



Passive Design Strategies for Pollutant Capture in Sustainable Educational Spaces to Improve Air Quality and Reduce Pollutants

Mahdi Soleimanian¹ Samaneh Taghdir^{*2} Ali Maleki³

Received 12/Mar/2025

Revised 07/Jun/2025

Accepted: 31/Aug/2025

(PP.: 71-100)

Abstract

Introduction: Indoor air quality in educational spaces plays a critical role in the physical health, mental concentration, and learning efficiency of students and staff. Both indoor and outdoor pollutants not only increase the risk of respiratory diseases but also impair cognitive performance and reduce educational productivity. Since pollutant sources in such spaces are diverse and multidimensional, relying on a single technology is insufficient for effective air quality improvement.

Methods: This study systematically reviewed scientific literature and international experiences to evaluate innovative technologies for pollutant capture and purification in schools and educational facilities. Two main approaches were examined: (1) the application of surface adsorbents and photocatalytic coatings on building façades to reduce outdoor pollutants such as PM_{2.5}, PM₁₀, and VOCs; and (2) the use of nanoscale materials and coatings indoors to control pollutants such as CO₂ and formaldehyde.

Results and Discussion: Findings indicated that photocatalytic technologies based on TiO₂ and ZnO, under well-lit conditions, are cost-effective starting points offering advantages such as self-cleaning and antibacterial properties. Photocatalytic ceramic filters (CCFs), which combine physical adsorption with photo-oxidation, provide balanced performance and maintain partial efficiency under low-light conditions. In contrast, MOFs and DACC, although capable of selective adsorption (e.g., CO₂ and SO₂), are less suitable for widespread use in schools due to cost and stability concerns, and are more relevant for specific or pilot applications.

Conclusion: The optimal strategy is a phased and integrated approach: starting with low-cost indoor coatings, followed by complementary façade technologies (including CCFs), and ultimately integration into double-skin façade systems where economically justified. This pathway balances technical performance, cost, and climatic adaptability, thereby enhancing health and educational productivity in the long term.

Keywords: Sustainable Architecture, Air Quality in Educational Spaces, Absorbent Coatings, Nano-materials.

¹M.A., Department of Architecture, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

²Assistant Prof., Department of Architecture, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. (Corresponding author). S_taghdir@iust.ac.ir

³Prof., Department of Organic Chemistry, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

استراتژی‌های طراحی غیر فعال جذب در فضاهای آموزشی پایدار برای کاهش آلاینده‌ها و ارتقای کیفیت هوا

مهدی سلیمانی¹، سمانه تقدیر^{2*} و علی ملکی³

تاریخ دریافت: 1403/12/22

تاریخ بازنگری: 1404/03/17

تاریخ پذیرش: 1404/06/09

(صفحات 71-100)

چکیده

مقدمه: کیفیت هوای فضاهای آموزشی نقشی اساسی در سلامت جسمی، تمرکز ذهنی و بازده یادگیری دانش‌آموزان و کادر آموزشی دارد. آلودگی‌های داخلی و خارجی نه تنها احتمال بروز بیماری‌های تنفسی را افزایش می‌دهند، بلکه سبب افت کارایی شناختی و کاهش یادگیری نیز می‌شوند. از آنجا که منابع آلاینده در این فضاها متنوع و چندبعدی‌اند، اتکا به یک فناوری منفرد برای بهبود کیفیت هوا کافی نیست. **روش تحقیق:** این مطالعه با مرور نظام‌مند منابع علمی و تجربیات بین‌المللی، فناوری‌های نوین جذب و تصفیه آلاینده‌ها در مدارس و فضاهای آموزشی را ارزیابی کرد. دو رویکرد اصلی بررسی شد: (1) استفاده از جاذب‌های سطحی و پوشش‌های فتوکاتالیتیک در نمای ساختمان برای کاهش آلاینده‌های بیرونی مانند $PM_{2.5}$ ، PM_{10} و NO_x ؛ و (2) به‌کارگیری مصالح و پوشش‌های نانومقیاس در فضاهای داخلی به منظور کنترل آلاینده‌هایی نظیر CO_2 ، VOC و فرمالدئید.

نتایج و بحث: تحلیل‌ها نشان داد فناوری‌های فتوکاتالیتی مبتنی بر TiO_2 و ZnO در شرایط پرنور، با هزینه پایین و مزایایی مانند خودتمیزشوندگی و اثرات ضدباکتری، کارآمدترین نقطه شروع‌اند. فیلترهای سرامیکی فتوکاتالیتی (CCF) با ترکیب جذب فیزیکی و اکسیداسیون نوری، عملکردی متوازن و بخشی از کارایی را در نور کم حفظ می‌کنند. در مقابل، MOFs و DACC اگرچه جذب انتخابی (مثلاً CO_2 و SO_2) فراهم می‌کنند، اما به دلیل هزینه و پایداری، برای به‌کارگیری وسیع در مدارس مناسب نیستند و بیشتر در کاربردهای خاص/پایلوت موضوعیت دارند.

نتیجه‌گیری: راهبرد بهینه، رویکرد مرحله‌ای و ترکیبی است: آغاز با پوشش‌های داخلی کم‌هزینه، سپس تکمیل با فناوری‌های مکمل نما (از جمله CCF) و در گام نهایی، ادغام در سامانه‌های نماهای دوپوسته در صورت توجیه‌پذیری اقتصادی. این مسیر توازن کارایی فنی، هزینه و سازگاری اقلیمی را برقرار می‌کند و سلامت و بهره‌وری آموزشی را در بلندمدت ارتقا می‌دهد.

واژگان کلیدی: معماری پایدار - کیفیت هوای فضاهای آموزشی - پوشش‌های جاذب - مصالح نانو مواد.

¹ کارشناسی ارشد، گروه معماری، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

² استادیار، گروه معماری، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. (نویسنده مسئول) S_taghdir@iust.ac.ir

³ استاد، گروه شیمی آلی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

1- مقدمه

آلودگی هوا یکی از مشکلات جهانی است که سالانه مسئول بیش از 7 میلیون مرگ است و به کاهش امید به زندگی در میان جمعیت‌های مختلف کمک می‌کند (WHO, 2021). با توجه به اینکه افراد بیش از 90 درصد از زمان خود را در محیط‌های داخلی می‌گذرانند، تأثیرات آلودگی هوای داخلی حتی از آلودگی هوای بیرون بیشتر به نظر می‌رسد (Oliveira et al., 2019). کیفیت هوای داخلی (IAQ) به یکی از مسائل مورد توجه جامعه و سیاست‌گذاران تبدیل شده است. در فضاهای آموزشی، به ویژه در کلاس‌های درس، چگالی اشغال بالا نسبت به فضاهای اداری، منجر به افزایش گرما و آلودگی‌های ناشی از حضور دانش‌آموزان می‌شود (Chatzidiakou et al., 2012). کلاس‌های درس معمولاً چهار برابر بیشتر از فضاهای اداری معمولی پر از افراد است و این موضوع باعث افزایش آلودگی‌هایی مانند بوی بدن و دیگر آلاینده‌های داخلی می‌شود (Chatzidiakou et al., 2015). کودکان به دلیل در حال رشد بودن اعضای بدنشان به طور ویژه در برابر آلاینده‌های هوای داخلی آسیب پذیرتر هستند (Dambruoso et al., 2013) و آنها به طور متوسط حدود 6 تا 7 ساعت در روز را در مدارس و حدود 700 ساعت در سال در کلاس‌ها سپری می‌کنند. آلودگی هوای داخلی در کلاس‌های درس می‌تواند منجر به مشکلات بهداشتی مختلفی شود که تأثیرات آن برای کودکان زیر 12 سال که سیستم تنفسی و ایمنی آنها هنوز تکامل نیافته، به مراتب بیشتر است (Zhang et al., 2006). پاندمی جهانی اخیر ناشی از ویروس SARS-CoV-2 نیز اهمیت این موضوع را دوچندان کرده است. آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده به این نکته اشاره کرده است که کیفیت هوای داخلی ضعیف می‌تواند باعث کاهش توانایی افراد در انجام کارهایی مانند تمرکز، محاسبه و به یاد آوردن اطلاعات شود (EPA, August 2003). افزایش سطح دی‌اکسید کربن (CO_2) در فضاهای بسته، موجب کاهش تمرکز و توانایی شناختی افراد می‌شود (Satish et al., 2012). همین‌طور، تحقیقات نشان می‌دهند که افزایش سطوح

ترکیبات آلی فرار (VOCs) و ذرات ریز معلق مانند PM_{10} و $PM_{2.5}$ می‌تواند منجر به کاهش عملکرد تحصیلی، افزایش استرس و غیبت بیشتر در مدرسه شود (Sadrizadeh et al., 2022). در بیشتر مطالعات، دی‌اکسید کربن به عنوان یکی از اصلی‌ترین آلاینده‌ها در فضاهای آموزشی شناخته شده است، به‌ویژه که تعداد افراد حاضر در فضای کلاس درس عامل تعیین‌کننده‌ای در سطح CO_2 داخلی است (Cabovská et al., 2022). از دیگر عوامل مؤثر بر آلاینده‌های داخلی می‌توان به نوع تهویه، حجم کلاس درس، نگهداری ساختمان و فعالیت‌های بدنی در طول روز اشاره کرد (Lazović et al., 2016). ترکیبات آلی فرار (VOCs) از دیگر آلاینده‌های اصلی در کلاس‌های درس هستند که منابع آنها می‌تواند شامل محصولات شیمیایی نظافتی و مواد استفاده‌شده در صنایع دستی و فعالیت‌های دانش‌آموزی مانند رنگ‌ها و چسب‌ها باشد. علاوه بر این، وجود آلاینده‌های بیرونی مانند بنزن، تولوئن و استایرن نیز می‌تواند بر کیفیت هوای داخلی تأثیر بگذارد (Ukēhaxhaj et al., 2023). یکی از آلاینده‌های خاص، فرمالدئید است که به دلیل سمیت بالای خود و حضور مکرر در فضاهای داخلی نگرانی‌های زیادی را به وجود آورده است (Jiang et al., 2018). این آلاینده معمولاً از منابعی مانند مبلمان چوبی، مواد نساجی، دستگاه‌های الکترونیکی و رطوبت یا قارچ‌ها منتشر می‌شود (Martins et al., 2025). آلودگی‌های خارجی مانند ذرات PM_{10} و $PM_{2.5}$ نیز می‌توانند از مناطق پر تردد به داخل مدارس منتقل شوند و تأثیر زیادی بر کیفیت هوای داخلی داشته باشند (Pallarés et al., 2021). عوامل داخلی مانند حضور دانش‌آموزان و فعالیت‌های روزانه آنان نیز به انتشار این آلاینده‌ها کمک می‌کند (Cabovská et al., 2022). هدف اصلی این مقاله بررسی و تحلیل راه‌حل‌های مختلف برای بهبود کیفیت هوای داخلی در کلاس‌های درس است. این مطالعه به شناسایی و بررسی تأثیر آلاینده‌ها بر سلامت دانش‌آموزان و معلمان پرداخته و کارایی فناوری‌ها و روش‌های مدرن در بهبود کیفیت هوا را ارزیابی می‌کند. علاوه بر این، مقاله به ارائه توصیه‌هایی برای کاربرد



عملی این راه حل ها در محیط های آموزشی پرداخته است. هدف نهایی این تحقیق کمک به بهبود محیط یادگیری، افزایش کارایی دانش آموزان و ارتقای استانداردهای بهداشتی در مدارس است.

1-1- مروری بر پیشینه پژوهشی

کیفیت هوای فضاها داخلی، به ویژه در محیط های آموزشی، یکی از چالش های مهم در حوزه بهداشت عمومی و طراحی معماری است. آلودگی هوای داخلی می تواند تأثیرات منفی بر سلامت و عملکرد دانش آموزان و استادان بگذارد. در این راستا، استفاده از استراتژی های غیرفعال جذب آلاینده ها، از جمله طراحی مناسب نما ها، گیاهان داخلی و مصالح خاص، به عنوان راهکارهایی برای بهبود کیفیت هوای داخلی فضاها آموزشی مطرح شده است. در این بخش، تحقیقات پیشین در این زمینه مرور و روش ها و چالش های مختلف بررسی خواهند شد. مهم ترین مقالات در این زمینه عبارتند از:

Kabirikopaei و همکاران (2021) در مقاله ای به نام "شناسایی عوامل کیفیت هوای داخل کلاس که بر عملکرد تحصیلی دانش آموزان تأثیر می گذارد" به پاسخ به این سؤال می پردازد که چه ارتباطی بین عملکرد تحصیلی دانش آموزان و کیفیت هوای کلاس درس است و روش وی برای این تحقیق اندازه گیری عوامل مختلف IAQ در 220 کلاس و در 2 سال متوالی و به صورت فصلی که نتایج این مقاله نشان می دهد که انواع سیستم های مکانیکی و نرخ های مناسب تهویه نقش مهمی در کیفیت هوای داخلی کلاس ها ایفا می کنند و این عوامل ارتباطات معنی داری با نتایج یادگیری دانش آموزان دارند. نرخ های تهویه مناسب و فیلترهای کارآمد به ترکیب های آلاینده در کلاس ها کمک می کنند و عملکرد دانش آموزان را بهبود می بخشد (Kabirikopaei et al., 2021).

Cabovská و همکاران (2022) در مقاله ای به نام "استراتژی های تهویه و کیفیت هوای داخلی در کلاس های ابتدایی مدارس سوئدی" به پاسخ به این سؤال می پردازد که چه رویکردها و استراتژی هایی برای تهویه مدارس وجود دارد. روش وی برای این پژوهش اندازه گیری های

محیط حرارتی و IAQ در طی 5 روز مدرسه در 45 کلاس ابتدایی در شهر گوتنبورگ، سوئد، انجام شد که نتایج این مقاله نشان می دهد اکثر کلاس ها دارای غلظت های مناسب از اوزون، فرمالدئید و TVOC بودند، اما غلظت PM_{10} و $PM_{2.5}$ در بخش هایی از کلاس ها از حدود توصیه شده توسط WHO فراتر بود. کلاس های با تهویه طبیعی و مکانیکی متعادل با گرمایش و تصفیه ذرات، عملکرد بهتری در IAQ نسبت به تهویه طبیعی نشان دادند (Cabovská et al., 2022).

Parasuraman و همکاران (2024) در مقاله ای به نام "رنگ خودتمیزکن فتوکاتالیتیک و دوستدار محیط زیست: یک رویکرد منحصر به فرد برای حذف مؤثر آلاینده های هوای داخلی و ضد عفونی سطوح" به پاسخ به این سؤال چگونه نانوذرات USPNT در حذف آلاینده های هوایی و ضد عفونی سطوح می پردازند؟ روش وی برای این تحقیق آزمایش های فتوکاتالیتیکی شبیه سازی شده با محیط داخلی است که نتایج این مقاله نشان می دهد که سنتز نانوذرات USPNT با داشتن سطح بالا و عملکرد فتوکاتالیتیکی بسیار بهتر از نانوذرات P_{25} است. همچنین، استفاده مؤثر از این فتوکاتالیزور برای حذف آلاینده های هوایی شهری و حتی ضد عفونی باکتری E. coli نشان داده شده است. علاوه بر این، بررسی های جامعی انجام شده درباره تأثیرات مختلف نور و عوامل هدایت سطحی بر عملکرد فتوکاتالیزور USPNT ارائه شده است (Parasuraman et al., 2024).

Zouari و همکاران (2024) در مقاله ای با عنوان "پوشش های مبتنی بر بیوکربن عملکردی برای محافظت از چوب و تصفیه هوای داخلی" به این سؤال پاسخ داده اند که چگونه پوشش های بیوکربنی دُوپ شده با اکسید منگنز می توانند در بهبود کیفیت هوای داخلی و محافظت از چوب مؤثر باشند. آنها پوشش های فتوکاتالیتیکی $BC-MnO_2$ (20 درصد وزنی) را روی روغن کتان و اکریلیک آبی آزمایش کردند. نتایج نشان داد که افزودن $BC-MnO_2$ هیدرو فوبیسیته پوشش ها را بهبود می دهد و پیری شتاب زده آن را بیشتر می کند. پوشش های حاوی $BC-MnO_2$ حفظ رنگ بهتری داشتند و تغییرات رنگ در آنها کمتر بود. در آزمایش های تصفیه

در مصرف انرژی در سردترین روز سال و 11.66٪ در گرم‌ترین روز سال شد و راحتی حرارتی ماهانه مدرسه را افزایش داد (Soleimani et al. 2024).

Elatar و همکاران (2025) در مطالعه‌ای با عنوان «روش‌شناسی استفاده از فتوکاتالیز برای بهبود کیفیت هوای داخل فضاهای آموزشی دانشگاه‌ها» به این پرسش پاسخ دادند که چگونه استفاده از فناوری فتوکاتالیستی می‌تواند کیفیت هوای محیط‌های داخلی آموزشی را بهبود بخشد. در این پژوهش، میزان اثربخشی مصالح فتوکاتالیستی در کاهش آلاینده‌های محیطی نظیر PM_{2.5}، PM₁₀، دی‌اکسید کربن (CO₂) و نیتروژن دی‌اکسید (NO₂) در فضاهای دانشگاهی بررسی شد. نتایج نشان داد که با استفاده از پوشش‌های فتوکاتالیستی، غلظت PM_{2.5} و PM₁₀ به ترتیب 61٪ و 65٪ کاهش یافت. همچنین میزان NO₂ به میزان 46٪ و CO₂ نیز 17٪ کاهش پیدا کرد. افزون بر این، پوشش‌های مورد استفاده توانستند سطح فرمالدئید را به میزان 32٪ در حضور پوشش‌های چوبی و 29٪ در پوشش‌های پلاستیکی کاهش دهند. این مطالعه تأکید می‌کند که فناوری فتوکاتالیستی به‌عنوان یک راهکار مؤثر می‌تواند به بهبود چشم‌گیر کیفیت هوای داخلی در محیط‌های آموزشی کمک نماید (Elatar et al., 2025).

Nieto Marquez و همکاران (2023) در پژوهشی با عنوان «بهبود کیفیت هوای داخلی با استفاده از رنگ‌های فتوکاتالیستی: مطالعه‌ای در مقیاس واقعی در دانشگاه فنی مادرید» به بررسی کارایی رنگ‌های فتوکاتالیستی بر پایه TiO₂ در کاهش آلاینده NO₂ در فضاهای داخلی پرداخته‌اند. در این مطالعه، رنگ فتوکاتالیستی ProCleanAir روی دیوارهای یک اتاق آموزشی اعمال شد و سپس غلظت NO₂ با نمونه‌گیرهای غیرفعال پالمرز اندازه‌گیری گردید. نتایج حاکی از کاهش 9.4 تا 37.5 درصدی NO₂ بود و آزمون آماری t استیودنت نیز معناداری این تغییرات را تأیید نمود. پژوهش همچنین نشان داد که اثر کاهندگی آلاینده‌ها تا یک سال پایدار بوده، هرچند تابع شرایط فصلی و آب‌وهوایی بود. این مطالعه تأکید دارد که استفاده از

آلودگی، پوشش‌های اکریلیک BC-MnO₂ تا 46٪ و پوشش‌های روغنی تا 24٪ فرمالدئید را حذف کردند. این تحقیق نشان می‌دهد که پوشش‌های مبتنی بر BC-MnO₂ می‌توانند هم در حفاظت از چوب و هم در بهبود کیفیت هوای داخلی مؤثر باشند (Zouari et al., 2024). Shen و همکاران (2024) در مقاله‌ای با عنوان «توسعه پوشش کربناتاسیون فتوکاتالیستی برای بتن: بهبود کیفیت هوا و ذخیره‌سازی CO₂» به این سؤال پاسخ داده‌اند که چگونه پوشش‌های کربناتاسیون فتوکاتالیستی می‌توانند کیفیت هوا را بهبود بخشیده و CO₂ را ذخیره کنند. در این تحقیق، پوشش‌های ترکیبی از سیلیکات دوکلسیم (C₂S) و نانو TiO₂ برای بهبود عملکرد فتوکاتالیستی و دوام بتن توسعه یافتند. نتایج نشان داد که با افزایش TiO₂ از 1٪ به 8٪، کارایی فتوکاتالیستی از 2518 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}$ به 4392 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}$ افزایش یافت. همچنین، این پوشش‌ها توانستند تا 15.18٪ CO₂ جذب کنند و استحکام پیوستگی پوشش تا 4.69 MPa افزایش یافت. این مطالعه نشان می‌دهد که پوشش‌های فتوکاتالیستی می‌توانند هم به بهبود کیفیت هوا و هم به افزایش دوام بتن کمک کنند (Shen et al., 2024).

Soleimani و همکاران (2024) در مقاله‌ای تحت عنوان «نانو فناوری برای راحتی حرارتی و بهره‌وری انرژی در ساختمان‌های آموزشی با رویکرد شبیه‌سازی و اندازه‌گیری در اقلیم BSh». به این سؤال پاسخ داده‌اند که چگونه استفاده از نانو فناوری می‌تواند در بهبود راحتی حرارتی و کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های آموزشی مؤثر باشد. در این تحقیق، راحتی حرارتی و مصرف انرژی در یک مدرسه ابتدایی 12 کلاسه در شیراز ارزیابی شده است. در این مطالعه، نانو مواد تغییر فاز (nano-PCMs) و Aeropan در پنجره‌ها و دیوارهای مدرسه برای بهبود ویژگی‌های حرارتی و کاهش مصرف انرژی استفاده شده است. نتایج نشان داد که آرایش U شکل، به دلیل جذب بیشتر نور خورشید و خاصیت فتوکاتالیستی نانو ذرات، بیشترین کاهش مصرف انرژی (میانگین ماهانه 11.80٪) را نسبت به آرایش‌های LS و ILS به همراه داشت. این آرایش موجب کاهش 12.03٪

رنگ‌های فتوکاتالیستی می‌تواند به عنوان بخشی از استراتژی چندگانه برای کاهش آلودگی هوای داخلی مؤثر باشد (Nieto Marquez et al., 2023).

جدول 1- مرور پژوهش‌ها در زمینه راهکارهای بهبود کیفیت هوای داخلی در فضاهای آموزشی

Tab. 1 - Review of Research on Indoor Air Quality Improvement Strategies in Educational Spaces

ردیف	نویسنده / سال	عنوان مقاله	سؤال پژوهش	روش تحقیق	نتایج کلیدی
1	Kabirikopaei et al (2021)	شناسایی عوامل کیفیت هوای داخل کلاس	چه عواملی از IAQ بر عملکرد تحصیلی دانش‌آموزان مؤثر است؟	اندازه‌گیری فصلی پارامترهای IAQ در ۲۲۰ کلاس طی دو سال متوالی	ارتباط معناداری بین نرخ تهویه، نوع سیستم تهویه و بهبود نمرات دانش‌آموزان مشاهده شد. تهویه مناسب منجر به کاهش CO ₂ و افزایش تمرکز شد.
2	Cabovská et al (2022)	استراتژی‌های تهویه و IAQ در مدارس سوئدی	کدام نوع تهویه برای کلاس‌های ابتدایی مؤثرتر است؟	پایش IAQ و شرایط حرارتی در ۴۵ کلاس در طول ۵ روز مدرسه	کلاس‌هایی با تهویه مکانیکی متعادل، سطح پایین‌تری از NO ₂ ، PM _{2.5} و PM ₁₀ نسبت به کلاس‌های با تهویه طبیعی نشان دادند. (ضعف تهویه طبیعی)
3	Parasuraman et al (2024)	رنگ عملکرد رنگ‌های خودتمیزکن فتوکاتالیتیکی USPNT	عملکرد رنگ‌های نانویی در حذف آلاینده‌های داخلی و ضدعفونی چیست؟	تست آزمایشگاهی عملکرد فتوکاتالیستی و ضدباکتری با نور داخلی	رنگ USPNT با سطح بالا و عملکرد فتوکاتالیستی قوی توانست VOC ها را به‌طور مؤثری حذف کند و باکتری E. coli را غیر فعال نماید.
4	Zouari et al (2024)	پوشش‌های بیوکربنی برای چوب	پوشش‌های حاوی BC-MnO ₂ تا چه حد در حفاظت چوب و تصفیه هوا مؤثرند؟	اعمال پوشش‌های فتوکاتالیستی بر پایه بیوکربن روی چوب و آزمون حذف آلاینده	پوشش‌های اکریلیک حاوی BC-MnO ₂ موفق به حذف تا ۴۶٪ فرمالدئید شدند.
5	Shen et al. (2024)	پوشش کربناتاسیون TiO ₂ برای بتن	چگونه پوشش‌های TiO ₂ +C ₂ S می‌توانند کیفیت هوا و خواص بتن را بهبود دهند؟	تست عملکرد پوشش روی بتن با درصدهای مختلف TiO ₂	افزایش TiO ₂ موجب ارتقاء عملکرد فتوکاتالیستی بتن شد. جذب CO ₂ تا ۱۵.۱۸٪ و استحکام پیوستگی پوشش تا ۴.۶۹ MPa افزایش یافت.
6	Soleimani et al. (2024)	نانو فناوری و بهره‌وری انرژی در مدارس اقلیم گرم	نانومواد چه تأثیری بر آسایش حرارتی و مصرف انرژی دارند؟	شبیه‌سازی و اندازه‌گیری انرژی در مدرسه‌ای در شیراز	نانومواد (nano-PCMs) و عایق‌های Aeropan در دیوارها و پنجره‌ها، همراه با طراحی صحیح جهت‌گیری ساختمان برای حداکثر بهره‌گیری از نور خورشید، موجب افزایش کارایی فتوکاتالیستی نانوذرات و بهبود عملکرد حرارتی ساختمان شده است.
7	Elatar et al (2025)	کاربرد فوتوکاتالیز در فضاهای دانشگاهی	پوشش‌های فتوکاتالیستی تا چه حد می‌توانند آلاینده‌ها را کاهش دهند؟	بررسی میدانی در فضاهای آموزشی با تحلیل آماری آلاینده‌ها	کاهش چشمگیر PM _{2.5} (۶۱٪)، NO ₂ (۴۶٪) و CO ₂ (۶۵٪) مشاهده شد. همچنین فرمالدئید (۱۷٪) در دیوارهای چوبی تا ۳۲٪ کاهش یافت.
8	Nieto Marquez et al (2023)	رنگ فتوکاتالیستی در دانشگاه مادرید	آیا رنگ‌های TiO ₂ می‌توانند NO ₂ داخلی را کاهش دهند؟	سنجش غلظت NO ₂ پس از اعمال رنگ ProCleanAir®	کاهش NO ₂ بین ۹.۴٪ تا ۳۷.۵٪ بسته به شرایط فصلی مشاهده شد. اثرگذاری رنگ تا یک سال پس از اعمال حفظ شد.

در فضاهای مسکونی، کاری و آموزشی می‌شوند. در این راستا، شناسایی و بررسی انواع آلاینده‌های داخلی و اثرات آن‌ها بر سلامت افراد، به‌ویژه در محیط‌های آموزشی، به عنوان یک موضوع حیاتی مطرح است (Martins et al., 2025).

2-2-1- منابع و عوامل مؤثر بر آلاینده‌های هوای داخلی در مدارس

در مطالعات علمی مختلف، شواهد متعددی مبنی بر تأثیر منابع و عوامل مختلف بر حضور آلاینده‌های مختلف در هوای داخلی مدارس وجود دارد. این آلاینده‌ها می‌توانند تأثیرات منفی قابل توجهی بر سلامت جسمی و روانی دانش‌آموزان، معلمان و سایر کارکنان مدارس داشته باشند. بنابراین، درک منابع و عواملی که می‌توانند موجب افزایش سطوح آلاینده‌ها در فضاهای داخلی مدارس شوند، امری ضروری است. در ادامه به تفصیل به بررسی برخی از این آلاینده‌ها و عوامل مؤثر بر حضور آن‌ها در فضاهای داخلی مدارس پرداخته خواهد شد.

1-2-2-1- دی‌اکسید کربن (CO_2):

دی‌اکسید کربن یکی از آلاینده‌های رایج در فضاهای داخلی مدارس است. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که میزان CO_2 در فضاهای آموزشی به شدت به اشغال فضا و تعداد افرادی که در آن فضا حضور دارند، بستگی دارد. به عبارت دیگر، هرچه تعداد افراد در یک کلاس یا فضای بسته بیشتر باشد، احتمال افزایش غلظت CO_2 نیز بیشتر خواهد بود (Sá et al., 2017). علاوه بر این، ویژگی‌های فنی و عملکردی سیستم‌های تهویه، همچنین حجم فضای کلاس درس، از دیگر عواملی هستند که بر سطح CO_2 تأثیر گذار است (Jovanović et al., 2014). در حقیقت، تهویه ناکافی و یا عدم وجود سیستم‌های تهویه مناسب می‌تواند منجر به انباشت دی‌اکسید کربن و افت کیفیت هوای داخل مدارس شود.

1-2-2-2- ترکیبات آلی فرار (VOCs):

ترکیبات آلی فرار یکی دیگر از آلاینده‌های رایج در فضای مدارس هستند که معمولاً به طور مستقیم از مواد مختلف موجود در فضاهای داخلی مدارس وارد هوا

با توجه به اینکه سیستم‌های تهویه طبیعی در مدارس با محدودیت‌هایی از جمله وابستگی به شرایط اقلیمی، اثربخشی محدود در حذف آلاینده‌های گازی و ذرات معلق، و عملکرد نا پایدار در مناطق شهری آلوده مواجه‌اند، و در مقابل، سیستم‌های تهویه مکانیکی نیز با هزینه‌های بالای نصب، مصرف انرژی، و نیاز به نگهداری و تعویض فیلتر همراهند، نیاز به راهکارهای جایگزین غیر فعال بیش از پیش احساس می‌شود. در این مقاله، مجموعه‌ای از راهبردهای غیرفعال برای بهبود کیفیت هوای داخلی در فضاهای آموزشی شناسایی و تحلیل شده‌اند. این راهبردها شامل استفاده از مصالح جاذب و پوشش‌های فتوکاتالیستی هستند که بدون نیاز به سیستم‌های فعال و انرژی‌بر، قابلیت حذف مؤثر آلاینده‌ها و ارتقاء کیفیت هوا را دارند. نوآوری اصلی این پژوهش در ارائه یک چارچوب دسته‌بندی‌شده، بومی شده و قابل پیاده‌سازی در مدارس ایران است، که با در نظر گرفتن محدودیت‌های مالی، اقلیمی و اجرایی، به معماران امکان می‌دهد مناسب‌ترین استراتژی‌های غیرفعال را برای طراحی فضاهای آموزشی سالم، پایدار و مقرون‌به‌صرفه انتخاب کنند.

1-2- چارچوب نظری

1-2-1- آلاینده‌های هوای داخلی

آلودگی هوای داخلی به یکی از نگرانی‌های مهم بهداشتی تبدیل شده است که تأثیرات گسترده‌ای بر سلامت انسان دارد. مواجهه مداوم با آلاینده‌های مختلفی همچون ترکیبات آلی فرار (VOCs)، اوزون، ذرات معلق، مونوکسید کربن و دیگر مواد سمی، خطر ابتلا به بیماری‌های تنفسی، قلبی-عروقی و سرطان را به طور چشم‌گیری افزایش می‌دهد. این آلاینده‌ها علاوه بر علائم اولیه‌ای چون سردرد، خشکی گلو، تحریک چشم‌ها و آبریزش بینی، می‌توانند به مشکلات جدی‌تری همچون حملات آسم، بیماری‌های مزمن ریوی و حتی سرطان منجر شوند (WHO, 2021). بررسی‌ها نشان داده‌اند که این مواد آلاینده نه تنها بر سلامت افراد تأثیر منفی دارند، بلکه باعث کاهش کیفیت زندگی و بهره‌وری در محیط‌های داخلی، به‌ویژه

می‌شوند. این ترکیبات معمولاً از مواد تمیزکننده‌ای که در طول روز استفاده می‌شوند و یا از مواد مورد استفاده در فعالیت‌های هنری و صنایع دستی مانند چسب‌ها و رنگ‌ها وارد فضا می‌شوند (Mečiarová et al., 2018). علاوه بر این، مبلمان، کفپوش‌ها و مصالح استفاده‌شده در ساختمان‌ها نیز می‌توانند منابعی از VOCها باشند (Madureira et al., 2016). برای کاهش این آلاینده‌ها، توصیه می‌شود که مدارس سیستم‌های تهویه مکانیکی کارآمد را نصب کرده و به نگهداری صحیح از آن‌ها توجه ویژه‌ای داشته باشند (Madureira et al., 2016). این اقدامات می‌تواند به کاهش میزان VOCها در فضاهای داخلی مدارس کمک کند و بهبود کیفیت هوای داخل کلاس‌ها را به دنبال داشته باشد.

3-2-2-1- فرمالدئید:

فرمالدئید یکی از ترکیبات آلی فرار خاص است که به دلیل ویژگی‌های سمی آن، نگرانی‌های زیادی ایجاد کرده است. این آلاینده به‌طور عمده از منابعی مانند مبلمان چوبی، منسوجات، پرده‌ها و تجهیزات الکترونیکی وارد فضاهای داخلی مدارس می‌شود. همچنین، برخی شرایط تهویه‌ای مانند کمبود تهویه مناسب و ویژگی‌های ساختمان می‌توانند موجب افزایش غلظت فرمالدئید در فضاهای داخلی شوند (Brdarić et al., 2019). بنابراین، کنترل شرایط تهویه، به‌ویژه در فضاهای کلاس‌های درس و اتاق‌های پرجمعیت، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

3-2-2-1- دی‌اکسید نیتروژن (NO₂):

دی‌اکسید نیتروژن یکی از آلاینده‌های اصلی هوای شهری است که می‌تواند از طریق منابع داخلی و خارجی به فضاهای داخلی مدارس منتقل شود. در حالی که برخی منابع داخلی مانند سیستم‌های گرمایشی با احتراق شناخته شده‌اند، بیشترین منابع NO₂ در مدارس از محیط بیرون ناشی می‌شوند. به‌ویژه، ترافیک شهری و آلودگی هوای ناشی از وسایل نقلیه می‌تواند موجب ورود NO₂ به فضاهای داخلی مدارس شود (Szabados et al., 2021; Ukėhaxhaj et al., 2023). همچنین، نوع تهویه و ویژگی‌های ساختاری مدارس نیز می‌تواند تأثیر زیادی بر

غلظت NO₂ در داخل مدارس داشته باشد (Cabovská et al., 2022).

3-2-2-5- ذرات معلق:

ذرات معلق به‌عنوان یکی از آلاینده‌های مهم و مضر در مدارس شناخته شده‌اند که عمدتاً از آلودگی هوای بیرون وارد فضاهای داخلی می‌شوند. این ذرات به‌ویژه در مناطقی که دارای ترافیک سنگین هستند، می‌توانند در سطح مدارس حضور یابند (Alves et al., 2016). علاوه بر منابع خارجی، برخی منابع داخلی مانند حضور دانش‌آموزان، فعالیت‌های داخل کلاس و استفاده از گچ نیز به‌عنوان عوامل مؤثر در تولید ذرات معلق شناخته شده‌اند (Villanueva et al., 2021). ویژگی‌های ساختمان مدرسه نیز بر میزان ذرات معلق موجود در هوا تأثیر دارند. به‌عنوان مثال، نوع مصالح استفاده‌شده در ساخت مدرسه و جهت‌گیری اتاق‌ها می‌تواند در میزان ورود و تجمع ذرات معلق مؤثر باشد (Cavaleiro Rufo et al., 2016).

3-2-2-6- مونوکسید کربن (CO):

مونوکسید کربن یکی از آلاینده‌های داخلی است که معمولاً به دلیل سیستم‌های گرمایشی با احتراق یا سیگار کشیدن در فضاهای مدارس ایجاد می‌شود (Hänninen et al., 2017). حضور CO در فضای مدرسه می‌تواند بسیار خطرناک باشد، زیرا این آلاینده به راحتی از طریق سیستم تهویه به فضای داخلی مدارس منتقل می‌شود. تهویه نامناسب و همچنین فصل‌های سرد سال که نیاز به سیستم‌های گرمایشی بیشتر است، می‌توانند موجب افزایش سطح CO در مدارس شوند (Sá et al., 2017).

3-2-2-7- رادون:

رادون، که یک آلاینده ژئولوژیکی است، به‌طور عمده از منابع بیرونی مانند خاک، سنگ‌ها و سازه‌های گرانیتی وارد فضاهای داخلی می‌شود (Curado et al., 2020). این آلاینده معمولاً به دلیل ویژگی‌های طبیعی منطقه و مصالح ساختمانی موجود در مدرسه وارد فضاهای داخلی می‌شود. تهویه ناکافی، نوع مصالح استفاده‌شده در ساخت مدرسه و ویژگی‌های ساختمان از جمله عواملی هستند

تأثیرات منفی اوزون در فضای مدارس کمک کند. در جدول 2 خلاصه‌ای از آلاینده‌های هوای داخل و منشأ شکل‌گیری آنها در مدرسه ذکر شده است.

که بر سطوح رادون در فضاهای داخلی مدارس تأثیر دارند (Curado et al., 2020).

2-2-1-1-2-8-اوزون (O3):

3-2-1-استراژی‌های آلودگی هوا
طبیعت متنوع منابع آلودگی‌ها، بر اهمیت استراتژی‌های هدفمند برای مدیریت مؤثر کیفیت هوا، به‌ویژه در محیط‌های داخلی تأکید می‌کند. آلودگی‌های خارجی عمدتاً از استفاده از سوخت‌های فسیلی (Nathanson, 2019)، ترافیک، صنایع، نیروگاه‌ها، گرمایش فضاهای مسکونی و ذرات خاک از زمین‌های خشک پدید می‌آیند (Mannan and Al-Ghamdi, 2021).

اوزون یکی از آلاینده‌های جوی است که تنها از منابع بیرونی وارد فضاهای داخلی مدارس می‌شود. در حالی که غلظت اوزون در محیط‌های داخلی معمولاً کمتر از محیط‌های بیرونی است، سیستم‌های تهویه، به‌ویژه پنجره‌ها و جهت‌گیری اتاق‌ها می‌توانند بر سطوح اوزون در داخل مدارس تأثیرگذار باشند (Cabovská et al., 2022). مدیریت صحیح سیستم‌های تهویه و همچنین طراحی مناسب ساختمان می‌تواند به کاهش

جدول 1- منابع، غلظت‌ها و عوامل تعیین‌کننده حضور آلاینده‌های هوای داخلی در مدارس

Tab. 1 - Sources, Concentrations, and Determining Factors of Indoor Air Pollutants in Schools. Martins, 2025

آلاینده هوای داخلی	منابع قرارگیری	غلظت (محدوده میانگین‌ها)	غلظت (محدوده حداکثرها)	عوامل تعیین‌کننده قرارگیری
CO ₂	اشغال فضا، هوای بیرون	410-3780 ppm	1000-4434 ppm	تعداد ساکنان، نوع تهویه (طبیعی، مکانیکی)، حجم اتاق، فصل، نگهداری ساختمان، جهت‌گیری کلاس، فعالیت‌های فیزیکی
ترکیبات VOCs آلی	محصولات تمیزکننده، مصالح کف، مواد کلاسی (هنر و صنایع دستی، منسوجات)، محصولات مصرفی	19-1543 µg/m ³	84-820.2 µg/m ³	تعداد ساکنان، نوع تهویه (طبیعی، مکانیکی)، فصل، حجم اتاق، نوع کف
بنزن (Benzene)	محیط بیرونی، مصالح کف، مواد کلاسی (پارچه‌ها)	0.44-5.24 µg/m ³	0.6-20.1 µg/m ³	نوع تهویه (طبیعی، مکانیکی)، جهت‌گیری کلاس
لیمونن (Limonene)	محصولات تمیزکننده، تخته سفید، فعالیت‌های کلاسی، مواد کلاسی (پارچه‌ها)	3.08-26.6 µg/m ³	3.6-249 µg/m ³	نوع تهویه (طبیعی، مکانیکی)، جهت‌گیری کلاس
پینن (Pinene)	محصولات تمیزکننده، مواد کلاسی (پارچه‌ها)، فعالیت‌های کلاسی	4.85-55.6 µg/m ³	9.9-73 µg/m ³	نوع تهویه (طبیعی، مکانیکی)
تولون (Toluene)	محیط بیرونی، مواد کلاسی (هنر و صنایع دستی، پارچه‌ها)	1.5-25 µg/m ³	1.9-202.5 µg/m ³	نوع تهویه (طبیعی، مکانیکی)
نفتالین (Naphthalene)	مواد کلاسی	0.5-2.18 µg/m ³	1-6.05 µg/m ³	نوع تهویه (طبیعی، مکانیکی)
فرمالدئید (Formaldehyde)	میلان (چوبی)، منابع ارگانیک (رطوبت، کپک)، الکترونیک، فعالیت‌های کلاسی، سیگار کشیدن، ترافیک، مواد کلاسی (پارچه‌ها)	0.01-102 µg/m ³	12.9-126.9 µg/m ³	نوع تهویه (طبیعی، مکانیکی)، ویژگی‌های ساختمان (موقعیت، سن)، نوع کف
دی‌اکسید نیتروژن (NO ₂)	محیط بیرونی، ترافیک، دیوارهای ساختمان، گرمایش/احتراق	4.89-31 µg/m ³	13.7-69 µg/m ³	نوع تهویه (طبیعی، مکانیکی)، جهت‌گیری کلاس، تعداد ساکنان، سطح کف



این آلودگی‌ها به راحتی از طریق شکاف‌ها در نمای ساختمان‌ها مانند درب‌ها یا پنجره‌ها وارد محیط‌های داخلی می‌شوند و می‌توانند کیفیت هوای داخلی (IAQ) را به خطر بیندازند. این امر می‌تواند پیامدهای منفی بر سلامت و رفاه انسان‌ها داشته باشد (Igwe et al., 2022). اطمینان از تهویه کافی برای بهبود کیفیت هوای داخلی و کاهش خطرات سلامتی بسیار مهم است. همچنین، باید مسأله آلودگی خارجی در مناطقی که آلودگی بالایی دارند، در نظر گرفته شود. بنابراین، استفاده از سیستم‌های فیلتراسیون مناسب برای تصفیه هوای بیرونی قبل از ورود به محیط داخلی ضروری است. نمای ساختمان‌ها این ظرفیت را دارند که با استفاده از استراتژی‌های طراحی غیر فعال، آلودگی هوا را کاهش داده و کیفیت هوای داخلی را بهبود بخشند. این استراتژی‌ها شامل بررسی جامع عناصری مانند جریان هوای بهینه، جهت‌گیری ساختمان، طراحی

بازشوها، چیدمان فضایی بلوک‌ها و پیکربندی کلی ساختمان هستند. (Zhao et al., 2020). همچنین استفاده از نانو ذرات در مصالح و عناصر معماری درون ساختمان نظیر پوشش‌ها و رنگ‌ها می‌تواند نقش مهمی در حذف آلاینده‌هایی که منشأ داخلی دارند ایفا کند. از طریق یکپارچه سازی این استراتژی‌ها، تهویه طبیعی به‌طور مؤثر تسهیل می‌شود و زمانی که آلودگی هوا کاهش یابد، وابستگی به تهویه مکانیکی کاهش می‌یابد (Rassia, 2020). بنابراین جاذب‌ها می‌توانند نقش مهمی در حذف آلاینده‌ها ایفا کنند. آنها می‌توانند در نمای ساختمان‌ها و حتی در داخل ساختمان‌ها، آلاینده‌ها را حذف کرده و باعث ارتقای کیفیت فضاهای داخلی کلاس درس، شوند. در جدول 3، استراتژی‌های کاهش آلودگی هوا به دو دسته جاذب‌های در نما و جاذب‌ها در عناصر معماری تقسیم شده‌اند که در ادامه به بررسی این جاذب‌ها پرداخته خواهد شد.

جدول 3 - استراتژی‌های کاهش آلودگی هوا
Tab.3 - Air Pollution Reduction Strategies

دسته‌بندی	زیرگروه	اصول حذف آلاینده	مکانیزم	ارجاعات
کاهش آلاینده با توجه به عناصر معماری	جذب در رنگ‌ها و پوشش‌ها	فوتوکاتالیز و جذب مواد آلاینده	استفاده از نانوذرات و مواد فتوسنتزی برای تجزیه آلاینده‌های منشأ داخلی و دیوارها به حذف گازهای مضر مانند VOC، NOx و SOx می‌پردازند.	(Malinowska et al., 2024; Parasuraman et al., 2024; Anus et al., 2023; Baudys et al., 2021;)
	جذب در چوب	حذف آلاینده‌ها مانند فرمالدئید و VOC ها از هوا	پوشش‌های چوبی داخل برای جذب VOC ها و تنظیم رطوبت هوای داخل عمل می‌کنند	(Zouari et al., 2024; Da Silva et al., 2017; Yan et al., 2024)
	جذب در بتن	حذف آلاینده‌ها مانند متیلن بلو، دوده و اکسیدهای نیتروژن (NO)	پوشش‌های فوتوکاتالیتیک در بتن به ایجاد بتن‌های ختم‌شده و بتن‌های جاذب آلاینده‌های هوا و آلاینده‌هایی که در حین ساخت بتن تولید می‌شود، می‌پردازد.	(Zouari et al., 2024; Lv et al., 2023; Shen et al., 2024; G. Liu et al., 2024)
کاهش آلاینده با توجه به نما	جذب مستقیم CO ₂ از جو (DACC)	استخراج CO ₂ به‌طور مستقیم از جو	نمای مصنوعی به عنوان "برگ‌های مصنوعی" عمل می‌کند، CO ₂ را جذب و تبدیل می‌کند.	(Bryan, 2019; Bryan and Ben Salamah, 2018; Vajdi and Aslani, 2023; Karimi et al., 2021; Liu et al., 2017; Beuttler et al., 2019)
	فیلترهای فوتوکاتالیتیک	جذب نور UV برای شروع واکنش‌های شیمیایی جهت کاهش آلاینده‌ها	این فیلترها در سیستم‌های تهویه یا نمای ساختمان‌ها برای تصفیه هوا یکپارچه می‌شوند.	(Li et al., 2019; Si et al., 2018; Daglar et al., 2022; Jin et al., 2023; Karmakar et al., 2022; Lee et al., 2021)

دسته بندی	زیر گروه	اصول حذف آلاینده	مکانیزم	ارجاعات
فیلترهای کاتالیزور سرامیکی (CCFs)	تسهیل واکنش های اکسیداسیون که آلاینده ها را تجزیه می کنند	استفاده از مواد با سطح بالای تماس برای جذب گازها و آلاینده ها	این فیلترها برای تصفیه هوا در سیستم های تهویه یا نمای ساختمان یکپارچه می شوند.	(Kwon et al., 2023; Mughis Raza Naqvi, 2021; Sun et al., 2023; Samsung Newsroom, 2023;)
			MOFs ترکیب هایی از فلزات با یون های ارگانیک هستند که می توانند در پل ها یا سیستم های فیلتراسیون هوای ساختمان ها ادغام شوند.	(Samsung Newsroom, 2023; Chaudhari et al., 2017; Wang et al., 2018; Fang et al., 2018; Zhang et al., 2021)
			TiO ₂ نانوذرات موجود در سطوح نما یا خاک از نور UV برای تجزیه آلاینده ها استفاده می کند.	(Wei et al., 2023; Saeli et al., 2018)

1-2-3-1- جذب آلاینده های هوا

جذب به معنای جذب آلاینده های هوا روی سطح یک ماده جاذب است. این روش به طور موفقیت آمیز برای نگهداری ترکیبات آلی فرار (VOCs) و آلاینده های غیر آلی روی مواد جاذب، مانند زغال فعال، زئولیت ها، ژل سیلیکا، آلومینیوم فعال، خاک های معدنی و برخی پلیمرها استفاده شده است. رایج ترین مواد جاذب شامل زغال فعال و زئولیت های آب گریز هستند، زیرا دارای مساحت سطح بالا و ظرفیت جذب بالا هستند (Luengas et al., 2015). زغال فعال دارای تخلخل بالا است و یک جاذب غیر قطبی محسوب می شود. این ماده می تواند از پسماندهای کشاورزی مانند تفاله نیشکر، تفاله سیب یا پوست نارگیل برای حذف آلاینده ها با هزینه کمتر تولید شود (Anirudhan & Sreekumari, 2011). به دلیل ساختار میکروپور و مساحت سطح بزرگ، زغال فعال قادر است تا 100 میلی گرم در مترمکعب VOC ها را حذف کند (Xie, 2018)، هرچند که فرارهای با وزن مولکولی متوسط و بالا بهتر از فرارهای با وزن مولکولی پایین روی زغال فعال جذب می شوند. مواد جاذب می توانند به طور یکپارچه در مواد ساختمانی ادغام شوند یا روی سطوح داخلی به کار روند، که این امکان را می دهد که آلاینده های هوا بدون نیاز به انرژی اضافی و با حداقل تولید محصول فرعی، حذف شوند. این ویژگی باعث می شود که این مواد به عنوان مواد حذف آلاینده های غیرفعال (PRMs) طبقه بندی شوند. به عنوان مثال، PRMs می توانند برای کنترل سطح اوزون استفاده شوند، که این امر به ویژه برای

جمعیت های حساس مفید است و به ایجاد محیط های داخلی سالم تر کمک می کند. (Gall et al., 2011)

1-2-3-2- جذب در مواد و مصالح ساختمانی

توسعه های اخیر در فناوری های جاذب منجر به ایجاد مواد پیشرفته ای همچون نانو جاذب ها، جاذب های فتوسنتزی و جاذب های مشتق از MOFs و MIPS شده است که کارایی بالایی در مقابله با آلودگی هوا دارند. این مواد ظرفیت جذب بالا، انتخاب پذیری هدفمند و قابلیت بازیابی دارند که آن ها را هم از نظر اقتصادی به صرفه و هم پایدار می کند. مواد ساخت و ساز فتوسنتزی می توانند گازهای مضر مانند VOCs، NOx و SOx را به مواد بی ضرر تبدیل کنند و همچنین باکتری ها و ویروس ها را تجزیه کنند، که کیفیت هوای داخلی را بهبود می بخشد. این مواد در کشورهای مختلف، به ویژه در چین، برای بهبود کیفیت هوای داخل ساختمان ها و فضاهای عمومی به کار می روند (Chen & Poon, 2009; Wei et al., 2023). پیشنهادی برای مواد ساخت و ساز فتوسنتزی ارائه می شود.

1-2-3-3- رنگ ها و پوشش های جاذب

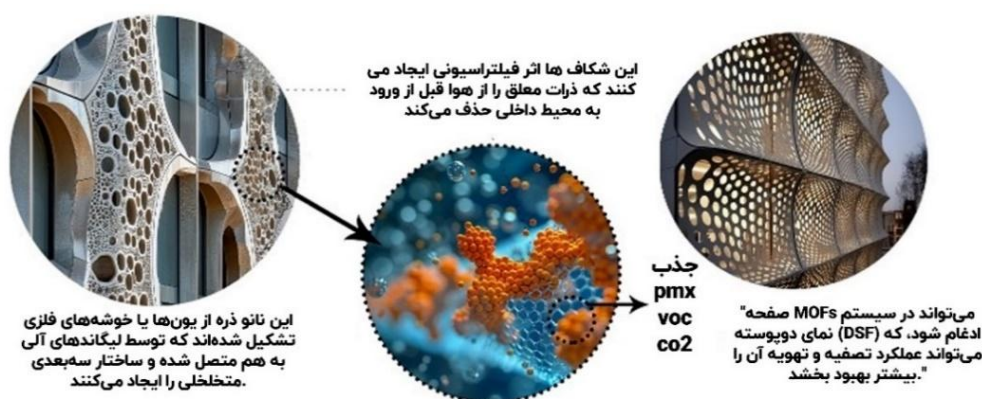
میکروارگانیزم هایی که بر روی مصالح ساختمانی رشد می کنند می توانند منجر به تخریب فیزیکی و شیمیایی شوند، فرایندی که به آن تخریب زیستی گفته می شود. مصالح ساختمانی آلی که حاوی سلولز هستند، مانند رنگ ها، پوشش های لاک و گچ ها، به ویژه در برابر رشد

حاضر، تیتانیوم (IV) اکسید به دلیل ارزان بودن و پتانسیل اکسیداسیون بالا، پرکاربردترین و مورد تحقیق‌ترین ماده با خواص فتو سنتزی است (Enea et al., 2019). همچنین مهم است که به پایداری نوری، فعالیت نوری و سوپر هیدرو فیلیتی آن اشاره کنیم که آن را نسبت به بسیاری از مواد دیگر برتر می‌سازد (Malinowska et al., 2024). مبتنی بر TiO_2 ، مانند رنگ‌ها، پوشش‌ها، گچ‌ها، کاشی‌ها، کفپوش‌ها و بتن‌ها، به طور فزاینده‌ای در بخش‌های مختلف صنعت ساختمان به دلیل کاربردهای متنوع خود استفاده می‌شوند (Enea et al., 2019). مواد ذکر شده دارای ویژگی‌هایی مانند حذف آلودگی هوا و خود پاک‌کنندگی هستند که آن‌ها را برای بهبود محیط‌های داخلی و خارجی بسیار مؤثر می‌سازد (Monteiro et al., 2014; Salvadores et al., 2020; Shen et al., 2015).

4-3-2-1- جذب در نما

مواد جاذب از جمله زغال فعال، ژل سیلیکا، غشاها، فیلتر کاتالیزور سرامیکی و دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) (Al-Zaidi and Markaryan, 2020) برای تصفیه آلاینده‌ها به کار می‌روند. با استفاده از این مواد جاذب در نمای ساختمان، آلاینده‌های هوای بیرون به‌طور مؤثر تصفیه می‌شوند و هوای پاک به داخل محیط وارد می‌شود. که در شکل 1 نمایی از کاربرد نانو ذرات در نماهای دو پوسته مشاهده می‌شود.

میکروبی آسیب‌پذیرترند و در طول زمان بیشتر در معرض آسیب قرار می‌گیرند (Gómez-Espinosa et al., 2020; Gutarowska, 2014). مؤثرترین ضد عفونی‌کننده‌ها، مواد شیمیایی هستند که دامنه وسیعی از فعالیت ضد انواع مختلف میکروارگانیسم‌ها از جمله باکتری‌ها، قارچ‌ها و سایر گونه‌های میکروبی را دارند (Reiß et al., 2021). نانو تکنولوژی، به ویژه از طریق استفاده از فرمولاسیون‌های نانو کامپوزیت با اندازه‌ها و اشکال دقیقاً کنترل شده نانو ذرات، منجر به توسعه نانو متریال‌هایی با خواص ضد میکروبی شده است (Enea et al., 2019; Kovalev et al., 2024). گزارش‌های اولیه در مورد استفاده از نانو ذرات در رنگ‌ها برای جلوگیری از نشست و رشد ارگانیسم‌های مختلف بیوفولینگ، در حالی که تأثیرات زیست محیطی را به حداقل می‌رساند، در سال 2006 منتشر شد. در این زمان، Nyden و همکارانش حق اختراعی برای روشی که در آن از نانو ذرات Cu ، ZnO ، TiO_2 و CuO به عنوان ضد عفونی‌کننده در رنگ‌ها استفاده می‌شود، دریافت کردند (Nyden & Fant, 2008). این رنگ از فرمولاسیونی بر اساس ایمیدازول‌ها که به نانو ذرات فلزی با سطح بالاتر متصل شده‌اند، تشکیل شده است و برای جذب میکروارگانیسم‌های پاتولوژیک طراحی شده است. فتو سنتز نامتجانس به عنوان یکی از تکنیک‌های امیدوارکننده برای تجزیه آلاینده‌های هوا و ضد عفونی سطوح ظهور کرده است (Li et al., 2024). در حال



شکل 1- مکانیزم جذب آلاینده‌های هوا که توسط MOFilter به کار گرفته شده است.

Fig. 1 – Mechanism of Air Pollutant Capture Utilized by MOFilter . Ma et al., 2019

لی و کوزیل (Lee et al., 2021)، ترکیب فیلتر کردن و فتو کاتالیز UV-A مؤثرترین روش برای کاهش ذرات معلق (PM) است.

1-2-3-7- فیلتر کاتالیزور سرامیکی (CCF)

فیلترهای کاتالیزور سرامیکی (CCFs) ظرفیت بارگذاری گرد و غبار حداکثری را چهار برابر بیشتر از فیلترهای معمولی (تقریباً 20 گرم در لیتر در مقایسه با 5 گرم در لیتر) دارند. علاوه بر این، فیلترهای CCF قابلیت استفاده مجدد از طریق ده چرخه احیا با فرآیند ساده شستشوی آب را نشان می‌دهند (Kwon et al., 2023)، در حالی که عملکردهای اولیه حذف ذرات معلق (PM) و ترکیبات آلی فرار (VOCs) را حفظ می‌کنند. این نشان می‌دهد که CCF ها ظرفیت بارگذاری گرد و غبار و توانایی احیا بسیار بالاتری نسبت به فیلترهای معمولی دارند (Kwon et al., 2023). فیلتر CCF دارای یک کانال ورودی با پلاگ‌ها و دیواره داخلی متخلخل است که جریان هوا را پس از عبور از دیواره به سمت کانال خروجی هدایت می‌کند. مکانیزم فیلتراسیون CCF برای حذف ذرات معلق ترکیبی از فیلتراسیون در بستر عمیق است (Sun et al., 2023). طراحی CCF بر اساس یک مفهوم نوآورانه است که در آن ذرات معلق در کانال ورودی فیلتر سرامیکی جمع می‌شوند و در عین حال، گازهای VOC تحت تأثیر پوشش فتوکاتالیزور موجود در کانال خروجی، در شرایط محیطی تجزیه می‌شوند (Lee et al., 2021). فیلترهای CCF در نمای ساختمان ذرات معلق، NOx، اکسیدهای گوگرد (SOx) و VOC ها را حذف می‌کنند (Kwon et al., 2023).

1-2-3-8- فریم‌های آلی فلزی (MOF)

MOF ها یک کلاس از پلیمرهای بلوری متخلخل هستند که از یون‌های فلزی تشکیل شده‌اند (Samsung MOF. Newsroom, 2023) MOF ها به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود مانند پنجره‌های نانو مقیاس و ساختارهای متخلخل در نمای ساختمان‌ها به کار می‌روند. ترکیب یون‌های فلزی و لینکرهای آلی در MOF ها منجر به ایجاد مجموعه‌ای گسترده از ساختارها و ویژگی‌ها می‌شود (Ma et al., 2022).

5-3-2-1- جذب کربن از هوای مستقیم

فناوری DACC شامل جذب CO₂ به طور مستقیم از جو اطراف و ذخیره‌سازی آن به شکل جامد است (Karimi et al., 2023). فناوری فیلتر هوای بسته که کربن را جذب می‌کند، از فیلترهای بیولوژیکی برای حذف آلاینده‌ها از هوا استفاده می‌کند (Liu et al., 2017). این فناوری‌ها می‌توانند به‌طور یکپارچه در نمای ساختمان‌ها برای جذب CO₂ از هوا به کار گرفته شوند، که این امکان را فراهم می‌آورد که CO₂ ذخیره‌سازی یا به مواد با ارزش تبدیل شود. فتوبیوراکتورها به نمای ساختمان‌ها ادغام می‌شوند تا میکروآلگاها را کشت دهند که CO₂ را از هوا جذب کرده و به کاهش کربن جهانی کمک می‌کنند (Beuttler et al., 2019). نمای ساختمان‌ها می‌توانند به عنوان برگ‌های مصنوعی گسترده در نظر گرفته شوند که قادر به جذب CO₂ از جو هستند و آن را به مواد با ارزش تبدیل می‌کنند (Vajdi and Aslani, 2023). مواد مبتنی بر کربن می‌توانند از طریق روش‌های مختلفی مانند ادغام زیست‌توده و جلبک‌ها یا استفاده از سیستم‌های مکانیکی برای جذب CO₂ به کار گرفته شوند (Bryan, 2019).

6-3-2-1- فیلترهای فتوکاتالیتیک

فیلترهای فتوکاتالیتیک آلاینده‌های ذرات معلق (PM) را از طریق فرآیندی به نام فتوکاتالیز حذف می‌کنند (Li et al., 2019). در مورد حذف ذرات معلق، فتوکاتالیست اکسیژن واکنش‌پذیر (ROS) تولید می‌کند که آلاینده‌های آلی مانند رادیکال هیدروکسیل (OH)، سوپراکسید و PM را اکسید کرده و به مواد بی ضرری مانند CO₂ و آب تجزیه می‌کند (Si et al., 2018). فعالیت فتوکاتالیتیکی (Daglar et al., 2022) MOFs با تنظیم ترکیب شیمیایی و ساختار ماده بهینه می‌شود (Wang et al., 2018). استفاده از فتوکاتالیز UV-A اشعه فرابنفش با طول موج بین 320 تا 400 نانومتر که طول موج طولانی‌تر در طیف UV است و کمترین سمیت را دارد زیرا کمتر مواد آن را جذب می‌کنند) به طور قابل توجهی غلظت باکتری‌ها و ویروس‌های موجود در هوا را کاهش داد (Lee et al., 2021). طبق گفته‌ی

MOF ها این مواد به عنوان یک جایگزین امیدوارکننده برای مواد متخلخل سنتی، از جمله زغال فعال، زئولیت، آلومینا و سیلیکا برای تصفیه هوا به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد و مزایای آن‌ها، از جمله تخلخل فوق‌العاده بالا و مساحت سطح ویژه بزرگ، شناخته شده‌اند (Wang et al., 2018). MOF ها دارای مساحت سطح بزرگی هستند که اجازه می‌دهد آلاینده‌های بیشتری از هوا جذب و حذف شوند (Zhang et al., 2021). ادغام MOF ها در نمای ساختمان‌ها آلاینده‌ها را از طریق چندین مکانیزم از جمله جذب، تجزیه کاتالیزوری و جداسازی حذف می‌کند. این فرآیندها به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد MOF ها مانند انعطاف‌پذیری بالا، انتخاب‌پذیری و قابلیت تجزیه که به طراحی منطقی آن‌ها مربوط است، و همچنین ساختار منفذی متفاوت نسبت به سایر کاتالیزورها، ممکن می‌شود (Kaur et al., 2023). همچنین MOF می‌تواند به عنوان فیلترها (MOF filters) عمل کند تا آلاینده‌هایی مانند PM_{10} ، SO_2 ، O_3 و VOC ها و سایر مواد سمی را از هوا جذب کند (Ma et al., 2019; Ma et al., 2018). این امر از طریق فرآیندهای جذب و تجزیه کاتالیزوری به دست می‌آید (Zhang et al., 2021).

3-2-1- TiO₂ در نما

دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) یک ماده فتوکاتالیزور است که می‌تواند برای کاهش آلودگی هوا به نما اعمال شود. هنگامی که در معرض نور فرابنفش قرار می‌گیرد، TiO_2 آلاینده‌هایی مانند NO_x و VOC ها را به مواد بی‌ضرر تجزیه می‌کند (Wei et al., 2023). این فرآیند که به نام اکسیداسیون فتوکاتالیتیک شناخته می‌شود، به حفظ تمیزی نمای ساختمان کمک می‌کند و نیاز به تمیزکاری دستی را کاهش می‌دهد (Saali et al., 2018). سیستم نمای سبز با گیاهان پوشش داده شده با TiO_2 غلظت NO_x و CO_2 را کاهش می‌دهد (Yaseen Sharaf Zeebaree et al., 2022). این سیستم همچنین رشد قارچ‌ها و کپک‌ها را کاهش می‌دهد (Bersch et al., 2023) و آلاینده‌های هوای داخلی مانند فرمالدئید و بنزن را تا 70% کاهش می‌دهد (TDMA, 2023). علاوه بر این، گیاهان پوشش داده

شده با TiO_2 از اتلاف حرارت در ساختمان‌ها جلوگیری می‌کنند و از گرم شدن بیش از حد در تابستان پیشگیری می‌کنند (Ramadhan and Mahmoud, 2023). که این امر انتشار کربن عملیاتی ساختمان‌ها را کاهش می‌دهد.

2- روش تحقیق

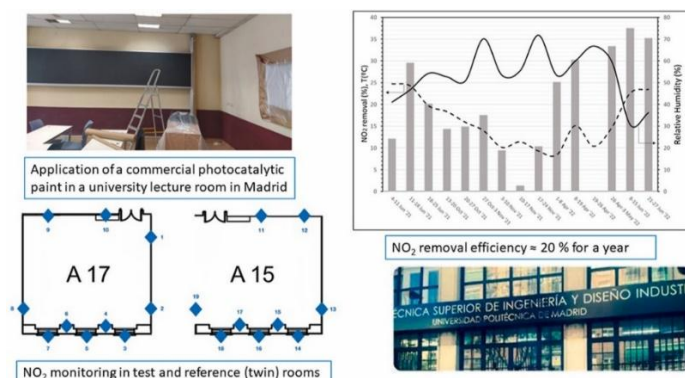
روش تحقیق این مقاله یک مطالعه مروری سیستماتیک است که به بررسی استراتژی‌های طراحی غیر فعال جذب برای کاهش آلاینده‌ها و ارتقای کیفیت هوا در فضاهای آموزشی پایدار می‌پردازد. برای این منظور، مقالات و منابع معتبر از پایگاه‌های اطلاعاتی معتبر مانند Scopus، ScienceDirect، Google Scholar و Scopus گردآوری و بررسی شد. در این تحقیق، ابتدا مقالات مرتبط با سیستم‌های جذب غیر فعال آلاینده‌ها، فضاهای آموزشی پایدار و تأثیر آن‌ها بر کیفیت هوای داخلی شناسایی شد. سپس با استفاده از تحلیل مقایسه‌ای، استراتژی‌های مختلف جذب آلاینده‌ها (مانند مصالح جاذب، بیوفیلترها، و سیستم‌های تهویه غیر فعال) و کارایی آن‌ها در بهبود کیفیت هوا و سلامت کاربران فضاهای آموزشی مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل نتایج از مقالات مختلف باعث شناسایی الگوها و روندهای مشترک در استفاده از این استراتژی‌ها شد و بهترین شیوه‌ها و راه‌حل‌های اقتصادی برای کاهش آلاینده‌ها و بهبود شرایط محیطی در فضاهای آموزشی شناسایی شد.

3- نتایج و بحث

در سال‌های اخیر، استفاده از فناوری‌های نوین و مواد جاذب در ساختمان‌ها به عنوان راهکاری پیشرفته برای مقابله با آلودگی هوا و ارتقاء کیفیت محیط‌های یادگیری، مورد توجه ویژه پژوهشگران و سیاست‌گذاران حوزه معماری قرار گرفته است. اهمیت این موضوع به ویژه در کشورهایی مانند ایران که با چالش عمده آلودگی شدید هوای شهری دوجندان است. مدارس و مراکز آموزشی به دلیل تراکم جمعیت دانش‌آموزان و نیاز به محیط‌های سالم برای یادگیری، مکان‌هایی

اثر حداقل تا یک سال پایدار بود. این یافته‌ها تأیید می‌کنند که مصالح فتوکاتالیستی می‌توانند به‌عنوان بخشی از راهکارهای چندگانه برای بهبود کیفیت هوای داخلی در فضاهای آموزشی مورد استفاده قرار گیرند. تا کنون استفاده از مواد فتوکاتالیستی و جاذب در نمای ساختمان‌های آموزشی به‌طور گسترده‌ای مورد توجه قرار نگرفته است و داده‌ای در این زمینه موجود نیست. با این حال، نمونه‌هایی از کاربرد این مواد در ساختمان‌های دیگر وجود دارد، که در شکل 3 دیده می‌شود. این مواد فتوکاتالیستی علاوه بر آثار مثبت در داخل ساختمان، به محوطه‌های اطراف، مانند فضاهای مدرسه نیز تأثیر می‌گذارند. به طور خاص، این مواد قادر به کاهش آلودگی هوا، بهبود کیفیت محیط و ایجاد فضایی سالم‌تر برای دانش‌آموزان است.

حساس محسوب می‌شوند که هرگونه کاهش کیفیت هوا می‌تواند تأثیر مستقیم بر سلامت، تمرکز و بازده آموزشی دانش‌آموزان داشته باشد. مطالعات میدانی اخیر در محیط‌های آموزشی نشان داده‌اند که استفاده از پوشش‌های فتوکاتالیستی حاوی نانوذرات TiO_2 می‌تواند نقش مؤثری در کاهش آلاینده‌های هوای داخلی ایفا کند. به عنوان نمونه، الاتار و همکاران (2025) در یک مطالعه تجربی در دانشگاهی واقع در منطقه صنعتی مصر، گزارش دادند که کاربرد این پوشش‌ها موجب کاهش 61٪ ذرات معلق $\text{PM}_{2.5}$ ، کاهش 65٪ PM_{10} و همچنین کاهش 46٪ در میزان NO_2 شد. از سوی دیگر، نیه‌تو مارکز و همکاران (2023) در یک پژوهش در دانشگاه فنی مادرید (شکل 2) نشان دادند که رنگ فتوکاتالیستی مبتنی بر TiO_2 موجب کاهش بین 9.4٪ تا 37.5٪ در غلظت NO_2 در یک اتاق آموزشی شد و این



شکل 2-بهبود کیفیت هوای داخلی از طریق استفاده از رنگ‌های فتوکاتالیستی

Fig. 2 – Improving indoor air quality using photocatalytic paints (Nieto-Márquez et al., 2023)



شکل 3-اجزای پوسته ساختمان با استفاده از مواد فتوکاتالیستی. (a) پابیون ایتالیا واقع در میلان، ایتالیا. (b) بیمارستان مانوئل گنا گونزالس واقع در مکزیکو سیتی، مکزیک

Fig. 3–Building envelope components using photocatalytic materials. (a) The Italian Pavilion located in Milan, Italy. (b) Hospital Manuel Gea Gonzalez located in Mexico City, Mexico. (Maury-Ramirez, Rinke, & Blom, 2024)

در این بخش، نتایج حاصل از مطالعات میدانی و آزمایشگاهی مرتبط با پنج فناوری اصلی مورد بررسی در این پژوهش، یعنی دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) فتوکاتالیتیک، چارچوب‌های فلزی-آلی (MOFs)، فناوری جذب مستقیم دی‌اکسید کربن (DACC) پوشش‌های فتوکاتالیتیک ترکیبی CCF و اکسید روی (ZnO) ارائه و تحلیل می‌شود. سپس، این فناوری‌ها از نظر مکانیزم عملکرد، کارایی، هزینه، مزایا و محدودیت‌ها، و تناسب اقلیمی با شرایط ایران مقایسه شده و در ادامه، راهبردهای اجرایی برای استفاده در مدارس پیشنهاد خواهد شد.

3-1- چالش‌های استفاده از نانوذرات

استفاده از نانوذرات، هرچند نویدبخش است، اما با چالش‌های متعددی همراه است که باید به طور جدی مورد بررسی قرار گیرد. این چالش‌ها در دو دسته اصلی طبقه‌بندی می‌شوند:

1. چالش‌های زیست‌محیطی و سلامتی: یکی از مهم‌ترین نگرانی‌ها در مورد نانوذرات، آثار ناشناخته آنها بر سلامت انسان و محیط زیست است. به دلیل اندازه کوچک، نانوذرات می‌تواند به راحتی از طریق استنشاق، تماس پوستی، یا زنجیره غذایی وارد بدن شود و آثار سمی ایجاد کند. بنابراین، ارزیابی جامع چرخه عمر (Life Cycle Assessment) نانوذرات و توسعه پروتکل‌های ایمنی برای تولید، استفاده، و دفع آنها ضروری است.

2. چالش‌های اقتصادی: تولید نانوذرات و ادغام آنها در مصالح باعث افزایش هزینه‌های تولید می‌شود. این موضوع می‌تواند کاربرد این فناوری را در پروژه‌ها محدود کند.

با این حال، پیشرفت‌های سال‌های اخیر در زمینه شیمی سبز (Green Chemistry) و استفاده از مواد اولیه پایدار، راهکارهایی برای کاهش هزینه‌ها و بهبود مقیاس‌پذیری و سلامتی این مواد ارائه داده است. که امروزه گام مهمی در کاربرد در مواد و مصالح ساختمانی دارد.

2-3- مکانیزم‌ها و توانایی حذف آلاینده‌ها

مکانیزم‌های حذف آلاینده‌ها در فناوری‌های نوین ساختمانی عمدتاً شامل جذب فیزیکی، جذب شیمیایی، و تجزیه فتوکاتالیتیکی است.

1-2-3- جذب فیزیکی:

در این فرآیند، مولکول‌های آلاینده از طریق نیروهای بین مولکولی ضعیف نظیر نیروهای واندروالسی یا پیوندهای هیدروژنی، بر سطح جذب نگه‌داری می‌شوند، بدون آن‌که تغییر شیمیایی در ساختار آنها ایجاد شود. این مکانیزم معمولاً با سرعت بالایی انجام شده و نیازمند انرژی خارجی یا شرایط نوری خاص نیست. با این حال، ظرفیت جذب محدود بوده و پس از اشباع، کارایی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و نیاز به احیا یا تعویض جذب وجود دارد. نمونه‌های شاخص این مکانیزم شامل بخش جذب در فناوری‌های ترکیبی مانند CCF و برخی انواع MOF است.

2-2-3- جذب شیمیایی:

در این مکانیزم، مولکول‌های آلاینده از طریق واکنش‌های شیمیایی یا تشکیل پیوندهای قوی (کووالانسی یا یونی) با سطح جذب به طور برگشت‌ناپذیر یا نیمه‌برگشت‌پذیر متصل می‌شوند. این فرآیند معمولاً انتخاب‌پذیری بالایی برای گونه‌های هدف دارد و امکان طراحی ساختار جذب برای حذف آلاینده‌های خاص وجود دارد. با این حال، احیای چنین جذب‌هایی نیازمند شرایط حرارتی یا شیمیایی شدید بوده و هزینه‌بر است. افزون بر این، برخی جذب‌های شیمیایی مانند دسته‌ای از MOF ها در شرایط رطوبت بالا دچار تخریب ساختاری و کاهش کارایی می‌شوند. نمونه‌های بارز این مکانیزم در فناوری MOFs و DACC مشاهده می‌شود.

3-2-3- تجزیه فتوکاتالیتیکی:

این مکانیزم بر پایه تحریک نیمه‌رساناهایی مانند TiO_2 و ZnO با تابش نور (معمولاً فرابنفش و در صورت دویینگ، نور مرئی) انجام می‌شود؛ در این فرایند، جفت‌های الکترون-حفره ایجاد شده و گونه‌های فعال

3-3- مزایا و محدودیت‌ها

3-3-1- فناوری TiO_2 فتوکاتالیتیکس

پوشش‌های مبتنی بر TiO_2 به دلیل توانایی اکسیداسیون گسترده وسیعی از آلاینده‌ها شامل NO_x ، VOC ، ذرات معلق و عوامل میکروبی، جایگاه ویژه‌ای در تصفیه هوای نماهای ساختمانی یافته‌اند. از مزایای کلیدی آن‌ها می‌توان به پایداری حرارتی بالا، طول عمر طولانی و خاصیت خودتمیزشوندگی اشاره کرد. با این حال، وابستگی کامل به تابش UV سبب می‌شود در شرایط ابری یا فضاهای کم‌نور، کارایی به شدت کاهش یابد. همچنین ظرفیت متوسط در جذب رطوبت و خاصیت ضد باکتریایی محدود، نقاط ضعف این فناوری به شمار می‌روند. علاوه بر این، TiO_2 ذاتا توانایی حذف مستقیم CO_2 را ندارد و تنها با اصلاحات ترکیبی یا دوپینگ می‌تواند چنین قابلیت بیابد.

3-3-2- چارچوب‌های فلزی-آلی (MOFs)

MOFs به دلیل تخلخل فوق‌العاده بالا و سطح ویژه بسیار زیاد توانایی جذب انتخابی آلاینده‌هایی چون SO_2 ، O_3 و VOC ‌ها را حتی در غیاب نور دارند. انعطاف‌پذیری ساختاری و قابلیت تنظیم شیمی سطح، آن‌ها را به جاذب‌هایی بسیار دقیق و کارآمد بدل کرده است. با این حال، حساسیت به رطوبت بالا در بسیاری از گونه‌ها موجب افت کارایی یا حتی تخریب ساختاری می‌شود. همچنین هزینه بالای سنتز و نیاز به احیای دوره‌ای باعث شده است استفاده از MOFs در مقیاس وسیع مدارس، از منظر اقتصادی و عملیاتی، چالش‌برانگیز باشد.

اکسیژن (ROS) همچون رادیکال هیدروکسیل و سوپراکسید تولید می‌شوند که قادرند آلاینده‌های اکسیدپذیر از جمله ترکیبات آلی، VOC ، NO_x و SO_x را به ترکیبات بی‌ضرر مانند H_2O و CO_2 یا یون‌های نیتрат و سولفات تبدیل کنند و همچنین عوامل میکروبی را غیرفعال نمایند. این مکانیزم به دلیل ظرفیت عملی نامحدود، دوام طولانی و خاصیت خودتمیز شونده، یک روش پایدار محسوب می‌شود، هرچند وابستگی بالایی به شدت و طیف نور و تمیزی سطح دارد. با این حال، TiO_2 و ZnO به‌طور ذاتی توانایی مؤثری در حذف یا جذب مستقیم CO_2 و گازهای پایدار و بی‌اثر (مانند N_2 و گازهای نجیب) ندارند، زیرا این ترکیبات از نظر شیمیایی بسیار پایدار و محصول نهایی اکسیداسیون‌اند و تنها برهم‌کنش سطحی بسیار ضعیفی با این نیمه‌رساناها برقرار می‌کنند. افزایش توانایی در حذف CO_2 تنها با اصلاح شیمیایی سطح (مانند افزودن گروه‌های آمینی یا قلیایی) یا ترکیب با جاذب‌های شیمیایی و مکانیزم‌های مکملی نظیر DACC یا برخی MOF‌های پایدار در محیط مرطوب امکان‌پذیر است که این رویکردها مستلزم فناوری ترکیبی و هزینه بالاتر است. خلاصه مقایسه این مکانیزم‌ها و فناوری‌های متناظر آنها در جدول 4 ارائه می‌شود. برای مناطق پرنور، فتوکاتالیز (ZnO ، TiO_2) پایداری و کم‌هزینه‌ترین گزینه است. در محیط‌های کم‌نور یا با آلاینده خاص، جذب شیمیایی یا مکانیزم ترکیبی (CCF) کارایی بهتری دارد. ترکیب مکانیزم‌ها می‌تواند پوشش گسترده‌تری از شرایط و آلاینده‌ها را فراهم کند که در ادامه این موارد بررسی می‌شود.

جدول 4- مکانیزم‌های جذب هر یک از فناوری‌ها

Tab. 4 -Mechanisms of absorption for each technology

فناوری	مکانیزم عملکرد	آلاینده‌های هدف
TiO_2 (فتوکاتالیتیک)	فتوکاتالیز: تولید گونه‌های اکسیژن واکنش‌پذیر (ROS) تحت نور UV	NO_x ، VOCs ، PM_{10} ، باکتری‌ها، ویروس‌ها
MOFs	جذب شیمیایی از طریق ساختار متخلخل	PM ، SO_2 ، O_3 ، VOC ‌ها
DACC	جذب فیزیکی مستقیم CO_2 از اتمسفر	CO_2
CCF با فتوکاتالیز	اکسیداسیون فتوکاتالیتیکی	VOCs ، گردوغبار، NO_x ، SO_x
ZnO پوشش‌ها	فتوکاتالیز و جذب فیزیکی	NO_x ، $\text{PM}_{2.5}$ ، VOCs ، باکتری‌ها، قارچ‌ها

3-3-3- فناوری جذب مستقیم کربن (DACC)

این فناوری با هدف جداسازی مستقیم CO₂ از هوای محیط طراحی شده و در کاهش غلظت این گاز گلخانه‌ای بسیار مؤثر است. مزایای اصلی آن پایداری حرارتی بالا و عملکرد مستقل از نور است. با این حال، دامنه عملکرد DACC صرفاً محدود به CO₂ است و فاقد خاصیت‌های مکمل مانند ضدباکتریایی یا خودتمیزشوندگی است. از سوی دیگر، پیچیدگی تجهیزات و هزینه بالای نصب و بهره‌برداری، مانع از آن می‌شود که به‌عنوان یک گزینه مقرون‌به‌صرفه برای مدارس مطرح شود.

3-3-4- فیلترهای کاتالیزور سرامیکی با فتوکاتالیست (CCF)

CCFها با ترکیب جذب فیزیکی و اکسیداسیون فتوکاتالیتیکی، توانایی حذف هم‌زمان ذرات معلق، NO_x، SO_x و VOCها را دارند. مهم‌ترین مزیت آنها این است که بخش جذب فیزیکی حتی در غیاب نور نیز فعال باقی می‌ماند، که این ویژگی نسبت به فتوکاتالیست‌های صرف برتری محسوب می‌شود. با این وجود، کاهش بازده فتوکاتالیتیکی در شرایط کم‌نور و پیچیدگی ساختار

چندلایه، هزینه تولید و نگهداری آن‌ها را افزایش می‌دهد. بنابراین CCFها اگرچه گزینه‌ای قدرتمند هستند، اما از منظر اقتصادی تنها در صورت ترکیب با مزایای دیگر (مانند طول عمر بالا یا چندمنظوره بودن) توجیه‌پذیرند.

3-3-5- اکسید روی (ZnO) در پوشش‌ها

ZnO از نظر مکانیزم فتوکاتالیتیکی شباهت زیادی به TiO₂ دارد، اما ویژگی‌های ضدباکتریایی و ضد قارچی قوی‌تر آن را برای محیط‌های آموزشی در مناطق مرطوب به گزینه‌ای برجسته بدل می‌سازد. علاوه بر این، ZnO پایداری حرارتی مناسب و قابلیت خودتمیزشوندگی دارد. نقطه ضعف اصلی آن، مشابه سایر فتوکاتالیست‌ها وابستگی شدید به نور است که در محیط‌های کم‌نور یا بدون نور سبب افت محسوس عملکرد می‌شود. برای بررسی مقایسه‌ای و مشاهده تطبیقی ویژگی‌های فنی و عملکردی هر یک از این فناوری‌ها، می‌توان به جدول 5 مراجعه کرد که نمایی خلاصه‌شده از مزایا و محدودیت‌های هر روش را ارائه می‌دهد.

جدول 5- بررسی مقایسه‌ای و مشاهده تطبیقی فناوری‌های جذب غیر فعال

Tab. 5-Comparative review and cross-sectional observation of passive absorption technologies

فناوری	آلاینده هدف	نیاز به نور	فعال در محیط بدون نور	جذب رطوبت	خاصیت ضدباکتریایی	پایداری حرارتی	خاصیت خودتمیز شونده
TiO ₂ (فتوکاتالیتیک)	PM, VOCs, NO _x باکتری‌ها، ویروس‌ها	بله (UV)	خیر	کم	متوسط	بالا	بله
MOFs	PM, SO ₂ , O ₃ , VOCها	خیر	بله	متوسط تا زیاد (وابسته به نوع)	کم	متوسط تا بالا	خیر
DACC	CO ₂	خیر	بله	کم	ندارد	بالا	خیر
CCF با فتوکاتالیست	PM, NO _x , SO _x , VOCها	متوسط (عملکرد بهتر با UV)	تنها جذب فیزیکی فعال می‌ماند	متوسط	متوسط	بالا	بله
Zno در پوشش‌های داخلی	PM _{2.5} , NO _x , VOCها، باکتری‌ها/قارچ‌ها	بله (UV)	خیر	متوسط	زیاد	بالا	بله

3-3-6- ارزیابی هزینه‌ها با تأکید بر بودجه‌های آموزشی

انتخاب فناوری مناسب برای بهبود کیفیت هوای مدارس، تنها بر اساس کارایی فنی معنا پیدا نمی‌کند؛ بلکه باید در بستر محدودیت‌های مالی بخش آموزش سنجیده شود. در کشوری مانند ایران، که بودجه‌های آموزشی غالباً با کمبود منابع مواجهند، فناوری‌های با هزینه اجرا و نگهداری پایین، اگرچه ممکن است در مقایسه با روش‌های پیشرفته ظرفیت محدودی داشته باشند، در عمل اثرگذاری بیشتری در مقیاس واقعی مدارس خواهند داشت. نتایج جدول 6 نشان می‌دهد که پوشش‌های فتوکاتالیتیک مبتنی بر TiO_2 و فناوری‌های CCF به دلیل هزینه اجرا و نگهداری پایین و نیز ویژگی‌های ذاتی همچون خودتمیزشوندگی، گزینه‌هایی بسیار جذاب برای مدارسند. این فناوری‌ها بدون نیاز به انرژی یا تجهیزات مکانیکی پرمصرف، می‌توانند در بلندمدت عملکرد پایداری داشته باشند. با این حال، نباید از این نکته غافل شد که وابستگی TiO_2 به نور UV و افت نسبی عملکرد CCF در شرایط کم‌نور یا آلودگی سطحی، می‌تواند میزان بازگشت سرمایه را در برخی مناطق اقلیمی کاهش دهد. بنابراین، انتخاب آن‌ها باید با در نظر گرفتن شرایط محلی و برنامه‌های نگهداری واقع‌بینانه صورت گیرد. در نقطه مقابل، فناوری‌های MOFs و DACC اگرچه از نظر علمی پیشرفته و دارای قابلیت جذب انتخابی آلاینده‌های خاص هستند، اما هزینه بسیار بالا، نیاز به احیای دوره‌ای (در مورد MOFs) و دامنه عملکرد محدود (در مورد DACC) باعث می‌شود نسبت هزینه-اثربخشی آنها در مدارس، به‌ویژه در مناطق کم‌برخوردار، غیر قابل توجیه باشد. تنها در

شرایط خاص مانند پروژه‌های پایلوت تحقیقاتی یا مدارس برخوردار در مناطق صنعتی — می‌توان توجیهی برای استفاده محدود از آنها یافت. پوشش‌های ZnO نیز مشابه TiO_2 از مکانیزم فتوکاتالیتیکی بهره می‌برند، اما مزیت آنها در خاصیت ضد باکتری و ضدقارچ بالاتر است. این ویژگی، در مناطق مرطوب شمال کشور که مشکلات میکروبی و بهداشتی بیشتر بروز می‌کند، ارزش اقتصادی و کارکردی ویژه‌ای ایجاد می‌کند. با این وجود، همانند سایر فتوکاتالیت‌ها، عملکرد آن‌ها در محیط‌های کم‌نور به‌طور محسوسی افت می‌کند و این نکته باید در تصمیم‌گیری لحاظ شود.

مزیت کلیدی فناوری‌های سطحی مانند TiO_2 ، ZnO و CCF در مقایسه با سیستم‌های مکانیکی (نظیر فیلترهای HEPA) این است که مصرف انرژی مداوم ندارند، قطعات متحرک یا فیلتر نیاز به تعویض ندارند، و به صورت یکپارچه با طراحی نما و متریال داخلی قابل ترکیب‌اند. این مزیت از نظر اقتصادی دو لبه دارد: از یک سو هزینه‌های عملیاتی را کاهش می‌دهد و فضای مفید کلاس‌ها را حفظ می‌کند، اما از سوی دیگر وابستگی به شرایط محیطی (نور و تمیزی سطح) می‌تواند مانع دستیابی به حداکثر کارایی شود. در نتیجه، از منظر فنی-اقتصادی و با توجه به محدودیت‌های بودجه‌ای مدارس در ایران، فناوری‌های مبتنی بر TiO_2 ، ZnO و CCF می‌توانند به‌عنوان گزینه‌های اولویت‌دار معرفی شوند؛ زیرا نسبت هزینه-اثربخشی مطلوبی دارند و در بازه‌های زمانی طولانی، سلامت دانش‌آموزان و بازده آموزشی را بهبود می‌بخشند.

جدول 6- ارزیابی هزینه‌های فناوری‌های جاذب در نما برای فضاهای آموزشی

Tab. 6- Cost Evaluation of Adsorbent Technologies in Facades for Educational Spaces

فناوری	هزینه اجرا (USD/kg)	هزینه نگهداری (سالانه)	مناسب برای بودجه آموزشی
TiO_2 (فتوکاتالیتیک)	کم	کم (به دلیل خودپاک‌کنندگی و مکانیسم جذب)	بسیار مناسب
MOFs	خیلی زیاد	متوسط (نیاز به احیای دوره‌ای)	نامناسب
DACC	متوسط تا زیاد	کم	نسبتاً نامناسب
CCF با فتوکاتالیت	متوسط	کم	مناسب
ZnO در پوشش‌ها	کم - حدود	کم (به دلیل خودپاک‌کنندگی و مکانیسم جذب)	مناسب

با این حال، نادیده گرفتن محدودیت‌های ذاتی این فناوری‌ها و تمرکز صرف بر هزینه پایین، می‌تواند به تصمیم‌های کوتاه‌مدت و غیرپایدار منجر شود. آنچه اهمیت دارد، انتخابی است که ضمن توجه به هزینه‌ها، به اقتضای اقلیمی و نیازهای واقعی هر مدرسه نیز سازگار باشد.

3-4- تحلیل انتخاب فناوری‌ها بر اساس اقلیم چهارگانه ایران

انتخاب فناوری‌های تصفیه‌کننده هوا برای مدارس و فضاهای آموزشی در ایران نمی‌تواند رویکردی یک‌سان داشته باشد؛ زیرا شدت تابش خورشید، رطوبت نسبی، ترکیب آلاینده‌ها و حتی الگوهای بهره‌برداری از فضاها، در اقلیم‌های مختلف کشور تفاوت‌های بنیادین دارد. اگرچه کارایی برخی فناوری‌ها به شدت وابسته به شرایط محیطی است، اما با رویکرد ترکیبی می‌توان محدودیت‌ها را تعدیل کرد و بازدهی پایدار به دست آورد. در اقلیم سرد و کوهستانی، نور محدود و طولانی بودن فصل زمستان موجب می‌شود فناوری‌های کاملاً وابسته به تابش خورشید مانند TiO_2 بازدهی کمتری داشته باشند. در این شرایط، استفاده از MOFs با جذب شیمیایی مستقل از نور، همراه با CCF که ترکیبی از جذب فیزیکی و فتوکاتالیز ارائه می‌دهد، گزینه‌ای متعادل محسوب می‌شود. این ترکیب نه تنها آلاینده‌های ناشی از احتراق سوخت‌های گرمایشی (PM)، NO_x را هدف قرار می‌دهد، بلکه بخشی از اثر کاهش نور بر فرایند فتوکاتالیتیک را نیز جبران می‌کند. در اقلیم معتدل و مرطوب شمال کشور، مسئله اصلی نه غلظت گازهای احتراقی بلکه رشد قارچ، کپک و حضور میکروارگانیسم‌هاست. اگرچه رطوبت بالا موجب افت پایداری برخی MOFs می‌شود، اما ترکیب ZnO با CCF می‌تواند به راهکاری پایدار بدل شود. ZnO با خاصیت ضدقارچی و ضدباکتریایی خود به طور مستقیم بر چالش اصلی این مناطق اثر می‌گذارد، در حالی که CCF ظرفیت جذب ذرات معلق و VOCها را حفظ می‌کند. بدین ترتیب، ترکیب این دو فناوری اثرات منفی رطوبت را به حداقل رسانده و عملکرد چندبعدی فراهم می‌سازد. در اقلیم گرم و خشک، شدت بالای تابش خورشید شرایط ایده‌آلی برای استفاده از TiO_2 فراهم

می‌کند. با این حال، وابستگی مطلق به نور در ساعات شبانه یا شرایط گردوغبار شدید، بازدهی را محدود می‌سازد. ترکیب TiO_2 با CCF، نه تنها امکان فعالیت مداوم بخش جذب فیزیکی را در نبود نور فراهم می‌آورد، بلکه کارایی سیستم را در برابر طیف وسیع‌تری از آلاینده‌ها مانند SO_x و VOCها افزایش می‌دهد. در نتیجه، این اقلیم بیشترین ظرفیت بهره‌گیری از فناوری‌های فتوکاتالیتیک ترکیبی را داراست. در اقلیم گرم و مرطوب جنوب کشور، رطوبت بسیار بالا و تراکم جمعیتی مدارس، شرایطی ایجاد می‌کند که علاوه بر آلاینده‌های گازی، افزایش غلظت CO_2 و تکثیر میکروارگانیسم‌ها نیز تهدید جدی است. اگرچه کارایی برخی فناوری‌ها مانند MOFs در این محیط افت می‌کند، اما ترکیب ZnO به دلیل پایداری در رطوبت و خاصیت ضدباکتریایی، همراه با فناوری‌های مکمل جذب کربن (نظیر DACC یا برخی MOFs مقاوم به رطوبت)، می‌تواند هم‌زمان مشکل رشد میکروبی و افزایش CO_2 داخلی را کنترل کند. به طور کلی، اگرچه هر فناوری در یک اقلیم خاص با محدودیت‌هایی روبه‌رو است، اما رویکرد ترکیبی، امکان هم‌افزایی و کاهش ریسک افت عملکرد را فراهم می‌آورد. در این میان، سه فناوری کلیدی TiO_2 ، ZnO و CCF به عنوان «هسته اصلی» انتخاب‌ها در اقلیم‌های مختلف ایران توصیه می‌شوند، در حالی که MOFs و DACC به عنوان فناوری‌های مکمل و شرایط‌محور به کار گرفته می‌شوند. چنین راهبردی، نه تنها کارایی فنی را تضمین می‌کند، بلکه با کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش تطبیق‌پذیری اقلیمی، به گزینه‌ای پایدار و اقتصادی برای مدارس کشور بدل خواهد شد.

3-5- راهکارهای اجرایی پیشنهادی برای مدارس ایران

با توجه به تنوع اقلیمی ایران و محدودیت‌های مالی در بخش آموزش، انتخاب راهکارهای بهبود کیفیت هوای مدارس نمی‌تواند صرفاً بر پایه هزینه اولیه انجام گیرد؛ بلکه لازم است اثربخشی زیست‌محیطی، دوام عملکردی و بازگشت سرمایه نیز در نظر گرفته شود. تجارب بین‌المللی نشان می‌دهد که راهکارهای کم‌هزینه مانند پوشش‌های فتوکاتالیتیک، اگرچه به تنهایی قادر به رفع

مدرسسه را نیز ارتقا دهد. بی‌توجهی به این مرحله می‌تواند موجب تناقض عملکردی شود؛ جایی که کلاس‌ها سالم‌تر می‌شوند اما محوطه باز — که برای سلامت جسمی و روانی دانش‌آموزان حیاتی است — همچنان آلوده باقی می‌ماند.

4-5-3- طراحی نماهای دوپوسته با ادغام فناوری‌های سبز

نماهای دوپوسته با ادغام پوشش‌های فتوکاتالیتیک و فناوری‌های سبز مانند نمای گیاهی یا فتوبیورآکتورها پیشرفته‌ترین گزینه هستند. این روش علاوه بر بهبود کیفیت هوا، به صرفه‌جویی انرژی و ارتقای زیباشناسی محیط کمک می‌کند. هرچند هزینه اولیه آن بالاست و اجرای گسترده در مدارس موجود دشوار است، اما در چشم‌انداز بلندمدت، نادیده گرفتن این گزینه به معنای محروم شدن از ظرفیت‌های پایدار انرژی و سلامت خواهد بود.

به‌طور کلی، راهکارهای کم‌هزینه نظیر پوشش‌های فتوکاتالیتیک داخلی (شکل 4) باید به‌عنوان اولین گام سریع و اثرگذار در مدارس ایران اجرا شوند. این فناوری‌ها می‌توانند به‌طور مستقیم بر آلاینده‌های گازی و میکروبی اثر بگذارند و با هزینه اندک، سلامت محیط آموزشی را بهبود دهند. با این حال، برای دستیابی به پایداری بلندمدت و پوشش طیف وسیع‌تر آلاینده‌ها، باید این فناوری‌ها در مراحل بعدی با پنل‌های جاذب داخلی و پوشش‌های بیرونی تکمیل شوند. در نهایت، نماهای دوپوسته با ادغام فناوری‌های سبز (شکل 5) می‌توانند بالاترین سطح کارایی، بهره‌وری انرژی و ارتقای زیست‌پذیری را ایجاد کنند. چنین رویکرد مرحله‌ای و تلفیقی، ضمن مدیریت محدودیت‌های اقلیمی و مالی، تضمین می‌کند که سرمایه‌گذاری در بهبود کیفیت هوا، واقعا به ارتقای سلامت و بازده آموزشی دانش‌آموزان منجر شود.

کامل تمامی آلاینده‌ها نیستند، اما می‌توانند آغازگر یک تحول فوری و اثرگذار در بهبود کیفیت هوای داخلی مدارس باشند. نقطه ضعف طبیعی این فناوری‌ها در حذف ذرات معلق (PM) به معنای ناکارآمدی آن‌ها نیست، بلکه صرفاً نشان می‌دهد که برای دستیابی به پایداری بلندمدت و پوشش‌دهی جامع آلاینده‌ها، باید این روش‌ها به‌تدریج با فناوری‌های مکمل مانند پنل‌های جاذب و پوشش‌های بیرونی ترکیب شوند.

1-5-3- کاربرد نانوذرات در مصالح و رنگ‌های داخلی

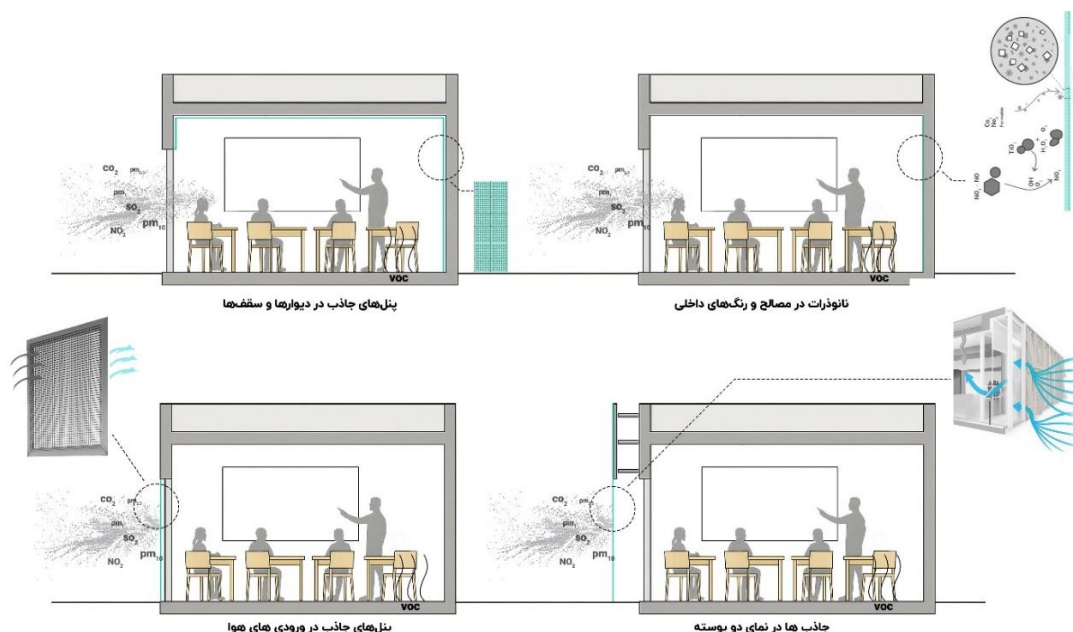
استفاده از پوشش‌های TiO_2 و ZnO ساده‌ترین و کم‌هزینه‌ترین گام برای مدارس است. این فناوری‌ها توانایی کاهش VOCها و NO_x و عوامل میکروبی را دارند و با توجه به خاصیت خودتمیزشوندگی، نیاز اندکی به نگهداری دارند. اگرچه در حذف ذرات معلق عملکرد محدودی دارند، اما به‌عنوان اولین گام عملی و فوری می‌توانند اثر قابل توجهی در بهبود کیفیت هوای کلاس‌ها ایجاد کنند.

2-5-3- نصب پنل‌های جاذب در دیوارها و سقف‌ها

پنل‌های MOFs یا CCF می‌توانند به‌عنوان فناوری مکمل عمل کرده و شکاف عملکردی پوشش‌های داخلی را پر کنند. این پنل‌ها ظرفیت بالاتری در جذب PM و برخی گازهای خاص دارند و در صورت طراحی صحیح، می‌توانند مزایای جانبی مانند عایق صوتی نیز فراهم کنند. هزینه متوسط و نیاز به احیای دوره‌ای برخی از آن‌ها چالشی است، اما در ترکیب با رنگ‌های فتوکاتالیتیک، یک گزینه میانی ارزشمند محسوب می‌شوند.

3-5-3- کاربرد فناوری‌های جاذب در نمای خارجی

پوشش دادن نمای بیرونی با TiO_2 یا ZnO استفاده از پنل‌های CCF می‌تواند گام تکمیلی مؤثری باشد که علاوه بر بهبود هوای داخلی، کیفیت هوای محوطه



شکل 4 - راهکارهای اجرایی پیشنهادی برای مدارس ایران

Fig. 4-Proposed Implementation Strategies for Schools in Iran



شکل 5 - استفاده از نانو ذرات در مصالح و متريال‌های داخلی برای حذف آلاینده‌ها

Fig. 5-Use of Nanoparticles in Interior Materials and Components for Pollutant Removal

4- نتیجه‌گیری

خودتمیز شونده‌گی و خاصیت ضدباکتریایی، مناسب‌ترین گزینه برای آغاز مداخلات در مدارس محسوب می‌شوند. هرچند این فناوری‌ها به‌تنهایی قادر به حذف کامل آلاینده‌ها نیستند، اما می‌توانند به‌عنوان گام اول، بهبود سریع و ملموسی در کیفیت هوای داخلی ایجاد کنند. در ادامه، فناوری‌های مکمل نظیر فیلترهای CCF و پنل‌های جاذب مبتنی بر MOFs، با وجود هزینه و پیچیدگی بالاتر، امکان پوشش‌دهی به آلاینده‌های خاص (مانند VOCها، SO₂ و ذرات معلق) را فراهم

یافته‌های این پژوهش نشان داد که فناوری‌های نوین جذب و تصفیه هوا، اگرچه هر یک محدودیت‌های عملکردی و اقتصادی خاص خود را دارند، اما در صورت انتخاب هوشمندانه و ترکیبی می‌توانند به راهکاری پایدار برای ارتقای کیفیت محیط‌های آموزشی در ایران تبدیل شوند. بررسی تطبیقی نشان داد که پوشش‌های فتوکاتالیتیک مبتنی بر ZnO و TiO₂، به دلیل هزینه پایین، سهولت کاربرد و مزایای هم‌چون

Anirudhan, T., & Sreekumari, S. (2011). Adsorptive removal of heavy metal ions from industrial effluents using activated carbon derived from waste coconut buttons. *Journal of Environmental Sciences*, 23(12), 1989-1998. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60515-3](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60515-3)

Anus, A., Sheraz, M., Kim, S., & Lee, W. R. (2023). Visible light-activated photocatalytic activity of TiO₂-crystal violet based superhydrophobic paint against VOCs in indoor air. *Environmental Science: Advances*, 2(1), 69-77. <https://doi.org/10.1039/d2va00120a>

Ashraf, W., & Olek, J. (2018). Carbonation activated binders from pure calcium silicates: Reaction kinetics and performance controlling factors. *Cement and Concrete Composites*, 93, 85-98. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.07.004>.

Bastos, G., Patiño-Barbeito, F., Patiño-Cambeiro, F., & Armesto, J. (2016). Admixtures in cement-matrix composites for mechanical reinforcement, sustainability, and smart features. *Materials*, 9(12), 972. <https://doi.org/10.3390/ma9120972>

Baudys, M., Andrews, R., Han, R., O'Rourke, C., Hodgen, S., Krysa, J., & Mills, A. (2021). Photocatalytic paints for NO_x removal: Influence of various weathering conditions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 106172. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106172>

Beeldens, A. (2008). Air purification by pavement blocks: final results of the research at the BRRC. *Air purification by pavement blocks: final results of the research at the BRRC. Proceedings of Transport Research Arena Europe (TRA)*, Ljubljana, Slovenia. Retrieved from <https://www.scribd.com/document/540149677/>

می‌آورند و در ترکیب با پوشش‌های داخلی، شکاف عملکردی آن‌ها را پر می‌کنند. فناوری DACC نیز اگرچه از نظر فنی پیشرفته است و نقش ویژه‌ای در حذف CO₂ ایفا می‌کند، اما به دلیل دامنه محدود عملکرد و هزینه زیاد، تنها در شرایط خاص و پروژه‌های پایلوت توصیه می‌شود. تحلیل اقلیمی نشان داد که هیچ فناوری واحدی قادر به پاسخ‌گویی جامع در کل کشور نیست. در اقلیم‌های پرنور و خشک، فناوری‌های فتوکاتالیتیک بیشترین بازدهی را دارند؛ در حالی که در مناطق مرطوب، ترکیب ZnO با CCF کارکرد مؤثرتری دارد. در اقلیم‌های سرد و کم‌نور، حضور فناوری‌های جذب شیمیایی مانند MOFs می‌تواند محدودیت وابستگی به نور را جبران کند. این یافته‌ها بیانگر آن است که رویکرد مرحله‌ای، ترکیبی و اقلیم‌محور تنها مسیر پایدار برای بهبود کیفیت هوای مدارس ایران است. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب فناوری‌های بهبود کیفیت هوا در مدارس نباید صرفاً بر اساس هزینه اولیه یا یک شاخص منفرد صورت گیرد؛ بلکه باید در چارچوبی یکپارچه، شامل کارایی فنی، ملاحظات اقتصادی، سازگاری اقلیمی و بازگشت سرمایه اجتماعی مورد ارزیابی قرار گیرد. راهبرد پیشنهادی این پژوهش، اجرای تدریجی از پوشش‌های کم‌هزینه داخلی تا ادغام فناوری‌های پیشرفته در نماهای دوپوسته، مدلی واقع‌بینانه و پایدار را ترسیم می‌کند که می‌تواند ضمن مدیریت محدودیت‌های بودجه‌ای، سلامت دانش‌آموزان و بازده آموزشی را به‌طور بلندمدت تضمین نماید.

References

Alves, C., Duarte, M., Ferreira, M., Alves, A., Almeida, A., Cunha, A., 2016. Air quality in a school with dampness and mould problems. *Air Qual. Atmos. Health* 9, 107-115. <https://doi.org/10.1007/s11869-015-0319-6>

Al-Zaidi, B.M., Markaryan, A.S., 2020. Eating air pollution using building's façade technology. *Period. Eng. Nat. Sci.* 8 (4), 2218-2231. URL: <https://uobasrah.edu.iq/research/sciresearch/32023>

indoor air quality in Swedish primary school classrooms. *Build. Environ.* 226, 109744. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109744>

Cavaleiro Rufo, J., Madureira, J., Paciência, I., Slezakova, K., Pereira, M. do C., Aguiar, L., Teixeira, J.P., Moreira, A., Oliveira Fernandes, E., 2016. Children exposure to indoor ultrafine particles in urban and rural school environments. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 23, 13877–13885. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6555-y>

Chatzidiakou, L., Mumovic, D., & Summerfield, A. (2015). Is CO₂ a good proxy for indoor air quality in classrooms? Part 1: The interrelationships between thermal conditions, CO₂ levels, ventilation rates and selected indoor pollutants. *Building Services Engineering Research and Technology*, 36(2), 129-161. <https://doi.org/10.1177/0143624414566244>

Chatzidiakou, L., Mumovic, D., & Summerfield, A. J. (2012). What do we know about indoor air quality in school classrooms? A critical review of the literature. *Intelligent Buildings International*, 4(4), 228-259. <https://doi.org/10.1080/17508975.2012.725530>

Chaudhari, A.K., et al., 2017. Optochemically responsive 2D nanosheets of a 3D metal-organic framework material. *Adv. Mater.* 29 (27), 1701463. <https://doi.org/10.1002/adma.201701463>

Che, W., Xiao, Z., Wang, Z., Li, J., Wang, H., Wang, Y., & Xie, Y. (2019). Wood-based mesoporous filter decorated with silver nanoparticles for water purification. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(5), 5134-5141. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b06001>

Chen, C., Kuang, Y., Zhu, S., Burgert, I., Keplinger, T., Gong, A., Li, T., Berglund, L., Eichhorn, S. J., & Hu, L. (2020). Structure–property–function relationships of natural and

Air-purification-by-pavement-blocks-final-results-of-the-research-at-the-BRRC

Bernstein, A., Sargent, E. H., Aspuru-Guzik, A., Cogdell, R., Fleming, G. R., Van Grondelle, R., & Molina, M. (2016). Renewables need a grand-challenge strategy. *Nature*, 538(7623), 30-30. <https://doi.org/10.1038/538030a>

Bersch, J.D., et al., 2023. Photocatalytic TiO₂-based coatings for mortars on facades: a review of efficiency, durability, and sustainability. *Buildings* 13 (1), 186. <https://doi.org/10.3390/buildings13010186>

Besserer, A., Troilo, S., Girods, P., Rogaume, Y., & Brosse, N. (2021). Cascading recycling of wood waste: A review. *Polymers*, 13(11), 1752. <https://doi.org/10.3390/polym13111752>

Beuttler, C., Charles, L., Wurzbacher, J., 2019. The role of direct air capture in mitigation of anthropogenic greenhouse gas emissions. *Front. Clim.* 1, 10. <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00010>

Brdarić, D., Kovač-Andrić, E., Šapina, M., Kramarić, K., Lutz, N., Perković, T., Egorov, A., 2019. Indoor air pollution with benzene, formaldehyde, and nitrogen dioxide in schools in Osijek, Croatia. *Air Qual. Atmos. Heal.* 12, 963–968. <https://doi.org/10.1007/s11869-019-00715-7>

Bryan, H., & Salamah, F. B. (2019). *Building-integrated carbon capture: Carbon dioxide removal through buildings' mechanical systems*. 320-327. Paper presented at 7th International Conference On Energy Research and Development, ICERD 2019, Kuwait City, Kuwait. Retrieved from <https://www.scopus.com/pages/publications/85093975037>

Cabovská, B., Beková, G., Teli, D., Ekberg, L., Dalenbäck, J.-O., Wargocki, P., Psomas, T., Langer, S., 2022. Ventilation strategies and



EPA U.S. (August 2003). Indoor air quality & student performance. Environmental Protection Agency U.S. 402-K-03-006. pp. 1–8. Retrieved from

<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=901X0B0P.PDF>

Elattar, S., Abdullah, I., & Gebriel, A. Methodology of Using Photocatalysis to Improve Indoor Air Quality in Educational Spaces in Universities. *Available at SSRN 5156949*. <https://ssrn.com/abstract=5156949>

Fang, Y., et al., 2018. Metal-organic frameworks for solar energy conversion by photoredox catalysis. *Coord. Chem. Rev.* 373, 83-115. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2017.09.013>

Ferreira-Neto, E. P., Ullah, S., Martinez, V. P., Yabarrena, J. M. C., Simões, M. B., Perissinotto, A. P., Wender, H., de Vicente, F. S., Noeske, P.-L. M., & Ribeiro, S. J. (2021). Thermally stable SiO₂@TiO₂ core@shell nanoparticles for application in photocatalytic self-cleaning ceramic tiles. *Materials Advances*, 2(6), 2085-2096.

<https://doi.org/10.1039/D0MA00785D>

Gall, E. T., Corsi, R. L., & Siegel, J. A. (2011). Barriers and opportunities for passive removal of indoor ozone. *Atmospheric Environment*, 45(19), 3338-3341.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.03.032>

Gámez-Espinosa, E., Bellotti, N., Deyá, C., & Cabello, M. (2020). Mycological studies as a tool to improve the control of building materials biodeterioration. *Journal of Building Engineering*, 32, 101738.

<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101738>

Guan, H., Cheng, Z., & Wang, X. (2018). Highly compressible wood sponges with a spring-like lamellar structure as effective and reusable oil absorbents. *ACS nano*, 12(10), 10365-10373. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b05763>

engineered wood. *Nature Reviews Materials*, 5(9), 642-666.

<https://doi.org/10.1038/s41578-020-0195-z>

Chen, J., & Poon, C.-s. (2009). Photocatalytic construction and building materials: from fundamentals to applications. *Building and environment*, 44(9), 1899-1906.

<https://doi.org/10.1038/s41578-020-0195-z>

Curado, A., Silva, J.P., Lopes, S.I., 2020. Radon risk assessment in a low-energy consumption school building: a dosimetric approach for effective risk management. *Energy Rep.* 6, 897–902.

<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.11.155>

Da Silva, C., Stefanowski, B., Maskell, D., Ormondroyd, G., Ansell, M., Dengel, A., & Ball, R. (2017). Improvement of indoor air quality by MDF panels containing walnut shells. *Building and environment*, 123, 427-436.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.015>

Daglar, H., et al., 2022. Metal-organic framework-based materials for the abatement of air pollution and decontamination of wastewater. *Chemosphere* 303, 135082.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135082>

Dambruoso, P. R., de Gennaro, G., Loiotile, A. D., Di Gilio, A., Giungato, P., Marzocca, A., Mazzone, A., Palmisani, J., Porcelli, F., & Tutino, M. (2013). School air quality: pollutants, monitoring and toxicity. *Pollutant Diseases, Remediation and Recycling*, 1-44.

https://doi.org/10.1007/978-3-319-02387-8_1

Enea, D., Bellardita, M., Scalisi, P., Alaimo, G., & Palmisano, L. (2019). Effects of weathering on the performance of self-cleaning photocatalytic paints. *Cement and Concrete Composites*, 96, 77-86.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.11.013>

Jovanović, M., Vučković, B., Turanjanin, V., Živković, M., Spasojević, V., 2014. Investigation of indoor and outdoor air quality of the classrooms at a school in Serbia. *Energy* 77, 42–48.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.03.080>

Kabirikopaei, A., Lau, J., Nord, J., & Bovaird, J. (2021). Identifying the K-12 classrooms' indoor air quality factors that affect student academic performance. *Science of the Total Environment*, 786, 147342.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147498>

Karimi, M., Shirzad, M., Silva, J. A., & Rodrigues, A. E. (2023). Carbon dioxide separation and capture by adsorption: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(4), 2041-2084.

<https://doi.org/10.1007/s10311-023-01589-z>

Karmakar, A., Velasco, E., Li, J., 2022. Metal-organic frameworks as effective sensors and scavengers for toxic environmental pollutants. *Natl. Sci. Rev.* 9 (7).

<https://doi.org/10.1093/nsr/nwac091>

Kovalev, I., Guskov, R., Gongola, M., Popov, M., Chizhik, S., & Nemudry, A. (2024). Oxygen exchange kinetics on La_{0.6}Sr_{0.4}FeO_{3-δ}. *Ceramics International*, 50(7), 11855-11861.

<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.01.089>

Kwon, H.J., et al., 2023. Long-lifetime water-washable ceramic catalyst filter for air purification. *Nat. Commun.* 14 (1), 520.

<https://doi.org/10.1038/s41467-023-36050-w>

Lazović, I. M., Stevanović, Ž. M., Jovašević-Stojanović, M. V., Živković, M. M., & Banjac, M. J. (2016). Impact of CO₂ concentration on indoor air quality and correlation with relative humidity and indoor air temperature in school buildings in Serbia. *Thermal Science*, 20(suppl. 1), 297-307.

<https://doi.org/10.2298/TSCI150831173L>

Guo, M.-Z., Chen, J., Xia, M., Wang, T., & Poon, C. S. (2018). Pathways of conversion of nitrogen oxides by nano TiO₂ incorporated in cement-based materials. *Building and environment*, 144, 412-418.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.056>

Gutarowska, B. (2014). Moulds in biodeterioration of technical materials. *Acta Universitatis Lodzianae. Folia Biologica et Oecologica*, 10, 27-39.

<https://doi.org/10.2478/fobio-2014-0012>

Hänninen, O., Canha, N., Kulinkina, A.V., Dume, I., Deliu, A., Mataj, E., Lusati, A., Krzyzanowski, M., Egorov, A.I., 2017. Analysis of CO₂ monitoring data demonstrates poor ventilation rates in Albanian schools during the cold season. *Air Qual. Atmos. Health* 10, 773–782.

<https://doi.org/10.1007/s11869-017-0469-9>

Igwe, A.E., et al., 2022. Architectural mitigating strategies for air pollution in the built environment. In: *IOP conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing.

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1054/1/012046>

Jiang, J., Wang, D., Liu, Y., Xu, Y., & Liu, J. (2018). A study on pupils' learning performance and thermal comfort of primary schools in China. *Building and Environment*, 134, 102-113.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.036>

Jiang, Q., Qi, T., Yang, T., & Liu, Y. (2019). Ceramic tiles for photocatalytic removal of NO in indoor and outdoor air under visible light. *Building and environment*, 158, 94-103.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.05.014>

Jin, Y., et al., 2023. Metal-organic frameworks for air pollution purification and detection. *Adv. Funct. Mater.* 2304773.

<https://doi.org/10.1002/adfm.202304773>



organic frameworks prepared by in situ growth method for gas adsorption and antibacterial applications. *Cellulose* 25, 5999-6010. <https://doi.org/10.1007/s10570-018-1982-1>

Ma, X. (2005). *Emergent Social Complexity in the Yangshao Culture: Analyses of settlement patterns and faunal remains from Lingbao, western Henan, China (c. 4900-3000 BC)*. Archaeopress. <https://ehrafarchaeology.yale.edu/document?id=af48-007>

Ma, X., et al., 2019. Metal-organic framework films and their potential applications in environmental pollution control. *Acc. Chem. Res.* 52 (5), 1461-1470. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.9b00113>

Madureira, Joana, Paciência, I., Rufo, J., Moreira, A., de Oliveira Fernandes, E., Pereira, A., 2016. Radon in indoor air of primary schools: determinant factors, their variability and effective dose. *Environ. Geochem. Health* 38, 523-533. <https://doi.org/10.1007/s10653-015-9737-5>

Maier, D. (2023). A review of the environmental benefits of using wood waste and magnesium oxychloride cement as a composite building material. *Materials*, 16(5), 1944. <https://doi.org/10.3390/ma16051944>

Malinowska, I., Paszkiewicz, O., Markowska-Szczupak, A., & Zielińska-Jurek, A. (2024). New trifunctional acrylic water-based paint with self-cleaning, biocidal and magnetic properties. *Ceramics International*, 50(1), 819-828. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.10.166>

Mannan, M., Al-Ghamdi, S.G., 2021. Indoor air quality in buildings: a comprehensive review on the factors influencing air pollution in residential and commercial structure. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 18 (6). <https://doi.org/10.3390/ijerph18063276>

Lee, M., et al., 2021. Mitigation of particulate matter and airborne pathogens in swine barn emissions with filtration and UV-A photocatalysis. *Catalysts* 11 (11), 1302. <https://doi.org/10.3390/catal11111302>

Li, J., Xu, Z., Xia, Y., Gao, P., Peng, J., Shen, Q., & Wang, C. (2024). Strategy for preparing nanocrystalline Ta-N gradient layer with enhanced mechanical and tribological performance via microwave plasma nitriding. *Ceramics International*, 50(21), 41636-41647. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.08.013>

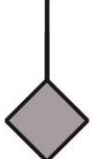
Li, P., Li, J., Feng, X., Li, J., Hao, Y., Zhang, J., ... & Wang, B. (2019). Metal-organic frameworks with photocatalytic bactericidal activity for integrated air cleaning. *Nature communications*, 10(1), 2177. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10218-9>

Liu, G., Fei, H., Wu, J., Zhang, J., Zhao, T., Guo, W., Wang, X., & Yang, S. (2024). Enhancement of carbonation, water purification and CO₂ self-sequestration in hydrophobic piezophotocatalytic carbonation coating for concrete. *Cement and Concrete Composites*, 154, 105756. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105756>

Liu, G., Xiao, M., Zhang, X., Gal, C., Chen, X., Liu, L., ... & Clements-Croome, D. (2017). A review of air filtration technologies for sustainable and healthy building ventilation. *Sustainable cities and society*, 32, 375-96. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.04.011>

Luengas, A., Barona, A., Hort, C., Gallastegui, G., Platel, V., & Elias, A. (2015). A review of indoor air treatment technologies. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 14, 499-522. <https://doi.org/10.1007/s11157-015-9363-9>

Ma, S., et al., 2018. Multifunctional cellulose-based air filters with high loadings of metal-



<https://patents.google.com/patent/US7311766B2/en>

Oliveira, M., Slezakova, K., Delerue-Matos, C., Pereira, M. C., & Morais, S. (2019). Children environmental exposure to particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbons and biomonitoring in school environments: A review on indoor and outdoor exposure levels, major sources and health impacts. *Environment international*, 124, 180-204.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.12.052>

Organization, W. H. (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization.
<https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>

Pallarés, S., Gómez, E. T., Martínez-Poveda, Á., & Jordán, M. M. (2021). Distribution Levels of Particulate Matter Fractions (< 2.5 µm, 2.5–10 µm and > 10 µm) at Seven Primary Schools in a European Ceramic Cluster. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(9), 4922.
<https://doi.org/10.3390/ijerph18094922>

Parasuraman, V., Sekar, P. P., Lee, H., Sheraz, M., Ly, H. N., Azizar, G. A. B., ... & Kim, S. (2024). Photocatalytic self-cleaning eco-friendly paint: A unique approach for efficient indoor air pollutant removal and surface disinfection. *Construction and Building Materials*, 412, 134671.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134671>

Ramadhan, A.M., Mahmoud, A.H., 2023. Evaluating the efficiency of a living wall facade as a sustainable energy-saving alternative in hot arid regions. *J. Eng. Appl. Sci.* 70 (1), 96.
<https://doi.org/10.1186/s44147-023-00259-9>

Rassia, S.T., 2020. How architecture fails in conditions of crisis: a discussion on the value of

Maury-Ramírez, A., Rinke, M., & Blom, J. (2024). Low-Carbon Embodied, Self-Cleaning, and Air-Purifying Building Envelope Components Using TiO₂ Photocatalysis, 3D Printing, and Recycling. *Coatings*, 14(9), 1228.
<https://doi.org/10.3390/coatings14091228>

Meřciarov' a, L., Vil' cekov' a, S., Křídlov'a Burdov'a, E., Kapalo, P., Miha l' ov'a, N., 2018. The real and subjective indoor environmental quality in schools. *Int. J. Environ. Health Res.* 28, 102–123.
<https://doi.org/10.1080/09603123.2018.1429579>

Monteiro, R. A., Lopes, F. V., Silva, A. M., Ângelo, J., Silva, G. V., Mendes, A. M., Boaventura, R. A., & Vilar, V. J. (2014). Are TiO₂-based exterior paints useful catalysts for gas-phase photooxidation processes? A case study on n-decane abatement for air detoxification. *Applied Catalysis B: Environmental*, 147, 988-999.
<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2013.09.031>

Mughis Raza Naqvi, C.L.A.A.W., 2021. Controlling Air Pollution with Ceramic Catalytic Filters. *CHEMENG Online*. Retrieved from <https://www.chemengonline.com/controlling-air-pollution-with-ceramic-catalytic-filters/>

Nathanson, J., 2019. Air pollution control. In: *Encyclopedia Britannica*. Retrieved 29/01/2021 Available from: <https://www.britannica.com/technology/air-pollution-control>.

Nieto-Márquez, A., de Mateo, M., Barrios, A., de la Fuente, M. D. M., & Narros, A. (2023). Improving indoor air quality by using photocatalytic paints. Real scale study at the Technical University of Madrid. *Atmospheric Pollution Research*, 14(8), 101827.
<https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101827>

Nyden, M., & Fant, C. (2008). Method and use of nanoparticles to bind biocides in paints. In: *Google Patents*. Retrieved from



up to 20 years. In: Samsung Introduces Easily Regenerable Air Purification Filter Technology Applying Photocatalysts on February 16, 2023; Available from: [https://news.samsung.com/medialibrary/global/search/Air%](https://news.samsung.com/medialibrary/global/search/Air%20)

Satish, U., Mendell, M. J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, S., & Fisk, W. J. (2012). Is CO₂ an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance. *Environmental health perspectives*, 120(12), 1671-1677. <https://doi.org/10.1289/ehp.11047>

Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., & Bolio, H. (2011). Sustainable cement production—present and future. *Cement and concrete research*, 41(7), 642-650. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.019>

Shen, W., Zhang, C., Li, Q., Zhang, W., Cao, L., & Ye, J. (2015). Preparation of titanium dioxide nano particle modified photocatalytic self-cleaning concrete. *Journal of cleaner production*, 87, 762-765. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.014>

Shen, Y., Jiang, L., Shen, P., Peng, L., Poon, C.-s., & Wang, F. (2024). Development of photocatalytic carbonation coating for concrete: Enhancement of air quality and sequestration of CO₂. *Cement and Concrete Composites*, 145, 105308. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105308>

Shi, C., Qu, B., & Provis, J. L. (2019). Recent progress in low-carbon binders. *Cement and concrete research*, 122, 227-250. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.009>

Si, Y., et al., 2018. Daylight-driven rechargeable antibacterial and antiviral nanofibrous membranes for bioprotective applications. *Sci.*

interior design over the COVID-19 outbreak. *SN Oper. Res. Forum* 1 (3), 13. <https://doi.org/10.1007/s43069-020-0014-9>

Reiß, F., Kiefer, N., Noll, M., & Kalkhof, S. (2021). Application, release, ecotoxicological assessment of biocide in building materials and its soil microbial response. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 224, 112707. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112707>

S'a, J.P., Branco, P.T.B.S., Alvim-Ferraz, M.C.M., Martins, F.G., Sousa, S.I.V., 2017. Evaluation of low-cost mitigation measures implemented to improve air quality in nursery and primary schools. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 14. <https://doi.org/10.3390/ijerph14060585>

Sadrizadeh, S., Yao, R., Yuan, F., Awbi, H., Bahnfleth, W., Bi, Y., Cao, G., Croitoru, C., De Dear, R., & Haghighat, F. (2022). Indoor air quality and health in schools: A critical review for developing the roadmap for the future school environment. *Journal of Building Engineering*, 57, 104908. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104908>

Saeli, M., et al., 2018. A sustainable replacement for TiO₂ in photocatalyst construction materials: hydroxyapatite-based photocatalytic additives, made from the valorisation of food wastes of marine origin. *J. Clean. Prod.* 193, 115-127. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.030>

Salvadores, F., Reli, M., Alfano, O. M., Kočí, K., & Ballari, M. d. l. M. (2020). Efficiencies evaluation of photocatalytic paints under indoor and outdoor air conditions. *Frontiers in chemistry*, 8, 551710. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.551710>

Samsung Newsroom, 2023. Newly developed filter simultaneously removes particulate matter and volatile organic chemicals as primary air pollutants while retaining initial performance for

integrated hotobioreactors as a building façade. *Sustain Energy Technol Assess* 56, 103068. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103068>

Wang, H., et al., 2018. An iron-containing metal-organic framework as a highly efficient catalyst for ozone decomposition. *Angew. Chem. Int. Ed.* 57 (50), 16416-16420. <https://doi.org/10.1002/anie.201810268>

Wei, Y., Meng, H., Wu, Q., Bai, X., & Zhang, Y. (2023). TiO₂-based photocatalytic building material for air purification in sustainable and low-carbon cities: a review. *Catalysts*, 13(12), 1466. <https://doi.org/10.3390/catal13121466>

WENCEK, A. S., Zborowska, M., Pradzynski, W., & Waliszewska, B. (2015). Emissions of volatile organic compounds from lacquer coatings used in the furniture industry, modified with nanoparticles of inorganic metal compounds. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 39(2), 251-259. <https://doi.org/10.3906/tar-1405-24>

Xie, T. (2018, July). Indoor air pollution and control technology. In *IOP conference series: Earth and Environmental Science* (Vol. 170, p. 032084). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/170/3/032084>

Yan, X., Chen, M., Wang, J., Wang, Z., Xin, R., Wu, D., Song, Y., Li, S., Zhu, W., & Wang, C. (2024). Nanoarchitectonics of bamboo-based heterojunction photocatalyst for effective removal of organic pollutants. *Chemical Engineering Journal*, 495, 153431. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.153431>

Yang, J., Wang, G., Wang, D., Liu, C., & Zhang, Z. (2017). A self-cleaning coating material of TiO₂ porous microspheres/cement composite with high-efficient photocatalytic depollution performance. *Materials Letters*, 200, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.04.090>

Adv. 4 (3), eaar5931. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aar5931>

Sun, L., Wang, Z., Zang, M., 2023. Denitrification activity test of a V modified Mn-based ceramic filter. *RSC Adv.* 13 (29), 19965-19974. <https://doi.org/10.1039/D3RA02561F>

Soleymani, M., Amrollahi, R., Taghdir, S., & Barzegar, Z. (2024). Nanotechnology for thermal comfort and energy efficiency in educational buildings with a simulation and measurement approach in BSh climate. *Scientific Reports*, 14(1), 21502. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-72853-7>

Szabados, M., Csákó, Z., Kotlík, B., Kazmarov'a, H., Kozajda, A., Jutraz, A., Kukec, A., Otorepec, P., Dongiovanni, A., Di Maggio, A., Fraire, S., Szigeti, T., 2021. Indoor air quality and the associated health risk in primary school buildings in Central Europe – the InAirQ study. *Indoor Air* 31, 989–1003. <https://doi.org/10.1111/ina.12802>

Tanimola, J. O., & Efe, S. (2024). Recent Advances in Nano-Modified Concrete: Enhancing Durability, Strength, and Sustainability Through Nano Silica (nS) and Nano Titanium (nT) Incorporation. *Applications in Engineering Science*, 100189. <https://doi.org/10.1016/j.apples.2024.100189>

Ukëhaxhaj, A., Ramadani, N., Moshhammer, H., Zogaj, D., 2023. Sources of indoor air pollution in schools in Kosovo. *Buildings* 13. <https://doi.org/10.3390/buildings13030668>

Ukëhaxhaj, A., Ramadani, N., Moshhammer, H., & Zogaj, D. (2023). Sources of Indoor Air Pollution in Schools in Kosovo. *Buildings*, 13(3), 668. <https://doi.org/10.3390/buildings13030668>

Vajdi, S., Aslani, A., 2023. Design and techno-economic analysis of direct CO₂ capturing with



Zhang, Y., et al., 2021. Simultaneous removal of VOCs and PM_{2.5} by metal-organic framework coated electret filter media. *J. Membr. Sci.* 618, 118629.

<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118629>

Zhao, B., Liu, Y., Chen, C., 2020. Air purifiers: a supplementary measure to remove airborne SARS-CoV-2. *Build. Environ.* 177, 106918. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106918>

Zouari, M., Marrot, L., & DeVallance, D. B. (2024). Functional biocarbon-based coatings for wood protection and indoor air depollution. *Building and environment*, 261, 111716. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111716>

Yaseen Sharaf Zeebaree, A., et al., 2022. Sustainable engineering of plant-synthesized TiO₂ nanocatalysts: diagnosis, properties and their photocatalytic performance in removing of methylene blue dye from effluent. A review. *Curr. es. Green Sustain.Chem.* 5, 100312. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2022.100312>

Zhang, G., Spickett, J., Rumchev, K., Lee, A., & Stick, S. (2006). Indoor environmental quality in a 'low allergen'school and three standard primary schools in Western Australia. *Indoor air*, 16(1). <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2005.00405.x>