Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(3) (2021) 387-390
DOI: 10.22060/mej.2019.15459.6133

Tips on Application of Natural Ventilation in Prevalent Buildings in Iran

S. A. Mousavian[1], M. Maerefat[1*] , R. Madahian[1], B. M. Kari[2]

[1] Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
[2] Road, Housing & Urban Development Research Center, Tehran, Iran

ABSTRACT: Methods of using natural ventilation in the architecture of the buildings have been studied. Architectural elements such as: the atrium, the ceiling light aperture, the courtyard, the staircase, dome roof, duct of the installations, and vertical channels of the building such as channel of the elevator are widely used in Iranian buildings. Feasibility of using these elements for natural ventilation has been studied taking into account the relevant standards. Significant results of the study are the sizes of the openings suitable for each case of ventilation. For the ventilation based on vertical paths such as the installation duct or the atrium, the ratio of the path area to the opening to it should be 0.78 times of the hydraulic diameter of the path. The area of the opening of the room to outdoor should 1.5 times of the opening of the room to the path. For ventilation using the light ceiling aperture the area of the opening to outdoor is independent of building area and should be 1 m^2. In ventilation using duct and staircase the should be an opening on the doom roof with area equal to the area of the duct.

Review History:

Received: Dec. 19, 2018
Revised: Aug. 22, 2019
Accepted: Sep. 02, 2019
Available Online: Nov. 29, 2019

Keywords:

Natural ventilation
Traditional architecture
Iran
Staircase
Duct
Atrium

1. Introduction

Natural ventilation has been widely used in traditional ancient buildings in Iran in cities such as Yazd, Isfahan, and Kerman. Architectural elements such as Baadgir (wind catcher) and domed roofs are the well-known elements employed for natural ventilation. While in the modern buildings natural ventilation has been neglected and mechanical ventilation is used instead. In Iranian National Building Regulations Nos.14 & 19 [1,2] the required air for ventilation has been given. The authors have studied international building regulations on natural ventilation [3]. In reference [4] application of natural ventilation for buildings and design strategies & modeling methods have been reported.

In the present study ventilation performance of several architectural elements in prevalent buildings in Iran has been studied.

2. Methodology

The Loop Design Method (LDM) has been used for ventilation rate estimations in the present study. In the LDM the pressure drop is obtained as a function of air flow rate and geometrical specifications. The LDM has been explained in details in reference [4]. Equations of "Cross Ventilation", "Skylight Ventilation", "Mechanical Duct", "Vertical Channel", and "Combined Duct and Staircase" have been used for estimations of natural ventilation rates under several conditions.

Eqs. (1) to (4) shows an example of combining the ventilation duct and staircase. The wind pressure and static pressure are balanced with the pressure drop across the opening and air flow paths. Fig. 1 shows the schematic of a combined system.

$$\Delta p_w + \Delta p_s = \Delta p_{inl-2} + \Delta p_{st} + \Delta p_{inl-3} + \Delta p_{inl-4} + \Delta p_d + \Delta p_{ex} \tag{1}$$

$$\Delta p_w + \Delta p_s = \frac{\rho_o Q_{st}^2}{2C_d A_{inl-2}^2} + \frac{8fL_s \rho_o Q_{st}^2}{\pi^2 D_{h-st}^5} + \frac{\rho_o Q^2}{2C_d A_{inl-3}^2} + \frac{\rho_i Q^2}{2C_d A_{inl-4}^2} + \frac{8fL\rho_i Q_d^2}{\pi^2 D_{h-d}^5} + \frac{\rho_i Q_d^2}{2C_d A_{ex}^2} \tag{2}$$

$$\Delta p_s = (\rho_o - \rho_i) g \Delta z \tag{3}$$

$$\Delta p_w = (c_{p-inl2} - c_{p-ex}) \left(\frac{\rho U_{ref}^2}{2} \right) \tag{4}$$

3. Results

The main contributions of the present study are summarized as follows:

*Corresponding author's email: maerefat@modares.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

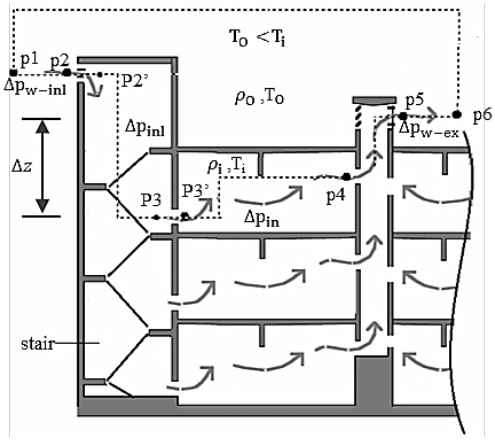


Fig. 1. Pressure drop in the combined system by duct and staircase

• The dome roof with a skylight is the best method for natural ventilation. This method is very suitable for one floor building or upper floor of a multi-floors building. According Fig. 2, the ventilation rate may be increased by 50% in windy climate. The inlets should be toward the incoming wind and the exhaust should be backward to the wind direction.

• The Mechanical Duct is a suitable device for ventilation of the floors which cannot be ventilated by skylights. A duct with square intersection of 0.6×0.6 m may induce ventilation rate about 0.3 $m^3.s^{-1}$.

• A combination of a duct with a staircase is shown in Fig. 1 may induce ventilation rate about 0.2 $m^3.s^{-1}$.

• Performance of an atrium depends on the size of the openings connected to it. At the best condition it may reach a flow rate of 3 $m^3.s^{-1}$. The effect of opening size on the flow rate of an atrium is shown in Fig. 3. It can be seen that for large hydraulic diameter of an atrium, the opening size affects the ventilation rate while this effect can be ignored for small hydraulic diameter of an atrium.

Table 1. Effect of natural ventilation induced by 5 K temperature difference on thermal load.

System	Ventilation Rate ($m^3.s^{-1}$)	Load (W)
Skylight	0.7	4300
Mechanical Duct	0.3	1800
Duct + Staircase	0.2	1200
Atrium	3	18000

• Effect of the natural ventilation rate on thermal loads (cooling or heating) depends on the ventilation rate induced by each system. The thermal loads due to the natural ventilation systems for temperature difference of 5 K are given in Table 1. It can be seen that the most effective element for natural ventilation is an atrium.

4. Conclusions

• Pass through ventilation is recommended in narrow buildings with small pressure drop in the direction of flow. The sizes of the openings at the inlet and outlet in this ventilation should be equal.

• Roof ventilation significantly dependent on architecture. The proposed area for the exit opening of a skylight in a house of 3 m height is 1 m^2 and independent of its base area. The skylight has its best performance in this exit opening area and the increase in area will not affect the ventilation rate.

• In ventilation with ducts and vertical passages, the area of the passage from the room to that pass shall be equal to the hydraulic diameter of that passage. In other words, the ratio of the cross-sectional of the passage to that passage should be about 0.78 hydraulic diameter of that passage. The area of the other openings, such as the room intake vent should be about 1.5 times the area of the opening of the room the duct.

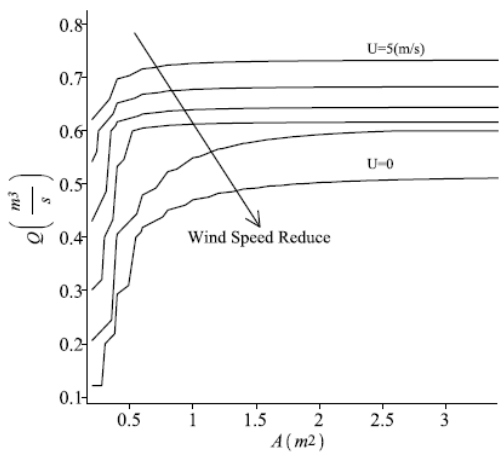


Fig. 2. The flow rate of patio vs. exhaust area for the different wind speeds in ceiling light (patio)

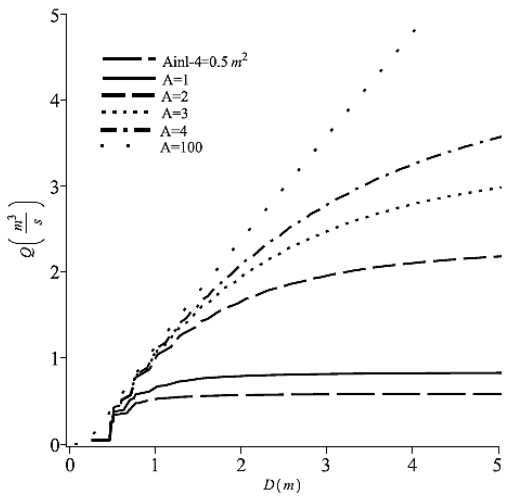


Fig. 3. The flow rate vs. the diameter of atrium for different inlet size to atrium

• In the staircase and duct ventilation system where the opening of the skylight at the dome roof acts as a wind catcher, the area of the opening of the dome roof should be about the duct cross sectional area. The opening area to living space should be 1.5 times of the duct area, and the opening on the ducts should have an area equal to the numerical value of the duct's hydraulic diameter. For example, in standard dimensions of duct (square with 0.6 m side), the opening the dome roof is about 0.4 m^2 and the opening on the duct is 0.6 m^2, and the opening of staircase and residential area 1 m^2.

• For an atrium, the proper dimensions of the openings are similar to those of vertical ducts.

References

[1] Department of Housing and Urban Development, The Fourteenth topic of national building regulations, Nashr Tose'e Iran, (2009), (in Persian).

[2] Department of Housing and Urban Development, The Nineteenth topic of national building regulations, (2009), (in Persian).

[3] S. Amir Mousavian. Mehdi Maerefat, Behruz Mohammad Kari, Investigation of natural ventilation in international standards, in HVAC conf-IRSHRAE-3, Civilica, Imam Khomeini International University, Iran, 1 March (2018), (in Persian).

[4] J.W. Axley, Application of Natural Ventilation for US Commercial Buildings: Climate Suitability Design Strategies & Methods Modeling Studies, Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, (2001).

HOW TO CITE THIS ARTICLE

S. A. Mousavian, M. Maerefat, R. Madahian, B. M. Kari, Tips on Application of Natural Ventilation in Prevalent Buildings in Iran, Amirkabir J. Mech Eng., 53(3) (2021) 387-390.

DOI: 10.22060/mej.2019.15459.6133

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ۳، سال ۱۴۰۰، صفحات ۱۶۲۱ تا ۱۶۳۶
DOI: 10.22060/mej.2019.15459.6133

نکات کاربردی در طراحی ساختمان‌های متداول در ایران با تکیه بر تهویه طبیعی

سیدامیرموسویان[۱]، مهدی معرفت*[۱]، رضا مداحیان[۱]، بهروز محمدکاری[۲]

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
۲- بخش انرژی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران ، ایران.

خلاصه: در این تحقیق راه‌های به‌کارگیری تهویه طبیعی در معماری متداول ساختمان‌ها مورد بررسی قرارگرفته است. در معماری متداول ایران عناصری همچون میان تالار، نورگیر سقفی، حیاط، انواع گذرگاه‌های عمودی شامل داکت تأسیساتی و کانال آسانسور، پارکینگ، راه‌پله و خرپشته به کار می‌رود و می‌تواند برای تهویه طبیعی به‌کار برده شود. تهویه با نورگیر سقفی، تهویه با گذرگاه‌های عمودی در ساختمان مانند آتریم و داکت، تهویه با ترکیب راه‌پله و داکت و تهویه عبوری مورد بررسی قرار گرفت. از نتایج مهم این تحقیق می‌توان به تعیین اندازه‌ی بازشوهای مناسب برای تهویه طبیعی در ساختمان اشاره کرد. در تهویه با گذرگاه‌های عمودی هوا مانند داکت تأسیساتی و آتریم، نسبت مساحت سطح مقطع گذرگاه به مساحت بازشو از اتاق به آن گذرگاه باید حدود ۰/۸۷ قطر هیدرولیکی آن گذرگاه باشد. علاوه بر این مساحت بازشوی اتاق به بیرون حدود ۱/۵ برابر مساحت بازشوی اتاق به گذرگاه در نظر گرفته شود. نتایج بررسی نشان داد که در شیوه‌ی تهویه با نورگیر سقفی حداکثر مساحت بازشوی خروجی مستقل از زیربنا و برابر با ۱ مترمربع در نظر گرفته شود. در شیوه‌ی تهویه از طریق ترکیب داکت و راه‌پله مساحت بازشوی قرارگرفته بر روی خرپشته برابر با مساحت سطح مقطع داکت در نظر گرفته شود.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۲۸
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۵/۳۱
پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۱۱
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۹/۰۸

کلمات کلیدی:
تهویه طبیعی
معماری متداول ایران
راه‌پله
داکت
میان تالار

۱- مقدمه

تهویه‌ی طبیعی به‌عنوان یک روش کارآمد و قدیمی، در معماری سازه‌های شهرهایی همچون یزد، اصفهان، کرمان و غیره مشهود است. هنر معماران ایرانی درگذشته، نمونه‌های مثال‌زدنی را در تهویه طبیعی با ابداع روش‌های خلاقانه همچون بادگیر، سقف گنبدی و غیره به جهانیان معرفی کرده است. الگوبرداری کشورهای دیگر از هنر معماری ایرانی در تهویه ساختمان‌ها و استفاده هر چه بیشتر آن‌ها از تهویه‌ی طبیعی و ایجاد استانداردهای جداگانه برای تهویه‌ی طبیعی نشان از کارآمد بودن این روش و همچنین بیانگر احترام این کشورها به طبیعت برای تولید هر چه کمتر آلاینده‌ها و همچنین حفظ منابع سوختی است. در این میان ایران، علاوه بر اینکه استفاده از عناصر معماری ساخته‌شده توسط پیشینیان خود را به فراموشی سپرده است. روزبه‌روز به سمت استفاده هر چه بیشتر از روش‌های تهویه‌ی اجباری با استفاده از تجهیزات مکانیکی همچون فن‌ها رفته است و معماری ناسازگار با تهویه طبیعی را پیاده‌سازی می‌کند. این امر در کنار الزامی بودن تهویه طبیعی در مقررات ملی ساختمان که در مبحث چهاردهم [۱] و نوزدهم [۲] به آن اشاره شده است، باعث شد تا بررسی تهویه طبیعی در معماری روز ایران در این تحقیق موردتوجه قرار گیرد تا بتواند نکات و توصیه‌هایی کاربردی و منطبق با معماری روز ایران داشته باشد.

معماری ساختمان‌های جدید در ایران از گذشته تا اکنون دستخوش تغییرات زیادی شده است. به‌طوری‌که با قاطعیت جز در موارد خاص و مطالعاتی دیگر عناصر قدیمی همچون بادگیر، سقف‌های گنبدی و غیره را نمی‌توان در سازه‌ها یافت. این عناصر که موضوع بررسی ما نیست به‌طور مفصل در کارهای گذشته مورد ارزیابی قرارگرفته‌اند برای مثال وکیلی نژاد و همکاران [۳] با جمع‌آوری این عناصر و تشریح اصول عملکرد آن‌ها در ایجاد سرمایش و گرمایش در معماری گذشته، سخن گفته‌اند. آنچه در غالب ساختمان‌های امروزی پدیدار شده‌اند شامل راه‌پله، خرپشته، میان تالار یا اتریم، حیاط‌خلوت یا پشتی، نورگیر سقفی یا پاسیو و کانال‌های عمودی مانند داکت‌های تأسیساتی، کانال آسانسور و پارکینگ است که هرکدام اغلب برای

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: maerefat@modares.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

هدف‌هایی مانند تأمین روشنایی و عبورومرور به وجود آمده‌اند و بحث تهویه در اولویت‌های بعدی بوده است.

در این تحقیق عملکرد عناصر معماری اجباری و اختیاری مناسب برای تهویه در ساختمان‌های جدیدالاحداث ایران بررسی شده است. در ابتدا برای بررسی عملکرد آن‌ها در زمینه‌ی تهویه، محدودیت‌های استانداردهای موجود و قوانین مربوطه موردمطالعه قرار گرفت. در این میان مبحث سوم مقررات ملی ساختمان ایران [۴] و انجمن ملی محافظت از آتش آمریکا [۵ و ۶] محدودیت مربوط به فشار مثبت بودن راه‌پله و کانال آسانسور و همچنین پیشنهاد برای وجود مکش در میان تالار را ارائه کرده‌اند. مرجع [۷] فهرستی از استانداردهای کشورهای مختلف را ارائه و میزان تأثیر این استانداردها بر روی استانداردهای جهانی را بررسی کرده است. در این میان می‌توان به استانداردهای امریکا [۸]، بریتانیا [۹] ، استرالیا [۱۰ و ۱۱]، هند [۱۲ و ۱۳] و چین [۱۴] اشاره کرد. نویسندگان مقاله‌ی حاضر در تحقیقی [۱۵] این استانداردها را به‌طور کامل موردبررسی قرار داده‌اند. در مورد آن‌ها می‌توان به این جمع‌بندی رسید که هرکدام کلیاتی در مورد تهویه بیان کرده‌اند و فقط در استاندارد بریتانیا و هند روابطی ساده برای تهویه ارائه شده است. استاندارد اشرِیْ آمریکا نیز روابطی برای میزان نفوذ و تهویه ارائه داده است. در آخر اینکه از هیچ‌کدام نمی‌توان به‌عنوان یک دستورالعمل در طراحی ساختمان سازگار با تهویه طبیعی استفاده کرد.

توجه‌ی عمده‌ی سایر پژوهشگران در نشان دادن کارآمد بودن تهویه‌ی طبیعی و مطالعه‌ی موردی با روش‌های عددی در این حوزه بوده است. به‌عنوان مثال بررسی جابجایی طبیعی و انتقال حرارت در محفظه‌ی بسته با مقطع مستطیلی توسط باومن [۱۶] و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی توانایی روش‌های عددی را در تخمین تهویه در محفظه‌ی بسته نشان داده است. در بررسی عددی دیگر جابجایی هوا در محفظه‌ی بسته با شار ثابت از جداره عمودی موردمطالعه قرارگرفته است و اثرات متغیرهای مختلف بر روی جابجایی آزاد هوا بررسی شده است و هدف از این مطالعه استفاده از یک مدل ساده برای نشان دادن قدرت تهویه‌ی طبیعی بوده است [۱۷]؛ اما ازآنجایی‌که هدف نویسندگان مقاله‌ی حاضر استفاده از روش‌های عددی و یا حل معادلات پیچیده نیست و همچنین این روش‌های عددی نمی‌تواند روشی مناسب برای محاسبات ساده و سریع در تهویه باشد به بررسی روش‌های دیگر پرداختند. برای مثال روش تحلیل حلقوی توسط اکسلی [۱۸] در طراحی ابتدایی تهویه طبیعی استفاده شده است و هم‌زمان با آن مقیمان و مرادی [۱۹] از همین روش استفاده کرده و روابطی را برای تهویه طبیعی ارائه کردند و به اعتبار سنجی این روش با روابط موجود برخی استانداردها پرداختند و بیان داشتند این روش علی‌رغم فرض‌های ساده کننده‌ای که در آن وجود دارد دارای دقت مطلوبی است. همچنین مؤلفین مقاله‌ی حاضر در تحقیقی دیگر [۲۰] از روابط ساده‌ی برنولی و با روش مشابه تحلیل حلقوی به تحلیل عملکرد سیستم سرمایش و گرمایش کانال زیرزمینی با دودکش خورشیدی پرداختند.

در ساختمان‌های جدید پارکینگ به‌عنوان یک جزء مهم و اجباری شناخته می‌شود. تهویه‌ی پارکینگ‌ها برای خارج کردن آلاینده‌های ناشی از احتراق و برای جلوگیری از ورود این آلاینده‌ها به سایر نقاط ساختمان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به همین دلیل گروه تحقیقاتی مقاله‌ی حاضر در مجموعه تحقیقات خود درگذشته به‌طور کامل به بررسی پارکینگ‌ها و تهویه‌ی آن در ساختمان‌های امروزی پرداخته‌اند ازجمله مطالعات ایشان بررسی موقعیت دریچه خروجی هوا در پارکینگ‌ها [۲۱] و ارائه راه‌کار کاهش آلودگی در پارکینگ [۲۲] است. ازآنجایی‌که هدف از این تحقیق بررسی تهویه ساختمان مسکونی برای آسایش ساکنین است سایر عناصر معماری به‌جز پارکینگ موردبررسی قرارگرفته است.

آنچه در این مقاله به‌صورت ویژه به آن توجه شده است و آن را نمی‌توان در کارهای دیگر یافت، بررسی معماری مرسوم در ایران است. هدف اصلی بررسی عملکرد ساختمان‌هایی است که به‌صورت انبوه در ساخت‌وسازها دیده می‌شود و به‌طور گسترده جایگزین معماری قدیمی متناسب با اقلیم در ایران شده است. در کارهای دیگر ساختمان باهدف تهویه طراحی‌شده و برای رسیدن به هدف مطلوب معماری خاص معرفی شده است؛ اما واقعیت آن است که معماری ساختمان‌ها در ایران از پذیرش طرح‌های جدید که باعث ایجاد هزینه اضافی می‌شود، بیگانه است برای مثال اضافه کردن دیوار ترومب[1] و یا اختصاص دادن فضایی برای انواع دودکش‌های خورشیدی. در این مقاله عملکرد ساختمان با معماری متداول بدون تغییر در آن برای برقراری جریان هوا و بیان نکاتی برای بهبود تهویه آن بیان شده است

1 Trombe wall

تا معماران و طراحان با توجه به برخی نکات خاص، طراحی را بهبود بخشیده و ساختمانی سازگارتر با تهویه طبیعی برای برقراری شرایط آسایش و بهبود کیفیت هوا برای ساکنین طراحی کنند.

پس از طراحی ساختمان منطبق با تهویه طبیعی اقدامات تکمیلی برای افزایش عملکرد آن و همچنین شناخت مشکلات پیشرو امری ضروری است. یک چالش اصلی در تهویه‌ی طبیعی هماهنگی سیستم تهویه طبیعی با دستگاه‌های تهویه مطبوع است. عدم هماهنگی بازشوها و دستگاه تهویه مطبوع در ساختمان‌ها یکی از منابع هدر رفت انرژی محسوب می‌شود. چِن و همکاران [۲۳] در آخرین مطالعات خود استفاده از سامانه‌های کنترلی را در ساختمان‌های دارای تهویه طبیعی پیشنهاد دادند. این کنترل‌ها در سه وضعیت به‌صورت کنترل هوشمند بر اساس آسایش حرارتی، کنترل دستی بر اساس آموزش به ساکنین و کنترل بر اساس یک مدار منطقی و محاسبه‌گر بر پایه پیش‌بینی مصرف انرژی انجام شد. بررسی آن‌ها در اقلیم‌های مختلف با شرایط دمایی متفاوت در چین بوده است. بررسی آن‌ها نشان داد که کنترل هوشمند بهترین عملکرد را دارد. کنترل دستی توسط ساکنین شرایط نارضایتی و عدم آسایش بیشتری به دنبال داشته است و در مواردی باعث اتلاف انرژی شده است. در تحقیق آن‌ها نشان داده شده است که توسعه‌دهندگان و صاحبان ساختمان نباید فقط هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و تعمیر و نگهداری این سامانه‌ها را در نظر بگیرند و اگر صرفه‌جویی انرژی سالانه و رضایت اشخاص را نیز در نظرگیرند به‌طور کامل پتانسیل تهویه طبیعی را درک می‌کنند. طبق این تحقیق، استفاده از کنترلرها برای پی بردن به پتانسیل کامل تهویه طبیعی امری ضروری و مکمل است. کاستِلو و همکاران [۲۴] درگاه‌های خروجی هوا بر روی پشت‌بام که تهویه طبیعی را ایجاد می‌کنند موردمطالعه قرار دادند. آنان با روش‌های عددی و حل معادلات ناویراستوکس و رینولدز عملکرد این درگاه‌های انتقال هوا را شبیه‌سازی و با نتایج آزمایشگاهی اعتبار سنجی کردند. مدل آن‌ها فقط بر اساس نیروی پیشران باد بوده و از اثرات نیروهای شناوری صرف‌نظر کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که درگاه‌های انتقال هوای چهار طرفه عملکرد بهتری را نسبت به سایر درگاه‌ها داشته است. همچنین در انتخاب نوع پیکربندی این درگاه‌ها علاوه بر دانستن تعداد دفعات تهویه[1] به نرخ سرعت هوا در فضای مورد تهویه نیز، باید توجه داشت.

کاستانزو و همکاران [۲۵] در مطالعه‌ی موردی خود به مشکل تهویه‌ی طبیعی در مناطق شهری با هوای آلوده پرداختند. آپارتمان معمولی واقع در یوژانگ کشور چین به‌صورت عددی و میدانی و با ثبت داده‌ها به‌صورت ساعت‌به‌ساعت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که تعداد دفعات تهویه متناسب با جهت‌گیری مناسب بازشوها در نمای ساختمان بین ۸ تا ۱۵ متفاوت خواهد بود. همچنین بر اساس کاهش زمان باز بودن پنجره‌ها به خاطر آلودگی هوا، پتانسیل تهویه طبیعی از حداکثر مقدار خود در آن منطقه با مقدار ۴۲۳۴ ساعت در سال به مقدار ۲۷۰۷ تا ۵۲۹ ساعت در سال به دلیل آلودگی کاهش می‌یابد. پتانسیل تهویه‌ی طبیعی در دو شهر دهلی‌نو و جده پور از هندوستان توسط پاتِل و همکاران [۲۶] مورد ارزیابی قرار گرفت. دو عامل باد و شناوری در یک ساختمان کم ارتفاع با یک مدل تحلیلی موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تهویه طبیعی در تعدادی از ماه‌های سال آسایش حرارتی را به دنبال دارد اما برای رسیدن به آسایش حرارتی با تهویه‌ی طبیعی در تمامی زمان‌ها باید از یک روش فعال و یا یک روش غیرفعال پیچیده و ترکیبی استفاده کرد. انتظار می‌رود برای تکمیل طرح‌های تهویه متناسب با معماری مرسوم در ایران محققان چالش‌های مشابه موارد بیان‌شده را در کارهای خود موردتوجه قرار دهند.

۲- روش حل

روش تحلیل حلقوی[2] برای تحلیل عملکرد مدل‌های ارائه‌شده انتخاب شده است این روش که بر پایه معادلات حلقه فشار بناشده است یک روش متداول در تعیین ابعاد اجزای سیستم تهویه است، تعیین اندازه اجزای سیستم تهویه که در نرم‌افزارهایی مانند کانتم[3] یا کامیز[4] نیز استفاده می‌شود بر پایه همین روش طراحی حلقه است. این روش که یک روش ساده بر پایه فشار است بدین‌صورت است که یک مسیر بسته از جریان هوا از ورودی تا خروجی دنبال شده و دوباره به نقطه‌ی ورودی بازمی‌گردد، این روش همچنین امکان تعیین ابعاد مستقیم اجزایی که جریان از آن‌ها عبور می‌کند را می‌دهد [۱۸].

افت فشار حاصل از بازشوها و اجزای مختلف انتقال جریان، تابعی از دبی عبوری از آن مقطع و برخی پارامترهای دیگر است.

1 ACH

2 Loop Method Design

3 CONTAM

4 COMIS

روابطی نیمه تجربی و تئوری مختلفی برای مدل‌سازی ریاضی این اجزا در استانداردها بیان شده است که می‌تواند درب، پنجره، ترک‌ها، مجراهای عبوری هوا در سازه‌ها و غیره را مدل‌سازی ریاضی کند، ازجمله روابط رایج، رابطه‌ی قانون توانی، سطح نشتی مؤثر، اوریفیس و داکت در شبیه‌سازی اجزای ساختمان است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

۲-۱: رابطه‌ی قانون توانی[1]

در مدل توانی که به‌صورت رابطه (۱) بیان می‌شود، اختلاف فشار با دبی با دو پارامتر، یکی بی‌بعد با نماد n و دیگری با نماد C ($m^3/s.Pa^{-n}$) مرتبط می‌شود، مقدار n با توجه به منطق حاکم بر مسئله ۰/۱ یا ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود، مقدار C از طریق آزمایش تعیین می‌شود که معمولاً در استانداردها برای بازشوهای مختلف قابل‌دسترسی است [۱۸].

$$\Delta p = \frac{Q^{1/n}}{C^{1/n}} \quad (۱)$$

رابطه (۲) بین سطح مقطع و مقدار ضریب C پیشنهاد شده است [۱۸].

$$A = 10000\frac{C}{C_d}\sqrt{\frac{\rho}{2}}\Delta p_r^{n-0.5} \quad (۲)$$

۲-۲: رابطه‌ی سطح نشتی مؤثر[2]

مدل سطح نشتی مؤثر بر پایه‌ی روابط کلاسیک اوریفیس بناشده است، این رابطه رفتار جریان برای گذر از یک مقطع را با چگالی هوا و سطح نشتی مؤثر، مرتبط می‌کند، از این رابطه معمولاً برای مدل‌سازی ریاضی ترک‌ها، درزهای بین درب و پنجره و غیره استفاده می‌شود [۱۸].

$$\Delta p = \frac{\rho Q^2}{2A_{eff}^2} \quad (۳)$$

۲-۳: رابطه‌ی اوریفیس[3]

مدل اوریفیس همان مدل اوریفیس کلاسیک است که با ضریبی به نام ضریب تخلیه[4] که به‌صورت تجربی تعیین می‌شود برای اجزای مختلف کالیبره شده است، این مدل می‌تواند برای در پنجره و غیره استفاده شود [۱۸].

$$\Delta p = \frac{\rho Q^2}{2C_d A^2} \quad (۴)$$

۲-۳: رابطه‌ی داکت[5]

این مدل برای کانال‌های انتقال هوا استفاده می‌شود، ضریب اصطکاک معمولاً بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۵ است. برای کانال‌های غیر دایره‌ای باید قطر هیدرولیکی آن محاسبه شود [۱۸].

$$\Delta p = f\frac{L}{2}\frac{\rho Q^2}{D_h A^2} \quad (۵)$$

۳-شیوه‌های تهویه طبیعی

تهویه‌ی طبیعی برای چند حالت بررسی شد، حالت‌های بررسی‌شده شامل تهویه عبوری، تهویه‌ی دودکشی با نورگیر سقفی و همچنین با مجاری عبور عمودی هوا در ساختمان شامل داکت تأسیساتی، آتریم، حیاط و راه‌پله است.

۳-۱:تهویه‌ی عبوری

شکل ۱ شماتیک ساده از یک ناحیه‌ای را که در معرض باد قرار گرفته است، نشان می‌دهد. ناحیه‌ی در مقابل باد با فشار مثبت و ناحیه‌ی پشت به باد در فشار کمتر (فشار منفی) خواهد بود. این اختلاف فشار باعث ایجاد جریان در ناحیه‌ی موردنظر خواهد شد. خط جریانی که از ورودی تا خروجی خواهد بود را در نظر بگیرید. هوا با شرایط در بی‌نهایت p1 به ساختمان نزدیک شده و از آن‌طرف به شرایط اولیه‌ی خود p6 واقع در بی‌نهایت تخلیه می‌شود. جریان با

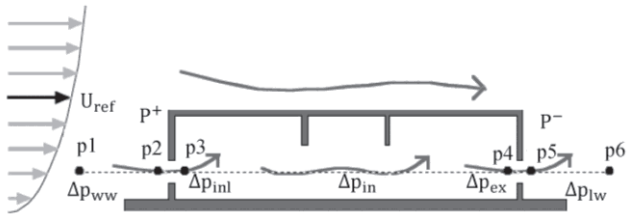


Fig. 1. Pressure drop in cross ventilation

شکل ۱: افت فشارها در تهویه‌ی عبوری

1 Power Law Component
2 Effective Leakage Area Component
3 Orifice
4 Discharge Coefficient
5 Duct

اختلاف فشار ایجادشده ناشی از باد به وجود آمده و افت فشارهای ناشی از بازشو ورودی، افت فشار داخلی و افت فشار بازشو خروجی از آن می‌کاهد. ناحیه‌ی فشار مثبت مقابل و ناحیه‌ی فشار منفی پشت به باد درواقع اختلاف فشار آن نقاط نسبت به فشار محیط در جریان آزاد است که هرکدام به‌صورت رابطه‌های (۶-ب) و (۶-ج) تعریف می‌شود. این اختلاف فشارها به‌شدت تحت تأثیر زمان است. با توجه به شکل ساختمان و دیگر عوامل محیطی، سرعت باد بازمان تغییر می‌کند بنابراین از سرعت مرجع که میانگین این سرعت‌ها در شرایط مختلف است، استفاده می‌شود. معمولاً (نه همیشه) این سرعت مرجع متوسط زمانی سرعت باد در ارتفاع ساختمان است. تأثیر شکل ساختمان در این اختلاف فشار با ضریب ثابت در نظر گرفته شده است که این ضریب برای سمت بادخیز مثبت و برای سمت پشت به باد منفی است. اختلاف فشار ناشی از باد به‌صورت رابطه (۶-د) تعریف می‌شود.

طبق خط جریان رسم شده در شکل ۱ رابطه (۶-الف) نوشته می‌شود.

$$p6-p1=\Delta p_{ww}-\Delta p_{inl}-\Delta p_{in}-\Delta p_{ex}-\Delta p_{lw}=0 \qquad \text{(۶-الف)}$$

برای ناحیه‌ی روبه باد و پشت به باد رابطه‌های (۶-ب) و (۶-ج) تعریف می‌شود [۱۸].

$$\Delta p_{ww}=c_{p-ww}\left(\frac{\rho U_{ref}^2}{2}\right) \qquad \text{(۶- ب)}$$

$$\Delta p_{lw}=c_{p-lw}\left(\frac{\rho U_{ref}^2}{2}\right) \qquad \text{(۶-ج)}$$

اختلاف فشار پیشران باد به‌صورت رابطه (۶-د) تعریف می‌شود.

$$\Delta p_{w}=(c_{p-ww}-c_{p-lw})\left(\frac{\rho U_{ref}^2}{2}\right) \qquad \text{(۶-د)}$$

با جایگذاری رابطه‌های (۶-ب) تا (۶-د) در رابطه (۶-الف)، رابطه (۷-الف) به‌دست می‌آید که نشان می‌دهد مجموع افت فشار اجزای مختلف برابر با اختلاف فشار ناشی از باد است.

$$\Delta p_{w}=\Delta p_{inl}+\Delta p_{in}+\Delta p_{ex} \qquad \text{(۷-الف)}$$

با استفاده از رابطه (۴) متناسب با نوع بازشو، رابطه (۷-ب) به دست می‌آید. از افت فشار داخلی صرف‌نظر شده است.

$$(c_{p-ww}-c_{p-lw})\left(\frac{\rho U_{ref}^2}{2}\right)=\frac{\rho Q^2}{2C_d A_{inl}{}^2}+\frac{\rho Q^2}{2C_d A_{ex}{}^2} \qquad \text{(۷-ب)}$$

۳-۲: نورگیر سقفی

این نوع تهویه زمانی انجام خواهد شد که دمای هوای داخل از دمای هوای بیرون بیشتر باشد. برقرار بودن این شرایط در هر ساعت از شبانه‌روز و در هر فصل از سال این نوع تهویه را فراهم می‌کند. تهویه‌ی شبانه در تابستان می‌تواند بهترین کاربرد این مدل تهویه باشد [۲۶]. تهویه با نورگیر سقفی با اثر دودکشی و بر اساس نیروی شناوری صورت می‌گیرد. شکل ۲ عوامل پیشران و افت فشارهای حاکم بر مسئله را نشان می‌دهد. در حلقه‌ی رسم شده درحرکت به سمت پایین فشار زیاد شده و با علامت مثبت وارد معادله می‌شود و درحرکت به سمت بالا از فشار کم شده و تأثیر آن با علامت منفی خواهد بود. معادلات حاکم بر مسئله به‌صورت رابطه (۸-الف) نوشته می‌شود.

$$-\Delta p_{inl}-\Delta p_{in}-\rho_i g\Delta z-\Delta p_{ex}+\rho_o g\Delta z=0 \qquad \text{(۸-الف)}$$

برای نوشتن این رابطه از نقطه‌ی p۱ حرکت کرده و بر روی حلقه‌ی رسم شده از مسیر داخل ساختمان دوباره به همان نقطه بازمی‌گردیم در این میان افت فشارهای داخلی و بازشوها با علامت منفی وارد معادله می‌شود.

فشار پیشران حاصل از نیروی شناوری به‌صورت رابطه (۸-ب) تعریف می‌شود.

$$\Delta p_s=(\rho_o-\rho_i)g\Delta z \qquad \text{(۸-ب)}$$

با جایگذاری رابطه (۸-ب) در رابطه (۸-الف)، رابطه (۹-الف) به‌دست می‌آید که نشان می‌دهد مجموع افت فشار اجزای مختلف برابر با اختلاف فشار ناشی از شناوری است.

$$\Delta p_s=\Delta p_{inl}+\Delta p_{in}+\Delta p_{ex} \qquad \text{(۹-الف)}$$

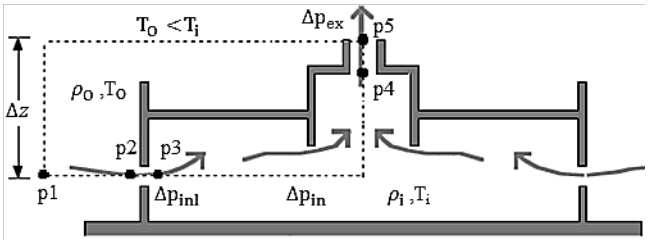


Fig. 2. Pressure drop in ceiling light (patio)

شکل ۲: افت فشار در نورگیر سقفی

با استفاده از رابطه‌های (۱) و (۴) متناسب با نوع بازشو، رابطه (۹-ب) به دست می‌آید از افت فشار داخلی صرف‌نظر شده است.

$$(\rho_0-\rho_i)g\Delta z=\left(\frac{Q}{C_{inl}}\right)^{1/n}+\frac{\rho Q^2}{2C_dA^2} \qquad (۹\text{-ب})$$

۳-۳: داکت تأسیساتی

شکل ۳ استفاده از یک کانال عمودی مانند داکت تأسیساتی را برای تهویه نشان می‌دهد. در این مدل داکت به‌صورت یک گذرگاه دایروی با قطر هیدرولیکی معادل در نظر گرفته شده است. دبی عبوری از داکت با توجه به تعداد بازشوها و تعداد طبقات متصل به داکت تعیین می‌شود. رابطه (۱۰) رابطه‌ی افت فشار مجموعه با نیروهای پیشران باد و شناوری را نشان می‌دهد.

در مسیر جریان هوای مشخص‌شده در شکل ۳ می‌توان به‌طور مستقیم نوشت، (مجموع افت فشار اجزای مختلف) = (اختلاف فشار ناشی از باد و شناوری).

$$\Delta p_w+\Delta p_s=\Delta p_{inl-2}+\Delta p_{in}+\Delta p_{inl-4}+\Delta p_d+\Delta p_{ex} \qquad (۱۰\text{-الف})$$

$$\Delta p_w+\Delta p_s=\frac{\rho_oQ^2}{2C_dA_{inl-2}^2}+\frac{\rho_iQ^2}{2C_dA_{inl-4}^2}+\frac{8fL\rho_iQ_d^2}{\pi^2D_h^5}+\frac{\rho_iQ_d^2}{2C_dA_{ex}^2} \qquad (۱۰\text{-ب})$$

اختلاف فشار شناوری و باد به‌صورت رابطه‌های (۱۰-ج) و (۱۰-د) تعریف می‌شود.

$$\Delta p_s=(\rho_o-\rho_i)g\Delta z \qquad (۱۰\text{-ج})$$

$$\Delta p_w=(c_{p-inl2}-c_{p-ex})\left(\frac{\rho U_{ref}^2}{2}\right) \qquad (۱۰\text{-د})$$

۳-۴: راه‌پله و داکت

طراحی بر اساس چند المان، روشی برای دست‌یابی به توزیع هوای متنوع‌تر در محیط است. برای فضاهایی که این المان‌ها در نقاط مختلف قرار گرفته‌اند با توزیع دبی هوا بین این المان‌ها می‌توان جریان با توزیع مکانی مناسب‌تری را ایجاد کرد. به‌طور مثال شکل ۴ طراحی بر اساس داکت و راه‌پله را نشان می‌دهد. در این روش می‌توان قسمتی از هوای ورودی را از طریق بازشوهای مستقیم به بیرون و قسمتی از هوا را به‌وسیله‌ی راه‌پله فراهم کرد. از مزیت‌های این روش توجه به محدودیت‌های اعمال‌شده توسط استانداردهای کنترل دود و آتش مبنی بر فشار مثبت بودن راه‌پله [۶] و همچنین رفع مشکلات مربوط به ورود بو و آلاینده‌ها از پارکینگ به درون راه‌پله اشاره کرد. در این مدل راه‌پله به‌صورت یک بادگیر عمل کرده و با توجه به قرارگیری خرپشته در بالاترین قسمت ساختمان به‌عنوان ورودی هوا امکان دستیابی به سرعت‌های بالای باد بدون مانع خارجی برای استفاده بیشتر از نیروی پیشران باد فراهم است.

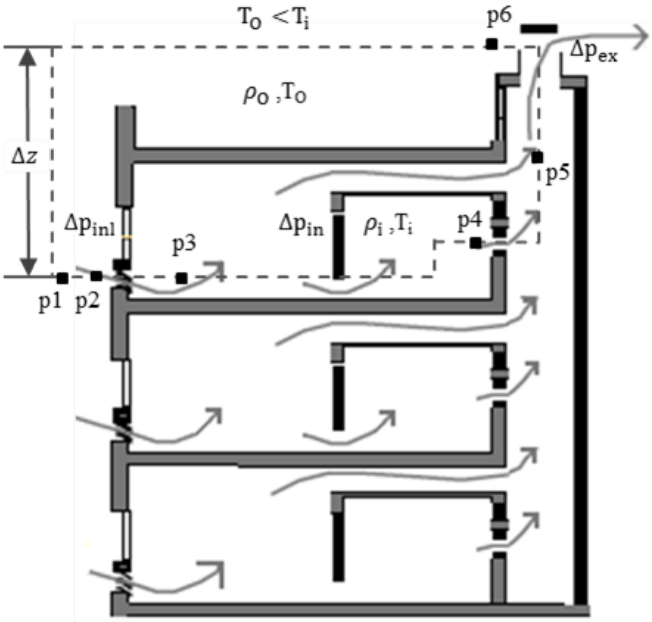


Fig. 3. Pressure drop in the mechanical duct and vertical channels of building

شکل ۳: افت فشار در داکت تأسیساتی و کانال‌های عمودی ساختمان

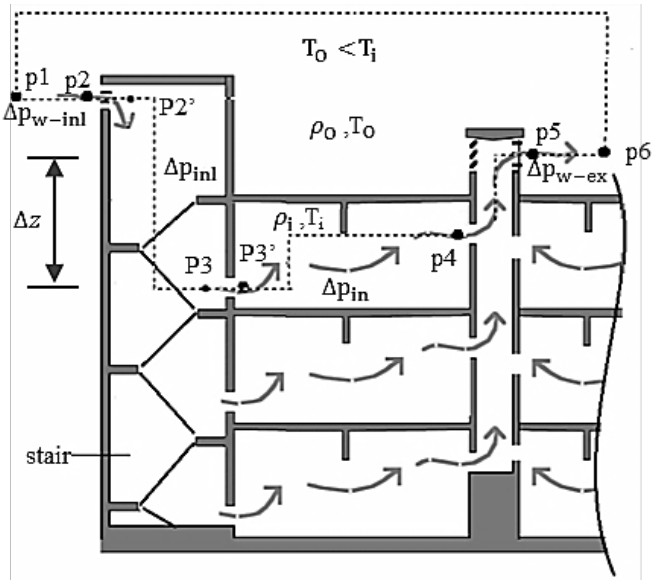


Fig. 4. Pressure drop in the combined system by duct and staircase

شکل ۴: افت فشار در سامانه‌ی ترکیبی داکت و راه‌پله

روابط حاکم به‌صورت رابطه (۱۱) نوشته می‌شود.

$$\Delta p_w + \Delta p_s = \Delta p_{inl-2} + \Delta p_{st} + \Delta p_{inl-3} + \Delta p_{inl-4} + \Delta p_d + \Delta p_{ex} \quad \text{(۱۱- الف)}$$

$$\Delta p_w + \Delta p_s = \frac{\rho_o Q_{st}^2}{2C_d A_{inl-2}^2} + \frac{8fL_s \rho_o Q_{st}^2}{\pi^2 D_{h-st}^5} + \frac{\rho_o Q^2}{2C_d A_{inl-3}^2} + \frac{\rho_i Q^2}{2C_d A_{inl-4}^2} + \frac{8fL\rho_i Q_d^2}{\pi^2 D_{h-d}^5} + \frac{\rho_i Q_d^2}{2C_d A_{ex}^2} \quad \text{(۱۱-ب)}$$

$$\Delta p_s = (\rho_o - \rho_i) g \Delta z \quad \text{(۱۱- ج)}$$

$$\Delta p_w = (c_{p-inl2} - c_{p-ex}) \left(\frac{\rho U_{ref}^2}{2} \right) \quad \text{(۱۱-د)}$$

۳-۵: میان تالار

اضافه شدن میان تالار به‌عنوان یک المان دلخواه و سلیقه‌ای به نقشه‌ی معماری در صورت طراحی مناسب می‌تواند کمک‌کننده‌ی تهویه باشد. میان تالار بهتر است به‌گونه‌ای طراحی شود که همراه فشار منفی باشد [۵] و به‌عنوان خروجی هوا تلقی شود. این قسمت از ساختمان در ایران به صورت‌های مختلف وجود دارد. حیاط‌های خلوتی که در گوشه‌ای از بنا برای تأمین نور اتاق‌های پشتی تعبیه می‌شوند هم به‌نوعی میان تالار محسوب می‌شوند. این حیاط‌خلوت با توجه به ساختار آن می‌تواند تهویه‌ی عبوری و یا تهویه دودکشی را ایجاد کند. تفاوت شرایط بین نقطه‌ی ۴ و ۵ در شکل ۵ می‌تواند نوع تهویه را از نوع عبوری به تهویه با گذرگاه عمودی تغییر دهد. درصورتی‌که شرایط نقطه‌ی ۴ و ۵ متفاوت بود آنگاه می‌توان از نتایج تحلیل میان تالار استفاده کرد و در غیر این صورت از مدل تهویه عبوری که در قسمت ۳-۱ بیان شد، باید استفاده شود.

رابطه (۱۲) حلقه‌ی فشار رسم شده برای میان تالار را به‌صورت ریاضی مدل می‌کند.

$$\Delta p_w + \Delta p_s = \Delta p_{inl-2} + \Delta p_{inl-4} + \Delta p_{at} + \Delta p_{ex} \quad \text{(۱۲-الف)}$$

$$\Delta p_w + \Delta p_s = \frac{\rho_o Q^2}{2C_d A_{inl-2}^2} + \frac{\rho_i Q^2}{2C_d A_{inl-4}^2} + \frac{8fL\rho_i Q_{at}^2}{\pi^2 D_{h-at}^5} + \frac{\rho_i Q_{at}^2}{2C_d A_{ex}^2} \quad \text{(۱۲-ب)}$$

$$\Delta p_w = (c_{p-inl2} - c_{p-ex}) \left(\frac{\rho U_{ref}^2}{2} \right) \quad \text{(۱۲-ج)}$$

$$\Delta p_s = (\rho_o - \rho_i) g \Delta z \quad \text{(۱۲-د)}$$

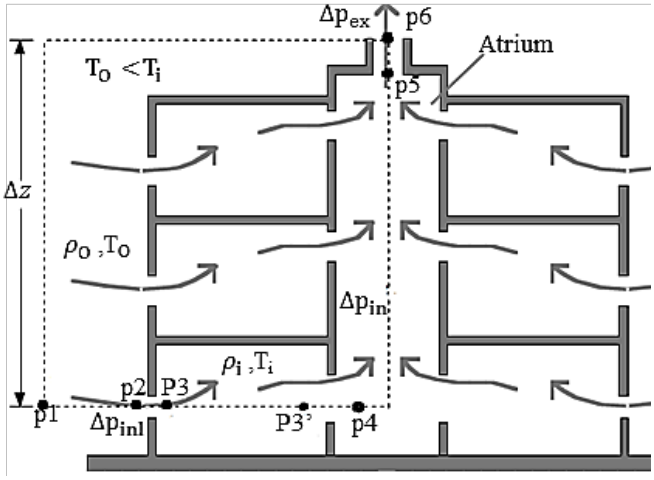


Fig. 5. Pressure drop in ventilation by atrium

شکل ۵: افت فشار در تهویه با میان تالار

۴-کاربرد و ارزیابی نتایج محاسباتی

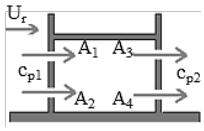
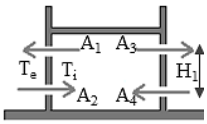
برای ارزیابی روش تحلیل حلقوی بیان‌شده در قسمت ۲، از روابط موجود در استانداردهای بریتانیا و اشرِی استفاده شده است. روابط ارائه‌شده در جدول ۱ مربوط به استاندارد بریتانیا [۹] و رابطه (۱۳) برای استاندارد اشرِی [۸] است. اعتبارسنجی در پیش‌بینی تعداد دفعات تعویض هوا برای یک فضا به حجم ۳۰۰ مترمکعب تنظیم شده است. ثابت‌ها برای یک ساختمان سه‌طبقه طبق استاندارد اشری و نقطه‌ی خنثی فشار بر روی سقف طبقه‌ی آخر در نظر گرفته شده است. دمای بیرون و داخل به ترتیب ۲۵ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد است. برای روش تحلیل حلقوی یک مسیر جریان به مشابه تهویه‌ی عبوری برای مقایسه با رابطه (۱۴) و یک حلقه بسته به مشابه نورگیر سقفی برای مقایسه با رابطه‌های (۱۳) و (۱۵) استفاده شده است. رابطه ارائه‌شده در استاندارد اشرِی [۸] به شرح زیر است.

$$Q(\tfrac{m^3}{s}) = C_D A \sqrt{2g\Delta H_{NPL}(T_i - T_O)/T_i} \quad \text{(۱۳)}$$

شکل‌های ۶(الف) و ۶(ب) مقایسه نتایج روش تحلیل حلقوی با استاندارد اشری و بریتانیا را نشان می‌دهد. نتایج در این روش به نتایج تجربی استانداردها نزدیک بوده و پاسخ‌هایی مابین پیش‌بینی روابط دو استاندارد می‌دهد. با توجه به اینکه دو استاندارد در مسئله مشابه، خود دارای اختلاف در نتایج هستند بنابراین پاسخ روش تحلیل حلقوی در ارائه خروجی مابین نتایج این دو استاندارد نشان از معتبر بودن این روش دارد که پیش‌تر نیز توسط سایر محققان مورد ارزیابی

جدول ۱: روابط پیشنهادی استاندارد بریتانیا برای تهویه‌ی طبیعی [۹]

Table 1. Equations for natural ventilation in British standard [9]

رابطه	شماتیک
$Q_W = C_d A_w U_r (\Delta C_p)^{1/2}$ $\frac{1}{A_W^2} = \frac{1}{(A_1+A_2)^2} + \frac{1}{(A_3+A_4)^2}$ (۱۴)	
$Q_B = C_d A_b \left(\frac{2\Delta T g H_1}{\bar{T}}\right)^{\frac{1}{2}}$ $\frac{1}{A_b^2} = \frac{1}{(A_1+A_2)^2} + \frac{1}{(A_3+A_4)^2}$ (۱۵)	

قرار گرفته است [۱۹].

۵- نتایج

استخراج نتایج از روابط می‌تواند با دو دیدگاه انجام شود که در غالب فلوچارت در شکل ۷ بیان شده است. محاسبات و رسم نمودارها با نرم‌افزار میپل صورت گرفته است. مقادیر ثابت در محاسبات به صورت جدول ۲ در نظر گرفته شده است.

۵-۱: تهویه عبوری

تهویه‌ی عبوری فقط با نیروی پیشران باد میسر است که طبق رابطه (۶) با صرف‌نظر از افت فشار داخلی و با فرض برابر بودن ضریب تخلیه برای دو بازشو، مساحت بازشوی ورودی و خروجی باهم برابر به دست می‌آید. در ساختمان‌های باریک که افت فشار داخلی کم است این روش تهویه کارآمد است اما با زیاد شدن عرض ساختمان با افزایش افت فشار داخلی تعادل بین دو طرف معادله از بین رفته و تهویه صورت نمی‌گیرد.

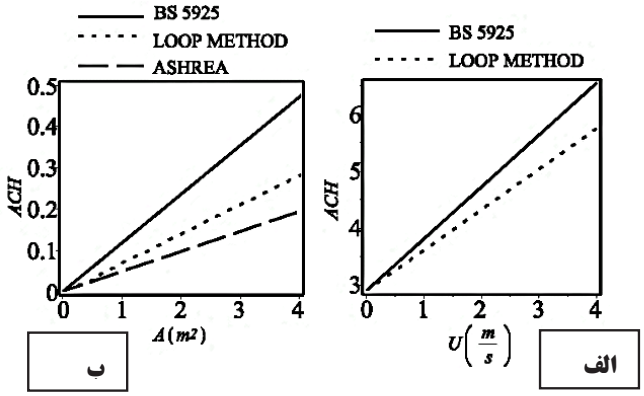


Fig. 6. Comparison of the results of the loop method with british and ASHRAE standards

شکل ۶ . مقایسه نتایج روش تحلیل حلقوی با استانداردهای بریتانیا و اشری

۵-۲: نورگیر سقفی

بررسی نورگیر سقفی در دو حالت انجام شد. حالت اول بررسی ابعادی بازشوها برای رسیدن به دبی دلخواه و حالت دوم بررسی نورگیرها با اندازه‌ی مرسوم و برآورد میزان تأثیر آن‌ها در مقدار تهویه است. شکل ۸ بر اساس فرض تأمین ۱۰ بار تعویض هوا برای ۱۰۰ مترمربع زیربنا با ارتفاع سقف ۳ متر تهیه شده است. این شکل حد بالا و پایین اندازه بازشوها را مشخص می‌کند. برای رسیدن به این میزان تهویه در حضور باد با اندازه‌ی ۴ متر بر ثانیه، اندازه‌ی بازشو در نورگیر باید بیشتر از ۰/۳ مترمربع و مقدار C باید از ۰/۷ (معادل ۱/۵ مترمربع بازشو) بیشتر باشد. این در حالی است که در مناطق با شدت باد کم، مساحت بازشو باید تا ۴ برابر و مقدار C برای بازشو تا ۰/۸ (معادل ۱/۷ مترمربع بازشو) افزایش پیدا کند. مقدار C از رابطه (۲) به مساحت تبدیل می‌شود. دلیل این امر را نیز با مراجعه به سمت چپ معادله مربوطه می‌توان توضیح داد. آنجا که مقدار اختلاف فشار پیشران باد صفر می‌شود و برای برقراری معادله در سمت راست مساحت با توان ۲ در مخرج باید افزایشی پیدا کند.

جدول ۲: مقادیر ثابت و ورودی‌ها در روابط استخراج‌شده

Table 2. Constant values and inputs in the extracted equations

چگالی هوای داخل	چگالی هوای بیرون	قطر هیدرولیکی داکت	قطر هیدرولیکی راه پله	طول راه پله	اختلاف ارتفاع	ضریب اصطحکاک	ضریب تخلیه	گرانش	ضریب فشار خروجی	ضریب فشار ورودی
ρ_i	ρ_o	D_{h-d}	D_{h-st}	L_{St}	Δz	f	C_d	g	C_{p-ex}	C_{p-inl}
۱/۱۶	۱/۱۸	۰/۶	۱/۷	۲ Δz	۳	۰/۰۴	۰/۶	۹/۸	-۰/۵	۰/۳

Fig. 7. Schematic of the computational steps to derive the results

شکل ۷: شمای کلی از مراحل محاسباتی برای استخراج نتایج

شکل ۹ عملکرد یک نورگیر سقفی که اختلاف ارتفاع ورودی و خروجی هوا در آن ۳ متر است را نشان می‌دهد. تغییرات دبی برای نورگیر با در نظر گرفتن ضریب گذردهی ۰/۶ برای ورودی‌ها، برحسب مساحت بازشوی خروجی رسم شده است. با دقت در این شکل می‌توان گفت که تأثیر سرعت باد و کمک گرفتن از باد در طراحی ساختمان برای تهویه تا ۶۰ درصد عملکرد را بهبود می‌بخشد. افزایش مساحت نورگیر تا مقدار معینی بر تهویه تأثیر می‌گذارد و افزایش مساحت بازشوهای ورودی نمی‌تواند تأثیری بر تهویه داشته باشد و این افزایش باید در تعادل با مساحت خروجی هوا باشد.

در این مدل فرض شده است که هوای ورودی از منافذ و بازشوها با ضریب گذردهی ۰/۶ که یک مقدار متداول و بدبینانه برای ضریب گذردهی است وارد ساختمان شود. بررسی مساحت درگاه خروجی

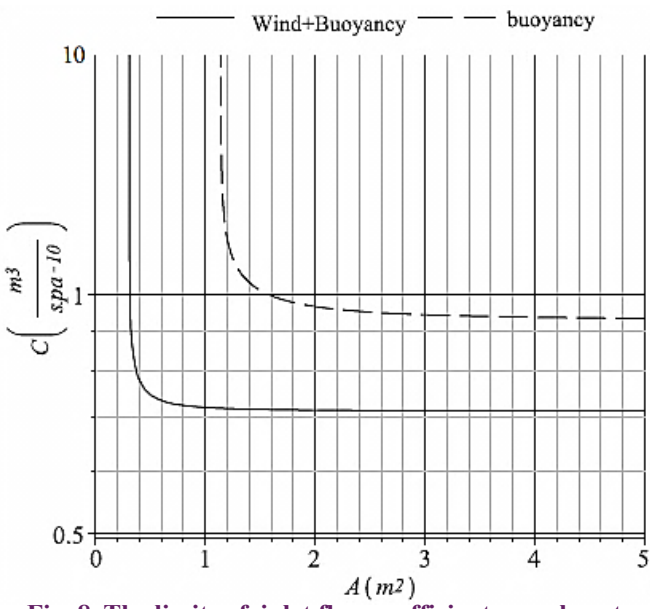


Fig. 8. The limits of inlet flow coefficient vs. exhaust [opening area for ceiling light (patio)[9

شکل ۸: حدهای مساحت بازشوی خروجی برحسب ضریب گذردهی هوا در ورودی برای نورگیر سقفی

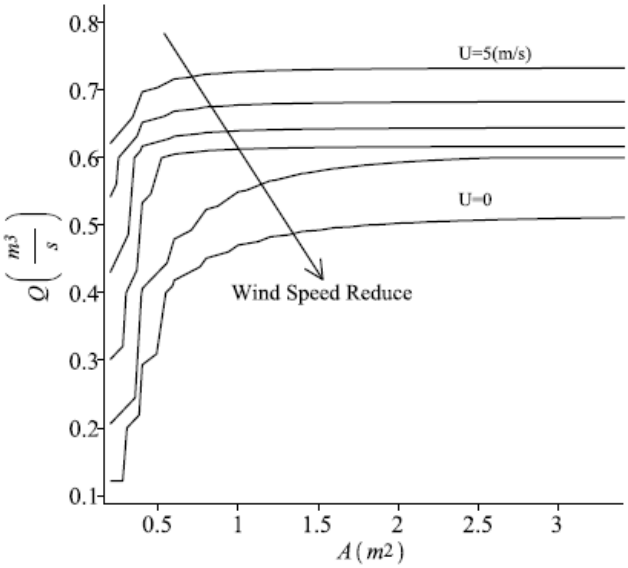


Fig. 9. The flow rate of patio vs. exhaust area for the dif-(ferent wind speeds in ceiling light (patio

شکل ۹: دبی هوای عبوری از نورگیر سقفی برحسب مساحت بازشوی قرارگرفته بر روی آن در سرعت‌های مختلف باد.

نورگیر به ما نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن مساحت ۱ مترمربع برای خروجی در هر سرعتی از باد دبی تهویه ثابت می‌ماند.

۵-۳: داکت (کانال)

شکل ۱۰ بررسی عملکرد داکت‌های تأسیساتی بر روی تهویه را نشان می‌دهد. حداقل ابعاد پیشنهادی برای داکت در برخی منابع مربع به ضلع ۶/ ۰متر است [۲۷]. با فرض مساحت خروجی برابر با سطح مقطع داکت، تأثیر مساحت ورودی‌های هوا شامل بازشو به داکت و بازشو به اتاق بر دبی بررسی شده است. حد نهایی تأثیر ابعاد بر دبی برای هرکدام از بازشوها در شکل مشخص است و بدین معنا است که افزایش مساحت بازشوها تا حدی بر دبی تأثیر می‌گذارند و داکت در بهترین عملکرد خود در حدود ۰/۴ مترمکعب بر ثانیه دبی عبور خواهد داد. این دبی در ابعاد معقول برای بازشو به داکت که در حدود حداکثر ۰/۵ مترمربع است، حداکثر ۰/۳ مترمکعب بر ثانیه است. با بررسی نمودارها می‌توان گفت عملکرد بهینه‌ی داکت برای انجام تهویه زمانی است که بازشوهای ورودی به داکت ابعادی نزدیک به قطر هیدرولیکی آن داکت داشته باشند. به‌عنوان‌مثال در داکت‌های استاندارد مساحت بازشو به آن‌ها برابر ۰/۶ مترمربع باشد.

شکل ۱۱ تأثیر بازشوی خروجی بر دبی کانال را نشان می‌دهد.

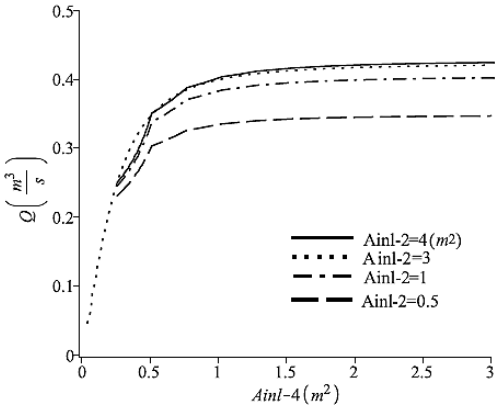


Fig. 10. The effect of inlets size on duct flow rate
شکل ۱۰: تأثیر اندازه مساحت بازشوهای ورودی بر دبی داکت

استفاده از درگاه‌های خروجی می‌تواند دبی خروجی از داکت را کاهش دهد؛ بنابراین توصیه می‌شود مساحت درگاه خروجی داکت با مساحت خود داکت برابر باشد.

۵-۴: ترکیب داکت و راه‌پله

شکل ۱۲ تأثیر اندازه‌ی مساحت ورودی هوا بر روی خرپشته را بر دبی، برحسب مقادیر مختلف اندازه‌ی بازشو به اتاق نشان می‌دهد. سایر پارامترها برای داکت و بازشوهای مربوط به داکت به‌صورت مقادیر مرسوم که شامل داکت مربعی شکل به ابعاد ۰/۶ متر و بازشو مربعی به ابعاد ۰/۳ متر است. این بررسی همچنین تأثیر ارتفاع بر روی دبی را بیان می‌کند. هنگامی‌که سطح بازشو به اتاق (A۳) کم باشد، اختلاف ارتفاع اختلاف دبی بیشتری را سبب می‌شود به عبارتی اگر سطح بازشو به اتاق در طبقه‌ی اول و هفتم برابر باشد. طبقه‌ی اول دبی بیشتری را از خود عبور می‌دهد؛ اما هنگامی‌که مساحت بازشو به اتاق بیشتر می‌شود اختلاف ارتفاع تأثیر کمتری را بر روی اختلاف دبی می‌گذارد. نکته‌ی قابل‌توجه دیگر وجود یک مساحت خاص برای ورودی هوا در خرپشته است که طبقه‌ی اول و هفتم دبی برابر را از خود عبور می‌دهند و افزایش و یا کاهش مساحت نسبت به آن نقطه تعادل در دبی را بر هم می‌زند. دلیل وجود چنین مساحتی را می‌توان به دلیل برابر شدن مجموع افت فشار ناشی از راه‌پله و داکت در هفت‌طبقه با شناوری ناشی از این اختلاف ارتفاع بیان کرد؛ بنابراین در طراحی این مدل از تهویه پیشنهاد می‌شود که مساحت بازشوی ورودی هوا از خرپشته حداقل برابر با سطح مقطع داکت در نظر گرفته شود. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشخص است در نزدیکی سطح مقطع داکت که برابر ۰/۳۶ مترمربع است، دبی عبوری از طبقات مختلف باهم برابر است و باعث توزیع یکنواخت هوا در طبقات مختلف می‌شود. این در صورتی امکان‌پذیر است که بازشوهای ارتباطی فضای مسکونی به راه‌پله به‌اندازه کافی بزرگ (حداقل برابر با بازشو خرپشته) در نظر گرفته شود.

۵-۵: میان تالار

شکل ۱۳ یک میان تالار را در حالتی که تمام مساحت بالایی خروجی باشد را نشان می‌دهد. حد تأثیر مساحت برای بازشوهای ورودی به آتریم در نمودار مشخص شده است به‌طوری‌که از مساحت

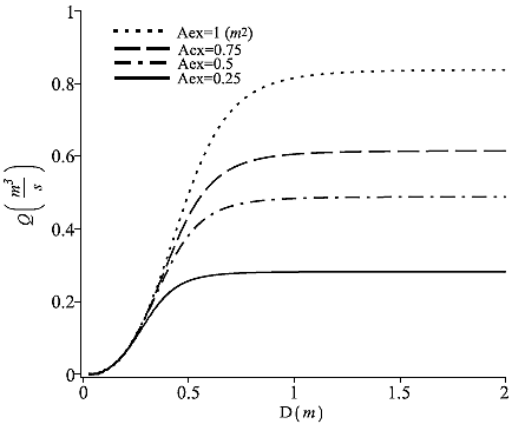


Fig. 11. The flow rate of duct vs. the diameter of it for the different exhaust area
شکل ۱۱: دبی هوا عبوری از داکت برحسب قطر آن در مساحت‌های مختلف خروجی.

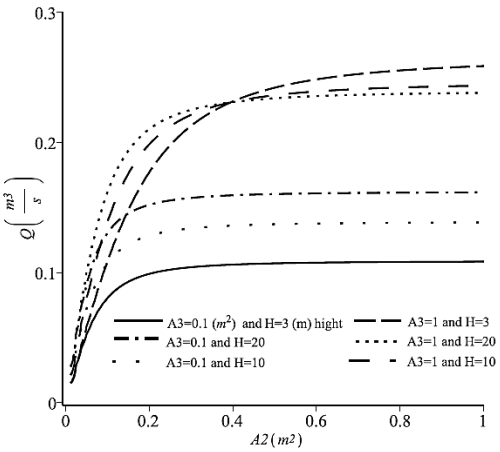


Fig. 12. The effect of inlet size on staircase vs. flow rate .for the different inlet size to zone and building height
شکل ۱۲: تأثیر اندازه‌ی بازشو بر روی خرپشته بر دبی برحسب بازشو به اتاق برای طبقات مختلف

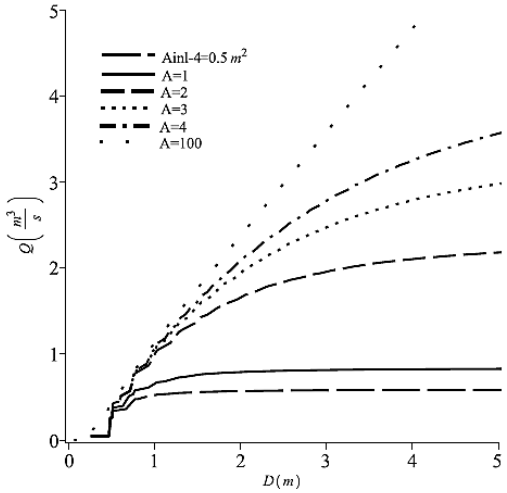


Fig. 13. The flow rate vs. the diameter of atrium for different inlet size to atrium

شکل ۱۳ . دبی برحسب قطر هیدرولیکی میان تالار برای مقادیر مختلف بازشو به میان تالار

۴ مترمربع برای بازشو تا مساحت نمونه ۱۰۰ مترمربع به‌عنوان نماینده بی‌نهایت، اختلاف دبی ناچیز است؛ اما در مساحت‌های کمتر برای این بازشو تأثیر بر روی دبی چشمگیرتر است و در صورت کاهش مساحت از حدی مشخص تأثیر به سزایی بر روی دبی گذاشته و دبی را به‌شدت کم می‌کند. در شکل ۱۴ عملکرد میان تالار در ابعاد استاندارد (سطح مقطع ۱۲ مترمربع) بررسی شده است [۲۷]. دبی در مقادیر مختلف مساحت بازشو به اتاق برحسب مقادیر مختلف بازشو به میان تالار بررسی شده است. این نمودار نشان می‌دهد که افزایش ابعاد بازشو به اتاق از یک حد مشخص، تأثیری بر دبی عبوری از

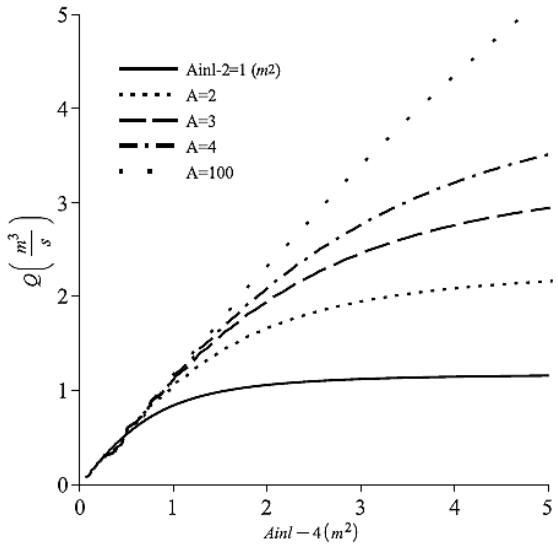


Fig. 14. The flow rate vs. inlet size to atrium for different inlet size to building

شکل ۱۴: دبی برحسب مساحت بازشو به میان تالار برای مقادیر مختلف بازشو به ساختمان.

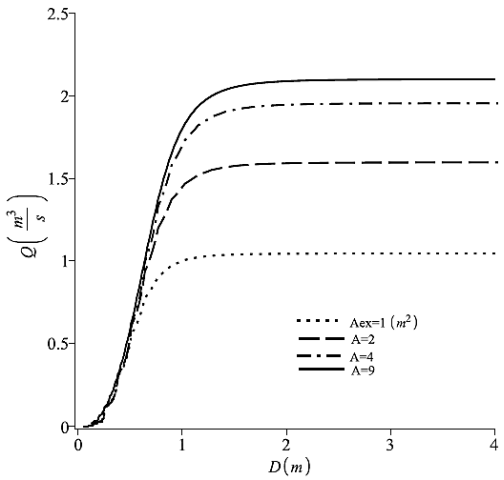


Fig. 15. The flow rate vs. the diameter of atrium for different exhaust size from it

شکل ۱۵: دبی برحسب قطر آتریم برای مقادیر مختلف خروجی قرارگرفته بر روی آن.

آتریم نخواهد داشت. با بررسی نمودارها می‌توان گفت اگر مساحت بازشوها به میان تالار نزدیک به مقدار قطر هیدرولیکی میان تالار باشد عملکرد میان تالار در تهویه طبیعی مطلوب ارزیابی می‌شود. اگر مساحت این بازشوها کمتر از این مقدار باشد به‌شدت دبی کاهش می‌یابد. مساحت بازشوی به اتاق که هوا را از بیرون وارد اتاق می‌کند باید برابر با مساحت بازشوی متصل به میان تالار در نظر گرفته شود. در : تأثیر درگاه خروجی بر روی میان‌تالار بررسی شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود با کاهش مساحت درگاه خروجی دبی عبوری از میان تالار کاهش می‌یابد؛ بنابراین توصیه می‌شود در صورت استفاده از درگاه‌های خروجی بر روی آتریم برای جلوگیری از تأثیر کاهنده‌ی آن بر روی دبی از خروجی‌های پشت به باد برای استفاده از ناحیه فشار منفی و کمک از نیروی باد برای ایجاد مکش استفاده شود تا افت دبی حاصل از وجود این نوع خروجی‌ها جبران شود.

۶- جمع‌بندی و توصیه‌های طراحی

۶-۱: جمع‌بندی عملکرد عناصر معماری در تهویه طبیعی

- تهویه‌ی پشت‌بامی با نورگیر سقفی کارآمدترین گزینه برای تهویه است. این روش که مناسب برای ساختمان‌های ویلایی و یا طبقات آخر است به‌راحتی با افزایش در تعداد در نقاط مختلف ساختمان باعث افزایش نرخ تهویه می‌شود. تفاوت عملکرد این سامانه در حضور و عدم حضور باد برای تأمین دبی هوا در حدود ۵۰ درصد است. در طراحی، استفاده از درگاه‌های خروجی هوای مناسب در جهت پشت به باد برای ایجاد ناحیه‌ی فشار منفی در

خروجی و بازشوهای ورودی رو به باد، پیشنهاد می‌شود.

- داکت تأسیساتی گزینه‌ی مناسب برای تهویه‌ی طبقات پایین‌تر که امکان تهویه با نورگیر سقفی برای آن‌ها وجود ندارد، است. تأثیر داکت بر تهویه‌ی هر ناحیه، با توجه به تعداد طبقات متصل به آن مشخص می‌شود. یک داکت با ابعاد حداقل در معماری که مربعی به طول ۰/۶ متر است، تقریباً ۳/۰ مترمکعب بر ثانیه دبی از خود عبور می‌دهد.

- ترکیب راه‌پله و داکت در ابعاد استاندارد برای تهویه با فرض اینکه تمام ورودی هوا از راه‌پله و تمام خروجی از داکت باشد، با ابعاد حداقلی برای داکت، می‌تواند ۰/۲ مترمکعب بر ثانیه دبی ایجاد کند.

- عملکرد آتریم وابسته به مساحت بازشوهای متصل به آن و مساحت بازشوی خروجی آن است و در بهترین عملکرد خود دبی ۳ مترمکعب بر ثانیه را می‌تواند تأمین کند و در صورت استفاده از بازشوی خروجی تا ۵۰ درصد از عملکرد آن می‌کاهد.

- تأثیر هوای تازه بر بار ساختمان (سرمایشی یا گرمایشی) با توجه به دبی ایجادشده توسط هر سیستم در جدول ۳ آمده است. بار سیستم محاسبه‌شده در مواردی که دمای هوای بیرون بیشتر از هوای داخل باشد به بار سرمایشی افزوده و در مواردی که دمای هوای بیرون کم‌تر از دمای داخل بوده می‌تواند از بار سرمایشی بکاهد. تهویه طبیعی گزینه‌ی مناسب برای از بین بردن بارهای سرمایشی اکتسابی در طول روز و تهویه‌ی شبانه در تابستان است.

یک سیستم کنترلی برای تنظیم دبی می‌تواند از اثر منفی تهویه‌ی طبیعی بر روی بار سرمایشی در طول روز جلوگیری کند.

- تهویه‌ی طبیعی در اغلب روش‌های موجود وابسته به شرایط محیطی و فصلی است. برای مثال تهویه‌ی عبوری کاملاً وابسته به وجود باد است. همچنین عملکرد درست طرح‌های پیشنهادی با برقرار بودن شرایط فرض شده میسر است و پیشنهاد این طرح‌ها برای استفاده حداکثری از شرایط موجود در تابستان بوده و عملکرد دائمی و پیوسته آن‌ها نیازمند طرح‌های تکمیلی مانند اضافه کردن دودکش خورشیدی[1] در خروجی‌های داکت، استفاده از بال‌های جهت دهنده هوا بر روی نمای ساختمان[2] برای هدایت باد به ورودی‌ها است.

۶-۲: جمع‌بندی و توصیه در مورد ابعاد بازشوها

- تهویه‌ی عبوری در ساختمان‌های باریک که افت فشار داخلی کمی در جهت جریان دارند توصیه می‌شود. اندازه‌ی بازشوها در ورودی و خروجی در این مدل تهویه باید با هم نسبت یک‌به‌یک داشته باشد.

- تهویه پشت‌بامی با نورگیر سقفی بیشتر از هر عاملی به دلیل محدودیت‌های معماری وابسته به بازشوی خروجی است. مساحت پیشنهادی برای درگاه خروجی یک نورگیر سقفی در یک خانه‌ی با ارتفاع سقف ۳ متر و مستقل از زیربنای آن برابر با ۱ مترمربع است. نورگیر سقفی در این

جدول ۳: تأثیر سیستم‌های تهویه‌ی طبیعی بر بار ساختمان

Table 3. Effect of natural ventilation on cooling or heating load

سیستم	دبی (مترمکعب بر ثانیه)	اختلاف دمای بیرون و داخل (کلوین)	بار سیستم (وات) $q=\rho c_p Q\Delta T$
نورگیر سقفی	۰/۷	۵	۴۳۰۰
داکت تأسیساتی	۰/۳	۵	۱۸۰۰
سیستم داکت و راه‌پله	۰/۲	۵	۱۲۰۰
آتریم	۳	۵	۱۸۰۰۰

1 Solar chimney
2 Wing walls

مساحت بهترین عملکرد خود را دارد و افزایش مساحت بیشتر از این مقدار تأثیری بر تهویه نخواهد داشت.

- در تهویه با داکت و گذرگاه‌های عمودی مساحت بازشوی از اتاق به آن گذرگاه برابر با مقدار عددی قطر هیدرولیکی آن گذرگاه در نظر گرفته شود. یا به عبارتی دیگر، نسبت مساحت سطح مقطع گذرگاه به مساحت بازشو از اتاق به آن گذرگاه باید حدود ۰/۷۸ قطر هیدرولیکی آن گذرگاه باشد. مساحت سایر بازشوها مانند بازشوی متصل به اتاق که هوا را از بیرون وارد می‌کنند، با ضریب حدودا ۱/۵ برابر مساحت بازشو از اتاق به داکت در نظر گرفته شود.
- تهویه با راه‌پله و داکت که در آن، خرپشته به‌عنوان یک بادگیر عمل می‌کند بدین‌صورت است که مساحت بازشوی قرارگرفته بر روی خرپشته با مساحتی نزدیک با سطح مقطع داکت انتخاب شود و سایر بازشوهای ارتباطی یعنی بازشو به فضای مسکونی با ضریب ۱/۵ و بازشو به داکت با ضریب ۱ برابر مساحتی برابر با مقدار عددی قطر هیدرولیکی داکت انتخاب شود. برای مثال در ابعاد استاندارد داکت (مربع به ضلع ۰/۶ متر)، بازشوی قرارگرفته در خرپشته مساحتی نزدیک به ۰/۴ مترمربع و بازشوی ارتباطی با داکت ۰/۶ مترمربع و بازشوی ارتباطی راه‌پله و فضای مسکونی ۱ مترمربع مساحت داشته باشد.
- در مورد میان تالار ابعاد بازشوهای متصل به آن به مشابه داکت و مجراهای عمودی تعیین می‌شود.

علائم انگلیسی

A	مساحت (m^2)
C_d	ضریب تخلیه
C_p	ضریب فشار
C_s	ضریب دودکشی
C_w	ضریب باد
C	ضریب عبور ($m^3.Pa^{-10}\ s^{-1}$)
D	قطر (m)
f	ضریب اصطکاک
H	ارتفاع (m)
L	طول (m)
Δp	اختلاف فشار (Pa)
U	سرعت ($m.s^{-1}$)
U_r	سرعت مرجع ($m.s^{-1}$)
Q	دبی حجمی ($m^3.s^{-1}$)
ΔT	دما (K)

علائم یونانی

ρ	چگالی ($kg.m^{-3}$)

بالانویس

-	متوسط‌گیری

زیرنویس‌ها

d	هیدرولیکی
ex	خروجی
inl	ورودی
in	داخلی
eff	مؤثر
ww	رو به باد
lw	پشت به باد
ref	مرجع
at	آتریم
st	راه‌پله
o	بیرون
i	داخل

۷- مراجع

[1] Department of Housing and Urban Development, The Fourteenth topic of national building regulations, Nashr Tose'e Iran, (2009). (in Persian)

[2] Department of Housing and Urban Development, The nineteenth topic of national building regulations, (2009). (in Persian)

[3] R. Vakilinezhad, F. Mehdizade, S. M. Mofidi, Principles of passive cooling systems in elements Traditional Iranian architecture, Architecture and urban design of Iran, 5(1) (2014) 147-159 (in Persian)

[4] Department of Housing and Urban Development, The Third topic of national building regulations, (2009). (in Persian)

[5] National Fire Protection Association, NFPA 92B: Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Areas, (2005).

[6] National Fire Protection Association, NFPA 92A: Recommended practice for smoke-control systems, (2006).

[7] C. Bloyd, M. Comstock, U. G. B. Council, and N. McNabb, APEC Building Codes, Regulations, and Standards, (2013).

[8] American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, A. Handbook, Fundamentals, Atlanta, (2001).

[9] B.S. Institution, BS 5925-1991: Code of Practice for Ventilation Principles and Designing for Natural Ventilation, British Standards Institution, (1991).

[10] A.S. Institution, Building Code of Australia- Volume One, in, (2015).

[11] A.S. Institution, NCC, Building Code of Australia – Guide to Volume One, in, (2015).

[12] S. Institution, IS 3362-1977: Code of practice for natural ventilation of residential buildings (first revision), (1977).

[13] C. WC, Draft National Building Code of India: Part 8 Building Services, Section 1 Lighting and Ventilation (Third Revision of SP 7), (2017).

[14] GB 50736-2012: Code for Heating Ventilation and Air Conditioning of Civil Buildings, (2012).

[15] S. Amir Mousavian, M. Maerefat, B.Mohammad Kari, Investigation of natural ventilation in international standards, in: HVACconf-IRSHRAE-3, Imam Khomeini International University , (2018). (in Persian).

[16] F. Bauman, Buoyancy-driven convection in a rectangular enclosure: experimental results and numerical calculations, in: American Society of Mechanical Engineers Conference on Heat Transfer in Passive Solar Systems, Orlando, July 27-30, (2013).

[17] A. Emery and J. Lee, The effects of property variations on natural convection in a square enclosure, Journal of Heat Transfer, 121(1) (1999) 57-63.

[18] J.W. Axley, Application of Natural Ventilation for US Commercial Buildings-Climate Suitability Design Strategies & Methods Modeling Studies, (2001).

[19] M. Moghiman and F. Moradi, Computation of natural ventilation of building using loop analysis, ACECR Journal, 2(1) (2002) 127-140 (in Persian).

[20] A. Haghighi and M. Maerefat, Solar ventilation and heating of buildings in sunny winter days using solar chimney, Sustainable Cities and Society, 10(1) (2014) 72-79.

[21] J. Amnian, M. Maerefat, Gh. Heidarinejad, Investigation on effect of exhaust vents location on reduction of pollution in enclosed car parks, Modares Mechanical Engineering Journal, 16(5) (2016) 70-80 (in Persian).

[22] J. Amnian, M. Maerefat, Gh. Heidarinejad, Offering a method for reducing pollution and criterion for evaluation of ventilation flow in multilevel enclosed parking lots, Modares Mechanical Engineering Journal, 16(5) (2016) 285-297 (in Persian).

[23] Y. Chen, Zheming Tong, Wentao Wu, Holly Samuelson, Ali Malkawi, and Leslie Norford, Achieving natural ventilation potential in practice: Control schemes and levels of automation, Applied energy, 235(1) (2019) 1141-1153.

[24] Castillo, J. Antonio, et al, Natural ventilation of an isolated generic building with a windward window and different windexchangers: CFD validation, sensitivity study and performance analysis., Building Simulation, 12(3) (2019).

[25] Costanzo, Vincenzo, et al., Natural ventilation potential for residential buildings in a densely built-up and highly polluted environment, Renewable energy, 138(1) (2019) 340-354.

[26] K. N. Patil, S. C. Kaushik, and Ayush Aggarwal, Evaluation of Natural Ventilation Potential for Indoor Thermal Comfort in a Low-Rise Building in Arid and Semi-arid Climates of India, Advances in Energy and Built Environment, 36(1) (2020) 203-221.

[27] Department of Housing and Urban Development, The Fourth topic of national building regulations, (2009). (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

S. A. Mousavian, M. Maerefat, R. Madahian, B. M. Kari, Tips on Application of Natural Ventilation in Prevalent Buildings in Iran, Amirkabir J. Mech Eng., 53(3) (2021) 1621-1636.

DOI: 10.22060/mej.2019.15459.6133

این صفحه عمداً خالی است