

A Review of Strategies for Improving Indoor Environmental Quality in Schools, with Emphasis on Transparent Building Envelopes, Thermal Comfort, and Indoor Air Quality in Semi-Hot and Arid Climates

1. Rasa Koshani[✉]: Ph.D. Student, Department of Architecture, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran

2. Mohammad Parva^{✉*}: Department of Architecture, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran.

3. Heydar Jahanbakhsh[✉]: Associate Professor, Department of Architecture, Faculty of Technology and Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

4. Vahideh Hojati[✉]: Department of Urban Planning, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran

*Corresponding Author's Email Address: mo.parva@iau.ac.ir

How to Cite: Koshani, R., Parva, M., Jahanbakhsh, H., & Hojati, V. (2026). A Review of Strategies for Improving Indoor Environmental Quality in Schools, with Emphasis on Transparent Building Envelopes, Thermal Comfort, and Indoor Air Quality in Semi-Hot and Arid Climates. *Manifestation of Art in Architecture and Urban Engineering*, 4(2), 1-23.

Abstract:

This systematic review synthesizes the factors associated with strategies for improving indoor environmental quality in schools located in semi-hot and arid climates, where high solar radiation, substantial temperature fluctuations ranging from 12°C to 42°C, low humidity, and frequent dust events create a fundamental trade-off among natural ventilation, mechanical cooling, and air filtration. No single strategy can simultaneously address all dimensions of indoor environmental quality. A systematic search was conducted in the ScienceDirect database for articles published between 2020 and 2026. Four keyword combinations covered transparent building envelopes and thermal comfort, indoor air quality, improvement strategies, and integrated indoor environmental quality models. Of the 1,200 articles identified, 25 were included after screening and were supplemented by four conference papers from Shiraz. A narrative synthesis was conducted using comparative summary tables. An optimal window-to-wall ratio of 15%–30%, combined with a south–southeast orientation, reduces cooling loads by 20%–40%, while dynamic shading systems combined with low-emissivity glazing achieve reductions of 36%–57%. In naturally ventilated classrooms, carbon dioxide concentrations exceed 1,000 ppm and reach 2,800–3,200 ppm when windows are closed, whereas particulate matter concentrations increase two- to fourfold, reaching 35–59 µg/m³, when windows are open. Photocatalytic filters remove 82%–96% of volatile organic compounds, while HEPA air purifiers reduce particulate matter concentrations by 14%–56%. Machine-learning models based on the Random Forest algorithm predict dissatisfaction with indoor environmental quality with an R² of 0.91 using carbon dioxide, volatile organic compounds, temperature, and humidity as predictor variables. Nevertheless, the three-way trade-off remains unresolved across all stand-alone strategies. This is the first integrated review specifically addressing indoor environmental quality in semi-hot and arid climates by combining four domains—building-envelope design, air-quality monitoring, improvement technologies, and integrated modeling—with field data from Shiraz. The proposed framework, comprising passive design, controlled ventilation with filtration, low-cost sensors, and machine-learning-based control, provides practical guidance for policymakers and practitioners. It also highlights key research gaps, including the need for long-term field studies, climate-specific machine-learning models, and the quantification of health outcomes in these understudied regions.

Keywords: indoor environmental quality; educational buildings; semi-hot and arid climate; thermal comfort; indoor air quality; transparent building envelope; photocatalytic filtration.

Received: 22 December 2025

Revised: 04 April 2026

Accepted: 12 April 2026

Published: 22 June 2026



Copyright: © 2026 by the authors. Published under the terms and conditions of Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License.

مروری بر راهبردهای بهبود کیفیت محیط داخلی در مدارس با تأکید بر پوسته‌های شفاف، آسایش حرارتی و کیفیت هوای داخلی در اقلیم‌های نیمه‌گرم و خشک

۱. رسا کشنی^{id}: دانشجوی دکتری، گروه معماری، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

۲. محمد پروا^{id}: گروه معماری، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران. (نویسنده مسئول)

۳. حیدر جهان‌بخش^{id}: دانشیار، گروه معماری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران

۴. وحیده حجتی^{id}: گروه شهرسازی، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

*پست الکترونیک نویسنده مسئول: mo.parva@iau.ac.ir

نحوه استناددهی: کشنی، رسا، پروا، محمد، جهان‌بخش، حیدر، و حجتی، وحیده. (۱۴۰۵). مروری بر راهبردهای بهبود کیفیت محیط داخلی در مدارس با تأکید بر پوسته‌های شفاف، آسایش حرارتی و کیفیت هوای داخلی در اقلیم‌های نیمه‌گرم و خشک. *تجلی هنر در معماری و شهرسازی*، ۲۳(۲)، ۱-۲۳.

چکیده

این مرور سیستماتیک به ترکیب عوامل مربوط به راهبردهای کیفیت محیط داخلی در مدارس واقع در اقلیم‌های نیمه‌گرم و خشک می‌پردازد؛ مناطقی که تابش خورشیدی بالا، نوسانات دمایی شدید (۱۲ تا ۴۲ درجه سانتیگراد)، رطوبت کم و رویدادهای گردوغبار مکرر، مبادله‌ای اساسی بین تهویه طبیعی، سرمایش مکانیکی و فیلتراسیون ایجاد کرده‌اند. هیچ راهبرد واحدی قادر به حل همزمان تمام مسائل کیفیت محیط داخلی نیست. جستجوی سیستماتیک در پایگاه داده‌ی ساینس‌دایرکت برای مقالات منتشرشده بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۶ انجام شد. چهار ترکیب کلیدواژه، پوسته‌های شفاف و آسایش حرارتی، کیفیت هوای داخلی، راهبردهای بهبود، و مدل‌های یکپارچه‌ی کیفیت محیط داخلی را پوشش دادند. از ۱۲۰۰ مقاله، ۲۵ مقاله پس از غربالگری وارد شدند که با چهار مقاله‌ی کنفرانسی از شیراز تکمیل شده‌اند. ترکیب روایی با استفاده از جداول خلاصه‌ی مقایسه‌ای انجام شد. نسبت بهینه‌ی پنجره به دیوار (۱۵ تا ۳۰ درصد) با جهت‌گیری جنوب-جنوب شرقی، بار سرمایش را ۲۰ تا ۴۰ درصد و سایه‌بان پویا همراه با شیشه‌ی کم‌گسیل، آن را ۳۶ تا ۵۷ درصد کاهش می‌دهد. در کلاس‌های با تهویه طبیعی، دی‌اکسیدکربن از ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام فراتر رفته و در حالت بسته بودن پنجره‌ها به ۲۸۰۰ تا ۳۲۰۰ پی‌پی‌ام می‌رسد، در حالی که ذرات معلق در حالت باز بودن پنجره‌ها دو تا چهار برابر (۳۵ تا ۵۹ میکروگرم بر متر مکعب) افزایش می‌یابد. فیلترهای فوتوکاتالیستی ۸۲ تا ۹۶ درصد ترکیبات آلی فرار را تخریب می‌کنند و تصفیه‌کننده‌های HEPA، ذرات معلق را ۱۴ تا ۵۶ درصد کاهش می‌دهند. مدل‌های یادگیری ماشین (Random Forest) با $R^2=0.91$ با استفاده از دی‌اکسیدکربن، ترکیبات آلی فرار، دما و رطوبت، نارضایتی از کیفیت محیط داخلی را پیش‌بینی می‌کنند. با این حال، مبادله‌ی سه‌گانه در تمام راهبردهای تکی همچنان پابرجاست. این نخستین مرور یکپارچه‌ای است که به‌طور خاص به کیفیت محیط داخلی در اقلیم‌های نیمه‌گرم و خشک می‌پردازد و چهار حوزه‌ی طراحی پوسته، آسایش حرارتی، فناوری‌های بهبود و مدل‌سازی یکپارچه را با داده‌های میدانی از شیراز ترکیب می‌کند. چارچوب پیشنهادی، شامل طراحی غیرفعال، تهویه کنترل‌شده با فیلتراسیون، حسگرهای کم‌هزینه و کنترل مبتنی بر یادگیری ماشین، راهنمای عملی برای سیاست‌گذاران و دست‌اندرکاران ارائه می‌دهد. همچنین شکاف‌های تحقیقاتی کلیدی مانند مطالعات میدانی بلندمدت، مدل‌های یادگیری ماشین ویژه اقلیم و کمی‌سازی پیامدهای سلامت را در این مناطق کمتر مطالعه‌شده برجسته می‌سازد.

کلیدواژگان: کیفیت محیط داخلی؛ ساختمان‌های آموزشی؛ اقلیم نیمه‌گرم و خشک؛ آسایش حرارتی؛ کیفیت هوای داخلی؛ پوسته‌ی شفاف؛ فیلتراسیون فوتوکاتالیستی.

تاریخ دریافت: ۱ دی ۱۴۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۵ فروردین ۱۴۰۵

تاریخ پذیرش: ۲۳ فروردین ۱۴۰۵

تاریخ انتشار: ۱ تیر ۱۴۰۵



مقدمه

مدارس پس از خانه، دومین محیط پررفت و آمد برای کودکان هستند و دانش آموزان روزانه حدود ۶ تا ۸ ساعت را در کلاس های درس سپری می کنند. (1, 2) در این سال های شکل گیری، دستگاه های تنفسی، ایمنی و شناختی کودکان هنوز در حال رشد هستند و همین امر آن ها را در برابر شرایط نامطلوب محیط داخلی، به ویژه آسیب پذیر می کند. (3, 4) کیفیت محیط داخلی، که یک مفهوم چندوجهی شامل آسایش حرارتی، کیفیت هوای داخلی، آسایش بصری و آسایش صوتی است، به طور مستقیم بر سلامت، حضور در مدرسه، عملکرد شناختی و پیشرفت تحصیلی دانش آموزان تأثیرگذار بوده است. (5-7)

مطالعات اپیدمیولوژیک ارتباط قوی بین کیفیت محیط داخلی نامطلوب و پیامدهای منفی سلامت در دانش آموزان برقرار کرده اند. غلظت های بالای CO_2 ، که نشان دهنده تهویه ناکافی است، با افزایش سردرد، خواب آلودگی، کاهش دامنهی توجه و نمرات پایین تر آزمون ها ارتباط دارد. (8, 9) مواجهه با ذرات معلق ریز و ترکیبات آلی فرار، شرایط تنفسی مانند آسم و رینیت آلرژیک را تشدید می کند که از شایع ترین بیماری های مزمن در کودکان سنین مدرسه هستند. (10) (11) علاوه بر این، ناراحتی حرارتی - چه گرمای بیش از حد و چه سرمای بیش از حد - تمرکز را مختل کرده و خستگی را افزایش می دهد و به طور مستقیم بهره وری یادگیری را کاهش می دهد. (12, 13)

با توجه به اینکه تراکم جمعیت در کلاس های درس تقریباً چهار برابر ساختمان های اداری است (14, 15) و کودکان نسبت به بزرگسالان نرخ تنفس بیشتری به ازای وزن بدن دارند (16)، اطمینان از کیفیت محیط داخلی مطلوب در محیط های آموزشی نه تنها یک مسئله رفاهی، بلکه یک ضرورت اساسی در حوزه سلامت عمومی و عدالت آموزشی است.

اقلیم های نیمه گرم و خشک طبقه بندی کوپن (BSh و BWh)، که مشخصه ی مناطقی مانند مرکز ایران، از جمله شیراز، شبه جزیره ی عربستان، بخش هایی از شمال آفریقا و جنوب غربی ایالات متحده است، چالش های متمایزی برای کیفیت محیط داخلی ایجاد می کنند که به طور بنیادی با اقلیم های معتدل یا مرطوب تفاوت دارد. (17, 18) جدول ۱ ویژگی های کلیدی اقلیمی مناطق نیمه گرم و خشک را با مثال موردی شیراز خلاصه می کند:

جدول ۱. ویژگی های اقلیمی مناطق نیمه گرم و خشک

پارامتر	شیراز، ایران (نمونه ی اقلیم نیمه گرم و خشک)	چالش برای کیفیت محیط داخلی
دمای روزانه ی تابستان	۳۸-۴۲ درجه ی سانتی گراد	تقاضای بالای سرمایش؛ خطر گرمای بیش از حد
دمای شبانه ی زمستان	۰-۵ درجه ی سانتی گراد	نیاز به گرمایش؛ پل های حرارتی
دامنه ی دمایی شبانه روز	۱۲-۱۸ درجه ی سانتی گراد	دشواری در حفظ دمای پایدار داخلی
رطوبت نسبی (تابستان)	۱۵-۲۵ درصد	هوای خشک؛ تحریک دستگاه تنفسی
تابش خورشیدی (سالانه)	۱۸۰۰-۲۲۰۰ کیلووات ساعت بر مترمربع	افزایش بار حرارتی خورشیدی؛ خیرگی
رویدادهای گردوغبار (سالانه)	۳۰-۶۰ روز	نفوذ بالای $PM_{2.5}/PM_{10}$
میانگین سالانه ی $PM_{2.5}$ در فضای باز	۲۵-۳۵ میکروگرم بر مترمکعب	فراتر از رهنمودهای WHO

چالش اصلی کیفیت محیط داخلی در اقلیم های نیمه گرم و خشک، یک مبادله ی اساسی بین سه راهبرد رقیب است (جدول ۲). (19, 20)

جدول ۲. راهبردهای کیفیت محیط داخلی

راهبرد	تأثیر بر CO ₂	تأثیر بر PM _{2.5}	تأثیر بر آسایش حرارتی	هزینه انرژی
تهویه طبیعی (باز بودن پنجره‌ها)	کاهش قابل توجه	افزایش قابل توجه (گردوغبار خارج)	نامطلوب (ورود هوای گرم خارج)	کم
سرمایش مکانیکی (کولر) با بسته بودن پنجره‌ها	تجمع (بدون هوای تازه)	کاهش (در صورت وجود فیلتر)	خوب	بالا
فیلتراسیون (تصفیه‌کننده‌های قابل حمل HEPA/با بسته بودن پنجره‌ها)	تجمع	کاهش قابل توجه	خوب (با کولر)	متوسط-بالا

هیچ راهبرد واحدی به‌طور هم‌زمان هر سه مشکل را حل نمی‌کند. این مبادله در چندین مطالعه در اقلیم‌های گرم و خشک شناسایی شده است (21, 22) و معضل اصلی طراحی و بهره‌برداری برای مدارس در مناطقی مانند شیراز محسوب می‌شود. درحالی‌که مرورهای سیستماتیک متعددی به کیفیت محیط داخلی در مدارس پرداخته‌اند (23-26)، اکثر قریب به اتفاق آن‌ها بر اقلیم‌های معتدل، مانند اروپا و آمریکای شمالی، یا مناطق گرمسیری مرطوب متمرکز هستند. این مرور، اولین ترکیب یکپارچه از تحقیقات کیفیت محیط داخلی را برای اقلیم‌های نیمه‌گرم و خشک فراهم می‌کند و شواهد مربوط به موارد زیر را ترکیب می‌نماید:

طراحی پوسته‌ی شفاف (نسبت پنجره به دیوار، سایه‌بان، شیشه‌کاری، دوقلوهای دیجیتال)

پایش کیفیت هوای داخلی (CO₂، PM_{2.5}، VOCs، زیست‌آئروسول‌ها)

راهبردهای بهبود (فوتوکاتالیست، فیلتر HEPA، دیوارهای سبز)

مدل‌سازی یکپارچه‌ی کیفیت محیط داخلی (یادگیری ماشین، ارزیابی پس از بهره‌برداری، ضرایب وزنی)

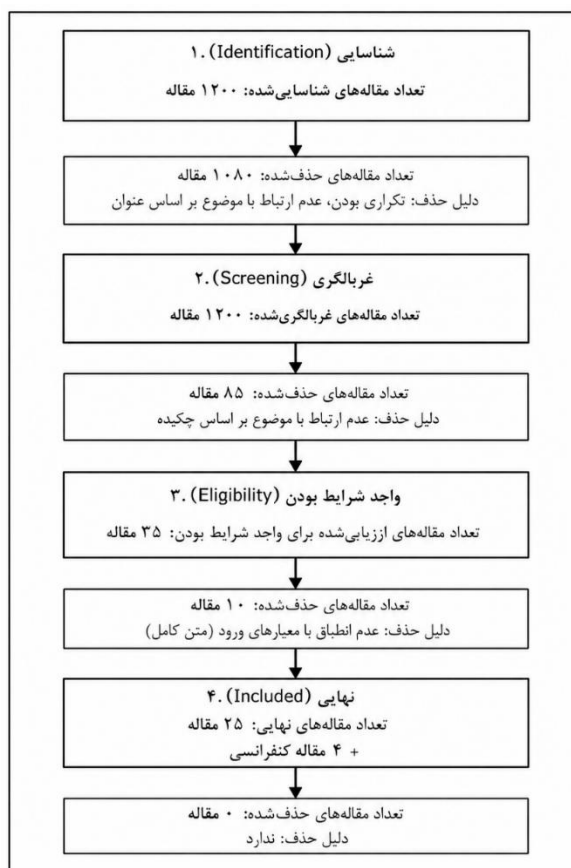
روش‌شناسی پژوهش

یک جست‌وجوی سیستماتیک در پایگاه‌های داده‌ی ساینس‌دایرکت، الزویر و گوگل اسکالر برای شناسایی مقالات مرتبط هم‌داوری‌شده‌ی منتشرشده بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۶ انجام شد. راهبرد جست‌وجو از ترکیب چندین کلیدواژه برای اطمینان از پوشش جامع چهار گروه موضوعی استفاده کرد. ترکیب اول از «کیفیت هوای داخلی» یا «IEQ» یا «آسایش حرارتی» و «مدرسه» یا «کلاس درس» و «تهویه» یا «فیلتراسیون» یا «سایه‌بان» یا «شیشه‌کاری» برای شناسایی مطالعات مرتبط با پوسته‌های شفاف و آسایش حرارتی استفاده کرد. ترکیب دوم از «ذرات معلق» یا «PM_{2.5}» یا «CO₂» و «کلاس درس» یا «ساختمان مدرسه» و «(۲۰۲۰ تا ۲۰۲۶)» برای یافتن تحقیقات در مورد پارامترهای کیفیت هوای داخلی بهره گرفت. ترکیب سوم از «فیلتراسیون فوتوکاتالیستی» یا «HEPA» یا «دیوار سبز» و «مدرسه» یا «هوای داخلی» برای یافتن مطالعات در مورد راهبردهای بهبود استفاده کرد. ترکیب چهارم نیز از «یادگیری ماشین» یا «مدل IEQ» یا «ارزیابی پس از بهره‌برداری» و «کلاس درس» یا «ساختمان آموزشی» برای پوشش مطالعات مدل‌سازی یکپارچه‌ی کیفیت محیط داخلی بهره گرفت.

برای هر مقاله‌ی تحقیقاتی، داده‌ها به‌صورت سیستماتیک شامل اطلاعات نویسنده، سال انتشار، هدف تحقیق، روش‌شناسی به‌کاررفته، یافته‌های کمی کلیدی و محدودیت‌های مطالعه استخراج شدند. برای مقالات مروری، یافته‌ها صرفاً برای مقایسه‌ی زمینه‌ای استفاده شدند و به‌عنوان منابع داده‌ی اولیه در نظر گرفته نشدند.

ترکیب روایی با جداول خلاصه‌ای که راهبردها، فناوری‌ها و مدل‌ها را در چهار گروه موضوعی مقایسه می‌کردند، انجام شد. این رویکرد ساختاریافته، یکپارچه‌سازی شواهد حاصل از روش‌شناسی‌های متنوع شامل اندازه‌گیری‌های میدانی، آزمایش‌های آزمایشگاهی، شبیه‌سازی‌های عملکرد ساختمان و تحلیل‌های یادگیری ماشین را امکان‌پذیر ساخت، درحالی‌که تمایز بین یافته‌های تحقیقات اولیه و منابع مروری ثانویه را حفظ می‌کرد.

چارچوب پریسما فرایند غربالگری و گزارش‌دهی را هدایت کرد و شفافیت در انتخاب و دسته‌بندی مقالات را تضمین نمود. نمونه‌ی نهایی ۲۵ مقاله، همراه با چهار مقاله‌ی کنفرانسی شیراز، مبنای شواهد جامعی برای ترکیب راهبردهای کیفیت هوای داخلی، به‌ویژه مرتبط با اقلیم‌های نیمه‌گرم و خشک، فراهم کرد و شکاف شناسایی‌شده در ادبیات مربوط به مرورهای یکپارچه‌ی کیفیت هوای داخلی برای مناطق گرم و خشک را پوشش داد.



شکل ۱. نمودار جریان پریسما

جدول ۳. گروه‌های موضوعی

گروه	موضوع	تعداد مقالات	انواع مقالات
الف	پوسته‌های شفاف و آسایش حرارتی	۸	تحقیقاتی (۷)، مروری (۱)
ب	کیفیت هوای داخلی (IAQ)	۷	تحقیقاتی (۴)، مروری (۳)
ج	راهبردهای بهبود فوتوکاتالیست، HEPA، گیاهان	۵	تحقیقاتی (۳)، مروری (۲)
د	مدل‌های یکپارچه‌ی کیفیت محیط داخلی و یادگیری ماشین	۵	تحقیقاتی (۴)، مروری (۱)

برای هر مقاله‌ی تحقیقاتی، داده‌های زیر استخراج شد: نویسنده(ها)، سال، هدف، روش‌شناسی (میدانی/شبیه‌سازی/آزمایشگاهی)، یافته‌های کمی کلیدی و محدودیت‌ها. برای مقالات مروری، یافته‌ها صرفاً برای مقایسه‌ی زمینه‌ای استفاده شدند، نه به‌عنوان منابع داده‌ی اولیه. ترکیب روایی با استفاده از جداول خلاصه‌ای که راهبردها، فناوری‌ها و مدل‌ها را مقایسه می‌کردند، انجام شد.

یافته‌های پژوهش

گروه الف: پوسته‌های شفاف و آسایش حرارتی

گروه الف شامل هشت مطالعه است که نقش اجزای پوسته‌ی شفاف ساختمان، پنجره‌ها، شیشه‌کاری، دستگاه‌های سایه‌بان و سیستم‌های کنترل آن‌ها را در تعدیل آسایش حرارتی و عملکرد انرژی در ساختمان‌های مدارس بررسی می‌کنند. این مطالعات از طیف متنوعی از روش‌شناسی‌ها شامل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک همراه با شبیه‌سازی عملکرد ساختمان، آزمایش‌های آزمایشگاهی مواد تغییر فازدهنده، توسعه‌ی دوقلوهای دیجیتال برای کنترل پیش‌بینی‌کننده‌ی کرکره‌ها، مدل‌سازی هیبریدی دوطرفه‌ی تکراری که شبیه‌سازی حفره‌ی شیشه‌ای را با تراز انرژی پوسته تلفیق می‌کند، اندازه‌گیری‌های میدانی یک‌ساله در کلاس‌های با حالت مختلط، بهینه‌سازی چندهدفه‌ی رفتار ساکنان و عملکرد پنجره‌ها، تحقیقات آموزشی طراحی-ساخت بر روی نماهای جنبشی و بهینه‌سازی پارامترهای ساختمان با یادگیری ماشین بهره می‌برند.

نسبت پنجره به دیوار و جهت‌گیری

نسبت بهینه‌ی پنجره به دیوار برای اقلیم‌های گرم-خشک و نیمه‌خشک، به‌عنوان یک پارامتر طراحی حیاتی، از شواهد ترکیب‌شده به‌دست می‌آید. (27, 28) Alelwani (29) از طریق بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک همراه با شبیه‌سازی عملکرد ساختمان نشان داد که ۱۰۰ درصد WWR در فضاهای ارتباطی عمودی، مانند راه‌پله‌ها، به ۷۹.۳۴ درصد روشنایی مفید روز، با تنها ۵.۶ درصد افزایش در شدت مصرف انرژی، دست یافت. جهت‌گیری ساختمان به‌عنوان تأثیرگذارترین پارامتر واحد بر بار سرمایش و ناراحتی حرارتی در بهینه‌سازی جامع یادگیری ماشین انجام‌شده توسط Allahyari و همکاران (30) شناسایی شد. تحلیل آن‌ها از بیش از ۳.۷ میلیون سناریوی طراحی با استفاده از Gradient Boosting، با ضریب تعیین ۰.۹۹۷۱، نشان داد که جهت‌گیری‌های شرقی-غربی در زوایای ۹۰ و ۲۷۰ درجه، اوج تقاضای سرمایش را تا ۳۵۰۰ کیلووات‌ساعت در سال تولید می‌کنند، درحالی‌که جهت‌گیری‌های شمالی-جنوبی در زوایای ۰ و ۱۸۰ درجه، تقاضای سرمایش را به نزدیک صفر کاهش می‌دهند.

دستگاه‌های سایه‌بان: ثابت، پویا و یکپارچه با مواد تغییر فازدهنده و فناوری‌های شیشه‌کاری

راهبردهای سایه‌اندازی از نظر اثربخشی در مطالعات مرور شده تفاوت قابل توجهی داشتند، به‌طوری‌که سیستم‌های پویا و یکپارچه با مواد تغییر فازدهنده عملکرد برتری نسبت به راه‌حل‌های سایه‌اندازی ثابت نشان دادند (32) Fardous and Bennadji. (31) نشان دادند که سیستم‌های سایه‌بان جنبشی الهام‌گرفته از مشربیه سنتی به کاهش قابل توجه ۹۳ درصدی در نفوذ نور خورشید، در عین حفظ اتصال بصری، دست یافتند که یافته‌ای حیاتی برای اقلیم‌های گرم و خشک است که در آن‌ها هم کنترل جذب حرارت و هم حفظ نور روز ضروری است (33) Çelik. رویکردی نوآورانه با یکپارچه‌سازی مواد تغییر فازدهنده (PCM) در دستگاه‌های سایه‌بان عمودی ارائه کرد و محدودیت سایه‌اندازی معمولی را، که فقط محافظت غیرفعال را بدون قابلیت ذخیره‌سازی حرارتی فراهم می‌کند، برطرف

ساخت. در زاویه‌ی شیب ۴۵ درجه، سایه‌بان پُر شده با PCM دمای داخلی را ۳۶ درصد بیشتر از دستگاه‌های سایه‌بان خالی پس از ۴۰۰۰۰۰ ثانیه سرمایش حفظ کرد که نشان‌دهنده‌ی ارزش ذخیره‌سازی انرژی حرارتی برای به‌تأخیرانداختن کاهش دمای شبانه است Guerrero Ramírez. و همکاران (34) یک دوقلوی دیجیتال برای کنترل پیش‌بینی‌کننده‌ی کرکره‌ها، با استفاده از یک مدل انرژی ساختمان (BEM) جعبه‌سفید کالبره‌شده همراه با پایش بلادرنگ داخلی و پیش‌بینی‌های آب‌وهوا، توسعه دادند Niu. و همکاران (35) یک مقایسه‌ی جامع از شش فناوری شیشه‌کاری در اقلیم سرد و خشک BWk، با استفاده از یک چارچوب ترکیبی تکراری دوطرفه‌ی نوآورانه، انجام دادند که شبیه‌سازی دوبعدی حفره‌ی شیشه‌ای را با تراز انرژی پوسته‌ی چندلایه تلفیق می‌کرد.

خلاصه‌ی راهبردهای گروه الف: راهبردهای پوسته‌ی شفاف برای اقلیم‌های گرم و خشک

بر اساس شواهد ترکیب‌شده، جدول ۴ راهبردهای کلیدی برای طراحی پوسته‌ی شفاف در اقلیم‌های گرم و خشک را مقایسه می‌کند. ترکیب شواهد نشان می‌دهد که هیچ راهبرد واحدی عملکرد بهینه را در تمام معیارها ارائه نمی‌دهد. در عوض، مؤثرترین رویکرد برای اقلیم‌های گرم و خشک شامل ترکیبی از راهبردها است: بهینه‌سازی جهت‌گیری ساختمان به‌عنوان یک اقدام با هزینه‌ی صفر، اجرای WWR مناسب بر اساس عملکرد فضا، ترکیب سایه‌بان پویا در نمای جنوبی و غربی برای کنترل تطبیقی خورشید، و انتخاب فناوری‌های شیشه‌کاری بر اساس تعادل خاص بین هزینه‌ی اولیه و صرفه‌جویی عملیاتی بلندمدت. انتخاب بین شیشه‌ی کم‌گسیل تک‌لایه و شیشه‌ی دو یا سه‌لایه به شدت اقلیمی خاص بستگی دارد، به‌طوری‌که شیشه‌ی کم‌گسیل برای اکثر کاربردهای گرم و خشک عملکرد کافی ارائه می‌دهد و راه‌حل‌های چندلایه در اقلیم‌های شدید یا در مواردی که کاهش نویز نیز مورد نیاز است، مزایای بیشتری ارائه می‌کنند.

جدول ۴. مقایسه‌ی راهبردهای پوسته‌ی شفاف برای اقلیم‌های گرم و خشک

راهبرد	یافته‌ی کلیدی	پیکربندی بهینه	کاهش سرمایش	توصیه برای اقلیم گرم و خشک؟
بهینه‌سازی نسبت پنجره به دیوار	WWR کمتر (۱۵-۳۰ درصد) برای کلاس‌ها؛ ۱۰۰ درصد برای ارتباطات عمودی	۱۵-۳۰ درصد برای فضاها؛ ۱۰۰ درصد برای راه‌پله‌ها	۸-۱۲ درصد	بله
جهت‌گیری	جنوب-جنوب شرقی (۱۷۰-۱۸۰ درجه) بار سرمایش را به حداقل می‌رساند	۱۷۲ درجه	۲۰-۴۰ درصد	بله (هزینه‌ی صفر)
سایه‌بان ثابت	مؤثر است، اما نمی‌تواند به‌طور فصلی تطبیق یابد	عمق پیش‌آمدگی ۰.۸۳ متر	۱۰-۱۵ درصد	بله (کم‌هزینه)
سایه‌بان پویا/جنبشی	کاهش ۹۳ درصدی نفوذ نور خورشید؛ حفظ نور روز	الهام‌گرفته از مشربیه، کنترل‌شده با آردوینو	۲۵-۳۵ درصد	بله (هزینه‌ی بالاتر)
سایه‌بان یکپارچه با PCM	دمای شبانه ۳۶ درصد بیشتر؛ ۳.۹ درجه‌ی سانتی‌گراد گرم‌تر	شیب ۴۵ درجه، PCM با نقطه‌ی ذوب ۲۶-۲۹ درجه‌ی سانتی‌گراد	۱۵-۲۵ درصد	بله (نوسازی)
شیشه‌کاری کم‌گسیل	کاهش ۵۷.۶ درصدی بار حرارتی؛ بهترین تک‌لایه	پوشش کم‌گسیل سخت روی سطح داخلی	۵۰-۶۰ درصد	بله
شیشه‌کاری دولایه	کاهش ۲۸ درصدی؛ مناسب برای کاهش نویز	شکاف هوای ۱۲ میلی‌متر	۲۵-۳۵ درصد	بله
شیشه‌کاری سه‌لایه	کاهش ۳۷ درصدی؛ بازده نزولی نسبت به دولایه	شکاف‌های ۱۲ میلی‌متر، پوشش کم‌گسیل	۳۵-۴۵ درصد	فقط برای اقلیم‌های شدید

گروه ب: کیفیت هوای داخلی در مدارس

گروه ب شامل هفت مطالعه است که کیفیت هوای داخلی در کلاس‌های مدارس را بررسی می‌کنند و بر اندازه‌گیری، منابع و اثرات سلامت آلاینده‌های کلیدی، شامل دی‌اکسید کربن، ذرات معلق، ترکیبات آلی فرار، فرمالدئید، دی‌اکسید نیتروژن، ازن و زیست‌آئروسول‌ها، متمرکز هستند. این مطالعات از رویکردهای روش‌شناختی متنوعی شامل مرور ادبیات و تحلیل کتاب‌سنجی تحقیقات جهانی IAQ، توسعه و اعتبارسنجی میدانی سیستم‌های حسگر کم‌هزینه، مرور سیستماتیک همبستگی‌های میکروبیوم-آلاینده، مطالعات مداخله‌ای کنترل‌شده با تصفیه‌کننده‌های هوای قابل‌حمل، نمونه‌برداری فعال و غیرفعال با تحلیل کروماتوگرافی، اندازه‌گیری‌های میدانی یک‌ساله در مدارس شهری و روستایی و شبیه‌سازی CONTAM از راهبردهای تهویه در شرایط عادی و آتش‌سوزی‌های جنگلی بهره می‌برند.

آلاینده‌های کلیدی در کلاس‌های درس

دی‌اکسید کربن (CO_2) به‌عنوان پرمونیتورترین پارامتر IAQ در مدارس ظاهر می‌شود که در درجه‌ی اول، به‌عنوان شاخصی برای کفایت تهویه عمل می‌کند تا یک آلاینده‌ی مستقیم Roslan. و همکاران (36) غلظت‌های جهانی CO_2 در کلاس‌ها را اغلب بیش از ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام گزارش کردند، به‌طوری‌که سطوح زمستانی ۱۱۱۸-۷۶۰ پی‌پی‌ام و سطوح بهاری ۸۰۷-۱۰۲۲ پی‌پی‌ام در مدارس پرتغال توسط Charres و همکاران (37) ثبت شد که در آن‌ها ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام مکرراً فراتر می‌رفت. در مدارس ایران، Sahin و همکاران (38) میانگین CO_2 را بیش از ۲۰۰۰ پی‌پی‌ام در طول فصل گرما، به‌دلیل کلاس‌های شلوغ با ۴ تا ۵ مترمکعب به‌ازای هر دانش‌آموز در مقایسه با ۷ مترمکعب در استانداردهای ایالات متحده، ثبت کردند که نشان‌دهنده‌ی اثر تشدیدکننده‌ی تراکم اشغال بالا بر تجمع CO_2 در زمانی است که تهویه ناکافی است. ذرات معلق (PM) نگرانی غالب سلامت را در کلاس‌های با تهویه‌ی طبیعی، به‌ویژه در مناطق شهری و در طول رویدادهای گردوغبار، نشان می‌دهند Roslan. و همکاران (36) محدوده‌های جهانی $PM_{2.5}$ در کلاس‌ها را ۴ تا ۱۰۰ میکروگرم بر مترمکعب و PM_{10} را ۱۰ تا ۲۸۴ میکروگرم بر مترمکعب گزارش کردند، به‌طوری‌که مدارس آسیایی بالاترین غلظت‌ها را تا ۲۸۴ میکروگرم بر مترمکعب برای PM_{10} نشان دادند.

ترکیبات آلی فرار (VOCs) و کربونیل‌ها دسته‌ی سوم آلاینده‌های اصلی را با منابع داخلی قابل‌توجه نشان می‌دهند Charres. و همکاران (37) دریافتند که غلظت‌های کربونیل در داخل ساختمان ۱۸ برابر بیشتر از بیرون بود (۶۸۸ میکروگرم بر مترمکعب در مقابل ۳۸۶ میکروگرم بر مترمکعب در فضای باز) که نشان‌دهنده‌ی منابع داخلی قوی از محصولات پاک‌کننده، مبلمان، مصالح ساختمانی و فعالیت‌های ساکنان است Amare. و همکاران (39) سطوح کل VOC را ۳۷ تا ۸۳ میکروگرم بر مترمکعب در مدارس ابتدایی اتیوپی گزارش کردند، به‌طوری‌که بنزن ۷۳ تا ۸۰ درصد از خطر سرطان تجمعی را تشکیل می‌داد که بار سلامت قابل‌توجه مرتبط با مواجهه با VOC در محیط‌های مدرسه، به‌ویژه در کشورهای درحال‌توسعه که مقررات مصالح ساختمانی ممکن است سخت‌گیرانه نباشد، را برجسته می‌سازد.

زیست‌آئروسول‌ها، از جمله باکتری‌ها، قارچ‌ها و محصولات متابولیکی آن‌ها، دسته‌ی چهارم آلاینده‌ها را با پیامدهای سلامت قابل‌توجه برای دانش‌آموزان تشکیل می‌دهند Ferraz. و همکاران (40) به‌طور سیستماتیک همبستگی‌های بین میکروارگانیسم‌ها و آلاینده‌ها را در ۲۵ مطالعه مرور کردند و همبستگی‌های مثبت معنی‌داری بین CO_2 و باکتری‌ها، با ضرایب همبستگی از ۰.۱۸ تا ۰.۳۴۰، شناسایی کردند، به‌طوری‌که شش مطالعه به معنی‌داری آماری دست یافتند. گونه‌های

آسپرژیلوس و کلادوسپوریوم ارتباط معنی‌داری با PM_{10} نشان دادند که نشان می‌دهد ذرات معلق به‌عنوان حامل برای انتقال و بقای میکروب‌ها در هوای داخلی عمل می‌کنند.

منابع و عوامل تأثیرگذار

تراکم اشغال به‌عنوان عامل غالب در تجمع CO_2 در کلاس‌های درس ظاهر می‌شود، به‌طوری‌که تراکم اشغال کلاس‌ها تقریباً چهار برابر ساختمان‌های اداری است (14) و معمولاً از ۰.۳ تا ۰.۸ دانش‌آموز در هر مترمربع، در مقایسه با ۰.۱ تا ۰.۲ نفر در هر مترمربع در دفاتر کار، متغیر است. کیفیت هوای خارج به‌طور قابل‌توجهی بر غلظت‌های PM داخل و آلاینده‌های گازی از طریق نفوذ و تهویه‌ی طبیعی تأثیر می‌گذارد. در مدارس شهری نزدیک به کریدورهای ترافیکی، نسبت‌های I/O دی‌اکسید نیتروژن و $PM_{2.5}$ به ۱.۰ نزدیک می‌شود که نشان‌دهنده‌ی نفوذ تقریباً کامل آلاینده‌های خارجی به محیط کلاس‌های درس است. (41) در طول رویدادهای گردوغبار در مناطق نیمه‌خشک، PM خارجی می‌تواند از ۲۰۰ میکروگرم بر مترمکعب فراتر رود و از طریق منافذ تهویه‌ی طبیعی و نشت‌های پوسته‌ی ساختمان به داخل نفوذ کند. (38)

تغییرات فصلی اثرات متضادی بر پارامترهای مختلف IAQ ایجاد می‌کند و یک چالش مدیریتی اساسی ایجاد می‌نماید. در زمستان، پنجره‌ها برای حفظ گرما بسته می‌مانند و باعث تجمع CO_2 با غلظت‌هایی می‌شوند که اغلب از ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ پی‌پی‌ام فراتر می‌رود. در تابستان، پنجره‌های باز CO_2 را کاهش می‌دهند، اما نفوذ $PM_{2.5}$ را از گردوغبار خارجی، انتشار گازهای وسایل نقلیه و رویدادهای آلودگی منطقه‌ای افزایش می‌دهند. (37)

روش‌های اندازه‌گیری و استانداردها

Chojer و همکاران (42) یک سیستم حسگر کم‌هزینه به نام مانیتور SENSINAIR را با استفاده از حسگرهای الکتروشیمیایی Alphasense برای مونوکسید کربن، دی‌اکسید نیتروژن و ازن، همراه با یک حسگر Plantower PMS5003 برای $PM_{2.5}$ ، توسعه و اعتبارسنجی کردند. استانداردهای فعلی IAQ برای مدارس، که در جدول ۵ خلاصه شده‌اند، در حوزه‌های قضایی و انواع آلاینده‌ها به‌طور قابل‌توجهی متفاوت هستند. سازمان بهداشت جهانی جامع‌ترین رهنمودها را ارائه می‌دهد و ۱۵ میکروگرم بر مترمکعب را برای $PM_{2.5}$ به‌عنوان میانگین ۲۴ ساعته و ۵ میکروگرم بر مترمکعب را به‌عنوان میانگین سالانه، ۴۵ میکروگرم بر مترمکعب را برای PM_{10} به‌عنوان میانگین ۲۴ ساعته، و ۱۰۰ میکروگرم بر مترمکعب را برای فرمالدئید به‌عنوان میانگین ۳۰ دقیقه‌ای توصیه می‌کند.

جدول ۵. خلاصه‌ی استانداردها و رهنمودهای IAQ برای کلاس‌های مدارس

آلاینده	پیشنهاد (۲۰۲۱) WHO	ASHRAE ۶۲.۱-۲۰۲۲	EN ۱۶۷۹۸-۱ (Category I)	ISO ۱۶۰۰۰-۴۱
CO_2	کمتر از ۱۰۰۰ ppm (شاخص تهویه)	کمتر از ۱۰۰۰ ppm بالاتر از فضای باز	کمتر از ۱۰۰۰ ppm مطلق	Class A: کمتر از ۱۰۰۰ ppm Class B: کمتر از ۱۰۰۰ ppm Class C: ۱۴۰۰-۱۰۰۰؛ ۵۰۰۰-۱۴۰۰
$PM_{2.5}$	کمتر از ۱۵ $\mu g/m^3$ (۲۴h)؛ کمتر از ۵ $\mu g/m^3$ سالانه	مشخص نشده	مشخص نشده	مشخص نشده
PM_{10}	کمتر از ۴۵ $\mu g/m^3$ (۲۴h)	مشخص نشده	مشخص نشده	مشخص نشده
Formaldehyde	کمتر از ۱۰۰ $\mu g/m^3$ (۳۰ min)	مشخص نشده	مشخص نشده	مشخص نشده
TVOC	بدون رهنمود	مشخص نشده	کمتر از ۳۰۰ $\mu g/m^3$ محاسبه‌شده بر حسب تولوئن)	مشخص نشده
نرخ تهویه	مشخص نشده	۵-۸ L/s به‌ازای هر فرد	۱۰ L/s به‌ازای هر فرد	مشخص نشده
		(کلاس‌های درس)	(Category I)	

اثرات بر سلامت دانش آموزان

اثرات سلامت ناشی از IAQ نامطلوب در مدارس در چندین مطالعه به خوبی مستند شده است، با طیفی از اثرات، از علائم حاد تا بیماری‌های مزمن و اختلالات شناختی Roslan و همکاران (36) گزارش کردند که هر ۱۰ میکروگرم بر مترمکعب افزایش در PM_{10} با ۰.۲ تا ۰.۶ درصد افزایش در بستری‌های بیمارستانی برای بیماری‌های تنفسی حاد در کودکان مرتبط است که یک رابطه‌ی دوز-پاسخ واضح بین مواجهه با ذرات و پیامدهای شدید سلامت را نشان می‌دهد. غلظت‌های CO_2 بیش از ۱۴۰۰ پی‌پی‌ام به طور مداوم باعث سردرد، خستگی، بی‌توجهی و کاهش عملکرد شناختی می‌شوند (9)، اثراتی که به ویژه در محیط‌های آموزشی، که تمرکز و پردازش اطلاعات برای یادگیری ضروری است، نگران‌کننده هستند.

مواجهه‌ی طولانی مدت با فرمالدئید، که توسط آژانس بین‌المللی تحقیقات سرطان به عنوان ماده‌ی سرطان‌زای گروه ۱ طبقه‌بندی شده است (43)، با افزایش شیوع آسم و حساسیت‌زایی آلرژیک در دانش‌آموزان مرتبط بوده است. مواجهه با زیست‌آئروسول‌ها به طور خاص با علائم تنفسی و بیماری‌های مرتبط با ساختمان در مدارس مرتبط بوده است. مطالعه‌ی Salin و همکاران (44) نشان داد که معلمان در کلاس‌های دارای گردوغبار بسیار سمی، شانس ابتلا به ۱۲ علامت مرتبط با کار، از جمله تنگی نفس با نسبت شانس ۱۲.۲، چشم‌های مرطوب با نسبت شانس ۱۲.۷، احساس توده در گلو با نسبت شانس ۹.۰ و افزایش نیاز به خواب با نسبت شانس ۷.۷، را به طور قابل توجهی افزایش داده‌اند. مواجهه با قارج با تشدید آسم، رینیت آلرژیک و علائم مرتبط با ساختمان مرتبط بوده است.

گروه ج: راهبردهای بهبود

گروه ج شامل پنج مطالعه است که فناوری‌ها و راهبردهای بهبود کیفیت هوای داخلی در کلاس‌های مدارس را بررسی می‌کنند، از جمله سیستم‌های فیلتراسیون فوتوکاتالیستی، تصفیه‌کننده‌های هوای قابل حمل مبتنی بر HEPA و رویکردهای بیوفیلیک مانند دیوارهای سبز داخلی. این مطالعات از رویکردهای روش‌شناختی متنوعی شامل توسعه و آزمایش در مقیاس آزمایشگاهی مواد فیلتر فوتوکاتالیستی، مداخلات میدانی با تصفیه‌کننده‌های هوای قابل حمل در کلاس‌های اشغال‌شده، شبیه‌سازی CONTAM از راهبردهای تهویه و فیلتراسیون و پایش یک‌ساله‌ی عملکرد دیوار سبز در یک مدرسه‌ی ابتدایی استفاده می‌کنند.

فیلتراسیون فوتوکاتالیستی

Jagajeevan and Sivakumar (45) یک نانوکامپوزیت سه تایی CeO_2-TiO_2-ZnO را بر روی فیلترهای الیاف شیشه، از طریق فرایند غوطه‌وری در سل-ژل پچینی اصلاح‌شده، توسعه دادند. هتروجانکشن S-scheme به یک شکاف نواری ۲.۶۴ الکترون‌ولت دست یافت و فعال‌سازی نور مرئی را تحت روشنایی استاندارد) طول موج LED بیش از ۴۲۰ نانومتر (امکان‌پذیر ساخت. یک فیلتر نسل دوم که شامل CeO_{2-x} با مهندسی گرادیان خلأ، همراه با MoS_2 و $g-C_3N_4$ ، بود (46)، به عملکرد حتی بالاتری دست یافت: جذب $PM_{2.5}$ به میزان ۹۸.۶ درصد و کانی‌سازی BTEX به میزان ۹۵.۷ درصد در عرض ۱۲۰ دقیقه، با ثابت سرعت ۰.۰۲۸۵ دقیقه^{-۱}، معادل ۳.۵ برابر $g-C_3N_4$ خالص.

فیلتر HEPA و تصفیه‌کننده‌های هوای قابل حمل (PACS)

Thompson و همکاران (47) یک مطالعه‌ی میدانی در پنج کلاس درس در کالیفرنیا، واقع در یک منطقه‌ی تعیین‌شده بر اساس AB ۶۱۷ با بار آلودگی هوای بالا، انجام دادند و اثربخشی ارتقای فیلترهای HVAC به MERV ۱۳ و تصفیه‌کننده‌های هوای قابل‌حمل را در شرایط عملیاتی دنیای واقعی مقایسه کردند. این مطالعه نشان داد که ارتقای فیلترهای HVAC از MERV ۶ به MERV ۱۳ در کلاس‌های بدون تصفیه‌کننده‌ی هوای قابل‌حمل، منجر به بهبود قابل‌توجه ۱۱ تا ۲۲ درصدی در اثربخشی فیلتراسیون PM_{2.5}، با مقدار p کمتر از ۰.۰۰۱، شد Juntunen و همکاران (48) یک مطالعه‌ی مداخله‌ای جامع در ۲۷ کلاس درس اشغال‌شده در شش مدرسه‌ی فنلاند انجام دادند و عملکرد تصفیه‌کننده‌های هوا با فیلترهای EPA یا HEPA و کربن فعال را در مقابل عملکرد شم (بدون فیلتر) مقایسه کردند. این مطالعه نشان داد که عملکرد تصفیه‌کننده‌ی هوا، میانگین غلظت TVOC را ۵۲.۹ درصد و نسبت داخل به خارج PM_{2.5} را ۲۴.۸ درصد کاهش داد، به‌طوری‌که غنای قارچی و تنوع آن به ترتیب ۲۵.۸ و ۸.۲ درصد کاهش یافت.

Won و همکاران (49) راهبردهای تهویه و فیلتراسیون را در شرایط عادی و آتش‌سوزی جنگلی، با استفاده از یک مدل چندمنطقه‌ای CONTAM که نشان‌دهنده‌ی هشت کلاس با تهویه‌ی مکانیکی و یک راهرو در یک مدرسه‌ی K۵ بود، شبیه‌سازی کردند. در شرایط عادی با PM_{2.5} فضای باز تقریباً ۱۰ میکروگرم بر مترمکعب، سیستم HVAC که با ۱۲ تعویض هوا در ساعت، با ۲۰ درصد هوای خارج و یک فیلتر MERV ۸ کار می‌کرد، میانگین غلظت‌های PM_{2.5} را زیر ۵ میکروگرم بر مترمکعب و غلظت‌های CO₂ را زیر ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام حفظ کرد. در شرایط آتش‌سوزی جنگلی با PM_{2.5} فضای باز به میزان ۳۰ میکروگرم بر مترمکعب، فیلتراسیون MERV ۱۳ با ۲۰ درصد هوای خارج، PM_{2.5} داخلی را زیر ۴ میکروگرم بر مترمکعب حفظ کرد، درحالی‌که MERV ۸ نیاز به بستن دریچه‌ی هوای خارج و کار با تصفیه‌کننده‌های هوای قابل‌حمل با ۵ تعویض هوا در ساعت برای دستیابی به غلظت‌های زیر ۵ میکروگرم بر مترمکعب داشت.

راهبردهای بیوفیلیک و مبتنی بر گیاه

Campiotti و همکاران (50) یک دیوار سبز داخلی به مساحت ۲۴ مترمربع با هفت گونه‌ی گیاهی در راهروی یک مدرسه‌ی ابتدایی در تورین، ایتالیا، نصب کردند و عملکرد آن را به مدت یک سال، از طریق یک فرایند مشارکتی شامل ذی‌نفعان مدرسه، شهرداری و دانشگاه، پایش کردند. دیوار سبز حذف قابل‌توجه PM₁₀ را نشان داد، با تجمع کل PM₁₀ به میزان ۰.۱۸۴ گرم در هر مترمربع در سال، معادل ۱۸.۴ میکروگرم در هر سانتی‌مترمربع در سال در سطح دیوار. با این حال، این مطالعه نشان داد که کاهش VOC قابل‌توجه نبود که احتمالاً به دلیل نرخ‌های بالای تهویه‌ی حفظ‌شده در طول همه‌گیری کووید-۱۹ است که تجمع آلاینده را کاهش داد و همچنین به دلیل موقعیت دیوار سبز در یک راهروی بزرگ که در آن تبادل هوا زیاد بود. این مطالعه همچنین موانع عملی مهمی را برای اجرا و پایش در زمینه‌های مدرسه‌ی دنیای واقعی مستند کرد، از جمله محدودیت‌های بودجه‌کراتیک برای انجام تحقیقات در مدارس دولتی، تنوع در پاسخ در بین گروه‌های کلاسی مختلف که بر ارزیابی تأثیر آموزشی تأثیر گذاشت، و چالش جداسازی اثرات دیوار سبز از سایر متغیرها.

گروه د: مدل‌های یکپارچه‌ی IEQ و چارچوب‌های کل‌نگر

گروه د شامل پنج مطالعه است که رویکردهای یکپارچه را برای ارزیابی و پیش‌بینی IEQ بررسی می‌کنند، از جمله مدل‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی نارضایتی ساکنان، مرورهای سیستماتیک ادبیات برای شناسایی شکاف‌های تحقیقاتی در مناطق اقلیمی، توسعه‌ی شاخص‌های IEQ با ضرایب وزنی مؤلفه‌ها، بهینه‌سازی چندهدفه‌ی ترکیبی از اهداف انرژی و آسایش و چارچوب‌های ارزیابی پس از بهره‌برداری برای ساختمان‌های مسکونی با قابلیت کاربرد در مدارس.

یادگیری ماشین برای پیش‌بینی IEQ

Alam و همکاران (51) مدل‌های یادگیری ماشین متعددی را برای پیش‌بینی نرخ‌های نارضایتی دانش‌آموزان در چهار حوزه‌ی IEQ، با استفاده از داده‌های ۱۴۳۷ نظرسنجی، اندازه‌گیری‌های حسگر داخلی و خارجی و پارامترهای ساختمان از سه کلاس درس در یک مدرسه‌ی نوژی، توسعه و مقایسه کردند. تحلیل SHAP تأثیرگذارترین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده‌ی نارضایتی IEQ را شناسایی کرد: غلظت CO_2 ، سطوح VOC، دمای داخلی، رطوبت نسبی، تابش خورشید و جهت‌گیری پنجره‌ی اتاق. اهمیت نسبی حوزه‌های IEQ برای بهزیستی کلی، که از مقادیر SHAP به‌دست آمده، نشان داد که محیط صوتی با ۳۵ درصد تأثیرگذارترین، و پس از آن کیفیت هوای داخلی با ۳۰ درصد، محیط حرارتی با ۲۳ درصد و محیط دیداری با ۱۲ درصد قرار دارند. این رتبه‌بندی به‌طور قابل‌توجهی با وزن‌دهی رگرسیون خطی از Valiyappurakkal و همکاران (52) در کلاس‌های گرمسیری، که در آن آسایش دیداری با ۳۴.۳ درصد مهم‌ترین، و پس از آن حرارتی با ۲۹.۵ درصد، صوتی با ۲۵.۲ درصد و IAQ با ۷.۸ درصد بود، متفاوت است که تأثیر اقلیم و بافت فرهنگی بر ترجیحات IEQ را برجسته می‌کند. Allahyari و همکاران (30) از رویکرد مشابه یادگیری ماشین برای بهینه‌سازی متمرکزتر انرژی و آسایش حرارتی در مدارس گرم و خشک استفاده کردند و بیش از ۳.۷ میلیون سناریوی طراحی را از طریق شبیه‌سازی پارامتری تولید کردند و از Gradient Boosting با GridSearchCV برای تنظیم فرامترها استفاده کردند. مدل بهینه‌سازی‌شده به R^2 برابر با ۰.۹۹۷۱، با میانگین خطای مربعات ۴۰۶.۶ و میانگین خطای مطلق ۱۲.۵۵، دست یافت که دقت پیش‌بینی استثنایی را نشان می‌دهد. اعتبارسنجی متقابل با ۵ بخش و ۳ تکرار، مقادیر R^2 از ۰.۹۹۶۷ تا ۰.۹۹۸۰، با میانگین ۰.۹۹۷۳ و انحراف معیار ۰.۰۰۰۳، به‌دست آورد که پایداری مدل و قابلیت تعمیم‌پذیری را تأیید می‌کند.

ضرایب وزنی برای مؤلفه‌های IEQ

Valiyappurakkal و همکاران (52) یک شاخص IEQ به‌طور خاص برای کلاس‌های با تهویه‌ی طبیعی در اقلیم گرمسیری گرم‌مرطوب، با استفاده از رگرسیون خطی با عرض از مبدأ صفر بر اساس ۲۳۵ نظرسنجی از دانش‌آموزان در پنج کلاس درس، توسعه دادند. ضرایب وزنی به‌دست‌آمده عبارت بودند از: آسایش دیداری ۳۴.۳ درصد، آسایش حرارتی ۲۹.۵ درصد، آسایش صوتی ۲۵.۲ درصد و کیفیت هوای داخلی ۷.۸ درصد. وزن بالای آسایش دیداری نشان‌دهنده‌ی اهمیت روشنایی کافی در کلاس‌هایی است که نور طبیعی روز منبع اصلی است Chiang و همکاران (۲۰۰۱) IAQ را با ۳۴ درصد در مراکز مراقبت از سالمندان مهم‌ترین یافتند، درحالی‌که Wong و همکاران (۲۰۰۸) آسایش حرارتی را با ۳۱ درصد در دفاتر هنگ‌کنگ و Fassio و همکاران (۲۰۱۴) روشنایی را با ۳۵ درصد در دفاتر ایتالیا مهم‌ترین یافتند. تفاوت بین مطالعه‌ی مدرسه‌ی گرمسیری و مطالعه‌ی مدرسه‌ی اقلیم سرد به‌ویژه آموزنده است: در مدارس گرمسیری با تهویه‌ی طبیعی، آسایش دیداری با ۳۴.۳ درصد مهم‌ترین است، درحالی‌که در مدارس اقلیم سرد با تهویه‌ی مکانیکی، آسایش صوتی با ۳۵ درصد مهم‌ترین است و IAQ از ۷.۸ درصد به ۳۰ درصد افزایش می‌یابد.

یافته‌های مرور سیستماتیک در مورد شکاف‌های تحقیقاتی

Khoshnaw و همکاران (53) یک مرور سیستماتیک ادبیات و تحلیل کتاب‌سنجی از ۱۳۵ مقاله در نه پایگاه داده انجام دادند و رابطه‌ی بین IEQ و چهار هدف عملکردی، شامل کاهش انرژی، آسایش کلی، سلامت ساکنان و بهره‌وری دانش‌آموزان، را در مناطق اقلیمی مختلف بررسی کردند. این مرور شکاف تحقیقاتی قابل توجهی را در اقلیم‌های گرمسیری، خشک و سرد، در مقایسه با مناطق معتدل، شناسایی کرد، به‌طوری‌که منطقه‌ی معتدل C تنها منطقه‌ای بود که در آن تمام روش‌های طراحی رویکرد کل‌نگر پیاده‌سازی شده‌اند. در اقلیم خشک B، تحقیقات عمدتاً بر شش روش اول طراحی رویکرد کل‌نگر متمرکز بود، درحالی‌که بهره‌وری انرژی، افزایش بهره‌وری دانش‌آموزان، آسایش و سلامت و شیوه‌های عملیاتی کمتر مورد توجه قرار گرفتند. در اقلیم سرد D، محققان بر پوسته‌ی ساختمان، جهت‌گیری مدرسه، نوسازی و دو جنبه از آسایش و سلامت اولویت دادند و سایر روش‌ها توجه کمتری دریافت کردند. در اقلیم گرمسیری A، تنها پنج جنبه از طراحی رویکرد کل‌نگر مورد استفاده قرار گرفت: طراحی خورشیدی غیرفعال، طراحی فشرده، راهبردهای طراحی غیرفعال، سیستم‌های HVAC با بازده بالا و برنامه‌های پاک‌سازی سبز.

این مرور همچنین نشان داد که سلامت ساکنان و بهره‌وری دانش‌آموزان کمترین توجه را در حوزه‌ی تحقیقات دریافت کرده‌اند و تلاش‌های اندکی برای پرداختن به این مسائل از طریق روش‌های طراحی رویکرد کل‌نگر صورت گرفته است. این موضوع منعکس‌کننده‌ی اولویت‌های نظارتی و ذی‌نفعان است که بر بهره‌وری انرژی و آسایش، بیش از سلامت ساکنان و بهره‌وری، تأکید دارند، زیرا اقدامات صرفه‌جویی در انرژی مزایای هزینه‌ای فوری و قابل‌اندازه‌گیری‌تری ارائه می‌دهند. تحلیل کتاب‌سنجی تأیید کرد که مطالعات ترکیبی آسایش حرارتی و کیفیت هوای داخلی رایج‌ترین هستند، درحالی‌که مطالعات ترکیبی IAQ و آسایش دیداری، به دلیل ماهیت غالباً متضاد آن‌ها، کمترین شیوع را دارند، زیرا افزایش فضای پنجره برای بهبود آسایش دیداری ممکن است با اجازه‌ی نفوذ آلاینده‌های خارجی یا کاهش تهویه در زمانی که پنجره‌ها برای کنترل خیرگی بسته می‌شوند، IAQ را به خطر بیندازد.

چارچوب‌های ارزیابی پس از بهره‌برداری

Castaño-Rosa and Nerweyi (54) یک مرور سیستماتیک ادبیات از ارزیابی پس از بهره‌برداری (POE) در ساختمان‌های مسکونی انجام دادند و ۱۰۴ مقاله را برای شناسایی روش‌های رایج، موانع و راهبردهای کاهش شکاف‌های عملکردی تحلیل کردند. این مرور چندین راهبرد کلیدی برای کاهش شکاف‌های عملکردی را شناسایی کرد که به‌طور مستقیم برای مدارس قابل‌کاربرد هستند. اول، ادغام تفکر POE از ابتدا مستلزم تعریف برنامه‌های مشارکت ذی‌نفعان، از جمله کاربران ساختمان، پیش از شروع طراحی است تا اطمینان حاصل شود که نیازها و رفتارهای ساکنان در فرایند طراحی در نظر گرفته می‌شوند. دوم، جمع‌آوری داده‌های پیوسته از طریق پایش قبل و بعد از مداخله برای حداقل یک سال، به‌منظور ثبت تغییرات فصلی، برای شناسایی شکاف‌های عملکردی و ارزیابی اثربخشی مداخله ضروری است. سوم، حلقه‌های بازخورد با جلسات منظم بین طراحان، اپراتورها و ساکنان، ارتباطات را تسهیل کرده و امکان شناسایی و حل سریع مسائل را فراهم می‌کند. چهارم، آموزش کاربران از طریق راهنماها، بازدیدهای راهنمایی و بازدیدهای پیگیری در ماه‌های ۶، ۲۴ و ۶۰ به اطمینان از این‌که ساکنان نحوه‌ی عملکرد سیستم‌های ساختمان را برای دستیابی به عملکرد مورد انتظار درک می‌کنند، کمک می‌کند.

بحث

چهار دسته‌ی یافته‌ها به شدت به هم مرتبط هستند. طراحی پوسته‌ی شفاف (گروه الف) به‌طور مستقیم بارهای سرمایش و تأمین نور روز را تعیین می‌کند که به‌نوبه‌ی خود بر آسایش حرارتی و آسایش دیداری تأثیر می‌گذارند. باین‌حال، انتخاب‌های پوسته نیز بر IAQ (گروه ب) تأثیر می‌گذارند: شیشه‌کاری با عملکرد بالا با WWR پایین، جذب حرارت خورشید را کاهش می‌دهد، اما ممکن است تهویه‌ی طبیعی را محدود کرده و تجمع CO_2 را افزایش دهد. راهبردهای بهبود (گروه ج) - چه فیلترهای فوتوکاتالیستی، چه PAC های HEPA یا دیوارهای سبز - مکانیسم‌هایی را برای جداسازی این مبادله فراهم می‌کنند و تهویه‌ی مکانیکی با فیلتراسیون را برای پرداختن به هر دو پارامتر CO_2 و $PM_{2.5}$ به‌طور هم‌زمان امکان‌پذیر می‌سازند. در نهایت، مدل‌های یکپارچه‌ی IEQ (گروه د) ابزارهایی را برای پیش‌بینی ناراضیاتی ساکنان و بهینه‌سازی راهبردهای کنترل در زمان واقعی فراهم می‌کنند.

یافته‌ها به‌طور مداوم یک مبادله‌ی سه‌گانه را نشان می‌دهند که به‌ویژه در اقلیم‌های نیمه‌گرم و خشک حاد است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، هیچ راهبرد واحدی - چه تهویه‌ی طبیعی، سرمایش مکانیکی یا فیلتراسیون - نمی‌تواند به‌طور هم‌زمان به تجمع CO_2 ، نفوذ $PM_{2.5}$ و آسایش حرارتی بپردازد. تهویه‌ی طبیعی به‌طور مؤثر غلظت‌های CO_2 را به ۱۸۰۰-۲۲۰۰ پی‌پی‌ام کاهش می‌دهد، اما اجازه می‌دهد سطوح $PM_{2.5}$ به ۳۵-۵۰ $\mu g/m^3$ و دمای داخلی به ۳۴-۳۸ درجه‌ی سانتی‌گراد وارد شوند. سرمایش مکانیکی با موفقیت آسایش حرارتی را در ۲۲-۲۴ درجه‌ی سانتی‌گراد حفظ می‌کند، اما باعث تجمع CO_2 به ۲۸۰۰-۳۲۰۰ پی‌پی‌ام می‌شود. فیلتراسیون با HEPA یا PACs، $PM_{2.5}$ را به زیر ۵ $\mu g/m^3$ کاهش می‌دهد، اما همچنین منجر به تجمع CO_2 می‌شود و هزینه‌های انرژی بالایی را به همراه دارد. این مبادله توضیح می‌دهد که چرا Hwang و همکاران (19) دریافتند که IEQ مطلوب - جایی که هر سه پارامتر به‌طور هم‌زمان استانداردها را برآورده می‌کنند - تنها ۱۳ تا ۱۶ درصد از زمان در کلاس‌های با حالت مختلط به‌دست آمده است. همچنین توضیح می‌دهد که چرا Charres و همکاران (37) غلظت‌های کربونیل را ۱۸ برابر بیشتر در داخل از خارج مستند کردند که نتیجه‌ی مستقیم بسته نگه‌داشتن پنجره‌ها برای حفظ آسایش حرارتی است.

مبادله‌ی سه‌گانه بین تهویه طبیعی، سرمایش مکانیکی و فیلتراسیون

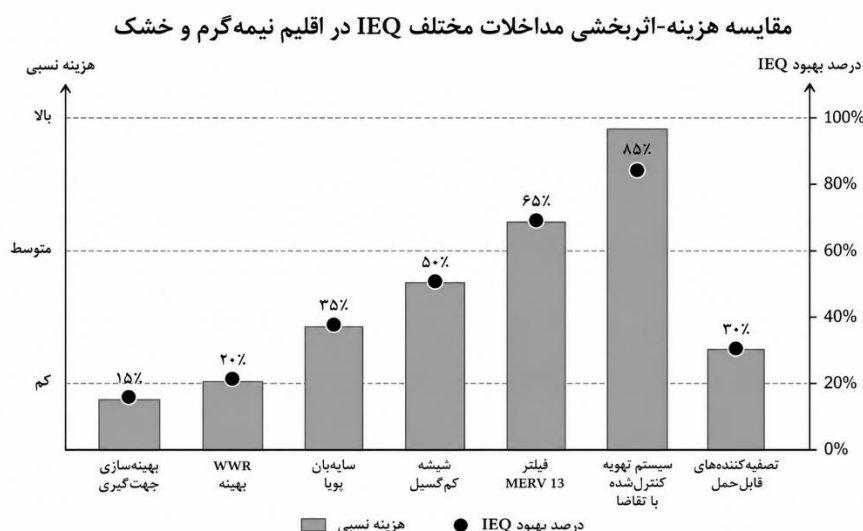
در اقلیم نیمه‌گرم و خشک



شکل ۲. مسئله‌ی مبادله‌ی IEQ در اقلیم‌های نیمه‌گرم و خشک

بر اساس شواهد ترکیب‌شده و اعتبارسنجی‌شده با داده‌های میدانی شیراز، توصیه‌های عملی برای بهبود IEQ در مدارس اقلیم نیمه‌گرم و خشک، سازمان‌دهی شده

بر اساس سطح هزینه و امکان‌پذیری اجرا، ارائه می‌شود.



شکل ۳. مقایسه‌ی هزینه-اثربخشی مداخلات IEQ در اقلیم‌های نیمه‌گرم و خشک

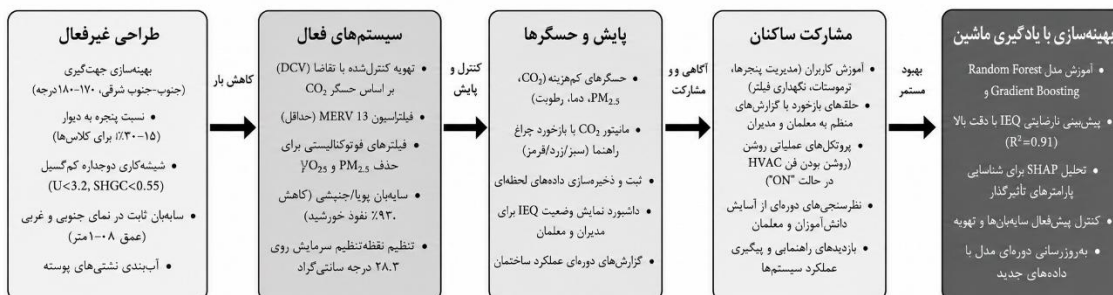
برای طراحی مدارس جدید، اولویت‌های زیر به‌ترتیب اهمیت توصیه می‌شوند. اول، جهت‌گیری ساختمان باید به 170° – 180° درجه (جنوب-جنوب شرقی) بهینه‌سازی شود؛ یک تصمیم با هزینه‌ی صفر با صرفه‌جویی مادام‌العمر انرژی 20% – 40% درصد. دوم، نسبت پنجره به دیوار باید برای کلاس‌ها 15% – 30% درصد تنظیم شود، با نسبت‌های بالاتر 50% – 100% درصد برای فضاهای ارتباطی عمودی، مانند راه‌پله‌ها. سوم، سایه‌بان پویا یا جنبشی باید در نمای جنوبی و غربی نصب شود، ترجیحاً با الهام از طرح‌های مشربیه‌ی سنتی با کنترل خودکار، برای دستیابی به کاهش 93% درصدی نفوذ خورشید. چهارم، شیشه‌کاری دولایه‌ی کم‌گسیل با ضریب انتقال حرارت زیر $3.2 \text{ W/m}^2\text{K}$ و SHGC زیر 0.55 باید به‌عنوان حداقل استاندارد مشخص شود. پنجم، یک سیستم تهویه‌ی با حالت مختلط با تهویه‌ی کنترل‌شده با تقاضا بر اساس حسگر CO_2 باید پیاده‌سازی شود، همراه با فیلتراسیون $\text{MERV } 13$ ششم، نقطه‌ی تنظیم سرمایش باید روی 28.3°C درجه‌ی سانتی‌گراد تنظیم شود که توسط Allahyari و همکاران (30) به‌عنوان تعادل بهینه بین مصرف انرژی و آسایش ساکنان شناسایی شده است.

برای نوسازی مدارس موجود، مداخلات در سه سطح هزینه سازمان‌دهی می‌شوند. مداخلات کم‌هزینه و فوری شامل نصب مانیتورهای CO_2 با بازخورد دیداری چراغ‌راهنمایی، ارتقای فیلترهای HVAC به $\text{MERV } 13$ در صورت امکان، افزودن سایه‌بان ثابت به پنجره‌های جنوبی و غربی و آب‌بندی نشت‌های پوسته است. مداخلات با هزینه‌ی متوسط شامل نصب تصفیه‌کننده‌های هوای قابل‌حمل با فیلترهای HEPA در کلاس‌های بدون تهویه‌ی مکانیکی، افزودن فیلم‌های بازتابنده‌ی کم‌گسیل به پنجره‌ها و نصب فن‌های سقفی است. سرمایه‌گذاری‌های با هزینه‌ی بالا شامل تعویض پنجره‌ها با شیشه‌کاری دولایه‌ی کم‌گسیل، نصب تهویه‌ی مکانیکی با بازیابی حرارت و فیلتراسیون $\text{MERV } 13$ و پیاده‌سازی سیستم‌های اتوماسیون ساختمان با تهویه‌ی کنترل‌شده با تقاضا بر اساس CO_2 است.



شکل ۴. ماتریس تصمیم‌گیری برای مداخلات IEQ در اقلیم‌های نیمه گرم و خشک

بر اساس ترکیب یافته‌ها در هر چهار دسته و اعتبارسنجی محلی از داده‌های میدانی شیراز، یک چارچوب یکپارچه برای مدیریت IEQ در مدارس اقلیم نیمه گرم و خشک پیشنهاد می‌شود. این چارچوب (شکل ۵) اذعان می‌کند که هیچ فناوری یا راهبرد واحدی به تنهایی مبادله‌ی IEQ را حل نمی‌کند و موفقیت نیازمند یکپارچه‌سازی در پنج لایه‌ی به هم پیوسته است.

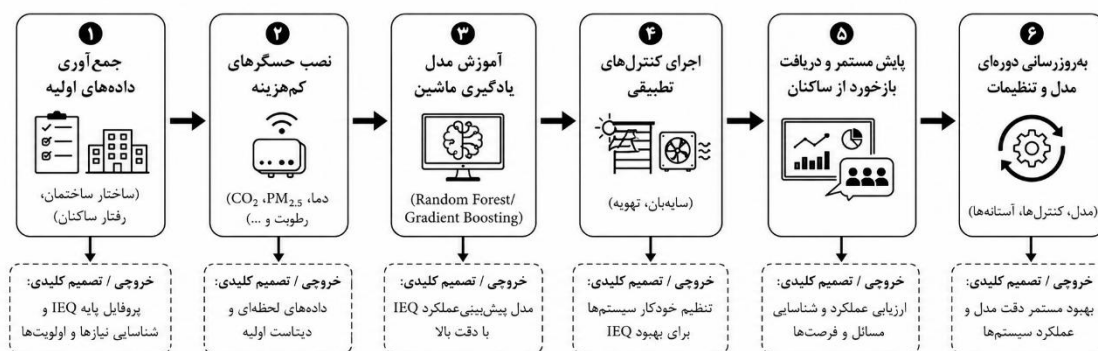


شکل ۵. چارچوب یکپارچه برای مدیریت IEQ در مدارس اقلیم نیمه گرم و خشک

این چارچوب پنج لایه اذعان می‌کند که مدیریت IEQ در اقلیم‌های نیمه گرم و خشک یک مسئله‌ی طراحی یک‌باره نیست، بلکه یک فرایند مداوم بهینه‌سازی و تطبیق است. هر لایه، لایه‌های دیگر را تقویت می‌کند: طراحی غیرفعال بار روی سیستم‌های فعال را کاهش می‌دهد؛ پایش، داده‌های مورد نیاز برای بهینه‌سازی

را فراهم می‌کند؛ مشارکت ساکنان اطمینان حاصل می‌کند که سیستم‌ها به‌طور مؤثر استفاده می‌شوند؛ و یادگیری ماشین، بهبود مستمر را امکان‌پذیر می‌سازد. این چارچوب نقشه‌راهی را برای مدارس فراهم می‌کند که به‌دنبال حل مبادله‌ی اساسی IEQ و دستیابی به هدف فراهم‌آوری محیط‌های یادگیری سالم، راحت و مولد برای همه‌ی دانش‌آموزان هستند.

گام‌های پیاده‌سازی چارچوب یکپارچه IEQ



شکل ۶. فرایند پیاده‌سازی چارچوب یکپارچه برای مدیریت IEQ در مدارس اقلیم نیمه‌گرم و خشک

نتیجه‌گیری

این مرور سیستماتیک از ۲۵ مقاله‌ی منتشرشده بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۶، اولین ترکیب یکپارچه از راهبردهای کیفیت محیط داخلی را برای اقلیم‌های نیمه‌گرم و خشک ارائه می‌دهد. یافته‌ها در چهار گروه موضوعی نشان می‌دهند که نسبت بهینه‌ی پنجره به دیوار برای کلاس‌ها از ۱۵ تا ۳۰ درصد متغیر است، به‌طوری‌که جهت‌گیری جنوب-جنوب شرقی بار سرمایش را ۲۰ تا ۴۰ درصد کاهش می‌دهد. شیشه‌کاری کم‌گسیل بار حرارتی را ۵۷.۶ درصد کاهش می‌دهد، درحالی‌که سایه‌بان پویا به کاهش ۹۳ درصدی نفوذ خورشید دست می‌یابد. غلظت‌های دی‌اکسید کربن در کلاس‌های با تهویه طبیعی مکرراً از ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام فراتر می‌رود، به‌طوری‌که کربنیل‌ها در داخل ساختمان ۱۸ برابر غلظت‌های خارج اندازه‌گیری شده‌اند. فیلترهای فوتوکاتالیستی به تخریب ۹۵.۷ درصدی تولوئن در عرض ۱۲۰ دقیقه دست می‌یابند و مدل‌های Random Forest نارضایتی IEQ را با ضریب تعیین ۰.۹۱ پیش‌بینی می‌کنند. چالش اصلی در اقلیم‌های گرم و خشک، یک مبادله‌ی سه‌گانه است: تهویه طبیعی دی‌اکسید کربن را کاهش می‌دهد، اما ذرات معلق و ناراحتی حرارتی را افزایش می‌دهد؛ سرمایش مکانیکی آسایش حرارتی را بهبود می‌بخشد، اما تجمع دی‌اکسید کربن را تشدید می‌کند؛ فیلتراسیون ذرات معلق را کاهش می‌دهد، اما هزینه‌های انرژی را افزایش می‌دهد و به دی‌اکسید کربن نمی‌پردازد. رویکردهای یکپارچه که طراحی غیرفعال، تهویه کنترل‌شده با تقاضا همراه با فیلتراسیون، شبکه‌های حسگر کم‌هزینه و کنترل مبتنی بر یادگیری ماشین را ترکیب می‌کنند، می‌توانند IEQ را به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشند. مداخلات کم‌هزینه، از جمله مانیتورهای دی‌اکسید کربن و فیلترهای MERV ۱۳، مزایای فوری را ارائه می‌دهند و باید در محیط‌های با منابع محدود در اولویت قرار گیرند. تحقیقات آینده باید به کم‌نمایش‌بودن اقلیم‌های گرم و خشک در ادبیات، از طریق مطالعات میدانی چندساله و مدل‌های یادگیری ماشین ویژه‌ی اقلیم، بپردازد. برای شهرهایی مانند شیراز، که دانش‌آموزان درحال‌حاضر IEQ مطلوب را در کمتر از ۱۵ درصد از ساعات اشغال تجربه می‌کنند، پیاده‌سازی راهبردهای یکپارچه نه‌تنها یک فرصت، بلکه یک ضرورت در حوزه‌ی سلامت عمومی و عدالت آموزشی است که نیازمند تعهد نهادی، حمایت سیاست‌گذاران و سرمایه‌گذاری پایدار است.

مشارکت نویسندگان

در نگارش این مقاله تمامی نویسندگان نقش یکسانی ایفا کردند.

تشکر و قدردانی

از تمامی کسانی که در طی مراحل این پژوهش به ما یاری رساندند تشکر و قدردانی می‌گردد.

تعارض منافع

در انجام مطالعه حاضر، هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد.

حمایت مالی

این پژوهش حامی مالی نداشته است.

موازن اخلاقی

در انجام این پژوهش تمامی موازن و اصول اخلاقی رعایت گردیده است.

خلاصه مبسوط

Extended Abstract

Indoor environmental quality (IEQ) in schools is a multidimensional construct encompassing thermal comfort, indoor air quality (IAQ), visual comfort, and acoustic comfort, all of which interact to influence students' health, attendance, cognitive functioning, learning efficiency, and academic achievement. Schools represent the second most frequently occupied environment for children after their homes, and students generally spend approximately six to eight hours per day in classrooms (1, 2). Children are particularly susceptible to adverse indoor environmental conditions because their respiratory, immune, and cognitive systems are still developing, while their inhalation rates relative to body mass are higher than those of adults (3, 4, 16). Epidemiological and experimental evidence indicates that insufficient ventilation, elevated carbon dioxide concentrations, airborne particulate matter, volatile organic compounds, biological contaminants, and inappropriate thermal conditions are associated with respiratory symptoms, headaches, fatigue, reduced concentration, impaired cognitive performance, school absenteeism, and poorer educational outcomes (5-7). These concerns are particularly acute in semi-hot and arid climates, including central and southern Iran, the Arabian Peninsula, North Africa, and parts of the southwestern United States, where intense solar radiation, large diurnal temperature ranges, low relative humidity, prolonged cooling seasons, and frequent dust events generate a fundamental conflict among natural ventilation, mechanical cooling, and particle filtration (17, 18). Opening

windows may improve ventilation and reduce carbon dioxide accumulation, but it may simultaneously increase the penetration of outdoor dust, PM_{2.5}, PM₁₀, traffic-related pollutants, and hot air. Conversely, closing windows and operating air-conditioning systems may improve thermal comfort and reduce outdoor-particle infiltration while increasing carbon dioxide and internally generated pollutant concentrations. The present systematic review therefore aimed to synthesize evidence on IEQ improvement strategies for schools in semi-hot and arid climates, with particular emphasis on transparent building envelopes, thermal comfort, IAQ monitoring, air-cleaning technologies, and integrated predictive models.

A systematic search was conducted in ScienceDirect, Elsevier databases, and Google Scholar to identify relevant peer-reviewed publications issued between 2020 and 2026. The search strategy was designed to cover four thematic domains. The first domain addressed transparent envelopes and thermal comfort through combinations of terms related to IEQ, thermal comfort, schools, classrooms, ventilation, glazing, shading devices, and window-to-wall ratios. The second domain focused on IAQ parameters, including carbon dioxide, PM_{2.5}, PM₁₀, volatile organic compounds, formaldehyde, nitrogen dioxide, ozone, and bioaerosols. The third domain examined improvement technologies, such as photocatalytic filtration, HEPA filtration, portable air cleaners, green walls, and controlled ventilation. The fourth domain addressed integrated IEQ assessment through machine learning, post-occupancy evaluation, weighted IEQ indices, digital twins, and multi-objective optimization. The screening and reporting process was guided by the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses framework. Of approximately 1,200 initially identified records, 25 articles were retained after duplicate removal, title and abstract screening, full-text eligibility assessment, and methodological review. Four conference papers reporting evidence relevant to Shiraz were added to strengthen the regional interpretation. The final evidence base was organized into four groups: eight studies on transparent envelopes and thermal comfort, seven on IAQ, five on improvement strategies, and five on integrated IEQ and machine-learning models. For empirical studies, data extraction covered authorship, publication year, research objective, study design, climatic context, field or simulation methods, measured environmental variables, principal quantitative findings, and limitations. Review articles were used for contextual comparison rather than treated as primary data. A narrative synthesis was undertaken because of substantial methodological heterogeneity across field measurements, laboratory experiments, building-performance simulations, sensor-validation studies, post-occupancy surveys, intervention studies, and predictive modeling. Comparative summary tables were used to integrate evidence across technologies and identify convergent findings, climatic trade-offs, performance ranges, implementation barriers, and research gaps (24, 26, 53).

The findings demonstrate that transparent-envelope design is a primary determinant of cooling demand, solar heat gain, daylight availability, glare, and thermal discomfort in hot and dry school buildings. The most consistently supported approach was not the maximization of glazing but the careful adaptation of the window-to-wall ratio to room function, orientation, and occupancy. For regularly occupied classrooms, a window-to-wall ratio of approximately 15%–30% generally provided a more appropriate balance between daylight and cooling demand, whereas considerably higher ratios could be acceptable in circulation spaces such as stairwells, where continuous thermal comfort requirements are lower (27, 29). Building orientation was identified as one of the most influential and economically advantageous design variables. Machine-learning-based optimization of more than 3.7 million design scenarios indicated that east–west orientations produced the highest cooling loads, whereas north–south and south–southeast orientations substantially reduced annual cooling demand and thermal discomfort (30). Shading performance varied according to system adaptability. Fixed overhangs provided low-cost protection but could not respond to seasonal or hourly variation, while dynamic and kinetic shading systems achieved more effective solar control. Mashrabiya-inspired kinetic facades reduced solar penetration by as much as 93% while preserving visual connectivity and usable daylight (32). Phase-change-material-integrated vertical shading devices improved thermal storage and delayed

nocturnal temperature reduction, demonstrating advantages over conventional empty shading elements (33). Predictive blind-control systems supported by calibrated white-box digital twins further improved the balance between daylight availability and solar-load mitigation by integrating real-time indoor monitoring with weather forecasting (34). Glazing technology also had a substantial effect. Low-emissivity glazing produced the strongest performance among single-layer options, while double and triple glazing offered additional benefits for extreme climates and noise reduction, although the incremental advantage of triple glazing was smaller relative to its higher cost. Integrated dynamic simulations confirmed that glazing performance should be evaluated through coupled thermal and cavity models rather than isolated U-value comparisons (35). Overall, the most effective envelope strategy combined optimized orientation, moderate classroom glazing ratios, adaptive shading, and low-emissivity glazing rather than relying on any single component.

Carbon dioxide was the most frequently monitored IAQ indicator and commonly exceeded 1,000 ppm in occupied classrooms, with concentrations rising above 2,000 ppm and occasionally approaching 3,000 ppm when windows remained closed during heating or cooling periods (36, 55). High occupancy density, often several times greater than that of office buildings, amplified pollutant accumulation and reduced the effectiveness of ventilation systems designed without sufficient consideration of classroom population. Seasonal field investigations showed that closing windows improved thermal stability but increased carbon dioxide and internally generated pollutants, whereas opening windows reduced carbon dioxide while increasing exposure to outdoor particles and dust (37, 38). Reported classroom PM_{2.5} concentrations ranged from approximately 4 to 100 µg/m³, while PM₁₀ concentrations reached substantially higher levels in polluted and dust-prone regions. Indoor-to-outdoor ratios near unity for nitrogen dioxide and fine particles indicated extensive penetration of outdoor pollution through infiltration and natural ventilation (41). Carbonyl compounds and volatile organic compounds represented major indoor-source pollutants; indoor carbonyl concentrations were reported to be many times higher than outdoor levels because of emissions from cleaning products, furnishings, finishes, educational materials, and occupant activities (10, 39). Bioaerosols also interacted with particle concentrations, with significant associations reported between bacterial levels and carbon dioxide and between fungal genera and PM₁₀ (40). Low-cost multipollutant sensor systems demonstrated practical potential for continuous monitoring, although calibration, drift, and environmental sensitivity remain important limitations (42). Among improvement technologies, visible-light-active photocatalytic filters achieved high removal efficiencies for both particulate matter and volatile organic compounds. Advanced CeO₂-TiO₂-ZnO and CeO_{2-x}/MoS₂/g-C₃N₄ composites achieved PM_{2.5} capture and BTEX degradation rates exceeding 90% under controlled laboratory conditions (45, 46). Portable air cleaners and upgraded HVAC filtration produced more modest but operationally relevant reductions in occupied classrooms. MERV 13 filtration improved PM_{2.5} removal compared with lower-grade filters, while HEPA- or EPA-based air cleaners reduced PM_{2.5}, total volatile organic compounds, and fungal richness (47, 48). Simulation evidence further showed that combining outdoor-air control, MERV 13 filtration, and portable air cleaning could maintain low PM_{2.5} concentrations during normal and wildfire conditions without allowing carbon dioxide to exceed acceptable levels (49). Green walls contributed to particle deposition and biophilic benefits but showed limited effectiveness for volatile organic compound removal under highly ventilated real-world conditions (50).

The synthesis identifies a persistent three-way trade-off among ventilation adequacy, particle control, and thermal comfort. Natural ventilation can reduce carbon dioxide but may introduce hot outdoor air, dust, combustion pollutants, and fine particles. Mechanical cooling can maintain indoor temperatures within a comfortable range but, when operated with closed windows and insufficient outdoor air, intensifies carbon dioxide and volatile organic compound accumulation. Filtration can substantially

reduce PM_{2.5} but cannot independently remove carbon dioxide and may increase energy use. This explains why mixed-mode classrooms rarely meet thermal, ventilation, and particulate standards simultaneously throughout occupied periods (19, 20). Integrated IEQ models provide a pathway for managing this conflict dynamically. Machine-learning models using carbon dioxide, volatile organic compounds, temperature, relative humidity, solar radiation, room orientation, and occupant feedback achieved high predictive accuracy for dissatisfaction and environmental performance (30, 51). However, the relative importance of IEQ domains varied by climate and cultural context. In mechanically ventilated cold-climate classrooms, acoustic quality and IAQ received high relative weights, whereas in naturally ventilated tropical classrooms, visual and thermal comfort were more influential (52). This variation demonstrates that universal IEQ weighting systems should not be transferred uncritically across climatic regions. For new schools in semi-hot and arid areas, the evidence supports south-southeast orientation, classroom window-to-wall ratios of 15%–30%, dynamic shading on highly exposed facades, low-emissivity double glazing, demand-controlled ventilation, and MERV 13 filtration. For existing schools, low-cost priorities include carbon dioxide monitors with visible feedback, improved window-operation protocols, envelope air-sealing, fixed shading, and filter upgrades. Medium-cost measures include portable HEPA air cleaners, low-emissivity window films, and ceiling fans, while higher-cost interventions include mechanical ventilation with heat recovery, replacement glazing, and automated building-control systems. Post-occupancy evaluation should be incorporated from the design stage and should include continuous monitoring across at least one annual cycle, structured stakeholder feedback, and user education to reduce the gap between predicted and actual performance (54). The evidence also highlights the limited number of long-term field studies in arid and semi-arid school environments and the need for locally calibrated control algorithms, health-outcome assessments, and integrated energy–health–comfort analyses (53).

This systematic review demonstrates that improving indoor environmental quality in schools located in semi-hot and arid climates requires a coordinated, multilayered approach rather than the isolated application of ventilation, cooling, filtration, or facade technologies. The principal challenge is the simultaneous control of carbon dioxide, particulate matter, and indoor temperature under conditions of high solar gain, low humidity, and frequent dust exposure. Passive design can substantially reduce thermal loads, but it must be integrated with controlled ventilation and effective filtration to prevent pollutant accumulation. Continuous sensing is necessary to detect changing occupancy, outdoor pollution, and thermal conditions, while predictive control can support timely adjustments to windows, blinds, ventilation rates, air cleaners, and cooling systems. The proposed framework therefore consists of five interconnected layers: climate-responsive passive design, mixed-mode ventilation with filtration, continuous low-cost monitoring, occupant engagement and operational training, and adaptive optimization supported by machine learning. Low-cost interventions, particularly carbon dioxide monitoring, shading, envelope sealing, and filtration upgrades, can provide immediate improvements in resource-constrained schools, whereas long-term renovation should prioritize high-performance glazing, controlled mechanical ventilation, and integrated building automation. Future investigations should include multiyear field measurements, climate-specific predictive models, standardized health indicators, and economic evaluations that account for energy costs, absenteeism, cognitive performance, and health benefits. For cities such as Shiraz, where acceptable IEQ conditions may occur during only a limited proportion of occupied hours, the implementation of integrated strategies is essential for protecting children's health, improving learning conditions, reducing educational inequality, and ensuring that school buildings remain resilient under increasingly severe heat and air-pollution conditions.

References

1. Parinduri RA. Do children spend too much time in schools? Evidence from a longer school year in Indonesia. *Economics of Education Review*. 2014;41:89-104.
2. Sadrizadeh S, Yao R, Yuan F, Awbi H, Bahnfleth W, Bi Y, et al. Indoor air quality and health in schools: A critical review for developing the roadmap for the future school environment. *Journal of Building Engineering*. 2022;57:104908.
3. Salthammer T, Uhde E, Schripp T, Schieweck A, Morawska L, Mazaheri M, et al. Children's well-being at schools: Impact of climatic conditions and air pollution. *Environment International*. 2016;94:196-210.
4. Landrigan PJ. Children as a vulnerable population. *International Journal of Occupational Medicine & Environmental Health*. 2004;17(1).
5. Wargocki P, Porras-Salazar JA, Contreras-Espinoza S, Bahnfleth W. The relationships between classroom air quality and children's performance in school. *Building and Environment*. 2020;173:106749.
6. Mendell MJ, Heath GA. Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature. *Indoor Air*. 2005;15(1):27-52.
7. Haverinen-Shaughnessy U, Shaughnessy RJ, Cole EC, Toyinbo O, Moschandreas DJ. An assessment of indoor environmental quality in schools and its association with health and performance. *Building and Environment*. 2015;93:35-40.
8. Allen JG, MacNaughton P, Satish U, Santanam S, Vallarino J, Spengler JD. Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: A controlled exposure study of green and conventional office environments. *Environmental Health Perspectives*. 2015;124(6):805.
9. Du B, Tandoc MC, Mack ML, Siegel JA. Indoor CO2 concentrations and cognitive function: A critical review. *Indoor Air*. 2020;30(6):1067-82.
10. Halios CH, Landeg-Cox C, Lowther SD, Middleton A, Marczylo T, Dimitroulopoulou S. Chemicals in European residences: Part I: A review of emissions, concentrations and health effects of volatile organic compounds (VOCs). *Science of the Total Environment*. 2022;839:156201.
11. Kim KH, Kabir E, Kabir S. A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment International*. 2015;74:136-43.
12. Brink HW, Loomans MG, Mobach MP, Kort HS. Classrooms' indoor environmental conditions affecting the academic achievement of students and teachers in higher education: A systematic literature review. *Indoor Air*. 2021;31(2):405-25.
13. Wargocki P, Porras-Salazar JA, Contreras-Espinoza S. The relationship between classroom temperature and children's performance in school. *Building and Environment*. 2019;157:197-204.
14. Katafygiotou MC, Serghides DK. Indoor comfort and energy performance of buildings in relation to occupants' satisfaction: Investigation in secondary schools of Cyprus. *Advances in Building Energy Research*. 2014;8(2):216-40.
15. Hajian Zeidy M, Afshariyazad S, Hosseini MR, Pouriany J. Assessing the status of sustainable tourism in Sari City for regional development. *Journal of Land Use and Sustainable Development*. 2026:202512061227239.
16. World Health O. Effects of air pollution on children's health and development: A review of the evidence. *World Health Organization*; 2005.
17. Emadian Razavi SZ, Tahbaz M. Climatic exterior walls in residential buildings of Yazd. *International Journal of Architectural Engineering & Urban Planning*. 2015;25(1).
18. Khanmohamadi M, Pourahmadi M, Mozaffar F. Windows optimization based on the glare performance in educational building of Iran hot and dry climate. *Journal of Sustainable Architecture and Urban Design*. 2019;7(1):113-28.
19. Hwang RL, Lu YJ, Chen WA. Thermal comfort and indoor air quality challenges in mixed-mode classrooms: Year-round field study insights from a hot-humid climate. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2025:107031.
20. Pollozhani F, McLeod RS, Schwarzbauer C, Hopfe CJ. Assessing school ventilation strategies from the perspective of health, environment, and energy. *Applied Energy*. 2024;353:121961.
21. Alaidroos A, Alaimani A, Krarti M, Qurnfulah E, Tiwari A. Influence of building envelope characteristics on the effectiveness of PMV-based controls for schools located in Saudi Arabia. *Indoor and Built Environment*. 2022;31(10):2411-29.
22. Calama-González CM, Suárez R, León-Rodríguez ÁL, Ferrari S. Assessment of indoor environmental quality for retrofitting classrooms with an egg-crate shading device in a hot climate. *Sustainability*. 2019;11(4):1078.
23. Lamberti G, Salvadori G, Leccese F, Fantozzi F, Bluyssen PM. Advancement on thermal comfort in educational buildings: Current issues and way forward. *Sustainability*. 2021;13(18):10315.
24. Kapoor NR, Kumar A, Meena CS, Kumar A, Alam T, Balam NB, et al. A systematic review on indoor environmental quality in naturally ventilated school classrooms: A way forward. *Advances in Civil Engineering*. 2021;2021(1):8851685.
25. Díaz-López C, Serrano-Jiménez A, Verichev K, Barrios-Padura Á. Passive cooling strategies to optimise sustainability and environmental ergonomics in Mediterranean schools based on a critical review. *Building and Environment*. 2022;221:109297.
26. Tran MT, Wei W, Dassonville C, Martinsons C, Ducruet P, Mandin C, et al. Review of parameters measured to characterize classrooms' indoor environmental quality. *Buildings*. 2023;13(2):433.
27. Asghari M, Kasaeian A, JahanBakhsh H, Yazdani H. Multi-objective optimization of building envelopes for energy efficiency and carbon emission: Evaluating PCM configurations across four climate zones in Iran. *Energy Conversion and Management: X*. 2025:101396.
28. Yue N, Li L, Xu C. Multi-objective optimization of a hybrid PVT assisted ground source and air source heat pump system for large space buildings using transient metamodel. *Energy*. 2025;328:136473.
29. Alelwani R. Multi-objective optimization of window-to-wall ratio and shading devices for energy-efficient daylighting in Saudi residential villas. *Discover Sustainability*. 2026;7(1):539.

30. Allahyari S, Khorram ZR, Ahmadi M, Ahmadi J, Aram F. Optimization of energy use and thermal comfort in underserved hot-dry climate schools using a machine learning framework. *Energy Reports*. 2025;14:4737-49.
31. Zeidy MH, Rouhi M, Amrei SGR, editors. Effect of passive solar cooling systems performance on indoor air quality in buildings. *Development Engineering Conferences Center Articles Database*; 2024.
32. Fardous IA, Bennadji A. Integrating dynamic facade design into architectural education and practice through Mashrabiya-inspired kinetic systems. *Discover Education*. 2026.
33. Çelik A. Thermal performance evaluation of phase change material filled vertical shading devices. *Applied Thermal Engineering*. 2026;130420.
34. Ramírez KG, Nuevo-Gallardo C, Ulecia JMS, Pozas BM, Bandera CF. A calibrated white-box digital twin for predictive blind control: A passive strategy to balance solar-driven thermal loads mitigation and daylight availability. *Energy and Buildings*. 2026;117799.
35. Niu H, Li K, Shi Z, Li H. Dynamic thermal analysis of modern glazing systems using integrated modeling approaches. *Energy and Buildings*. 2026;117692.
36. Roslan NS, Mat MNH, Rani MFH. A review of indoor air quality (IAQ) in classrooms: The effect of particulate matter (PM), gaseous pollutants, and airborne pathogens. *Environmental Pollution*. 2026;127966.
37. Charres I, Furst L, Vicente ED, Soares M, Viegas C, Cervantes R, et al. School air quality and thermal comfort: A multi-pollutant seasonal assessment. *Journal of Building Engineering*. 2025;113997.
38. Sahin C, Rastgeldi Dogan T, Yildiz M, Sofuoglu SC. Indoor environmental quality in naturally ventilated schools of a dusty region: Excess health risks and effect of heating and desert dust transport. *Indoor Air*. 2022;32(7):e13068.
39. Amare AN, Sorsa S, Gebremariam Z, De Coster G, Van Langenhove H, Demeestere K, et al. Volatile organic compounds in school environments of Hawassa city, Ethiopia and assessment of possible human health risks. *Atmospheric Pollution Research*. 2023;14(12):101943.
40. Ferraz M, Santos J, da Silva MV. A systematic review of indoor air quality in schools: Focus on microbiome and their relation to particulate matter and chemical pollutants. *Public Health in Practice*. 2026;100790.
41. Salonen H, Salthammer T, Morawska L. Human exposure to NO₂ in school and office indoor environments. *Environment International*. 2019;130:104887.
42. Chojer H, Branco PTBS, Martins FG, Sousa SIV. A novel low-cost sensors system for real-time multipollutant indoor air quality monitoring: Development and performance. *Building and Environment*. 2024;266:112055.
43. Humans IWGotEoCRt. Formaldehyde, 2-butoxyethanol and 1-tert-butoxypropan-2-ol. 2006.
44. Salin J, Ohtonen P, Andersson MA, Syrjälä H. The toxicity of wiped dust and airborne microbes in individual classrooms increase the risk of teachers' work-related symptoms: A cross-sectional study. *Pathogens*. 2021;10(11):1360.
45. Jagajeevan V, Sivakumar VL. Visible-light-active CeO₂-TiO₂-ZnO Z-scheme photocatalytic filters for simultaneous removal of indoor particulate matter and volatile organic compounds. *Progress in Engineering Science*. 2026;100289.
46. Jagajeevan V, Sivakumar VL. Vacancy-gradient-engineered CeO₂-x/MoS₂/g-C₃N₄ S-scheme photocatalytic glass filters for simultaneous PM_{2.5} capture and BTEX degradation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2026;122646.
47. Thompson M, Castorina R, Chen W, Moore D, Peerless K, Hurley S. Effectiveness of air filtration in reducing PM_{2.5} exposures at a school in a community heavily impacted by air pollution. *Atmosphere*. 2024;15(8):901.
48. Juntunen M, Täubel M, Yli-Tuomi T, Taimisto P, Siponen T, Jalkanen K, et al. Associations of air cleaning interventions in primary school classrooms with indoor environmental quality and perceived symptoms. *Building and Environment*. 2025;278:112980.
49. Won Y, Chen W, Wang ZM, Wagner J, Kumagai K. Analysis of impact of ventilation and air cleaning strategies on classroom PM_{2.5} and CO₂ under normal and wildfire conditions: A CONTAM simulation study. *Indoor Environments*. 2026;3(1):100158.
50. Campiotti A, Ricciardi E, Spano G, Dominici L, Comino E, Riggio R, et al. Indoor green walls for improving air quality and human well-being: A case study from a primary school in Turin (Italy). *Nature-Based Solutions*. 2025;100280.
51. Alam AG, Bartonova A, Høiskar BAK, Fredriksen MF, Sharma J, Mathisen HM, et al. Predicting the student's perceptions of multi-domain environmental factors in a Norwegian school building: Machine learning approach. *Building and Environment*. 2025;280:113144.
52. Valiyappurakkal VK, Dolas S, Suresh A. Assessing indoor environmental quality of naturally ventilated classrooms in tropical climates. *Journal of Building Engineering*. 2025;111:113048.
53. Khoshnaw DS, Mustafa FA, Katona TJ, Baranyai B. Indoor environmental quality and achieving performance goals for classroom enhancement: A systematic literature review and bibliometric analysis. *Results in Engineering*. 2025;27:106082.
54. Castaño-Rosa R, Nerweyi D. Bringing post-occupancy evaluation up front to enhance energy efficiency in residential buildings. *Building Research & Information*. 2025;53(8):1075-91.
55. Persily A. Development and application of an indoor carbon dioxide metric. *Indoor Air*. 2022;32(7):e13059.