Eghtedari & Mahravan, 2021). برخلاف سامانه‌های فعال که به مصرف مداوم انرژی وابسته هستند، سیستم‌های غیرفعال از ویژگی‌های ذاتی مصالح برای تنظیم شرایط محیطی استفاده می‌کنند (Rode et al., 2005). در این میان، مصالح هیگروسکوپیک، به دلیل قابلیت جذب و آزادسازی بخار آب، از مهم‌ترین گزینه‌ها برای تنظیم رطوبت داخلی به شمار می‌روند. این ویژگی که با عنوان ظرفیت بافر رطوبتی^۱ شناخته می‌شود، می‌تواند نوسانات کوتاه‌مدت رطوبت نسبی را کاهش و پایداری محیط داخلی را افزایش دهد (Osanyintola & Simonson, 2021).

(Janssen et al., 2007; 2006). مصالحی نظیر چوب، گچ، خاک رس و مواد سلولزی، به دلیل ساختار متخلخل خود، توانایی جذب و دفع رطوبت را دارند و، به همین دلیل، در مطالعات مرتبط با تنظیم غیرفعال رطوبت مورد توجه قرار گرفته اند (Vereecken et al., 2011). با این حال، بسیاری از این مصالح سنتی دارای محدودیت هایی نظیر ظرفیت جذب پایین، سرعت پاسخ دهی محدود و عملکرد غیرقابل کنترل در شرایط محیطی متغیر هستند. در این زمینه، هیدروژل ها به عنوان گروهی از مواد پیشرفته با ظرفیت بالای جذب رطوبت مورد توجه قرار گرفته اند. هیدروژل ها دارای ساختار شبکه ای سه بعدی پلیمری هستند که امکان جذب و نگهداری مقادیر زیادی آب را فراهم می کند، در حالی که تبادل رطوبت با محیط اطراف همچنان حفظ می شود (Ahmed, 2015; Peppas et al., 2006). این ویژگی سبب شده است که هیدروژل ها در حوزه هایی نظیر مهندسی پزشکی، کشاورزی، بسته بندی هوشمند و تصفیه ی محیطی کاربرد گسترده ای پیدا کنند. در سال های اخیر، توجه به استفاده از هیدروژل ها در مصالح ساختمانی هوشمند و سامانه های تنظیم غیرفعال رطوبت نیز افزایش یافته است؛ زیرا این مواد می توانند پاسخی دینامیک و تطبیق پذیر به تغییرات رطوبتی محیط نشان دهند. با وجود این ظرفیت ها، همچنان محدودیت هایی در زمینه ی یکپارچه سازی چندعملکردی، کاربردپذیری بلندمدت و انطباق این سامانه ها با پوشش های معماری وجود دارد. در میان پلیمرهای زیستی مورد استفاده در ساخت هیدروژل ها، کیتوسان یکی از مهم ترین و پرکاربردترین مواد طبیعی به شمار می رود. کیتوسان، که از دی استیلایسیون کیتین به دست می آید، به دلیل زیست تخریب پذیری، زیست سازگاری، غیرسمی بودن و خواص ضد میکروبی ذاتی بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Rinaudo, 2006; Kong et al., 2010). مطالعات نشان داده اند که گروه های آمینی موجود در ساختار کیتوسان قادر هستند با غشای سلولی میکروارگانیسم ها برهم کنش و رشد باکتری ها و قارچ ها را مهار کنند (Nasaj et al., 2024). علاوه بر این، ماهیت آب دوست و قابلیت تشکیل فیلم در کیتوسان آن را به گزینه ای مناسب برای سامانه های کنترل رطوبت تبدیل کرده است. با این حال، هیدروژل های خالص کیتوسانی معمولاً از نظر استحکام مکانیکی و پایداری عملکردی در چرخه های مکرر جذب و دفع رطوبت با محدودیت هایی مواجه هستند. به منظور

بهبود عملکرد هیدروژل های زیستی، پژوهشگران به توسعه ی سامانه های هیبریدی مبتنی بر ترکیب پلیمرهای طبیعی و سنتزی روی آورده اند (Hedayati Tabari et al., 2022). پلی وینیل الکل (PVA) یکی از پرکاربردترین پلیمرهای سنتزی در مهندسی هیدروژل است که به دلیل استحکام مکانیکی مناسب، پایداری شیمیایی، آب دوستی و قابلیت تشکیل فیلم کاربرد گسترده ای دارد (Tripathi et al., 2009). ترکیب PVA با کیتوسان می تواند هیدروژل هایی با ساختار پایدارتر، ظرفیت جذب رطوبت مناسب تر و عملکرد چندمنظوره ایجاد کند (Wang et al., 2024; Yusmaniar et al., 2023). این سامانه های هیبریدی ویژگی های زیستی و ضد میکروبی کیتوسان را با پایداری و دوام PVA ترکیب می کنند و، به همین دلیل، گزینه ای امیدوارکننده برای توسعه ی مصالح هوشمند ساختمانی به شمار می روند. ترکیب PVA و کیتوسان، به دلیل داشتن هم زمان قابلیت فیلم سازی مناسب، رفتار آب دوست، پایداری ساختاری، سازگاری با پوشش های پایه آبی و ویژگی ضد میکروبی ذاتی، به عنوان گزینه ای مناسب برای این پژوهش انتخاب شد. با وجود این، درباره ی کاربرد هیدروژل های PVA/ Chitosan در تنظیم غیرفعال رطوبت محیط داخلی و توسعه ی پوشش های معماری چندعملکردی هنوز مطالعات کافی انجام نشده است. در سال های اخیر، سامانه های مبتنی بر کیتوسان و هیدروژل به دلیل زیست سازگاری، قابلیت اصلاح ساختاری، ظرفیت جذب و رهایش رطوبت و نیز ویژگی های ضد میکروبی بالقوه به عنوان گزینه هایی امیدبخش برای توسعه ی پوشش ها و رنگ های معماری عملکردی مطرح شده اند (Bakshi et al., 2020; Garcia-Garcia et al., 2024). بخش عمده ی این مطالعات بر حوزه هایی نظیر بسته بندی، مهندسی زیست پزشکی و سطوح بهداشتی متمرکز بوده اند و انتقال این سامانه ها به مقیاس پوشش های معماری همچنان با محدودیت های پژوهشی همراه بوده است. در بسیاری از مطالعات پیشین، هیدروژل های PVA و پلیمرهای زیست پایه ای مانند کیتوسان مستقلاً بررسی شده اند یا تمرکز پژوهش ها بر یکی از عملکردهای این مواد نظیر جذب رطوبت یا خاصیت ضد میکروبی بوده است. در مقابل، ادغام این سامانه ها در ماتریس پوشش های معماری همراه با ارزیابی هم زمان ویژگی های تنظیم رطوبت، رفتار رئولوژیکی مرتبط با قابلیت اعمال پوشش و عملکرد ضد میکروبی کمتر بررسی شده

است. در نتیجه، مطالعاتی که به بررسی هم‌زمان این ویژگی‌ها در سامانه‌های پوششی مبتنی بر ترکیب هیدروژل PVA و کیتوسان در ماتریس رنگ معماری بپردازند همچنان محدود هستند. در حوزه فیزیک ساختمان، عملکرد بافرینگ رطوبت در مصالح ساختمانی به‌طور گسترده مطالعه شده است. پژوهش (Simonson et al., 2004) نشان داد که استفاده از مصالح هیگروسکوپیک می‌تواند نوسانات رطوبت نسبی در فضای داخلی را به‌شدت کاهش دهد و درعین‌حال به بهبود آسایش حرارتی و کاهش نیاز به تهویه مکانیکی کمک کند. همچنین، محققان (Osanyintola & Simonson, 2006) با انجام دادن آزمایش‌های تجربی نشان دادند که مصالح با ظرفیت بافرینگ رطوبت می‌توانند، با فرایندهای جذب و دفع چرخه‌ای رطوبت، شرایط رطوبتی محیط داخلی را پایدارتر سازند (Rode et al., 2005). نیز اهمیت ظرفیت بافرینگ رطوبت در مصالح ساختمانی را به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در طراحی پوسته‌های ساختمانی پایدار مطرح کردند. پژوهش‌های جدیدتر نیز به بررسی رفتار هم‌زمان انتقال حرارت و رطوبت در مصالح چندلایه‌ی ساختمانی پرداخته و نشان داده‌اند که تعاملات هیگروترمال در پیش‌بینی عملکرد محیط داخلی ساختمان‌ها بسیار اثرگذار هستند (Vereecken et al., 2011). با این حال، مطالعات مقایسه‌ای نشان می‌دهد که بسیاری از مصالح متداول ساختمانی، اگرچه توانایی محدودی در تنظیم رطوبت دارند، ظرفیت جذب رطوبت و سرعت پاسخ‌دهی آن‌ها در برابر تغییرات سریع رطوبت محیطی محدود است. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در زمینه‌ی مواد هیدروژلی و مصالح هیگروسکوپیک، هنوز مطالعات محدودی ادغام سامانه‌های هیدروژلی زیست‌پایه در ماتریس پوشش‌های معماری و ارزیابی هم‌زمان رفتار رطوبتی، ویژگی‌های رئولوژیکی و عملکرد ضدمیکروبی آن‌ها را بررسی کرده‌اند. هدف این پژوهش توسعه و ارزیابی یک پوشش معماری عملکردی بر پایه‌ی ترکیب هیدروژل پلی‌وینیل‌الکل (PVA) و کیتوسان در ماتریس رنگ پلاستیک است. تمرکز اصلی تحقیق بر تحلیل قابلیت‌های این سامانه‌ی هیبریدی در ایجاد پوشش‌هایی با رفتار رطوبت‌پذیر و خاصیت ضدمیکروبی است. همچنین، این پژوهش پتانسیل سامانه‌ی توسعه‌یافته را از منظر ویژگی‌های مرتبط با عملکرد رطوبتی، قابلیت اعمال پوشش و کاربردی‌پذیری در چهارچوب

رویکردهای معماری پایدار و اکولوژیک در مقیاس مصالح ساختمانی ارزیابی می‌کند. بر این اساس، توسعه‌ی پوشش‌های هیدروژل‌پایه‌ی چندعملکردی می‌تواند در تولید مصالح نازک‌کاری داخلی سازگارتر و پاسخ‌گوتر در مقابل شرایط محیطی نویدبخش باشد. نوآوری این پژوهش در تلفیق هم‌زمان عملکرد تنظیم رطوبت، ویژگی‌های رئولوژیکی مرتبط با قابلیت اعمال پوشش و عملکرد ضدمیکروبی در سامانه‌ی پوششی زیست‌پایه‌ی مبتنی بر هیدروژل PVA/ Chitosan نهفته است؛ رویکردی که در مطالعات مرتبط با پوشش‌های معماری کمتر به‌صورت یکپارچه بررسی شده است. این تلفیق چندعملکردی، به‌ویژه در مصالح معماری معاصر، اهمیت بسیاری دارد؛ زیرا امروزه انتظار می‌رود مصالح پوششی به‌صورت هم‌زمان قابلیت تنظیم غیرفعال شرایط محیطی، مقاومت میکروبی و سازگاری با سامانه‌های رایج پوششی را فراهم کنند. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که بر کاربردهای زیست‌پزشکی، بسته‌بندی یا سامانه‌های پلیمری مجزا تمرکز داشته‌اند، این پژوهش قابلیت استفاده از این ترکیب زیست‌پایه را در چهارچوب پوشش‌های داخلی ساختمان و رویکردهای معماری پایدار ارزیابی می‌کند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

پلی‌وینیل‌الکل (PVA) به‌صورت پودر از شرکت Merck (آلمان، کد محصول ۸۲۱۰۳۸) تهیه و به‌عنوان پلیمر اصلی در تهیه‌ی هیدروژل استفاده شد. کیتوسان با وزن مولکولی متوسط از شرکت Sigma-Aldrich (ایالات متحده‌ی آمریکا) تهیه شد. اسید استیک گلاسیال با خلوص ۹۹/۵ درصد (گرید آزمایشگاهی) از شرکت DAEJUNG Chemicals (کره‌ی جنوبی) خریداری و برای حل کردن کیتوسان استفاده شد. تمامی محلول‌ها با استفاده از آب مقطر تهیه شدند.

به‌منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی پوشش‌های داخلی ساختمان و بررسی سازگاری سامانه‌ی هیدروژلی با پوشش‌های ساختمانی متداول، از رنگ پلاستیک پایه‌ی آب تجاری با نام «ممتاز سحر» (ایران) به‌عنوان پوشش پایه استفاده شد.

۲-۲- آماده‌سازی زیرلایه‌های گچی

به‌منظور شبیه‌سازی زیرلایه‌های گچی مورد استفاده در دیوارهای داخلی ساختمان، نمونه‌های گچی با استفاده از پودر

جدول ۱. فرمولاسیون نمونه ها براساس جرم

نمونه	محلول کیتوسان (۳ درصد وزنی)	محلول pva (۵ درصد وزنی)
نمونه ۱	۱/۵ گرم	۱ گرم
نمونه ۲	۱ گرم	۲ گرم
نمونه ۳	۱/۵ گرم	۳ گرم

پس از افزودن محلول های پلیمری، مخلوط ها مداوم هم زده شدند تا ترکیب یکنواختی حاصل شود. سپس، پوشش ها به طور یکنواخت، با استفاده از قلم مو، روی زیرلایه های گچی اعمال شدند. نمونه های پوشش داده شده پیش از انجام آزمایش ها به مدت ۲۴ ساعت در شرایط دمای محیط آزمایشگاه (25 ± 2 درجه ی سلسیوس) خشک شدند.

برای اجرای آزمون DVS، نمونه های کاملاً خشک شده به صورت پودر آسیاب شدند تا اثر زیرلایه ی گچی حذف شود.

۲-۴- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

به منظور بررسی ریخت شناسی سطح و ویژگی های ریزساختاری نمونه ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل FEI Quanta 200 ساخت ایالات متحده ی امریکا استفاده شد. پیش از تصویربرداری، نمونه ها روی پایه های آلومینیمی نصب شدند. تصاویر در ولتاژ شتاب دهنده ی ۲۰/۰ kv و در بزرگ نمایی های ۲۰۰۰ و ۵۰۰۰ برابر تهیه شدند.

۲-۵- آنالیز جذب بخار دینامیک (DVS)

رفتار جذب و واجذب رطوبت نمونه ها با استفاده از دستگاه Dynamic Vapor Sorption مدل DVS Advantage (ساخت شرکت Surface Measurement Systems، انگلستان) بررسی شد. برای این منظور، حدود ۲۰ میلی گرم از هر نمونه به صورت پودری در ظرف مخصوص دستگاه قرار داده شد. تمامی اندازه گیری ها در دمای ثابت ۲۵ درجه ی سلسیوس انجام شد. پروتکل آزمون به گونه ای تنظیم شد که رطوبت نسبی (RH) به صورت پله ای و افزایشی در سطوح ۰، ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰، ۹۰ و ۱۰۰ درصد تغییر یابد تا امکان مطالعه ی دقیق رفتار جذب در نواحی تک لایه، چند لایه و اشباع فراهم شود. پس از اتمام مرحله ی جذب، فرایند واجذب (Desorption) نیز با کاهش پله ای رطوبت تا رسیدن به رطوبت صفر درصد طی شد. در هر پله ی رطوبتی، شرط پایداری جرم (dm/dt) برای انتقال به

گچ تجاری (شرکت گچ سمنان اسپندار، ایران) تهیه شدند. نسبت آب به گچ مطابق با استاندارد ASTM C472 و در محدوده ی وزنی ۰/۳۳ تا ۰/۴۰ انتخاب شد. بر این اساس، حدود ۳۳ تا ۴۰ گرم آب مقطر به ۱۰۰ گرم پودر گچ افزوده شد.

مخلوط تهیه شده در قالب های سیلیکونی با ابعاد 5×2.5 سانتی متر و ضخامت تقریبی ۰/۳ سانتی متر ریخته شد. سپس، نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت در شرایط دمای محیط آزمایشگاه (25 ± 2 درجه ی سلسیوس) قرار داده شدند تا فرایند گیرش و خشک شدن کامل گچ انجام شود. پس از خشک شدن، زیرلایه های گچی برای اعمال پوشش ها استفاده شدند.

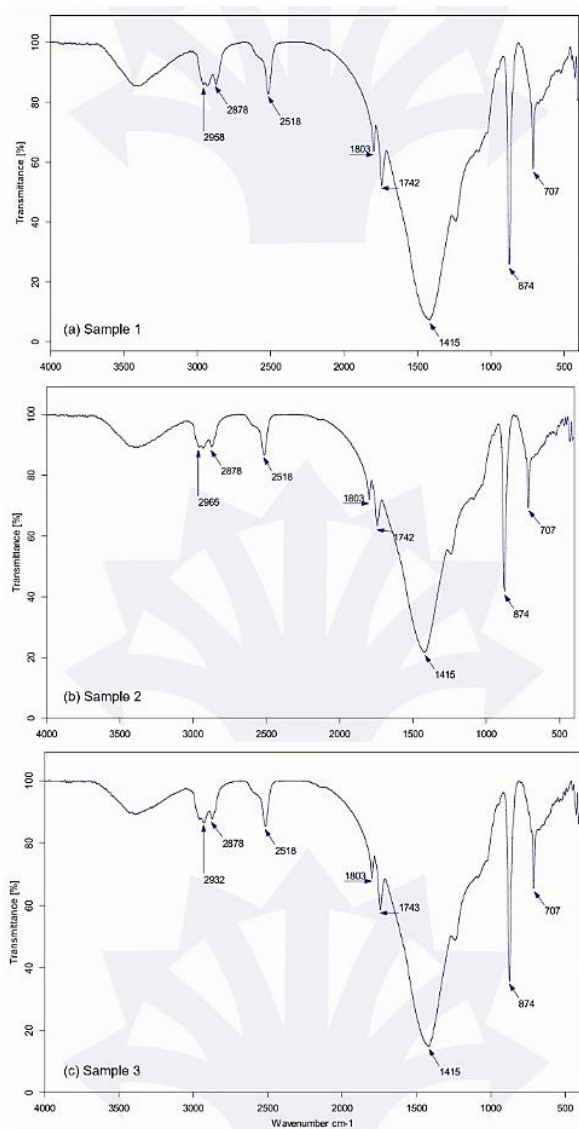
۲-۳- تهیه ی پوشش های هیدروژلی مبتنی بر PVA/ کیتوسان

در ابتدا محلول ۵ درصد وزنی PVA با حل کردن ۵ گرم پودر PVA در ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر تهیه شد. این محلول تحت هم زدن مغناطیسی مداوم در دمای حدود ۸۵ درجه ی سلسیوس به مدت حدود ۲ ساعت قرار گرفت تا محلولی شفاف و یکنواخت حاصل شود.

برای تهیه ی محلول ۳ درصد وزنی کیتوسان، ابتدا ۰/۶ گرم کیتوسان با وزن مولکولی متوسط در ۰/۷۵ میلی لیتر اسید استیک گلاسیال پراکنده شد تا فرایند حل شدن آغاز شود. سپس، ۲۰ میلی لیتر آب مقطر به تدریج به مخلوط افزوده شد و محلول حاصل تحت هم زدن مغناطیسی در دمای حدود ۵۰ درجه ی سلسیوس به مدت ۲ ساعت قرار گرفت تا محلولی همگن تشکیل شود.

به منظور بررسی تأثیر سامانه ی هیدروژلی در عملکرد پوشش، دو دسته فرمولاسیون تهیه شد: (۱) پوشش شاهد شامل رنگ پایه بدون افزودن هیدروژل؛ و (۲) پوشش های اصلاح شده ی حاوی سامانه ی PVA/ کیتوسان.

فرمولاسیون های اصلاح شده با افزودن مقادیر مشخصی از محلول های PVA و کیتوسان به ۵۰ گرم رنگ پلاستیک پایه تهیه شدند. مقادیر گزارش شده مربوط به جرم محلول های پلیمری آماده شده است. فرمولاسیون ها به صورت زیر تهیه شدند:



شکل ۱. طیف‌سنجی مادون قرمز (FTIR): (a) نمونه ۱؛ (b) نمونه ۲؛ (c) نمونه ۳ (پوشش هیدروژل PVA/کیتوسان اصلاح‌شده با پیک‌های شاخص برای شناسایی پیوندهای شیمیایی و گروه‌های عاملی مشخص شده‌اند).

طیف‌سنجی مادون قرمز نمونه‌های سنتز شده (شکل ۱) ایجاد یک شبکه‌ی پلیمری یکپارچه و حفظ ساختار شیمیایی اجزا را نشان می‌دهد. در ناحیه‌ی ۳۶۰۰ تا ۳۰۰۰ cm^{-1} ، که به ارتعاش کششی گروه‌های هیدروکسیل (OH^-) اختصاص دارد، مشاهده‌ی باندی پهن در نمونه‌های کامپوزیت ۲ و ۳ نشان‌دهنده‌ی شدت یافتن پیوندهای هیدروژنی بین مولکولی بین زنجیره‌های PVA و کیتوسان است؛ سازوکاری که مراکز فعالی را برای جذب و انتقال غیرفعال رطوبت فراهم می‌آورد. در بررسی دقیق‌تر ناحیه‌ی ارتعاش کششی C-H (محدوده‌ی ۲۹۰۰ تا ۳۰۰۰)، جابه‌جایی‌های معناداری در جایگاه پیک‌ها مشاهده می‌شود که ناشی از تغییر محیط الکترونی زنجیره‌ها

مرحله‌ی بعد لحاظ شد (یا توقف در هر پله به مدت ۱۰ دقیقه) و تغییرات جرمی نمونه به‌طور پیوسته برای استخراج ایزوترم‌های جذب رطوبت ثبت شد.

۶-۲- ارزیابی فعالیت آنتی‌باکتریال

فعالیت آنتی‌باکتریال پوشش‌های تهیه‌شده با استفاده از روش کمی شمارش باکتری علیه *Escherichia coli* (ATCC 25922, PTCC 1399) ارزیابی شد. برای این منظور، از کشت تازه‌ی باکتری مورد نظر، سوسپانسیونی با غلظت معادل نیم‌مک‌فارلند برابر با $(1.5 \times 10^8 \text{ CFU/ml})$ تهیه شد. سپس، سوسپانسیون اولیه به‌منظور دستیابی به غلظت کاری $(1.5 \times 10^6 \text{ CFU/ml})$ رقیق شد. نمونه‌های پوشش‌داده‌شده در تماس مستقیم با سوسپانسیون باکتریایی آماده‌شده قرار گرفتند و به مدت ۲۴ ساعت تحت شرایط کنترل‌شده انکوبه شدند. پس از پایان زمان تماس، عملیات کشت میکروبی انجام شد و پلیت‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳۷ درجه‌ی سلسیوس انکوبه شدند. در ادامه، کلنی‌های رشدیافته شمارش شدند و تعداد باکتری‌های زنده برحسب واحد تشکیل‌دهنده‌ی کلنی در هر میلی‌لیتر (CFU/ml) تعیین شد. فعالیت آنتی‌باکتریال نمونه‌ها بر پایه‌ی مقایسه‌ی تعداد باکتری‌های زنده با نمونه‌ی شاهد ارزیابی شد و تمامی آزمون‌ها در سه تکرار مستقل اجرا شدند.

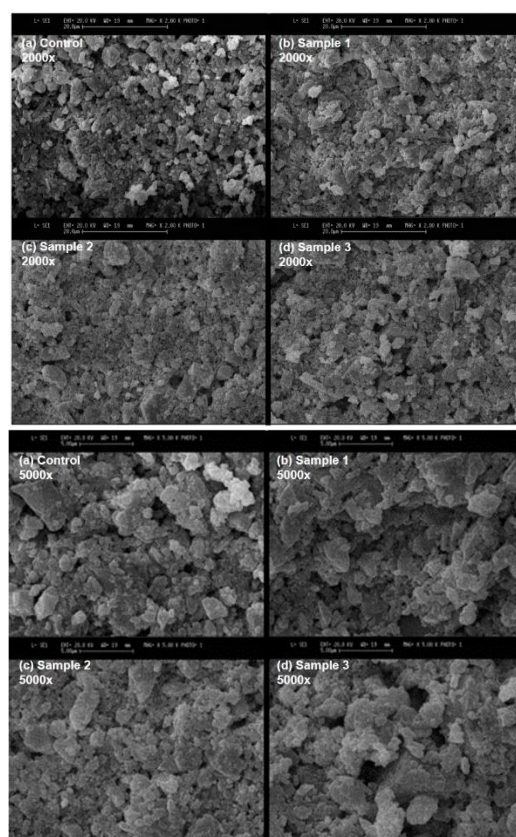
۷-۲- تکرارپذیری آزمایش‌ها

به‌منظور اطمینان از قابلیت اطمینان نتایج، تمامی آزمایش‌ها حداقل در سه تکرار مستقل انجام شدند و مقادیر گزارش‌شده میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده هستند.

۳- بحث

بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان می‌دهد که افزودن سامانه‌ی هیدروژلی PVA/ کیتوسان به ماتریس رنگ پلاستیک پایه‌آب به بازآرایی قابل توجه در معماری ریزساختاری پوشش منجر شده است. این بازآرایی به صورت تغییر در فشردگی ظاهری فیلم، نحوه‌ی توزیع ریزویژگی‌های سطحی، میزان یکنواختی ریخت‌شناختی و ظهور نواحی بازتر یا void-like قابل مشاهده است. از آنجاکه عملکرد پوشش معماری رطوبت‌پاسخ‌گو تا حد زیادی به نحوه‌ی ادغام فاز هیدروفیل در بستر رنگ و دسترس‌پذیری آن برای بخار آب وابسته است، تحلیل SEM در این پژوهش در تبیین رابط‌های میان فرمولاسیون، ساختار و عملکرد بسیار مهم است. نمونه‌ی شاهد، که فاقد فاز هیدروژلی PVA/ کیتوسان است، در هر دو بزرگ‌نمایی $\times 2000$ و $\times 5000$ ریخت‌شناسی نسبتاً فشرده، دانه‌ای و ناهمگن نشان می‌دهد. در این نمونه، ریزویژگی‌های سطحی به صورت نامنظم توزیع شده‌اند و نشانه‌ای از شکل‌گیری ساختار باز یا شبکه‌ای سازمان‌یافته مشاهده نمی‌شود. مقدار بالای ضریب تغییرات تصویری در نمونه‌ی شاهد، به‌ویژه در بزرگ‌نمایی $\times 2000$ با مقدار تقریبی $CV = 0.679$ ، با این برداشت کیفی همسو است و نشان‌دهنده‌ی نوسان قابل توجه در ویژگی‌های تصویری و بافتی سطح است. البته، این شاخص، تصویری اندازه‌گیری مستقیم زبری یا تخلخل در نظر گرفته نمی‌شود، بلکه صرفاً معیاری توصیفی برای پشتیبانی از ارزیابی نسبی ناهمگنی ریخت‌شناختی است. در مجموع، ساختار شاهد را می‌توان ماتریس رنگی نسبتاً متراکمی تفسیر کرد که فاقد بازشدگی ساختاری قابل توجه در مقیاس مشاهده شده است. با ورود فاز هیدروژلی در نمونه‌ی ۱، ریخت‌شناسی پوشش دچار تغییر محسوسی می‌شود. در این نمونه، در مقایسه با نمونه‌ی شاهد، سطح از حالت کاملاً فشرده فاصله می‌گیرد و نواحی کم‌تراکم‌تر، فرورفتگی‌های موضعی و ویژگی‌های void-like با وضوح بیشتری ظاهر می‌شوند. این تغییر احتمالاً ناشی از حضور فاز PVA/ کیتوسان در فرایند تشکیل فیلم و تأثیر آن در آرایش اجزای ماتریس رنگ در مرحله‌ی خشک شدن است. با این حال، از آنجاکه در نمونه‌ی ۱ مقدار کیتوسان نسبتاً بیشتر و مقدار PVA کمتر است، امکان دارد پیوستگی شبکه‌ی هیدروفیل و ادغام یکنواخت آن در بستر رنگ هنوز کاملاً شکل نگرفته باشد. این موضوع در تصاویر $\times 5000$ نیز منعکس است؛ جایی که تفاوت

است. برای نمونه‌ی ۱ (شاهد)، کمینه‌ی پیک در عدد موجی $2931/6 \text{ cm}^{-1}$ ثبت شده است. در نمونه‌ی ۲، این مقدار به $2933/5 \text{ cm}^{-1}$ جابه‌جا شده که حاکی از درهم‌تنیدگی متفاوت زنجیره‌های پلیمری است. در نمونه‌ی ۳ نیز، موقعیت پیک در بازه‌ی $2927/8 \text{ cm}^{-1}$ تا $2931/6 \text{ cm}^{-1}$ قرار دارد که نشان‌دهنده‌ی تغییر در تحرک سگمنت‌های پلیمری در پی اصلاحات هیدروژلی است. پیک شاخص کربونیل ($C=O$) در هر سه طیف در محدوده‌ی 1742 cm^{-1} تا 1743 cm^{-1} تثبیت شده که تأییدی بر تخریب نشدن گروه‌های عاملی اصلی در فرایند سنتز است. همچنین، حفظ باندهای مشخصه‌ی 1415 cm^{-1} ، 874 و 707 cm^{-1} پایداری اسکلت پلیمری را اثبات می‌کند. در مجموع، داده‌های FTIR مؤید آن است که فرایند ترکیب، بدون آسیب به زیرساخت‌های شیمیایی، به مهندسی نوعی شبکه‌ی نانوکامپوزیتی پایدار منجر شده است که پتانسیل ساختاری لازم برای تنظیم رطوبت در فضا‌های داخلی ساختمان را دارد.



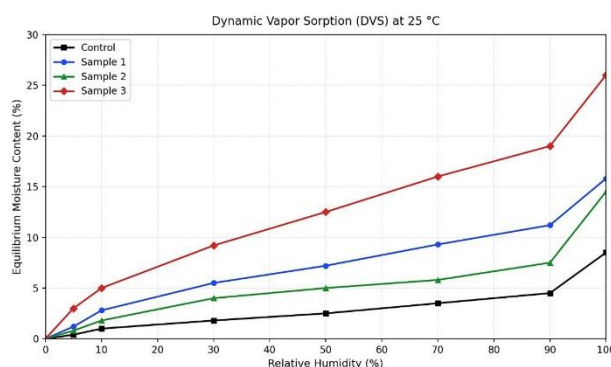
شکل ۲. ریزساختار پوشش‌ها به منظور بررسی تأثیر افزودن هیدروژل PVA/ کیتوسان در معماری داخلی فیلم رنگ، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در بزرگ‌نمایی $\times 2000$ و $\times 5000$ مطالعه شد.

میان نواحی مترکم‌تر و نواحی بازتر بیشتر آشکار می‌شود. از دیدگاه تصویری، کاهش ضریب تغییرات در مقایسه با شاهد نشان می‌دهد که افزودن هیدروژل تا حدی ناهمگنی شدید ماتریس اولیه را تعدیل کرده است، اما مقدار $CV = 0/538$ در بزرگ‌نمایی $\times 5000$ همچنان باقی ماندن ناهمگنی ریزمقیاس را نشان می‌دهد. بنابراین، نمونه‌ی ۱ را می‌توان مرحله‌ای ابتدایی از بازآرایی ساختاری دانست که در آن اثر هیدروژل مشهود است، اما توزیع و یکپارچگی فاز اصلاح‌کننده هنوز به وضعیت بهینه نرسیده است. درمقابل، نمونه‌ی ۲ متعادل‌ترین و پایدارترین الگوی ریخت‌شناختی را در میان تمام نمونه‌ها نشان می‌دهد. این نمونه، با نسبت ۱ گرم محلول کیتوسان و ۲ گرم محلول PVA در ۵۰ گرم رنگ پایه، از نظر ترکیب شیمیایی در موقعیتی قرار دارد که ظاهراً تعادل مناسبی میان پیوستگی فیلم، حضور فاز هیدروفیل و جلوگیری از تجمع موضعی فراهم شده است. در تصاویر SEM، ساختار نمونه‌ی ۲ از شاهد بازتر است، اما برخلاف نمونه‌ی ۱ و نمونه‌ی ۳، این بازشدگی با ناهمگنی شدید همراه نیست. ویژگی‌های ریزساختاری در این نمونه با توزیع یکنواخت‌تر و آرایش منسجم‌تر ظاهر می‌شوند و، در هر دو بزرگ‌نمایی $\times 2000$ و $\times 5000$ ، بافت سطحی ثبات نسبی دارد. این برداشت کیفی با شاخص‌های تصویری نیز همسو است، به‌طوری که نمونه‌ی ۲ کمترین ضریب تغییرات را در هر دو بزرگ‌نمایی نشان می‌دهد، یعنی حدود $CV = 0/470$ در $\times 2000$ و $CV = 0/465$ در $\times 5000$. پایداری این مقادیر در دو مقیاس مشاهده نشان می‌دهد که یکنواختی ریخت‌شناختی نمونه‌ی ۲ صرفاً محدود به میدانی دید یا بزرگ‌نمایی‌ای خاص نیست، بلکه در مقیاس‌های مختلف تصویر نیز تداوم نسبی دارد. از منظر سازوکاری، می‌توان چنین تفسیر کرد که در نمونه‌ی ۲ مقدار PVA برای ایجاد پیوستگی بهتر در فاز هیدروفیل کافی است، درحالی که مقدار کیتوسان نیز به اندازه‌ای حضور دارد که برهم‌کنش‌های هیدروژنی و ویژگی‌های عملکردی مورد انتظار، به‌ویژه رطوبت‌پذیری و پتانسیل زیستی، را تقویت کند، بدون آنکه بار پلیمری کل به حدی برسد که موجب جدایش فازی، تجمع موضعی یا افت یکنواختی شود. گروه‌های هیدروکسیل PVA و گروه‌های آمینی/هیدروکسیلی کیتوسان می‌توانند، از طریق برهم‌کنش‌های هیدروژنی با یکدیگر و با اجزای قطبی ماتریس رنگ، به ادغام بهتر فاز هیدروژلی در پوشش کمک کنند.

بنابراین، ریخت‌شناسی مشاهده‌شده در نمونه‌ی ۲ را می‌توان نتیجه‌ی تعادلی مطلوب میان سازمان‌یافتگی فاز پلیمری، حفظ انسجام فیلم و ایجاد دسترس‌پذیری ساختاری برای بخار آب دانست. این ویژگی از منظر طراحی پوشش‌های معماری هوشمند اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا پوششی رطوبت‌پاسخ‌گو باید هم قابلیت تعامل با رطوبت را داشته باشد و هم پیوستگی و پایداری سطحی خود را حفظ کند. در نمونه‌ی ۳، اگرچه افزایش مقدار هیدروژل همچنان موجب حفظ ساختاری بازتر از شاهد شده است، ریخت‌شناسی از نمونه‌ی ۲ ناهمگن‌تر می‌شود. این نمونه با داشتن مقدار بالاتر PVA و کیتوسان از نظر بار پلیمری در سطح بالاتری قرار دارد و تصاویر SEM نشان می‌دهند که افزایش مقدار فاز هیدروژلی الزاماً به بهبود بیشتر یکنواختی ریزساختاری منجر نشده است. در این نمونه، تفاوت میان نواحی مترکم‌تر و نواحی بازتر افزایش یافته و توزیع ویژگی‌های void-like حالت منظم نمونه‌ی ۲ را ندارد. مقدار ضریب تغییرات تصویری نیز این برداشت را پشتیبانی می‌کند، به‌طوری که در بزرگ‌نمایی $\times 5000$ ، مقدار $CV = 0/520$ برای نمونه‌ی ۳ بیشتر از نمونه‌ی ۲ است. این افزایش نسبی می‌تواند بیانگر رشد ناهمگنی موضعی در مقیاس ریز باشد. از نظر سازوکاری، چنین رفتاری احتمالاً ناشی از افزایش بیش از حد فاز پلیمری و احتمال بروز تجمعات موضعی، جدایش نسبی فاز یا تغییر در دینامیک خشک شدن فیلم است. درنتیجه، نمونه‌ی ۳ را می‌توان نمونه‌ای دانست که اگرچه از نظر بازشدگی ساختاری از شاهد پیشرفته‌تر است، از منظر یکنواختی و تعادل ریخت‌شناختی در مقایسه با نمونه‌ی ۲ در جایگاه پایین‌تری قرار می‌گیرد. به‌طور کلی، روند مشاهده‌شده در تصاویر SEM نشان می‌دهد که اثر هیدروژل PVA/کیتوسان در ریخت‌شناسی پوشش، خطی و صرفاً وابسته به افزایش مقدار افزودنی نیست، بلکه به وجود نسبتی بهینه میان اجزای هیدروژلی و ماتریس رنگ وابسته است. مقدار کم یا نسبت نامتوازن می‌تواند به بازآرایی ناقص ساختار منجر شود، درحالی که مقدار بیش از حد ممکن است یکنواختی فیلم را کاهش دهد. در این میان، نمونه‌ی ۲ مناسب‌ترین تعادل میان بازشدگی ساختاری، یکنواختی ریزریخت‌شناختی و حفظ انسجام فیلم را نشان می‌دهد. این یافته از منظر توسعه‌ی پوشش‌های معماری زیست‌پایه اهمیت دارد؛ زیرا نشان می‌دهد دستیابی به عملکرد مطلوب رطوبت‌پاسخ‌گو تنها با افزایش مقدار

شاخص فیزیکی، در متن تنها مقادیر نماینده در رطوبت نسبی (RH) معادل ۱۰ درصد، ۵۰ درصد، ۹۰ درصد و ۱۰۰ درصد گزارش شده اند، درحالی که روند کامل تغییرات در شکل قابل مشاهده است. مطابق شکل، مقدار رطوبت تعادلی در تمامی نمونه ها با افزایش رطوبت نسبی افزایش می یابد. نمونه ی شاهد در کل بازه ی رطوبتی کمترین میزان جذب را نشان می دهد، به طوری که مقدار رطوبت تعادلی آن از حدود ۱ درصد در رطوبت نسبی ۱۰ درصد به حدود ۵/۴ درصد در رطوبت نسبی ۹۰ درصد و تقریباً ۵/۸ درصد در رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد افزایش می یابد. این رفتار نشان دهنده ی ظرفیت محدود جذب رطوبت و تعداد کمتر مکان های فعال برای برهم کنش با مولکول های آب در پوشش شاهد است. در ناحیه ی رطوبت های نسبی پایین (حدود ۰ تا ۲۰ درصد)، جذب آب عمدتاً به جذب تک لایه بر روی گروه های قطبی ساختار پلیمر مربوط می شود. این گروه ها شامل گروه های هیدروکسیل در PVA و گروه های آمینی و هیدروکسیل در کیتوسان هستند که از طریق پیوندهای هیدروژنی با مولکول های آب برهم کنش برقرار می کنند. در رطوبت نسبی ۱۰ درصد، مقدار رطوبت تعادلی برای نمونه ی شاهد حدود ۱ درصد است. این افزایش جذب اولیه در نمونه های اصلاح شده، به ویژه نمونه ی ۳، نشان دهنده ی افزایش تعداد مکان های فعال و ماهیت هیدروفیل تر ساختار است. در رطوبت های میانی (تقریباً ۲۰ تا ۷۰ درصد)، فرایند جذب وارد مرحله ی تشکیل لایه های چندگانه می شود. در این ناحیه، مولکول های آب، علاوه بر سطح پلیمر، با مولکول های آب جذب شده ی قبلی نیز برهم کنش دارند. در حدود رطوبت نسبی ۵۰ درصد، مقدار رطوبت تعادلی تقریباً ۵/۲ درصد برای نمونه ی شاهد، حدود ۲/۷ درصد برای نمونه ی ۱، حدود ۵ درصد برای نمونه ی ۲ و نزدیک به ۵/۱۲ درصد برای نمونه ی ۳ گزارش می شود. در رطوبت های نسبی بالا (بیش از ۷۰ درصد)، جذب چندلایه تقویت می شود و احتمال بروز پدیده هایی نظیر تراکم مؤئینگی در ریزحفرات شبکه ی پلیمری افزایش می یابد. در حدود رطوبت نسبی ۹۰ درصد، مقدار جذب برای نمونه ی شاهد نزدیک به ۵/۴ درصد، برای نمونه ی ۱ حدود ۱۱ درصد، برای نمونه ی ۲ حدود ۵/۷ درصد و برای نمونه ی ۳ تقریباً ۱۹ درصد است. در رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد، این مقادیر به ترتیب به حدود ۵/۸ درصد، نزدیک به ۱۶ درصد، حدود ۵/۱۴ درصد و

هیدروژل حاصل نمی شود، بلکه نیازمند تنظیم دقیق نسبت PVA/کیتوسان و سازگاری آن با بستر رنگ است. بنابراین، تحلیل SEM نشان می دهد که نمونه ی ۲، از نظر ریخت شناسی، مطلوب ترین انتخاب برای عملکرد رطوبتی و زیستی متعادل در میان فرمولاسیون های بررسی شده است. با این حال، باید تأکید شود که SEM به تنهایی برای اثبات قطعی ظرفیت جذب/واجد جذب رطوبت یا فعالیت آنتی باکتریال کافی نیست، بلکه این مشاهدات باید شواهد ساختاری پشتیبان در کنار نتایج DVS و آزمون های میکروبی تفسیر شوند. در چنین چهارچوبی، یکنواختی و بازآرایی ساختاری مشاهده شده در نمونه ی ۲ می تواند مبنایی ریخت شناسی برای توضیح عملکرد مطلوب تر این فرمولاسیون در آزمون های عملکردی بعدی فراهم کند.



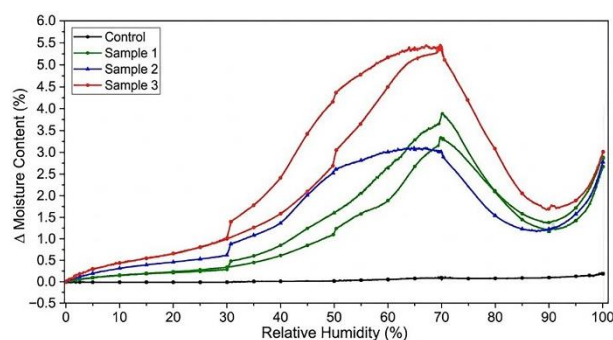
شکل ۳. به منظور توصیف کمی رفتار جذب رطوبت و تفسیر

سازوکارهای مولکولی جذب آب در پوشش ها، داده های ایزوترم حاصل از آزمون Dynamic Vapor Sorption با استفاده از مدل Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) برازش داده شدند.

به منظور توصیف رفتار جذب رطوبت و بررسی سازوکارهای مولکولی برهم کنش آب با ساختار پوشش ها، ایزوترم های حاصل از آزمون Dynamic Vapor Sorption (DVS) در دمای ۲۵ درجه ی سلسیوس تحلیل شدند. به منظور تفسیر کمی داده ها، چهارچوب نظری مدل Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) مدنظر قرار گرفت. مدل GAB به طور گسترده برای توصیف ایزوترم های جذب رطوبت در مواد زیستی و پلیمری به کار می رود؛ زیرا توانایی مدل سازی جذب تک لایه و چندلایه ی هم زمان آب را دارد. در آزمون DVS، رطوبت نسبی به صورت پله ای از مقادیر پایین تا ۱۰۰ درصد افزایش داده شد. منحنی کامل تغییرات رطوبت تعادلی در شکل ارائه شده است. با این حال، به منظور اختصار و تمرکز بر نقاط

Content) در طول چرخه‌های پیوسته رطوبت نسبی هستند. از این رو، این نتایج باید پاسخ وابسته به زمان پوشش‌ها در برابر تغییرات رطوبتی تفسیر شوند، نه ظرفیت جذب رطوبت تعادلی کل. مقایسه‌ی مسیرهای جذب و واجذب نشان‌دهنده‌ی اختلافی معنادار میان این دو فرایند و تشکیل حلقه‌ی پسماند مشخص است. این رفتار حاکی از آن است که جذب و آزادسازی رطوبت ماهیتی هم‌زمان و برگشت‌پذیر کامل ندارند و به مسیر تغییرات رطوبت نسبی وابسته هستند. بنابراین، بخشی از آب جذب‌شده درون ساختار پوشش برای مدت طولانی‌تری حفظ می‌شود. از منظر کمی، نمونه‌ی شاهد پاسخ بسیار محدودی نشان می‌دهد و مقادیر ثبت‌شده در کل چرخه عموماً کمتر از حدود ۰/۲ درصد باقی می‌مانند. در مقابل، پوشش‌های اصلاح‌شده با هیدروژل افزایش چشمگیری در پاسخ دینامیکی نشان می‌دهند. در حدود ۷۰ RH درصد، بیشینه‌ی تغییر رطوبت برای نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب حدود ۳/۸ درصد، ۳/۱ درصد و ۵/۴ درصد است. این افزایش بیانگر آن است که حضور گروه‌های عاملی آب‌دوست در ماتریس PVA/ کیتوسان برهم‌کنش پوشش با بخار آب محیط را به‌طور مؤثری تقویت کرده است. در نمونه‌ی شاهد، هم‌پوشانی نسبی مسیرهای جذب و واجذب بیانگر آن است که نگهداشت رطوبت عمدتاً از طریق جذب سطحی ضعیف بر گروه‌های قطبی ماتریس پلیمری انجام می‌شود. بنابراین، با کاهش رطوبت نسبی، آب جذب‌شده نیز به‌سرعت آزاد می‌شود. این مشاهده با ریزساختار متراکم و تقریباً غیرمتخلخل مشاهده‌شده در تصاویر SEM سازگار است؛ ساختاری که در آن امکان بروز سازوکارهای نگهداشت مبتنی بر موئینگی محدود است. در نمونه‌ی ۱، ظهور حلقه‌ی پسماند قابل تشخیص نشان می‌دهد که، علاوه بر جذب سطحی، بخشی از مولکول‌های آب در معماری متخلخل ایجادشده به دام می‌افتند. در نمونه‌ی ۲، حلقه‌ی پسماند به‌طور محسوسی گسترده‌تر و منظم‌تر است، به‌ویژه در محدوده‌های میانی تا بالای رطوبت نسبی. ریزساختار متخلخل، یکنواخت و اسفنجی مشاهده‌شده در SEM می‌تواند شرایط مناسبی برای به دام افتادن رطوبت، تشکیل لایه‌های چندگانه‌ی آب و احتمال وقوع میعان موئین فراهم کند. در نتیجه، این نمونه توانایی مطلوبی در جذب رطوبت اضافی در شرایط رطوبت بالا و آزادسازی تدریجی آن دارد که این امر نشان می‌دهد که از شاخصه‌های اصلی ماده‌ی بافر رطوبتی غیرفعال کارآمد است.

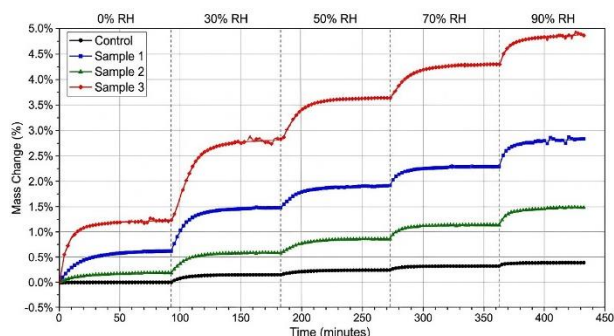
تقریباً ۲۶ درصد می‌رسند. مقایسه‌ی منحنی‌های ایزوترم نشان می‌دهد که افزودن هیدروژل PVA/ کیتوسان موجب افزایش ظرفیت جذب رطوبت در مقایسه با نمونه‌ی شاهد شده است. در کل محدوده‌ی رطوبتی، نمونه‌ی ۳ بیشترین مقدار رطوبت تعادلی را نشان می‌دهد و پس از آن به ترتیب نمونه‌ی ۱، نمونه‌ی ۲ و نمونه‌ی شاهد قرار می‌گیرند. افزایش قابل توجه جذب در نمونه‌ی ۳، به‌ویژه در رطوبت‌های بالا، احتمالاً ناشی از افزایش گروه‌های هیدروفیل و توسعه‌ی ساختار متخلخل‌تر در شبکه‌ی پلیمری است که امکان نفوذ و نگهداری بیشتر مولکول‌های آب را فراهم می‌کند. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که اصلاح پوشش با هیدروژل PVA/ کیتوسان موجب افزایش مکان‌های فعال جذب و تسهیل تشکیل لایه‌های چندگانه‌ی آب شده است.



شکل ۴. تغییرات دینامیکی جرم (Moisture Content) طی

چرخه‌های جذب و واجذب بخار آب در آزمون DVS برای نمونه‌ی شاهد و پوشش‌های اصلاح‌شده با هیدروژل PVA/ کیتوسان (حلقه‌ی هیستریزس مشاهده‌شده بیانگر پاسخ مسیرمند ماده به تغییرات رطوبت نسبی است. افزایش مقدار هیدروژل موجب افزایش دامنه‌ی پاسخ دینامیکی و تقویت رفتار بافری رطوبت در پوشش‌های اصلاح‌شده می‌شود).

در این بخش، پاسخ دینامیکی پوشش‌ها در برابر چرخه‌های رطوبتی تحلیل شد. گفتنی است که مقادیر Y در این نمودار بیانگر تغییرات جرم لحظه‌ای در طول چرخه است و از نظر کمی با مقادیر کل رطوبت تعادلی (ارائه‌شده در شکل ۳) متمایز است؛ چراکه هدف در اینجا تبیین رفتار پاسخ‌دهی زمانی است، نه ظرفیت ذخیره‌سازی کل. به‌منظور بررسی رفتار جذب و واجذب بخار آب و تبیین سازوکارهای نگهداشت رطوبت در ساختار پوشش‌ها، پروفیل‌های حاصل از آزمون Dynamic Vapor Sorption (DVS) تحلیل شدند. شایان ذکر است که داده‌های ارائه‌شده در این شکل بیانگر تغییر جرم دینامیکی (Moisture



شکل ۵. پروفیل زمانی جذب رطوبت در نمونه‌ی شاهد و نمونه‌های پوششی اصلاح‌شده با هیدروژل، به‌دست‌آمده از آزمون جذب بخار دینامیکی (DVS) در شرایط تغییرات پله‌ای رطوبت نسبی (این نمودار تغییرات (Δ Moisture Content) را برحسب زمان نمایش می‌دهد و امکان مقایسه‌ی نمونه‌ها را از نظر سینتیک جذب رطوبت، پاسخ گذرای جذبی و زمان مشخصه‌ی لازم برای رسیدن به شبه‌تعادل در سطوح متوالی رطوبت نسبی فراهم می‌کند).

پروفیل زمانی جذب رطوبت نمونه‌ها، به‌دست‌آمده از آزمون جذب بخار دینامیکی (DVS) در شرایط تغییرات پله‌ای رطوبت نسبی، در شکل ۵ ارائه شده است. این نمودار تغییرات جرم (Δ Mass Change) را برحسب زمان نمایش می‌دهد و امکان مقایسه نمونه‌ها را از منظر سینتیک جذب و زمان رسیدن به شبه‌تعادل (Quasi-Equilibrium) فراهم می‌کند. در انتهای آزمون و در ۹۰ RH درصد، بیشترین ظرفیت جذب متعلق به نمونه‌ی ۳ (۴/۹ درصد) است و پس از آن نمونه‌ی ۱ (۲/۸ درصد)، نمونه‌ی ۲ (۱/۵ درصد) و نمونه‌ی شاهد (۰/۴ درصد) قرار دارند. در نمونه‌ی شاهد، فرایند جذب بسیار سریع و محدود است، به‌گونه‌ای که منحنی، در هر پله، در کمتر از ۳۰ دقیقه به حالت پایدار می‌رسد که نشان‌دهنده‌ی ساختار فشرده و جذب عمدتاً سطحی است. درمقابل، افزودن هیدروژل PVA/ کیتوسان باعث افزایش محسوس زمان رسیدن به تعادل و ارتقای ظرفیت جذب در تمام نمونه‌های اصلاح‌شده شده است. در میان نمونه‌ها، نمونه‌ی ۲ بارزترین رفتار سینتیکی را نشان می‌دهد. منحنی این نمونه با شیبی ملایم و در بازه‌ی زمانی طولانی‌تری (حدود ۶۰ تا ۷۰ دقیقه) به پلاتوی تعادلی می‌رسد. این رفتار بیانگر شبکه‌ی متخلخل و یکنواختی است که توازن مطلوبی میان سرعت جذب اولیه و آزادسازی تدریجی رطوبت ایجاد کرده است؛ ویژگی‌ای که کاملاً با مشاهدات SEM و گستردگی هیستریزس DVS همخوانی دارد و نمونه‌ی ۲ را به انتخابی بهینه برای کاربرد Moisture-Buffering تبدیل می‌کند. در نمونه‌ی ۳،

نمونه‌ی ۳ بیشترین دامنه‌ی پاسخ دینامیکی را نشان می‌دهد و مقدار آن به حدود ۵/۴ درصد می‌رسد. با این حال، الگوی پسماند آن از نمونه‌ی ۲ پیچیده‌تر است. این رفتار را می‌توان به ناهمگنی ساختاری و تجمع موضعی پلیمر نسبت داد که در تصاویر SEM نیز قابل مشاهده است. چنین ویژگی‌هایی احتمالاً موجب ایجاد توزیع گسترده‌تری از اندازه‌ی حفرات و در نتیجه تفاوت در سینتیک جذب و واجذب در نواحی مختلف سطح پوشش شده‌اند. از دیگر ویژگی‌های قابل توجه در نمونه‌های اصلاح‌شده، افت غیرخطی و سپس افزایش مجدد رطوبت در بازه‌ی ۷۰ RH تا ۹۰ درصد است. این رفتار نشان می‌دهد که پوشش‌های اصلاح‌شده با هیدروژل از ایزوترم تعادلی ساده تبعیت نمی‌کنند، بلکه پاسخ آن‌ها به شدت تحت تأثیر مسیر و شرایط دینامیکی چرخه‌ی رطوبتی قرار دارد. این پدیده‌ی گذرا را می‌توان به فرایندهایی نظیر پلاستیسایز شدن القاشده با رطوبت، بازآرایی ساختاری یا گذار فاز در ماتریس هیدروژلی نسبت داد؛ فرایندهایی که می‌توانند در رطوبت‌های بالا موقتاً حجم آزاد و ظرفیت برهم‌کنش با آب را تغییر دهند. در مجموع، تحلیل حلقه‌های پسماند نشان می‌دهد که اصلاح پوشش با هیدروژل PVA/ کیتوسان سازوکارهای ساختاری نگهداشت رطوبت را به‌طور معنی‌داری تقویت کرده است. اگرچه نمونه‌ی ۳ بیشترین دامنه‌ی پاسخ دینامیکی را ارائه می‌دهد، نمونه‌ی ۲ منظم‌ترین و کنترل‌شده‌ترین رفتار را نشان می‌دهد. از این رو، این نمونه را می‌توان گزینه‌ی مناسب‌تری برای کاربردهای تنظیم غیرفعال رطوبت در محیط‌های داخلی دانست.

جدول ۲. نتایج کمی فعالیت آنتی‌باکتریال نمونه‌ها علیه *E. coli*

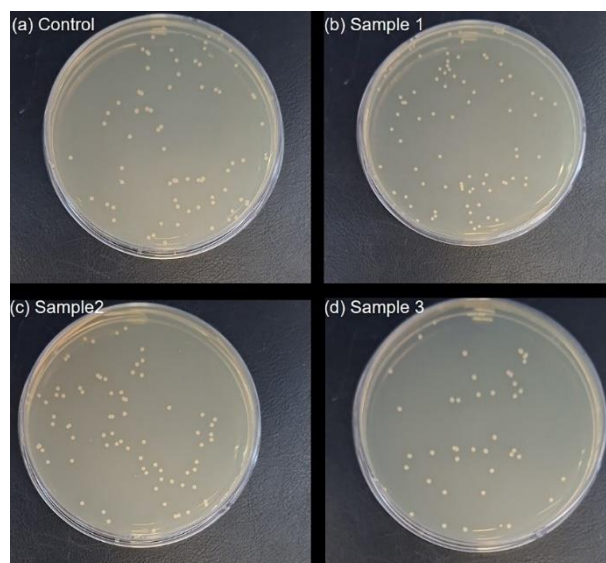
براساس شمارش CFU

میکروارگانیزم	نمونه	(CFU/ml)	فرایند آنتی‌باکتریال (%)
<i>E. coli</i> (ATCC 25922)	۰	$1/5 \times 10^6$	—
	۱	$1/3 \times 10^6$	۱۳/۳۳
	۲	$1/2 \times 10^6$	۲۰/۰۰
	۳	$8/5 \times 10^5$	۴۳/۳۳
	Blank	$1/5 \times 10^6$	—

فعالیت آنتی‌باکتریال پوشش‌های اصلاح‌شده با هیدروژل PVA/ کیتوسان در برابر *Escherichia coli* با استفاده از آزمون کمی شمارش واحدهای تشکیل‌دهنده‌ی کلنی، CFU، ارزیابی شد. این روش امکان سنجش مستقیم تعداد سلول‌های زنده پس از تماس با سطح پوشش را فراهم می‌کند و، برای بررسی سامانه‌های پوششی با عملکرد تماس‌محور، رویکردی مناسب و قابل‌اتکا به شمار می‌رود. نمونه‌ی کنترل، با مقدار 1.5×10^6 CFU/ml بیشترین بار باکتریایی را نشان داد که بیانگر نبود اثر آنتی‌باکتریال مؤثر در ماتریس رنگ پلاستیک پایه‌آب بدون افزودنی هیدروژلی است. درمقابل، نمونه‌های اصلاح‌شده با PVA/ کیتوسان کاهش تدریجی در تعداد باکتری‌های زنده ایجاد کردند. فعالیت آنتی‌باکتریال از ۱۳/۳۳ درصد در نمونه‌ی ۱ به ۲۰/۰۰ درصد در نمونه‌ی ۲ افزایش یافت و در نمونه‌ی ۳ به بیشترین مقدار خود یعنی ۴۳/۳۳ درصد رسید. این روند افزایشی نشان می‌دهد که اصلاح فرمولاسیون هیدروژلی توانسته است عملکرد زیستی پوشش را بهبود دهد. بیشترین کاهش CFU در نمونه‌ی ۳ مشاهده شد، به‌طوری که تعداد باکتری‌های زنده در این نمونه به 8.5×10^5 CFU/ml رسید. این نتیجه نشان می‌دهد که مؤثرترین فرمولاسیون در میان نمونه‌های بررسی‌شده است. برتری این نمونه احتمالاً به افزایش دسترس‌پذیری گروه‌های آمینی کیتوسان، توزیع مناسب‌تر فاز فعال در ماتریس پلیمری و تقویت تماس مؤثر میان سطح پوشش و سلول‌های باکتریایی مربوط است. گروه‌های آمینی پروتونه‌شده کیتوسان می‌توانند با اجزای آنیونی غشای باکتریایی برهم‌کنش الکترواستاتیکی برقرار کنند و، از طریق اختلال در نفوذپذیری غشاء، زیست‌پذیری *E. coli* را کاهش دهند. با توجه به اینکه *E. coli* باکتری‌ای گرم‌منفی با غشای خارجی نسبتاً مقاوم است، مشاهده‌ی بیشترین فعالیت آنتی‌باکتریال در نمونه‌ی ۳ از نظر عملکردی قابل‌توجه است.

با وجود ظرفیت جذب بالاتر (۴/۹ درصد)، رفتار سیستیکی تا انتهای بازه‌ی ۹۰ دقیقه‌ای همچنان روند صعودی دارد که نشان‌دهنده‌ی ناهمگنی ریزساختاری (توزیع نامتوازن حفرات) است. در مجموع، اصلاح پوشش با هیدروژل PVA/ کیتوسان، پاسخ رطوبتی را از رفتاری سریع و سطحی (شاهد) به رفتاری کندتر، پایدارتر و تنظیم‌پذیرتر تبدیل کرده است که از این نظر، نمونه‌ی ۲ بهترین توازن را میان سرعت جذب اولیه و پایداری سیستیکی ایجاد کرده است.

فعالیت آنتی‌باکتریال نمونه‌های توسعه‌یافته علیه *Escherichia coli* (ATCC 25922) با استفاده از روش کمی شمارش واحدهای تشکیل‌دهنده‌ی کلنی (CFU) ارزیابی شد. پس از ۲۴ ساعت تماس و سپس ۲۴ ساعت انکوباسیون در دمای ۳۷ درجه‌ی سلسیوس، تعداد کلنی‌های زنده شمارش شد. تصاویر نماینده‌ی پلتهای مربوط به گروه شاهد و نمونه‌های پوشش‌دار در شکل ۵ و نتایج کمی شامل مقادیر CFU/ml و درصد فعالیت آنتی‌باکتریال در جدول ۲ ارائه شده‌اند.



شکل ۶. تصاویر نماینده پلتهای کشت *Escherichia coli* پس از ارزیابی فعالیت آنتی‌باکتریال به روش شمارش CFU: (a) شاهد؛ (b) نمونه‌ی ۱؛ (c) نمونه‌ی ۲؛ و (d) نمونه‌ی ۳ (کاهش تراکم کلنی‌ها در نمونه‌ها، به‌ویژه نمونه‌ی ۳، روند مهار وابسته به فرمولاسیون را نشان می‌دهد).

بالین حال، مقدار ۴۳/۳۳ درصد بیانگر اثر مهارکنندگی متوسط است و نباید به عنوان حذف کامل جمعیت باکتریایی یا خاصیت باکتری کشی قوی تفسیر شود. در مجموع، نتایج آزمون CFU نشان می دهد که اصلاح رنگ پلاستیک پایه آب با هیدروژل PVA/ کیتوسان موجب ایجاد عملکرد آنتی باکتریال قابل اندازه گیری در برابر E. coli شده و نمونه ی ۳ را می توان به عنوان فرمولاسیون برتر برای بهینه سازی های بعدی معرفی کرد.

۳-۱- روابط ساختار-ویژگی-عملکرد در پوشش های پلی وینیل الکل - کیتوسان

نخستین گام در تبیین رفتار این سامانه شناسایی پیوندهای شیمیایی و برهم کنش های مولکولی از طریق طیف سنجی مادون قرمز بود. تحلیل طیف ها نشان داد که، در نمونه های کامپوزیت، پیک های مشخصه و جابه جایی های معنادار در نواحی ارتعاشی OH- و C-H گواهی بر تشکیل شبکه ای منسجم از پیوندهای هیدروژنی بین مولکولی بین PVA و کیتوسان است؛ برهم کنش هایی که بستر مولکولی لازم برای سازمان یافتگی ساختاری و عملکردی آتی را فراهم می آورند. با کنار هم قرار دادن نتایج حاصل از آزمون ها می توان روابط متقابل میان ترکیب، ساختار و عملکرد پوشش های مبتنی بر PVA/ Chitosan را در قالب چهارچوبی یکپارچه تفسیر کرد. این هم راستایی میان داده های حاصل از SEM، رفتار رطوبتی (DVS)، آزمون آنتی باکتریال و تحلیل های شیمیایی پیش گفته نشان می دهد که تغییرات مشاهده شده در هر بخش پدیده هایی مستقل و منفک نیستند، بلکه به احتمال زیاد بازتاب سطوح مختلفی از سازمان یافتگی ای مشترک در سامانه ی پلیمری هستند. از منظر ریزساختاری، تصاویر SEM بیانگر آن بودند که ریخت شناسی پوشش ها از ماتریسی نسبتاً پیوسته همراه با درجات مختلفی از تخلخل و ناهمواری سطحی تشکیل شده است. چنین سازمانی می تواند در چند سطح در عملکرد ماده اثرگذار باشد. نخست، پیوستگی فاز پلیمری به حفظ انسجام لایه و پایداری نسبی ساختار کمک می کند؛ دوم، حضور فضاهای خالی، میکرو حفرات و نواحی با سطح ویژه بالاتر مسیرهای در دسترس تری برای نفوذ و برهم کنش مولکول های آب با شبکه فراهم می سازند. در نتیجه، رفتار رطوبتی مشاهده شده در آزمون DVS را می توان، دست کم تا حدی، در امتداد همین ویژگی های ریخت شناسی تفسیر کرد.

در داده های DVS، تفاوت در ظرفیت جذب، نحوه ی افزایش جرم با افزایش رطوبت نسبی و نیز الگوی هیستریزس همگی حاکی از آن هستند که آب در این سامانه ها تنها به صورت سطحی جذب نمی شود، بلکه از طریق ترکیبی از جذب در سایت های قطبی، نفوذ به نواحی آمورف و تشکیل لایه های آب در رطوبت های بالاتر در شبکه توزیع می شود. به ویژه در نمونه هایی که افزایش جذب در رطوبت های میانی تا بالا محسوس تر بود، می توان استنباط کرد که هم تعداد سایت های فعال آب دوست و هم دسترس پذیری ساختاری این سایت ها بیشتر بوده است. در همین خصوص، وجود هیستریزس محدود اما قابل مشاهده نیز نشان می دهد که بخشی از مولکول های آب در طول واجذب با تأخیر بیشتری از ساختار خارج می شوند؛ پدیده ای که معمولاً با بازآرایی موقتی زنجیره ها، نگهداشت مؤئینه در فضاهای ریز یا برهم کنش فیزیکی قوی تر آب با برخی نواحی قطبی مرتبط است. بالین حال، چون چرخه ی جذب/ واجذب همچنان تا حد زیادی برگشت پذیر باقی مانده است، به نظر می رسد که جذب رطوبت در این پوشش ها عمدتاً در حوزه ی برهم کنش های فیزیکی دینامیک رخ می دهد. بنابراین، می توان چنین برداشت کرد که رفتار جذب رطوبت حاصل هم افزایی میان معماری ریزساختار و ماهیت فیزیکی - شیمیایی سامانه است. نتایج سینتیک جذب نیز این تفسیر را تکمیل می کنند. تفاوت در سرعت افزایش جرم و زمان رسیدن به تعادل رطوبتی نشان می دهد که پاسخ این پوشش ها به تغییرات محیطی تنها تابع ظرفیت نهایی جذب نیست، بلکه به نحوه ی سازمان یافتگی ساختار و مقاومت آن در برابر انتقال جرم نیز وابسته است. نمونه هایی که پاسخ اولیه ی سریع تری نشان می دهند، احتمالاً دارای ساختاری با دسترس پذیری بیشتر سایت های جذب یا مسیرهای نفوذ کوتاه تر هستند، در حالی که رسیدن تدریجی تر به تعادل می تواند نشان دهنده ی نفوذ مرحله ای آب به لایه های داخلی تر یا بازآرایی تدریجی زنجیره ها در حضور رطوبت باشد. از این منظر، برازش مناسب مدل GAB نیز اهمیت پیدا می کند؛ زیرا مؤید آن است که جذب رطوبت در این سامانه ها را می توان در قالب حضور سایت های اولیه با انرژی بالاتر و سپس تشکیل لایه های بعدی آب با انرژی کمتر توصیف کرد. این مسئله با ماهیت پلیمری - هیدروفیل سامانه سازگار است؛ زیرا ساختاری که گروه های قطبی فراوان دارد به طور طبیعی بستر مناسبی برای

جذب اولیه و سپس رشد تدریجی لایه های آب فراهم می سازد. از سوی دیگر، عملکرد آنتی باکتریال پوشش ها را نیز می توان در امتداد همین چهارچوب ساختار - ویژگی تبیین کرد. حضور کیتوسان در فرمولاسیون، به ویژه از طریق گروه های آمینی قابل پروتونه شدن، بستر اصلی فعالیت ضد میکروبی را فراهم می آورد. این گروه ها می توانند، از طریق برهم کنش الکترواستاتیکی با اجزای دارای بار منفی در غشای سلولی باکتری ها، تعادل غشایی را مختل کنند و در نهایت موجب مهار رشد شوند. با این حال، شدت این عملکرد صرفاً تابع حضور شیمیایی کیتوسان نیست، بلکه به نحوه توزیع آن در ماتریس، میزان در دسترس بودن گروه های فعال و ویژگی های سطحی پوشش نیز وابسته است. از این منظر، داده های SEM می توانند مکمل تفسیر نتایج آزمون CFU باشند: ریخت شناسی سطح می تواند در تماس مؤثر با محیط اطراف اثر بگذارد و نوع پخش شدگی فازها نیز تعیین می کند که چه مقدار از گروه های فعال کیتوسان برای برهم کنش مستقیم با باکتری ها در دسترس باقی می ماند. بنابراین، تغییرات مشاهده شده در پاسخ آنتی باکتریال را می توان نه پیامدی منفرد، بلکه نتیجه ی تنظیم هم زمان ترکیب، ساختار و دسترس پذیری عملکردی دانست. بر این اساس، به نظر می رسد در این سامانه ها رابطه ای چند مقیاسی میان آرایش ریز ساختاری، پاسخ رطوبتی و عملکرد زیستی برقرار است. در مقیاس ساختاری، پوشش ها به صورت فیلمی پیوسته با درجاتی از تخلخل و ناهمگنی فضایی ظاهر می شوند؛ در مقیاس عملکردی، همین ویژگی ها ظرفیت جذب رطوبت، نحوه انتقال جرم و نوع پاسخ آنتی باکتریال را تحت تأثیر قرار می دهند. در نتیجه، تفسیر داده ها در کنار یکدیگر این امکان را فراهم می سازد که پوشش های مورد مطالعه نه مجموعه ای از خواص جداگانه، بلکه نوعی سامانه ی عملکردی یکپارچه در نظر گرفته شوند که در آن هر ویژگی از برهم کنش میان سطوح مختلف ساختار ناشی می شود.

۴- نتیجه گیری

این پژوهش موفق شد نوعی پوشش معماری زیست پایه ی چند عملکردی را از طریق ادغام هیدروژل PVA/ کیتوسان در ماتریس رنگ پلاستیک پایه آب توسعه دهد و ارزیابی کند. یافته های این مطالعه نشان می دهد که لایه های نازک کاری و

پوشش های داخلی ساختمان می توانند از نقشی صرفاً تزئینی فراتر روند و مانند اجزای فعال و مهندسی شده در تنظیم هیگروترمال و بهبود کیفیت محیط داخلی (IEQ) عمل کنند. تحلیل های ساختاری، با استفاده از طیف سنجی FTIR، تشکیل پیوندهای هیدروژنی بین مولکولی و هم پوشانی مؤثر گروه های عاملی میان زنجیره های PVA و کیتوسان را تأیید کردند؛ این سازمان یافتگی شیمیایی و ایجاد شبکه ی پلیمری پایدار در ماتریس رنگ مانند شالوده ی ساختاری رفتارهای بهبود یافته ی رطوبتی و ضد میکروبی عمل می کند. ارزیابی عملکرد هیگروسکوپیک با آزمون DVS نشان داد که افزودن هیدروژل به ماتریس رنگ ظرفیت جذب رطوبت را به طور چشمگیری افزایش می دهد. در رطوبت نسبی ۹۰ درصد، میزان جذب رطوبت برای نمونه ی کنترل تنها ۴/۵ درصد ثبت شد، در حالی که این مقدار برای نمونه ی ۲ به ۷/۵ درصد و برای نمونه ی ۳ به ۱۹ درصد افزایش یافت. همچنین، حداکثر ظرفیت جذب در شرایط اشباع (رطوبت نسبی نزدیک به ۱۰۰ درصد) برای نمونه ی اصلاح شده به حدود ۲۶ درصد رسید. وجود حلقه ی هیستریزس مشخص در ایزوترم های جذب/ واجذب به ویژه در نمونه ی ۳ نشان دهنده ی نوعی سازوکار بافرینگ رطوبتی پایدار در ریز ساختار پوشش است که می تواند، با جذب بخار آب مازاد در دوره های پیک رطوبت و آزادسازی تدریجی آن در شرایط خشک، نوسانات رطوبت نسبی فضا را تعدیل کند. هم زمان، آزمون کمی CFU نشان داد که نمونه ی کنترل با بار باکتریایی مقدار $1/5 \times 10^6$ CFU/ml فاقد هرگونه خاصیت ضد میکروبی است. در مقابل، پوشش های اصلاح شده فعالیت مهارتی در برابر باکتری گرم منفی *Escherichia coli* نشان دادند. با افزایش سهم کیتوسان، نرخ مهار باکتریایی از ۱۳/۳۳ درصد در نمونه ی ۱ به ۲۰/۰۰ درصد در نمونه ی ۲ رسید و در نهایت در نمونه ی ۳ مقدار ۲۳/۳۳ درصد را ثبت کرد که معادل کاهش جمعیت زنده ی باکتری ها به $8/5 \times 10^5$ CFU/ml است. این مهار زیستی، که به برهم کنش الکترواستاتیک گروه های آمینی پروتونه شده ی کیتوسان با غشای باکتری نسبت داده می شود، اثر بازدارنده ی متوسط و پایداری را برای کاهش بارهای میکروبی سطوح بدون نیاز به مواد شیمیایی فرار ایجاد می کند. در نهایت، از منظر کاربرد در معماری، این پوشش با ظرفیت جذب رطوبت بالا و مهار زیستی هم زمان مانند نوعی راهبرد طراحی غیر فعال عمل می کند.

<https://doi.org/10.30501/jamt.2023.378386.1261> [in Persian]

10. IMARC Group. (2024). *Smart coatings market: Global industry trends, share, size, growth, opportunity and forecast 2024–2032*. <https://www.imarcgroup.com/smart-coatings-market>
11. Janssen, H., Blocken, B., & Carmeliet, J. (2007). Conservative modelling of the moisture and heat transfer in building components under atmospheric excitation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(5–6), 1128–1140. <https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2006.06.048>
12. Kong, M., Chen, X. G., Xing, K., & Park, H. J. (2010). Antimicrobial properties of chitosan and mode of action: A state-of-the-art review. *International Journal of Food Microbiology*, 144(1), 51–63. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2010.09.012>
13. Nasaj, M., Chehelgerdi, M., Asghari, B., Ahmadih-Yazdi, A., Asgari, M., Kabiri-Samani, S., Sharifi, E., & Arabestani, M. (2024). Factors influencing the antimicrobial mechanism of chitosan action and its derivatives: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 134321. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134321>
14. Mendell, M. J., Mirer, A. G., Cheung, K., Tong, M., & Douwes, J. (2011). Respiratory and allergic health effects of dampness, mold, and dampness-related agents: A review of the epidemiologic evidence. *Environmental Health Perspectives*, 119(6), 748–756. <https://doi.org/10.1289/ehp.1002410>
15. Milan, B. D., Mohammadzadeh, H., Jafari, R., & Soltani, M. (2022). Investigation of the coating methods and types of coatings containing hydroxyapatite. *Applied Chemistry Perspectives*, 1(2), 45–58. <https://doi.org/10.30501/acp.2022.365116.1108>
16. Osanyintola, O. F., & Simonson, C. J. (2006). Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact. *Energy and Buildings*, 38(10), 1270–1282. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.026>
17. Peppas, N. A., Hilt, J. Z., Khademhosseini, A., & Langer, R. (2006). Hydrogels in biology and medicine: From molecular principles to bionanotechnology. *Advanced Materials*, 18(11), 1345–1360. <https://doi.org/10.1002/adma.200501612>
18. Qin, M., Belarbi, R., Ait-Mokhtar, A., & Nilsson, L.-O. (2009). Coupled heat and moisture transfer in multi-layer building materials. *Construction and Building Materials*, 23(2), 967–975. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.05.015>
19. Rinaudo, M. (2006). Chitin and chitosan: Properties and applications. *Progress in Polymer Science*, 31(7), 603–632. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.06.001>
20. Rode, C., Peuhkuri, R., Mortensen, L. H., Hansen, K. K., Time, B., Gustavsen, A., ... & Arfvidsson, J. (2005). Moisture buffering of building materials, Report BYG-DTU R-126. *Report of the Nordisk Innovations Center, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark*.
21. Royal Society (2021). *Climate change: Evidence and causes*. <https://royalsociety.org/news-resources/projects/climate-change-evidence-causes/>
22. Sassi, P. (2006). *Strategies for sustainable architecture*. Routledge.
23. Simonson, C. J., Salonvaara, M., & Ojanen, T. (2004). Heat and mass transfer between indoor air and a permeable and hygroscopic building envelope: Part I—Field measurements. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 28(1), 63–101. <https://doi.org/10.1177/1097196304044395>
24. Tripathi, S., Mehrotra, G. K., & Dutta, P. K. (2009). Chitosan based antimicrobial films for food packaging applications. *e-Polymers*, 9(1), 1021–1025. <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/epoly.2008.8.1.1082/html>
25. Vereecken, E., Janssen, H., Roels, S., & Carmeliet, J. (2011). Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation. *Building and Environment*, 46(2), 296–310. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.11.003>
26. Viitanen, H., Toratti, T., Makkonen, L., Peuhkuri, R., Ojanen, T.,

این سیستم هیبرید می‌تواند بار هیگروترمال روی سیستم‌های مکانیکی تهویه مطبوع (HVAC) را کاهش دهد و، با جلوگیری از میعان سطحی، مانع از رشد کپک و تخریب مصالح شود. این فناوری به‌ویژه برای فضاهایی با نوسانات رطوبتی کوتاه‌مدت شدید و همچنین ساختمان‌های واقع در اقلیم‌های مرطوب و نیمه‌مرطوب، که مصالح ساختمانی دائماً تحت تنش‌های هیگروترمال قرار دارند، به‌عنوان راهکاری پایدار، ماده‌محور و اقتصادی توصیه می‌شود.

سپاسگزاری

نگارنده مراتب سپاس و قدردانی خود را از مرکز تحقیقات معماری و شهرسازی، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی تهران تقدیم می‌دارد.

منابع

1. Ahmed, E. M. (2015). Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. *Journal of Advanced Research*, 6(2), 105–121. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.07.006>
2. Arundel, A. V., Sterling, E. M., Biggin, J. H., & Sterling, T. D. (1986). Indirect health effects of relative humidity in indoor environments. *Environmental Health Perspectives*, 65, 351–361. <https://doi.org/10.1289/ehp.8665351>
3. Bakshi, P. S., Selvakumar, D., Kadirvelu, K., & Kumar, N. S. (2020). Chitosan as an environment friendly biomaterial – A review on recent modifications and applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 150, 1072–1083. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.113>
4. Banerjee, D., Guo, X., Benavides, J., Rameau, B., & Cloutier, S. (2020). Designing green self-healing anticorrosion conductive smart coating for metal protection. *Smart Materials and Structures*, 29(10), 105027. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aba849>
5. Eghtedari, M., & Mahravan, A. (2021). Evaluation a hybrid passive cooling system for a building using experimental and commercial software (Design Builder). *Journal of Renewable Energy and Environment*, 8(2), 1–10. <https://doi.org/10.30501/jree.2021.239940.1131>
6. Firoozi, A. A., Firoozi, A. A., Oyejobi, D. O., Avudaiaappan, S., & Flores, E. S. (2024). Emerging trends in sustainable building materials: Technological innovations, enhanced performance, and future directions. *Results in Engineering*, 24, 103521. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103521>
7. Fisk, W. J., Lei-Gomez, Q., & Mendell, M. J. (2007). Meta-analyses of the associations of respiratory health effects with dampness and mold in homes. *Indoor Air*, 17(4), 284–296. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2007.00475.x>
8. Garcia-Garcia, A., Muñana-González, S., Lanceros-Mendez, S., Ruiz-Rubio, L., Perez Alvarez, L., & Vilas-Vilela, J. L. (2024). Biodegradable natural hydrogels for tissue engineering, controlled release, and soil remediation. *Polymers*, 16(18), 2599. <https://doi.org/10.3390/polym16182599>
9. Hedayati Tabari, F., Hamidinezhad, H., Karimian, M., & Nazifi, E. (2022). Synthesis and characterization of chitosan/poly(vinyl alcohol) polymer nanofibers containing chicory extract by electrosun method and evaluation of its antibacterial properties. *Journal of Advanced Materials and Technologies*, 11(4), 31–44.

- Ruokolainen, L., & Räsänen, J. (2010). Towards modelling of decay risk of wooden materials. *European Journal of Wood and Wood Products*, 68, 303–313. <https://doi.org/10.1007/s00107-010-0450-x>
27. Wang, Z., Mahmood, N., Budhathoki-Uprety, J., Brown, A. C., King, M. W., & Gluck, J. M. (2024). Preparation and Characterization of Hydrogels Fabricated from Chitosan and Poly(vinyl alcohol) for Tissue Engineering Applications. *ACS Applied Bio Materials*, 7(8), 3763–3776. <https://doi.org/10.1021/acsabm.4c00642>
 28. Wolkoff, P. (2018). Indoor air humidity, air quality, and health – An overview. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 221(3), 376–390. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2018.01.015>
 29. World Economic Forum (2025). *3 key insights on the digital transformation of construction*. <https://www.weforum.org/stories/2025/07/construction-sector-digital-transformation/>
 30. Yu, Y., & Abola, M. (2023). Ecological architecture – A perfect interpretation of the harmonious coexistence of architecture and nature. In *2023 2nd International Conference on Urban Planning and Regional Economy (UPRE 2023)* (pp. 302-306). Atlantis Press. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-218-7_34
 31. Yusmaniar, Y., Julio, E., Rahman, A., Yudianto, S. D., & Susetyo, F. B. (2023). Synthesis of polyvinyl alcohol-chitosan composite film using nanocellulose from coconut fibers (*Cocos nucifera*). *International Journal of Engineering*, 36(11B), 1612–1619. <https://doi.org/10.5829/ije.2023.36.11b.05>