10.22034/jrenew.2025.201463

سال دوازدهم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۴، ص ص 148- 156

فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir

Online ISSN 2676-2994 print ISSN 2423-4931

مقاله ترویجی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۷

تاریخ پذیرش: ۴۰۲/۰۹/۲۳

کاربرد بادگیرهای نسل جدید جهت تهویه طبیعی و کنترل سطح دی‌اکسید کربن هوا در فضاهای آموزشی اقلیم معتدل و مرطوب ایران

امیرمحمد بابازاده[۱]، سیده مامک صلواتیان[۲*]

۱- دانشجوی دکترا، گروه معماری، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران

۲- استادیار، گروه معماری، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران

* رشت، ۳۵۱۶۴۱۳۳۵، salavatian@iaurasht.ac.ir

چکیده

امروزه بامطالعه عناصر معماری اقلیمی گذشته، سیستم‌های نوینی همچون بادگیرهای نسل جدید ساخته شده است. مؤلفه‌های کیفیت هوای داخلی تأثیر بسزایی بر عملکرد دانش‌آموزان در فضاهای آموزشی دارند؛ بنابراین می‌بایست سطح این مؤلفه‌ها در هوای فضای داخلی پایش و به سطح مطلوب رسانده شوند. پژوهش حاضر سعی بر بررسی کاربرد سیستم بادگیرهای نسل جدید بر دو مؤلفه کیفیت هوای فضای داخلی یعنی نرخ تهویه و سطح دی‌اکسید کربن هوا در اقلیم معتدل و مرطوب ایران داشته است. این پژوهش از نوع مروری است و جمع‌آوری داده‌ها به شیوه کتابخانه‌ای است و با استفاده از روش تحقیق توصیفی - تحلیلی سعی بر نتیجه‌گیری و تعمیم نتایج به‌دست‌آمده در اقلیم معتدل و مرطوب ایران شده است. جهت مشخص شدن نتایج، در ابتدا سرعت باد موردنیاز جهت فعال شدن بادگیرهای نسل جدید جمع‌آوری گردید. سپس ارزیابی‌ها در خصوص قابلیت سیستم‌های بادگیر نسل جدید در تأمین استانداردهای لازم در هر دو زمینه نرخ تهویه و سطح دی‌اکسید کربن هوا صورت گرفت. نتایج نشان داد که با توجه به میانگین سرعت باد در سه شهر مورد مطالعه، سیستم‌های بادگیر نسل جدید در اکثر ماهای سال با در نظر گرفتن یک فن دمنده در ابتدای مسیر توانایی تأمین استانداردهای لازم در هر دو زمینه نرخ تهویه و سطح دی‌اکسید کربن هوا را در فضاهای آموزشی دارد.

کلیدواژگان: بادگیر، تهویه طبیعی، سطح دی‌اکسید کربن، محیط‌های آموزشی، اقلیم معتدل و مرطوب ایران

Application of the new generation wind catchers to control natural ventilation and CO_2 level in educational spaces of moderate and humid climate in Iran

Amir Mohammad Babazadeh[1], SeyedehMamak Salavatian[2*]

1- Ph.D. student, Department of Architecture, Rasht branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran

2- Assistant professor, Department of Architecture, Rasht branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran

* P.O.B. 413353516 Rasht, Iran, salavatian@iaurasht.ac.ir

Received: 27 January 2023 Accepted: 14 December 2023

Abstract

Nowadays by studying about elements of climatic architectures, new systems have been created. Wind catcher is one of those functional elements. On the other side, the indoor air quality (IAQ) factors have significant impact on students' performance. Therefore, these factors must be monitored and controlled. This study investigates the use of new generation of wind catchers to control natural ventilation and CO_2 level in the educational environments of Iran moderate and humid climate. This review research includes a comprehensive literature review and the descriptive-analytical research method has been used to draw conclusions and generalizes the results in the moderate and humid climate of Iran. The results reveal that according to the average wind speed in the three studied cities, the new generation wind-catcher systems in most of the year, considering a blower fan at the beginning of the path, are able to provide the necessary standards in both ventilation rate and carbon dioxide level factors of the air in educational spaces.

Keywords: Wind catcher, Natural ventilation, CO_2 level, Educational spaces, Iran, Moderate and humid climate

Authors retain the copyright and full publishing rights. This article is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

۱- مقدمه

بسیاری از راهکارها و تکنیک‌های استفاده شده جهت تأمین شرایط آسایش در معماری اقلیمی گذشته عمدتاً با استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر بوده است. ازجمله مواردی که در اقلیم‌های گرم و خشک و گرم و مرطوب معماری اقلیمی گذشته جهت ایجاد شرایط آسایش مورداستفاده قرار می‌گرفته، بادگیرها هستند. بادگیرها در نقاط مختلفی از جهان ساخته می‌شدند و به همین جهت انواع متفاوتی دارند، اما عملکرد و هدف آن‌ها یکسان است [۱]. امروزه با مطالعه بیشتر ساختار و عملکرد بادگیرها، سیستم نوینی تولیدشده که با الگوبرداری از بادگیرهای معماری گذشته می‌تواند با مصرف انرژی بسیار کم شرایط آسایش را در فضاهای داخلی بهبود بخشد. ازجمله فضاهایی که می‌توان از قابلیت‌های این سیستم نوین جهت ایجاد تهویه طبیعی استفاده کرد، مدارس است چراکه با توجه به تعاریف، مزایای بسیاری همانند مصرف انرژی کم، انتشار کم دی‌اکسید کربن، بی‌صدا بودن در حین کار، سهولت در نگه‌داری و تعمیرات را به همراه دارد [۲, ۳].

از سوی دیگر امروزه با توجه به مسائلی همچون بیماری‌های همه‌گیر، لزوم توجه به سیستم‌های تهویه در مدارس بسیار اهمیت دارد و همواره در مطالعات جدید تأکید بر وجود یک سیستم تهویه طبیعی است [۴, ۵]. از همین روی پیشنهادهای ساختاری و چیدمان داخلی انعطاف‌پذیر در کنار لزوم توجه به سیستم تهویه طبیعی در فضاهای بسته آموزشی به جهت خطرات ناشی از ویروس کرونا و به‌طورکلی بیماری‌های همه‌گیر نیز پیشنهادشده است [۶]. در ارتباط با سیستم‌های تهویه نیز می‌توان اشاره کرد که نیروی محرکه این سیستم‌ها باد و اثر دودکشی[1] است. برخی از انواع این سیستم‌ها عبارت‌اند از: تهویه یک‌طرفه[2]، تهویه عبوری[3] یا سیستم‌های تهویه دودکشی[4] که می‌توانند شامل: ۱- باز کردن پنجره‌ها، ۲- دمپرها و ۳-دودکش‌های سقفی باشند [۷]. پژوهشی برای سنجش محیط مدرسه از آلاینده‌های هوا انجام‌شده و مؤلفه‌هایی ازجمله دما، رطوبت نسبی، دی‌اکسید کربن و مؤلفه‌های شیمیایی موجود در هوای منطقه موردبررسی قرارگرفته است و درنهایت نرخ تهویه بسیار پایین (۰.۱ الی ۳.۷ لیتر بر ثانیه به ازای هر نفر) به‌عنوان یک معضل معرفی‌شده است [۸]. سنجش میزان دی‌اکسید کربن موجود در کلاس‌های درس مشخص نموده که در برخی موارد، دی‌اکسید کربن موجود در فضای کلاس فراتر از حد استاندارد سازمان بهداشت جهانی[5] است اما به دلیل هدر رفت گرمای داخلی از طریق بازشوها که به جهت ایجاد تهویه طبیعی استفاده می‌شدند، ترجیح کاربران به عدم استفاده از تهویه طبیعی و محبوس کردن گرما است [۹]. به همین جهت بازیابی انرژی حرارتی در هوای خروجی سیستم تهویه طبیعی اهمیت یافته و با تغییرات ساختاری در آن، علاوه برافزایش نرخ تهویه و ایجاد شرایط مطلوب برای فضای داخلی، در بازیابی گرما نیز تأثیر مثبتی بر دمای هوای داخلی داشته و دمای داخل را تا ۳.۷ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌دهد [۱۰].

در این پژوهش، تمرکز بر بررسی کاربرد سیستم بادگیرهای نسل جدید بر دو مؤلفه کیفیت هوای داخلی[6] یعنی نرخ تهویه و سطح دی‌اکسید کربن بوده و سعی بر امکان‌سنجی استفاده این سیستم‌ها در اقلیم معتدل و مرطوب ایران شده است؛ بنابراین این مطالعه به دنبال یافتن پاسخ این سؤال است که آیا می‌توان از سیستم‌های بادگیر نسل جدید در بهبود کیفیت هوای داخلی و کنترل سطح دی‌اکسید کربن هوا در کاربری آموزشی اقلیم معتدل و مرطوب ایران بهره برد ؟

فرضیه مطرح شده در این پژوهش اثبات کارآمدی بادگیرهای نسل جدید در بهبود کیفیت هوای داخلی و کنترل سطح دی‌اکسید کربن هوا در کاربری آموزشی شهرهای منطقه اقلیمی معتدل و مرطوب ایران است.

روش تحقیق در این پژوهش توصیفی – تحلیلی است و جمع‌آوری داده‌ها به شیوه کتابخانه‌ای است. جهت آزمون فرضیه سه‌گام اصلی مشخص‌شده است؛ در گام اول منابع مرتبط با سیستم‌های تهویه طبیعی[7]، استفاده این سیستم‌ها در فضاهای آموزشی و بادگیرهای نسل جدید بررسی و ارزیابی شد. در گام دوم، کاربرد این نوع سیستم‌ها در تهویه فضای مدارس جمع‌بندی شده و درنهایت با توجه به اقلیم معتدل و مرطوب ایران و داده‌های ایستگاه‌های کلیماتولوژی (اقلیم‌شناسی) مراکز استان‌های این اقلیم در ایران و بررسی آن‌ها در نرم‌افزار مشاور انرژی[8] و مقایسه با شرایط بهینه عملکردی این سیستم‌ها، کاربرد سیستم بادگیرهای نسل جدید در این اقلیم موردبررسی قرار گرفت.

۲- تفاوت بادگیرهای سنتی و نسل جدید

سیستم‌های مونودرفت و بادگیرهای سنتی هر دو برای تهویه و خنک‌کننده طبیعی بناها طراحی شده‌اند، اما در مواردی همچون مکانیسم، طراحی، کاربرد، سازگاری و بهره‌وری انرژی متفاوت هستند. مکانیسم سیستم‌های مونودرفت ترکیبی از اصول تهویه طبیعی و اجزای مکانیکی مانند فن‌ها و دمپرهای کم انرژی برای کنترل جریان هوا و حفظ راحتی در داخل ساختمان هستند. این سیستم‌ها معمولاً در سیستم‌های تاسیساتی مدرن ادغام می‌شوند و با انواع و شرایط مختلف ساختمان سازگاری بیشتری دارند [۳]. این در حالی است که بادگیرهای سنتی برای تأمین تهویه صرفاً بر حرکت باد طبیعی و جریان هوای شناور متکی هستند [۱۱].

از نظر طراحی سیستم‌های مونودرفت معمولاً بخشی از طراحی جامع ساختمان و استراتژی تاسیساتی هستند. این سیستم‌ها را می‌توان برای برآوردن الزامات خاص تهویه و خنک‌کننده، ازجمله کنترل کیفیت هوا و تنظیم دما، سفارشی کرد[۲, ۳] . درحالی‌که بادگیرهای سنتی طراحی ساده‌تری دارند. طراحی بادگیرهای سنتی ازنظر معماری قابل‌مشاهده است و در برآورد الزامات خاص بخش تأسیسات کاربردی ندارند [۱].

در بحث کنترل نیز سیستم‌های مونودرفت اغلب دارای حسگرها و کنترل‌هایی برای نظارت بر شرایط داخل ساختمان و در صورت نیاز تنظیم جریان هوا هستند . این سیستم‌ها می‌توانند کنترل دقیق دما، رطوبت و کیفیت هوا را فراهم و به‌صورت لحظه‌ای نمایش دهند [۱۲]. بادگیرهای سنتی بر الگوهای باد طبیعی تکیه‌دارند و به جهت ماهیت آن، سطح کنترل یکسانی ندارند [۱۳].

در ارتباط با سازگاری این سیستم‌ها با محیط مورداستفاده آن‌ها نیز سیستم‌های مونودرفت را می‌توان در طیف وسیعی از انواع ساختمان‌ها و اقلیم‌ها نصب کرد. اسن سیستم‌ها می‌توانند با سایر سیستم‌های تاسیساتی از قبیل

1. Stack effect
2. Single sided ventilation
3. Cross ventilation
4. Stack ventilation systems
5. World Health Organization
6. Indoor Air Quality (IAQ)
7. Natural ventilation systems (NVS)
8. Climate consultant

سرمایشی، گرمایشی و تهویه‌ای ادغام شوند [۳, ۱۰]. سازگاری بادگیرهای سنتی به‌مراتب کمتر بوده و مرتبط با سبک‌های معماری خاصی هستند و بیشتر در مناطقی با الگوهای باد ثابت یافت می‌شوند [۱۳].

سیستم‌های مونودرفت را می‌توانند با استفاده از فن‌های کم‌مصرف و بهینه به‌گونه‌ای طراحی نمود که ازنظر بهره‌وری انرژی کارآمد باشند؛ همچنین می‌توان سیستم‌های بازیابی گرما را برای بهبود بهره‌وری کلی انرژی با آن‌ها ترکیب نمود [۱۰].

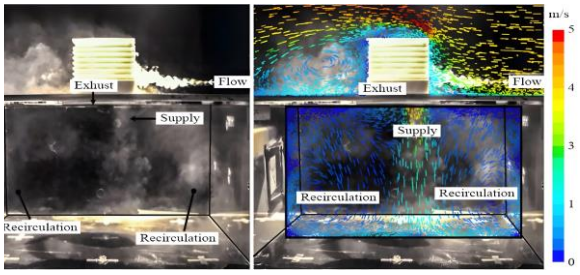
به‌طور خلاصه سیستم‌های مونودرفت اغلب همه‌کاره‌تر و مناسب‌تر برای ساختمان‌های بروز هستند، درحالی‌که بادگیرهای سنتی رویکردی سنتی‌تر و غیرفعال‌تر برای تهویه دارند. انتخاب بین آن‌ها به الزامات و محدودیت‌های خاص یک پروژه معین بستگی دارد.

۳- عملکرد بادگیرهای سنتی در تهویه طبیعی

راهکارهای غیرفعال در معماری سنتی الگوی بسیاری از طراحی‌های مطابق با اقلیم امروزی واقع‌شده است. ازجمله مواردی که در اقلیم‌های گرم و خشک و گرم و مرطوب معماری گذشته جهت ایجاد یک شرایط آسایش مورداستفاده قرار می‌گرفته، بادگیر است. ساختار و عملکرد کلی این سیستم بر پایه بادهای غالب و مطلوب منطقه بوده، به‌طوری‌که با دریافت باد و هدایت آن به داخل فضای مشخص‌شده، باعث ایجاد تهویه طبیعی می‌شود. بادگیرها در نقاط مختلفی در داخل و خارج از ایران همانند پاکستان، افغانستان، عراق، مصر، امارات، سوریه، لبنان، فلسطین، اسرائیل، ترکیه و جزیره مزوپوتامیا ساخته می‌شدند و به همین جهت انواع متفاوتی دارند، اما عملکرد و هدف آن‌ها یکسان است [۱]

۴- بادگیرهای نسل جدید

از سیستم‌های نوینی که با الهام از الگوهای گذشته و مشخصاً بادگیرها طراحی‌شده، سیستمی با نام تجاری مونودرفت[1] است. امروزه این سیستم‌ها در انواع گوناگونی با عملکردهای متفاوت و برای اهداف گوناگون مورداستفاده قرار می‌گیرند. به‌طورکلی سیستم تهویه طبیعی با استفاده از انرژی باد و تفاوت در فشار هوای داخلی و خارجی یک فضا (اثر دودکشی) فعال می‌شود و هوای تازه را به فضای موردنظر می‌رساند و هوای داخل فضا را به سمت خارج منتقل می‌کند. نحوه عمل سیستم همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است، بدین ترتیب است که هوا در فضای خارج از ساختمان دارای فشار بیشتری (فشار مثبت) نسبت به هوای فضای داخل (فشار منفی) ساختمان است، بنابراین هوای خارج از بین پره‌هایی که زاویه آن‌ها به‌طرف داخل است وارد ساختمان می‌شود و با ورود هوای خارجی، از سوی دیگر هوای داخلی به دلیل افزایش فشار نسبی و همچنین بالاتر بودن دمای آن، توسط پره‌هایی که زاویه آن‌ها به سمت خارج است بیرون می‌رود.



شکل ۱ سرعت باد سیستم‌های بادگیر نسل جدید در آزمایش بخار [۱۴]

این سیستم‌ها می‌توانند بصورت قابل‌کنترل نیز تنظیم شود؛ همچنین از دیگر مزیت‌های آن کم‌کربن و غیرفعال بودن آن است که برای تهویه از فن یا پمپ استفاده نمی‌کند [۳]. اگرچه در شرایط خاصی جهت رساندن نرخ تهویه به استانداردهای لازم، می‌توان از یک فن دمنده در ابتدای مسیر نیز بهره برد [۲].

۵- تهویه و سطح کربن دی‌اکسید در فضاهای آموزشی

۵-۱- تهویه در فضای آموزشی

امروزه و خصوصاً پس از شیوع همه‌گیری ویروس کرونا، سیستم‌های تهویه طبیعی به دلیل نیاز به تضمین نرخ تهویه کافی برای جلوگیری از انتشار ویروس در ساختمان‌های مدارس، موردتوجه قرارگرفته‌اند [۱۵].

در پژوهشی نسبت نرخ تهویه با دی‌اکسید کربن بررسی‌شده که نتایج حاکی از آن بوده است که غلظت دی‌اکسید کربن در فضا اغلب بسیار بیشتر از ۱۰۰۰ ppm است که نشان دهنده نرخ تهویه اغلب به‌مراتب کمتر از ۷ لیتر بر ثانیه به ازای هر نفر است. بسیاری از مطالعات نرخ متوسط تهویه را در محدوده ۳ تا ۵ لیتر بر ثانیه به ازای هر نفر گزارش می‌کنند [۱۲, ۱۶] بااین‌وجود رسیدن به نرخ ۸ لیتر بر ثانیه به ازای هر نفر به‌عنوان نرخ تهویه مطلوب پیشنهاد می‌شود [۱۲]. در استاندارد اروپا، ۴ سطح نرخ تهویه بر اساس لیتر بر ثانیه به ازای هر نفر با توجه به سطح دی‌اکسید کربن هوای خارجی (۴۰۰ppm) مشخص‌شده که بر این اساس، نرخ تهویه بیش از ۱۰ لیتر بر ثانیه به ازای هر نفر به‌عنوان بالاترین و نرخ تهویه کمتر از ۴ لیتر بر ثانیه به ازای هر نفر به‌عنوان پایین‌ترین سطح نرخ تهویه معرفی‌شده است [۱۷].

جدول ۱ نرخ تهویه بر اساس سطح دی‌اکسید کربن خارجی [۱۷]

نرخ تهویه (L/s.p)	محدوده سطح دی‌اکسید کربن (ppm)	وضعیت کیفیت هوای داخلی
بیشتر از ۱۰	کمتر از ۸۰۰	بالاترین میزان استاندارد
بین ۷ تا ۱۰	بین ۸۰۰ تا ۱۰۰۰	استاندارد متوسط
بین ۴ تا ۷	بین ۱۰۰۰ تا ۱۴۰۰	استاندارد نزدیک به متوسط
کمتر از ۴	بیش از ۱۴۰۰	پایین‌ترین حد استاندارد

علاوه بر این، سازمان انجمن مهندسین گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع آمریکا (اشری)[2] نیز نرخ تهویه مناسب جهت رسیدن به سطح کیفیت هوای داخلی و دی‌اکسید کربن مناسب را ۸ لیتر بر ثانیه به ازای هر نفر معرفی نموده است [۱۸].

1. Monodraugh™

2. ASHRAE (The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)

۲-۵- سطح دی‌اکسید کربن هوا در محیط‌های آموزشی

چندین مطالعه برای ارزیابی عملکرد دانش‌آموزان و عوامل مؤثر بر عملکرد آن‌ها همانند کیفیت هوای محیط داخلی کلاس‌های درس انجام‌گرفته و ثابت‌شده که محیط‌های آموزشی وجود دارند که کیفیت هوای محیط داخلی در آن‌ها پایین‌تر از حد استاندارد است که در عملکرد دانش‌آموزان تأثیر منفی دارد [۱۹].

هفت پارامتر کلیدی طراحی در عملکرد دانش آموزان تأثیر دارد که سه مورد از آن‌ها، نور، دما و تهویه، ارتباط مستقیمی با کیفیت هوای داخلی و طراحی ساختمان دارند [۲۰]. آلاینده‌های هوای داخل ساختمان‌های مدرسه را می‌توان به ۳ دسته فیزیکی، شیمیایی و میکروبیولوژی طبقه‌بندی کرد [۷, ۸, ۱۵, ۲۱]. به‌طورکلی مؤلفه‌های فیزیکی و شیمیایی تأثیرگذار در کیفیت هوای داخلی عبارت‌اند از: بنزن، تری کلرواتیلن، تتراکلرواتیلن، فرمالدئید، نفتالین، بنزو پیرن، دی‌اکسید نیتروژن، اُزُن، دی‌اکسید کربن، مونوکسید کربن، رادون. مؤلفه‌های میکروبیولوژی عبارت‌اند از: اندوتوکسین، گروه‌های قارچی و باکتریایی خاص، آلرژن‌ها، کنه‌های گردوغبار داخلی، آلرژن های اسب، گربه و سگ. هوای حاصل از بازدم افراد معمولاً منبع اصلی دی‌اکسید کربن در فضای داخلی مدارس است. سطوح دی‌اکسید کربن در کلاس‌های درس تحت تأثیر عوامل مختلفی ازجمله: تعداد ساکنین اتاق[1]، سطوح فعالیت ساکنین[2]، مدت‌زمانی که ساکنین در اتاق می‌گذرانند[3] و میزان تهویه[4] است. همچنین سطح دی‌اکسید کربن حاصل از احتراق ممکن است در محل‌های پخت غذا و یا آزمایشگاه‌ها زمانی که اجاق‌های گازی یا شعله‌های بنزن‌سوز در حال استفاده هستند، بالا باشد[۷]. بنابراین در فضاهای بسته که آلودگی اساساً ناشی از حضور افراد است، می‌توان با کنترل و پایش سطح دی‌اکسید کربن، کیفیت تهویه را مورد ارزیابی قرارداد [۲۲].

نتایج در علم پزشکی روشن کرده است که سطح بالاتر از ۲۰۰۰ ppm سبب ایجاد تهوع و خواب‌آلودگی می‌شود که مطمئناً برای کارایی دانش‌آموزان مضر بوده و همچنین مقادیر بالای ۵۰۰۰ ppm برای مکانیسم تنفس به دلیل آسیب فیزیولوژیکی خطرناک گزارش‌شده است[۲۳]؛ همچنین اشری تفاوت بین غلظت دی‌اکسید کربن داخلی و خارجی را بیش از ۷۰۰ ppm توصیه کرده است [۱۷] و مرجع مدارس دولتی در بریتانیا، حداکثر سطح دی‌اکسید کربن را ۱۵۰۰ ppm در طول زمان اشغال و استفاده از فضا تعیین کرده است [۷]. همین مقدار به‌عنوان حداکثر سطح دی‌اکسید کربن توسط کشورهای دیگر همانند آلمان و سوئیس در مقررات آورده شده است [۲۳].

۶- ارزیابی عملکرد بادگیرهای نسل جدید در بهبود نرخ تهویه طبیعی و کنترل سطح دی‌اکسید کربن هوا در فضاهای آموزشی

سیستم‌های تهویه مکانیکی[5] می‌توانند در مواردی با مشکلاتی روبرو باشند. به‌طور مثال به دلیل برخی از مسائل عملیاتی و فنی، خصوصاً در مدارس با بنای قدیمی و فاقد زیرساخت، امکان استفاده و یا به‌روزرسانی این نوع سیستم‌ها فراهم ناست[۷, ۲۴].

رویکرد بهبود کیفیت هوای داخلی در مدارس با افزایش نرخ تهویه امکان‌پذیر است [۱۹]. استفاده از بادگیرهای نسل جدید که یک روش تهویه طبیعی را برای بهبود نرخ تهویه ارائه می‌دهد در مدارس بریتانیا در حال افزایش است. پیش‌بینی‌های نظری و اندازه‌گیری‌های تجربی ارائه‌شده در مورد این نوع سیستم‌ها نشان می‌دهند که یک بادگیر قادر است نرخ تهویه استاندارد برای یک اتاق در هنگام استفاده را فراهم آورد، مشروط بر اینکه تعدادی از معیارهای طراحی برآورده شوند. نرخ تهویه بادگیر را می‌توان با افزودن پنجره‌های باز و ایجاد فشار منفی در داخل فضا به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشید [۷, ۲۵]. مطابق با شکل ۱ طی آزمایش‌های انجام‌شده مشخص شد که بادگیر قادر به ارائه نرخ‌های تهویه توصیه‌شده بوده؛ همچنین دو مؤلفه سرعت باد خارجی و فشار هوای داخلی نیز به‌عنوان عوامل تأثیرگذار معرفی شدند [۱۲].

۷- مزیت‌های استفاده از سیستم‌های بادگیر نسل جدید در فضاهای آموزشی اقلیم معتدل و مرطوب

بر اساس برآوردهای وزارت انرژی ایالات‌متحده، ۲۵ درصد از هزینه‌های انرژی در مدارس را می‌توان از طریق طراحی بهتر ساختمان و استفاده از فناوری‌های انرژی کارآمد همراه با بهبود در عملیات و نگهداری صرفه‌جویی کرد. کلاس‌های درس یکی از مهم‌ترین بخش‌ها ازلحاظ مصرف انرژی در اکثر ساختمان‌های مدارس است. دانش‌آموزان بیشتر وقت خود را در این فضا می‌گذرانند. کلاس‌های درس به دلیل تراکم جمعیتی به نسبت فضا، منحصربه‌فرد هستند؛ بنابراین، تهویه کافی در کلاس ضروری است [۴, ۲۶].

در ارتباط با مزیت و اهمیت استفاده از این سیستم‌ها به‌طور خاص در اقلیم معتدل و مرطوب بر اساس پژوهش‌های انجام‌شده و نمونه‌های موردی می‌توان بیان نمود توجه وجود تهویه کافی در این اقلیم همواره از اولویت‌های طراحی بوده است [۲۷]. سیستم‌های مونودرفت امکان کنترل بهتر دما و رطوبت داخلی را فراهم می‌کند که درنتیجه آن فراهم آمدن شرایط آسایش است؛ بنابراین با تنظیم نرخ تهویه، دانش‌آموزان می‌توانند شرایط آسایش و یا شرایط نزدیک به آسایش را تجربه کنند [۳, ۲۵, ۲۸-۳۰]. دیگر مزیت این سیستم‌ها نحوه عملکرد آن‌ها است، این سیستم‌ها با اصول تهویه طبیعی کارکرده و می‌توانند وابستگی به سیستم‌های خنک‌کننده یا گرمایش مکانیکی را کمتر کرده و یا به حداقل برسانند [۳] و آلودگی‌های زیست محیطی را کاهش می‌دهند [۳۱]. اگرچه در ارتباط با توجیه بیشتر استفاده از این سیستم‌ها در اقلیم معتدل و مرطوب نیاز به مطالعات گسترده‌تری است [۲۶].

به‌طور خلاصه، استفاده از سیستم‌های مونودرفت برای کنترل تهویه طبیعی و سطوح CO_2 در فضاهای آموزشی با آب‌وهوای معتدل و مرطوب، مزایایی مانند بهبود کیفیت هوای داخل ساختمان، افزایش آسایش حرارتی، بهره‌وری انرژی، کاهش نویز، پایداری محیطی و فرصت‌های آموزشی را ارائه می‌دهد. با ایجاد یک محیط آموزشی سالم، راحت و پایدار، مؤسسات آموزشی می‌توانند از رفاه و عملکرد تحصیلی دانش آموزان و کارکنان به‌طور یکسان حمایت کنند.

۸- روش پژوهش

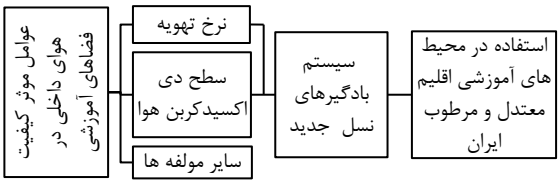
تلاش این پژوهش، بررسی و ارزیابی نتایج پژوهش‌های مرتبط با ایجاد تهویه طبیعی و سطح دی‌اکسید کربن هوا در محیط‌های آموزشی و سیستم بادگیرهای نسل جدید بوده است. این پژوهش به شیوه مروری است و جهت جمع‌آوری داده‌ها روش کتابخانه‌ای اتخاذشده است. در گام نهایی این مطالعه

1. The number of occupants in the room
2. The activity levels of occupants
3. The amount of time occupants spend in the room
4. The ventilation rate
5. Mechanical ventilation system (MVS)

به دنبال یافتن پاسخ این سؤال است که آیا می‌توان از سیستم‌های بادگیر نسل جدید در بهبود کیفیت هوای داخلی و کنترل سطح دی‌اکسید کربن هوا در کاربری آموزشی اقلیم معتدل و مرطوب ایران بهره برد ؟

روش دستیابی به پاسخ این سؤال اتکا به یافته‌های کمی پژوهش‌های دیگر در ارتباط با بهبود کیفیت هوای داخلی و کنترل سطح دی‌اکسید کربن هوا در کاربری آموزشی بوده و پس‌ازآن توسط نرم‌افزار مشاور انرژی[1]، مقایسه‌ای میان این آمار با شرایط اقلیم معتدل و مرطوب ایران انجام‌شده است تا کاربرد این سیستم‌ها با عملکردهای ثبت‌شده آن‌ها در این اقلیم نیز موردسنجش واقع گردد. در ادامه شرح کامل‌تری از فرایند انجام این پژوهش ارائه می‌گردد.

جمع‌آوری مطلب و تحلیل در این پژوهش در سه‌گام اصلی خلاصه می‌شود که هرکدام زیرمجموعه‌هایی دارند. در گام اول منابع مرتبط با سیستم‌های تهویه طبیعی، بادگیرهای نسل جدید و استفاده این سیستم‌های نوین در فضاهای آموزشی بررسی و ارزیابی شد. در گام دوم کاربرد این نوع سیستم‌ها در تهویه فضای مدارس مورد جمع‌بندی قرار گرفت و درنهایت در گام سوم، امکان استفاده از این سیستم‌ها در اقلیم معتدل و مرطوب ایران سنجیده شده است. جهت بررسی و امکان‌سنجی این سیستم‌ها در اقلیم موردنظر و بر اساس نقشه پهنه‌بندی اقلیمی ایران مطابق شکل ۳، جهت به دست آوردن میانگین بیشترین و کمترین سرعت باد در شهرهای گرگان، ساری و رشت، به ترتیب به‌عنوان مراکز استان‌های گلستان، مازندران و گیلان که در اقلیم موردبررسی واقع‌شده‌اند، از نرم‌افزار مشاور انرژی استفاده‌شده که داده‌های اولیه این نرم‌افزار با فرمت epw از ایستگاه‌های کلیماتولوژی دریافت شده است و جهت بررسی، تحلیل و مقایسه سرعت باد موجود در این شهرها از خروجی‌های نرم‌افزار کمک گرفته‌شده است. شکل ۲ چارچوب پژوهش را بیان نموده است.



شکل ۲ چارچوب پژوهش و روند بررسی مؤلفه‌های مشخص‌شده کیفیت هوای داخلی جهت بررسی سیستم بادگیرهای نسل جدید در فضای آموزشی اقلیم معتدل و مرطوب ایران

در گام نهایی جهت پاسخ به سؤال پژوهش با توجه به اطلاعات به‌دست‌آمده از ارزیابی مطالعات پیشین و نمونه‌های موردی مرتبط، ارزیابی‌های لازم در ارتباط با کمیت‌های مؤثر در دو بخش بهبود کیفیت هوای داخلی و کنترل سطح دی‌اکسید کربن فضاهای داخلی صورت گرفته است. پس‌ازآن با توجه به اطلاعات اقلیم‌شناسی مستخرج از ایستگاه‌های مرتبط و به دست آوردن میانگین سرعت باد مراکز استان‌های واقع در اقلیم معتدل و مرطوب، مقایسه وضعیت اقلیمی موجود با شرایط بهینه سیستم بادگیرهای نسل جدید صورت گرفته است.

جدول ۲ عملکرد شبیه‌سازی‌شده بادگیرهای نسل جدید با توجه به‌سرعت باد و فشار هوای داخلی [۱۴]

میانگین هوای داخلی (Pa)	میانگین سرعت گردش هوای داخلی (m/s)	نرخ تهویه تأمین‌شده (L/s.p)	سرعت باد بیرونی (m/s)
-۰.۱۲	۰.۱۹	۹.۰۰	۱
-۰.۶۱	۰.۴۰	۱۸.۳۳	۲.۰۰
-۱.۲۸	۰.۵۵	۲۷.۰۰	۳.۰۰
-۲.۴۱	۰.۸۱	۳۸.۳۳	۴.۰۰
-۳.۶۴	۰.۹۹	۴۸.۱۷	۵.۰۰

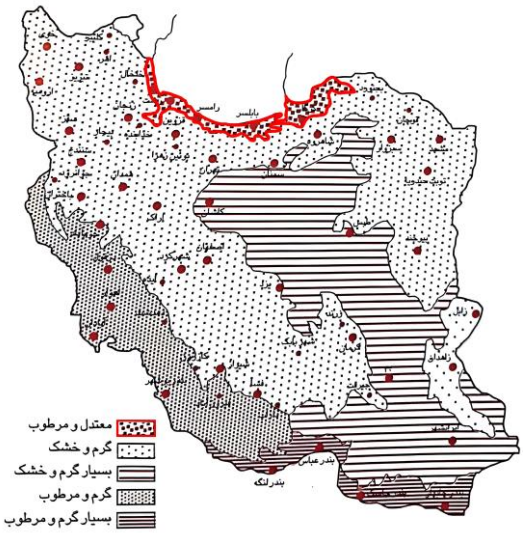
۸-۱- مقادیر استاندارد در بهبود نرخ تهویه طبیعی و کنترل سطح دی‌اکسید کربن هوا در فضاهای آموزشی

مقررات ساختمانی پیشنهاد می‌کند که حداقل نرخ تهویه هوا ۱۰ لیتر بر ثانیه به ازای هر نفر برای یک کلاس درس کوچک با ظرفیت پانزده نفر موردنیاز است [۳۲]. بادگیرهای نسل جدید این توصیه را برای سرعت باد خارجی ۱ متر بر ثانیه و کمتر برآورده نمی‌کند. بااین‌حال، همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده‌شده است، با افزایش سرعت باد خارجی (۲ متر بر ثانیه و بالاتر)، سیستم به‌طور تصاعدی از نرخ مشخص‌شده ۱۰ لیتر بر ثانیه پیشی می‌گیرد [۱۴].

۸-۲- محدوده مطالعاتی: اقلیم معتدل و مرطوب ایران

اقلیم معتدل و مرطوب یا سواحل جنوبی دریای خزر که به‌صورت نواری بین رشته‌کوه‌های البرز و دریای خزر محصور و از جلگه‌های پست تشکیل‌شده که با پیشروی به سمت شرق، رطوبت، بارندگی و اعتدال هوای آن کاهش می‌یابد.

در دسته‌بندی اقلیمی کوپن نوار شمالی ایران در دسته‌بندی کلی معتدل و زیرمجموعه نیمه گرمسیری و معتدل قرارگرفته است. بر این اساس شهرهای رشت، لاهیجان، بابلسر و گرگان در این منطقه قرار دارند [۳۳, ۳۴]. رطوبت زیاد هوا و اعتدال درجه حرارت از ویژگی‌های این اقلیم به شمار می‌رود [۲۷]. در شکل ۳ تقسیمات اقلیمی چهارگانه ایران با تأکید بر اقلیم معتدل و مرطوب مشخص‌شده است.



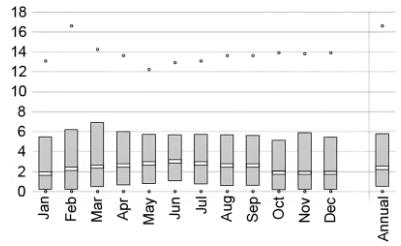
شکل ۳ تقسیمات اقلیمی ایران با تأکید بر اقلیم معتدل و مرطوب [۲۷]

با توجه به شکل ۳ و قرارگیری سه استان گلستان، مازندران و گیلان در این اقلیم، شهرهای گرگان، ساری و رشت به ترتیب به‌عنوان مراکز این استان‌ها موردبررسی قرارگرفته و داده‌های مربوط به میانگین بیشترین و کمترین سرعت باد در این شهرها توسط نرم‌افزار مشاور انرژی استخراج گردیده است (شکل‌های ۴ تا ۶).

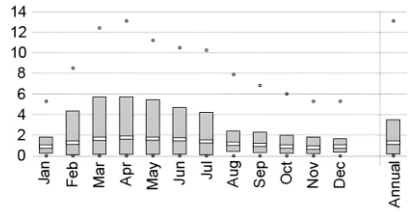
مشکل عمده در این مناطق، رطوبت زیاد هوا در تمام فصول سال است. ازاین‌رو، مهم‌ترین عامل ایجاد آسایش در ساختمان‌های این مناطق وجود تهویه

1. climate consultant

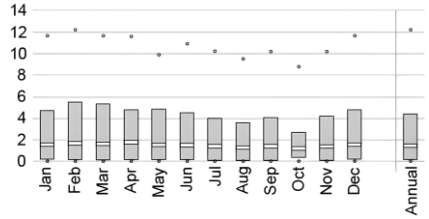
است؛ بنابراین، در طراحی ساختمان برای این مناطق باید مسئله ایجاد تهویه و ایجاد کوران هوا در داخل ساختمان مورد توجه خاصی قرار گیرد [۲۷].



شکل ۴ سرعت باد برحسب متر بر ثانیه شهر گرگان، خوانش سالانه در ۱۲ ماه



شکل ۵ سرعت باد برحسب متر بر ثانیه شهر ساری، خوانش سالانه در ۱۲ ماه



شکل ۶ سرعت باد برحسب متر بر ثانیه شهر رشت، خوانش سالانه در ۱۲ ماه

۹- یافته‌ها

۹-۱- امکان‌سنجی به‌کارگیری بادگیرهای نسل جدید در فضاهای آموزشی اقلیم معتدل و مرطوب ایران

در مرور ادبیات پژوهش، مشخصه‌ی دی‌اکسید کربن به‌عنوان یکی از عوامل تأثیرگذار در کیفیت هوای داخلی معرفی شد که کنترل سطح دی‌اکسید کربن به همراه توجه به وجود نرخ تهویه مناسب می‌تواند محیط مطلوبی را جهت ارائه آموزش و بهبود عملکرد دانش‌آموزان فراهم آورد.

از سوی دیگر لزوم توجه به طراحی پایدار و مصرف انرژی، خصوصاً در فضاهای عمومی همانند مدرسه، از اهمیت بالایی برخوردار است و استفاده از سیستم تهویه طبیعی می‌تواند تأثیر بسزایی در مصرف انرژی مدارس (فضاهای آموزشی) داشته باشد،

یافته‌های کمّی از دو شاخصه سطح استاندارد دی‌اکسید کربن هوا و نرخ تهویه مطلوب در یک فضای آموزشی در جدول ۲ مشخص‌شده است.

جدول ۲ نرخ مطلوب تهویه و میزان دی‌اکسید کربن هوا [۱۴, ۱۷, ۲۹]

نرخ تهویه (L/s.p)	سرعت باد مطلوب (m/s)	فشار هوای داخلی (Pa)	سطح CO_2 هوا (ppm)
حداقل ۸	۱	-۰.۱۲	کمتر از ۱۵۰۰
۱۰	۲	-۰.۱۲ تا -۰.۶۱	کمتر از ۱۰۰۰

در ارتباط با سیستم‌های بادگیر نسل جدید عملکرد این سیستم‌ها به دو مؤلفه‌ی فشار هوای داخلی و سرعت باد خارجی بستگی دارد. طبق جدول ۲ نتایج نشان داده است که این نوع بادگیرها در سرعت باد خارجی کمتر از ۱ متر بر ثانیه توانایی تأمین نرخ تهویه مطلوب را ندارد و نرخ تهویه پایین‌تر از ۸ لیتر بر ثانیه به ازای هر نفر است؛ اما در سرعت باد بالاتر از ۱ متر بر ثانیه می‌تواند نرخ تهویه مناسب را فراهم کند و حداقل نرخ ۸ لیتر بر ثانیه به ازای هر نفر در فضای داخلی فراهم می‌شود. نتایج نشان داده است که با افزایش سرعت باد و بالا رفتن نرخ تهویه طبیعی، فشار اتاق نیز پایین‌تر می‌رود و باعث ایجاد اختلاف فشار بیشتری بین فضای داخل و فضای خارجی می‌شود. درمجموع با توجه به مقادیر ذکرشده در حداقل‌ترین حالت ممکن و در صورت وزش باد خارجی با سرعت ۱ متر بر ثانیه می‌توان نرخ تهویه‌ای معادل ۸ لیتر بر ثانیه به ازای هر نفر و سطح کربن دی‌اکسید ppm ۱۵۰۰ را در فضای داخلی فراهم آورد. این مقادیر به‌عنوان مقادیر حداقلی در فضای داخلی کاربری‌های آموزشی مورد تائید سازمان بهداشت جهانی و استاندارد اروپا نیز است [۱۴, ۱۷, ۲۹].

نظر به اهمیت تهویه طبیعی در ساختمان‌های اقلیم معتدل و مرطوب ایران، امکان‌سنجی کاربرد این سیستم‌ها با توجه به مؤلفه‌های معرفی‌شده در عملکرد سیستم‌های بادگیر نسل جدید یعنی فشار هوای داخلی و سرعت باد خارجی انجام گرفت و میانگین بیشترین و میانگین کمترین سرعت باد در دوازده ماه سال در شهرهای گرگان، ساری و رشت به‌عنوان مراکز استان‌های واقع در اقلیم معتدل و مرطوب ایران مطالعه شد تا توانایی این سیستم‌ها ازنظر سرعت باد خارجی به تفکیک در هرماه مشخص شود. نتایج این بررسی در شکل ۴، شکل ۵ و شکل ۶ همچنین جدول‌های ۴ تا ۶ آورده شده است (نوشته‌های مشخص شده در جدامل ذکر شده، محدوده حداقلی است).

جدول ۳ وضعیت استان‌های موردبررسی در کمترین سرعت وزش باد در ۱۲ ماه

	دسامبر	نوامبر	اکتبر	سپتامبر	اوت	جولای	ژوئن	می	آوریل	مارس	فوریه	ژانویه
گرگان	۰.۵ m/s >	۰.۵ m/s >	۰.۵ m/s >	۰.۵ m/s ≈	۰.۵ m/s ≈	**۱ m/s ≥**	**۱ m/s ≈**	**۱ m/s ≥**	۰.۵ m/s ≥	۰.۵ m/s ≈	۰.۵ m/s >	۰.۵ m/s >
ساری	۰.۵ m/s ≥	۰.۵ m/s >	۰.۵ m/s >	۰.۵ m/s >	۰.۵ m/s ≈	۰.۵ m/s >	۰.۵ m/s >	۰.۵ m/s >	۰.۵ m/s >	۰.۵ m/s >	۰.۵ m/s >	۰.۵ m/s >
رشت	۰.۵ m/s >	۰.۵ m/s >	۰.۵ m/s >	۰.۵ m/s >	۰.۵ m/s >	۰.۵ m/s >	۰.۵ m/s >	۰.۵ m/s >	۰.۵ m/s >	۰.۵ m/s >	۰.۵ m/s >	۰.۵ m/s >

بر اساس جدول‌های ۴ تا ۶ و با توجه به کمترین سرعت باد خارجی ثبت‌شده در اقلیم معتدل و مرطوب ایران، در تمامی فصول امکان استفاده از

سیستم بادگیرهای نسل جدید فراهم ناست و جهت بهبود عملکرد آن‌ها نیاز به یک فن دمنده مطابق با شکل ۱۰، در ابتدای مسیر این بادگیرها است. در ارتباط با فشار هوای داخلی که یکی از مؤلفه‌های تأثیرگذار در ایجاد تهویه داخلی و رسیدن به نرخ تهویه مطلوب معرفی گردید، می‌توان با تعبیه بازشو (هایی) در فضای داخلی و استفاده از آن‌ها به‌ویژه در فصول گرم، اختلاف فشار مناسبی در فضای داخلی ایجاد نمود. به‌طورکلی در شکل ۷، شکل۸ و شکل ۹ و نیز داده‌های جدول ۲ و نیز جدول‌های ۴ تا ۶، بازه‌های زمانی مناسب جهت استفاده از بادگیرهای نسل جدید در اقلیم معتدل و مرطوب ایران جهت دستیابی به نرخ تهویه مناسب در فضاهای آموزشی و کنترل سطح دی‌اکسید کربن، ارائه‌شده است.

جدول ۴ وضعیت استان‌های موردبررسی در بیشترین سرعت وزش باد در ۱۲ ماه

	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
گرگان	≈ ۵/۵ m/s	< ۶ m/s	< ۶ m/s	< ۶ m/s	≈ ۵/۵ m/s	≈ ۵/۵ m/s	≈ ۵/۵ m/s	≈ ۵/۵ m/s	≈ ۵/۵ m/s	≈ ۵ m/s	≈ ۶ m/s	≈ ۵/۵ m/s
ساری	≥ ۲ m/s	< ۴ m/s	≈ ۵/۵ m/s	≈ ۵/۵ m/s	< ۵ m/s	≈ ۴/۵ m/s	≈ ۴ m/s	≈ ۲/۵ m/s	≈ ۲/۵ m/s	≈ ۲ m/s	≈ ۲ m/s	≈ ۲ m/s
رشت	< ۴/۵ m/s	< ۵/۵ m/s	< ۵/۵ m/s	< ۴/۵ m/s	< ۴/۵ m/s	≈ ۴/۵ m/s	≈ ۴ m/s	≈ ۳/۵ m/s	≈ ۴ m/s	≈ ۲/۵ m/s	< ۴ m/s	< ۳ m/s

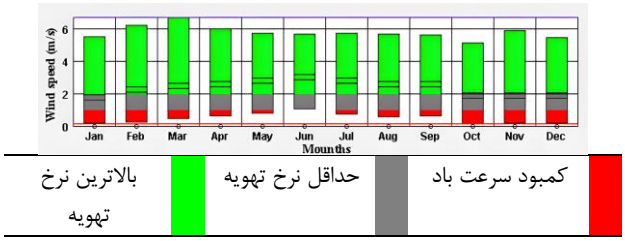
جدول ۵ وضعیت استان‌های موردبررسی با میانگین وزش باد در ۱۲ ماه

	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
گرگان	< ۲ m/s	< ۲ m/s	< ۲ m/s	< ۲ m/s	< ۲ m/s	≈ ۳ m/s	< ۲ m/s	< ۲ m/s	< ۲ m/s	< ۲ m/s	< ۲ m/s	< ۲ m/s
ساری	< ۱ m/s	> ۲ m/s	> ۲ m/s	> ۲ m/s	> ۲ m/s	> ۲ m/s	> ۲ m/s	> ۲ m/s	> ۲ m/s	< ۱ m/s	< ۱ m/s	< ۱ m/s
رشت	> ۲ m/s	> ۲ m/s	> ۲ m/s	> ۲ m/s	> ۲ m/s	> ۲ m/s	> ۲ m/s	> ۲ m/s	> ۲ m/s	> ۲ m/s	> ۲ m/s	> ۲ m/s

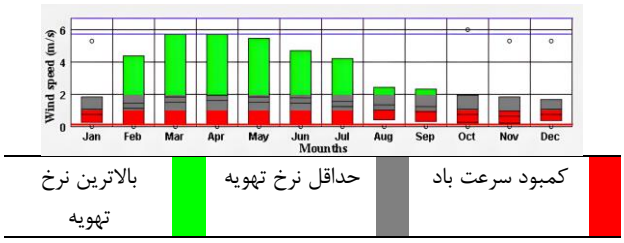
بر اساس جدول ۴، در ۳ ماه می، ژوئن و جولای (معادل نیمه اردیبهشت، خرداد، تیر و نیمه مرداد) امکان استفاده از سیستم بادگیرهای نسل جدید با احتمال عدم استفاده از فن دمنده در ابتدای مسیر (به دلیل نزدیک بودن سرعت باد خارجی به ۱ متر بر ثانیه) در شهر گرگان وجود دارد اما چنانچه بیان شد، با توجه به مقادیر ثبت‌شده احتمال استفاده از فن دمنده در ابتدای مسیر وجود دارد؛ همچنین مطابق با همین جدول که بر اساس کمترین سرعت وزش باد خارجی است، مشخص شد در ۹ ماه دیگر سال در شهر گرگان وجود فن دمنده در ابتدای مسیر الزامی است چراکه مقادیر ثبت‌شده پایین‌تر از حداقل سرعت باد است. در ۲ شهر ساری و رشت نیز در ۱۲ ماه سال نیاز به فن دمنده در ابتدای مسیر محسوس است.

در جدول ۵ که بر مبنای بیشترین سرعت باد در شهرهای موردبررسی است مشخص گردید که در صورت وجود بیشینه سرعت وزش باد، سیستم بادگیر نسل جدید می‌توانند در هر ۱۲ ماه سال به سهولت نرخ تهویه بیش‌تر از حداقل برای هر فرد را تامین و همچنین سطح کربن دی‌اکسید را تا حد بسیار بالایی در فضای داخلی کاهش دهند.

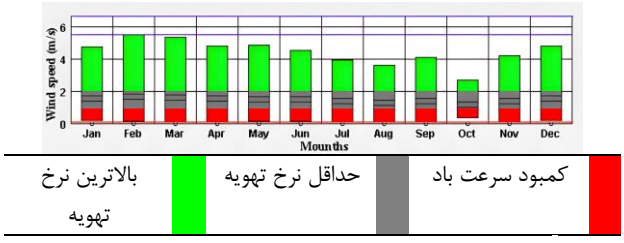
درنهایت با توجه به مقادیر میانگین سرعت وزش باد در ۳ شهر گرگان، ساری و رشت که در جدول ۶ بیان‌شده است، مشخص گردید که شهر گرگان و رشت در ۱۲ ماه سال توانایی استفاده از این سیستم را دارا است. شهر ساری در ۴ ماه اکتبر، نوامبر، دسامبر و ژانویه (معادل نیمه مهر، آبان، آذر، دی و نیمه بهمن) با احتمال نرسیدن سرعت باد به حداقل لازم برای رسیدن به نرخ تهویه و کنترل سطح کربن دی‌اکسید حداقل، به فن دمنده در ابتدای مسیر جهت رساندن سرعت باد به حداقل لازم را دارا است.



شکل ۷ محدوده‌های ایجادشده با توجه به‌سرعت باد برحسب متر بر ثانیه شهر گرگان، خوانش سالانه در ۱۲ ماه



شکل ۸ محدوده‌های ایجادشده با توجه به‌سرعت باد برحسب متر بر ثانیه شهر ساری، خوانش سالانه در ۱۲ ماه

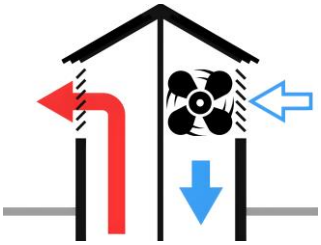


شکل ۹ محدوده‌های ایجادشده با توجه به‌سرعت باد برحسب متر بر ثانیه شهر رشت، خوانش سالانه در ۱۲ ماه

پژوهش دیگری که در اقلیم‌های مشابه نیز صورت گرفته است جهت بیشتر کردن سرعت باد، استفاده از جهت‌گیری بنا و توجه به زوایای طراحی‌شده برای کنترل ورودی باد غالب به بنا را پیشنهاد کرده است [۳۵] که این امر جهت

رسیدن به نتیجه مطلوب مستلزم دیدگاه طراحی پایدار در طراحی بنا است. همچنین استفاده از فن دمنده در ابتدای مسیر جهت بهبود سرعت باد ورودی و درنتیجه بهبود نرخ تهویه، در پژوهش‌های دیگر مورد تأکید قرارگرفته است و بر اساس مشاهدات تجربی، استفاده از فن دمنده در ابتدای مسیر در ابنیه غیرمسکونی سبب رضایت و استفاده بیشتر ساکنین از این نوع از سیستم‌های تهویه در بنا شده است [۳۶, ۳۷]. همچنین فن‌های مورد استفاده در ابتدای مسیر از نظر مصرف انرژی نیز در بهینه‌ترین حالت و کم مصرف‌ترین حالت ممکن طراحی و تعبیه می‌شوند [۳].

بصورت کلی مطابق مقادیر بدست آمده در شکل ۴، شکل ۵ و شکل ۶ همچنین جدول‌های ۴ تا ۶، در سه شهر موردبررسی، شهر گرگان بیشترین امکان استفاده از سیستم بادگیرهای نسل جدید را دارا است. شهر گرگان توانایی استفاده از این نوع سیستم را در دوازده ماه سال و در صورت وزش باد با سرعت بالاتر از ۱ متر بر ثانیه را دارد. البته چنانچه بیان شد، با توجه به داده‌های شکل ۷ وجود فن دمنده در ابتدای مسیر پیشنهاد می‌شود.



شکل ۱۰ دیاگرام قرارگیری فن در ابتدای میسر ورودی جهت افزایش سرعت باد

۱۰- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش کاربرد سیستم‌های بادگیر نسل جدید بر اساس دو مؤلفه کیفیت هوای داخلی (تهویه و سطح دی‌اکسید کربن) موردمطالعه قرار گرفت. بررسی‌های انجام‌شده و مرور نتایج پژوهش‌های مرتبط، نشان داد که سیستم‌های بادگیر نسل جدید که مزایای بسیاری ازجمله تهویه و کنترل سطح دی‌اکسید کربن هوای داخلی را در اختیار کاربران قرار می‌دهد، توانایی تأمین استانداردهای لازم در هر دو زمینه را دارد. با توجه به میانگین سرعت وزش باد در شهرهای مورد بررسی که عمدتا مقادیری مابین ۱ الی ۲ متر بر ثانیه هستند، مشخص گردید که این سیستم‌ها توانایی تامین نرخ تهویه استاندارد برای فضای داخلی آموزشی را دارا هستند؛ چراکه در استانداردهای مربوطه مشخص گردیده است که سرعت باد بیش از ۱ متر بر ثانیه توانایی تامین نرخ استاندارد حداقل ۸ لیتر در ثانیه به ازای هر نفر را به صورت طبیعی دارا است. با توجه به آمار ثبت شده در شهر ساری و موارد مطروحه جهت افزایش سرعت باد ورودی، وجود یک فن دمنده در ابتدای مسیر در این شهر و نیز گرگان و رشت پیشنهاد میگردد تا سرعت باد پایین‌تر ۱ متر بر ثانیه قرار نگیرد. وجود این فن دمنده می‌تواند چالش‌های ثبت شده را با توجه به مقادیر کمترین سرعت باد ثبت شده در سه شهر مورد بررسی پوشش دهد. یافته‌ها مشخص نموده‌اند که کمترین سرعت ثبت شده در این سه شهر بجز در سه ماه می، ژوئن و جولای معادل اواسط اردیبهشت الی اواسط شهریور، در شهر گرگان، کمتر از ۱ متر بر ثانیه بوده و توانایی تامین نرخ تهویه و کنترل سطح دی‌اکسید کربن هوا در فضای داخلی را ندارد؛ همچنین با توجه به یافته‌های میانگین سرعت باد در ۴ ماه اکتبر، نوامبر، دسامبر و ژانویه که معادل اوایل مهر ماه تا اواسط بهمن ماه است فن دمنده می‌تواند با قرارگیری در مدار، سرعت لازم جهت دستیابی به نرخ استاندارد را ایجاد کند. در سایر ماه های سال با توجه به میانگین سرعت باد ثبت شده این نرخ تهویه با بالا رفتن سرعت باد، بیشتر از ۸ لیتر بر ثانیه به ازای هر نفر خواهد بود.

در ارتباط با کنترل سطح دی‌اکسید کربن نیز با توجه به استاندارد مشخص شده از جانب سازمان بهداشت جهانی و استاندارد اروپا، سرعت باد بیش از ۱ متر بر ثانیه به صورت طبیعی توانایی کنترل سطح دی‌اکسید کربن در فضای داخلی را دارد. بنابر استانداردهای ثبت شده نرخ دی‌اکسید کربن در فضا با سرعت وزش باد ۱ متر بر ثانیه به کمتر از ۱۵۰۰ppm کاهش می‌یابد. چنانچه بیان شد، با توجه به نتایج میانگین سرعت وزش باد ثبت شده در شهرهای مورد بررسی، و قابلیت سیستم بادگیرهای نسل جدید، این سیستم‌ها توانایی کنترل سطح دی‌اکسید کربن فضای داخلی را دارا هستند و همانطور که بیان شد، وجود یک فن دمنده موجب می‌شود در صورت وجود کمترین سرعت باد ثبت شده در شهرهای مورد بررسی و ماه‌هایی که میانگین سرعت باد کمتر از مقدار مشخص شده جهت بکار گیری سیستم بادگیرهای نسل جدیدی در راستای تهویه و کنترل سطح دی‌اکسید کربن است، سرعت باد افزایش یافته و این سیستم‌ها عملکرد مورد قبولی داشته باشند.

در ارتباط با فن دمنده برخی پژوهش‌های پیشین نشان دادند که جهت رسیدن به بهترین نرخ تهویه توسط سیستم‌های بادگیر نسل جدید، سرعت باد بالاتر از ۱ متر بر ثانیه موردنیاز است که برای رفع این مشکل احتمالی در اقلیم‌های غیر برخوردار از مقدار فوق‌الذکر استفاده از فن دمنده در ابتدای مسیر این سیستم، جهت سرعت بخشیدن به جریان هوای ورودی پیشنهاد شده است تا سرعت باد ورودی را افزایش داد. علاوه بر مؤلفه سرعت باد خارجی، فشار هوای داخلی نیز تأثیر بسزایی در ایجاد تهویه در فضای داخلی داشته که می‌توان جهت کنترل این مؤلفه، بازشو (هایی) در فضای داخلی تعبیه نمود تا با باز کردن آن (ها) اختلاف فشار مناسب را فراهم آورد.

همچنین بر اساس یافته‌ها مشخص شد که استفاده از این سیستم در اقلیم معتدل و مرطوب ایران و مشخصاً در سه شهر گرگان، ساری و رشت به‌عنوان مراکز استان‌های واقع‌شده در این اقلیم، در اکثر ماه‌های سال با تعبیه یک فن دمنده در ابتدای مسیر جهت افزایش سرعت باد و در برخی ماه‌ها با توجه به میانگین وزش باد و کمترین سرعت وزش باد ثبت شده، امکان‌پذیر است؛ بنابراین فرضیه مطرح‌شده در این پژوهش در ارتباط با توانایی بهبود کیفیت هوای داخلی و کنترل سطح دی‌اکسید کربن هوا با استفاده از بادگیرهای نسل جدید به‌شرط قرارگیری یک فن دمنده در ابتدای مسیر مورد تائید قرار گرفت. در پژوهش‌های آتی عملکرد بادگیرهای نسل جدید در ارتباط با سایر مؤلفه‌های مربوط به کیفیت هوای داخلی و یا بازیابی گرمای ازدست‌رفته قابل‌بررسی خواهد بود تا دیدگاه جامع‌تری در ارتباط با این‌گونه سیستم‌ها در اقلیم معتدل و مرطوب ایران حاصل شود.

۱۱- فهرست علائم

L/s.p	نرخ تهویه (لیتر بر ثانیه به ازای هر نفر)
m/s	سرعت (متر بر ثانیه)
Pa	فشار (پاسکال)
ppm	غلظت گاز

۱۲- مراجع

[1] M. Mahmodi and s. m. m. shemirani, Iranian identity of wind catcher and its background in Iranian architecture, *Hoviyat Shahr,* Vol. 2, No. 2, pp. 25-33, 2012. (in Persian)

[2] Y. Su, S. B.Riffat, Y. L. Lin, and N. Khan, Experimental and CFD study of ventilation flow rate of a Monodraught™ windcatcher, *Energy and Buildings,* Vol. 40, No. 6, pp. 1110-1116, 2008.

[3] monodraught. *Natural ventilation,* Accessed 22 May 2022; Available: https://www.monodraught.com/products/natural-ventilation

[4] EUA, *DESIGN CONSIDERATIONS FOR K12 FACILITIES POST PANDEMIC*, United States, 2020.

[5] Cordongan_clark_group and Ittner_architecture, *COVID-19 SCHOOL DESIGN GUIDELINES*, United States2020.

[6] D. M. Saeed, W. F. Elkhatib, and A. M. Selim, Architecturally safe and healthy classrooms: eco-medical concept to achieve sustainability in light of COVID-19 global pandemic, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering,* Vol. 1, pp. 1-16, 2021.

[7] *BB 101: Guidelines on ventilation, thermal comfort, and indoor air quality in schools*, Accessed 22 May 2022; https://www.gov.uk/government/publications/building-bulletin-101-ventilation-for-school-buildings

[8] K. K. Kalimeri *et al.*, Indoor air quality investigation of the school environment and estimated health risks: Two-season measurements in primary schools in Kozani, Greece, *Atmospheric Pollution Research,* Vol. 7, No. 6, pp. 1128-1142, 2016.

[9] J. Fernández-Agüera, M. Á. Campano, S. Domínguez-Amarillo, I. Acosta, and J. J. Sendra, CO2 Concentration and Occupants' Symptoms in Naturally Ventilated Schools in Mediterranean Climate, *Buildings,* Vol. 9, No. 9, p. 197, 2019.

[10] J. K. Calautit, D. O'Connor, P. W. Tien, S. Wei, C. A. J. Pantua, and B. Hughes, Development of a natural ventilation windcatcher with passive heat recovery wheel for mild-cold climates: CFD and experimental analysis, *Renewable Energy,* Vol. 160, pp. 465-482, 2020.

[11] A. Aryan, Z. Ehsan, S. Amin, and K. Masoud, Wind catchers: Remarkable example of Iranian sustainable architecture, *Journal of sustainable development,* Vol. 3, No. 2, p. 89, 2010.

[12] A. Meiss, H. Jimeno-Merino, I. Poza-Casado, A. Llorente-Álvarez, and M. Á. Padilla-Marcos, Indoor Air Quality in Naturally Ventilated Classrooms. Lessons Learned from a Case Study in a COVID-19 Scenario, *Sustainability,* Vol. 13, No. 15, p. 8446, 2021.

[13] H. Montazeri, Experimental and numerical study on natural ventilation performance of various multi-opening wind catchers, *Building and Environment,* Vol. 46, No. 2, pp. 370-378, 2011.

[14] J. K. Calautit and B. R. Hughes, Wind tunnel and CFD study of the natural ventilation performance of a commercial multi-directional wind tower, *Building and Environment,* Vol. 80, pp. 71-83, 2014.

[15] M. Gil-Baez, J. Lizana, J. A. Becerra Villanueva, M. Molina-Huelva, A. Serrano-Jimenez, and R. Chacartegui, Natural ventilation in classrooms for healthy schools in the COVID era in Mediterranean climate, *Building and Environment,* Vol. 206, p. 108345, 2021.

[16] W. J. Fisk, The ventilation problem in schools: literature review, (in eng), *Indoor Air,* Vol. 27, No. 6, pp. 1039-1051, 2017.

[17] E. C. f. Standardization (CEN), EN 13779: *Ventilation for Non-Residential Buildings – Performance Requirements for Ventilation and Room- Conditioning Systems*, Brussels, Belgium 2007.

[18] ASHRAE, *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*, ANSI/ASHRAE Stand. 62.1-2010., Atlanta, USA 2010.

[19] R. M. S. F. Almeida and V. P. de Freitas, IEQ Assessment of Classrooms with an Optimized Demand Controlled Ventilation System, *Energy Procedia,* Vol. 78, pp. 3132-3137, 2015.

[20] P. Barrett, F. Davies, Y. Zhang, and L. Barrett, The impact of classroom design on pupils' learning: Final results of a holistic, multi-level analysis, *Building and Environment,* Vol. 89, pp. 118-133, 2015.

[21] O. Hänninen and U. Haverinen-Shaugnessy, *School environment: policies and current status*, 2015.

[22] J. Cavaleiro Rufo *et al.*, Indoor air quality and atopic sensitization in primary schools: A follow-up study, *Porto Biomedical Journal,* Vol. 1, No. 4, pp. 142-146, 2016.

[23] L. Schibuola, M. Scarpa, and C. Tambani, Natural Ventilation Level Assessment in a School Building by CO2 Concentration Measures, *Energy Procedia,* Vol. 101, pp. 257-264, 2016.

[24] R. M. S. F. Almeida and V. P. de Freitas, Indoor environmental quality of classrooms in Southern European climate, *Energy and Buildings,* Vol. 81, pp. 127-140, 2014.

[25] B. M. Jones and R. Kirby, The Performance of Natural Ventilation Windcatchers in Schools -A Comparison between Prediction and Measurement, *International Journal of Ventilation,* Vol. 9, No. 3, pp. 273-286, 2010.

[26] Y. V. Perez and I. G. Capeluto, Climatic considerations in school building design in the hot–humid climate for reducing energy consumption, *Applied Energy,* Vol. 86, No. 3, pp. 340-348, 2009.

[27] M. kasmai, *Climate & Architectural (Second Edition)*. Tehran: Khak publication, 2013. (in Persian)

[28] M. Alwetaishi and M. Gadi, Toward sustainable school building design: A case study in hot and humid climate, *Cogent Engineering,* Vol. 5, 2018.

[29] O. World Health, *Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19: World Health Organization*, 2021. [Online]. Accessed 22 May 2022; http://apps.who.int/iris/.

[30] N. Lechner, *Heating, cooling, lighting: Sustainable design methods for architects*. John wiley & sons, 2014.

[31] B. Jones and R. Kirby, The Performance of Natural Ventilation Windcatchers in Schools - A Comparison between Prediction and Measurement, *International Journal of Ventilation,* Vol. 9, pp. 273-286, 2010.

[32] Z. Zhang, W. Zhang, Z. Zhai, and Q. Chen, Evaluation of Various Turbulence Models in Predicting Airflow and Turbulence in Enclosed Environments by CFD: Part 2—Comparison with Experimental Data from Literature, *Hvac&r Research,* Vol. 13, pp. 871-886, 2007.

[33] U. Lohmann, R. Sausen, L. Bengtsson, U. Cubasch, J. Perlwitz, and E. Roeckner, The Köppen climate classification as a diagnostic tool for general circulation models, *Climate Research,* pp. 177-193, 1993.

[34] P. J. Guetter and J. E. Kutzbach, A modified Köppen classification applied to model simulations of glacial and interglacial climates, *Climatic change,* Vol. 16, No. 2, pp. 193-215, 1990.

[35] S. Selvaraj and T. Kesavaperumal, CFD simulations for examining natural ventilation in the learning spaces of an educational building with courtyards in Madurai, *Building Services Engineering Research and Technology,* Vol. 41, p. 014362441987879, 2019.

[36] D. Mongkolsawat, *Thermal Operating Practice in Mixed-Mode Buildings: Higher Education Case Study in a Hot-Humid Climate*, 2013.

[37] M. Fan, A. A. Jamaludin, and H. Hussein, *The Observation of Sensory Design in Open Spaces of University Campus under Hot-humid Climate*. 2020.