

## Examining the Use of HVAC Systems in Controlling the Spread of COVID-19

**Aaron Rahmati \***

University of technology Sydney (UTS)

**Ali Vahdani**

Shiraz university of technology, Iran.

**Marzieh Ali Mohammadi**

Islamic Azad university, west Tehran branch,  
Iran.

### Abstract

The outbreak of pneumonitis caused by the new 2019 coronavirus has raised significant concerns about the transmission and control of the virus. Controlling indoor environments is critical in reducing infection risk. HVAC systems are used to maintain healthy and comfortable indoor environments, and their proper use is crucial in reducing the spread of the virus and improving human well-being during the pandemic. In order to achieve a healthier and more comfortable indoor environment, preventing indoor pollution is essential, especially when it comes to preventing disease transmission. The paper explores how ventilation systems can be used to control the spread of the virus in healthcare facilities and public vehicles. It also discusses the future challenges in designing and controlling HVAC systems.

**Keywords:** COVID-19, ventilation, HVAC, indoor environment, control

Received: 28/February/2023

Accepted: 05/May/2023

ISSN: 2980-8936

## سیستم‌های HVAC برای کنترل محیطی برای به حداقل رساندن عفونت COVID-19

گروه مکاترونیک دانشگاه صنعتی سیدنی (UTS)، سیدنی، استرالیا.

آرون رحمتی \*

گروه فناوری اطلاعات، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران.

علی وحدانی

گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، ایران.

مرضیه علی محمدی

### چکیده

شیوع التهاب ریۀ ناشی از کروناویروس جدید سال ۲۰۱۹، موجب نگرانی‌های قابل توجهی درباره انتقال و کنترل ویروس شده است. کنترل محیط داخلی یا محیط‌های بسته عمومی بسیار مهم است و به کاهش خطر ابتلا کمک می‌کند. سیستم‌های گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع (HVAC) برای ایجاد محیط داخلی سالم و راحت استفاده می‌شوند. به همین دلیل، استفاده منطقی از سیستم HVAC اهمیت بسیاری در کنترل محیط دارد و به کاهش خطر ابتلا و بهبود سلامتی انسان در دوران ویروسی کمک می‌کند. برای برآورده کردن نیاز به محیط سالم‌تر و عملکرد تهویه داخلی با کارایی حرارتی بالاتر، جلوگیری از آلودگی داخلی ضروری است؛ به خصوص در مورد مقاومت در برابر انتقال بیماری. در این مقاله، رویدادهای تباهی جمعی در فضاهای بسته و کنترل مهندسی در برابر شیوع ویروس با سیستم‌های تهویه برای مراکز بهداشتی و وسایل نقلیه عمومی بررسی شده است. چالش‌های آینده مربوط به طراحی و کنترل HVAC نیز بحث شده است.

کلیدواژه‌ها: کووید-۱۹، تهویه، سیستم‌های تهویه، محیط داخلی، کنترل

## مقدمه

شیوع اخیر نمونهای ناشی از کروناویروس جدید ۲۰۱۹ م رکب (کوید-۱۹) باعث نگرانی جدی اجتماعی شده است. افرادی که با کروناویروس SARS-CoV-2 آلوده می‌شوند، ممکن است به بیماری شدیدی از نظر تنفسی مبتلا شوند که شباهت زیادی به کروناویروس سندرم تنفسی حاد (SARS-CoV-1) دارد و در بیشتر موارد، مرگ‌ومیر بالایی گزارش شده است. تا ۲۲ جولای ۲۰۲۰ (GMT ۱۷:۰۰) بیش از ۲۰۰ (دقیقاً ۲۱۶) کشور، منطقه و قلمرو عفونت کروناویروس را ثبت کرده‌اند که نشان‌دهنده شدت اپیدمی جهانی است. تعداد افراد آلوده و تعداد مرگ‌ومیر هنوز در حال افزایش است (بیش از ۱۵,۲ میلیون مورد تأییدشده و ۶۲۲ هزار مورد مرگ تأییدشده) (World Health Organization (WHO), 2020).

برای کنترل گسترش کروناویروس در همه جای دنیا، روش‌های مستقیم و اساسی مانند درمان پزشکی (در موارد شدید) و جداسازی اجتماعی ضروری هستند. برای جلوگیری از ابتلا به ویروس باید تلاش معادلی برای حفظ سلامتی افراد سالم انجام شود. جداسازی فیزیکی، مانند درمان جدایی برای بیماران (Aganovic & Cao, 2019)، فاصله‌گذاری اجتماعی و قرنطینه شهرها با موفقیت همراه بوده‌اند (British Broadcasting Corporation, 2020). با این حال، با بازگشت تدریجی به زندگی عادی، کار و تولید، افرادی به اماکن و خدمات عمومی (مانند فروشگاه‌ها، سوپرمارکت‌ها، دفاتر، بیمارستان‌ها، رستوران‌ها و پاب‌ها) مراجعه خواهند کرد که می‌تواند خطری برای گسترش بیماری باشد و ایجاد سندرم ساختمان بیمار را به دنبال داشته باشد که به دلیل استفاده از ضدعفونی‌کننده‌ها در ساختمان‌ها به وجود می‌آید (Hosseini et al., 2020). کنترل محیط داخلی برای کاهش خطر ابتلا در این محیط‌ها بسیار مهم است. سامانه‌های گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع (HVAC) برای ایجاد محیط داخلی سالم و با راحتی حرارتی استفاده می‌شوند (Rolloos, 1993)؛ بنابراین، استفادهٔ عقلانی از سامانه‌های HVAC و کنترل محیط برای کاهش خطر ابتلا و بهبود سلامت انسان در هنگام وبا بسیار مهم است.

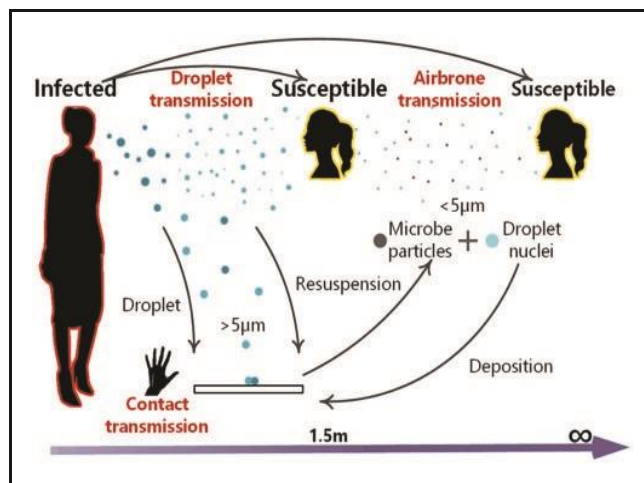
کنترل محیط داخلی برای کاهش خطر عفونت بسیار حائز اهمیت است. سامانه‌های گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع (HVAC) برای ایجاد محیط داخلی سالم و با راحتی حرارتی استفاده می‌شوند؛ بنابراین، استفادهٔ منطقی از سامانه‌های HVAC اهمیت بسیاری در کنترل محیطی و کاهش خطر عفونت در این محیط‌ها و بهبود سلامت انسان‌ها در دوران شیوع بیماری دارد.

## رویدادهای همگانی واگیری در فضاهای بسته

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، انتقال ویروس معمولاً از سه روش انتقال اصلی، به نام‌های انتقال تماسی، انتقال قطره‌ای و انتقال از طریق هوا (آئروسول) تشکیل شده است (Xu et al., 2020). جدول ۱، سه حادثهٔ انتقال نمونه مربوط به انتقال در فضاهای بسته و با شدت بالای شغلی را لیست کرده است (World Health Organization (WHO), 2020; Zhao et al., 2005).

باید به انتقال هوایی حامل بارونده ویروس اهمیت زیادی داده شود (Park et al., 2020). این نقطه‌های حامل ویروس (Aganovic & Cao, 2019) و ذرات جامد موجود در آن می‌تواند توسط جریان هوا یا اثرات آبخاری به فاصلهٔ بسیار بزرگی حمل شوند. برخورد با این ذرات بارونده در فضاهای داخلی، مسیر عمدهٔ انتقال ویروس به افراد را ایجاد می‌کند. دستورالعمل‌های سازمان بهداشت جهانی (A case of COVID-19 transmission in public) (vehicles, 2020; Lu et al., 2020) برای بهبود تهویهٔ فضای داخلی و نگهداری بهداشت شخصی شامل شستشوی منظم دست‌ها، استفاده از ماسک صورت (پوشش صورت)، ضدعفونی کردن تمام سطوح لمسی و غیره است؛ بنابراین،

کنترل تهویه باید الزامات کاهش ریسک عفونت را به‌ویژه در فضاهای بسته مانند خانه‌ها، مراکز بهداشتی، دفاتر، مراکز خرید، وسایل حمل‌ونقل عمومی و غیره، برآورده کند. معیارهای ملی برای اطمینان از اینکه تأسیسات تهویه هوا از جمله سیستم‌های HVAC کافی و کارآمد باشد؛ باید بررسی گردد.



شکل ۱: مسیرهای انتقال ممکن COVID-19 [۶].

کنترل مهندسی علیه گسترش ویروس با سیستم‌های تهویه مطبوع برای اماکن درمانی و وسایل نقلیه عمومی

سیستم‌های تهویه مطبوع سستی برای تخلیه هوای آلوده داخلی از طریق ورود هوای تازه از خارج طراحی شده‌اند و با حفظ کیفیت هوای داخلی و راحتی در سطح قابل‌قبولی کار می‌کنند (Zhang et al., 2021). با توجه به نقص در فشار باد پایدار، سیستم‌های تهویه طبیعی معمولاً برای مصارف کمکی استفاده می‌شوند؛ بنابراین، سیستم‌های تهویه مکانیکی به طور اصلی برای بهبود حذف آلودگی استفاده می‌شوند تا نیازهای کیفیت هوای داخلی را برآورده کنند (Sandberg et al., 2020; Yin et al., 2019). سیستم‌های تهویه مکانیکی توصیه شده ممکن است با توجه به روش تأمین هوا، مانند تهویه ترکیبی (Van Hooff & Blocken, 2020)، تهویه جایگزین (Schmeling & Bosbach, 2020)، توزیع هوای زیر کف (Park & Chang, 2014) و تهویه شخصی (PV) متفاوت باشند (Xu & Liu, 2018). از دیدگاه برنامه‌های مهندسی، کارایی حذف آلودگی هوای داخلی به نرخ تهویه و الگوی جریان هوا وابسته است (Qian & Zheng, 2018). مشکل اصلی برای کنترل آلودگی زیستی داخلی از طریق سیستم‌های تهویه مطبوع (Cao & Ren, 2018)، پیدا کردن روشی برای حذف سریع و نابود کردن آلاینده‌های زیستی داخلی در یک ترکیب مشخص از نرخ تهویه، الگوی جریان هوا و شاید تشعشع ژرمیسایدی UVGI است (Krishnamoorthy & Tande, 2016; Su et al., 2016)؛ به علاوه، بررسی کنترل سیستم‌های تهویه در فضاهای بسته و با تراکم بالا مانند مراکز بهداشتی و وسایل نقلیه عمومی ضروری است.

### کنترل تهویه برای مراکز درمانی

کنترل ریسک عفونت داخلی در مراکز بهداشتی از زمان واکنش جدی به ویروس سارس در سال ۲۰۰۳ برای اولین بار مورد توجه قرار گرفت (Li et al., 2007). کنترل باکتری‌ها و ویروس‌های هوازی باید به گونه‌ای باشد که انتشار متقابل در اتاق‌های بیمارستان را به حداقل می‌رساند. برخی از اقداماتی که برای کمینه کردن باکتری‌ها و ویروس‌های هوازی صورت گرفته، شامل استفاده از فیلترهای هوای بالا-کارایی (HEPA) و لامپ‌های UVGI می‌شود. سازمان

بهداشت جهانی (WHO) نیز پروتکل‌های پیشرفته‌تری برای روش‌های تولید مه بر روی تمام بیماران مشکوک و تأییدشده کووید-۱۹ پیشنهاد می‌دهد (Jin et al., 2016; Cong Wang et al., 2021; World Health Organization (WHO), 2020). بیمارستان باید به گونه‌ای مه‌پاش شود که باعث کاهش باکتری‌ها و ویروس‌های هوازی گردد. هدف طراحی و تنظیم وسایل تهویه هوا برای اتاق‌های بیمارستان عمدتاً بر تعادل بین کیفیت هوای داخلی و کارایی انرژی متمرکز است (Babaoglu et al., 2020).

بخش‌های عمومی بیمارستان برای برآورده شدن نرخ تعویض هوای مشخصی طراحی شده‌اند. نرخ تهویه حداقل، ACH ۶ برای کل هوا و ACH ۲ برای هوای تازه در استاندارد چینی GB 51039-2014، (GB 51039-2014, 2014) کد طراحی بیمارستان‌های عمومی مشخص شده است. استاندارد GB 15982-2012، (GB 15982-2012, 2012) استاندارد بهداشتی برای ضدعفونی در بیمارستان‌ها، توزیع هوایی با تأمین از بالا و بازگرداندن از کنار را توصیه می‌کند. استاندارد ASHRAE 170-2008 (ANSI/ASHRAE/ASHE Standard 170-2017, 2017) و استاندارد بریتانیا (HTM 03-01, 2007) همچنین حداقل نیازهای تهویه را برای بخش‌های عمومی بیمارستان در ACH ۶ تعیین می‌کنند. استاندارد اروپایی (CEN/TS 16244:2018) نیز الزامات کیفیت هوا، نرخ تهویه، کنترل جهت جریان هوا و کاهش آلودگی‌های بیولوژیکی را برای بیمارستان‌ها مشخص می‌کند (CEN/TS 16244, 2018).

بخش‌های عمومی بیمارستان برای برآورده شدن نرخ تعویض هوای مشخصی طراحی شده‌اند (Chartier & Pessoa-Silva, 2009). نرخ تهویه حداقل، ACH ۶ برای کل هوا و ACH ۲ برای هوای تازه در استاندارد چینی GB 51039-2014، کد طراحی بیمارستان‌های عمومی مشخص شده است. استاندارد GB 15982-2012، استاندارد بهداشتی برای ضدعفونی در بیمارستان‌ها، توزیع هوایی با تأمین از بالا و بازگرداندن از کنار را توصیه می‌کند. استاندارد ASHRAE 170-2008 و استاندارد بریتانیا (HTM 03-01) همچنین حداقل نیازهای تهویه را برای بخش‌های عمومی بیمارستان در ACH ۶ تعیین می‌کنند (Zhou et al., 2018). استاندارد اروپایی (CEN/TS 16244:2018) نیز الزامات کیفیت هوا، نرخ تهویه، کنترل جهت جریان هوا و کاهش آلودگی‌های بیولوژیکی را برای بیمارستان‌ها مشخص می‌کند (Yu et al., 2017).

دستورالعمل سازمان بهداشت جهانی برای تهویه طبیعی به منظور کنترل عفونت در محیط‌های درمانی، نرخ تهویه حداقل ۲۸۸ مترمکعب بر ساعت (تقریباً ۱۲ تغییر هوا در ساعت) در هر نفر را برای حذف مؤثر خطر عفونت توصیه می‌کند. این بدان معناست که اتاق‌های بیمارستان به نرخ تهویه بسیار بالاتری نیاز دارند تا به محیطی سالم برای بیماران و پرسنل پزشکی برسند. تهویه طبیعی به عنوان یک تکمیل برای تهویه مکانیکی به منظور کنترل عفونت‌های هوایی، به دلیل نیاز بالای نرخ تهویه در اتاق‌های بیمارستانی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر نرخ تهویه بالای مورد نیاز برای مراکز درمانی، الگوی جریان هوا نیز باید به عنوان یک عامل مهم در انتشار عفونت در نظر گرفته شود.

جدول ۱. رویدادهای نفوذ گسترده اتفاق افتاده در فضاهای بسته.

توالی افراد	تصویر	مکان
از ۹۳ کارمند تست صندلی‌های آبی مثبت شده است.		دفتر اداری
تست افراد دایره‌های قرمز رنگ مثبت شده است.		رستوران
تست افراد صندلی‌های مشخص شده مثبت شده است.		مکان‌های عمومی

### کنترل تهویه در خودروهای عمومی

حمل و نقل در شهرهای بزرگ به عنوان یک بخش ضروری از زندگی روزانه به ویژه در شهرهای بزرگ در نظر گرفته می‌شود. نسبت بالایی از افراد هر روز در وسایل حمل و نقل عمومی مانند اتوبوس‌ها و قطارهای شهری و مترو (هر دوی آن‌ها بالا و پایین زمین) وقت خود را صرف می‌کنند (Onat et al., 2017). چندین بررسی درباره محیط‌های کوچک حمل و نقل مشکلات جدی کیفیت محیط داخلی (IEQ) را نسبت به محیط‌های خارجی شناسایی کرده‌اند. چگالی بالای جمعیت و محیط نسبتاً بسته می‌تواند برای کیفیت محیط داخلی در وسایل حمل و نقل عمومی مسئله‌ای جدی باشد؛ بنابراین، احتمال بروز انتقال ویروس در محیط داخلی محدود این نوع وسایل، ممکن است باعث انتشار بیماری‌های ویروسی در زمان بروز وبا شود (Cooley et al., 2011).

یک پژوهش مربوط به شهر نیویورک به مطالعه تأثیر سفر با قطار مترو در بیماری آنفلوآنزا پرداخت. به منظور کنترل انتقال ویروس در محیط حمل و نقل عمومی، یک مدل عددی مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) توسعه داده شده است که با معادله ولز-رایلی (Wells-Riley) تلفیق شده تا خطر عفونت آنفلوآنزای هوایی را در



حمل و نقل عمومی ارزیابی کند (Zhu et al., 2012). بر خلاف حمل و نقل عمومی شهری، سفر با هواپیما ممکن است به مدت چندین ساعت یا در کشتی کروز چند روز باشد. به عنوان یک نتیجه، بررسی مؤثر جریان هوا و توزیع آلاینده‌ها در محیط کابین هواپیما برای ایمنی پرواز و سلامتی، راحتی و بهبود وضعیت اشغال کنندگان اساسی است (Li et al., 2021; Congcong Wang et al., 2018). همچنین، مکانیزم‌های مربوط به ارزیابی کمی اقدامات مختلف برای کاهش خطر عفونت در زمان شیوع بیماری باید برای همه طرح شود (Zheng et al., 2016).

### بهبود اقدامات پیشگیرانه در سیستم‌های HVAC برای مقابله با اپیدمی

علاوه بر روش تهویه هوا، روش‌های ضد عفونی و تمیز کردن دیگری مانند فیلترهای HEPA، مازول‌های کنترل دما و رطوبت و تشعشع فرابنفش (UV) باید برای کاهش آلاینده‌ها و مسیرهای انتقال عامل‌های بیماری به هوا، به کار گرفته شوند. سیستم‌های HVAC باید با اتصال این روش‌های ضد عفونی و تمیز کردن، برای دستیابی به استانداردهای کیفیت هوای بالاتر توسعه یابند.

فیلتراسیون هپا HEPA معمولاً برای فیلتراسیون ذرات استفاده می‌شوند. از نظر تئوری می‌تواند حداقل ۹۹٫۹۷ درصد از گردوغبار، گرده، کپک‌ها، باکتری‌ها و ذرات معلق در هوا با اندازه ۰٫۳ میلی‌متر (Environmental Protection Agency (EPA), 2020) را حذف کند. برای فیلتر کردن ذراتی که بزرگ‌تر یا کوچک‌تر هستند؛ می‌توان با راندمان بالاتر از ۹۹٫۹۷ درصد را در نظر گرفت.

لیو و همکاران (۲۰۲۰) قطر آیرودینامیکی SARSCoV-2 آئروسل را در دو بیمارستان اندازه‌گیری کردند (Liu et al., 2020). از میان گستره‌های فاصله‌ای بین اندازه، دو غلظت اوج آئروسل 0.25-1.0 SARSCoV-2 میلی‌متر در ناحیه زیر میکرون و بزرگ‌تر از ۲٫۵ میلی‌متر در ناحیه سوپرمیکرون وجود دارد. از آنجایی که اکثر ویروس‌ها و ذرات میکروبی در اندازه‌های مشخصی قرار می‌گیرند که به راحتی قابل ره‌گیری هستند، فیلترهای HEPA می‌توانند تا زمانی که از فیلتر عبور می‌کنند در جذب و حذف ویروس‌ها از جریان هوا بسیار مؤثر باشند. تمیز کردن دوره‌ای و تعویض فیلتر برای حفظ عملکرد صحیح HEPA مورد نیاز است (Chen et al., 2019).

رطوبت و دما. تعداد زیادی از داده‌ها و مطالعات نشان داده‌اند که انتشار پاتوژن‌ها و ویروس‌ها می‌تواند در شرایط سرد و خشک تسهیل شود (Ma et al., 2020; Matson et al., 2020). هنگامی که فردی سرفه، عطسه یا صحبت می‌کند، قطرات تنفسی غنی از آب از طریق مجاری دهان و بینی وارد هوا می‌شوند. به دلیل رطوبت کم هوای اطراف، این قطرات بار رطوبت بالا با انتقال جرم، آب خود را از دست می‌دهند و اندازه قطرات کاهش می‌یابد. از یک طرف، محتوای آب در ذرات نقش مهمی در رقیق کردن ویروس دارد و قطرات کم‌آب برای انسان بسیار مسری هستند. از سوی دیگر، قطرات عفونی با اندازه کوچک‌تر در زیر جریان هوای دایره‌ای که توسط سیستم تهویه هدایت می‌شود، بیشتر حرکت می‌کنند. رطوبت نسبی داخل ساختمان بین ۵۰ تا ۶۰٪ (Velraj & Haghighat, 2020) برای کاهش خطر شیوع بیماری‌های عفونی در هوا پیشنهاد می‌شود.

نور فرابنفش. لامپ‌های UV در اواسط قرن بیستم برای استریل و ضد عفونی کردن استفاده می‌شدند که می‌توانند در یک واحد انتقال هوا یا مستقیماً در محفظه تهویه نصب شوند بدون اینکه تأثیری بر گردش الگوی جریان هوا داشته باشند. این ماده با شکستن پیوندهای شیمیایی خاص و اختلال در ساختار DNA، RNA و پروتئین‌ها عمل می‌کند و باعث می‌شود که یک میکروارگانیسم قادر به تکثیر نباشد. با توجه به اندازه‌ها و شکل‌های مختلف میکروارگانیسم‌ها که بر جذب UV آن‌ها تأثیر می‌گذارد، زمان لازم برای کشتن هر گونه می‌تواند متفاوت باشد. مدل‌سازی عملکرد

دستگاه‌های UVGI در اتاق‌های دارای تهویه می‌تواند به بهینه‌سازی راندمان استریل‌سازی کمک کند (Gilkeson et al., 2014).

### چالش‌های آینده کنترل HVAC

به منظور ارضای نیاز محیط سالم‌تر و عملکرد آسایش حرارتی بیشتر سیستم تهویه داخلی (Overen et al., 2019)، پیشگیری از آلودگی داخل ساختمان ضروری است؛ به‌ویژه با توجه به هدف مقاومت در برابر انتقال بیماری. سیستم‌های HVAC معمولی معمولاً با نرخ‌های تهویه و تنظیمات دمایی بیش‌ازحد تجویز شده (Li et al., 2017)، بدون در نظر گرفتن کارایی انرژی کار می‌کنند؛ بنابراین، برای دستیابی به یک محیط داخلی سالم و انرژی ساختمان، کارایی چالش اصلی برای طراحان سیستم‌های HVAC خواهد بود.

فن‌آوری‌های جدید و نوظهور تهویه ساختمان (Cao, Yu, et al., 2020) ممکن است راه‌حلی را برای دستیابی به بهره‌وری و صرفه‌جویی در انرژی ساختمان، از جمله سیستم‌های تهویه پیشرفته (Ren & Cao, 2020)، سنجش بهینه سیستم (Cao, Ding, et al., 2020)، نظارت (Shao et al., 2019) و فن‌آوری‌های کنترل (Feng et al., 2019) و تجزیه و تحلیل داده‌ها ارائه دهند. مدل‌سازی CFD به طور گسترده برای طراحی و کاربرد سیستم‌های تهویه پیشرفته استفاده شده است. با این حال، به دلیل تقاضای زیاد برای کاربرد طراحی عملی، هنوز راه زیادی برای تحقق کنترل آنلاین انواع مختلف سیستم‌های تهویه با استفاده از CFD (Cao, 2019) وجود دارد. برای تحقق کنترل آنلاین تهویه، روش یادگیری ماشینی مبتنی بر CFD با استفاده از فناوری هوش مصنوعی (AI) می‌تواند راهی بالقوه باشد که سرعت بالا و پیش‌بینی دقیق مورد نیاز جریان هوا را فراهم می‌کند. تحقیقات بین‌رشته‌ای مربوطه در مورد ساخت سیستم تهویه هوش مصنوعی باید در آینده انجام شود.

### منابع

- Aganovic, A., & Cao, G. (2019). Evaluation of airborne contaminant exposure in a single-bed isolation ward equipped with a protected occupied zone ventilation system. *Indoor and Built Environment*, 28(8), 1092-1103.
- ANSI/ASHRAE/ASHE Standard 170-2017: Ventilation of Health Care Facilities. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers. (2017). In. USA.
- Babaoglu, U. T., Miletli Sezgin, F., & Yag, F. (2020). Sick building symptoms among hospital workers associated with indoor air quality and personal factors. *Indoor and Built Environment*, 29(5), 645-655.
- British Broadcasting Corporation (BBC). *Learn how Wuhan dealt with the lockdown*. (2020). Retrieved 11 July 2020 from [www.bbc.co.uk/news/av/world-asia-china-52210273/coronavirus-learn-howwuhan-dealt-with-the-lockdown](http://www.bbc.co.uk/news/av/world-asia-china-52210273/coronavirus-learn-howwuhan-dealt-with-the-lockdown)
- Cao, S.-J. (2019). Challenges of using CFD simulation for the design and online control of ventilation systems. In (Vol. 28, pp. 3-6): SAGE Publications Sage UK: London, England.
- Cao, S.-J., Ding, J., & Ren, C. (2020). Sensor deployment strategy using cluster analysis of Fuzzy C-Means Algorithm: Towards online control of indoor environment's safety and health. *Sustainable cities and society*, 59, 102190.
- Cao, S.-J., & Ren, C. (2018). Ventilation control strategy using low-dimensional linear ventilation models and artificial neural network. *Building and Environment*, 144, 316-333.
- Cao, S.-J., Yu, C. W., & Luo, X. (2020). New and emerging building ventilation technologies. In (Vol. 29, pp. 483-484): SAGE Publications Sage UK: London, England.
- A case of COVID-19 transmission in public vehicles. (2020). Retrieved 11 July 2020 from [new.qq.com/omn/20200424/20200424A0N2RU00.html](http://new.qq.com/omn/20200424/20200424A0N2RU00.html)



- CEN/TS 16244:2018. Ventilation in hospitals – coherent hierarchic structure and common terms and definitions for a standard related to ventilation in hospitals. (2018). In. Brussels: Comite Europeen de Normalisation.
- Chartier, Y., & Pessoa-Silva, C. (2009). Natural ventilation for infection control in health-care settings.
- Chen, C., Ji, W., & Zhao, B. (2019). Size-dependent efficiencies of ultrafine particle removal of various filter media. *Building and Environment*, 160, 106171.
- Cooley, P., Brown, S., Cajka, J., Chasteen, B., Ganapathi, L., Grefenstette, J., Hollingsworth, C. R., Lee, B. Y., Levine, B., & Wheaton, W. D. (2011). The role of subway travel in an influenza epidemic: a New York City simulation. *Journal of urban health*, 88, 982-995.
- Environmental Protection Agency (EPA). *What is aHEPA filter?* (2020). Retrieved 10 July 2020 from [www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/what-hepa-filter-1](http://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/what-hepa-filter-1)
- Feng, Z., Yu, C. W., & Cao, S.-J. (2019). Fast prediction for indoor environment: models assessment. In (Vol. 28, pp. 727-730): SAGE Publications Sage UK: London, England.
- GB 15982-2012. (2012). Hygienic standard for disinfection inhospitals. Beijing, China: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. In.
- GB 51039-2014. (2014). Code for design of general hospital. Beijing, China: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. In.
- Gilkeson, C., Noakes, C., & Khan, M. (2014). Computational fluid dynamics modelling and optimisation of an upper-room ultraviolet germicidal irradiation system in a naturally ventilated hospital ward. *Indoor and Built Environment*, 23(3), 449-466.
- Hosseini, M. R., Fouladi-Fard, R., & Aali, R. (2020). COVID-19 pandemic and sick building syndrome. *Indoor and Built Environment*, 29(8), 1181-1183.
- HTM 03-01: Specialised ventilation for healthcare premises: part A – design and validation. (2007). In. London: Department of Health/Estates and Facilities Division.
- Jin, R., Hang, J., Liu, S., Wei, J., Liu, Y., Xie, J., & Sandberg, M. (2016). Numerical investigation of wind-driven natural ventilation performance in a multi-storey hospital by coupling indoor and outdoor airflow. *Indoor and Built Environment*, 25(8), 1226-1247.
- Krishnamoorthy, G., & Tande, B. M. (2016). Improving the effectiveness of ultraviolet germicidal irradiation through reflective wall coatings: Experimental and modeling based assessments. *Indoor and Built Environment*, 25(2), 314-328.
- Li, M., Yan, Y., Zhao, B., Tu, J., Liu, J., Li, F., & Wang, C. (2018). Assessment of turbulence models and air supply opening models for CFD modelling of airflow and gaseous contaminant distributions in aircraft cabins. *Indoor and Built Environment*, 27(5), 606-621.
- Li, X., Shen, C., & Yu, C. W. (2017). Building energy efficiency: Passive technology or active technology? In (Vol. 26, pp. 729-732): SAGE Publications Sage UK: London, England.
- Li, Y., Leung, G. M., Tang, J., Yang, X., Chao, C., Lin, J. Z., Lu, J., Nielsen, P. V., Niu, J., & Qian, H. (2007). Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment-a multidisciplinary systematic review. *Indoor air*, 17(1), 2-18.
- Liu, Y., Ning, Z., Chen, Y., Guo, M., Liu, Y., Gali, N. K., Sun, L., Duan, Y., Cai, J., & Westerdahl, D. (2020). Aerodynamic analysis of SARS-CoV-2 in two Wuhan hospitals. *Nature*, 582(7813), 557-560.
- Lu, J., Gu, J., Li, K., Xu, C., Su, W., Lai, Z., Zhou, D., Yu, C., Xu, B., & Yang, Z. (2020). COVID-19 outbreak associated with air conditioning in restaurant, Guangzhou, China, 2020. *Emerging infectious diseases*, 26(7), 1628.
- Ma, Y., Zhao, Y., Liu, J., He, X., Wang, B., Fu, S., Yan, J., Niu, J., Zhou, J., & Luo, B. (2020). Effects of temperature variation and humidity on the death of COVID-19 in Wuhan, China. *Science of the total environment*, 724, 138226.
- Matson, M. J., Yinda, C. K., Seifert, S. N., Bushmaker, T., Fischer, R. J., van Doremalen, N., Lloyd-Smith, J. O., & Munster, V. J. (2020). Effect of environmental conditions on SARS-CoV-2 stability in human nasal mucus and sputum. *Emerging infectious diseases*, 26(9), 2276.

- Onat, B., Alver Şahin, Ü., & Sivri, N. (2017). The relationship between particle and culturable airborne bacteria concentrations in public transportation. *Indoor and Built Environment*, 26(10), 1420-1428.
- Overen, O. K., Meyer, E. L., Makaka, G., Ziuku, S., & Mamphweli, S. (2019). Zonal air exchange rate of a passive solar house and resultant sensible air heat transfer. *Indoor and Built Environment*, 28(7), 914-926.
- Park, D. Y., & Chang, S. (2014). Numerical analysis to determine the performance of combined variable ceiling and floor-based air distribution systems in an office room. *Indoor and Built Environment*, 23(7), 971-987.
- Park, S. Y., Kim, Y.-M., Yi, S., Lee, S., Na, B.-J., Kim, C. B., Kim, J.-i., Kim, H. S., Kim, Y. B., & Park, Y. (2020). Coronavirus disease outbreak in call center, South Korea. *Emerging infectious diseases*, 26(8), 1666.
- Qian, H., & Zheng, X. (2018). Ventilation control for airborne transmission of human exhaled bio-aerosols in buildings. *Journal of thoracic disease*, 10(Suppl 19), S2295.
- Ren, C., & Cao, S.-J. (2020). Implementation and visualization of artificial intelligent ventilation control system using fast prediction models and limited monitoring data. *Sustainable cities and society*, 52, 101860.
- Rolloos, M. (1993). HVAC systems and indoor air quality. *Indoor Environment*, 2(4), 204-212.
- Sandberg, M., Kabanshi, A., & Wigö, H. (2020). Is building ventilation a process of diluting contaminants or delivering clean air? *Indoor and Built Environment*, 29(6), 768-774.
- Schmeling, D., & Bosbach, J. (2020). Influence of shape and heat release of thermal passenger manikins on the performance of displacement ventilation in a train compartment. *Indoor and Built Environment*, 29(6), 835-850.
- Shao, X., Wang, K., & Li, X. (2019). Rapid prediction of the transient effect of the initial contaminant condition using a limited number of sensors. *Indoor and Built Environment*, 28(3), 322-334.
- Su, C., Lau, J., & Gibbs, S. G. (2016). Student absenteeism and the comparisons of two sampling procedures for culturable bioaerosol measurement in classrooms with and without upper room ultraviolet germicidal irradiation devices. *Indoor and Built Environment*, 25(3), 551-562.
- Van Hooff, T., & Blocken, B. (2020). Mixing ventilation driven by two oppositely located supply jets with a time-periodic supply velocity: A numerical analysis using computational fluid dynamics. *Indoor and Built Environment*, 29(4), 603-620.
- Velraj, R., & Haghighat, F. (2020). The contribution of dry indoor built environment on the spread of Coronavirus: Data from various Indian states. *Sustainable cities and society*, 62, 102371.
- Wang, C., Holmberg, S., & Sadrizadeh, S. (2021). Impact of door opening on the risk of surgical site infections in an operating room with mixing ventilation. *Indoor and Built Environment*, 30(2), 166-179.
- Wang, C., Zhang, J., Chen, H., & Liu, J. (2021). Experimental study of thermo-fluid boundary conditions, airflow and temperature distributions in a single aisle aircraft cabin mockup. *Indoor and Built Environment*, 30(8), 1185-1199.
- World Health Organization (WHO). *Advice on the use of masks the community, during home care and in health care settings in the context of the novel coronavirus (2019-nCoV) outbreak*. (2020). Retrieved 11 July 2020 from [www.who.int/docs/defaultsource/documents/advice-on-the-use-of-masks-2019ncov.pdf](http://www.who.int/docs/defaultsource/documents/advice-on-the-use-of-masks-2019ncov.pdf)
- World Health Organization (WHO). *Coronavirus disease(COVID-19) outbreak situation*. (2020). Retrieved 13 July 2020 from [www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019](http://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019)
- World Health Organization (WHO). *Getting your workplace ready for COVID-19*. Retrieved 11 July 2020 from [www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/advice-for-workplace-clean19-03-2020.pdf](http://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/advice-for-workplace-clean19-03-2020.pdf)
- World Health Organization (WHO). *Recommendations for health workers with low risk for COVID-19 infection*. (2020). Retrieved 11 July 2020 from [www.who.int/teams/risk-communication/health-sector](http://www.who.int/teams/risk-communication/health-sector)

- Xu, C., & Liu, L. (2018). Personalized ventilation: one possible solution for airborne infection control in highly occupied space? In (Vol. 27, pp. 873-876): SAGE Publications Sage UK: London, England.
- Xu, C., Luo, X., Yu, C., & Cao, S.-J. (2020). The 2019-nCoV epidemic control strategies and future challenges of building healthy smart cities. In (Vol. 29, pp. 639-644): SAGE Publications Sage UK: London, England.
- Yin, H., Liu, C., Zhang, L., Li, A., & Ma, Z. (2019). Measurement and evaluation of indoor air quality in naturally ventilated residential buildings. *Indoor and Built Environment*, 28(10), 1307-1323.
- Yu, H., Mui, K. W., Wong, L. T., & Chu, H. (2017). Ventilation of general hospital wards for mitigating infection risks of three kinds of viruses including Middle East respiratory syndrome coronavirus. *Indoor and Built Environment*, 26(4), 514-527.
- Zhang, Y., Yu, W., Li, Y., & Li, H. (2021). Comparative research on the air pollutant prevention and thermal comfort for different types of ventilation. *Indoor and Built Environment*, 30(8), 1092-1105.
- Zhao, B., Zhang, Z., & Li, X. (2005). Numerical study of the transport of droplets or particles generated by respiratory system indoors. *Building and Environment*, 40(8), 1032-1039.
- Zheng, L., Chen, Q., Xu, J., & Wu, F. (2016). Evaluation of intervention measures for respiratory disease transmission on cruise ships. *Indoor and Built Environment*, 25(8), 1267-1278.
- Zhou, Q., Qian, H., & Liu, L. (2018). Numerical investigation of airborne infection in naturally ventilated hospital wards with central-corridor type. *Indoor and Built Environment*, 27(1), 59-69.
- Zhu, S., Srebric, J., Spengler, J. D., & Demokritou, P. (2012). An advanced numerical model for the assessment of airborne transmission of influenza in bus microenvironments. *Building and Environment*, 47, 67-75.

