



## Thermal Comfort Evaluation for Naturally Ventilated Building Applying an Adaptive Model in Different Cities of Iran

A. Minaei<sup>1\*</sup>, N. Moallemi Khiavi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

**ABSTRACT:** In the present article, the performance of natural cross ventilation in providing thermal comfort in a building across six cities of Iran with different climates has been investigated using EnergyPlus software. To evaluate the thermal comfort of the building, the adaptive thermal comfort model of ASHRAE Standard 55 has been applied. This model is proposed to evaluate thermal comfort in naturally ventilated buildings without any mechanical ventilation equipment. However, the airflow network model has been considered to simulate natural ventilation through openings. The simulation time for all six cities is considered from 21 March to 22 September. The results show that the achievement of thermal comfort in the building depends mainly on climate. The best and the worst performance has been observed for Tabriz with its cold climate and Bandar Abbas with its hot and humid climate, respectively. Thermal comfort has been provided more than 69% of the time by applying natural cross ventilation in Tabriz for building without insulation. While this value for Bandar Abbas is estimated at about 12%. Also, results show that the use of insulation with a thickness of 5 cm in the external constructions of the building makes an increase of about 8-12% in the hours of thermal comfort for all cities compared to the building without insulation.

### Review History:

Received: Aug. 02, 2022

Revised: Oct. 30, 2022

Accepted: Dec. 27, 2022

Available Online: Jan. 05, 2023

### Keywords:

Cross natural ventilation

Adaptive thermal comfort model

Cooling

Energy Plus

### 1- Introduction

Ventilation of the internal spaces may be categorized into three kinds: mechanical ventilation, natural ventilation, or a combination of these two methods. In mechanical ventilation systems, electrical energy is needed to ventilate, cool, and refresh the indoor air. However, in natural ventilation fresh air from the outside enters the interior spaces through openings such as doors and windows, and in addition to establishing thermal comfort in space, it also removes pollution from the air in the room. Natural ventilation is considered a passive ventilation system as well as a proper alternative to mechanical air conditioning systems [1].

Among the various methods of assessing natural ventilation, the analytical models due to simplicity are implemented in building simulations software e.g., EnergyPlus [2]. In most research, to investigate thermal comfort in naturally ventilated buildings, the Fanger model [3] has been applied to check the thermal sensations of occupants. Field studies in warm climates in buildings without air-conditioning systems have shown that the Fanger model [3] predicts a warmer thermal sensation than the occupants actually feel. For this reason, Dear and Brager [4] presented an adaptive thermal comfort model at the request of ASHRAE [5] for naturally ventilated buildings.

Most of the research carried out in the field of natural

ventilation in Iranian cities has been done by considering single-zone buildings. While almost all buildings in Iran have more than one zone, so the study of natural ventilation in multi-zone buildings is crucial. Therefore, in the present study, the ability of natural ventilation in establishing thermal comfort in a multi-zone building (with a living room, a kitchen, and two bedrooms) during the cooling period for six cities in Iran has been investigated using EnergyPlus software [2]. Also, the adaptive thermal comfort model of ASHRAE [5] has been used to analyze thermal comfort in the naturally ventilated reference building.

### 2- Methodology

#### 2- 1- Reference building

To assess the natural ventilation, a multi-zone building consisting of a living room, a kitchen, two bedrooms, and a staircase is considered. Also, the orientation of the building is north-south. The schematic of the reference building is shown in Fig. 1. Due to the presence of windows on both sides of the building and shared doors between the spaces of the building, Natural ventilation is considered to be a type of cross natural ventilation. The materials considered for the building are common materials used in Iranian buildings. All occupants in the building consist of two people in the living room and one person in each bedroom.

\*Corresponding author's email: A.minaei@uma.ac.ir



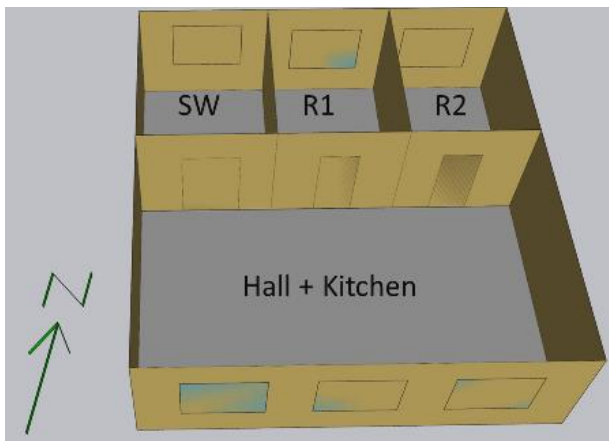


Fig. 1. Schematic of sample building

### 2- 2- Using the airflow network model

In this research, the Airflow Network model is used to calculate the natural ventilation flow rate. The airflow network model of EnergyPlus software has been validated using measured data at Oak Ridge National Laboratory (ORNL) and the Florida Solar Energy Center (FSEC) [6].

### 2- 3- Adaptive thermal comfort model

In the present study, the Adaptive thermal comfort model [4] of the ASHRAE [5] model is used to investigate the thermal comfort of occupants. In the Adaptive thermal comfort model, the thermal comfort conditions of the indoor environment vary according to the outdoor environment conditions. According to ASHRAE/ANSI 55 [5], the acceptable indoor temperature should be selected based on

the satisfaction of 80% of the residents, which is expressed by Eq. (1):

$$T_{comf} = 0.31T_{a,out} + 17.8 \mp 3.5 \quad (1)$$

Where  $T_{a,out}$  and  $T_{comf}$  are the average outside temperature in a period of one month and the optimal indoor temperature, respectively.

### 3- Results and Discussions

To investigate the potential of natural ventilation in the reference building, six cities of Iran including Tehran, Tabriz, Yazd, Isfahan, Shiraz, and Bandar Abbas with different climates have been considered. To assess the cooling performance of the natural ventilation, the simulation period has been selected from March 21 to September 22. In Figs. 2 and 3, the temperature distribution of the living room, the outside temperature, and the upper and lower limits of the temperature for Bandar Abbas and Tabriz based on the 80% satisfaction of the occupant are shown. Figs. 2 and 3 are obtained for the building without insulation. However, indoor thermal comfort condition is established if the indoor temperature is between the continuous red line and the dashed red line.

Also, the effect of using insulation in the external walls and roof on the thermal comfort of residents has been investigated. In Fig. 4, the effect of using natural ventilation in establishing thermal comfort is shown by considering three different insulation thicknesses and also without insulation.

According to Fig. 4, thermal comfort conditions are established in more hours in insulated buildings.

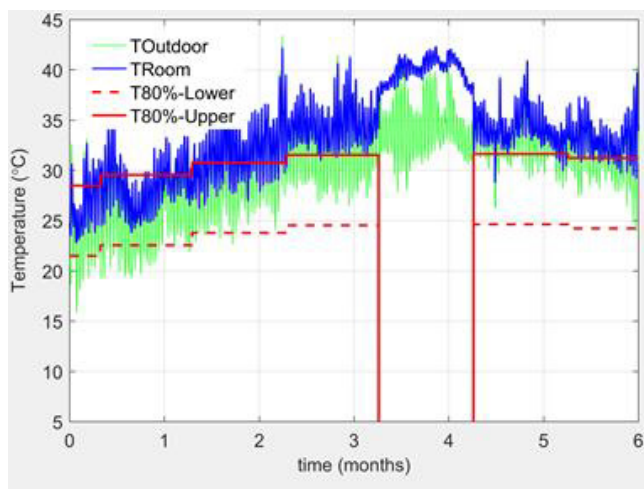


Fig. 2. Temperature variation of the living room and outdoor air in Bandar Abbas city

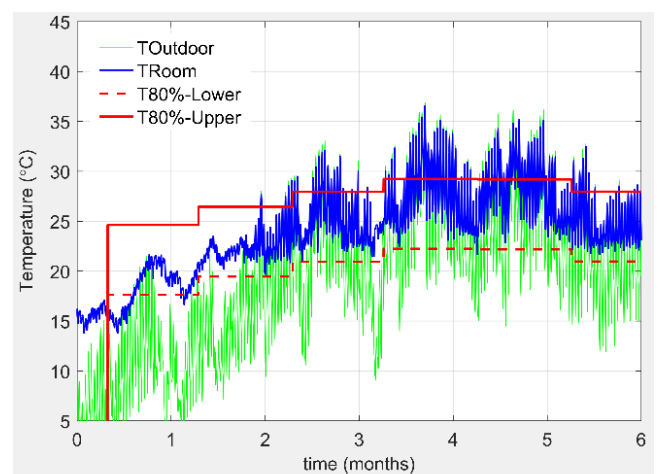


Fig. 3. Temperature variation of the living room and outdoor air in Tabriz city

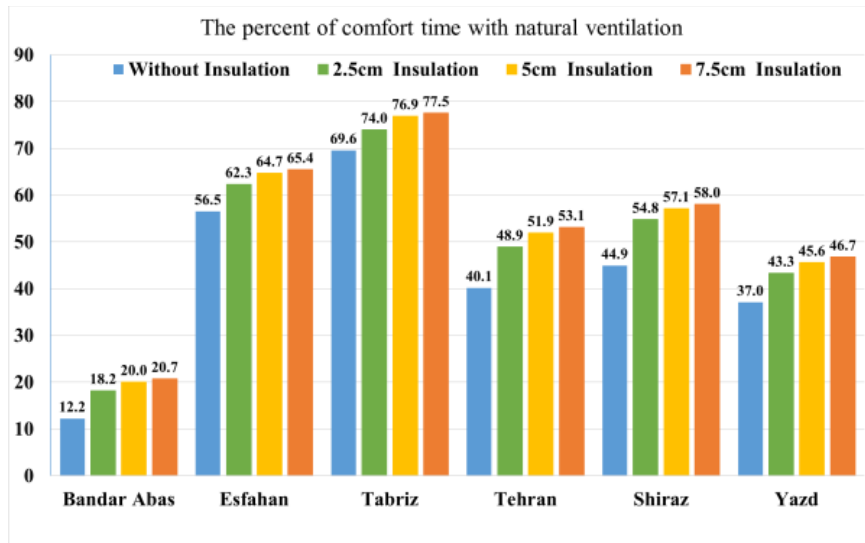


Fig. 4. The percent of comfort hours in spring and summer for insulated and non-insulated sample building

#### 4- Conclusions

In the present study, thermal comfort in a multi-zone building has been investigated by applying cross natural ventilation across six cities in Iran. The simulations were carried out in the EnergyPlus software through the time period of March 21 to September 22. The results of the present study are as follows:

Tabriz with a cold and dry climate has shown the best performance. In this city, thermal comfort has been established in more than 69% of the hours for buildings without insulation.

The weakest performance has been observed in Bandar Abbas with a hot and humid climate. For this city, thermal comfort is established in about 12 percent of the considered times without insulation.

The percent of thermal comfort establishing hours for Tehran, Isfahan, Shiraz, and Yazd is about 40, 56, 45, and 37%, respectively.

The use of insulation with a thickness of 5 cm in the external walls and roof of the building increases the percentage of thermal comfort hours by 8-12% for all cities compared to buildings without insulation.

By increasing the insulation thickness from 2.5 cm to 5 cm, the percentage of comfort hours increases in the range of 2-4%.

#### References

- [1] M. Nomura, K. Hiyama, A review, Natural ventilation performance of office buildings in Japan, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74 (2017) 746–754.
- [2] DOE, EnergyPlus Version 9.6.0 Documentation Engineering Reference. U.S. Department of Energy, 2021.
- [3] P. O. Fanger, J. Toftum, Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates. *Energy and buildings*, 34(6) (2002) 533-536.
- [4] R. J. De Dear, G. S. Brager, Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and buildings*, 34(6) (2002) 549-561.
- [5] ASHRAE, ANSI/ASHRAE Standard 55-2020 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (2020).
- [6] L. Gu, Airflow network modeling in EnergyPlus, in: 10th International Building Performance Simulation Association Conference, Tsinghua University, Beijing, China, 2007, pp. 964-972.

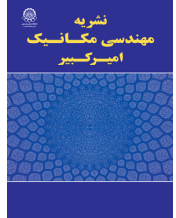
#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Minaei, N. Moallemi Khiavi, *Thermal Comfort Evaluation for Naturally Ventilated Building Applying an Adaptive Model in Different Cities of Iran*, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 54(11) (2022) 537-540.

DOI: 10.22060/mej.2023.21654.7486







## بررسی آسایش حرارتی برای یک ساختمان با تهویه طبیعی با استفاده از یک مدل آسایش تطبیقی در شش شهر مختلف ایران

عسگر مینایی<sup>۱\*</sup>، نگین معلمی خیابوی<sup>۲</sup>

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران  
۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۱  
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۰۸  
پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۶  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۱۰/۱۵

### کلمات کلیدی:

تهویه طبیعی عبوری  
مدل آسایش حرارتی تطبیقی  
سرمایش  
انرژی پلاس

**خلاصه:** در مقاله حاضر به بررسی عملکرد تهویه طبیعی عبوری در تأمین آسایش حرارتی یک ساختمان نمونه در شش شهر ایران با اقلیم‌های آب‌وهوایی مختلف با استفاده از نرم‌افزار انرژی پلاس پرداخته شده است. برای بررسی آسایش حرارتی ساختمان از مدل آسایش حرارتی تطبیقی استاندارد اشری ۵۵ استفاده شده است. این مدل برای بررسی آسایش حرارتی در ساختمان‌های خنک شونده با تهویه طبیعی و فاقد تجهیزات تهویه مطبوع و مکانیکی پیشنهاد شده است. برای شبیه‌سازی تهویه طبیعی نیز مدل شبکه جریان هوا در نظر گرفته شده است. دوره شبیه‌سازی برای هر شش شهر از یک فروردین تا ۳۱ شهریور در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که برقراری آسایش حرارتی در ساختمان نمونه بیش از هر چیز به شرایط آب‌وهوایی و نوع اقلیم وابسته است. بهترین عملکرد برای شهر تبریز با اقلیم سرد و ضعیف‌ترین عملکرد برای شهر بندرعباس با اقلیم گرم و مرطوب مشاهده شده است. به طوری که با استفاده از تهویه طبیعی عبوری برای ساختمان نمونه در شهر تبریز در ساختمان بدون عایق در بیش از ۶۹ درصد موارد، آسایش حرارتی برقرار شده است که برای بندرعباس این عدد حدود ۱۲ درصد به دست آمده است. همچنین نتایج نشان داد که استفاده از عایق با ضخامت ۵ سانتی‌متر در جداره‌های خارجی ساختمان درصد زمان‌های برقراری آسایش حرارتی را در مقایسه با ساختمان بدون عایق برای تمامی شهرها در حدود ۸-۱۲ درصد افزایش می‌دهد.

### ۱- مقدمه

همین دلیل این روش، یک روش فعال برای سرمایش و تهویه ساختمان محسوب می‌گردد. در تهویه طبیعی هوای تازه محیط بیرون از طریق بازشوها مانند در و پنجره وارد اتاق شده و علاوه بر برقراری آسایش حرارتی در اتاق (دما و رطوبت نسبی)، آلودگی را نیز از هوای اتاق پاک می‌کند. با توجه به عدم استفاده از وسایل مصرف‌کننده انرژی در این نوع تهویه، این روش تهویه یک سیستم غیرفعال محسوب می‌گردد. بخش بزرگی از ساختمان‌های مدرن منحصراً به سیستم تهویه مکانیکی (سیستم فعال) متکی هستند [۲]. سیستم تهویه طبیعی در مقایسه با سیستم‌های تهویه مطبوع یک راه‌حل مناسب و به صرفه برای ساختمان‌ها است. تهویه طبیعی پتانسیل خوبی برای تهویه برودتی رضایت‌بخش و برقراری کیفیت هوای داخلی دارد. از مزایای تهویه طبیعی نسبت به تهویه مکانیکی می‌توان به کاهش مصرف انرژی، دوام بالا و انتشار کمتر دی‌اکسید کربن اشاره کرد. به دلیل مزایای فوق این سیستم می‌تواند به طور گسترده‌ای به عنوان یک جایگزین مناسب برای سیستم‌های تهویه مطبوع مکانیکی استفاده شود [۱].

توسعه پایدار در صنعت ساختمان مستلزم آن است که طراحان نیازهای کاربران امروزی را بدون به خطر انداختن نیازهای نسل‌های آینده برآورده سازند. در سطح جهانی، ۴۰ تا ۶۰ درصد از کل مصرف انرژی ساختمان مربوط به سیستم‌های گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع به‌منظور برقراری شرایط آسایش حرارتی ساکنین است [۱]. مصرف انرژی برای سیستم‌های گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع روزبه‌روز افزایش می‌یابد، این افزایش مصرف انرژی عمدتاً مبتنی بر استفاده از سوخت‌های فسیلی بوده و منجر به آلودگی هوا و گرم شدن کره زمین می‌شود. در حالت کلی تهویه ساختمان به صورت تهویه مکانیکی، تهویه طبیعی و یا ترکیبی از تهویه طبیعی و تهویه مکانیکی انجام می‌شود. در تهویه مکانیکی معمولاً از تجهیزاتی مانند فن برای ارسال هوای تازه بیرون به داخل ساختمان استفاده می‌شود. به علاوه سیستم‌های تهویه مکانیکی ممکن است با دستگاه‌هایی مانند کولر آبی، چیلر تراکمی یا جذبی و غیره به منظور تأمین آسایش حرارتی ترکیب شوند. به



و فضای داخلی به تعادل می‌رسد. در ارتفاع پایین‌تر از صفحه فشار خنثی، هوای تازه از خارج به داخل وارد می‌شود و در ارتفاع بالاتر از صفحه فشار خنثی هوای داخل به بیرون جریان می‌یابد [۱]. در بیشتر موارد، جریان‌های باد و نیروی شناوری به طور هم‌زمان وجود دارند. یکی از روش‌های استفاده از اثر باد و شناوری در ساختمان‌ها، استفاده از بادگیر است که در ساختمان‌ها سنتی رواج داشت. جمعه زاده و همکاران [۷] در یک مقاله مروری به بررسی مطالعات انجام شده در زمینه استفاده از بادگیر برای تهویه طبیعی پرداختند. ایشان با استفاده از مقاله‌های مختلف، تأثیر پارامترهای هندسی بادگیر و ساختار ساختمان بر دبی تهویه طبیعی را مورد بررسی قرار دادند.

باتوجه به شکل ساختمان و محل بازشوها، تهویه طبیعی را می‌توان به سه دسته مختلف تهویه یک‌طرفه<sup>۲</sup>، تهویه عبوری<sup>۳</sup> و تهویه دودکشی<sup>۴</sup> تقسیم‌بندی کرد. تهویه یک‌طرفه به حالتی اطلاق می‌شود که تمام بازشوها فقط در یک دیوار قرار داشته باشد یا فقط یک بازشو وجود داشته باشد. در این نوع تهویه هوا از یک نما که بازشوها در آن قرار دارند وارد و از همان نما از طریق بازشوها خارج می‌شود. در تهویه عبوری، جریان هوا از طریق بازشو موجود در یک طرف ساختمان وارد فضای داخلی شده و از طریق بازشوی موجود در طرف دیگر ساختمان خارج می‌شود. در این نوع تهویه اختلاف فشار ناشی از سرعت باد نیروی محرکه اصلی در تهویه است [۸]. تهویه دودکشی به دلیل اختلاف چگالی بین هوای گرم داخل و سرد بیرون انجام می‌شود. هوای خارج معمولاً از طریق بازشوهای عمودی وارد می‌شود و سپس از طریق یک مسیر جریان عمودی مانند دهلیز، راه پله یا دودکش خارج می‌شود [۹]. تهویه طبیعی عبوری به‌طور معمول هوای تازه بیشتری نسبت به تهویه یک‌طرفه و تهویه دودکشی فراهم می‌کند [۱۰].

برای بررسی تهویه طبیعی، روش‌های مختلفی از جمله روش‌های تجربی، مدل‌سازی عددی و تحلیلی استفاده شده است. فن و همکاران [۳] آهنگ تهویه را برای دو نوع مختلف تهویه یک‌طرفه و تهویه عبوری برای یک ساختمان در شهر لندن با استفاده از روش ردیابی گاز دی‌اکسیدکربن اندازه‌گیری کردند. هدف آنها بررسی دقت روش‌های تحلیلی در پیش‌بینی آهنگ تهویه در تهویه عبوری و یک‌طرفه بود. نتایج آنها نشان داد که روش‌های تحلیلی نتایج قابل قبول‌تری برای تهویه عبوری در مقایسه با تهویه یک‌طرفه می‌دهند. عمرانی و همکاران [۱۱] نیز عملکرد دو نوع مختلف تهویه عبوری و یک طرفه را در یک ساختمان بلندمرتبه واقع در

تهویه طبیعی می‌تواند آسایش حرارتی را برای ساکنین فراهم کند، اما باتوجه به اینکه در تهویه طبیعی هوای بیرون به داخل ساختمان منتقل می‌شود، عملکرد آن به تفاوت بین دمای هوای بیرون و فضای داخل بستگی دارد. باتوجه به اینکه با افزایش دمای هوای بیرون، دمای هوای داخل ساختمان نیز افزایش می‌یابد، این عامل باعث کاهش عملکرد تهویه طبیعی و کاهش آسایش حرارتی در داخل ساختمان می‌شود. باین‌حال، تحقیقات نشان داده است که ساکنان ساختمان‌های دارای تهویه طبیعی می‌توانند دمای اتاق بالاتری را در تابستان نسبت به ساختمان‌هایی که دارای تهویه مطبوع هستند، تحمل کنند. از طرف دیگر، عملکرد تهویه طبیعی در یک ساختمان تا حد زیادی به نوع اقلیمی که ساختمان در آن قرار دارد، وابسته است [۳]. در تهویه طبیعی اختلاف فشار بین محیط داخل و بیرون سبب می‌شود که هوای بیرون از طریق بازشوها (در و پنجره)، به داخل ساختمان جریان پیدا کند. تفاوت فشار داخلی و خارجی ناشی از دو عامل است: باد و نیروی شناوری. در بسیاری از موارد ترکیب این دو باعث تهویه طبیعی در ساختمان می‌شود [۴].

در تهویه طبیعی ناشی از نیروی محرک باد، جریان باد بر روی یک طرف ساختمان باعث به‌وجود آمدن ناحیه فشار بالا نسبت به محیط داخل در سمت بادگیر و ناحیه فشار پایین در سمت دیگر می‌شود. این اختلاف فشار بین نمای بادگیر و نمای دیگر باعث ورود جریان هوا به داخل اتاق از سمت بادگیر و خروج جریان هوا از نمای دیگر می‌شود. آهنگ تهویه عمدتاً به‌سرعت باد، زاویه برخورد باد، موقعیت بازشوها و شکل ساختمان بستگی دارد [۵].

تهویه طبیعی با نیروی شناوری در ساختمان‌هایی با دیوارهای دارای بازشوهای بزرگ یا یک بازشو در بالا و یک بازشو دیگر در پایین دیوار اتفاق می‌افتد. این نوع تهویه به دلیل اختلاف چگالی بین هوای خارج و داخل اتفاق می‌افتد. اختلاف چگالی ناشی از اختلاف دمای بین فضای داخلی و خارجی است. تفاوت در چگالی هوای بیرون و داخل باعث اختلاف فشار در هوای داخل و بیرون در ارتفاع‌های مختلف بازشوها می‌شود که این اختلاف فشار هوای داخل و خارج سبب ایجاد پروفیل عمودی فشار در داخل و خارج می‌شود [۶]. هنگامی که منابع حرارتی در فضای داخلی وجود دارد، دمای داخل فضا از محیط بیرون بیشتر می‌شود. هوای گرم‌تر فضای داخلی به سمت بالا حرکت می‌کند و باعث ایجاد فشار بالاتر نسبت به محیط بیرون در قسمت بالاتر و فشار پایین‌تر در قسمت پایین بازشو می‌شود. در یک ارتفاع خاص که به آن صفحه فشار خنثی گفته می‌شود، فشار بین محیط بیرون

2 Single-sided ventilation  
3 Cross ventilation  
4 Stack effect ventilation

1 Neutral pressure plane



شده است. و کیلی نژاد و شاعری [۱۸] به بررسی تجربی آسایش حرارتی در یک ساختمان اداری در شهر بوشهر پرداختند. در مطالعه آنها عوامل محیطی مانند دما، رطوبت و سرعت باد در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری شده و تعداد ۱۸۰ پرسشنامه توسط افراد حاضر در محیط پاسخ داده شده است. آن‌ها حد بالای دما برای برقراری آسایش حرارتی را در شهر بوشهر در ماه اسفند ۲۸/۶ درجه سلسیوس گزارش کرده‌اند. متداول‌ترین مدل آسایش حرارتی، مدل فنگر است که از دو شاخص میانگین پیش‌بینی آرا<sup>۱</sup> برای ارزیابی احساس حرارتی و شاخص درصد ناراضی‌تی حرارتی افراد<sup>۲</sup> برای بررسی احساس حرارتی فرد استفاده می‌کند. منظور از شاخص میانگین پیش‌بینی آرا، پیش‌بینی و نسبت دادن اعدادی برای بیان میانگین احساس حرارتی افراد در یک محیط است. این شاخص تابعی از دو شاخص فردی پوشش و فعالیت فرد و چهار شاخص محیطی شامل دمای هوای محیط، متوسط دمای تابشی، سرعت هوا و رطوبت نسبی هوا است. مطالعات میدانی در اقلیم‌های گرم در ساختمان‌های بدون تهویه مطبوع نشان داده است که این مدل، احساس حرارتی گرم‌تری نسبت به احساس حرارتی واقعی ساکنان پیش‌بینی می‌کند. فنگر و توفتام [۱۹] دلیل این امر را انتظارات پایین ساکنین بیان کرده‌اند. آن‌ها همچنین بیان کردند که سطح تخمین زده فعالیت افراد در فضاهای فاقد سیستم‌های تهویه مطبوع بالاتر از سطح فعالیت واقعی افراد است. به همین دو دلیل ساکنین ساختمان ممکن است گرما را کمتر از آنچه شاخص میانگین پیش‌بینی آرا پیش‌بینی می‌کند، احساس کنند. به همین دلیل، فنگر و توفتام مدل توسعه‌یافته شاخص میانگین پیش‌بینی آرا را برای ساختمان‌های فاقد سیستم‌های تهویه ارائه دادند. در این مدل یک ضریب انتظار<sup>۳</sup> معرفی شده است که در ساختمان‌های فاقد سیستم تهویه این مقدار باید در مقدار شاخص میانگین پیش‌بینی آرا محاسبه شده ضرب شود. برای ساختمان‌های فاقد سیستم تهویه مطبوع که از تهویه طبیعی برای سرمایه‌گذاری ساختمان استفاده می‌شود، دیر و براگر [۲۰] به سفارش اشری یک مدل آسایش حرارتی تطبیقی ارائه دادند. این مدل در هندبوک استاندارد اشری: مفاهیم [۲۱] و استاندارد انسی/اشری ۵۵ [توضیح داده شده است. این روش توسط محققان مختلف [۲۳ و ۲۴] در ساختمان‌هایی که تهویه طبیعی برای سرمایه‌گذاری ساختمان بکار گرفته شده است، برای بررسی آسایش حرارتی استفاده شده است. در مطالعه حاضر نیز، روش آسایش حرارتی تطبیقی برای بررسی آسایش حرارتی بکار گرفته شده است.

شهر گرم و مرطوب بریسن استرالیا بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که تهویه عبوری آسایش حرارتی را در بیش از ۷۰ درصد مواقع تأمین می‌کند، در حالی که تهویه یک طرفه فقط در یک درصد مواقع قادر به تأمین آسایش حرارتی اتاق است.

اسفه و همکاران [۱۲] در یک مطالعه تجربی و عددی به بررسی تأثیر زاویه باد بر تهویه طبیعی در یک اتاق با سقفی نیمه استوانه‌ای پرداختند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که بیشترین دبی حجمی تهویه در زاویه باد صفر درجه روی می‌دهد. همچنین آنها اظهار کردند که استفاده از سقف نیم استوانه‌ای راندمان تهویه طبیعی را افزایش می‌دهد. ژانگ و همکاران [۱۳] تأثیر جهت وزش باد را بر عملکرد تهویه طبیعی در تهویه یک طرفه و عبوری با استفاده از شبیه‌سازی عددی سه بعدی بررسی کردند و نتایج خود را با داده‌های تجربی مقایسه کردند. شبیه‌سازی‌های عددی نتایج دقیق‌تری را در مقایسه با روش‌های تحلیلی ساده ارائه می‌دهند. با این حال، روش‌های عددی به دلیل شبکه محاسباتی بزرگ، به زمان زیادی برای شبیه‌سازی نیاز دارند. این روش‌ها همچنین نیاز به دانش کافی از مفاهیم حل عددی مانند مدل‌سازی هندسه سه بعدی، مش‌بندی، تنظیم شرایط اولیه و مرزی، انتخاب روش آشفستگی مناسب و غیره دارند، بنابراین این روش‌ها برای مهندسان و معماران مناسب نیستند. همچنین این روش‌ها قابل پیاده‌سازی در نرم‌افزارهای شبیه‌سازی ساختمان مانند انرژی پلاس نیستند.

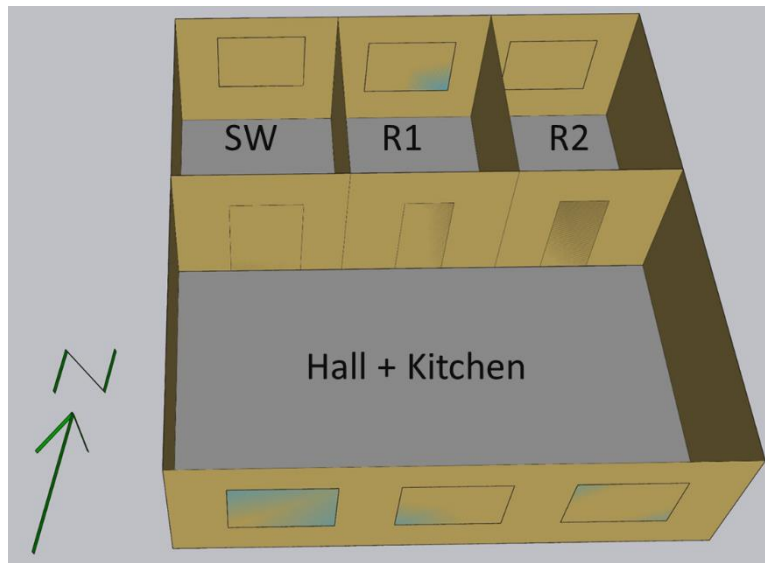
فرمول‌های ساده تجربی و تحلیلی به علت سادگی توسط مهندسان، معماران و محققین به صورت گسترده‌ای استفاده شده است. این مدل‌ها در نرم‌افزارهای شبیه‌ساز انرژی در ساختمان همانند انرژی پلاس [۱۴] و دیزاین بیلدر [۱۵] اعمال شده‌اند. موسویان و همکاران [۱۶] در یک مطالعه تحلیلی به بررسی تأثیر ابعاد و موقعیت عوامل مؤثر در معماری ایران مانند تالار، نورگیر سقفی، حیاط، انواع گذرگاه‌های عمودی شامل داکت تأسیساتی و کانال آسانسور، پارکینگ، راه‌پله و خرپشته در تهویه طبیعی پرداختند و ابعاد و موقعیت مناسب هر یک از عوامل فوق را برای محاسبه حداکثر آهنگ دبی تهویه محاسبه کردند. آینه‌وند و همکاران [۱۷] راهکارهایی برای افزایش دبی حجمی تهویه طبیعی در یک ساختمان ۶ طبقه در شهر رشت ارائه دادند. شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار دیزاین بیلدر انجام گرفت. آن‌ها تأثیر استفاده از بادگیر یک طرفه و بادگیر با چندین دهانه را در دبی حجمی تهویه طبیعی بررسی کردند.

در برخی پژوهش‌ها به بررسی مبحث آسایش حرارتی در ساختمان با اعمال تهویه طبیعی با استفاده از مدل‌های آسایش حرارتی مختلف پرداخته

1 Predicted mean vote

2 Predicted percentage of dissatisfied

3 Expectancy factor



شکل ۱. شماتیکی از ساختمان نمونه

Fig. 1. Schematic of sample building

## ۲- شبیه‌سازی

برای ارزیابی تغییرات دما در داخل ساختمان و بررسی ساعت‌های برقراری آسایش حرارتی در داخل ساختمان با وجود تهویه طبیعی عبوری، از نرم‌افزار انرژی پلاس استفاده شده است.

### ۲-۱- ساختمان نمونه

فضای نمونه یک ساختمان یک طبقه است که در شکل ۱ نشان داده شده است. این ساختمان یک فضای  $11 \times 10$  متری است که اگر مساحت راه‌پله کم شود سطح مفید آن تقریباً ۹۵ مترمربع خواهد بود. ساختمان متشکل از سه فضای کنترل شده و یک فضای کنترل نشده است. پذیرایی و آشپزخانه با هم به‌عنوان یک فضای کنترل شده و دو اتاق نیز به‌عنوان دو فضای کنترل شده دیگر در نظر گرفته شده‌اند. زیربنای هر اتاق به طور تقریبی ۱۵ مترمربع و زیر بنای پذیرایی و آشپزخانه ۶۵ مترمربع است. ارتفاع دیوارها ۳ متر در نظر گرفته شده است. به‌علاوه، راه‌پله به‌عنوان فضای کنترل نشده در نظر گرفته می‌شود. دیوارهای شرقی و غربی مجاور همسایه در نظر گرفته شده است. به همین دلیل بر روی آنها پنجره‌ای وجود ندارد. مساحت پنجره‌ها روی دیوارهای شمالی و جنوبی به‌اندازه ۳۰ درصد مساحت دیوارها در نظر گرفته

بیشتر پژوهش‌های انجام‌گرفته در زمینه تهویه طبیعی در شهرهای ایران با در نظر گرفتن ساختمان‌های یک ناحیه‌ای انجام‌گرفته است. درحالی‌که به طور تقریبی تمامی ساختمان‌های ایران دارای بیش از یک ناحیه هستند و به همین دلیل مطالعه تهویه طبیعی در ساختمان‌های چند ناحیه‌ای اهمیت بسزایی دارد. بنابراین در پژوهش حاضر، توانایی تهویه طبیعی عبوری ناشی از باد و نیروی شناوری حرارتی در برقراری آسایش حرارتی در یک ساختمان چند ناحیه‌ای (دارای یک پذیرایی، یک آشپزخانه و دو اتاق مستقل) در طول دوران سرمایش در شهرهای مختلف ایران و با استفاده از نرم‌افزار انرژی پلاس [۱۴] بررسی شده است. به‌علاوه، برای ارزیابی شرایط آسایش حرارتی، مدل آسایش حرارتی تطبیقی [۲۰] به کار گرفته شده است که این مدل به‌عنوان مدل آسایش حرارتی کارآمد در محیط‌های دارای تهویه طبیعی در استاندارد اشری ۵۵ [۲۲] معرفی شده است. ساختمان در نظر گرفته شده دارای جهت‌گیری شمالی- جنوبی است و مصالح استفاده شده در دیوارها، سقف، کف و پنجره‌های آن از نوع مصالح متداول در ساختمان‌های ایرانی است. همچنین در ساختمان در نظر گرفته شده، تأثیر وجود عایق در جداره‌های خارجی ساختمان و همچنین تأثیر ضخامت عایق در برقراری آسایش حرارتی ساکنین ساختمان بررسی شده است.



جدول ۱. مصالح استفاده شده در جداره‌های ساختمان نمونه به ترتیب قرارگیری از سمت خارج به سمت داخل

Table 1. Material used in building construction from outside layer to inside layer

دیوار خارجی	سنگ گرانیت	ملات ماسه و سیمان	آجر توپر	عایق پلی‌استایرن	گچ‌وخاک
دیوار مجاور فضای کنترل نشده	گچ سفید	گچ‌وخاک	آجر توپر	عایق پلی‌استایرن	گچ سفید
سقف	آسفالت	ورق ایزوگام	بتن سبک	تیرچه بلوک سیمانی	عایق پلی‌استایرن
پنجره	شیشه با روکش نقره‌ای	هوا	شیشه شفاف		
در	چوب				

جدول ۲. خواص ترموفیزیکی مصالح استفاده شده در ساختمان

Table 2. Thermo-physical properties of materials used in building construction

مواد	رسانندگی گرمایی (W/m.°C)	چگالی (kg/m <sup>۳</sup> )	گرمای ویژه (J/kg.°C)	ضخامت (cm)
سنگ گرانیت	۲/۸	۲۶۰۰	۷۹۰	۲
ملات ماسه و سیمان	۱/۳	۲۰۰۰	۹۰۰	۲
آجر توپر	۱/۱	۱۸۵۰	۷۹۰	۲۲
عایق پلی‌استایرن	۰/۰۳۹	۴۰	۱۲۱۰	۵
گچ‌وخاک	۱/۱	۱۵۰۰	۱۰۹۰	۱/۵
گچ سفید	۰/۵۷	۱۱۵۰	۱۰۹۰	۰/۶
آسفالت	۱/۱۵	۲۱۰۰	۱۲۶۰	۳
ورق ایزوگام	۰/۲۳	۱۰۵۰	۱۲۶۰	۱
بتن سبک	۰/۵۲	۱۵۰۰	۸۸۰	۵
تیرچه بلوک سیمانی	۱	۲۱۰۰	۱۱۷۳	۲۵
چوب	۰/۱۱	۴۵۰	۱۶۳۰	۳

ورودی اتاق‌ها و راه پله بین فضاهای ساختمان جریان یافته و از طرف دیگر آن خارج می‌شود به همین دلیل تهویه از نوع عبوری خواهد بود. نوع مصالح ساختمان دیوارها، کف، سقف و پنجره‌ها در جدول ۱ آورده شده است. لازم به ذکر است مصالح در نظر گرفته شده برای ساختمان نمونه از نوع مصالح متداول در ساختمان‌های ایرانی است. خواص حرارتی مواد استفاده شده در مصالح ساختمان نیز به شرح جدول ۲

شده است. درب ورودی هر اتاق و درب ورودی راه‌پله به پذیرایی به ترتیب دارای ابعاد ۱×۲/۱ متر و ۱/۵×۲/۱ متر هستند. باتوجه به وجود پنجره‌ها در دو طرف ساختمان و درب‌های مشترک بین فضاهای ساختمان، تهویه طبیعی از نوع تهویه عبوری خواهد بود. لازم به ذکر است که در این پژوهش، درب‌های ورودی مربوط به اتاق‌ها و راه پله، به عنوان بازشو در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین جریان هوای وارد شده از طریق پنجره‌های ساختمان، بواسطه درب

جدول ۳. خواص تابشی و حرارتی شیشه‌های استفاده شده در ساختمان

Table 3. Thermal and radiation Properties of glass materials

مواد	شیشه شفاف	شیشه نقره‌ای
رسانندگی گرمایی (W/m.°C)	۱/۱	۱/۱
ضخامت (cm)	۰/۷	۰/۶
ضریب عبور تابشی	۰/۷۷۵	۰/۴۵۵
ضریب انعکاس	۰/۰۷۱	۰/۰۵۳
ضریب عبور نور مرئی	۰/۸۸۱	۰/۴۳۱
ضریب انعکاس نور مرئی	۰/۰۸	۰/۰۵۲
ضریب گسیل مادون سرخ	۰/۸۴	۰/۸۴

است. ضریب هدایت حرارتی و چگالی تمامی مصالح از مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان [۲۵] استخراج شده است. به دلیل اینکه گرمای ویژه در این مبحث موجود نبود برای مقادیر گرمای ویژه این مصالح از دیتابیس خود نرم افزار انرژی پلاس استفاده شده است.

خواص حرارتی و تابشی شیشه نیز در جدول ۳ آورده شده است. لازم به ذکر است که در مطالعه حاضر پنجره‌هایی از نوع دوجداره با قاب پی‌وی‌سی در نظر گرفته شده‌اند. گاز بین جداره‌ها هوا در نظر گرفته شده است. جداره خارجی از نوع شیشه با پوشش نقره‌ای رنگ انتخاب شده است که باعث کاهش تابش عبوری به داخل ساختمان می‌شود. شیشه داخلی نیز از نوع شیشه معمولی است.

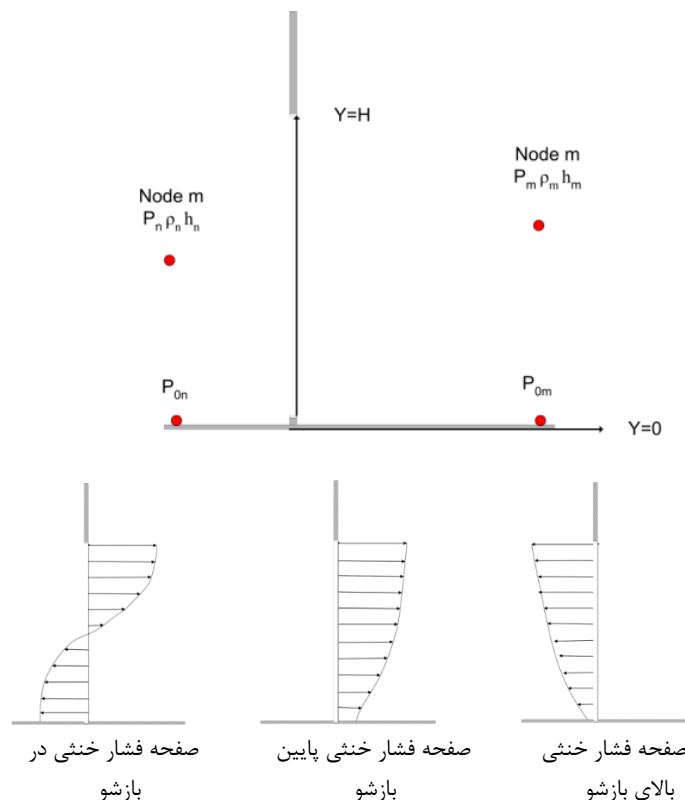
به منظور انجام محاسبات انرژی و ارزیابی بار حرارتی و برودتی ساختمان، تعداد افراد حاضر در پذیرایی و اتاق‌ها به ترتیب دو نفر و یک نفر در نظر گرفته شده است. برای بار حاصل از روشنایی، مقدار لوکس (لومن بر مترمربع) مورد نیاز برای پذیرایی و اتاق خواب با توجه به مبحث ۱۳ مقررات ملی ساختمان [۲۶] برابر با ۲۰۰ لوکس (لومن بر مترمربع) است. با در نظر گرفتن لامپ ال‌ای‌دی برای تمامی فضاها، چگالی توان الکتریکی (بر حسب وات بر مترمربع) مورد نیاز به طور تقریبی برابر با ۳ وات بر مترمربع به دست می‌آید. به همین دلیل بار روشنایی برای تمامی فضاها ۳ وات بر مترمربع در نظر گرفته شده است. برای بار تجهیزات حرارتی نیز با توجه به مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان [۲۵] میزان متوسط توان تجهیزات خانگی برابر با ۴ وات بر مترمربع در نظر گرفته شده است.

۲-۲- شبیه‌سازی تهویه طبیعی با استفاده از شبکه جریان هوا<sup>۱</sup>  
 برای شبیه‌سازی تهویه طبیعی در انرژی پلاس چندین مدل وجود دارد که تمامی این مدل‌ها از روش‌های تجربی و تحلیلی برای محاسبه دبی تهویه استفاده می‌کنند. برخی از مدل‌ها نیز از روش‌های بسیار ساده تجربی استفاده می‌کنند. در مقاله حاضر، از مدل شبکه جریان هوا برای محاسبه نرخ تهویه طبیعی استفاده شده است. این مدل از مجموعه‌ای از گره‌ها تشکیل شده است که در طرفین بازشوها (در، پنجره و درزها) قرار دارند. مدل شبکه جریان هوای اعمال شده در نرم‌افزار انرژی پلاس با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه ملی اوک ریج<sup>۲</sup> و مرکز انرژی خورشیدی فلوریدا<sup>۳</sup> اعتبارسنجی شده است [۲۷]. این روش متشکل از سه مرحله متوالی است:

- ۱- محاسبات فشار و جریان هوا؛
- ۲- محاسبات دمای حباب خشک و نسبت رطوبت در هر گره؛
- ۳- محاسبات بار محسوس و نهان

در مرحله اول فشار در هر گره و دبی جریان هوا در هر بازشو با توجه به مقادیر فشار باد و همچنین نیروهای اجباری ناشی از وسایل تهویه مکانیکی مانند فن با استفاده از روابط ساده تجربی و تحلیلی محاسبه می‌شود. در مرحله بعد دما و نسبت رطوبت در هر گره با معلوم بودن دبی هوا در هر بازشو و دما و رطوبت نسبی محیط داخل و محیط بیرون مشخص می‌شود.

1 Air flow network  
 2 Oak Ridge  
 3 Florida sun energy centre



شکل ۲. شماتیکی از یک بازشوی عمودی با سه الگوی جریان هوای متفاوت [۱۴]

Fig. 2. A schematic of a vertical opening with three different air flow patterns [14]

که اندیس‌های  $n$  و  $m$  به گره‌های ورودی و خروجی اشاره دارد.  $\rho$ ،  $P$  و  $g$  به ترتیب فشار، چگالی هوا و ارتفاع و شتاب ناشی از گرانش هستند. با توجه به شکل ۲ و روابط (۱) و (۲)، در طرفین بازشو فشار بر حسب ارتفاع تغییر می‌کند. به همین دلیل اختلاف فشار بین دو گره نیز بر حسب ارتفاع تغییر خواهد کرد. نقطه‌ای که اختلاف فشار بین دو گره طرفین بازشو صفر می‌شود. صفحه فشار خنثی نامیده می‌شود. مکان صفحه فشار خنثی ممکن است پایین‌تر از بازشو، در بین بازشو و یا بالاتر از بازشو قرار بگیرد. در حالتی که مکان صفحه فشار خنثی پایین‌تر از بازشو یا بالاتر از آن قرار گیرد، در کل بازشو جهت جریان یک‌طرفه است. ولی در صورتی که صفحه فشار خنثی در بازشو قرار داشته باشد. جهت جریان در بالاتر و پایین‌تر از صفحه فشار خنثی متفاوت خواهد بود. الگوهای جریان بر روی بازشو در نمودارهای پایین شکل ۲ بر حسب مکان صفحه فشار خنثی نمایش داده شده است.

در هر ارتفاعی از بازشو، سرعت هوا،  $V(y)$ ، بر حسب اختلاف فشار و از

طریق رابطه (۳) محاسبه می‌گردد [۱۴].

در مرحله آخر با معلوم بودن دما و نسبت رطوبت هر گره بار گرمای محسوس و نهان انتقالی از هر بازشو محاسبه می‌شود. مهم‌ترین مسئله در تهویه طبیعی محاسبه نرخ تهویه طبیعی در هر بازشو است. برای این منظور در طرفین هر بازشو یک گره در نظر گرفته می‌شود و با معلوم بودن فشار این گره‌ها، دبی تهویه با در نظر گرفتن بازشو به‌عنوان یک اریفیس با سطح مقطع زیاد محاسبه می‌شود [۱۴].

شماتیکی از الگوی جریان هوا از یک بازشوی عمودی (در یا پنجره) در شکل ۲ نشان داده شده است. مقدار فشار در هر دو سمت ورودی و خروجی با ارتفاع تغییر می‌کند. معادله هیدرواستاتیک برای محاسبه فشار بر حسب ارتفاع در هر گره مطابق روابط (۱) و (۲) استفاده می‌شود [۱۴]:

$$P_n(y) = P_{0n} - \rho_n g y \quad (1)$$

$$P_m(y) = P_{0m} - \rho_m g y \quad (2)$$

در رابطه (۸)  $U_{Wind}$  سرعت باد اندازه گیری شده توسط ایستگاه هواشناسی در ارتفاع استاندارد ۱۰ متر در یک محیط باز است.  $Z$  ارتفاع ساختمان است.  $k$  و  $a$  به نوع منطقه ساختمان بستگی دارد. مقدار  $k$  و  $a$  برای مناطق شهری به ترتیب ۰/۲۱ و ۰/۳۳ است [۳]. ضریب فشار در انرژی پلاس از معادله تجربی توسعه یافته توسط سوامی و چاندرا محاسبه می شود [۱۴]:

$$C_p = C_{p0} \cdot \ln \left( \begin{array}{l} 1.248 - 0.703 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) - 1.175 \sin^2(\theta) + 0.131 \sin^3(2\theta G) \\ + 0.769 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + 0.07G^2 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) + 0.717 \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{array} \right) \quad (9)$$

در رابطه (۹)  $G$  لگاریتم طبیعی نسبت عرض دیوار دارای باز شو به عرض دیوار مجاور است.  $\theta$  زاویه وزش باد و  $C_{p0}$  ضریب فشار در زاویه باد صفر است (مقدار آن ۰/۶ است).

### ۲-۳- مدل آسایش حرارتی تطبیقی

همان طور که در بخش مقدمه بیان شد، مدل آسایش حرارتی میانگین پیش بینی آرا متداول ترین مدل آسایش حرارتی است. اما این مدل در ساختمان های دارای تهویه طبیعی، مقدار پایین تری برای احساس حرارتی ساکنان در مقایسه با احساس حرارتی واقعی آنها پیش بینی می کند [۱۹]. به سفارش اشری، دیر و براگر [۲۰] برای ساختمان خنک شونده با تهویه طبیعی با استفاده از مطالعات میدانی یک رابطه تجربی برای دمای آسایش فضای داخل ارائه دادند. در این مدل شرایط آسایش حرارتی محیط داخل بر حسب شرایط محیط بیرون متغیر است. این مدل به عنوان جایگزینی برای مدل میانگین پیش بینی آرا در ساختمان های خنک شونده با تهویه طبیعی ارائه شد. در این مدل، دمای آسایش داخل بر حسب میانگین دمای محیط بیرون در یک بازه زمانی مشخص (یک ماه) بیان شده است. این رابطه بر اساس ۲۱۰۰۰ مورد اندازه گیری شده در ۱۶۰ ساختمان به دست آمده است. در مطالعه حاضر این مدل برای بررسی پتانسیل تهویه طبیعی در ساختمان نمونه استفاده خواهد شد.

مدل آسایش حرارتی تطبیقی دیر و براگر [۲۰] شرایط قابل قبول برای ساکنین یک ساختمان خنک شونده با تهویه طبیعی را بیان می کند و در شرایط زیر قابل استفاده است [۲۲]:

هیچ گونه وسیله تهویه مکانیکی (مانند فن) یا تهویه مطبوع (مانند کولر آبی، کولرگازی و یا غیره) برای سرمایش و گرمایش وجود ندارد.

$$(y) = C_d \sqrt{2 \frac{P_n(y) - P_m(y)}{\rho}} \quad (3)$$

که  $C_d$  ضریب تخلیه است که به طور کلی برای بازشوهای عمودی بزرگ ۰/۶ در نظر گرفته می شود [۲۸] رابطه (۳)، در واقع رابطه بین سرعت و اختلاف فشار را در هر ارتفاعی از کف باز شو (در یا پنجره) بیان می کند که همان رابطه اریفیس است.

ارتفاع فشار خنثی از طریق رابطه (۴) محاسبه می شود [۱۴].

$$Y = \frac{P_{0n} - P_{0m}}{\rho(\rho_n - \rho_m)} \text{ or } \frac{P_{0m} - P_{0n}}{\rho(\rho_m - \rho_n)} \quad (4)$$

برای حالتی که ارتفاع خنثی در باز شو قرار می گیرد می توان دبی تهویه را با استفاده از روابط (۵) و (۶) به دست آورد.

$$\dot{m}_{0,Y} = \int_{y=0}^Y \rho V(y) W dy \quad (5)$$

$$\dot{m}_{Y,H} = \int_{y=Y}^H \rho V(y) W dy \quad (6)$$

که در آن  $H$  و  $W$  به ترتیب ارتفاع و عرض باز شو هستند. در گره های خارجی، مطابق رابطه (۷)، فشار با استفاده از سرعت باد و ضریب فشار محاسبه می شود [۱۴].

$$P_w = C_p \rho \frac{U_{ref}^2}{2} \quad (7)$$

در رابطه (۷) فشار باد،  $C_p$  ضریب فشار و  $U_{ref}$  سرعت محلی باد است. سرعت باد گزارش شده توسط ایستگاه هواشناسی در یک محیط باز در ارتفاع ۱۰ متری اندازه گیری می شود. مقدار سرعت باد در محل ساختمان با سرعت باد گزارش شده  $U_{Wind}$  متفاوت خواهد بود. مقدار سرعت محلی باد با استفاده از رابطه (۸) برآورد می شود [۱۴].

$$U_{ref} = U_{wind} k z^a \quad (8)$$

پنجره‌های ساختمان در دو ضلع جنوبی و شمالی در نظر گرفته شده است. برای بررسی پتانسیل تهویه طبیعی در ساختمان نمونه شش شهر تهران، تبریز، یزد، اصفهان، شیراز و بندرعباس با اقلیم‌های متفاوت انتخاب شده است. داده‌های آب‌وهوایی این شهرها توسط ابراهیم‌پور و معرفت [۲۹] در قالب فرمت epw ایجاد شده است و همچنین اطلاعات آب و هوایی برای بیشتر شهرهای جهان در دیتابیس نرم افزار انرژی پلاس قابل دستیابی است [۳۰]. با توجه به بررسی تأثیر تهویه طبیعی در سرمایش ساختمان، بازه زمانی شبیه سازی فصل بهار و تابستان (از ۲۱ مارس تا ۲۲ سپتامبر ماه میلادی) انتخاب شده است.

### ۳-۱- بررسی تأثیر تهویه طبیعی عبوری بر دمای داخل ساختمان

در شکل‌های ۳ تا ۸ توزیع دمای فضای بزرگتر داخلی پذیرایی، محیط بیرون و حد بالا و پایین دما بر اساس رضایت ۸۰ درصدی ساکنین نشان داده شده است. این نمودارها برای ساختمان بدون عایق ترسیم شده است. حد بالا و پایین دما بر اساس رضایت ۸۰ درصدی با استفاده از رابطه (۱۱) حساب شده است. در این رابطه  $T_{a,out}$  بیانگر میانگین دمای محیط در هر ماه میلادی است. در صورتی که دمای اتاق بین خط قرمز ممتد و قرمز خطچین قرار داشته باشد، اتاق در شرایط آسایش حرارتی قرار دارد. در صورتی که دمای اتاق خارج از این محدوده باشد، آسایش حرارتی در فضای داخلی برقرار نیست. لازم به ذکر است که تغییرات دمای دو اتاق دیگر نیز در طول شبیه سازی تفاوت چندانی با تغییرات دمایی پذیرایی ندارد. به همین دلیل نتایج بدست آمده برای اتاق‌ها در این نوشتار ارائه نشده است. همانطور که پیشتر بیان شد، در مدل آسایش حرارتی تطبیقی میانگین دمای محیط بیرون در هر ماه میلادی باید بین ۱۰ و ۳۳/۵ درجه سلسیوس باشد. در خارج از این محدوده این مدل جوابگو نیست و علاوه بر این، استفاده از تهویه طبیعی برای سرمایش ساختمان پیشنهاد نمی‌شود. برای دماهای میانگین ماهانه کمتر از ۱۰ درجه سلسیوس، دمای هوای محیط بیرون پایین است و در این زمان‌ها ساختمان بطور معمول به گرمایش نیاز دارد و با توجه به اینکه کاربرد تهویه طبیعی برای سرمایش ساختمان است، استفاده از تهویه طبیعی برای ساختمان کاربرد ندارد. همچنین در میانگین دمای محیط بالاتر از ۳۳/۵ درجه سلسیوس، با توجه به بالا بودن دمای محیط بیرون، استفاده از هوای محیط بیرون برای سرمایش ساختمان پیشنهاد نمی‌شود. مقادیر حد بالا و پایین بر اساس رضایت ۸۰ درصدی ساکنین برای حالت‌هایی که دمای محیط کمتر از ۱۰ درجه سلسیوس یا بالاتر از ۳۳/۵ درجه

- نرخ متابولیک افراد داخل ساختمان در محدوده ۱ تا ۱/۵ مت است.  
 - بر حسب شرایط داخل و محیط بیرون، ساکنین ساختمان آزادند تا پوشش خود را در محدوده ۰/۵ clo تا ۱ clo تغییر دهند.  
 - میانگین دمای محیط بیرون باید در هر ماه بیشتر از ۱۰ درجه سلسیوس و کمتر از ۳۳/۵ درجه سلسیوس باشد. در صورتی که دما خارج از این محدوده باشد، نمی‌توان از این مدل استفاده کرد. به علاوه در چنین شرایطی استفاده از تهویه طبیعی برای ساختمان توصیه نمی‌گردد.  
 در مدل آسایش حرارتی تطبیقی، دمای بهینه محیط داخل ( $T_{comf}$ ) برای برقراری رضایت حرارتی تمامی ساکنان با استفاده از برازش بر روی داده‌های تجربی به صورت رابطه (۱۰) بیان شده است [۲۰].

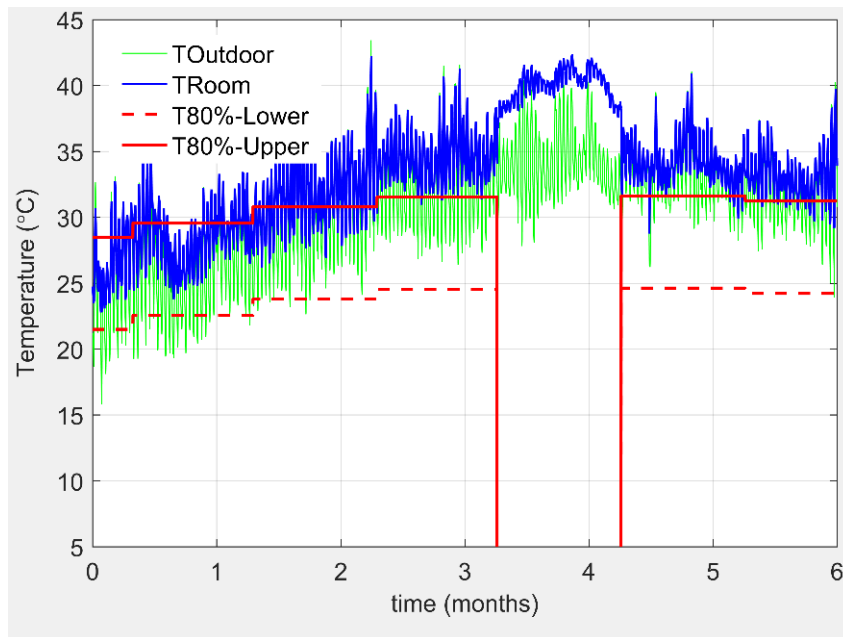
$$T_{comf} = 0.31T_{a,out} + 17.8 \quad (10)$$

در رابطه فوق  $T_{a,out}$  میانگین دمای محیط بیرون در یک بازه زمانی یک ماهه است. در مرحله بعد دیر و براگر [۲۰] یک رابطه ریاضی برای دمای داخل بر اساس رضایت ۹۰ درصد و ۸۰ درصد ساکنان ارائه دادند. برای برقراری رضایت ۹۰ درصد ساکنان، دمای قابل قبول داخل باید ۲/۵ درجه سلسیوس بالاتر یا پایین‌تر از دمای بهینه داخل ( $T_{comf}$ ) باشد. همچنین برای برقراری رضایت ۸۰ درصد ساکنان نیز دمای قابل قبول داخل باید ۳/۵ درجه سلسیوس بالاتر یا پایین‌تر از دمای بهینه داخل ( $T_{comf}$ ) باشد. بر اساس استاندارد اشری/انسی ۵۵ [۲۲] دمای قابل قبول داخل بر اساس رضایت ۸۰ درصد ساکنان باید انتخاب شود که مطابق رابطه (۱۱) بیان می‌شود.

$$T_{comf} = 0.31T_{a,out} + 17.8 \mp 3.5 \quad (11)$$

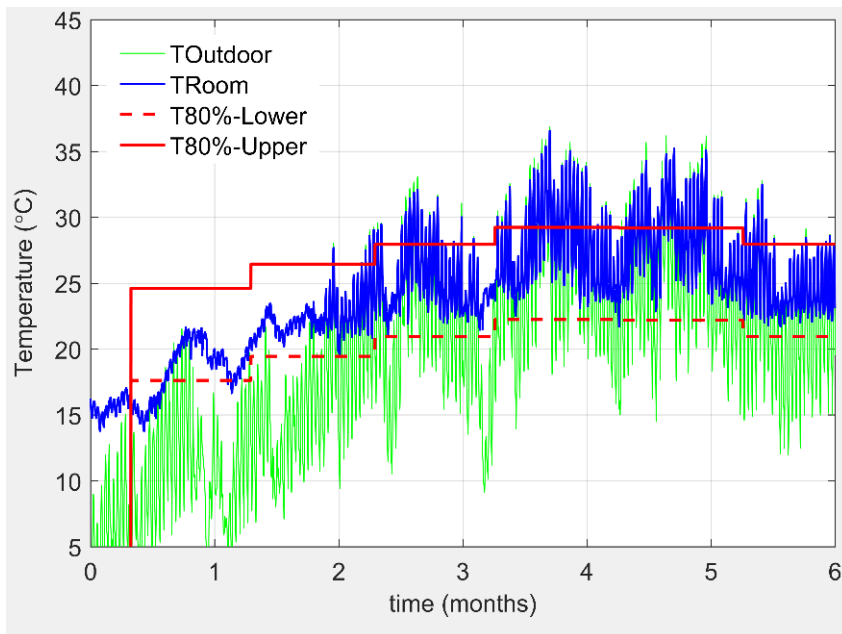
### ۳- بحث و نتیجه گیری

هدف از مطالعه حاضر بررسی پتانسیل تهویه طبیعی عبوری ناشی از نیروهای باد و شناوری در برقراری آسایش حرارتی ساکنان در یک ساختمان با چندین ناحیه است. بدین منظور یک ساختمان نمونه با سه فضای کنترل شده و یک فضای کنترل نشده (راه‌پله) در نظر گرفته شده است. جهت‌گیری ساختمان شمالی - جنوبی در نظر گرفته شده است. دیوارهای غربی و شرقی ساختمان مجاور همسایه در نظر گرفته شده است. به همین دلیل تمامی



شکل ۳. توزیع دمای پذیرایی و محیط بیرون در شهر بندرعباس

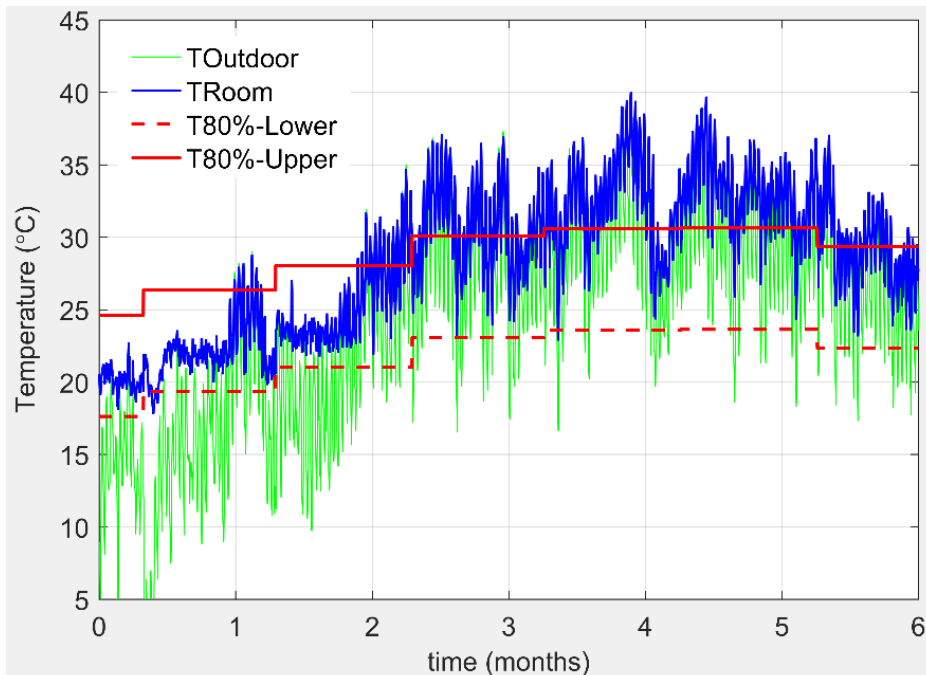
Fig. 3. Temperature variation of living room and outdoor air in Bandar Abbas city



شکل ۴. تغییرات دمای پذیرایی و محیط بیرون در شهر تبریز

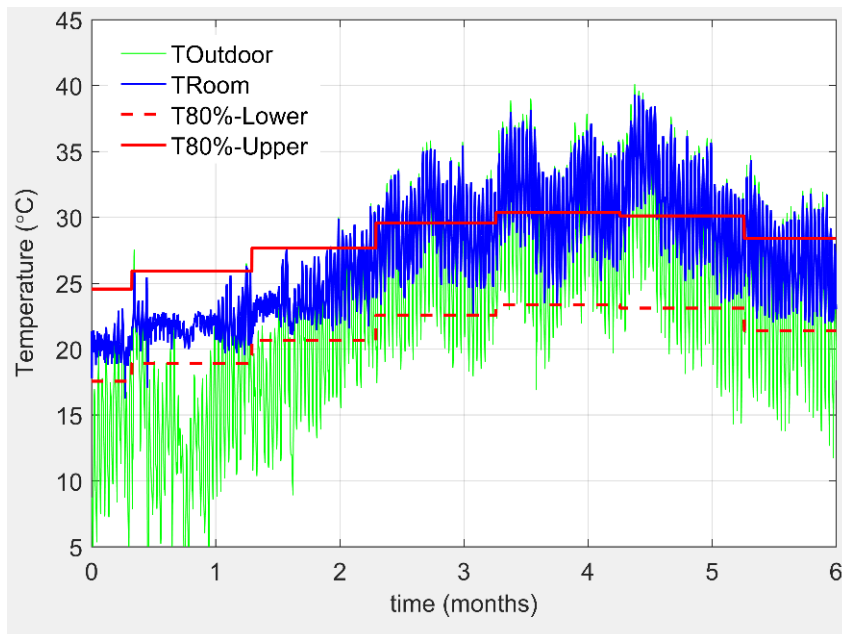
Fig. 4. Temperature variation of living room and outdoor air in Tabriz city





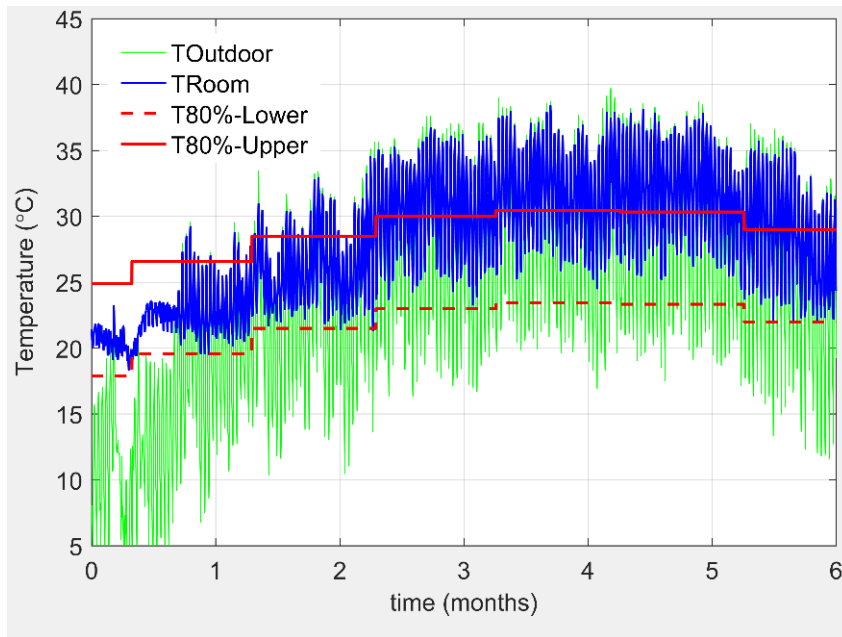
شکل ۵. تغییرات دمای پذیرایی و محیط بیرون در شهر تهران

Fig. 5. Temperature variation of living room and outdoor air in Tehran city



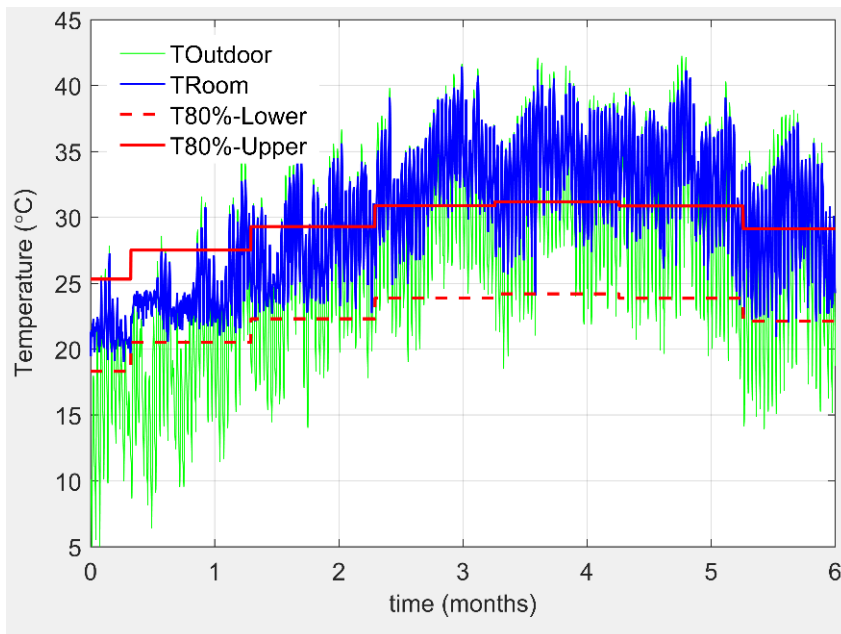
شکل ۶. تغییرات دمای پذیرایی و محیط بیرون در شهر اصفهان

Fig. 6. Temperature variation of living room and outdoor air in Esfahan city



شکل ۷. تغییرات دمای پذیرایی و محیط بیرون در شهر شیراز

Fig. 7. Temperature variation of living room and outdoor air in Shiraz city



شکل ۸. تغییرات دمای پذیرایی و محیط بیرون در شهر یزد

Fig. 8. Temperature variation of living room and outdoor air in Yazd city

می‌شود.

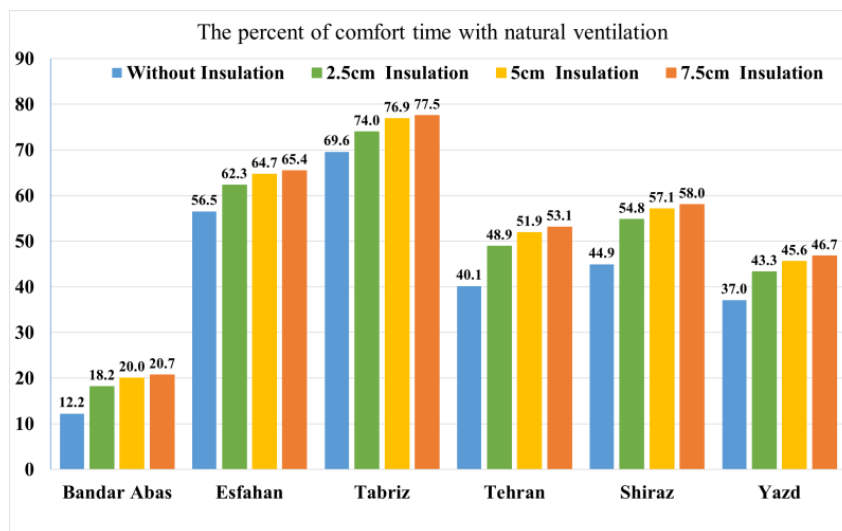
### ۳-۲- بررسی تأثیر استفاده از عایق در دیوارهای خارجی و سقف بر آسایش حرارتی

در این قسمت، تأثیر استفاده از عایق در دیوارهای خارجی و سقف روی آسایش حرارتی ساکنین بررسی شده است. سه ضخامت مختلف عایق، ۲/۵، ۵ و ۷/۵ سانتی‌متر بررسی شده است. در شکل ۹، تأثیر استفاده از تهویه طبیعی در برقراری آسایش حرارتی در ساختمان نمونه با در نظر گرفتن جداره‌های خارجی ساختمان با این سه ضخامت عایق و همچنین حالت بدون عایق نشان داده شده است. محور عمودی این نمودار بیانگر درصد زمان‌هایی در طول ۶ ماه اول سال است که تهویه طبیعی عبوری می‌تواند آسایش حرارتی را برقرار کند. با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود که در ساختمان‌های عایق‌کاری شده شرایط آسایش در ساعت‌های بیشتری برقرار می‌شود. به عنوان مثال برای شهر بندرعباس در ساختمان بدون عایق با استفاده از تهویه طبیعی در ۱۲/۲ درصد ساعت‌های شبیه سازی، آسایش حرارتی در داخل ساختمان برقرار شده است، در حالی که در ساختمان عایق‌کاری شده با ضخامت ۵ سانتی‌متر این مقدار تا ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت عایق از ۲/۵ سانتی‌متر به ۵ سانتی‌متر، درصد ساعت‌های برقراری آسایش برای شهرهای مختلف در حدود ۲ الی ۴ درصد افزایش می‌یابد. همچنین افزایش ضخامت عایق از ۵ سانتی‌متر به ۷/۵ سانتی‌متر ساعات برقراری آسایش حرارتی را در حدود یک درصد افزایش می‌دهد که مقدار قابل توجهی نیست. بنابراین افزایش ضخامت عایق در مقادیر بالاتر از ۵ سانتی‌متر پیشنهاد نمی‌شود. بهترین عملکرد تهویه طبیعی در شهر تبریز مشاهده شده است. با توجه به شکل ۹، برای شهر تبریز برای ساختمان بدون عایق و عایق ۵ سانتی‌متر به ترتیب در حدود ۷۰ درصد و ۷۷ درصد ساعت‌های ۶ ماهه اول سال آسایش حرارتی برقرار شده است. برای شهرهای تهران، اصفهان، شیراز و یزد نیز در ساختمان بدون عایق در بیش از ۳۷ درصد زمان‌های شبیه‌سازی، آسایش حرارتی با اعمال تهویه طبیعی برقرار می‌شود. برای تمامی شهرها نیز با عایق‌کاری جداره‌های ساختمان با ضخامت ۵ سانتی‌متر می‌توان درصد ساعت‌های آسایش حرارتی را در حدود ۸ الی ۱۲ درصد افزایش داد.

سلسیوس باشد، بر روی نمودار با مقادیر صفر نشان داده شده است. در شکل ۳، نمودار دماهای بیان شده برای شهر بندرعباس در فصل بهار و تابستان نشان داده شده است. با توجه به شکل ۳، مشاهده می‌شود که در ماه هفتم میلادی (از ۱۰ تیر تا ۹ مرداد) میانگین دمای ماهانه محیط بیرون بالاتر از ۳۳/۵ درجه سلسیوس است و تهویه طبیعی برای برقراری آسایش ساکنین ساختمان پاسخگو نیست و باید از تهویه مطبوع استفاده شود. در ماه‌های اول و دوم سال با توجه به پایین بودن دمای محیط بیرون، دمای محیط داخل در بیشتر ساعات در بین حد بالا (قرمز ممتد) و حد پایین (قرمز خط‌چین) قرار دارد. لذا برای شهر بندرعباس در این ماه‌ها، امکان برقراری آسایش حرارتی با استفاده از تهویه طبیعی عبوری وجود دارد. ولی در ماه‌های سوم تا ششم با توجه به بالا بودن دمای محیط بیرون، دمای اتاق خارج از محدوده آسایش حرارتی تطبیقی است. لذا تهویه طبیعی در این ماه‌ها نمی‌تواند پاسخگوی آسایش حرارتی ساکنین باشد و استفاده از تهویه مطبوع الزامی است.

شکل ۴ دمای پذیرایی و محیط بیرون را در طول ۶ ماه اول سال شمسی برای شهر تبریز نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که در ۲۰ روز اول سال به علت پایین بودن دمای محیط بیرون ساختمان نیاز به گرمایش دارد و استفاده از تهویه طبیعی مجاز نیست. در بقیه روزهای فصل بهار به طور تقریبی در طول روز، تهویه طبیعی عبوری می‌تواند آسایش حرارتی را بر اساس مدل تطبیقی در داخل ساختمان برقرار کند. در ماه‌های تیر و مرداد نیز در برخی از ساعت‌ها آسایش حرارتی برقرار می‌شود و در برخی از ساعت‌های دیگر برقرار نمی‌شود. برای ماه شهریور به طور تقریبی در تمامی ساعات آسایش حرارتی برقرار شده است. موارد فوق بیانگر پتانسیل بسیار خوب این شهر برای استفاده از تهویه طبیعی عبوری را نشان می‌دهد.

شکل ۵ توزیع دمای پذیرایی و محیط بیرون را در طول ۶ ماه اول سال شمسی برای شهر تهران نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که در طول دو ماه اول سال به طور تقریبی در تمامی ساعت‌ها، دمای داخل ساختمان در محدوده آسایش حرارتی قرار دارد. در بقیه ماه‌های سال نیز در بعضی از ساعت‌ها، دمای محیط داخل در محدوده آسایش حرارتی قرار دارد که نشان‌دهنده پتانسیل خوب تهویه طبیعی عبوری برای برقراری آسایش حرارتی در یک ساختمان نمونه در شهر تهران است. با توجه به شکل‌های ۶ تا ۸ نتایج مشابه شهر تهران برای شهرهای اصفهان، شیراز و یزد مشاهده



شکل ۹. درصد ساعت‌های برقراری آسایش حرارتی در فصل بهار و تابستان در ساختمان نمونه عایق کاری شده و بدون عایق

Fig. 9. The percent of comfort hours in spring and summer for insulated and non-insulated sample building

طبیعی عبوری در بیش از ۶۹ درصد ساعت‌ها آسایش حرارتی برقرار شده است. ضعیف‌ترین عملکرد در شهر بندر عباس مشاهده شده است برای این شهر در حدود ۱۲ درصد از زمان‌های در نظر گرفته شده، آسایش حرارتی در ساختمان بدون عایق برقرار شده است. این مقدار برای شهر تهران، اصفهان، شیراز و یزد به ترتیب حدود ۴۰، ۵۶، ۴۵ و ۳۷ درصد بدست آمده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از عایق در جداره‌های خارجی ساختمان ساعت‌های برقراری آسایش حرارتی در مقایسه با ساختمان بدون عایق افزایش می‌یابد. با افزایش ضخامت عایق از مقدار ۲/۵ سانتی‌متر به ۵ سانتی‌متر درصد ساعت‌های برقراری آسایش در محدوده ۲-۴ درصد افزایش می‌یابد. افزایش ضخامت عایق به مقادیر بزرگتر از ۵ سانتی‌متر به دلیل تأثیر ناچیز بر درصد ساعت‌های برقراری آسایش حرارتی پیشنهاد نمی‌شود. مقدار افزایش درصد ساعت‌های برقراری آسایش حرارتی برای ساختمان با عایق ۵ سانتی‌متر در مقایسه با ساختمان بدون عایق برای تمامی شهرها در محدوده ۸-۱۲ درصد است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر به بررسی آسایش حرارتی در یک ساختمان نمونه چند ناحیه‌ای (متشکل از یک پذیرایی، یک آشپزخانه و دو اتاق) با اعمال تهویه طبیعی عبوری پرداخته شده است. پنجره‌های این ساختمان در ضلع جنوبی و شمالی قرار گرفته‌اند. برای بررسی آسایش حرارتی از مدل آسایش حرارتی تطبیقی استاندارد اشری ۵۵ استفاده است که مناسب ساختمان‌های خنک شونده با تهویه طبیعی است. مدل شبکه جریان هوا برای محاسبه نرخ تهویه از بازشوها استفاده شده است. شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار انرژی پلاس در بازه زمانی یک فروردین تا ۳۱ شهریور انجام گرفته است. شبیه‌سازی‌ها در شش شهر مختلف ایران، بندرعباس، تبریز، تهران، اصفهان، شیراز و یزد انجام گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد شهر تبریز بهترین عملکرد را داشته است. برای این شهر به طور تقریبی در تمامی ساعت‌های بهار و در بسیاری از ساعت‌های فصل تابستان با اعمال تهویه طبیعی، آسایش حرارتی برقرار شده است. به طوری که برای ساختمان بدون عایق با اعمال تهویه

## ۵- فهرست علائم

### علائم انگلیسی

- cross ventilation and single-sided ventilation, *Building and Environment*, vol. 187(2021) 107386.
- [4] L. Moosavi, N. Mahyuddin, N. Ab Ghafar, M. Azzam Ismail, Thermal performance of atria: An overview of natural ventilation effective designs, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34(2014) 654–670.
- [5] N. Khan, Y. Su, S. B. Riffat, A review on wind driven ventilation techniques, *Energy and Buildings*, 40( 8) (2008) 1586–1604.
- [6] L. Yang, G. Zhang, Y. Li, Y. Chen, Investigating potential of natural driving forces for ventilation in four major cities in China, *Building and Environment*, 40(6) (2005) 738–746.
- [7] F. Jomehzadeh, H. M. Hussien, J. K. Calautit, P. Nejat, and M. S. Ferwati, “Natural ventilation by windcatcher (Badgir): A review on the impacts of geometry, microclimate and macroclimate,” *Energy and Buildings*, 226(2020) 110396.
- [8] S. Omrani, V. Garcia-Hansen, R. Drogemuller, B. R. Capra, Thermal comfort evaluation of natural ventilation mode: Case study of a high-rise residential building, Fifty years later: Revisiting the role of architectural science in design and practice: 50th International Conference of the Architectural Science Association, The University of Adelaide, (2016) 1–9.
- [9] L. C. Haw, O. Saadatian, M. Y. Sulaiman, S. Mat, K. Sopian, Empirical study of a wind-induced natural ventilation tower under hot and humid climatic conditions, *Energy and Buildings*, 52 (2012) 28–38.
- [10] J. Wang, T. Zhang, S. Wang, F. Battaglia, Numerical investigation of single-sided natural ventilation driven by buoyancy and wind through variable window configurations, *Energy and Buildings*, 168(2018) 147–164.
- [11] S. Omrani, V. Garcia-Hansen, B. R. Capra, R. Drogemuller, Effect of natural ventilation mode on thermal comfort and ventilation performance: Full-scale

$C_D$	ضریب تخلیه
$C_P$	ضریب فشار
$c_P$	گرمای ویژه، $J/(kg^\circ C)$
$g$	شتاب گرانش $m/s^2$
$H$	ارتفاع بازشو، $m$
$k$	رسانندگی گرمایی، $W/(m^\circ C)$
$\dot{m}$	دبی جرمی تهویه، $kg/s$
$P$	فشار، $Pa$
$T_{comf}$	دمای آسایش، $^\circ C$
$T_{a,aut}$	میانگین ماهانه دمای محیط بیرون، $^\circ C$
$U_{Ref}$	سرعت محلی باد، $m/s$
$U_{Wind}$	سرعت باد گزارش شده توسط ایستگاه هواشناسی، $m/s$
$W$	عرض بازشو، $m$
$y$	ارتفاع، $m$

### علائم یونانی

$\rho$	چگالی، $kg/m^3$
$\theta$	زاویه وزش باد

### زیرنویس

$n, m$	گره‌ها
Wind	باد

## منابع

- [1] H. Zhang, D. Yang, V. W.Y. Tam, Y. Tao, G. Zhang, S. Setunge, L. Shi., A critical review of combined natural ventilation techniques in sustainable buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141 (2021) 110795
- [2] M. Nomura, K. Hiyama, A review, Natural ventilation performance of office buildings in Japan, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74 (2017) 746–754.
- [3] S. Fan, M. S. Davies Wykes, W. E. Lin, R. L. Jones, A. G. Robins, P. F. Linden, A full-scale field study for evaluation of simple analytical models of

- Energy and buildings, 34(6) (2002) 549-561.
- [21] ASHRAE, ASHRAE Handbook 2017 -Fundamentals: SI Edition. 2017.
- [22] ASHRAE, ANSI/ASHRAE Standard 55-2020 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. 2020.
- [23] Z. Tong, Y. Chen, and A. Malkawi, Estimating natural ventilation potential for high-rise buildings considering boundary layer meteorology, *Applied Energy*, 193 (2017) 276–286.
- [24] G. Elshafei, A. Negm, M. Bady, M. Suzuki, and M. G. Ibrahim, Numerical and experimental investigations of the impacts of window parameters on indoor natural ventilation in a residential building, *Energy and Buildings*, 141(2017) 321–332.
- [25] Road, Housing and Urban Development Research Center, National Building Regulations, code 19: Energy Savings. Tehran, Iran, 2020 (In Persian).
- [26] Road, Housing and Urban Development Research Center, National Building Regulations, code 13: Design and implementation of electrical installations of buildings. Tehran, Iran, 2016 (In Persian).
- [27] L. Gu, Airflow network modeling in EnergyPlus, in: 10th International Building Performance Simulation Association Conference, Tsinghua University, Beijing, China, 2007, pp. 964-972.
- [28] J. Wang, S. Wang, T. Zhang, and F. Battaglia, Assessment of single-sided natural ventilation driven by buoyancy forces through variable window configurations, *Energy and Buildings*, 139 (2017) 762–779.
- [29] A. Ebrahimpour, M. Maerefat, A method for generation of typical meteorological year, *Energy Conversion and Management*, 51(3) (2010) 410–417.
- [30] Weather Data. <https://energyplus.net/weather>.
- measurement, *Energy and Buildings*, 156 (2017) 1–16.
- [12] M. K. Esfeh, A. Sohankar, A. R. Shahsavari, M. R. Rastan, M. Ghodrat, M. Nili, Experimental and numerical evaluation of wind-driven natural ventilation of a curved roof for various wind angles, *Building and Environment*, 205 (2021) 108275.
- [13] X. Zhang, A. U. Weerasuriya, and K. T. Tse, CFD simulation of natural ventilation of a generic building in various incident wind directions: Comparison of turbulence modelling, evaluation methods, and ventilation mechanisms, *Energy and Buildings*, 229 (2020) 110516.
- [14] DOE, EnergyPlus Version 9.6.0 Documentation Engineering Reference. U.S. Department of Energy, 2021.
- [15] Natural ventilation modelling. [https://designbuilder.co.uk/helpv2/Content/\\_Natural\\_ventilation\\_modelling.htm](https://designbuilder.co.uk/helpv2/Content/_Natural_ventilation_modelling.htm).
- [16] S. A. Mousavian, M. Maerefat, R. Madahian, B. M. Kari, Tips on Application of Natural Ventilation in Prevalent Buildings in Iran, *Amirkabir Journal Mechanical Engineering*, 53(3) (2021) 1621-1636.
- [17] R. Aeinehvand, A. Darvish, A. B. Daemei, S. Barati, A. Jamali, V. M. Ravasjan, Proposing alternative solutions to enhance natural ventilation rates in residential buildings in the CFA climate zone of rasht, *Sustainability*, 13(2) (2021) 1–18.
- [18] R. Vakilinezhad, J. Shaeri, Evaluation of Thermal Comfort Zone in Naturally Ventilated Offices in Bushehr. *Hoviatshahr*, 14(4) (2020) 61-72.
- [19] P. O. Fanger, J. Toftum, Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates. *Energy and buildings*, 34(6) (2002) 533-536.
- [20] R. J. De Dear, G. S. Brager, Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55.



چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Minaei, N. Moallemi Khiavi, *Thermal Comfort Evaluation for Naturally Ventilated Building Applying an Adaptive Model in Different Cities of Iran*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(11) (2023) 2663-2680.

**DOI:** 10.22060/mej.2023.21654.7486



