

# پتانسیل‌سنجی تهویه طبیعی در فضاهای اداری از منظر اقلیم و طرح فضای داخلی در مراکز استان\*

علمی پژوهشی

پریسا راه حق\*\*

زهرا سادات زمردیان\*\*\*

محمد تحصیلدوست\*\*\*\*

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۵

## چکیده

تهویه طبیعی از مهم‌ترین استراتژی‌های غیرفعال کاهش مصرف انرژی ساختمان، ایجاد آسایش حرارتی، و بهبود کیفیت هوای داخل ساختمان بوده و از راه‌حل‌های کلیدی برای دستیابی به پایداری در صنعت ساختمان است. از سوی دیگر، پتانسیل تهویه طبیعی به شدت وابسته به شرایط آب‌وهوایی است و به‌طور قابل توجهی از منطقه‌ای به منطقه دیگر متفاوت است. این در حالی است که اطلاعاتی از برقراری این امکان در کشور در دسترس نیست. از این رو پژوهش حاضر پتانسیل‌سنجی تهویه برای استفاده حداکثری در اقلیم‌های مختلف ایران را در دو بخش و دو مقیاس مطالعه کرده است. نخست پتانسیل تهویه در مقیاس اقلیم بر اساس داده‌های هواشناسی ارزیابی شده و حداکثر پتانسیل تهویه طبیعی ۳۱ مرکز استان از طریق محاسبه تعداد ساعات مناسب برای بهره‌گیری از تهویه برآورد شده و در بخش دوم تأثیر تهویه بر ارتقای آسایش حرارتی و کیفیت هوا در مقیاس ساختمان در فضای داخلی بررسی شده است. به این منظور، یک مدول از یک ساختمان اداری در نرم‌افزار راینو مدل‌سازی شده، سپس با استفاده از پلاگین کلایمت استودیو محدودیت‌هایی بر داده‌های هواشناسی (دما، باد و رطوبت) اعمال شده است. در نهایت، نتایج به‌صورت نقشه و با ارائه دسته‌بندی گزارش شده است. طبق نتایج، ساعات تهویه طبیعی از ۱۰۹۵ تا ۶۱۵۸ ساعت، درصد ساعات آسایش از ۳۳/۱۵٪ تا ۵۰/۳۲٪، درصد ساعاتی با غلظت کربن‌دی‌اکسید استاندارد از ۱۰/۸۹٪ تا ۵۰/۱۶٪ و درصد ساعاتی با نرخ تعویض هوای مناسب نیز از ۱۱/۵۵٪ تا ۴۸/۸۵٪ متغیر بوده‌اند. بر این اساس، به‌منظور پاسخ به پرسش پژوهش (هریک از مناطق و اقلیم ایران، چه مقدار پتانسیل استفاده از تهویه طبیعی دارند؟) اطلس پتانسیل تهویه طبیعی فضاهای داخلی در اقلیم‌های مختلف کشور (و محدود به مراکز استان‌ها) تهیه شده که قابلیت استفاده در فرایند طراحی با توجه به امکان بهره‌گیری از پتانسیل‌های طبیعی را برای طراحان بدون نیاز به دانش فنی محاسباتی برآورده می‌سازد.

## کلیدواژه‌ها:

پتانسیل تهویه طبیعی، درصد ساعات آسایش حرارتی، غلظت کربن‌دی‌اکسید، نرخ تعویض هوا.

## مطالعات معماری ایران

دو فصلنامه معماری ایرانی

شماره ۲۴ - پاییز و زمستان ۱۴۰۲

صفحات ۱۶۹-۱۹۱ ۱۶۹

\* این مقاله مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نگارنده اول با موضوع تدوین چارچوب سامانه ارزیابی محیط مصنوع: ارزیابی اثر تهویه بر کاهش انتشار آلاینده‌ها؛ نمونه موردی ویروس کووید ۱۹ در دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه شهید بهشتی است.

\*\* دانشجوی دکتری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی

\*\*\* استادیار، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، نویسنده مسئول، z\_zomorodian@sbu.ac.ir

\*\*\*\* دانشیار، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی

## پرسش‌های پژوهش

۱. هریک از مناطق و اقالیم ایران، چه مقدار پتانسیل استفاده از تهویه طبیعی دارند یا به عبارتی، چند ساعت از سال برای استفاده از تهویه طبیعی مناسب است؟
۲. ذرات آلاینده موجود در هوا چه تأثیری بر پتانسیل استفاده از تهویه طبیعی دارند؟

## مقدمه

صرفه‌جویی در مصرف انرژی از چالش‌های مهم جهان و عاملی تعیین‌کننده در آینده توسعه پایدار در صنعت ساختمان است. یک‌پنجم مصرف برق از سهم چهل‌درصدی ساختمان‌ها از کل انتشار گازهای گلخانه‌ای از مصرف انرژی جهانی (Jung and Jazizadeh 2019) در سال ۲۰۱۹، مربوط به سیستم‌های تهویه مطبوع ساختمان‌هاست (Hamilton et al. 2020). طبق گزارش آژانس بین‌المللی انرژی<sup>۱</sup>، مصرف انرژی برای سرمایش فضای ساختمان‌ها از سال ۲۰۰۰ دوبرابر شده است و ممکن است تا سال ۲۰۴۰ به دوبرابر سطح فعلی برسد. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد سرمایش فضا به بزرگ‌ترین مصرف‌کننده برق ساختمان تبدیل خواهد شد و تقریباً ۱۶ درصد از تقاضای جهانی برق در سال ۲۰۵۰ را شامل می‌شود (International Energy Agency 2018).

در ایران نیز در چند سال اخیر، افزایش مصرف برق و تراز نبودن تولید و مصرف، موجب اعمال خاموشی‌های گسترده در اکثر شهرهای ایران از دی‌ماه ۱۳۹۹ (۲۰۲۱ میلادی) شد و تولید، زندگی، آسایش و رفاه مردم را تحت‌تأثیر قرار داد (بهرامی ۱۴۰۰). در این میان به‌منظور صرفه‌جویی در مصرف برق، مکان‌های مختلف از جمله ادارات مجبور به خاموش کردن سیستم‌های تهویه مطبوع شدند؛ به‌گونه‌ای که فقط از طریق تهویه طبیعی امکان تعویض و خنک کردن هوای فضای داخلی ساختمان‌ها وجود داشت؛ مسئله‌ای که در این برهه زمانی به‌دلیل شیوع بیماری تنفسی کووید ۱۹<sup>۲</sup> بیش از پیش بحرانی بود. امتداد این محدودیت‌ها به‌نوعی است که در پایان فروردین‌ماه ۱۴۰۲ خاموش کردن سیستم‌های سرمایشی تمام ادارات و دستگاه‌های اجرایی شهر تهران از ساعت ۱۲ مورد تأکید مدیرعامل شرکت توزیع نیروی برق تهران بزرگ قرار گرفت (<https://tbtb.ir>).

طراحی معماری با ادغام راهکارهای بومی و اقلیمی در فرایند طراحی، نقش مهمی در ایجاد ساختمان‌های پایدار و کم‌مصرف دارد (Santamouris et al. 2018). معماران با در نظر گرفتن عواملی مانند جهت ساختمان، هندسه، سایبان‌های افقی، بازشوها و تهویه، می‌توانند استفاده از منابع طبیعی را بهینه کرده (لکنر ۱۹۹۱)، اتکا به سیستم‌های مصنوعی را به حداقل برسانند (Givoni 1998). در میان این راهکارها تهویه طبیعی<sup>۳</sup> پتانسیل بسیاری برای کاهش انرژی سرمایشی و تأمین هوای تازه ساختمان‌ها داشته (Chen, Tong, and Malkawi 2017) و از امیدوارکننده‌ترین راهبردهای دستیابی به ساختمان‌های پایدار است؛ زیرا پتانسیل قابل توجهی برای کاهش مصرف انرژی ساختمان (اثرات صرفه‌جویی در مصرف انرژی بدون صرف انرژی برای تهویه مکانیکی) (Wen et al. 2023) و ایجاد آسایش حرارتی و بهبود کیفیت هوای داخل ساختمان دارد (Bamdad et al. 2022). بر این اساس، معماران می‌توانند در طراحی خود، استقلال بیشتری از سیستم‌های مکانیکی (برای تأمین سرمایش و تهویه) لحاظ کنند (Wen et al. 2023). محیط بیرون از تأثیرگذارترین عوامل در ارزیابی پتانسیل تهویه طبیعی<sup>۴</sup> در ساختمان‌هاست.

به‌طور کلی، پتانسیل تهویه طبیعی را می‌توان در سه مقیاس اصلی، از جمله اقلیم، سایت و ساختمان ارزیابی کرد. تصویر ۱ این طبقه‌بندی را نشان می‌دهد. در مقیاس آب‌وهوایی به پارامترهای اقلیمی مانند دما و رطوبت هوا در یک مکان خاص بستگی دارد (Causone 2016). در مقیاس سایت که منظور محیط اطراف ساختمان است، پارامترهایی مانند مورفولوژی و استراتژی‌های برنامه‌ریزی شهری (Hsie and Ward 2006)، آلودگی صوتی و جوی (Germano and Roulet 2006) همراه با پارامترهای هواشناسی در نظر گرفته می‌شود. مقیاس ساختمان اغلب شامل معیارهای ارزیابی پیچیده‌تری است که اثر تعاملی پارامترهای ساختمان بر پتانسیل تهویه طبیعی، مانند

خواص حرارتی پوشش ساختمان، پیکربندی بازشوها، بهره‌گرایی داخلی و جذب گرمای خورشیدی را در مرحله طراحی به‌عنوان ابزار کنترل طراحان در اختیار می‌گذارد. طبعاً درک پتانسیل اقلیمی برای استفاده از تهویه طبیعی اولین گام خواهد بود. در واقع پتانسیل خنک‌کنندگی تهویه طبیعی به پارامترهای زیادی بستگی دارد؛ باین‌حال، اولین گام در استراتژی تهویه طبیعی در ساختمان‌ها، شناسایی در دسترس بودن و قابلیت استفاده از تهویه طبیعی در هر اقلیم است (Bamdad et al. 2022)؛ زیرا این استراتژی به‌شدت به ویژگی‌های آب‌وهوای محلی بستگی داشته و به‌طور قابل توجهی از منطقه‌ای به منطقه دیگر متفاوت است. بنابراین درک تغییرات بین مناطق به‌منظور استفاده مؤثرتر از تهویه طبیعی بسیار مهم است (Chen, Tong, and Malkawi 2017). به این منظور با توجه به اهمیت استفاده از تهویه طبیعی، در این پژوهش به تدوین اطلس تهویه طبیعی کشور پرداخته می‌شود.

### ۱. تهویه طبیعی و نفوذ ناخواسته هوا

تهویه حرکت طبیعی هوا در داخل ساختمان با استفاده از استراتژی‌های مختلف است، که باید به‌دقت طراحی شود تا محیطی سالم برای زندگی را تضمین کند. تهویه نامناسب موجب کیفیت پایین هوای داخلی شده و تهویه بیش از حد نیز باعث هدررفت گرما و افزایش هزینه‌های انرژی خواهد شد. تهویه طبیعی از نیروهای طبیعی (فشار باد و نیروی شناوری) برای هدایت هوای بیرون به داخل ساختمان و برعکس استفاده می‌کند (Wood and Salib 2013). نفوذ یا نشت هوا برخلاف تهویه غیرعمدی و ناخواسته است، که موجب ورود جریان هوا از بیرون به داخل ساختمان می‌شود (Zhong et al. 2022). طبق استاندارد (BS 5925: 1991)، حداقل نرخ تهویه و مقدار پیشنهادی آن در کاربری اداری به ترتیب ۸ و ۱۲ L/s به‌ازای هر نفر بوده و مقدار پیشنهادی نفوذ هوا در کاربری اداری طبق استاندارد (BSRIA, 1998)  $10 \text{ m}^3 \cdot \text{hr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  (در فشار ۵۰ pa) است. مقادیر ذکر شده برای تهویه دو کاربرد اصلی دارد: پتانسیل تهویه طبیعی از منظر تأمین سرمایش و تأمین هوای تازه سلامت (کیفیت هوا) مطرح است. در محیط‌های داخلی، تهویه طبیعی نقش مهمی در حفظ کیفیت هوای داخل ساختمان و افزایش رضایت کاربران دارد.



تصویر ۱: مقیاس‌های ارزیابی پتانسیل تهویه طبیعی (Bamdad et al. 2022)

در بسیاری از شرایط، از تهویه طبیعی برای حفظ محدوده آسایش حرارتی (دمای قابل قبول) و کنترل رطوبت داخلی (کاهش یا حذف) (Carrer et al. 2015) استفاده می‌شود. از جمله مزایای تهویه طبیعی توانایی آن در تأمین مقدار کافی تهویه و نرخ بالای تهویه (نسبت به تهویه مکانیکی)، به‌دلیل استفاده از نیروهای طبیعی و دهانه‌های بزرگ (می‌تواند

تا حد زیادی از حداقل نیازهای تهویه فراتر رود و برای خنک‌سازی در تابستان و حذف کامل یک‌باره آلاینده‌های داخلی استفاده شود) با هزینه کم، با یک سیستم ساده است (WHO 2021). از نقاط ضعف تهویه طبیعی متغیر بودن و وابستگی به نیروهای خارجی است (هم‌اکنون مکانی و هم‌اکنون زمانی می‌توانند متفاوت باشند) که نرخ جریان هوا را ایجاد می‌کنند (Emmerich, Dols, and Axley 2001). همچنین کنترل تهویه طبیعی ممکن است دشوار باشد؛ زیرا جریان هوا در برخی مکان‌ها به‌طور نامناسبی زیاد و در برخی دیگر از مناطق راکد است (Lipinski et al. 2020). در پژوهش (Aviv et al. 2021) توأم کردن سیستم‌های تهویه طبیعی و تابشی، موجب افزایش صرفه‌جویی سالانه انرژی بین ۲۵-۴۵ درصد (زمانی که نسبت هوای بیرون ۵۰٪ باشد) و کاهش هزینه‌های انرژی بین ۴۵-۱۰ درصد در ۶۰ شهر بزرگ جهان شده است. در پژوهش (Chen, Tong, and Malkawi 2017) استفاده از تهویه طبیعی در شهرهایی با آب‌وهوای سرد و تابستان مطلوب مانند مسکو و سن پترزبورگ، و شهرهایی مانند مکزیکوسیتی، لس‌آنجلس، و ژوهان‌نسورگ، با پتانسیل بیش از ۶۰۰۰ ساعت تهویه، بیش از ۳۰٪ موجب صرفه‌جویی در انرژی شده، و در شهرهایی مانند توکیو، نیویورک و پکن، با ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ ساعت تهویه بین ۲۰٪ تا ۳۰٪ صرفه‌جویی در انرژی را گزارش کرده است.

مطالعات نشان داده‌اند که تهویه مناسب با بهبود سلامت، افزایش کیفیت هوا، سطح بالاتر رضایت از محیط همراه بوده و با تأمین هوای تازه (اکسیژن) و حذف دی‌اکسید کربن موجب کاهش قرار گرفتن در معرض طیف وسیعی از آلاینده‌های هوا (مانند بوها، رطوبت و آلاینده‌هایی مانند مواد شیمیایی موجود در هوا (VOCs) یا آلودگی (NOx) ...)) و کاهش علائم مربوط به سندرم ساختمان بیمار می‌شود (Sundell et al. 2011). از جمله دیگر آلاینده‌ها و بیروس‌هایی هستند که موجب عفونت‌های تنفسی می‌شوند. اهمیت این نوع آلاینده‌ها در بحران جهانی اخیر از سال ۲۰۱۹ (سندرم حاد تنفسی سارس کووید ۲) بیش از پیش محرز شد. ساختمان‌ها به‌عنوان محیط‌هایی بسته، به مکان مطلوبی برای انتقال سریع کووید ۱۹ تبدیل شدند (Aviv et al. 2021). همچنین با توجه به اینکه انتقال از طریق هوا روش اصلی انتقال سارس کووید ۲ است (Elsaid and Ahmed 2021)، تهویه محدود در فضاها داخلی خطر انتقال بیماری را افزایش می‌دهد (WHO 2020). بنابراین، محققان به این نتیجه رسیدند که تهویه با رقیق کردن غلظت و بیروس، نقش کلیدی در کاهش انتقال این بیماری از طریق هوا دارد (Zheng et al. 2021).

با توجه به این مقدمه، و توجه به این نکته که به‌رغم کارایی تهویه در ساختمان و نقش پراهمیت آن، سند و مطالعه‌ای درخصوص تدوین اطلس تهویه طبیعی کشور موجود نیست، پژوهش حاضر در پی یافتن آن است که هر یک از مناطق و اقلیم ایران، چه مقدار پتانسیل استفاده از تهویه طبیعی دارند یا به عبارتی، چند ساعت از سال برای استفاده از تهویه طبیعی مناسب است؟

طبعاً از این طریق می‌توان تعیین کرد تهویه طبیعی تا چه میزان می‌تواند به ارتقای آسایش حرارتی و کیفیت هوا کمک کند. به این منظور با توجه به محدودیت اطلاعات موجود، مراکز استان‌ها به‌عنوان نماینده هر اقلیم بررسی شده و نقشه پتانسیل تهویه طبیعی بر اساس آن تهیه شده است. برای انجام این فرایند ابتدا در پیشینه تحقیق، مطالعات مشابه بررسی شده، ضمن شرح روش‌شناسی در بخش سه، نتایج و بحث درخصوص آن‌ها در پی آمده‌اند، تا بستر جمع‌بندی و پیشنهاد جهت‌گیری‌های تحقیقات آتی باشد.

## ۲. پیشینه پژوهش

### ۲.۱. تحقیقات مرتبط در مقیاس اقلیم

بررسی پتانسیل تهویه طبیعی به‌صورت کشوری در دیگر کشورها یا حتی در مقیاس گسترده‌تر در تحقیقات پیشین، با بررسی مجموعه‌ای از پارامترها به شرح زیر بدون سابقه نیست:

در پژوهشی در ۱۸۵۴ مکان در سراسر جهان با محاسبه ساعات تهویه طبیعی، پتانسیل استفاده از تهویه طبیعی در یک ساختمان اداری سه طبقه، برآورد شده است (Chen, Tong, and Malkawi 2017)، همچنین پتانسیل صرفه‌جویی در

انرژی ۶۰ شهر بزرگ جهان با شبیه‌سازی انرژی ساختمان<sup>۷</sup> محاسبه شده است. در این پژوهش، آستانه بالای دما<sup>۸</sup> طبق مدل آسایش تطبیقی پیشنهادی (De Dear and Brager 2002)، محاسبه شده است که متعاقباً افزایش آستانه دمای بالا به میزان چند درجه، منجر به افزایش قابل توجهی در مقدار ساعات تهویه طبیعی شده است. در تصویر ۲ نقشه‌های حاصل از پژوهش نخست مشاهده می‌شود.



تصویر ۲: تصویر سمت چپ: نقشه ساعات تهویه طبیعی در ۱۸۵۴ مکان، تصویر سمت راست: نقشه ساعات تهویه طبیعی با استفاده از مدل آسایش حرارتی تطبیقی (Chen, Tong, and Malkawi 2017)

در پژوهش دیگر (Aviv et al. 2021) با استفاده از یک مدل رگرسیون جایگزین روی نتایج مطالعه پیش‌گفته به منظور ایجاد یک مدل رابطه پیش‌بینی بین ساعات تهویه طبیعی و صرفه‌جویی در انرژی اعمال شده است. در این مطالعه، نویسندگان یک سیستم تابشی جدید (پانل‌های خنک‌کننده تابشی) را به کمک غشا با تهویه طبیعی جفت می‌کنند. به‌واسطه استفاده از سیستم تابشی دمای قابل قبول هوا تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. محققین چینی (Ji, Zhao, and Zhao 2022) ضمن بررسی اثرات تغییرات آب‌وهوا و آلودگی هوا بر موضوع، پتانسیل تهویه طبیعی در ۷۴ شهر چین در پنج منطقه آب‌وهوایی اصلی را در محدوده ۱۴-۲۰-۱۹-۲۰ با لحاظ چهار سناریو تهویه طبیعی مربوط به دما، رطوبت، سرعت باد و غلظت‌های مختلف شش آلاینده جوی ارزیابی کرده‌اند. خلاصه‌ای از مطالعات بیان شده در جدول ۱ قابل مشاهده است.

جدول ۱: خلاصه‌ای از مطالعات بیان شده در مقیاس اقلیم

محدوده مورد بررسی	کاربری	بررسی انرژی	تغییرات آب‌وهوا	آلودگی هوا	پارامترهای اقلیمی محدودشده			شاخص مورد بررسی	رفرنس		
					محدودیت باد	محدودیت رطوبت	دمای حد پایین <sup>۹</sup>				
					$U_{out}$	$U_{in,max}$					
جهانی	اداری	✓	×	×	طبق معادله ۲	۰/۸ متر بر ثانیه	آستانه بالای دمای نقطه شبنم ۱۷ °C	۱۲/۸ °C	طبق معادله مدل آسایش تطبیقی	(Chen, Tong, and Malkawi 2017)	
جهانی	اداری	✓	×	×	طبق معادله ۲	۰/۸ متر بر ثانیه	آستانه بالای دمای نقطه شبنم ۱۷ °C	۴۰ °C	ساعات تهویه طبیعی	(Aviv et al. 2021)	
۷۴ شهر چین	-	×	✓	✓	طبق معادله ۲	۰/۳ متر بر ثانیه	$\leq 80$	۱۶ °C	۲۸ °C	ساعات تهویه طبیعی	(Ji, Zhao, and Zhao 2022)

\* علامت × در جدول به این معنا به کار رفته که این عامل در تحقیق در نظر گرفته نشده است.  
 \* علامت ✓ در جدول به این معنا به کار رفته که این عامل در تحقیق در نظر گرفته شده است.  
 \* علامت - در جدول به این معنا به کار رفته که به این عامل در تحقیق اشاره نشده است.

## ۲.۲. تحقیقات مرتبط در مقیاس ساختمان

پژوهشی در سال گذشته (Wen et al. 2023) چارچوبی را برای ارزیابی سریع اثر تهویه طبیعی در مراحل اولیه طراحی با استفاده از استقلال حرارتی، از طریق شبیه‌سازی پارامتریک یک ساختمان اداری معمولی پنج طبقه در شانگهای ارائه

می‌نماید. در این بررسی ۲۱-۲۷ درجه سانتی‌گراد به‌عنوان محدوده آسایش حرارتی فضای داخلی و ۱۵-۲۶ به‌عنوان محدوده دمای بیرون پذیرفته شده‌اند. در این بررسی، میزان رطوبت در نظر گرفته نشده است، اما پس از انجام بررسی‌ها دمای حد پایین ۱۷ درجه سانتی‌گراد، برای کنترل پنجره‌ها به‌عنوان متغیر طراحی در مطالعات موردی عملکرد بهتری را از نظر استقلال حرارتی نشان داده است. در مطالعه‌ای دیگر (Bamdad et al. 2022) پتانسیل اقلیمی تهویه طبیعی براساس مدل آسایش حرارتی تطبیقی استاندارد اشری ۵۵ را در ده شهر استرالیا بررسی کرده‌اند. شاخص جدیدی به نام پتانسیل اقلیمی تهویه طبیعی گسترده معرفی شده که نشان می‌دهد پتانسیل اقلیمی تهویه طبیعی تا چه حد می‌تواند در یک آب‌وهوای خاص، زمانی که سرعت هوا بالا می‌رود، گسترش یابد. حساسیت هر دو شاخص تحت شرایط آب‌وهوایی فعلی و پیش‌بینی شده در آینده ارزیابی شد؛ زیرا پتانسیل اقلیمی تهویه طبیعی ممکن است در طول زمان به دلیل گرم شدن کره زمین تغییر کند. همچنین دو برنامه زمانی مختلف برای استفاده از استراتژی‌های تهویه طبیعی مورد بررسی قرار گرفت: یک روز کامل و فقط در ساعات اداری (۷ صبح تا ۱۸ عصر). در مطالعه دیگر (Miranda et al. 2022) به‌علت انتشارات اخیر کروناویروس، به تجزیه و تحلیل اثرات تهویه طبیعی بر کیفیت هوای داخلی و آسایش حرارتی در مراکز آموزشی پرداخته شده است. برای انجام این کار، ۷ کلاس مستطیل شکل در اسپانیا، به‌صورت میدانی در طول فصل زمستان مورد بررسی قرار گرفتند. در این اندازه‌گیری‌ها از سطح غلظت کربن‌دی‌اکسید به‌عنوان شاخص کیفیت هوای داخل ساختمان<sup>۱۰</sup> استفاده شده است. مطابق نتایج این مطالعه زمانی که دمای بیرون زیر ۶ درجه سانتی‌گراد باشد، نرخ ناراضیاتی کاربران بین ۰.۲۵٪ تا ۰.۷۲٪ بوده است؛ اما در دمای بالاتر از ۱۲ درجه سانتی‌گراد، میزان ناراضیاتی کمتر از ۰.۱۰٪ شده است. در این مطالعه، حدود استاندارد جریان هوای بیرونی به‌ازای هر نفر (۱۲/۵ لیتر در ثانیه برای هر نفر توصیه می‌شود، اما برای کاهش خطر ابتلا به کووید ۱۹، به ۱۴ لیتر در ثانیه افزایش یافته است)، طبق استاندارد (RITE, 2007) تعیین شده است. خلاصه‌ای از مطالعات بیان‌شده در جدول ۲ قابل مشاهده است.

جدول ۲: خلاصه‌ای از مطالعات بیان‌شده در مقیاس ساختمان

محدوده مورد بررسی	کاربری	تغییرات آب‌وهوا	پارامترهای اقلیمی محدودشده		آسایش حرارتی				شاخص مورد بررسی	رفرنس
			محدودیت باد		محدودیت رطوبت	دمای حد پایین	دمای حد بالا	حد بالا و پایین دمای داخل		
			$u_{out}$	$u_{in,max}$						
شانگهای	اداری	×	۱۵ متر بر ثانیه	×	×	۱۷ °C	۲۶ °C	۲۱ °C ۲۷ °C	آسایش حرارتی	(Wen et al. 2023)
ده شهر استرالیا	اداری	✓	×	×	-۳۰٪ -۷۰٪	۱۲ °C	×	۲۱ °C	پتانسیل اقلیمی تهویه طبیعی و گسترده	(Bamdad et al. 2022)
اسپانیا	آموزشی	×	×	≤ -۰/۵۷ متر بر ثانیه	-۳۶/۱٪ ۷۳/۸٪	۱۲ °C	×	۲۱ °C ۶ °C	آسایش حرارتی / CO <sub>2</sub>	(Miranda et al. 2022)

### ۳.۲. شاخص‌های ارزیابی تهویه طبیعی

مطالعات مختلف تنوعی از شاخص‌های ارزیابی تهویه طبیعی را با لحاظ پارامترهای ساختمانی ارائه می‌کنند؛ نظیر اثربخشی تهویه طبیعی<sup>۱۱</sup> (Yoon and Malkawi 2017)، شاخص عملکرد تهویه<sup>۱۲</sup> (Acred and Hunt 2014)، ساعات رضایت‌بخش تهویه طبیعی<sup>۱۳</sup> (Tan and Deng 2017)، اثربخشی خنک‌کننده تهویه طبیعی<sup>۱۴</sup>، نسبت بهره‌برداری بالقوه آب‌وهوا<sup>۱۵</sup> (Yoon et al. 2020). همچنین می‌توان از این شاخص‌ها در فازهای مختلف برای تخمین پتانسیل سرمایه‌گذاری تهویه طبیعی استفاده کرد. باین‌حال، درک پتانسیل اقلیمی (آب‌وهوا) برای بهره‌برداری از تهویه طبیعی باید اولین قدم باشد (Yoon et al. 2020).

مطابق مطالعات صورت‌گرفته، پتانسیل تهویه طبیعی در مقیاس آب‌وهوا بدون تداخل با ویژگی‌های ساختمان ارزیابی

می‌شود. شاخص‌هایی مانند ساعات تهویه طبیعی (Wen et al. 2023)، پتانسیل خنک‌کننده اقلیمی<sup>۱۶</sup> (Artmann, Manz, and Heiselberg 2007)، پتانسیل اقلیمی تهویه طبیعی<sup>۱۷</sup> (Causone 2016)، پتانسیل خنک‌کننده اقلیمی مبتنی بر آنتالپی<sup>۱۸</sup> (Fiorentini et al. 2019)، پتانسیل اقلیمی تهویه طبیعی گسترده<sup>۱۹</sup> (Bamdad et al. 2022)، در مقیاس اقلیم ارزیابی می‌شوند. پژوهشگران شاخص پتانسیل خنک‌کننده اقلیمی را برای تخمین پتانسیل خنک‌سازی شبانه تهویه طبیعی براساس تفاوت‌های دمایی ساختمان و فضای باز معرفی کرده‌اند که دمای ساختمان به‌طور هماهنگ در یک محدوده نوسان می‌کند (Artmann, Manz, and Heiselberg 2007).

پتانسیل اقلیمی تهویه طبیعی شاخصی است که به‌عنوان تعداد ساعات در یک سال که می‌توان از تهویه طبیعی استفاده نمود، تقسیم بر تعداد کل ساعت‌ها در سال تعریف می‌شود (Causone 2016). این شاخص شامل محدودیت‌های دمای محیط و نسبت رطوبت در محدوده آسایش است. حد بالایی دما توسط مدل آسایش حرارتی تطبیقی تعیین می‌شود و برای رطوبت نسبی، محدودیت‌های ۳۰٪ و ۷۰٪ در نظر گرفته می‌شود. پتانسیل اقلیمی تهویه طبیعی گسترده نیز مشخص می‌کند در صورت برآورده شدن الزامات سرعت بالای هوا تا چه حد تهویه طبیعی می‌تواند مورد بهره‌برداری قرار گیرد (Bamdad et al. 2022). شاخص ساعات تهویه طبیعی به‌عنوان تعداد ساعاتی در یک سال تعریف می‌شود که شرایط آب‌وهوایی در فضای باز (برای مثال دما، رطوبت، سرعت باد، کیفیت هوا) برای استفاده از تهویه طبیعی مناسب باشد. در تحقیق حاضر برای ارزیابی این شاخص از فایل‌های هواشناسی TMY استفاده شده، حد بالای دما طبق مدل آسایش حرارتی تطبیقی در نظر گرفته شده و حداکثر سرعت جریان هوای داخلی با استفاده از معادله بیان شده در جدول ۳ محاسبه می‌شود (Chen, Tong, and Malkawi 2017).

طبق مطالعات انجام‌شده، با توجه به اهمیت تأثیر شرایط اقلیمی بر پتانسیل استفاده از تهویه طبیعی، در میان شاخص‌های بیان‌شده، در پژوهش حاضر به بررسی و محاسبه شاخص تعداد ساعات تهویه طبیعی، در اقلیم ایران خواهیم پرداخت؛ زیرا در مراحل ابتدایی طراحی اتربخش‌تر است و می‌تواند در سنجش سریع طرح‌های معماری در راستای امکان‌پذیری یا میزان استفاده از تهویه طبیعی به معماران کمک کرده و پیش‌زمینه ذهنی مناسبی را برایشان فراهم نماید.

### ۳. روش‌شناسی

مبتنی بر مطالعات قبلی و به‌منظور پاسخ به سؤال اصلی پژوهش، روش پژوهش و اجزای آن مشتمل بر دو بخش روش‌شناسی در مقیاس اقلیم و روش‌شناسی در مقیاس ساختمان است که ذیلاً شرح داده خواهد شد. سپس روش دسته‌بندی و فرایند آن توضیح داده می‌شود.

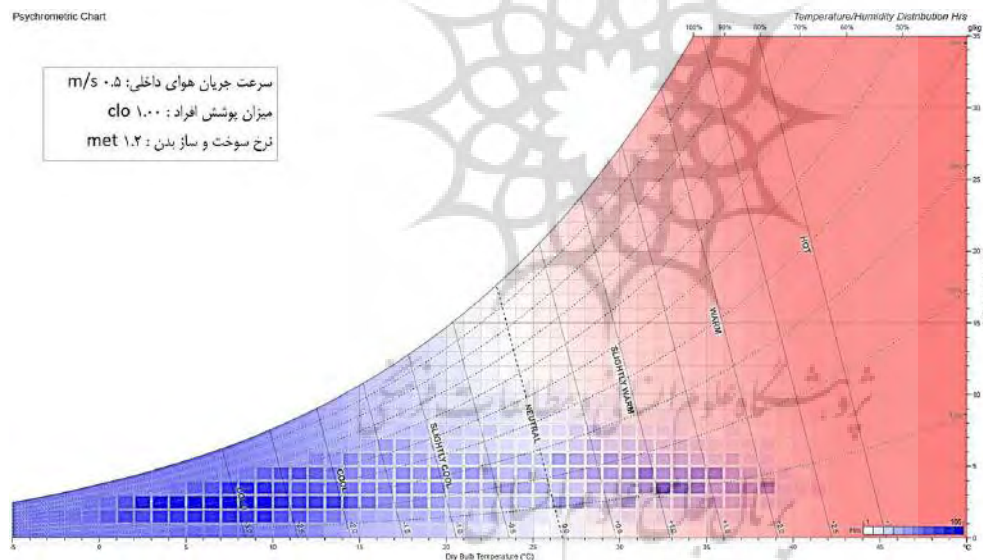
#### ۳.۱. روش‌شناسی در مقیاس اقلیم

برای اطمینان از یک طراحی پایدار و کارآمد، شناسایی حداکثر پتانسیل تهویه طبیعی در یک اقلیم معین و حساسیت آن به تغییرات آب‌وهوایی ضروری است. از این رو اولین گام در طراحی استراتژی‌های تهویه طبیعی در ساختمان‌ها این است که مشخص شود آیا (یا تا چه حد) آب‌وهوا برای استفاده از تهویه طبیعی مناسب است. به این منظور در این بخش طبق بررسی‌هایی که بر تحقیقات مشابه صورت گرفت، با استفاده از داده‌های فایل‌های آب‌وهوایی EPW<sup>۲۰</sup> برگرفته از سایت climate.onebuilding، نوع TMYx از سال ۲۰۰۷-۲۰۲۱ پتانسیل تهویه طبیعی (ساعات مناسب برای استفاده از تهویه طبیعی) به‌صورت یک بررسی سالانه در ۳۱ مرکز استان ایران مورد ارزیابی قرار گرفته و بازه‌ها و محدوده‌هایی برای یک سری از داده‌های آب‌وهوایی (دما، رطوبت و باد) تعیین شد. بدین منظور محاسبات در بستر گرس‌هاپر<sup>۲۱</sup> با استفاده از پلاگین کلایمت استودیو<sup>۲۲</sup> انجام شده است. سپس مقادیر به‌دست‌آمده با استفاده از روش خوشه‌بندی، دسته‌بندی شده و نقشه پتانسیل تهویه طبیعی ایران در سایت mapchart ترسیم می‌شود.

#### ۳.۱.۱. تعیین محدوده‌های در نظر گرفته‌شده

همان‌طور که در بخش پیشینه تحقیق اشاره شد، تحقیقات پیشین محدوده (بالایی) دمای قابل قبول هوا را افزایش

داده‌اند. همچنین طبق مدل آسایش حرارتی تطبیقی (De Dear and Brager 2002)، در این پژوهش برای حد بالای دما محدودیتی در نظر گرفته نشده است. از سوی دیگر، مطابق مطالعات قبلی (Wen et al. 2023) دمای  $17^{\circ}\text{C}$  به‌عنوان حد پایین دما در این پژوهش لحاظ شده است (این دما پس از بهینه‌یابی میان دماهای  $15^{\circ}\text{C}$  تا  $19^{\circ}\text{C}$  به دست آمد. با تغییر حد پایین دما از  $17$  به  $19$  درجه ساعات بیش‌سرمايش (ساعاتی که دما پایین‌تر از محدوده‌های آسایش حرارتی است) و با تغییر حد پایین دما از  $17$  به  $15$  درجه ساعات بیش‌گرمایش (ساعاتی که دما بالاتر از محدوده‌های آسایش حرارتی است) تغییر چندانی نداشته است. بنابراین دمای  $17$  درجه به دلیل داشتن عملکرد بهتر از نظر استقلال حرارتی در این تحقیق اعمال شده است). برای تعیین حداکثر سرعت مجاز باد بیرون برای استفاده از تهویه طبیعی، حداکثر سرعت جریان هوای داخلی  $0.5$  متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است (Tanabe and Kimura 1989) و حداکثر آستانه سرعت باد در فضای باز با استفاده از معادله تجربی پیشنهادی در (Phaff et al. 1980) در هر شهر با لحاظ تأثیر ترکیبی باد، دما و تلاطم بر تهویه طبیعی محاسبه شده است. ارتفاع عمودی پنجره  $1/65$  متر فرض شده است. تعیین حد بالا و پایین رطوبت نیز با توجه به اثری از  $0$  تا  $60\%$  در نظر گرفته شده است. در تصویر ۳ نمودار سایکرومتریک شهر تهران، طبق داده‌های آب‌وهوایی این شهر و اعمال محدودیت در رطوبت، با مشخص بودن محدوده‌های میانگین آرای پیش‌بینی‌شده<sup>۳۳</sup> با استفاده از ابزار مبتنی بر وب اندرو مارش (andrewmarsh.com) ترسیم شده است. فرایند انجام کار در تصویر ۴ نشان داده شده است.

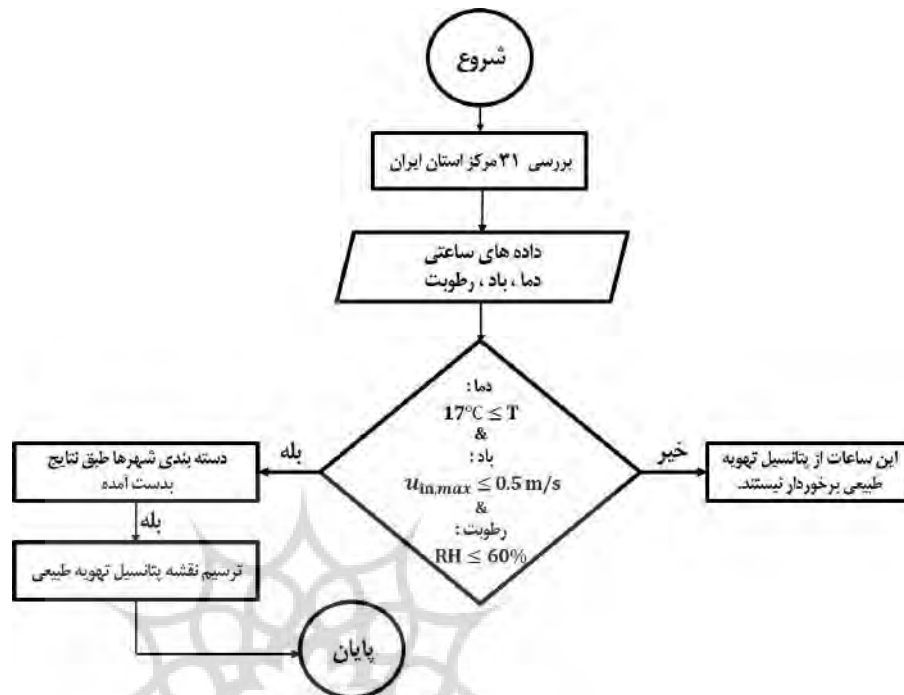


تصویر ۳: نمودار سایکرومتریک ترسیم‌شده با داده‌های آب‌وهوایی شهر تهران، با اعمال محدودیت در رطوبت ( $0$  تا  $60\%$  در نظر گرفته شده است)، محدوده میانگین آرای پیش‌بینی‌شده طبق سرعت جریان هوای داخلی، میزان پوشش افراد و نرخ سوخت‌وساز بدن، بر نمودار مشخص شده است.

### ۲.۳ روش‌شناسی در مقیاس ساختمان

پس از تعیین برنامه زمانی استفاده از تهویه طبیعی در طول سال مطابق مفروضات اخیر، به بررسی تأثیر تهویه بر ارتقای آسایش حرارتی و کیفیت هوا در مقیاس ساختمان در فضای داخلی پرداخته می‌شود. ضمن بررسی درصد ساعات آسایش، در این مطالعه از سطح غلظت کربن‌دی‌اکسید به‌عنوان شاخص کیفیت هوای داخل ساختمان استفاده شده است. همچنین با توجه به تأثیر تهویه بر کنترل بیماری کووید ۱۹، نرخ تعویض هوا<sup>۳۳</sup> نیز به‌منظور بررسی کیفیت هوا با عنایت به این موضوع محاسبه می‌شود. به این منظور، اتافی از یک ساختمان اداری به‌عنوان نمونه موردی انتخاب





تصویر ۴: روند تهیه نقشه پتانسیل تهویه طبیعی

شده و در محیط نرم افزار راینو ۶ مدل می شود. سپس در هریک از مراکز استان های ایران با استفاده از تحلیل های پارامتریک در بستر گرس هاپر و با استفاده از پلاگین کلایمت استودیو برای شبیه سازی ها شاخص های فوق بررسی شده است. شایان ذکر است موتور محاسباتی این ابزارها انرژی پلاس<sup>۲۵</sup> است و تحلیل های مربوط به تهویه با مدل شبکه جریان<sup>۲۶</sup> انجام شده اند. در تصویر ۵ ابزارهای استفاده شده نمایش داده شده اند.

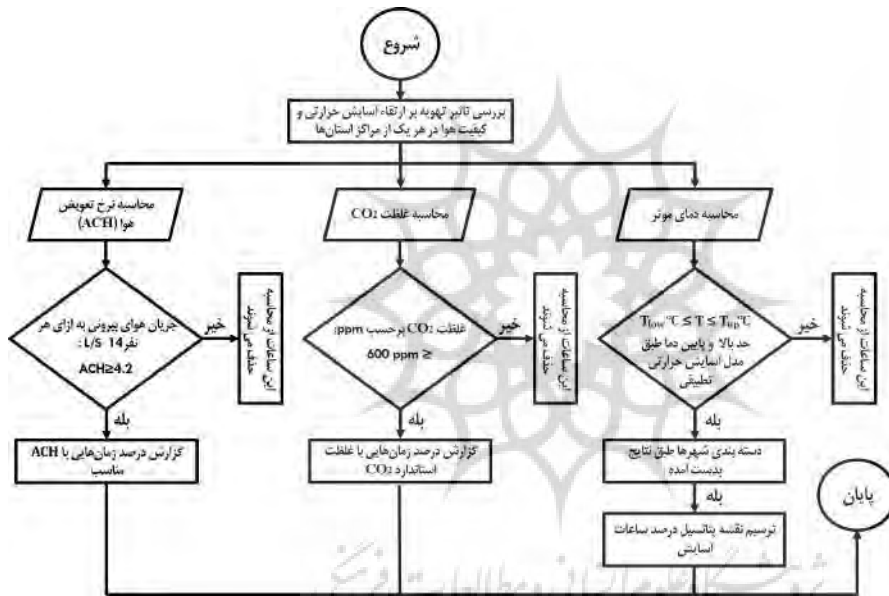


تصویر ۵: فرایند و ابزارهای استفاده شده

### ۳.۲.۱. تعیین محدوده های در نظر گرفته شده

به منظور بررسی تأثیر تهویه بر ارتقای آسایش حرارتی، دمای مؤثر<sup>۲۷</sup> در فضای اداری مورد بررسی محاسبه شده و برای ارزیابی درصد ساعات آسایش در طول سال، دمای حد بالا و پایین آسایش طبق مدل آسایش حرارتی تطبیقی (در این تحقیق محدوده های آسایش تطبیقی ۹۰٪ برای اطمینان داشتن از آسایش حرارتی تعداد بیشتری از افراد در نظر گرفته شده است.) با استفاده از نرم افزار کانسالتنت<sup>۲۸</sup> با توجه به فایل EPW) برای هر شهر مشخص شده است. طبق محدوده های به دست آمده برای هر شهر، درصد ساعاتی که در محدوده آسایش قرار می گیرند، محاسبه شده و با زمانی که فضا هیچ گونه تهویه ای نداشته، مقایسه می شود. سپس مقادیر به دست آمده با استفاده از روش خوشه بندی، دسته بندی شده و نقشه درصد ساعات آسایش حرارتی ایران در سایت mapchart ترسیم می شود. برای ارزیابی غلظت کربن دی اکسید در طول سال، میزان این غلظت برحسب ppm محاسبه شده و درصد ساعاتی که غلظت کمتر یا مساوی ۶۰۰ ppm

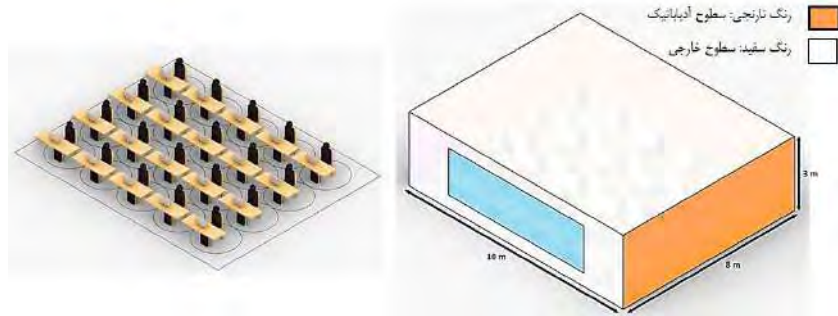
دارند (طبق استاندارد (ASHRAE 621-2016))، در محدوده استاندارد قرار گرفته و برای هر شهر گزارش می‌شود. غلظت بالای کربن دی‌اکسید (سطوح بالاتر از 700 ppm) نشان‌دهنده تهویه ضعیف بوده و می‌تواند با افزایش احتمال بروز عفونت‌های تنفسی مانند کووید ۱۹ در مکان‌های عمومی سرپوشیده مرتبط باشد (Morawska et al. 2020). در پژوهشی که کیفیت هوای داخلی مکان‌های عمومی (بررسی ۱۲ کاربری که اداری جزء مجموعه بررسی شده، نبوده است) در تهران بررسی شد، محدوده غلظت  $CO_2$  ppm ۴۴۱۸-۵۲۴ لحاظ شده بود (Derikvand et al. 2023). نرخ تعویض هوا نیز پس از انجام شبیه‌سازی‌ها محاسبه شده است. طبق رفرنس (Miranda et al. 2022) اگر مقدار هوای تازه مورد نیاز به‌ازای هر نفر ۱۴ لیتر بر ثانیه فرض شود، در فضای اداری مورد بررسی برای کنترل بیماری حدوداً ۴/۲ بار تعویض هوا در ساعت می‌تواند مناسب باشد. به‌این ترتیب درصد ساعاتی را که مقدار تعویض هوای بیشتر یا مساوی مقدار به‌دست‌آمده داشته باشند، برای هر شهر گزارش می‌شود. فرایند انجام کار در تصویر ۶ نمایش داده شده است.



تصویر ۶. روند انجام محاسبات بخش دوم پژوهش

### ۳.۳. مشخصات شبیه‌سازی‌ها

شبیه‌سازی‌ها در یک فضای اداری تک‌طبقه به ابعاد ۸ متر در ۱۰ متر در ۳ متر ارتفاع انجام شده‌اند، که تمام دیوارها به‌جز دیواری که پنجره در آن واقع شده، به‌صورت آدیاباتیک مدل‌سازی شده است (درواقع این فضا به‌عنوان جزئی از یک کل بزرگ‌تر فرض شده یا اتاقی از یک ساختمان بزرگ‌تر، به همین دلیل دیوارهای فاقد پنجره آدیاباتیک در نظر گرفته شده‌اند). این فضا تنها یک پنجره رو به‌سمت جنوب داشته و تهویه آن به‌صورت تهویه یک‌طرفه صورت می‌گیرد. در این فضا ۲۰ نفر کاربر، پشت میزهایی با ابعاد ۰/۶ متر در ۱/۶ متر، در دایره‌هایی فرضی با قطر ۱/۸۰ متر قرار گرفته‌اند. فاصله فیزیکی هر کاربر از کاربران نزدیک (جلوبی، پشتی و کناری) ۱/۸۰ متر است (فاصله اجتماعی ۱/۸۰ متری حداقل فاصله لازم با توجه به (Feng et al. 2020) است که در این مطالعه در نظر گرفته شده است). در تمام شبیه‌سازی‌ها سیستم تأسیسات خاموش در نظر گرفته شده و دما و شرایط آسایش در این حالت ارزیابی شده است. همچنین نیروهایی که برای تهویه در نظر گرفته شده‌اند، هر دو نیروی باد<sup>۲۹</sup> و نیروی شناوری<sup>۳۰</sup> هستند. مفروضات شبیه‌سازی‌ها در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است. همچنین در تصویر ۷ نمای بیرونی و داخلی فضای اداری بررسی شده قابل مشاهده است.



تصویر ۷: تصویر سمت راست: نمای بیرونی فضای اداری مورد بررسی، تصویر سمت چپ: نمای داخلی فضا

جدول ۳: فرضیات متغیر

فرضیات متغیر	
مراکز استان‌های ایران	اقلیم
حدود آسایش طبق مدل آسایش حرارتی تطبیقی ۹۰٪	دمای حد بالا و پایین آسایش
طبق معادله زیر: $u_{in,max} u_{in,max} = \sqrt{c_p u_{out,up}^2 + c_r h \Delta T_{max} + c_r}$	حداکثر آستانه سرعت باد در فضای باز

علاوه بر موارد ذکر شده در جدول ۳، برای مشاهده تغییرات احتمالی در نتایج، در صورت ایجاد تغییر در شرایط فرض شده، سایر پارامترهای مؤثر نظیر موقعیت استقرار پنجره و آلودگی هوای محیط خارجی نیز مبتنی بر روش پژوهش، برای نمونه در شهر تهران بررسی شدند که با استناد به روش بیان شده در مطالعات آتی برای سایر شهرها نیز قابل انجام و بررسی خواهد بود.

جدول ۴: فرضیات ثابت لحاظ شده در انجام شبیه‌سازی‌ها

فرضیات ثابت	
اداری، نوع ب طبق مبحث ۱۹ مقررات ملی	کاربری
۸ متر در ۱۰ متر در ۳ متر	ابعاد فضا
هیچ سیستمی لحاظ نشده	سیستم تأسیسات
۰/۲۵ P/m <sup>2</sup>	تعداد افراد در واحد سطح
۹۰.۱-۲۰۱۶ ۱/۲ طبق اشرفی	نرخ سوخت‌وساز بدن
۹۰.۱-۲۰۱۶ ۷/۵ طبق اشرفی	بار تجهیزات اداری (چگالی توان تجهیزات)
۹۰.۱-۲۰۱۶ ۱۱/۵ طبق مبحث ۱۹ (EC)	بار روشنایی (چگالی توان روشنایی)
۴۰۰ طبق (Grondzik and Kwok 2014)	میزان روشنایی (lux)
۰/۵ ach	نرخ نفوذ هوای ناخواسته (Infiltration)
%۳۰	WWR (نسبت پنجره به دیوار)
%۵۰	درصد باز شدن پنجره
به دلیل استفاده منقطع، عایق حرارتی داخلی برای تسهیل سرمایه‌گذاری و گرمایش فضا	محل قرارگیری عایق در سطوح مختلف
۰/۴۰۸ W/m <sup>2</sup> K	سقف
۱/۵۷۷ W/m <sup>2</sup> K	کف مجاور خاک
۰/۵۸۴ W/m <sup>2</sup> K	دیوار مجاور فضای خارج
۳/۰ W/m <sup>2</sup> K	پنجره
۰/۵۶۷ W/m <sup>2</sup> K	سقف
۱/۷۰ W/m <sup>2</sup> K	کف مجاور خاک
۰/۷۲۱ W/m <sup>2</sup> K	دیوار مجاور فضای خارج
۳/۰ W/m <sup>2</sup> K	پنجره

مشخصات پوسته ساختمانی، مطابق با مبحث ۱۹ (EC)

در میان مراکز استان‌های بررسی شده، طبق مبحث ۱۹ مقررات ملی، از نظر مشخصات پوسته ساختمان، همگی در دسته ساختمان‌های گروه ۳ قرار دارند، به جز چند شهر تبریز، ارومیه، اردبیل، بندر بوشهر، اهواز، زنجان، بندرعباس و همدان که در گروه ۲ قرار می‌گیرند.

#### ۴.۳. دسته‌بندی شهرها با روش خوشه‌بندی k میانگین

پس از انجام شبیه‌سازی‌ها طبق فرضیات بیان شده، داده‌های تولیدشده در نرم‌افزار اورنج،<sup>۳۱</sup> با استفاده از روش خوشه‌بندی و الگوریتم k-میانگین، دسته‌بندی شده و هر کدام از مراکز استان‌ها براساس تعداد ساعات تهویه (ساعات مناسب برای استفاده از تهویه طبیعی در هر شهر) و درصد ساعات آسایش در دسته خاصی قرار می‌گیرند.

خوشه‌بندی از روش‌های یادگیری بدون نظارت<sup>۳۲</sup> است. در یک خوشه‌بندی مناسب، اعضای یک خوشه بیشترین شباهت را با یکدیگر داشته و با اعضای سایر خوشه‌ها کمترین شباهت را دارند. خوشه‌بندی شامل دو رویکرد افزایشی<sup>۳۳</sup> و سلسله‌مراتبی<sup>۳۴</sup> است، که در این پژوهش از رویکرد افزایشی استفاده شده است. در این روش، داده‌ها به k خوشه تقسیم شده، فاصله هر نقطه با مرکز خوشه محاسبه و نقطه‌ای که کمترین فاصله را با آن داشته باشد، به آن خوشه تعلق دارد. فاصله اقلیدسی معروف‌ترین فاصله برای سنجش عضویت در خوشه‌هاست. یکی از معروف‌ترین و ساده‌ترین الگوریتم‌های خوشه‌بندی افزایشی، الگوریتم k میانگین بوده که در این پژوهش از آن استفاده می‌شود. در این روش برای ارزیابی خوشه‌بندی‌ها و یافتن بهترین تعداد خوشه‌ها از شاخص سیلوئت<sup>۳۵</sup> استفاده می‌شود. این معیار هم به پیوستگی درون خوشه‌ها و هم به میزان تفکیک‌پذیری آن‌ها بستگی دارد. شاخص سیلوئت برای هر نقطه، میزان تعلق آن را به خوشه‌اش در مقایسه با خوشه مجاور اندازه می‌گیرد. مقدار این شاخص بین -۱ تا +۱ تغییر می‌کند. مقدار نزدیک به ۱ بیانگر انطباق خوب بین نقطه و خوشه‌اش نسبت به خوشه مجاور است. اگر شاخص سیلوئت برای همه نقاط درون خوشه‌ها نزدیک به ۱ باشد، عمل خوشه‌بندی به درستی انجام شده است (Abdi and Gebrekristos 2022). عملکرد این الگوریتم را می‌توان به صورت خلاصه در تصویر ۸ مشاهده کرد.



تصویر ۸: عملکرد الگوریتم k-means (Howsam 2022)

#### ۴. یافته‌ها و بحث

با توجه به فرضیات بیان شده، برای هر یک از مراکز استان‌های ایران، محاسبات و شبیه‌سازی‌ها انجام شده و نتایج در مقیاس اقلیم شامل تعداد ساعات تهویه، حداکثر آستانه سرعت باد در فضای باز بوده و در مقیاس ساختمان شامل حدود آسایش طبق مدل آسایش حرارتی تطبیقی ۹۰٪، درصد ساعات آسایش در دو حالت با تهویه و بدون استفاده از تهویه طبیعی، درصد ساعاتی از سال که غلظت کربن دی‌اکسید مطابق با استاندارد باشد و درصد ساعاتی از سال که نرخ تعویض هوا طبق حدود ذکر شده باشد، که در دو بخش زیر ارائه شده است. تأکید می‌شود تمامی نتایج و مفروضات با فرض سیستم تأسیساتی خاموش محاسبه شده‌اند.

##### ۴.۱. یافته‌های بخش اول پژوهش، در مقیاس اقلیم

در این بخش به ارائه و تحلیل نتایج حاصل از بررسی پتانسیل تهویه طبیعی در مقیاس اقلیم پرداخته می‌شود. در جدول ۵ برای هر شهر، نتایج شاخص تعداد ساعات تهویه و حداکثر آستانه سرعت باد در فضای باز، برای استفاده از تهویه طبیعی ارائه شده است. طبق دسته‌بندی انجام شده با استفاده از روش خوشه‌بندی توسط الگوریتم k میانگین، بهترین تعداد دسته‌ها برای داده‌های ساعات تهویه در شهرهای مختلف، ۷ دسته بوده که در جدول ۶ می‌توان دسته‌ها را مشاهده

نمود. در نهایت، طبق دسته‌های ایجادشده، نقشه (تصویر ۹) مربوط به پتانسیل تهویه طبیعی ترسیم شده که در این نقشه، هریک از استان‌ها به رنگ مرکز استان که بررسی شده است، درآمده‌اند.

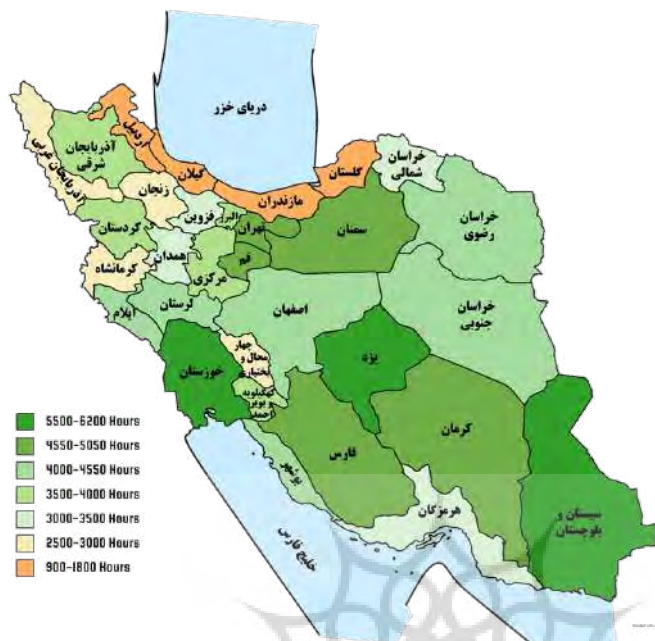
جدول ۵: نتایج بررسی پتانسیل تهویه در مقیاس اقلیم

ردیف	نام شهر	تعداد ساعات تهویه (hr)	حداکثر آستانه سرعت باد (m/s)	ردیف	نام شهر	تعداد ساعات تهویه (hr)	حداکثر آستانه سرعت باد (m/s)
۱	تبریز	۲۵۸۶	۱۳/۵	۲	ارومیه	۲۹۰۶	۱۲/۶
۳	اردبیل	۱۵۱۴	۱۴/۲	۴	اصفهان	۴۳۶۹	۱۲/۲
۵	کرج	۳۶۱۷	۱۳/۳	۶	ایلام	۴۱۶۳	۱۲/۲
۷	بندر بوشهر	۴۱۵۶	۱۳/۴	۸	تهران	۴۷۹۲	۱۲/۴
۹	شهرکرد	۲۸۸۵	۱۳/۸	۱۰	بیرجند	۴۵۱۴	۱۳
۱۱	مشهد	۴۱۹۶	۱۳/۴	۱۲	بجنورد	۳۱۳۰	۱۲/۲
۱۳	اهواز	۶۱۵۸	۱۱/۶	۱۴	زنجان	۲۹۱۸	۱۲/۴
۱۵	سمنان	۴۷۹۱	۱۳/۴	۱۶	زاهدان	۵۵۵۷	۱۲/۱
۱۷	شیراز	۴۹۴۳	۱۳/۲	۱۸	قزوین	۳۴۴۱	۱۲/۱
۱۹	قم	۴۹۹۲	۱۳	۲۰	سنتدج	۳۶۴۶	۱۲/۲
۲۱	کرمان	۴۶۳۸	۱۳/۵	۲۲	کرمانشاه	۲۹۹۸	۱۲/۷
۲۳	یاسوج	۲۸۰۰	۱۳/۷	۲۴	گرگان	۱۷۵۱	۱۲/۲
۲۵	رشت	۱۰۹۵	۱۴/۱	۲۶	خرم‌آباد	۴۲۳۵	۱۲/۶
۲۷	ساری	۱۳۴۷	۱۴	۲۸	اراک	۳۷۰۶	۱۲/۸
۲۹	بندرعباس	۳۳۰۱	۱۲/۴	۳۰	همدان	۳۰۸۹	۱۲/۴
۳۱	یزد	۵۵۴۳	۱۳				

جدول ۶: جدول دسته‌بندی تعداد ساعات تهویه طبیعی

دسته‌های ساعات تهویه	
$5500 \leq h < 6200$	$C_p$
$4550 \leq h < 5500$	$C_p$
$4000 \leq h < 4550$	$C_p$
$3500 \leq h < 4000$	$C_p$
$3000 \leq h < 3500$	$C_p$
$2500 \leq h < 3000$	$C_p$
$900 \leq h < 1800$	$C_1$

طبق نقشه ترسیم‌شده و دسته‌بندی‌های صورت‌گرفته، با حرکت از شمال ایران به سمت مرکز و جنوب، پتانسیل استفاده از تهویه طبیعی طبق شرایط تعریف‌شده، بیشتر شده است. اهواز با ۶۱۵۸ ساعت تهویه، بیشترین پتانسیل تهویه را داشته، سپس به ترتیب، زاهدان و یزد بیشترین پتانسیل تهویه را دارند. رشت با ۱۰۹۵ ساعت تهویه، کمترین پتانسیل و ساعات تهویه را داشته، سپس به ترتیب ساری، اردبیل و گرگان کمترین پتانسیل تهویه را داشته‌اند. به طور کلی می‌توان بیان نمود شهرهای مرکزی و جنوبی طبق شرایط تعریف‌شده، از پتانسیل بیشتری برای استفاده از تهویه طبیعی برخوردارند و شهرهای غرب و شمال غرب (مناطق سرد و کوهستانی به جز اردبیل که جزء شهرهایی با کمترین پتانسیل تهویه است) از ساعات تهویه متوسط رو به پایینی برخوردارند. همچنین در صورتی که محدودیت رطوبت در نظر گرفته نشود، شهرهای شمالی نیز از پتانسیل نسبتاً بالایی برای استفاده از تهویه طبیعی برخوردارند.



تصویر ۹: نقشه پتانسیل تهویه طبیعی (ساعات تهویه) مراکز استان‌های ایران

## ۲.۴ یافته‌های بخش دوم پژوهش، در مقیاس ساختمان

در این بخش به ارائه و تحلیل نتایج حاصل از بررسی تأثیر تهویه بر ارتقای آسایش حرارتی و کیفیت هوا در مقیاس ساختمان در فضای داخلی پرداخته می‌شود. حدود آسایش طبق مدل آسایش حرارتی تطبیقی ۹۰٪، نتایج درصد ساعات آسایش در دو حالت با تهویه و بدون تهویه، درصد ساعاتی از سال که غلظت کربن دی‌اکسید مطابق با استاندارد باشد و درصد ساعاتی از سال که نرخ تعویض هوا طبق حدود ذکر شده باشد، در جدول ۷ برای هر شهر ارائه شده است. طبق دسته‌بندی انجام‌شده با استفاده از روش خوشه‌بندی توسط الگوریتم k میانگین، بهترین تعداد دسته‌ها برای داده‌های درصد ساعات آسایش در شهرهای مختلف، ۵ دسته بوده که در جدول ۸ می‌توان دسته‌ها را مشاهده کرد. در نهایت طبق دسته‌های ایجادشده، نقشه (تصویر ۱۰) مربوط به درصد ساعات آسایش حرارتی ترسیم شده که در این نقشه هریک از استان‌ها به رنگ مرکز استان که بررسی شده است، درآمده‌اند.

جدول ۷: نتایج بررسی تأثیر تهویه بر ارتقای آسایش حرارتی و کیفیت هوا در مقیاس ساختمان

ردیف	نام شهر	درصد ساعات آسایش <sup>۱</sup> (%)	درصد ساعات آسایش بدون وجود تهویه <sup>۲</sup> (%)	حدود آسایش طبق مدل آسایش حرارتی تطبیقی ۹۰٪ <sup>۳</sup> (°C) T <sub>op</sub>	حدود آسایش طبق مدل آسایش حرارتی تطبیقی ۹۰٪ <sup>۳</sup> (°C) T <sub>low</sub>	درصد ساعاتی با غلظت استاندارد CO <sub>2</sub> با غلظت مناسب <sup>۴</sup> (%)	درصد ساعاتی با ACH مناسب <sup>۵</sup> (%)
۱	تبریز	۳۷/۰	۳۱/۶۸	۲۸/۹	۱۸/۴	۲۹/۵۴	۲۷/۴۰
۲	ارومیه	۳۶/۷۱	۳۲/۴۳	۲۸/۱	۱۸/۴	۲۸/۹۸	۲۳/۲۰
۳	اردبیل	۳۳/۱۵	۳۱/۷۳	۲۶/۵	۱۸/۴	۱۴/۱۳	۱۱/۹۱
۴	اصفهان	۴۲/۹۰	۳۸/۲۴	۲۹/۹	۱۸/۴	۴۱/۳۲	۴۰/۲۴
۵	کرج	۴۲/۲۱	۳۵/۷۴	۲۹/۲	۱۸/۴	۳۴/۹۶	۳۲/۱۳
۶	ایلام	۴۴/۶۶	۳۸/۰۲	۲۹/۶	۱۸/۴	۲۶/۴۰	۳۹/۵۳
۷	بندر بوشهر	۴۰/۸۳	۳۹/۸۳	۳۰/۷	۲۰/۱	۳۴/۳۳	۳۳/۵۰
۸	تهران	۴۲/۰۰	۳۶/۲۹	۳۰/۱	۱۸/۴	۳۹/۶۷	۳۱/۵۶

۹	شهرکرد	۳۸/۱۴	۳۴/۲۹	۲۸/۱	۱۸/۴	۳۱/۸۶	۲۹/۵۳
۱۰	بیرجند	۴۸/۰۲	۴۱/۶۳	۲۹/۶	۱۸/۴	۴۲/۸۸	۴۲/۲۰
۱۱	مشهد	۴۳/۶۶	۳۶/۴۱	۲۹/۴	۱۸/۴	۳۵/۷۹	۳۷/۴۵
۱۲	بجنورد	۴۲/۸۰	۳۵/۶۸	۲۸/۶	۱۸/۴	۳۴/۴۹	۲۸/۷۹
۱۳	اهواز	۳۹/۵۷	۳۶/۲۷	۳۰/۷	۱۹	۵۰/۰۸	۴۲/۲۹
۱۴	زنجان	۳۸/۰۵	۳۴/۰۵	۲۸/۳	۱۸/۴	۲۸/۶۹	۲۱/۷۹
۱۵	سمنان	۴۵/۰۴	۳۷/۵۳	۳۰/۶	۱۸/۴	۴۱/۲۱	۳۲/۰۴
۱۶	زاهدان	۵۰/۳۲	۴۱/۱۹	۳۰/۰	۱۸/۴	۵۰/۱۱	۴۸/۸۵
۱۷	شیراز	۴۷/۱۰	۳۹/۰۳	۳۰/۲	۱۸/۴	۴۵/۶۸	۴۰/۹۹
۱۸	قزوین	۴۲/۱۷	۳۶/۱۲	۲۹/۱	۱۸/۴	۳۳/۹۹	۳۲/۲۴
۱۹	قم	۴۶/۷۶	۳۷/۶۲	۳۰/۷	۱۸/۴	۴۲/۴۵	۴۲/۲۳
۲۰	سندج	۴۰/۲۵	۳۵/۶۵	۲۹/۴	۱۸/۴	۳۵/۱۹	۳۲/۶۵
۲۱	کرمان	۴۸/۲۵	۴۱/۶۳	۲۹/۷	۱۸/۴	۴۶/۰۲	۴۱/۲۸
۲۲	کرمانشاه	۴۲/۰۴	۳۵/۷۳	۲۷/۸	۱۸/۴	۳۰/۹۲	۲۵/۴۰
۲۳	یاسوج	۴۲/۸۹	۳۷/۸۲	۲۸/۹	۱۸/۴	۳۶/۶۸	۳۸/۳۴
۲۴	گرگان	۴۴/۰۹	۴۰/۱۱	۲۹/۲	۱۸/۴	۲۰/۱۶	۱۸/۶۲
۲۵	رشت	۴۵/۳۲	۴۲/۲۳	۲۸/۶	۱۸/۴	۱۰/۸۹	۱۱/۵۵
۲۶	خرم‌آباد	۴۴/۴۴	۳۸/۱۸	۲۹/۹	۱۸/۴	۳۶/۱۲	۳۹/۱۷
۲۷	ساری	۴۵/۵۷	۴۱/۸۰	۲۹	۱۸/۴	۱۷/۲۸	۱۴/۶۸
۲۸	اراک	۳۳/۰۵	۳۶/۶۴	۲۹/۳	۱۸/۴	۳۴/۳۰	۳۴/۸۵
۲۹	بندرعباس	۳۸/۴۹	۳۵/۹۸	۳۰/۷	۲۰/۵	۳۴/۳۴	۲۸/۵۹
۳۰	همدان	۳۵/۶۴	۲۹/۸۸	۲۸/۵	۱۸/۴	۲۹/۳۷	۲۲/۳۷
۳۱	یزد	۴۶/۵۴	۳۸/۳۹	۳۰/۷	۱۸/۴	۵۰/۱۶	۴۲/۴۵

۱. درصد ساعات آسایش حرارتی با استفاده از تهویه طبیعی در فضای مورد بررسی.

۲. درصد ساعات آسایش حرارتی بدون استفاده از تهویه طبیعی در فضای مورد بررسی.

۳. مشخص نمودن حد بالا و پایین دما در استفاده از تهویه طبیعی.

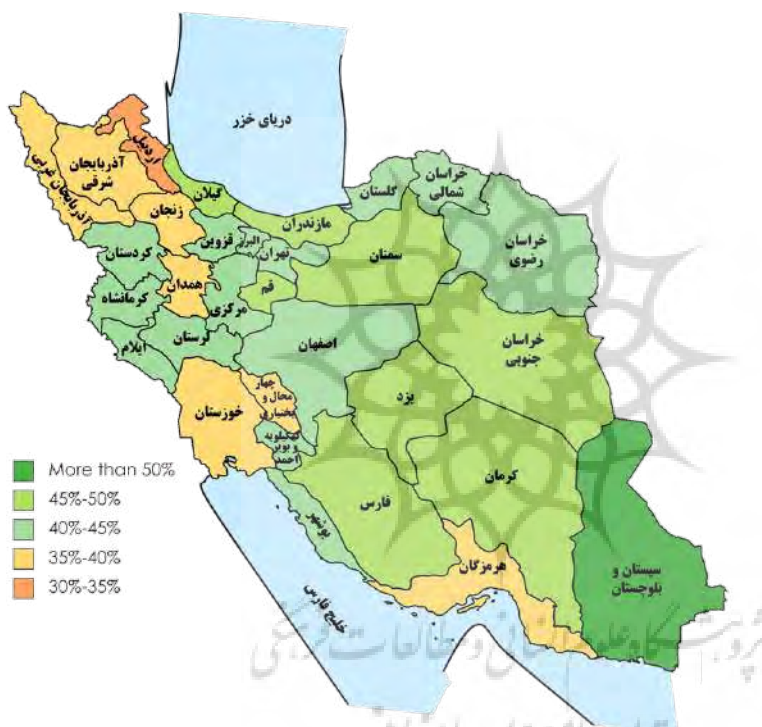
۴. دو ستون آخر: درصد ساعاتی است که با استفاده از تهویه طبیعی، مقدار ACH و غلظت CO<sub>2</sub> در فضای مورد بررسی به حد استاندارد می‌رسند.

جدول ۸: جدول دسته‌بندی درصد ساعات آسایش

دسته‌های درصد ساعات آسایش	
$h \leq 5\%$	$C_0$
$5\% < h < 45\%$	$C_1$
$45\% \leq h < 40\%$	$C_2$
$40\% \leq h < 35\%$	$C_3$
$35\% \leq h < 30\%$	$C_4$
$30\% \leq h < 25\%$	$C_5$

طبق نقشه ترمسیم‌شده و دسته‌بندی‌های صورت‌گرفته، زاهدان با  $50/32\%$ ، بیشترین درصد ساعات آسایش را داشته، سپس به ترتیب کرمان، بیرجند و شیراز بیشترین درصد ساعات آسایش را داشته‌اند. همچنین در میان شهرهای بررسی‌شده، اردبیل با  $33/15\%$ ، کمترین درصد ساعات آسایش حرارتی را داشته، سپس به ترتیب همدان، ارومیه و تبریز

کمترین درصد ساعات آسایش حرارتی را داشته‌اند. طبق نتایج به‌دست‌آمده در تمامی شهرهای بررسی‌شده، با مقایسه درصد ساعات آسایش در دو حالت با تهویه و بدون استفاده از تهویه طبیعی، می‌توان مشاهده نمود که در صورت استفاده از تهویه طبیعی درصد ساعات آسایش در طول سال افزایش یافته و باعث بهبود شرایط آسایشی در داخل ساختمان شده است. همچنین نیاز به استفاده از تجهیزات سرمایشی و تهویه مطبوع تا حدی کاهش یافته که موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی (به‌خصوص برق) می‌شود. طبق نتایج حاصل از بررسی کیفیت هوای فضای داخلی، درصد ساعاتی با غلظت کربن‌دی‌اکسید استاندارد از ۱۰/۸۹٪ تا ۵۰/۱۶٪ متغیر بوده که به‌ترتیب مربوط به شهرهای رشت و یزد است و درصد ساعاتی با نرخ تعویض هوای مناسب از ۱۱/۵۵٪ تا ۴۸/۸۵٪ متغیر بوده که به‌ترتیب مربوط به شهرهای رشت و زاهدان است.



تصویر ۱۰: نقشه درصد ساعات آسایش در مراکز استان‌های ایران

علاوه بر موارد فوق، با بررسی سایر پارامترهای مؤثر نظیر موقعیت استقرار پنجره و آلودگی هوای محیط خارجی، نتایج زیر نیز مبنی بر روش پژوهش ارائه شده حاصل گردید:

در ارتباط با تغییر محل استقرار پنجره در جبهه‌های جغرافیایی مختلف و تأثیر آن بر درصد ساعات آسایش، می‌توان گفت برای نمونه طبق تصویر ۱۱، که یک بررسی حول این مسئله در شهر تهران انجام شده، می‌توان دریافت درصد ساعات آسایش در حالتی که پنجره بر دیوار جنوبی مستقر است (حالتی که به‌عنوان حالت اصلی در این پژوهش لحاظ شد و نتایج آن در جداول مربوطه ارائه گردید)، نسبت به سایر حالات بیشتر بوده، سپس به‌ترتیب از شرق به غرب و شمال درصد ساعات آسایش کاهش یافته، تا در حالتی که پنجره بر دیوار شمالی قرار داشته، درصد ساعات آسایش نسبت به تمامی حالات کمتر شده است. علت این موضوع می‌تواند دریافت بیشتر بهره خورشیدی و تابشی باشد که ساختمان از سمت جنوب دریافت کرده و در جبهه‌های غربی و شمالی کاهش یافته است. همچنین



علاوه بر شرایط نامناسب هواشناسی، مانع دیگری که بهره‌گیری گسترده از تهویه طبیعی را محدود می‌کند، آلودگی هوای بیرون است. در این باره پژوهشی (پوردیهیمی و بینا ۱۳۹۳) در دزفول برای بررسی تأثیر جهت ساختمان بر کاهش آلودگی ناشی از ریزگردها در مجموعه‌های ساختمانی انجام شده است. نتیجه این پژوهش تعبیه بخش‌های حساس ساختمان در جهت مخالف سمت باد غالب است. بنابراین به دلیل اهمیت و تأثیری که آلاینده‌های هوا بر استفاده از تهویه دارند، بررسی دیگری در ارتباط با تأثیر لحاظ شدن غلظت آلاینده‌های جوی بر پتانسیل تهویه طبیعی در شهر تهران انجام شده که نتایج آن را می‌توان در جدول ۱۰ مشاهده کرد. این بررسی در شهر تهران، برای یک سال با استفاده از داده‌های گرفته‌شده از سازمان محیط زیست، از تاریخ ۸ شهریورماه ۱۴۰۰ تا ۸ شهریورماه ۱۴۰۱ انجام شده است. در این مسئله محدوده‌هایی طبق پژوهش (Ji, Zhao, and Zhao 2022) برای ۶ آلاینده جوی ( $PM_{10}$ ,  $O_3$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$ ,  $CO$ ) لحاظ شده که تأثیر آن‌ها را بر کاهش تعداد ساعات مناسب برای استفاده از تهویه طبیعی می‌توان مشاهده کرد. این بررسی در سه سطح انجام شده است: ۱. آلودگی در سطح بالا؛ ۲. آلودگی در سطح متوسط؛ ۳. آلودگی در سطح پایین، محدوده‌های در نظر گرفته شده در هر سطح، برای هر یک از آلاینده‌ها را می‌توان در جدول ۹ مشاهده کرد.

جدول ۹: حدود در نظر گرفته شده برای آلاینده‌های جوی

آلاینده‌های جوی	آلودگی در سطح بالا	آلودگی در سطح متوسط	آلودگی در سطح پایین
CO	$CO \leq 10$	$CO \leq 4$	$CO \leq 4$
SO <sub>2</sub>	$SO_2 \leq 500$	$SO_2 \leq 60$	$SO_2 \leq 50$
NO <sub>2</sub>	$NO_2 \leq 200$	$NO_2 \leq 40$	$NO_2 \leq 20$
O <sub>3</sub>	$O_3 \leq 200$	$O_3 \leq 160$	$O_3 \leq 70$
PM <sub>10</sub>	$PM_{10} \leq 150$	$PM_{10} \leq 70$	$PM_{10} \leq 20$
PM <sub>2.5</sub>	$PM_{2.5} \leq 75$	$PM_{2.5} \leq 35$	$PM_{2.5} \leq 10$

مقایسه درصد ساعات آسایش در جهت‌های مختلف استقرار پنجره



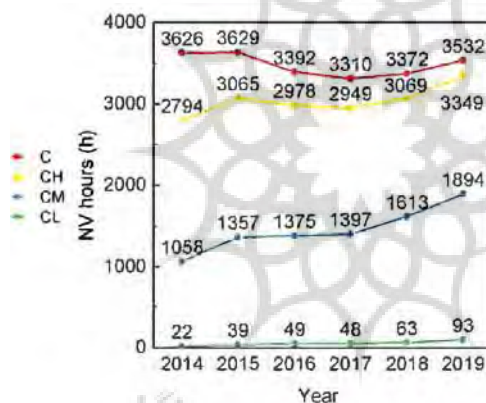
تصویر ۱۱: مقایسه درصد ساعات آسایش با تغییر محل استقرار پنجره در شهر تهران

طبق نتایج به دست آمده در جدول ۱۰ می‌توان کاهش تعداد ساعات مناسب برای استفاده از تهویه طبیعی در تهران را مشاهده کرد (در مقایسه با نتایج به دست آمده در جدول ۵). در میان آلاینده‌های در نظر گرفته شده، غلظت CO در هیچ یک از حالات مناسب نبوده است. همچنین به ترتیب CO،  $PM_{2.5}$  و  $NO_2$  بیشترین محدودیت را ایجاد کرده و  $O_3$  نیز کمترین محدودیت را ایجاد کرده‌اند.

جدول ۱۰: بررسی ساعات مناسب برای استفاده از تهویه طبیعی در تهران با در نظر گرفتن آلاینده‌های جوی

تعداد ساعات تهویه با در نظر گرفتن آلاینده‌ها	تعداد ساعات تهویه در طول سال بعد از اعمال محدودیت هر آلاینده						
	CO	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	
بدون CO: ۷۳۳ ساعت بدون CO و PM <sub>2.5</sub> : ۴۶۶۲ ساعت	۰	۸۷۶۰	۸۷۶۰	۸۷۶۰	۸۶۱۶	۱۷۵۲	بالا
بدون CO و PM <sub>2.5</sub> : ۱۱ ساعت بدون CO و PM <sub>2.5</sub> و NO <sub>2</sub> : ۲۹۷۹ ساعت	۰	۸۶۴۰	۴۸	۸۶۸۸	۵۹۲۸	۰	متوسط
فقط با در نظر گرفتن محدودیت SO <sub>2</sub> و O <sub>3</sub> : ۷۷۸۳	۰	۸۳۰۴	۰	۶۸۴۰	۰	۰	پایین

در تصویر ۱۲، میانگین سالانه ساعات استفاده از تهویه طبیعی در ۷۴ شهر چین از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ را در ۴ سناریو می‌توان مشاهده کرد. با گذشت زمان در چین به دلیل کاهش غلظت آلاینده‌ها، کیفیت هوا بهتر شده و شرایط برای استفاده از تهویه طبیعی با افزایش ساعات تهویه، بهبود یافته است. با این حال، تعداد کل ساعات تهویه در سناریو آلودگی با غلظت پایین، کم بوده و نشان می‌دهد محیط جوی چین هنوز تا رسیدن به حد مجاز آلودگی سازمان بهداشت جهانی<sup>۴۱</sup> فاصله دارد (Ji, Zhao, and Zhao 2022).



تصویر ۱۲: بررسی تأثیر آلاینده‌های هوا بر میانگین سالانه ساعات استفاده از تهویه طبیعی در ۷۴ شهر چین از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ (Ji, Zhao, and Zhao 2022)

البته قابل ذکر است که علاوه بر دو پارامتری (تأثیر آلاینده‌های جوی و جبهه قرارگیری پنجره) که تأثیر تغییر یا لحاظ آن‌ها بر نتایج مشاهده شد، سایر پارامترها نیز ممکن است بر نتایج این تحقیق اثر گذاشته و موجب تغییراتی در آن گردند؛ مانند تغییر سناریو تهویه. در این تحقیق تنها تهویه یک‌طرفه بررسی شده، در بررسی‌های بعدی می‌توان تأثیر تهویه دو طرفه مقابل و مجاور را نیز بررسی نمود. تغییر ابعاد پنجره، تغییر درصد باز شو پنجره، هندسه ساختمان، موانع شهری، سروصدای خارجی، تغییر اقلیم<sup>۴۲</sup>، گرمایش جهانی، تغییر محدوده‌های در نظر گرفته شده برای داده‌های اقلیمی (دما، رطوبت و باد) و امتحان روش‌های متفاوت و مقایسه نتایج حاصل از آن‌ها می‌تواند نتایج این پژوهش را تغییر دهد.

## نتیجه

در این تحقیق به علت تأثیری که تهویه طبیعی بر کاهش مصرف انرژی ساختمان، ایجاد آسایش حرارتی و بهبود کیفیت هوای داخل ساختمان دارد، برای اولین بار در اقلیم ایران سعی به پتانسیل‌سنجی تهویه طبیعی برای استفاده حداکثری از آن شده است. به این منظور پژوهش حاضر در دو بخش انجام شد: در بخش اول به بررسی پتانسیل تهویه طبیعی در مقیاس اقلیم پرداخته شد. در این راستا محدودیت‌هایی بر داده‌های آب‌وهوایی (دما، رطوبت و باد) اعمال شده، سپس

طبق شرایط تعریف شده با استفاده از فایل‌های آب‌وهوایی، تعداد ساعات مناسب برای بهره‌گیری از تهویه طبیعی در ۳۱ مرکز استان ایران محاسبه شد. در بخش دوم، به بررسی تأثیر تهویه بر ارتقای آسایش حرارتی و کیفیت هوا در مقیاس ساختمان پرداخته شد. به این منظور، اتاقی از یک ساختمان اداری با تهویه یک‌طرفه و پنجره جنوبی به‌عنوان نمونه موردی برای انجام شبیه‌سازی‌ها انتخاب گردید. در هر دو بخش، محاسبات با استفاده از پلاگین کلایمت استودیو انجام شد و پس از دسته‌بندی داده‌ها، نقشه پتانسیل تهویه طبیعی ایران و درصد ساعات آسایش ترسیم گردید.

طبق نتایج به‌دست آمده، رشت کمترین پتانسیل و ساعات تهویه (۱۰۹۵) را داشته (به دلیل محدودیت رطوبت) و هواز بیشترین ساعات (۶۱۵۸) را به خود اختصاص داده است. بیشترین درصد ساعات آسایش (۳۳/۵۰٪) در نتیجه استفاده از تهویه طبیعی مربوط به زاهدان و کمترین مقدار مربوط به شهر اردبیل (۱۵/۳۳٪) است. رشت کمترین درصد ساعات (۱۰/۸۹٪) با غلظت کربن دی‌اکسید استاندارد را داشته و یزد دارای بیشترین درصد ساعات استاندارد (۵۰/۱۶٪) بوده است. همچنین در زمینه درصد ساعات با نرخ تعویض هوای مناسب نیز رشت (۱۱/۵۵٪) کمترین مقدار را به خود اختصاص داده و زاهدان (۴۸/۸۵٪) بیشترین مقدار را دارد. امید است این پژوهش به سیاست‌گذاران و معماران در شناخت کمی پتانسیل تهویه طبیعی در مناطق و اقلیم‌های مختلف کشورمان و در توسعه استفاده صحیح و حداکثری از تهویه طبیعی با در نظر گرفتن ویژگی‌های آب‌وهوای محلی کمک نماید.

در گام‌های بعد، پژوهشگران می‌توانند شهرهای بیشتری را بررسی کرده و به نتایج این تحقیق بیفزایند. با بررسی سایر شهرهای کشورمان، می‌توان نقشه‌ها و دسته‌بندی‌های دقیق‌تری را برای بررسی پتانسیل تهویه و درصد ساعات آسایش ارائه نمود. البته قابل ذکر است که علاوه بر شرایط آب‌وهوایی هر منطقه، عواملی مانند جهت باد، ضرایب تخلیه پنجره، هندسه ساختمان، سطوح آلودگی محلی (آلاینده‌های جوی در بسیاری از مکان‌ها تهویه طبیعی را نه تنها چالش برانگیز، بلکه ناسالم می‌کند و نشان داده شده است که بر پتانسیل صرفه‌جویی در انرژی تأثیر می‌گذارد. در این تحقیق، این مسئله در تهران بررسی شد که نتیجه آن کاهش تعداد ساعات مناسب برای استفاده از تهویه طبیعی با در نظر گرفتن آلاینده‌های هوا بود)، موانع شهری، سروصدای خارجی و گرمایش جهانی بر تعداد ساعات استفاده از تهویه طبیعی در ساختمان‌ها تأثیر می‌گذارند، که می‌توان در تحقیقات آتی تأثیر آن‌ها را بررسی نمود.

## پی‌نوشت‌ها

1. International Energy Agency (IAE)
2. COVID-19
3. Natural Ventilation (NV)
4. Natural Ventilation Potential (NVP)
5. SARS-CoV-2
6. Natural Ventilation Hours (NVh)
7. Building Energy Simulation (BES)
8. Upper threshold of the acceptable comfort range ( $T_{up}$ )
9. Lower threshold of the acceptable comfort range ( $T_{low}$ )
10. Indoor Air Quality (IAQ)
11. Natural Ventilation Effectiveness (NVE)
12. Ventilation Performance Indicator (VPI)
13. Satisfied Natural Ventilation Hour (SNVH)
14. Natural Ventilation Cooling Effectiveness (NVCE)
15. Climate Potential Utilization Ratio (CPUR)

16. Climatic Cooling Potential (CCP)
  17. Climatic Potential of Natural Ventilation (CPNV)
  18. Enthalpy-Based Climatic Cooling Potential
  19. Climatic Potential of Extended Natural Ventilation (CPENV)
  20. Grasshopper
  21. Climate Studio
  22. Predicted Mean Vote (PMV)
  23. Air Change Rate (ACH)
  24. Rhino 6
  25. Energy Plus
  26. Airflow Network
  27. Operative Temperature
  28. Climate Consultant
  29. Wind Driven
  30. Buoyancy Driven
  31. Orange
  32. Unsupervised Learning
  33. Partitional
  34. Hierarchical
  35. Silhouette
۳۶. درصد ساعات آسایش حرارتی با استفاده از تهویه طبیعی در فضای مورد بررسی.
۳۷. درصد ساعات آسایش حرارتی بدون استفاده از تهویه طبیعی در فضای مورد بررسی.
۳۸. مشخص نمودن حد بالا و پایین دما در استفاده از تهویه طبیعی.
۳۹. دو ستون آخر: درصد ساعاتی است که با استفاده از تهویه طبیعی، مقدار ACH و غلظت CO<sub>2</sub>، در فضای مورد بررسی به حد استاندارد می‌رسد.
۴۰. در این تصویر، سناریوی C، مربوط به در نظر گرفتن پارامترهای اقلیمی بدون آلاینده‌ها و سناریوهای CL، CM و CH به ترتیب، بررسی ساعات تهویه در سه سطح آلودگی پایین، متوسط و بالاست.
41. World Health Organization (WHO)
  42. Climate Change



### منابع

- بهرامی، محمد. ۶ شهریور ۱۴۰۰. ضرورت صرفه‌جویی در مصرف برق برای جلوگیری از خاموشی‌ها. خبرگزاری جمهوری اسلامی. <https://www.irna.ir/news>
- پوردیهیمی، شهرام، و محسن بینا. ۱۳۹۳. بررسی تأثیر جهت ساختمان بر کاهش آلودگی ناشی از ریزگردها در مجموعه‌های ساختمانی (مورد مطالعاتی: بناهای شهر دزفول). مجله مطالعات معماری ایران، ش. ۶: ۴۱-۶۳.
- لکنر، نربرت. ۱۹۹۱. گرمایش، سرمایش، روشنایی: رویکردهای طراحی برای معماران. ترجمه محمدعلی کی‌نژاد و رحمان آذری. ۱۳۸۵. تبریز: دانشگاه هنر اسلامی تبریز.
- منصوری، محمدعلی. ۲۶ فروردین ۱۴۰۲. شرکت توزیع نیروی برق تهران بزرگ. <https://tbtb.ir>

- Abdi, Dawit, and Sirak Gebrekristos. 2022. Regionalization of Low Flow Analysis in Data Scarce Region: The Case of the Lake Abaya-Chamo Sub-Basin, Rift Valley Lakes Basin, Ethiopia. *Journal of Water Management Modeling* 30. C487.
- Acred, Andrew, and Gary R. Hunt. 2014. Stack Ventilation in Multi-Storey Atrium Buildings: A Dimensionless Design Approach. *Building and Environment* 72 (February): 44-52.
- Artmann, N., H. Manz, and P. Heiselberg. 2007. Climatic Potential for Passive Cooling of Buildings by Night-Time Ventilation in Europe. *Applied Energy* 84 (2): 187-201.
- ASHRAE handbook – fundamentals, 2009. Publisher: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.
- ASHRAE, Standard 55, 2010. American Society of Heating, Refrigerating and air-Conditioning Engineers. thermal environmental conditions for human occupancy.
- ASHRAE, Standard 621-2016. American Society of Heating. Refrigerating and air-Conditioning Engineers (ASHRAE). ANSI/ASHRAE Standard 621-2016 Ventilation for acceptable Indoor air Quality.
- Aviv, Dorit, Kian Wee Chen, Eric Teitelbaum, Denon Sheppard, Jovan Pantelic, Adam Rysanek, and Forrest Meggers. 2021. A Fresh (Air) Look at Ventilation for COVID-19: Estimating the Global Energy Savings Potential of Coupling Natural Ventilation with Novel Radiant Cooling Strategies. *Applied Energy* 292 (June): 116848.
- Bamdad, Keivan, Soha Matour, Nima Izadyar, and Tim Law. 2022. Introducing Extended Natural Ventilation Index for Buildings under the Present and Future Changing Climates. *Building and Environment* 226 (December): 109688.
- BS 5925, 1991, Code of practice for design of buildings : ventilation principles and designing for natural ventilation. Building Research Establishment “Thermal Insulation - Avoiding Risks”.A British Standard
- BSRIA,1998,The Building Services Research and Information Association in UK.
- Carrer, Paolo, Pawel Wargocki, Annaclara Fanetti, Wolfgang Bischof, Eduardo De Oliveira Fernandes, Thomas Hartmann, Stylianos Kephelopoulos, Susanna Palkonen, and Olli Seppänen. 2015. What Does the Scientific Literature Tell Us about the Ventilation-Health Relationship in Public and Residential Buildings? *Building and Environment* 94 (P1): 273-86.
- Causone, Francesco. 2016. Climatic Potential for Natural Ventilation. *Architectural Science Review* 59 (3): 212-28.
- Chen, Yujiao, Zheming Tong, and Ali Malkawi. 2017. Investigating Natural Ventilation Potentials across the Globe: Regional and Climatic Variations. *Building and Environment* 122 (September): 386–96.
- Dear, Richard J. De, and Gail S. Brager. 2002. Thermal Comfort in Naturally Ventilated Buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings* 34 (6): 549-61.
- Derikvand, Ahmad, Ali Taherkhani, Mohammad Sadegh Hassanvand, Kazem Naddafi, Ramin Nabizadeh, Mansour Shamsipour, Sadegh Niazi, Mohsen Heidari, Adel Mokammel, and Sasan Faridi. 2023. Indoor Air Quality in the Most Crowded Public Places of Tehran: An Inhalation Health

Risk Assessment. Atmosphere 14 (7): 1080.

- Elsaid, Ashraf Mimi, and M. Salem Ahmed. 2021. Indoor Air Quality Strategies for Air-Conditioning and Ventilation Systems with the Spread of the Global Coronavirus (COVID-19) Epidemic: Improvements and Recommendations. Environmental Research 199 (August): 111314.
- Emmerich, Steven J, W Stuart Dols, and James W Axley. 2001. Natural Ventilation Review and Plan for Design and Analysis Tools | NIST (National Institute of Standards and Technology).
- Feng, Yu, Thierry Marchal, Ted Sperry, and Hang Yi. 2020. Influence of Wind and Relative Humidity on the Social Distancing Effectiveness to Prevent COVID-19 Airborne Transmission: A Numerical Study. Journal of Aerosol Science 147 (September): 105585.
- Fiorentini, Massimo, Federico Tartarini, Laia Ledo Gomis, Daniel Daly, and Paul Cooper. 2019. Development of an Enthalpy-Based Index to Assess Climatic Potential for Ventilative Cooling of Buildings: An Australian Example. Applied Energy 251 (October): 113169.
- Germano, M., and C. A. Roulet. 2006. Multicriteria Assessment of Natural Ventilation Potential. Solar Energy 80 (4): 393-401.
- Givoni, B. (1998) Climate Considerations in Building and Urban Design. Van Nostrand Reinhold, the USA.
- Hamilton, I., et al. 2020, Global Status Report for Buildings and Construction: towards a Zero-Emission, United Nations Environment Programme, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector, Nairobi, Kenya.
- Howsam, 2022, <https://howsam.org/kmeans-tutorial/> (accessed August 27, 2023).
- Hsie, Tung-Shen, and I. C. Ward. 2006. A GIS-Based Method for Determining Natural Ventilation Potentials and Urban Morphology, in: 23rd International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Citeseer, Geneva, Switzerland.
- Indoor Air Quality Standard, 2003, GB/T 18883-2002, Standardization Administration of the People's Republic of China.
- International Energy Agency (IEA). 2018. The Future of Cooling- Opportunities for Energy-Efficient Air Conditioning, International Energy Agency (IEA).
- Ji, Wenjing, Kaijia Zhao, and Bin Zhao. 2022. The Trend of Natural Ventilation Potential in 74 Chinese Cities from 2014 to 2019: Impact of Air Pollution and Climate Change. Building and Environment 218 (June): 109146.
- Jung, Wooyoung, and Farrokh Jazizadeh. 2019. Human-in-the-Loop HVAC Operations: A Quantitative Review on Occupancy, Comfort, and Energy-Efficiency Dimensions. Applied Energy 239 (April): 1471-1508.
- Lipinski, Tom, Darem Ahmad, Nicolas Serey, and Hussam Jouhara. 2020. Review of Ventilation Strategies to Reduce the Risk of Disease Transmission in High Occupancy Buildings. International Journal of Thermofluids 7-8 (November): 100045.
- Miranda, M. T., P. Romero, V. Valero-Amaro, J. I. Arranz, and I. Montero. 2022. Ventilation Conditions and Their Influence on Thermal Comfort in Examination Classrooms in Times of COVID-19. A

- Case Study in a Spanish Area with Mediterranean Climate. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 240 (March): 113910.
- Morawska, Lidia, Julian W. Tang, William Bahnfleth, Philomena M. Bluysen, Atze Boerstra, Giorgio Buonanno, Junji Cao, et al. 2020. How Can Airborne Transmission of COVID-19 Indoors Be Minimised? *Environment International* 142 (September): 105832.
  - Phaff, J, W. de Gids, J. Ton, D. van der Ree and L. Schijndel. 1980. The Ventilation of Buildings: Investigation of the Consequences of Opening One Window on the Internal Climate of a Room. Report C 448, TNO Institute for Environmental Hygiene and Health Technology (IMG-TNO). Delft. The Netherlands.
  - RITE, 2007. Reglamento instalaciones térmicas en los edificios.
  - Santamouris, M., Pavlou, K., Doukas, P., & Mihalakakou, G. 2018. On the efficiency of natural ventilation techniques for the indoor environment. *Energy and Buildings*, 40(5), 837-844.
  - Sundell, J., H. Levin, W. W. Nazaroff, W. S. Cain, W. J. Fisk, D. T. Grimsrud, F. Gyntelberg, et al. 2011. Ventilation Rates and Health: Multidisciplinary Review of the Scientific Literature. *Indoor Air* 21 (3): 191-204.
  - Tan, Zijng, and Xiang Deng. 2017. Assessment of Natural Ventilation Potential for Residential Buildings across Different Climate Zones in Australia. *Atmosphere* 8 (9).
  - Tanabe, S., and Kimura, K. 1989. Thermal comfort requirements under hot humid conditions. Berkeley.
  - Wen, Liwei, Kyosuke Hiyama, Yu Huang, and Xueting Qin. 2023. A Framework for Rapid Diagnosis of Natural Ventilation Effect during Early Design Stage Using Thermal Autonomy. *International Journal of Green Energy* 20 (7): 752-66.
  - Wood, Antony, and Ruba. Salib. 2013. Guide To Natural Ventilation in High Rise Office Buildings, Council on Tall Buildings and Urban Habitat. ISBN 9780415509589.
  - World Health Organization, 2020. Transmission of SARS-CoV-2: implications for infection prevention precautions. scientific brief.
  - Yoon, Nari, Leslie Norford, Ali Malkawi, Holly Samuelson, and Mary Ann Piette. 2020. Dynamic Metrics of Natural Ventilation Cooling Effectiveness for Interactive Modeling. *Building and Environment* 180 (August): 106994.
  - Yoon, N, and A. Malkawi. 2017. Predicting the effectiveness of wind-driven natural ventilation strategy for interactive building design, in: Proceedings of the 15th International Building Simulation Conference. San Francisco, CA, USA.
  - Zheng, Wandong, Jingfan Hu, Zhaoying Wang, Jinbo Li, Zheng Fu, Han Li, Jakub Jurasz, S. K. Chou, and Jinyue Yan. 2021. COVID-19 Impact on Operation and Energy Consumption of Heating, Ventilation and Air-Conditioning (HVAC) Systems. *Advances in Applied Energy* 3 (August): 100040.
  - Zhong, Huai Yu, Yang Sun, Jin Shang, Fu Ping Qian, Fu Yun Zhao, Hideki Kikumoto, Carlos Jimenez-Bescos, and Xiaochen Liu. 2022. Single-Sided Natural Ventilation in Buildings: A Critical Literature Review. *Building and Environment* 212 (March): 108797.