



روش‌های ارزیابی تهویه طبیعی با تاکید بر فضاهای آموزشی

میلاذ امید¹، امید رهایی^{2*}، مرضیه آزاد ارمکی³، سیدآرش سیدشمس طالقانی⁴

1- دانشجوی دکتری، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

2- استادیار، گروه معماری، دانشکده مهندسی معماری و شهرسازی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

3- دانشیار، گروه معماری، دانشکده مهندسی معماری و شهرسازی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

4- استادیار، پژوهشگاه هوافضا، پژوهشکده علوم و فناوری‌های هوایی، تهران، ایران

* تهران، صندوق پستی: 16785-163، پست الکترونیکی: o.rahaei@sru.ac.ir

چکیده

جلوگیری از اتلاف و صرفه‌جویی در مصرف انرژی با توجه به کاهش و محدود بودن ذخایر انرژی فسیلی و خطر گرمای بیش از حد استفاده از آن از مهم‌ترین موضوعات دنیای امروز است. این در حالی است که عمده مصرف انرژی ساختمان به استفاده از تهویه مکانیکی مربوط می‌شود. بنابراین با توجه به مزیت‌های تهویه طبیعی، توسعه و استفاده از آن ضرورت دارد. این امر در کلاس‌های درس به علت جمعیت و تحرک بالا، اهمیت بیشتری می‌یابد. علی‌رغم پژوهش‌های بسیاری که در حوزه تهویه طبیعی انجام شده است، همچنان نیاز به مطالعات بیشتر و توسعه این سیستم در فضاهای آموزشی وجود دارد. بنابراین در این پژوهش با هدف شناخت ویژگی‌های تهویه طبیعی و روش‌های رایج در تحلیل آن، به مرور مطالعات انجام شده در این حوزه با تاکید بیشتر بر مطالعات فضاهای آموزشی پرداخته می‌شود. پژوهش‌های بررسی شده با کلیدواژه‌های مرتبط با تهویه طبیعی شامل بیش از 300 مقاله از پایگاه ساینس دایرکت و نشریات داخلی است که 140 منبع در این مقاله ذکر شده است. نتیجه نشان می‌دهد که علی‌رغم اهمیت بالای فضاهای آموزشی و نیاز به استفاده از تهویه طبیعی در این ساختمان‌ها، توجه به آن کافی نیست و لازم است تمامی ابعاد و پارامترهای مرتبط با تهویه طبیعی در فضاهای آموزشی بخصوص بازشوها و دهانه‌ها که نقش کلیدی در این زمینه دارند بررسی گردد. عمده پژوهش‌ها از دو روش اندازه‌گیری تجربی و مدل شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی استفاده کرده‌اند که در ساختمان‌ها با کاربری‌های متنوع در جهت بررسی متغیرها انجام شده است.

کلیدواژه‌گان: تهویه طبیعی، اندازه‌گیری تجربی، دینامیک سیالات محاسباتی، فضاهای آموزشی

Methods of evaluating natural ventilation with emphasis on educational spaces

Milad Omid¹, Omid Rahaei^{2*}, Marzieh Azad Armaki³, Arash Shams Taleghani⁴

1- PhD Student in Architecture, School of Architecture and Urban Design, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

2- Assistant Professor Department of Architecture, School of Architecture and Urban Design Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

3- Associate Professor, Department of Architecture, School of Architecture and Urban Design Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

4- Assistant Professor, Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 16785-163, Tehran, Iran, m.omidi@sru.ac.ir

Received: 12 November 2024 Accepted: 26 August 2025

Abstract

Preventing waste and saving energy consumption is one of the most important issues in the world due to the reduction and limitation of fossil energy reserves. Meanwhile, the main energy consumption in the building is related to the use of mechanical ventilation. Therefore, due to the advantages of natural ventilation, it is necessary to develop and use it, which becomes more important in classrooms due to the high population and activity. Despite much research that has been done in the field of natural ventilation, there is a need for more studies and development in educational spaces. Therefore, in this research, to know the characteristics of natural ventilation and common methods in its analysis, the studies conducted in this field are reviewed with more emphasis on the studies of educational spaces. Researches

reviewed with keywords related to natural ventilation include more than 300 articles from the Science Direct database and persian publications, of which 140 sources are cited in this article. The result is that despite the importance of the educational space and the need to use natural ventilation in these buildings, attention to it is not enough and it is necessary to check all dimensions and parameters related to natural ventilation in educational spaces, especially openings and openings that play a key role in this field. Most of the research have used two methods of experimental measurement and computational fluid dynamics simulation model, which have been carried out in buildings with various uses to investigate the variables.

Keywords: Natural Ventilation, Experimental Measurement, Computational Fluid Dynamics, Educational Spaces

1- مقدمه

جریان هوای داخلی در ساختمان‌های آموزشی و کاهش مصرف انرژی ساختمان، تهویه طبیعی می‌تواند راهبرد غالب تهویه در فضاهای آموزشی باشد [23]. مدارس با توجه به اهمیت بالایی که دارند، همواره در اولویت هستند؛ زیرا مستقیماً بر توانایی یادگیری و عملکرد مطلوب اثر دارد [38] و از نظر علمی نیز این تاثیر ثابت شده است [39].

2- روش تحقیق

هدف از این پژوهش، شناخت مزایا و معایب، پارامترها، روش‌ها و ابزارهای اندازه‌گیری تهویه طبیعی است. برای این منظور از یک روش مروری نظام‌مند از پایگاه معتبر ساینس دایرکت¹ و وب آف ساینس² و نشریات داخلی به تحلیل مقالات منتخب پرداخته شد. از کلیدواژه‌های مرتبط با تهویه طبیعی تکی یا ترکیبی بصورت "تهویه طبیعی" یا "کیفیت هوای داخلی" یا "اثرات تهویه" و "ساختمان آموزشی" یا "فضای آموزشی" یا "کلاس درس" و "دینامیک سیالات محاسباتی" یا "اندازه‌گیری تجربی" یا "بررسی عددی"³ استفاده شد. با جستجوی اولیه، بیش از 400 هزار مورد یافت شد. با مطالعه عنوان پژوهش‌ها عمدتاً در 10 سال گذشته، موارد غیرمرتبط حذف و سایرین در صورت نزدیکی به اهداف پژوهش، ذخیره گردید. در شکل 1، مراحل پژوهش، مفاهیم نظری و روش‌های تهویه طبیعی ارائه شده است.

3- مفهوم تهویه طبیعی

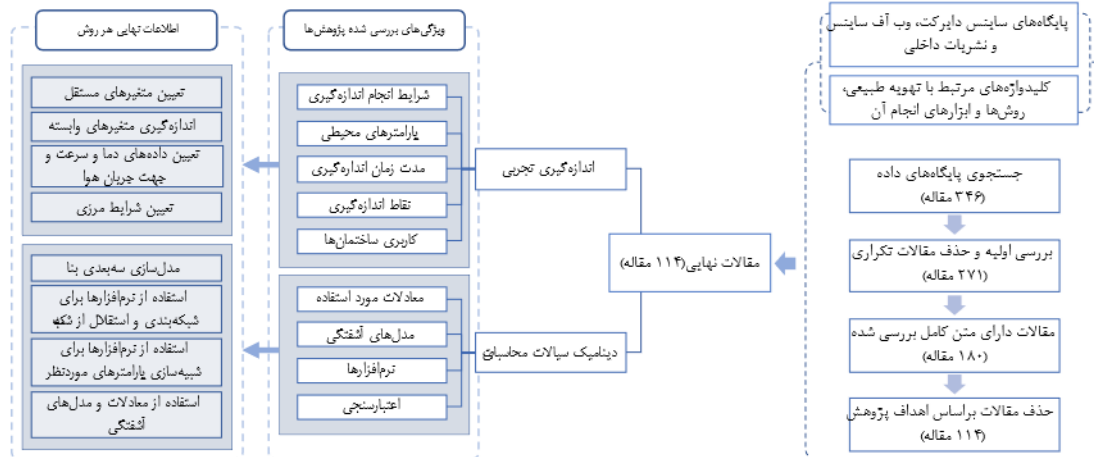
منظور از تهویه طبیعی، فرآیند آگاهانه و طراحی شده جابجایی هوای داخلی با هوای تازه خارج بدون صرف انرژی است [40]. به عنوان یک سیستم تهویه غیرفعال که با نیروی محرکه حرارتی یا حرکتی [4] و اختلاف فشار طبیعی، شناخته می‌شود [41، 42] که سبب جابجایی هوا می‌شود [43]. در یک سیر تاریخی مطالعات تهویه طبیعی، اولسن⁴ [44] پس از الدر، گیل و همکاران⁵، رایت و دفا و همکاران⁶ [45، 46، 47]، جریان هوا را در ابعاد واقعی بررسی کرد. سپس ناگانو و تاگاو⁷ [48] جریان هوا را با مدل صفر معادله‌ای و $k-\epsilon$ شبیه‌سازی کرده‌اند. تهویه طبیعی از طریق دهانه‌ها و بازوهای ساختمان، جریان هوا را با هدف ایجاد فشار یکنواخت به درون هدایت و هوای مسن را خارج می‌کند [49، 50]. با کنترل پارامترها و هدایت هوای به داخل، اختلاف فشار کاهش می‌یابد. همچنین جایگزینی هوای داخل با هوای تازه، کیفیت هوای داخلی و آسایش را فراهم [14، 15] و در جهت الگوهای پایداری و بهره‌وری انرژی کمک می‌کند [51، 52، 53، 54]. سه عامل باد، دمای هوا و تابش خورشید، جریان هوا را توسط اختلاف فشار ایجاد می‌کند [19، 55]. این تهویه به یکی از سه روش شناوری [56، 57، 58]، یک طرفه [21] و متقاطع [59، 60] انجام و به اشکال مختلف بادگیر، دودکش، نمای دوپوسته، هندسه و بازو نمایان می‌شوند [19، 61].

امروزه استفاده از سیستم‌های تهویه مکانیکی با وجود داشتن هزینه بسیار و مصرف بالای انرژی [1، 2] در ساختمان‌ها رایج است [3] و به عنوان انتخاب نهایی استفاده می‌شود [4] که حدود 60 درصد از کل انرژی ساختمان را مصرف می‌کند [5]. صرفه‌جویی در مصرف انرژی با توجه به محدود بودن ذخایر فسیلی و گرمای بیش از حد استفاده از آن [6]، از موضوعاتی است که در دنیای امروز مورد توجه است [7]. ساختمان‌ها حدود 40 درصد از کل انرژی را مصرف می‌کنند [8] که عمده‌ترین دلیل آن عدم اعتماد به سیستم‌های تهویه طبیعی است [1] زیرا بیشترین میزان مصرف انرژی در ساختمان به سیستم‌های خنک‌کننده مرتبط است [1، 2]. تهویه به دو صورت طبیعی، مکانیکی و یا بصورت ترکیبی از آن‌ها تأمین می‌شود [2، 9]. تهویه طبیعی متداول‌ترین فناوری غیرفعال با هزینه کم [10، 11] و جایگزینی مناسب برای تهویه مطبوع است [12]. تهویه طبیعی در ساختمان با هدف ایجاد جریان هوا از طریق عناصر معماری مانند بازوها انجام می‌گردد [13]. مطالعات نشان می‌دهد که در دو دهه گذشته توجه به جریان هوای داخل در قالب دانشی نوین بطور چشم‌گیری افزایش یافته [14]؛ چراکه تهویه طبیعی از راه‌های کاهش مصرف و افزایش بهره‌وری انرژی [15، 16] با هزینه‌های اولیه و نگهداری پایین [17، 18] می‌باشد. پژوهش‌های مختلفی انجام شده است [19، 20] که بررسی تهویه طبیعی داخلی و شناسایی مزایا و معایب آن، مولفه‌ها و روش‌های تحلیل تهویه طبیعی می‌تواند به مطالعات آتی کمک کند که در پژوهش حاضر به این مهم پرداخته شده است. تهویه طبیعی در بیشتر ساختمان‌ها کاربرد دارد و محققان به بررسی وضعیت آن در فضاهای آموزشی [21، 22، 23، 12]، فضاهای مسکونی [4، 6، 24، 25]، فضاهای اداری [26، 27، 28]، ساختمان‌های چندطبقه [29]، ورزشی [30]، تجاری [31] و صنعتی [32، 33] که با مطالعه این پژوهش‌ها و پارامترهای مورد بررسی آن‌ها، می‌توان شرایطی کنترل شده را برای ایجاد یک سیستم تهویه طبیعی که بتواند بیشترین بهره‌وری را داشته باشد ایجاد کرد.

در طول سال تحصیلی، دانش‌آموزان و معلمان مدت زمان بسیاری را در مدرسه سپری می‌کنند اما براساس پژوهش فیسک [34]، میزان تهویه در کلاس‌های درس، اغلب کم‌تر از استانداردهای تهویه است. با توجه به آمارهای آموزش و پرورش و عدم هم‌خوانی تعداد دانش‌آموزان در کلاس با سرانه فضاهای آموزشی ارائه شده در سند تحول بنیادین آموزش و پرورش [35] و ضابطه 697 سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور [36]، جریان هوای موثری در کلاس برقرار نمی‌شود و انتقال بیماری افزایش می‌یابد. اگرچه سیستم‌های تهویه مکانیکی معمولاً می‌توانند تهویه مناسبی را ایجاد کنند اما بسیاری از مدارس به این نوع از تهویه مجهز نیستند و تنها از تهویه طبیعی از طریق پنجره کلاس استفاده می‌کنند [37]. بنابراین با توجه به ضرورت ایجاد

همچنین برای دستیابی به تهویه مناسب، کنترل بیشتری بر پارامترهای آن مانند ابعاد و نوع بازشوها [62] نیاز است زیرا بر رفتار جریان هوای درون

ساختمان تاثیر می‌گذارد [63].



شکل 1 روند انجام پژوهش

مسکونی [14، 59] و آموزشی [12، 84] را بررسی کرده‌اند. با توجه به اینکه روش اندازه‌گیری در محل، به شرایط واقعی محیطی نزدیک‌تر است، عمده مقالات بررسی شده در این پژوهش، مربوط به این روش می‌باشد. روش‌های اندازه‌گیری و ابزارهای مورد استفاده، عناصر معماری، مدت زمان آزمون و دوره تکرار اندازه‌گیری‌ها، متغیرها و وضعیت نقاط اندازه‌گیری در اندازه‌گیری تجربی مدنظر بوده و در پژوهش‌ها بررسی شده است.

4-2- مدت زمان انجام آزمون‌ها

در اندازه‌گیری میدانی، مدت زمان آزمون و فاصله زمانی اندازه‌گیری‌ها اهمیت دارد. زیرا شرایط محیطی برخلاف مطالعات آزمایشگاهی، توسط سیستم کنترل نمی‌شود. هرچند امکان پایش و اندازه‌گیری طولانی مدت وجود دارد [85]. در پژوهش‌های بررسی شده مشخص شد که مدت اندازه‌گیری متنوع و در واحدهای زمانی ساعت [86]، روز [87]، هفته [88، 89]، ماه [90] و سال [60، 91] متغیر است. تکرار اندازه‌گیری پارامترها نیز از نظم مشخصی پیروی نمی‌کند. در برخی پژوهش‌ها اطلاعات دوره تکرار آزمون‌ها ذکر نشده بود [91]. اما در مجموع مشخص شد که در اندازه‌گیری‌ها، بازه‌های زمانی در نظر گرفته شده رعایت شده است. در یک پژوهش [59]، دوره تکرار اندازه‌گیری، 30 ثانیه برای یک پارامتر و 60 ثانیه برای پارامتر دیگر بود و در پژوهش دیگر [14] در طول یک شبانه‌روز و در تمام مدت یک هفته، هر دقیقه یکبار اندازه‌گیری انجام شده است. به عنوان مثال، بازه اندازه‌گیری برای غلظت کربن‌دی‌اکسید، 5 دقیقه [33] و برای دمای هوا، 4 دقیقه [56] و 10 ثانیه [92] استفاده شده است.

4-3- تجهیزات مورد استفاده برای اندازه‌گیری پارامترها

تجهیزات مورد استفاده برای اندازه‌گیری پارامترها در جدول 1 آمده است. برای اندازه‌گیری دمای هوای محیط، عمدتاً از دستگاه ترموکوپل و در مواردی نیز از دماسنج و برای اندازه‌گیری سرعت هوا از دستگاه‌های بادسنج در مدل‌های متنوع آن استفاده می‌شود.

4- روش‌های ارزیابی تهویه طبیعی

برای ارزیابی تهویه طبیعی، روش‌هایی مانند اندازه‌گیری تجربی [64]، مدل‌های انتگرالی [112، 113] و دینامیک سیالات محاسباتی وجود دارد [65، 66] که به تحلیل پارامترهای دما، سرعت و الگوی جریان هوا [67] و تاثیر بازشوها و عناصر ساختمان بر جریان هوا [68] پرداخته‌اند. روش دینامیک سیالات محاسباتی بیشترین استفاده را دارد؛ زیرا علاوه بر مطالعه پارامتریک و تحلیل در شرایط زمانی و اقلیمی خاص، امکان اعتبارسنجی و سازگاری بیشتری با روش تجربی دارد و پایایی نتایج را حفظ می‌کند [55].

4-1- اندازه‌گیری پارامترهای تهویه طبیعی به روش تجربی

زمانی است که متغیرها با اندازه‌گیری میدانی یا آزمایشگاهی بررسی شود [66]. در روش تجربی، روش‌های مشترکی وجود دارد اما استانداردهای مشخصی ندارد [114] که نتایج تحقیقات را متفاوت می‌کند. در مجموع، پارامترهای جریان هوا به اختلاف فشار محیط، ناحیه موثر دهانه‌ها، اختلاف دما، هندسه فضاها و محدودیت‌های دستگاه‌ها بستگی دارد [69]. در تهویه طبیعی، علاوه بر انتخاب روش اندازه‌گیری، متغیرها، جامعه آماری، نمونه موردی و نقاط داده، رعایت استاندارد اشری ضرورت دارد [70]. اندازه‌گیری تجربی به دو صورت است. در آزمایشگاه با شرایط قابل کنترل، دما، فشار و سرعت جریان هوا اندازه‌گیری می‌شود و با هزینه کمتر، امکان تکرار آزمایش‌ها در شرایط مرزی مختلف وجود دارد [71، 72، 73]. در آزمایشگاه می‌توان از ماکت با ابعاد واقعی [67، 74] یا با مقیاس کوچکتر [75، 76، 77] و بصورت آزمایش تونل باد [78، 79، 80] استفاده کرد. در روش دوم، اندازه‌گیری‌ها در محل پژوهش انجام می‌شود. مزایای آن این است که امکان بررسی پارامترهای بسیاری فراهم است و داده‌ها در شرایط واقعی هستند و اعتبار بیشتری دارد. در این روش، باید از ابزارها بطور دقیق استفاده شود چراکه شرایط مرزی، آب‌وهوایی و ویژگی‌های مکان و کاربران در شرایط واقعی با شرایط آزمایشگاهی متفاوت است [81، 82، 83]. پژوهش‌های بسیاری به اندازه‌گیری میدانی پرداخته‌اند که کاربری‌های مختلفی چون



بادسنج ST3880 [5] سیم حرارتی
سرعت
جریان هوا

از جدول 1 بر می آید که تنوع دستگاه‌ها و تجهیزات اندازه‌گیری پارامترها بسیار است و می‌توان از دستگاه‌های دردسترس و موجود بهره برد و نیاز به تهیه تجهیزات مشخصی وجود ندارد. جهت دستیابی به داده‌های دقیق، ترکیب برخی ابزارها ضرورت دارد. برای تحلیل بهتر، ترکیب دو ابزار دماسنج VAISALA مدل PHMP-155D برای دما و رطوبت و بادسنج اولتراسونیک مدل 8100 برای اندازه‌گیری سرعت باد، می‌تواند گزینه مناسبی باشد. این ابزارها با توجه به ویژگی‌های فنی و مطالعات علمی، می‌توانند انتخاب‌های مناسبی باشند.

5- متغیرهای تهویه طبیعی

متغیرهای محیطی در بخش‌های ساختمان مانند بازشوها [83] و اجزای ساختمان همچون دودکش و بادگیر [94، 95] و با رویکردهای مختلفی مانند الگوی جریان هوا [74]، اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌ها [82]، حفاظت از بناهای تاریخی [96، 97، 98] و آسایش حرارتی [81] اندازه گرفته می‌شود. مشخص شد که توجه به جریان هوای ورودی و وضعیت بازشوها [87] اهمیت بیشتری نسبت به ویژگی‌های هندسی (تعداد فضاها و طبقات نمونه) [81] دارد.

متغیرهای دما [99] و سرعت و رطوبت نسبی [14] اندازه گرفته و میزان فشار هوا [80]، سرعت جریان هوا [56، 96]، جهت باد [82]، اختلاف فشار هوا [92] و کیفیت هوا [14] کمتر بررسی شده و تعداد نقاط و موقعیت اندازه‌گیری نیز متنوع و متفاوت است. مثلاً هو و همکاران [59] در پژوهش خود، 3 پارامتر سرعت، حجم و فشار جریان هوا و دما را در 20 نقطه بررسی کرده‌اند. لیو و همکاران [88] در تونل باد بر روی متغیر دما در 2 نقطه ورودی و خروجی تونل انجام داده‌اند. در مطالعه دیگر [81] در 4 نقطه از 4 دماسنج برای بررسی متغیر دما در ارتفاعات مختلف داخلی استفاده شد. هان و همکاران [91] 16 نقطه برای اندازه‌گیری سرعت جریان هوا بررسی کردند. لارسن و هابزبرگ [100] 67 نقطه برای بررسی سرعت جریان و دمای هوا استفاده کردند. عقیف و همکاران [83] از 25 نقطه برای اندازه‌گیری سرعت و دمای هوا در دهانه پنجره‌ها و فضای داخلی استفاده کرده است. در یک جمع‌بندی، متغیرهای اصلی تهویه طبیعی در پژوهش‌ها شامل دمای هوا، سرعت جریان هوا و رطوبت نسبی محیط است که عمدتاً در فضای داخلی و با توجه به عناصر معماری مانند بازشوها و دهانه‌ها (به علت اینکه جریان هوای ورودی از این طریق وارد فضا می‌شود) و با استفاده از ابزارهایی مانند انواع ترموکوپل‌ها، دماسنج‌ها و بادسنج‌ها اندازه‌گیری می‌کنند. تعداد نقاط مورد استفاده در هر فضا برای بررسی متغیر است و از نظم مشخصی پیروی نمی‌کند و عمدتاً در محدوده 10 تا 30 نقطه قرار دارد. مدت زمان انجام آزمون تجربی متغیر است که با توجه به محدودیت‌های موجود در نمونه تعیین می‌شود اما در حالت کلی، دما و رطوبت نسبی در پایش‌های طولانی و سرعت جریان هوا در پایش‌های کوتاه مدت هفته‌ای اندازه‌گیری می‌شود.

جدول 1 دستگاه‌های مورد استفاده در اندازه‌گیری میدانی

پارامتر محیطی	مدل تجهیزات	منبع	موارد استفاده	تصویر
دمای هوا	دماسنج T&D مدل TR-76ui	[59]	دما و میزان CO ₂	
	دماسنج VAISALA مدل PHMP-155D	[59]	دما و رطوبت هوا	
دمای هوا	مینی دیتالاگر Testo مدل 174T	[88]	دمای هوا	
	دماسنج مقاوم پلاتین مدل PT100	[14]	دمای هوا	
دمای هوا	ترموکوپل نوع P	[14]	دمای هوا	
	دیتالاگر onset مدل HOB0-LCD U14-002	[81]	دما و رطوبت هوا	
دمای هوا	ترموکوپل نوع K (Chromel-Alumel)	[86، 30]	دمای هوا	
	ترموکوپل نوع T (Copper-Nickel) سنسورهای هوشمند Onset مدل S-TMB-M006	[79، 74]	دمای هوا	
دمای محیط داخلی	دستگاه دیجیتال EXTECH	[93]	دمای محیط داخلی	
	دستگاه HEAT INDEX WBGT مدل METER 2010SD	[5]	شاخص‌های اقلیمی	
سرعت هوا	بادسنج سه‌بعدی اولتراسونیک مدل 8100	[59، 30]، [86]	سرعت جریان هوا	
	دستگاه Testo مدل 480	[88]	دما، رطوبت و سرعت جریان هوا	
سرعت هوا	بادسنج دیجیتال سیم داغ مدل TPI 565C1	[79]	سرعت جریان هوا	
	بادسنج Victor مدل 816B	[93]	سرعت جریان هوا	

طبیعی ایجاد می‌کند [62] و بیشترین استفاده را دارد [72, 58, 73]. اما از نرم‌افزارهای دیگری چون CFX [102]، Solid Works [83] و Autodesk CFD [67] نیز استفاده شده است. در جدول 2، روش‌های رایج در تحلیل تهویه طبیعی آمده است. براساس جدول 2، فلونت و OpenFoam بهترین نرم‌افزارهای تحلیل انرژی هستند. نرم‌افزار OpemFoam هزینه محاسباتی کمتر و سریع‌تری دارد اما فلونت دقت بالاتری در شبیه‌سازی جریان ارائه می‌دهد. مدل آشفتگی k-ε یکی از پرکاربردترین مدل‌هاست. سرعت بالای همگرایی و پایین بودن هزینه محاسباتی به خصوص در هندسه‌های پیچیده مانند ساختمان و امکان شبیه‌سازی واقع بینانه از مزایای این مدل است. همچنین شکل 2، مراحل ارزیابی تهویه با روش دینامیک سیالات محاسباتی که بصورت رایج در پژوهش‌ها استفاده شده، آورده شده است.



شکل 2 مراحل ارزیابی تهویه با روش دینامیک سیالات محاسباتی و نرم‌افزارها

7- اعتبارسنجی

اعتبارسنجی مدل CFD پس از شبیه‌سازی، جهت تایید نتایج ضرورت دارد. این اعتبارسنجی عمدتاً برپایه داده‌های حاصل از اندازه‌گیری میدانی یا آزمایشگاهی و متغیرهای دما، سرعت جریان هوا و رطوبت نسبی است [30, 87]. این نتایج می‌تواند حاصل از تحقیق نویسندگان و یا استخراج از پیشینه تحقیق [65] باشد. اعتبارسنجی پژوهش معمولاً بصورت گرافیکی نشان داده می‌شود. اختلاف احتمالی موجود، ناشی از محدودیت‌ها و مشکلات دستگاه‌های اندازه‌گیری تجربی است [103].

جدول 2 ویژگی‌های مطالعات تهویه طبیعی با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی

منبع	ویژگی بنا	کاربری	هدف پژوهش	مدل	مدل آشفتگی	اعتبارسنجی	نرم‌افزار مورد استفاده
[104]	ساختمان دارای بالکن، 30 طبقه	مسکونی	مقایسه معادلات	LES, RANS	k-ε	آزمایش تونل باد	فلونت
[105]	یک ساختمان مرتفع	مسکونی	شبیه‌سازی یک طبقه از ساختمان تپ	RANS	(RNG) k-ε	اندازه‌گیری میدانی	فلونت
[95]	بادگیر	آموزشی	تاثیر دو گونه بادگیر بر جریان توزیع هوا	RANS	k-ε	-	فلونت
[99]	معماری بومی سیستان	مسکونی	تاثیر عناصر معماری	-	-	اندازه‌گیری میدانی	گمبیت و فلونت
[106]	یک اتاق با تهویه برج باد	-	تاثیر برج باد بر تهویه پارامترهای میانگین سن و میزان تغییر هوا	RANS	k-ε	آزمایش تونل باد	فلونت
[107]	ساختمان دارای شیب سقف	عمومی	تاثیر موقعیت دهانه‌ها و زاویه سقف	RANS	SST k-ω	آزمایش تونل باد	فلونت
[85]	5 بلوک ساختمانی	مسکونی	عملکرد تهویه در سیر تاریخی ساخت ساختمان‌ها	-	k-ε	اندازه‌گیری میدانی	انسيس مشينگ و فلونت
[84]	5 طبقه مدرسه ابتدایی	آموزشی	بررسی آسایش حرارتی و وضعیت هوای داخلی	-	-	اندازه‌گیری میدانی	پرسشنامه و فلونت
[108]	ساختمان مسکن کم‌درآمد	مسکونی	تاثیر فرم ساختمان بر جریان هوا	RANS	SST k-ω	اندازه‌گیری میدانی	فلونت
[4]	حیاط مرکزی ساختمان	مسکونی	تاثیر تغییرات کالبدی بر الگوی جریان	RANS	k-ε استاندارد	اندازه‌گیری گمبیت و فلونت	فلونت

6- مدل‌سازی CFD

شبیه‌سازی جریان هوا به روش CFD، رایج‌ترین روش مدل‌سازی برای تحلیل جریان سیالات است [65]. استفاده از بررسی‌های عددی کمک می‌کند تا نمونه‌های پیچیده، با دقت بیشتری بررسی شوند و این امکان را برای اندازه‌گیری سریع و کم هزینه‌تر و پیش‌بینی جریان سیالات فراهم و به بهبود طراحی و یا مداخلات کمک می‌کند [101]. مدل‌سازی CFD فرآیندی شامل تعیین معادلات حاکم، شرایط مرزی، شبکه مش‌بندی، مدل آشفتگی و اعتبارسنجی مدل است. بطور کلی معادلات به شبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS)، شبیه‌سازی گردابی بزرگ (LES) و میانگین رینولدز ناویر-استوکس (RANS) دسته‌بندی می‌شوند [72]. معادلات ناویر-استوکس بطور غالب استفاده شده است که k-ε و k-ω دو مدل آشفتگی رایج هستند [66, 93]. نتایج حاصل از روش CFD و استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی باید توسط داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های تجربی، اعتبارسنجی شوند [65]. لازم است مشخص شود که مدل شبیه‌سازی شده توانسته است تصویری دقیق از فرضیه مورد نظر پژوهش و جریان سیال را ارائه دهد [14].

1-1- خصوصیات مدل CFD

در مدل دینامیک سیالات محاسباتی، آشفتگی و نرم‌افزارها تحلیل می‌گردد. تعیین شرایط مرزی در شبیه‌سازی CFD، براساس داده‌های اندازه‌گیری تجربی بدست می‌آید. پژوهشگران از مدل آشفتگی k-ε استاندارد [50, 90] و RNG k-ε [73, 75, 86] بیشتر استفاده می‌کنند و پس از آن مدل‌های SST k-ω [78] و استاندارد k-ω [58, 74] در شبیه‌سازی‌ها بررسی می‌شود.

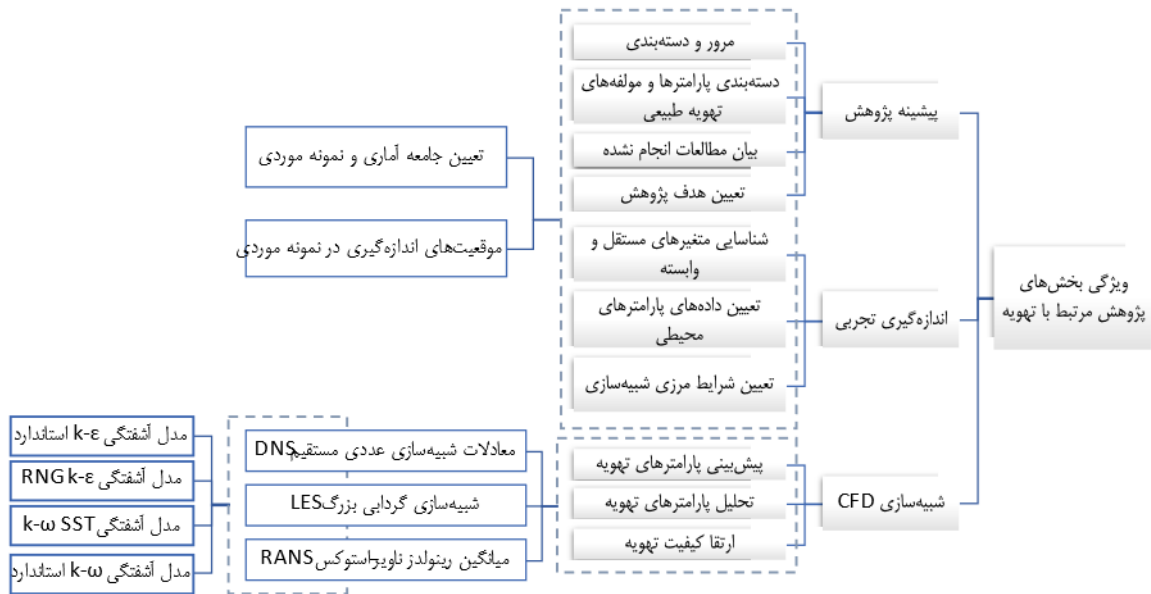
شبیه‌سازی با نرم‌افزارهای ANSYS FLUENT، FloVent، FloEFD، PHOENICS و ANSYS Star-CCM+ انجام می‌شود. نرم‌افزار ANSYS FLUENT متغیرهای بیشتری را بررسی و دامنه وسیع‌تری برای تحلیل تهویه

	میدانی		هوا	سنٹی
[12]	گمبیت و فلونت	اندازه‌گیری	بهبود تهویه طبیعی در فضای داخلی	کلاس درس یک مدرسه ابتدایی
[109]	گمبیت و فلونت	اندازه‌گیری	یکنواخت سازی جریان هوای داخلی	سالن‌های نمایشگاهی
[8]	فلونت	اندازه‌گیری	تاثیر تناسبات کالبدی حیاط بر جریان هوا	موزه حیاط مرکزی خانه مسکونی
[110]	FloVENT	آزمایش تونل	طراحی دیوار بال برای بهبود تهویه طبیعی	ساختمان 10 طبقه سنٹی
[9]	OpenFoam	اندازه‌گیری	تاثیر دهلیز بر تهویه طبیعی	دهلیز مسکونی

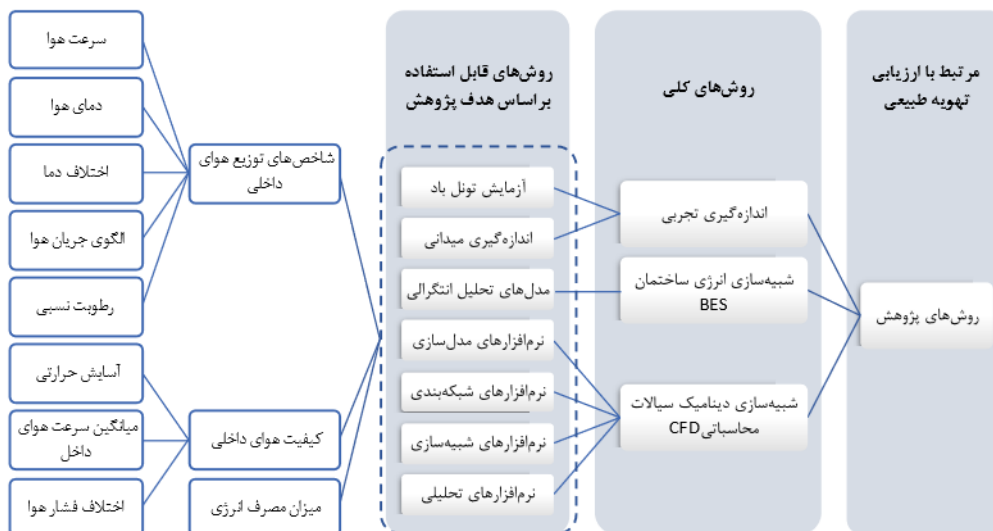
8- نتیجه‌گیری

تجربی هستند. روش دینامیک سیالات محاسباتی بیشترین استفاده را دارد. زیرا علاوه بر آنکه امکان مطالعه پارامتریک و تحلیل در شرایط زمانی و اقلیمی خاص را فراهم می‌کند، اعتبارسنجی بهتری را با روش‌های تجربی دارد. دینامیک سیالات محاسباتی به علت هزینه‌های ارزیابی پایین و امکان پیش‌بینی و مداخلات در نمونه موردی از بهترین روش‌های بررسی تهویه است. در مدل دینامیک سیالات محاسباتی می‌توان نتیجه گرفت که نرم‌افزار انسیس فلونت کارایی بیشتری دارد و در آن از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ و $k-\epsilon$ RNG استفاده می‌شود. اعتبارسنجی نیز توسط داده‌های اندازه‌گیری تجربی انجام می‌شود. که بصورت گرافیکی و با استفاده از نمودار انجام می‌شود. مشخص گردید که پژوهش‌های صورت گرفته در فضاهای آموزشی، عمدتاً از روش تجربی و دستگاه‌های اندازه‌گیری استفاده که پارامترهای دما، رطوبت و غلظت کربن‌دی‌اکسید بررسی شده است و شبیه‌سازی برای پهنه سازی گردش جریان هوا در فضای داخلی از محدودیت‌های مطالعات موجود است و نیاز به بررسی بیشتری دارد. بنابراین می‌توان روش CFD و داده‌های حسگرهای ارزان قیمت را برای مدارس تلفیق نمود. با توجه به گستردگی تهویه طبیعی، می‌توان براساس اقلیم و کاربری آموزشی، چارچوبی جهت انتخاب ابزار مناسب اندازه‌گیری تهویه طبیعی در نظر گرفت. در شکل 3، نتیجه کلی پژوهش و روش انجام پژوهش‌های تهویه طبیعی و در شکل 4، روش‌ها و مولفه‌هایی که می‌توان در پژوهش‌های تهویه طبیعی در نظر گرفت ارائه شده است.

این پژوهش با هدف تحلیل مطالعات و پیشرفت‌ها و روش تهویه طبیعی برای مطالعات آتی در تهویه طبیعی ساختمان آموزشی انجام شده است. اولین نتیجه این است که علی‌رغم اهمیت بالای فضاهای آموزشی و استفاده رایج از تهویه طبیعی در این ساختمان‌ها، توجه به آن کافی نیست. ابعاد و پارامترهای مرتبط با تهویه طبیعی در فضاهای آموزشی به خصوص در اقلیم‌های گرم و خشک و نیمه مرطوب محدود است و باید بررسی گردد. عمده پژوهش‌ها از دو روش اندازه‌گیری تجربی و مدل شبیه‌سازی CFD استفاده کرده‌اند. در اندازه‌گیری تهویه طبیعی، علاوه بر بررسی و انتخاب روش اندازه‌گیری، تعیین متغیرها و جامعه آماری، نمونه موردی و محل‌های انجام آزمون تجربی در نمونه‌های موردی ضرورت دارد که می‌توان برای هر یک از این موارد دستورالعمل‌های استاندارد اشری را در نظر گرفت. در روش‌های تجربی، نتیجه حاصل شده این بود که این مطالعات به دو صورت آزمایشگاهی یا درجا انجام می‌شود. در روش آزمایشگاهی می‌توان ابعاد بنا را به نسبت مشخص کوچکتر کرد. پارامترهای اصلی اندازه‌گیری شده دمای هوا، سرعت جریان هوا و رطوبت نسبی است. همچنین بیشترین زمان برای انجام اندازه‌گیری، 1 تا 2 هفته و عمدتاً در دو فصل (تابستان و زمستان) است. در نمونه موردی باید فضایی برای اندازه‌گیری میدانی انتخاب شود که در کل حجم نمونه پخش باشد و فضاهای راکد و تهویه‌های موضعی نیز در نظر گرفته شود. محدودیت این روش، عدم امکان اندازه‌گیری بلندمدت از نظر زمان و هزینه است. عناصر معماری و هندسی ساختمان (مانند بازشوها و ورودی‌ها)، تلفات انرژی، فشار، سرعت و الگوی جریان هوا از پارامترهای قابل تحلیل بصورت



شکل 3 روند کلی انجام پژوهش‌های تحلیل تهویه طبیعی



شکل 4 روش‌ها و مولفه‌های پژوهش‌های تهویه طبیعی

Amount of Opening Discharge Coefficient in Natural Ventilation, *Journal of Mechanical Engineering of Tabriz University*, Vol. 46, No. 3, pp. 147-153, 2016. (in Persian)

- [3] IEA, The Future of Cooling: Opportunities for energy-efficient air conditioning, IEA, Paris, 2018. <https://doi.org/10.1787/9789264301993-en>.
- [4] O. Rahaei, Investigation of physical changes in central courtyards on the pattern of airflow inside them in Qajar period houses in Isfahan by CFD method - Case study: Labaf House, *Journal of Sustainable Architecture and Urban Design*, Vol. 9, 2021. (in Persian)
- [5] M. Mas'oudi-nejad, M., Tahbaz, S.M. Mofidi Shemirani, The Study of the Thermal Performance of Shavadoons, Case Study: The Souzangar House in Dezful, Iran. *Journal of Iranian Architecture Studies*, Vol. 7, No. 13, pp. 49-70, 2018, doi:10.22052/1.13.49. (in Persian)
- [6] A. Figueroa-Lopez, A. Arias, X. Oregi, I. Rodríguez, Evaluation of passive strategies, natural ventilation and shading systems, to reduce overheating risk in a passive house tower in the north of Spain during the warm season. *Journal of Building Engineering*, Vol. 43, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102607>.

8- زیر نویس

1. ScienceDirect
2. Web of Science
3. "Natural Ventilation" OR "Indoor Air Quality" OR "Natural Effectiveness" AND "Educational Building" OR "Educational Spaces" OR "Classroom" AND "Computational Fluid Dynamic" OR "CFD" OR "Experimental Measurement" OR "Numerical investigation"
4. Olsen
5. Elder, Gill et al.
6. Wright and Defa et al.
7. Nagano and Tagawa

9- مراجع

- [1] Kokh, Nilson, and Hagger, *Natural Ventilation*, Translated by Ahmadinejad, M., Second edition, Esfahan, Nshre-Khakh, 2017. (in Persian)
- [2] V. Abdi, F. Veysi, H. Safarzade, Numerical analysis of the Effect of External Flow Turbulence and Aspect Ratio of Building on the

- implemented strategic measures, *Journal of Building Engineering*, Vol. 51, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2022.104204>
- [24] A. Alah Ahadi, M.R. Saghafi, M. Tahbaz, M. The optimization of light-wells with integrating daylight and stack natural ventilation systems in deep-plan residential buildings: A case study of Tehran. *Journal of Building Engineering*, Vol. 18, pp. 220-244, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2018.03.016>
- [25] H. Yin, C. Liu, I. Zhang, Measurement and evaluation of indoor air quality in naturally ventilated residential buildings, *Indoor Built Environ.*, Vol. 13, pp. 1-17, 2019.
- [26] T. Schulze, D. Gürlich, U. Eicker, Performance assessment of controlled natural ventilation for air quality control and passive cooling in existing and new office type buildings. *Energy and Buildings*. Vol. 172, pp. 265–278, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.023>
- [27] H. Indraganti, D. Boussaa, Comfort temperature and occupant adaptive behavior in offices in Qatar during summer. *Energy and buildings*. Vol. 150, pp. 23-36, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.063>
- [28] M. Nomura, K. Hiyama, A review: natural ventilation performance of office buildings in Japan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 74, pp. 746–754, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.083>
- [29] S. Omrani, V. Garcia-Hansen, B. Capra, R. Drogemuller, Natural ventilation in multi-storey buildings: design process and review of evaluation tools. *Building and Environment*. Vol. 116, pp. 182–194, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.012>
- [30] A. Limane, H. Fellouah, N. Galanis, Simulation of airflow with heat and mass transfer in an indoor swimming pool by OpenFOAM, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 109, pp. 862-878, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.02.030>
- [31] G. Carrilho da Graça, P. Linden, Ten questions about natural ventilation of non-domestic buildings, *Building and Environment*, Vol. 107, pp. 263-273, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.007>
- [32] X. Meng, Y. Wang, X. Xing, Y. Xu, Experimental study on the performance of hybrid buoyancy-driven natural ventilation with a mechanical exhaust system in an industrial building, *Energy and Buildings*, Vol. 208, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109674>
- [33] N. Edouard, J. Mosquera, H.J.C. van Dooren, L.B. Mendes, N.W.M. Ogink, Comparison of CO₂- and SF₆- based tracer gas methods for the estimation of ventilation rates in a naturally ventilated dairy barn, *Biosystems Engineering*, Vol. 149, pp.11-23, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.06.001>
- [34] W.J. Fisk, The ventilation problem in schools: literature review, *Indoor Air*, Vol. 27, No. 6, pp. 1039-1051, 2016. <https://doi.org/10.1111/ina.12403>
- [35] The document of fundamental evolution of education, Subsystem program for the provision of space, equipment, and technology of public official education system approved by the nine hundred and thirty-third (933) session of the Supreme Council of Education and Training, 2016.
- [36] Organization of Management and Planning of the country, *Regulation No. 697 of Design Criteria for Educational Buildings (similar architectural planning of elementary and secondary schools)*, 2016.
- [37] A. Muelas, P. Remacha, A. Pina, E. Tizné, S. El-Kadmiri, A. Ruiz, D. Aranda, J. Ballester, Analysis of different ventilation strategies and CO₂ distribution in a naturally ventilated classroom, *Journal of Atmospheric Environment*, Vol. 283, No. 15, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119176>
- [38] A. Zhang, R. Bokel, A. van den Dobbelsteen, Y. Sun, Q. Huang, Q. Zhang, Optimization of thermal and daylight performance of school buildings based on a multi-objective genetic algorithm in the cold climate of China, *Energy and Buildings*, Vol. 139, pp. 371-384, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.048>
- [39] S. Trachte, A. De Herde, *Sustainable Refurbishment School Buildings: A Guide for designers and planners*, Published by International Energy Agency, 2014.
- [7] P. Kheirkhah Sangdeh, N. Nasrollahi, Windcatchers and their applications in contemporary architecture. *Energy and Built Environment*, Vol. 3, No. 1, pp. 56-72, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.10.005>
- [8] A. Mardani, A. Roasaei, The pattern effect of central courtyard geometric on the airflow in traditional houses of Shushtar, *Journal of Iranian Islamic city studies*, Vol. 43, No. 13, pp. 71-80, 2021. doi: 20.1001.1.2228639.1399.10.40.5.9. (in Persian)
- [9] T. Zhang, Y. Zhao, Y. Zhao, Sh. Wang, J. Wang, A passive pivoted window for stabilizing the natural ventilation rate, *Energy and Buildings*, Vol. 267, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112151>
- [10] Y. Chen, Z. Tong, Y. Zheng, H. Samuelson, L. Norford, Transfer learning with deep neural networks for model predictive control of HVAC and natural ventilation in smart buildings, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 254, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119866>
- [11] P. Miri, P. Babakhani, On the failure of the only vernacular windcatcher in the mountainous region of Western Iran: opportunities for energy-efficient buildings. *J. Clean. Prod.* Vol. 295, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126383>
- [12] O. Rahaee, H.R. Azemati, Improving the Quality of Natural Ventilation in Classrooms of Mazandaran Province Based on the Position of the Openings Using CFD Method, *Journal of Iranian Architecture & Urbanism*, Vol. 11, pp. 57-71, 2020. (in Persian)
- [13] H. Zhong, Y. Sun, J. Shang, F. Qian, F. Zhao, H. Kikumoto, C. Jimenez-Bescos, X. Liu, Single-sided natural ventilation in buildings: a critical literature review, *Building and Environment*, Vol. 212, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108797>
- [14] N.R.M. Sakiyama, L. Mazzaferro, J.C. Carlo, T. Bejat, H. Garrecht, Natural ventilation potential from weather analyses and building simulation, *Energy and Buildings*, Vol. 231, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110596>
- [15] H.L. Gough, J.F. Barlow, Z. Luo, M. King, C.H. Halios, C.S.B. Grimmond, Evaluating single-sided natural ventilation models against full-scale idealised measurements: Impact of wind direction and turbulence, *Building and Environment*, Vol. 170, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106656>
- [16] D. Etheridge, A perspective on fifty years of natural ventilation research, *Building and Environment*, Vol. 91, pp. 51-60, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.033>
- [17] M. Palme, C. Carrasco, M. Gálvez, L. Inostroza, Natural ventilation: a mitigation strategy to reduce overheating in buildings under urban heat island effect in South American cities, *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 245, No. 7, 2017. DOI 10.1088/1757-899X/245/7/072046.
- [18] H.Y. Zhong, Y. Sun, J. Shang, F.P. Qian, F.Y. Zhao, H. Kikumoto, C. Jimenez-Bescos, X. Liu, Single-sided natural ventilation in buildings: a critical literature review, *Building and Environment*, Vol. 212, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108797>
- [19] H. Zhang, D. Yang, V.W.Y. Tam, Y. Tao, G. Zhang, S. Setunge, L. Shi, A critical review of combined natural ventilation techniques in sustainable buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 41, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110795>
- [20] N. Izadyar, W. Miller, B. Rismanchi, V. Garcia-hansen, Impacts of façade openings ' geometry on natural ventilation and occupants' perception: A review air change per hour, *Building and Environment*, Vol. 170, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106613>
- [21] E. Cuce, F. Sher, H. Sadiq, P.M. Cuce, T. Guclu, A.B. Besir, Sustainable ventilation strategies in buildings: CFD research, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 36, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100540>
- [22] C.C. Vassella, J. Koch, A. Henzi, A. Jordan, R. Waeber, R. Iannaccone, R. Charri'ere, From spontaneous to strategic natural window ventilation: improving indoor air quality in Swiss schools. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, Vol. 234, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2021.113746>
- [23] A. Aguilar, M. L.de la Hoz-Torres, N. Costa, P. Arezes, M. D.Martinez-Aires, D. P.Ruiz, Assessment of ventilation rates inside educational buildings in Southwestern Europe: Analysis of

- Vol. 153, pp. 325-340, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.025>
- [58] J. Wang, Q. Huo, T. Zhang, S. Wang, F. Battaglia, Numerical investigation of gaseous pollutant cross-transmission for single-sided natural ventilation driven by buoyancy and wind, *Building and Environment*, Vol. 172, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106705>
- [59] H. Hu, H. Kikumoto, R. Ooka, C. Lin, B. Zhang, Comprehensive validation of experimental and numerical natural ventilation predictions based on field measurement with experimental house, *Building and Environment*, Vol. 207(B), 2022. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108433>
- [60] D. Gupta, V.R. Khare, Natural Ventilation Design: Predicted and Measured Performance of a Hostel Building in Composite Climate of India, *Energy and Built Environment*, Vol. 2, No. 1, pp. 82-93, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.06.003>
- [61] Y. Li, P. Heiselberg, Analysis Methods for Natural and Hybrid Ventilation - a Critical Literature Review and Recent Developments, *International Journal of Ventilation*, Vol. 1, No. 4, pp.3-20, 2003. <https://doi.org/10.1080/14733315.2003.11683640>
- [62] A. Aflaki, A. Esfandiari, S. Mohammadi, A Review of Numerical Simulation as a Precedence Method for Prediction and Evaluation of Building Ventilation Performance, *Sustainability*. Vol. 13, No. 22, 2021. <https://doi.org/10.3390/su132212721>
- [63] Z.J. Zhai, Z. Zhang, W. Zhang, Q.Y. Chen, Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by CFD: Part 1 summary of prevalent turbulence models, *HVAC&R Research*, Vol. 13, No. 6, pp. 853-870, 2007. <https://doi.org/10.1080/10789669.2007.10391459>
- [64] S.M.R. Khani, M.N. Bahadori, A.R. Dehghani-Sanij, Experimental investigation of a modular wind tower in hot and dry regions, *Energy for Sustainable Development*, Vol. 39, pp. 21-28, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.03.003>
- [65] G. Remion, B. Moujalled, M. El Mankibi, R. Jobert, L. Deleersnyder, Assessing the performance of natural ventilation systems: a review of existing methods. In *39th AIVC conference Smart ventilation for buildings*, 2018.
- [66] O. Rahaei, Cultural Identity and Its Effects on Indigenous Methods of Natural Ventilation Passage of Metal Smiths in Dezful's Old Bazaar, *The Monthly Scientific Journal of Bagh-e Nazar*, Vol. 10, No. 24, pp. 39-46, 2013. (in Persian)
- [67] S. Benni, P. Tassinari, F. Bonora, A. Barbaresi, D. Torreggiani, Efficacy of greenhouse natural ventilation: Environmental monitoring and CFD simulations of a study case, *Energy and Buildings*, Vol. 125, pp. 276-286, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.014>
- [68] T.G. Farea, D.R. Ossen, S. Alkaff, H. Kotani, CFD modeling for natural ventilation in a lightwell connected to outdoor through horizontal voids, *Energy and Buildings*, Vol. 86, pp.502-513, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.030>
- [69] D. Etheridge, Natural Ventilation of Buildings Theory, Measurement and Design, Book Reviews, *International Journal of Ventilation*, Vol. 10, No. 4, 2016. <https://doi.org/10.1080/14733315.2012.11683965>
- [70] J. Woolley, S. Schiavon, F. Bauman, P. Raftery, Side-by-side laboratory comparison of radiant and all-air cooling: How natural ventilation cooling and heat gain characteristics impact space heat extraction rates and daily thermal energy use, *Energy and Buildings*, Vol. 200, pp. 68-85, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.07.020>
- [71] M. Fiedler, J. Fischer, S. Hempel, C. Saha, C. Loebstin, W. Berg, ... & T. Amon, Flow fields within a dairy barn-Measurements, physical modelling and numerical simulation. In Proceedings of the *International Conference of Agricultural Engineering AgEng*, pp. 6-10, 2014.
- [72] Y. Liu, Y. Hu, Y. Xiao, J. Chen, H. Huang, Effects of different types of entrances on natural ventilation in a subway station, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 105, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103578>
- [73] N. Kumar, T. Kubota, Y. Tominaga, M. Shirzadi, R. Bardhan, CFD simulations of wind-induced ventilation in apartment
- [40] M. Hazbei, Z. Adib, F. Nasrollahi, Natural ventilation effect on Shavadoons in Dezful by applying CFD modeling. *The Monthly Scientific Journal of Bagh-e Nazar*, Vol. 11, No. 30, pp. 37-48, 2014. (in Persian)
- [41] . Omrani, V. Garcia-Hansen, B. Capra, R. Drogemuller, Natural ventilation in multi-storey buildings: Design process and review of evaluation tools, *Building and Environment*, Vol. 116, pp. 182-194, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.012>
- [42] A. Salehi, *Natural Ventilation in Old Buildings: recommendations for its improvement*, Doctoral dissertation, Universidade de Coimbra (Portugal), 2016.
- [43] R. Shateriyan, *Climate and Architecture*, Tehran, Simaye Danesh, 2011.
- [44] D.A. Olsen, L.R. Glickman, H.M. Ferm, Steady-State Natural Convection in Empty and Partitioned Enclosures at High Rayleigh Numbers, *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 112, No. 3, pp. 640-647, 1990. <https://doi.org/10.1115/1.2910435>
- [45] J.W. Elder, Turbulence free convection in a vertical slot, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 23, No. 1, pp. 99-111, 1965. <https://doi.org/10.1017/S0022112065001258>
- [46] P.W. Giel, F.W. and Schmidt, All experiment study of high Rayleigh number natural convection, In: *An enclosure proceeding of the 8th International heat transfer conference*, Vol. 4, pp. 1459-1464, 1986.
- [47] R. Cheesewright, Turbulent natural convection from a vertical plane surface, *Journal of heat transfer*, Transaction of ASME, pp. 1-9, 1968.
- [48] Y. Nagano, M. Tagawa, An improved k-ε model for Boundary layer flows, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 112, No. 1, pp. 33-39, 1990. <https://doi.org/10.1115/1.2909365>
- [49] G. Remion, B. Moujalled, M. El Mankibi, Review of tracer gas-based methods for the characterization of natural ventilation performance: Comparative analysis of their accuracy, *Building and Environment*, Vol. 160, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106180>
- [50] J. Javadi Moghaddam, The effect of turbulence on natural ventilation of a proposed octagonal greenhouse in a transient flow, *International Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 18, pp. 2181-2196, 2021. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02955-y>
- [51] Z. Zhai, M. El Mankibi, A. Zoubir, Review of natural ventilation models, *Energy Procedia*, Vol. 78, pp. 2700-2705, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.355>
- [52] J.C. Salcido, AA. Raheem, R.R.A. Issa, From simulation to monitoring: Evaluating the potential of mixed-mode ventilation (MMV) systems for integrating natural ventilation in office buildings through a comprehensive literature review, *Energy and Buildings*, Vol. 127, pp. 1008-1018, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.054>
- [53] S. Liu, W. Pan, Q. Cao, Z. Long, Y. Jiang, Q. Chen, CFD simulations of natural cross ventilation through an apartment with modified hourly wind information from a meteorological station", *Energy and Buildings*, Vol. 195, pp. 16-25, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.043>
- [54] V.J.L. Gan, M. Deng, Y. Tan, W. Chen, J.C.P. Cheng, BIM-based framework to analyze the effect of natural ventilation on thermal comfort and energy performance in buildings, *Energy Procedia*, Vol. 158, pp. 3319-3324, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.971>
- [55] M. Chen Austin, D. Mora, D. Bruneau, A. Sempey, A review of airflow rate estimation techniques for natural ventilation in buildings", *Faculty of Engineering Journal*, No. 104, pp. 1-17, 2022. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20210849>
- [56] S.D. Ray, N. Gong, L.R. Glicksman, J.A. Paradiso, Experimental characterization of full-scale naturally ventilated atrium and validation of CFD simulations, *Energy and Buildings*, Vol. 69, pp. 285-291, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.018>
- [57] J. Wang, T. Zhang, S. Wang, F. Battaglia, Gaseous pollutant transmission through windows between vertical floors in a multistory building with natural ventilation, *Energy and Buildings*,

- [88] Y. Liu, Y. Xiao, J. Chen, G. Augenbroe, T. Zhou, A network model for natural ventilation simulation in deep buried underground structures, *Building and Environment*, Vol. 153, pp. 288-301, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.045>
- [89] D.P. Albuquerque, N. Mateus, M. Avantiaggiato, G. Carrilho da Graça, Full-scale measurement and validated simulation of cooling load reduction due to nighttime natural ventilation of a large atrium, *Energy and Buildings*, Vol. 224, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110233>
- [90] E.A. Villagrán, E.J. Baeza Romero, C.R. Bojacá, Transient CFD analysis of the natural ventilation of three types of greenhouses used for agricultural production in a tropical mountain climate, *Biosystems Engineering*, Vol. 188, pp. 288-304, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.10.026>
- [91] D. Han, S. Kim, J. Hyuk, Y. Sik, H. Chung, H. Jeong, N. Watjanatepin, C. Ruangpattanawit, S. Choi, Experimental study on thermal buoyancy-induced natural ventilation, *Energy and Buildings*, Vol. 177, pp. 1-11, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.046>
- [92] L. Zhigang, *Characteristics of Buoyancy Driven Natural Ventilation through Horizontal Openings*, PhD Thesis, Aalborg Univ, 2007.
- [93] A. Roasaei, O. Rahaei, Improvement of Indoor Air Flow Quality under the Influence of Internal Partition Walls in Air-Conditioned Office Spaces Using CFD Method. *Armanshahr Architecture & Urban Development*, Vol. 13, No. 30, pp. 69-81, 2020. <https://doi.org/10.22034/aaud.2020.101584.1325>. (in Persian)
- [94] H. Montazeri, F. Montazeri, CFD simulation of cross-ventilation in buildings using rooftop wind-catchers: Impact of outlet openings, *Renewable Energy*, Vol. 118, pp. 502-520, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.032>
- [95] N. Benkari, I. Fazil, A. Husain, Design and Performance Comparison of Two Patterns of Wind-catcher for a Semi-enclosed Courtyard, *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, Vol. 6, No. 5, pp. 396-400, 2017. DOI: 10.18178/ijmerr.6.5.396-400
- [96] D. D'Agostino, P.M. Congedo, CFD modeling and moisture dynamics implications of ventilation scenarios in historical buildings, *Building and Environment*, Vol. 79, pp. 181-193, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.007>
- [97] M.E. Zarei, N. Behboodi, Investigating the Speed and Pressure of the Wind in the Central Part of Varmal Castle Settlement in Sistan, Using CFD Simulation Method. *JRIA*, Vol. 4, No. 1, pp. 94-11, 2016. <http://jria.iust.ac.ir/article-1-431-fa.html>. (in Persian)
- [98] G. Memarian, A. Mohammadmoradi, S.M. Hosseinalipour, A. Heidari, S. Doodi, Analysis of Wind Behaviour in Naturally Ventilated Vernacular Housing in Ghaleno Village in Sistan, Using CFD Modelling, *JHRE*, Vol. 36, No. 157, pp. 21-36, 2017. URL: <http://jhre.ir/article-1-1200-fa.html>.
- [99] A. Heidari, S. Sahebzadeh, Z. Dalvand, Natural Ventilation in Vernacular Architecture of Sistan, Iran; Classification and CFD Study of Compound Rooms, *Sustainability*, Vol. 9, No. 6, 2017. <https://doi.org/10.3390/su9061048>
- [100] T.S. Larsen, P. Heiselberg, Single-sided natural ventilation driven by wind pressure and temperature difference, *Energy and Buildings*, Vol. 40, No. 6, pp. 1031-1040, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.07.012>
- [101] R. Mateus, J. Pereira, A. Pinto, Natural ventilation of large air masses: Experimental and numerical techniques review, *Energy and Buildings*, Vol. 291, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113120>
- [102] F. Muhsin, W.F.M. Yusoff, M.F. Mohamed, A.R. Sopian, CFD modeling of natural ventilation in a void connected to the living units of multi-storey housing for thermal comfort, *Energy and Buildings*, Vol. 144, pp. 1-16, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.035>
- [103] M. Baharvand, M. Hamdan, M. Abdul, DesignBuilder verification and validation for indoor natural ventilation. *Journal of Basic and Applied Scientific Research (JBASR)*, Vol. 3, No. 4, 2013.
- buildings with vertical voids: Effects of pilotis and wind fin on ventilation performance, *Building and Environment*, Vol. 194, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107666>
- [74] S. Gilani, H. Montazeri, B. Blocken, CFD simulation of stratified indoor environment in displacement ventilation: Validation and sensitivity analysis, *Building and Environment*, Vol.95, pp. 299-313, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.09.010>
- [75] R. Kim, S. Hong, T. Norton, T. Amon, A. Youssef, D. Berckmans, I. Lee, Computational fluid dynamics for non-experts : Development of a user-friendly CFD simulator (HNVR-SYS) for natural ventilation design applications, *Biosystems Engineering*, Vol. 193, pp. 232-246, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.03.005>
- [76] S.W. Hong, V. Exadaktylos, I.B. Lee, T. Amon, A. Youssef, T. Norton, D. Berckmans, Validation of an open source CFD code to simulate natural ventilation for agricultural buildings, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 138, pp. 80-91, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.03.022>
- [77] F. Durrani, M.J. Cook, J.J. McGuirk, Evaluation of LES and RANS CFD modelling of multiple steady states in natural ventilation, *Building and Environment*, Vol. 92, pp. 167-181, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.027>
- [78] S. Lee, I. Lee, R. Kim, Evaluation of wind-driven natural ventilation of single-span greenhouses built on reclaimed coastal land, *Biosystems Engineering*, Vol. 171, pp. 120-142, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.04.015>
- [79] L. Mccartney, M.G. Lefsrud, Field trials of the Natural Ventilation Augmented Cooling (NVAC) greenhouse, *Biosystems Engineering*, Vol. 174, pp. 159-172, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.07.004>
- [80] Q. Feng, C. Zhang, J. Lu, H. Cai, Z. Chen, Y. Yang, F. Li, Source localization in dynamic indoor environments with natural ventilation: An experimental study of a particle swarm optimization-based multi-robot olfaction method, *Building and Environment*, Vol. 161, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106228>
- [81] J.L. Fernández-Zayas, J.F. Villa-Medina, N.C. Valle, M.Á. Porta-Gándara, Experimental analysis of natural ventilation of an office building in Mexico City, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 28, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101661>
- [82] F. Rojano, P. Bourmet, M. Hassouna, P. Robin, M. Kacira, C.Y. Choi, Modelling the impact of air discharges caused by natural ventilation in a poultry house, *Biosystems Engineering*, Vol. 180, pp. 168-181, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.02.001>
- [83] M. Zofron Afif, R. Frans Fela, S. Sesotya Utami, M. Kholid Ridwan, R. Armanto Mangkuto, CFD Simulation in Naturally Ventilated Multi-Purpose Sports Hall: Effects to the Basketball and Badminton Matches. *Building Simulation*, Vol. 16, pp. 629-634, 2019. <http://dx.doi.org/10.26868/25222708.2019.210476>
- [84] Y. Xia, W. Lin, W. Gao, T. Liu, Q. Li, A. Li, Experimental and numerical studies on indoor thermal comfort in fluid flow: A case study on primary school classrooms, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 19, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100619>
- [85] J. Deng, N. Wong, D. Chung Hii, Zh. Yu, E. Tan, M. Zhen, Sh. Tong, Impact of architectural design strategies on the indoor natural ventilation of public residential buildings in Singapore, *Urban Climate*, Vol. 52, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101741>
- [86] A. Limane, H. Fellouah, N. Galanis, Three-dimensional OpenFOAM simulation to evaluate the thermal comfort of occupants, indoor air quality and heat losses inside an indoor swimming pool, *Energy and Buildings*, Vol. 167, pp. 49-68, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.037>
- [87] C. Porras-Amores, F.R. Mazarrón, I. Cañas, P. Villoría Sáez, Natural ventilation analysis in an underground construction : CFD simulation and experimental validation, *Tunnelling and Underground Space Technology*, V. 90, pp. 162-173, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.04.023>

- [104] X. Zheng, H. Montazeri, B. Blocken, CFD simulations of wind flow and mean surface pressure for buildings with balconies: Comparison of RANS and LES, *Building and Environment*, Vol. 173, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106747>
- [105] N. Izadyar, W. Miller, B. Rismanchi, V. Garcia-Hansen, A numerical investigation of balcony geometry impact on single-sided natural ventilation and thermal comfort, *Journal of Building and Environment*, Vol. 177, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106847>
- [106] J.K. Calautit, B.R. Hughes, Measurement and prediction of the indoor airflow in a room ventilated with a commercial wind tower, *Energy and Buildings*, Vol. 84, pp. 367-377, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.08.015>
- [107] J.I. Perén, T. van Hooff, B.C.C. Leite, B. Blocken, B. CFD analysis of cross-ventilation of a generic isolated building with asymmetric opening positions: Impact of roof angle and opening location, *Building and Environment*, Vol. 85, pp. 263-276, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.12.007>
- [108] R. Stasi, F. Ruggiero, U. Berardi, Natural ventilation effectiveness in low-income housing to challenge energy poverty, *Energy and Buildings*, Vol. 304, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113836>
- [109] O. Rahaei, S. Abi, A. Shams Taleghani, Uniformization of the ventilation process in the internal exhibition halls of the Shush Antiquities Museum with limited interventions. *Fluid Mechanics & Aerodynamics Journal*, Vol. 11, No. 1, pp. 41-55, 2022. 20.1001.1.23223278.1401.11.1.3.5. (in Persian)
- [110] F. Mozaffari Ghadikolaie, D.R. Ossen, M.F. Mohamed, Effects of wing wall at the balcony on the natural ventilation performance in medium-rise residential buildings, *Journal of Building Engineering*, Vol. 31, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101316>
- [111] M. Kasmai, *Climate Design Guide*, Building and housing research center, 1989.
- [112] N.M. Mateus, A. Pinto, G.C. Da Graça, Validation of EnergyPlus thermal simulation of a double skin naturally and mechanically ventilated test cell, *Energy and Buildings*, Vol. 75, pp. 511-522, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.043>
- [113] W. Liu, M. Jin, C. Chen, R. You, Q. Chen, Implementation of a fast fluid dynamics model in OpenFOAM for simulating indoor airflow, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, Vol. 69, No. 7, pp. 748-762, 2015. <https://doi.org/10.1080/10407782.2015.1090780>
- [114] H.L. Gough, Z. Luo, C.H. Halios, M.F. King, C.J. Noakes, C.S.B. Grimmond, J.F. Barlow, R. Hoxey, A.D. Quinn, Field measurement of natural ventilation rate in an idealised full-scale building located in a staggered urban array: Comparison between tracer gas and pressure-based methods, *Building and Environment*, Vol. 137, pp. 246-256, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.055>