



CFD Simulation Investigation for Flow of Inside and Outside of Building: Impact of the Window Dimensions and the Wind Directions

Ahmad Shaker¹, Esmaeil Ebrahimi Fordoei²

¹ Department of Mechanical Engineering, Kashan University, Kashan, Iran

² Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran

ABSTRACT: Studying airflow inside and outside a building is crucial for optimizing natural ventilation. A key factor influencing these flows is the size of the inlet and outlet openings on the building's walls. This study investigates the effect of this parameter using RANS equations in steady-state, three-dimensional conditions, with the SST- $k\omega$ turbulence model. Models with identical cross-sectional areas at the building's inlet but different aspect ratios were used. The highest and lowest air flow rates into the building were observed in models with aspect ratios of 1.56 and 0.39, respectively. To examine the impact of wind direction on air flow rate, wind angles from 0 to 75 degrees were analyzed. Results show that air flow rate becomes independent of inlet dimensions at wind angles greater than 30 degrees. Additionally, increasing window height leads to a decrease in high-velocity regions inside the building, while low-velocity and stagnation areas expand. Pressure coefficient analysis on the building's exterior reveals that pressure variations on the windward wall are greater than on the leeward wall. This study highlights the importance of opening dimensions and wind direction in determining airflow behavior, providing valuable insights for enhancing natural ventilation strategies.

Review History:

Received: Jul. 08, 2024

Revised: Feb. 01, 2025

Accepted: Feb. 02, 2025

Available Online: Feb. 07, 2025

Keywords:

Numerical Study

Opening Dimension

Ventilation Rate

Aspect Ratio

Wind Angel

1- Introduction

Natural ventilation plays a vital role in indoor air quality, thermal comfort, and building energy consumption [1]. Natural ventilation has garnered significant attention in recent years due to its role in achieving zero carbon emissions and its positive impact on human health. In modern societies, individuals spend more time indoors, leading to an increased demand for thermal comfort and indoor air quality. Consequently, this heightened demand has resulted in excessive energy consumption by heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems. To reduce building energy consumption and carbon emissions, natural ventilation has emerged as a viable alternative for maintaining optimal thermal comfort inside buildings. Recently, with the growing importance of energy consumption reduction and the emergence of situations such as the COVID-19 pandemic [2], the study of natural ventilation processes has gained considerable attention among researchers. This study focuses on the application of natural ventilation in buildings, specifically examining the relationship between the volumetric airflow rate into the building, occupant comfort in terms of airflow distribution, and pressure distribution under various conditions. This approach to analyzing natural ventilation processes is seldom explored in literature. The study investigates the influence of inlet and outlet dimensions

on airflow within a building under varying wind directions, considering these dimensions as a key parameter in building ventilation. The dimensions were selected such that all models had identical inlet cross-sectional areas but varying aspect ratios, creating different geometric shapes. A numerical simulation of a one-story building with two windows at the front and rear was conducted using computational fluid dynamics (CFD). The SST- $k\omega$ turbulence model was employed due to its accurate results in comparison with other numerical and experimental studies. Based on the boundary conditions, optimal ventilation rates were determined to aid in reducing energy consumption for building ventilation.

2- Methodology and physical modeling

To numerically investigate the effects of window dimensions and wind direction, ANSYS Fluent 18 [3] was used for the analysis. The study employed the RANS equations in a steady-state, three-dimensional framework, coupled with the SST- $k\omega$ turbulence model for simulating turbulent flow. To compute the wind flow around the building using the SST- $k\omega$ turbulence model, the continuity and momentum equations, along with the equations for the turbulence parameters k and ω , were solved. Six fundamental equations are required to solve this flow, which are commonly used in CFD simulations. These include one continuity equation,

*Corresponding author's email: ebrahimifordoei@tafreshu.ac.ir



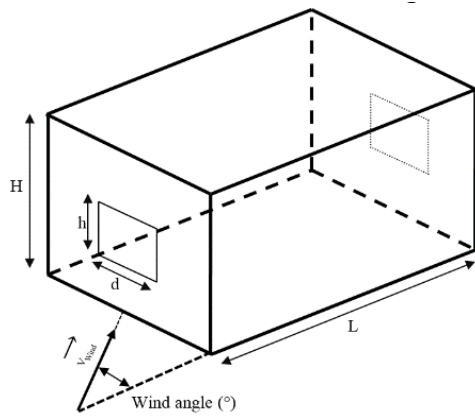


Fig. 1. The schematic of the modeling process includes the building model and the definition of the wind direction angle.

three momentum equations in the x, y, and z directions, one equation for k, and one for ω . The unknown parameters to be determined include the velocity components in the x, y, and z directions, pressure (p), turbulence kinetic energy (k), specific dissipation rate (ω), and turbulence viscosity (μ_t). These parameters are typically calculated using the governing equations and boundary conditions. The SIMPLE algorithm was employed to link velocity and pressure. The discretization of the terms related to viscosity and convection was carried out using second-order approximation. Convergence criteria for parameter ω were set to 10^{-4} , for parameter k to 10^{-5} , and for the velocity components to 10^{-6} . Also, Figure 1 presents the overall parameterized range under investigation, as well as the definition of the wind direction angle.

The dimensions of the building models in terms of length, width, and height are 100, 100, and 80 mm, respectively, corresponding to a real building size of 20, 20, and 16 m. The models examined in this study have identical building dimensions but differ in window sizes. To introduce and differentiate between the models, the aspect ratio, obtained by dividing the height by the width of the windows, is used. This ratio is calculated using the following equation.

$$AR = \frac{h}{d} \tag{1}$$

3- Discussion and Results

To validate the obtained results, a comparison was made with the experimental study conducted by Karava [4] at Concordia University, Canada, and the numerical study performed using the LES method by Chu and Chiang [5]. The comparison of the obtained results with the two studies conducted by the aforementioned references shows a nearly satisfactory alignment between the results.

The results obtained for different window dimensions, shown in Figure 2, indicate that the highest ventilation rate

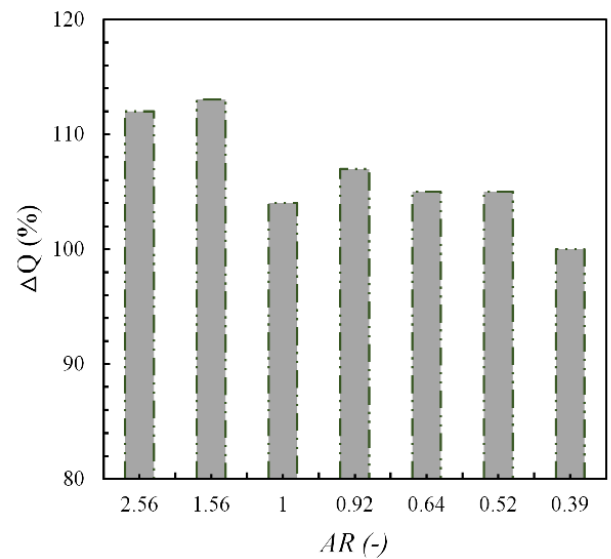


Fig. 2. The percentage increase in volumetric flow rate for models with varying window dimensions at a 0° wind angle compared to the reference model

occurs in the model with an aspect ratio of 1.56, while the lowest rate is observed in the model with an aspect ratio of 0.39. Additionally, as the width-to-height ratio of the window increases, the overall flow rate decreases.

The results indicate that for wind angles greater than 20°, an increase in the wind angle leads to a significant decrease in the ventilation rate. However, in models with wind angles less than 20°, no noticeable changes are observed at a given aspect ratio. Additionally, the analysis of the velocity profile changes at points along the line connecting the centers of the building's inlet and outlet, located in the building's mid-plane, shows that the velocity variation within the building ($0.2 < y/L < 1$) follows the same trend for different aspect ratios. In the central region of the building ($0.4 < y/L < 0.8$), due to the constant cross-sectional area and steady flow rate, the velocity remains almost constant until it reaches the window located on the leeward wall. In the area adjacent to the window located on the leeward wall of the building, within the interior space ($0.8 < y/L < 1$), the flow speed increases due to the reduced cross-sectional area caused by the presence of the window. After passing through the window, the flow experiences a decrease in speed. The analysis of the 3D contour of flow lines in Figure 3 shows that when the wind strikes the windward wall, a portion of it moves towards the sides, while another portion moves upward. On the other hand, in the regions closer to the ceiling, the flow tends to move from the entry to the exit. The volume of air flowing upward, which is created after striking the wall, essentially acts as an obstacle to the flows that are moving from the entry to the exit at ceiling height. The presence of this obstacle leads to the formation of flow vortices at the initial part of the building's roof.

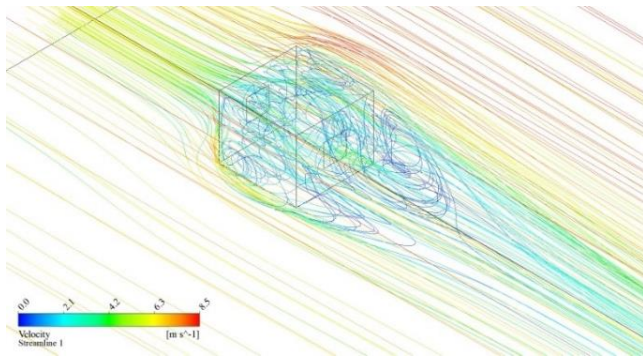


Fig. 3. 3D contour of flow lines inside and outside the building model

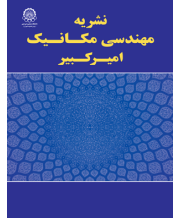
4- Conclusions

One of the influencing parameters on the internal and external flow and ventilation rate of the building is the window dimensions, which, in this study, have been examined alongside different wind angles. In this study, the flow both inside and outside the building has been investigated simultaneously. The highest ventilation rate in the building was observed in the model with a ratio of 1.56, while the lowest ventilation rate was found in the model with a ratio of 0.39. As the height of the windows increases, the high-speed

areas within the interior of the building decrease, while the areas of low speed and stagnation increase. The use of square windows, as well as windows with greater height compared to those with wider dimensions, has a greater impact on the stagnant area. Additionally, the pressure variations in the area opposite the windward wall are greater across different models than in the area behind the leeward wall.

References

- [1] Z. Jiang, T. Kobayashi, T. Yamanaka, M. Sandberg, A literature review of cross ventilation in buildings, *Energy and Buildings*, 291 (2023) 113143.
- [2] W. Su, Z. Ai, J. Liu, B. Yang, F. Wang, Maintaining an acceptable indoor air quality of spaces by intentional natural ventilation or intermittent mechanical ventilation with minimum energy use, *Applied Energy*, 348 (2023) 121504.
- [3] ANSYS fluent user's guide, release 19.0, ANSYS Inc, Canonsburg, (2018).
- [4] P. Karava, "Airflow Prediction in Buildings for Natural Ventilation Design: Wind Tunnel Measurements and Simulation.", Phd thesis, Concordia University, Montreal Quebec, (2008).
- [5] C. Chu, B. Chiang, Wind-driven cross ventilation in long buildings, *Building and Environment* 80 (2014) 150-158.



بررسی عددی تأثیر ابعاد پنجره و زاویه وزش باد بر جریان داخل و خارج ساختمان

احمد شاکر^۱، اسماعیل ابراهیمی فردویی^{۲*}

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۸

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۴

ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۱۱/۱۹

کلمات کلیدی:

مطالعه عددی

ابعاد ورودی

نرخ تهویه

نرخ تناسب

زاویه وزش باد

خلاصه: بررسی جریان داخل و خارج ساختمان ناشی از جریان هوا در اطراف و داخل ساختمان یکی از راهکارهای مؤثر در بهره‌مندی بیشتر از پتانسیل تهویه طبیعی می‌باشد. یکی از پارامترهای مؤثر بر این جریان‌ها، ابعاد ورودی و خروجی‌های واقع بر دیواره‌های ساختمان می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از معادلات ناولر-استوکس میان‌گیری شده در حالت دائمی و سه بعدی به همراه مدل توربولانسی انتقال تنش برشی، به مطالعه تأثیر این پارامتر مهم پرداخته شده است. بدین منظور از مدل‌هایی با سطح مقطع ورودی یکسان و نرخ تناسب مختلف استفاده شده است. بیشترین و کمترین میزان نرخ دبی حجمی هوای ورودی به ساختمان به ترتیب در مدل‌های با نرخ تناسب ۱/۵۶ و ۰/۳۹ مشاهده شده است. به منظور ارزیابی تأثیر زاویه وزش باد، زاویه‌های وزش ۰ تا ۷۵ درجه بررسی گردیده است. تحلیل نتایج نشان می‌دهد، این نرخ در زاویه‌های وزش بیش از ۳۰ درجه، مستقل از ابعاد مقطع ورودی هوا به ساختمان است. با افزایش ارتفاع پنجره‌ها، از گستره نواحی سرعت بالا در نواحی داخلی ساختمان کاسته شده و بر نواحی سکون و با سرعت پایین افزوده می‌شود. تحلیل ضریب فشار در ناحیه خارج از ساختمان نشان می‌دهد در دیواره رو به باد تغییرات فشار بیشتر از دیواره پشت به باد می‌باشد.

۱- مقدمه

شرایط مشابه انتشار ویروس کووید پرداخته و معیارها و دستورالعمل‌های جدیدی را برای طراحی و عملکرد سیستم‌های تهویه مطبوع و همچنین راهنمایی‌های مفید برای انتشار استانداردهای تهویه جدید ارائه نموده‌اند. اهمیت تهویه فضای داخلی ساختمان به گونه‌ای است که در طول همه‌گیری ویروس مذکور، چندین دستورالعمل چینی پیشنهاد کرده‌اند که پنجره‌های اتاق‌های خانگی برای ایزوله کردن افراد آلوده و کلاس‌هایی که مجهز به تهویه مکانیکی نیستند، باید حداقل دو بار در روز به مدت ۳۰ دقیقه می‌بایست باز شوند [۳].

با توجه به اهمیت بررسی نحوه تهویه داخل ساختمان و همچنین پیشرفت روز افزون دانش بشری در زمینه بکارگیری از تجهیزات محاسباتی، استفاده از روش‌های مطالعه عددی نیز در سال‌های اخیر در این زمینه مورد توجه قرار گرفته است؛ به عبارت دیگر، بررسی جریان ساختمان با بهره‌گیری از روش‌های عددی، نتایج سودمندی را در پی خواهد داشت. تحلیل تهویه طبیعی با کمک روش‌های عددی از دو روش امکان‌پذیر است که عبارتند از روش مجزا و روش ترکیبی [۴]. در روش مجزا، ابتدا جریان اطراف ساختمان

استفاده از انرژی باد در ساختمان که به منظور ایجاد جریان هوا در داخل ساختمان صورت می‌گیرد، سبب می‌شود تا فرآیند تهویه طبیعی در فضای داخلی ساختمان انجام شود. تهویه طبیعی نقشی حیاتی در کیفیت هوای داخل ساختمان، آسایش حرارتی و مصرف انرژی ساختمان دارد [۱]. بسیاری از ساختمان‌ها به دلیل فقدان تهویه طبیعی کافی یا عملکرد نامناسب دستگاه‌های تهویه مکانیکی در زمینه تهویه دارای مشکلاتی می‌باشند. فرآیند تهویه طبیعی در اثر نیروی بویانسی، انرژی باد و در برخی موارد در حضور هر دو پارامتر صورت می‌پذیرد. شیوع کووید-۱۹ توجه زیادی را به اهمیت کیفیت هوای داخل ساختمان‌ها جلب کرد. حال با کاهش روند انتشار این ویروس، مشخص شده است که افزایش نرخ جریان هوای بیرون برای کاهش احتمال سرایت، کاهش خطر همه‌گیری‌های آلودگی و افزایش ایمنی عمومی محیط داخلی نیز مفید است. بر این اساس به عنوان نمونه، بونامانو و همکاران [۲] به ارزیابی کارایی استانداردهای تهویه فعلی در مواجهه با

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ebrahimifordoei@tafreshu.ac.ir



در خارج ساختمان و همچنین وجود تجهیزات داخل می‌باشد. بعنوان مثال، منتظری و بلوکن [۱۱] در پژوهشی به بررسی تأثیر وجود و یا عدم وجود بالکن در ساختمان پرداخته‌اند و تفاوت وجود و یا عدم وجود بالکن را با مقایسه بین ضریب فشار در دو حالت بررسی نموده‌اند. وجود اختلاف ۳۰٪ در برخی نواحی بین دو حالت ذکر شده، بیانگر این است که هندسه خارجی ساختمان در تعیین شرایط جریانی داخلی و خارجی ساختمان نقش به‌سزایی دارد. در یکی دیگر از پژوهش‌های انجام شده توسط چو و چیانگ [۱۲] مطالعات عددی و تجربی بر روی مدل‌های دارای مانع عمود شکل در ساختمان صورت گرفته است. این گروه تمرکز خود را بر روی موضوعاتی نظیر موقعیت مانع، ابعاد ساختمان و محل نصب پنجره‌ها معطوف کرده است. در نمونه‌ای دیگر، چو و همکارانش [۱۳] یک ساختمان که توسط یک دیواره به دو قسمت تقسیم شده است، به عنوان مدل تحقیقاتی خود انتخاب کرده‌اند. این گروه با استفاده از آزمایش تونل باد، تأثیر تغییر پارامترهای مؤثر را بررسی نموده‌اند که از جمله آن‌ها تغییر مساحت مقاطع ورودی، خروجی ساختمان و مساحت درب اتصال دو قسمت فضای داخلی ساختمان می‌باشند. در حل مسائل مربوط به جریان آشفته، انتخاب مدل آشفتگی از اهمیت بالایی برخوردار است. در مدل‌سازی مربوط به هندسه ساختمان نیز در مراجع مختلف، مدل‌های مختلفی استفاده شده است. بررسی‌های عددی صورت گرفته در زمینه مدل‌سازی جریان در داخل و خارج ساختمان معمولاً با بهره‌گیری از معادلات ناویر-استوکس میان‌گیری شده^۱ به کمک مدل‌های دو معادله‌ای [۹، ۱۱، ۱۴-۱۶] یا با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۲ [۱۷-۱۹] انجام شده است.

امروزه تهویه طبیعی به دلیل انتشار کربن صفر و عملکرد خوب آن بر سلامت انسان، توجهات زیادی را به خود اختصاص داده است. افراد در جوامع مدرن زمان بیشتری را جهت اقامت و فعالیت در داخل خانه صرف می‌نمایند؛ بنابراین افزایش نیاز به آسایش حرارتی و کیفیت هوای داخلی منجر به مصرف انرژی زیاد توسط سیستم‌های گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع می‌شود. در واقع به منظور کاهش مصرف انرژی ساختمان و انتشار کربن، موضوع تهویه طبیعی به یک جایگزین شایسته برای تأمین آسایش حرارتی مطلوب داخل ساختمان تبدیل شده است. در سال‌های اخیر با توجه به افزایش اهمیت کاهش مصرف انرژی و وقوع شرایطی نظیر انتشار ویروس کرونا، بررسی فرآیند تهویه طبیعی مورد توجه محققین قرار گرفته است. در مطالعه حاضر نیز سعی شده است نحوه استفاده از فرآیند تهویه طبیعی در ساختمان مورد

در حضور ساختمان بدست آمده و سپس با استفاده از توزیع فشار بدست آمده، جریان داخل ساختمان بدست می‌آید. در روش دوم تحلیل جریان داخل و خارج به صورت همزمان انجام می‌گیرد. از بین رفتن تأثیر انرژی جنبشی آشفتگی در دیواره رو به باد و همچنین نادیده گرفتن تأثیر فشار دینامیک سیال در هنگام عبور از سطح مقطع باز، از دلایل عدم کارایی روش مجزا می‌باشند [۴]، لذا نتایج روش ترکیبی نسبت به روش مجزا از دقت بالاتری برخوردار است. ژانگ و همکاران [۵] در تحقیقات خود تأثیر حضور دهانه‌ها را در تهویه یک فضای عمومی با استفاده از شبیه‌سازی عددی بررسی نموده‌اند. نتایج نشان می‌دهد، استفاده از یک دهانه بزرگ‌تر روی سطح بادگیر یا سطح پشت به باد در پیکربندی دارای دو بازشو، منجر به دستیابی به نرخ تهویه بالاتر و گردش باد بهتر در فضای داخلی نسبت به سایر پیکربندی‌ها می‌گردد. همچنین نرخ تهویه را می‌توان با جانمایی چندین دیوار داخلی باریک به جای یک دیوار عمودی عریض و قرار دادن دیوارهای افقی بالاتر از ارتفاع بازشو به حداقل رساند. کالدرون و همکاران [۶] به کمک توزیع فشار اطراف ساختمان، جریان داخل ساختمان را به روش عددی و تجربی ارزیابی نموده‌اند. بررسی‌های ایشان نشان می‌دهد ارتباط مستقیمی بین نرخ تخلخل دیواره‌ها و پارامتر سرعت وجود ندارد. توزیع نیروی آیرودینامیکی و ضریب فشار بر روی سقف ساختمان‌های کم ارتفاع، متوسط و بلند توسط جسون و همکاران [۷] بررسی شده است. در یک پژوهش انجام شده توسط ون هوف و بلوکن [۸] جریان هوا در محدوده ورزشگاه آمستردام آرنا در کشور هلند مورد مطالعه قرار گرفته است و اعمال تغییر پیشنهادی توسط آن‌ها توانسته است نرخ تهویه را تا ۴۳٪ نسبت به حالت اولیه افزایش دهد. در پژوهشی دیگر، جیمز و چون هو [۹] در تحقیق خود به تأثیرات وجود ساختمان‌های مجاور بر روی تهویه طبیعی ساختمان مرجع پرداخته‌اند. نتایج کار این گروه بیانگر این مطلب است که افزایش جابجایی عرضی ساختمان‌ها، می‌تواند یکی از راه‌کارهای افزایش استفاده از فرآیند تهویه طبیعی در مناطق دارای تراکم ساختمانی بالا باشد. وو و همکارانش [۱۰] به منظور بررسی و بهبود فرآیند تهویه مرکز فرهنگی جی‌یابو تحقیقاتی انجام داده‌اند. در مدل‌سازی عددی انجام شده توسط این گروه حرکت باد در داخل ساختمان شبیه‌سازی گردیده است. به منظور بهبود وضعیت تهویه این بنا، تغییراتی توسط این گروه بر روی جداره رو به باد کلبه و همچنین قسمت اماکن اعمال شده است که می‌تواند نرخ دبی هوای ورودی را تا ۱۰۴٪ نسبت به طرح اولیه افزایش دهد.

از دیگر موارد تأثیرگذار بر روی جریان داخل ساختمان، موانع موجود

1 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)

2 Large Eddy Simulation (LES)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{V}) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \cdot \vec{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}}) + \rho \vec{g} \quad (2)$$

در رابطه (۲) عبارت P مربوط به پارامتر فشار و پارامتر $\bar{\bar{\tau}}$ بیانگر تانسور تنش می‌باشد. تانسور تنش موجود در رابطه فوق به کمک رابطه زیر به دست می‌آید [۲۰].

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu [(\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} I] \quad (3)$$

که پارامتر μ لزجت دینامیکی سیال و I تانسور یکه می‌باشد. به منظور تعیین شرط مرزی از پروفیل عمودی مربوط به سرعت باد و شدت آشفستگی مربوط به جهت حرکت باد استفاده می‌شود. با توجه به همپوشانی پروفیل لگاریتمی مؤلفه سرعت در راستای z با نتایج آزمایش تونل باد [۲۱]، جهت تعیین شرط مرزی سرعت برای قسمت ورودی، از معادله (۴) استفاده می‌شود.

$$V(z) = \frac{v^*}{K} \ln\left(\frac{z + z_0}{z_0}\right) \quad (4)$$

که v^* معرف سرعت اصطکاکی بوده و بر اساس نتایج تجربی دارای مقدار برابر 0.35 m/s است، پارامتر K نیز ثابت فن کارمن نامیده شده و مقدار آن برابر 0.42 می‌باشد. پارامتر z_0 بیانگر طول زبری آیرودینامیکی و z نیز مربوط به میزان ارتفاع از سطح کف است. جهت تعیین انرژی جنبشی آشفستگی، اطلاعاتی درباره انحرافات استاندارد از اغتشاشات آشفستگی مطابق رابطه (۵) در سه بعد مورد نیاز است.

$$k(z) = \frac{1}{2} (\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2) \quad (5)$$

که میزان انحراف استاندارد از اغتشاشات آشفستگی در راستای x ، y و z به ترتیب برابر σ_u ، σ_v و σ_w می‌باشد. رابطه بین انرژی جنبشی آشفستگی k ، شدت آشفستگی طولی I_V و سرعت باد با رابطه کلی (۶) بیان می‌شود.

توجه قرار گرفته که در آن ارتباط بین نرخ دبی هوای ورودی به ساختمان، وضعیت آسایش ساکنان از لحاظ توزیع سرعت و همچنین توزیع فشار در شرایط مختلف بررسی گردیده که این نحوه تحلیل فرآیند تهویه طبیعی به ندرت مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این زمینه، تأثیر ابعاد ورودی و خروجی دیواره‌های ساختمان بر جریان داخل ساختمان ناشی از جریان هوا در اطراف و داخل ساختمان تحت زوایای وزش مختلف به عنوان پارامتری کلیدی بر تهویه طبیعی ساختمان بررسی شده است. ابعاد مذکور بگونه‌ای انتخاب شده‌اند که تمامی مدل‌ها دارای سطح مقطع ورودی یکسان، ولی نسبت طول به عرض متفاوتی داشته و از این رو شکل‌های هندسی متفاوتی ایجاد کنند. بدین منظور شبیه‌سازی عددی یک ساختمان یک طبقه با داشتن دو پنجره در قسمت جلو و انتهایی ساختمان به روش دینامیک سیالات محاسباتی^۱ مورد توجه قرار گرفته است. در مدل‌سازی‌های انجام شده به دلیل تطابق مناسب نتایج در رابطه با استفاده از مدل توربولانسی انتقال تنش برشی کی-امگا^۲ با سایر کارهای عددی و تجربی، از این مدل آشفستگی استفاده شده است. با در نظر گرفتن شرایط مرزی معرفی شده، شرایط بهینه از نظر میزان نرخ تهویه به منظور کمک به کاهش مصرف انرژی لازم جهت تهویه ساختمان با توجه به مطالعه صورت گرفته استخراج شده‌اند.

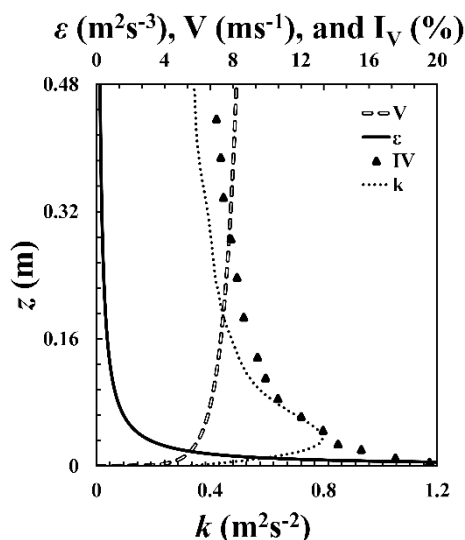
۲- معادلات حاکم بر جریان، شرایط مرزی و روش حل

برای مدل‌سازی‌های انجام شده به صورت عددی معادلات دیفرانسیل پاره‌ای حاکم بر جریان گسسته سازی شده و با توجه به شبکه ایجاد شده و شرایط مرزی اعمال شده به حل مسئله پرداخته می‌شود. در حل عددی تمامی جریان‌ها، نرم افزار فلوئنت از دو معادله بقای جرم و بقای مومنتوم استفاده می‌نماید. صورت کلی معادله بقای جرم یا پیوستگی به صورت رابطه (۱) می‌باشد [۲۰].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

در رابطه فوق، پارامتر ρ بیانگر چگالی و عبارت \vec{V} بیانگر بردار سرعت می‌باشد. معادله بقای مومنتوم نیز طبق رابطه (۲) بیان می‌گردد [۲۰].

- 1 Computational Fluid Dynamics (CFD)
- 2 Shear Stress Transport k- ω (SST K- ω)



شکل ۱. شرایط مرزی اعمال شده در مطالعه عددی حاضر

Fig. 1. The boundary conditions applied in the present numerical study

مرزی سبب می‌شود تا مؤلفه نرمال سرعت و همچنین تغییرات در راستای عمود بر این سطوح برای سایر متغیرها صفر در نظر گرفته شود. شرط مرزی خروجی نیز مربوط به فشار استاتیکی است که مقدار آن صفر تعیین شده است. برای حالت‌هایی که وزش باد نسبت به ساختمان دارای جهت بوده و جهات مختلف وزش باد مورد بررسی قرار می‌گیرد، دو قسمت جانبی از محدوده محاسباتی دارای شرط مرزی ورودی و دو قسمت دیگر دارای شرط مرزی خروجی می‌باشد. همچنین محدوده محاسباتی در زوایای وزش غیر صفر با زاویه وزش صفر متفاوت بوده که در بخش ۳ به آن اشاره می‌شود.

به منظور بررسی عددی تأثیرات ابعاد پنجره و جهت وزش باد، از نرم افزار انسیس فلونت ۱۸ [۲۶] جهت تحلیل استفاده گردیده است. در بررسی‌های انجام شده از دسته معادلات ناویر-استوکس میان‌گیری شده در حالت دائم سه بعدی به همراه مدل توربولانسی انتقال تنش برشی کی-امگا جهت مدل‌سازی جریان آشفته استفاده شده است. برای محاسبه جریان باد اطراف ساختمان با استفاده از مدل توربولانسی انتقال تنش برشی، معادلات پیوستگی و مونتوم به همراه معادلات مربوط به پارامترهای k و ω حل می‌شوند. تعداد معادلات لازم برای محاسبه این جریان شش معادله اصلی است که به‌طور معمول در شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این شش معادله شامل یک معادله پیوستگی، سه

$$k(z) = a(I_v(z)V(z))^2 \quad (6)$$

بر اساس رابطه بین مؤلفه‌های مربوط به انحرافات استاندارد از لحاظ اندازه، عدد مربوط به پارامتر a می‌تواند یکی از مقادیر 0.5 ، 1 و 1.5 باشد. بر اساس راهنمایی‌های انجام شده در مراجع [۱۱، ۲۲]، مقدار پارامتر مذکور در این پژوهش، عدد یک در نظر گرفته شده است. پروفیل عمودی نرخ اضمحلال آشفتگی ε و همچنین نرخ اضمحلال ویژه ω مطابق رابطه (۷) قابل دستیابی می‌باشد.

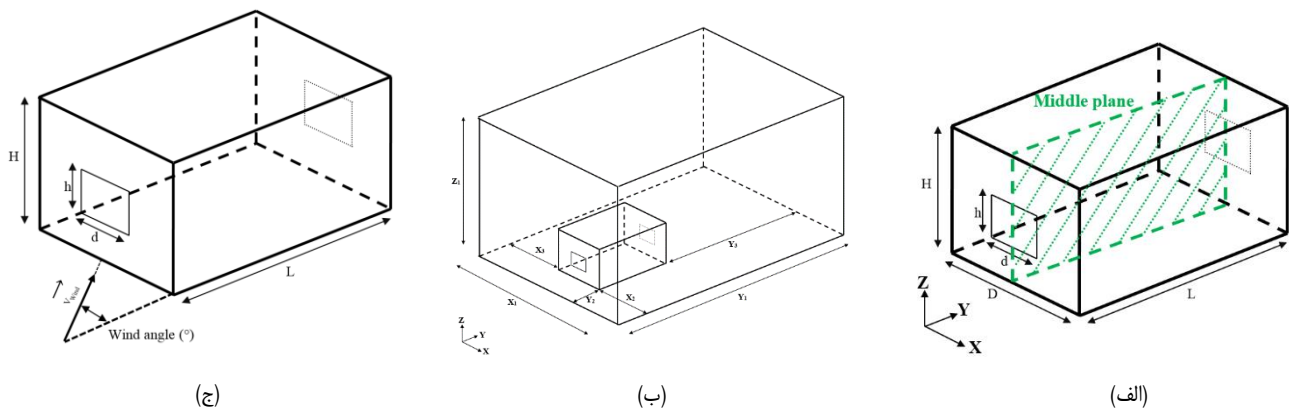
$$\omega(z) = \frac{\varepsilon(z)}{C_\mu k(z)} = \frac{v^3}{\kappa(z+z_0)} \quad (7)$$

پارامتر C_μ یک ثابت تجربی می‌باشد که مقدار آن برابر 0.09 است. برای اعمال عملکرد دیوار در سطح زمین و ساختمان نیز از ترکیبی از توابع دیوار استاندارد توسعه یافته توسط لاندرو اسپالدینگ [۲۳] و همچنین مدل اصلاح زبری مبتنی بر زبری توسعه یافته مربوط به دانه‌های شن و ماسه توسط کبکی و برادشاو [۲۴] استفاده شده است. بر این اساس، مطابق نتایج تحقیق بلوکن و همکاران [۲۵] از معادله (۸) به منظور برقراری ارتباط بین پارامترهای مؤثر در عملکرد دیوار بهره گرفته شده است.

$$l_s = 9.793 \frac{z_0}{z_s} \quad (8)$$

که در رابطه فوق l_s مربوط به ارتفاع زبری مربوط به دانه‌های شن و ماسه و z_s بیانگر ثابت زبری می‌باشد. مقدار l_s برای سطح دیواره ساختمان برابر صفر و برای سطح زمین برابر 0.28 میلی‌متر در نظر گرفته شده و ثابت زبری نیز 0.874 لحاظ گردیده است [۲۵]. بر این اساس مطابق توضیحات ارائه شده، شرایط مرزی اعمال شده در مطالعه عددی حاضر در شکل ۱ نشان داده شده است.

شرایط مرزی اعمال شده برای حالت‌هایی که جهت وزش باد عمود بر مدل ساختمان (زاویه وزش صفر درجه) است، برای قسمت راست، چپ و بالای محدوده محاسباتی، شرط مرزی تقارن می‌باشد. استفاده از این شرط



شکل ۲. شکل شماتیک مدل سازی مورد نظر، الف) مدل ساختمان و معرفی صفحه میانی، ب) محدوده حل و موقعیت قرارگیری ساختمان و ج) معرفی زاویه وزش باد

Fig. 2. The schematic diagram of the model under consideration: a) Building model and introduction of the middle plane, b) Solution domain and the position of the building, and c) Introduction of the wind angle

مقادیر مربوط به ابعاد محدوده حل که در شکل فوق نشان داده شده، برای زاویه وزش ۰ درجه و همچنین سایر زاویه‌های وزش باد در جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشد.

ابعاد مربوط به طول، عرض و ارتفاع مدل ساختمان‌ها، به ترتیب ۱۰۰، ۱۰۰ و ۸۰ میلی‌متر می‌باشد که مربوط به ساختمان با ابعاد واقعی ۲۰، ۲۰ و ۱۶ متر می‌باشد. مدل‌های بررسی شده در این پژوهش دارای ابعاد ساختمان برابر و ابعاد پنجره متفاوت می‌باشند. به منظور معرفی و تفکیک بین مدل‌ها از نرخ تناسب که حاصل تقسیم ارتفاع به عرض پنجره‌ها می‌باشد، استفاده می‌شود. این نرخ به کمک رابطه (۹) بدست می‌آید.

$$AR = \frac{h}{d} \quad (9)$$

در رابطه فوق، h بیانگر ارتفاع پنجره و d بیانگر عرض پنجره می‌باشد. لازم به ذکر است، ابعاد پنجره‌ها بگونه‌ای در نظر گرفته شده‌اند که سطح مقطع ورودی تمامی مدل‌ها با یکدیگر برابر باشند. با استفاده از تعریف فوق، در جدول ۲ مدل‌ها و شرایط مختلف بررسی شده در این پژوهش، ارائه گردیده است.

در متن حاضر منظور از مدل مرجع، مدلی است که دارای نرخ تناسب ۰/۳۹ بوده که مشخصات آن در جدول فوق ارائه شده است.

معادله مومنتوم در سه راستای x ، y و z ، یک معادله برای k و یک معادله برای ω می‌باشند. پارامترهای مجهول که می‌بایست تعیین شوند، شامل سرعت‌های مؤلفه‌ای در راستای سه محور فضایی x ، y و z ، فشار p ، انرژی جنبشی آشفتگی k ، نرخ اضمحلال ویژه ω و ویسکوزیته آشفتگی μ_t می‌باشند. این پارامترها معمولاً از طریق معادلات موجود و شرایط مرزی محاسبه می‌شوند که در بالا به آن‌ها اشاره شده است. جهت ایجاد ارتباط بین سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل^۱ بهره گرفته شده است. گسسته‌سازی عبارات‌های مربوط به لزجت و جابجایی با تقریب مرتبه دوم صورت گرفته است. معیار همگرایی برای پارامتر ω مقدار 10^{-4} ، برای پارامتر k مقدار 10^{-5} و برای هر سه مؤلفه سرعت مقدار 10^{-6} در نظر گرفته شده است.

۳- معرفی محدوده حل و مدل‌های هندسی مورد مطالعه

محدوده انجام محاسبات به کمک راهنمایی‌های ارائه شده توسط تامین‌گرا و همکاران [۲۲] و همچنین منتظری و بلوکن [۲۷]، انتخاب شده است. به منظور معرفی محدوده‌های مورد نظر از ارتفاع ساختمان به عنوان بعد مرجع استفاده می‌شود که با حرف H نشان داده می‌شود. در شکل ۲ محدوده کلی مورد بررسی به صورت پارامتریک و همچنین نحوه تعریف زاویه وزش باد ارائه گردیده است.

1 Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations (SIMPLE)

جدول ۱. معرفی ابعاد محدود حل محاسباتی برای مدل‌های مورد نظر در مطالعه جاری

Table 1. Introduction of the computational domain dimensions for the models considered in the current study

عنوان	زاویه وزش صفر	زاویه وزش غیر صفر
X ₁	۱۰H+D	۱۸H+D
X ₂	۵H	۱۵H
X ₃	۵H	۳H
Y ₁	۱۸H+L	۱۸H+L
Y ₂	۳H	۳H
Y ₃	۱۵H	۱۵H
Z ₁	۶H	۶H

جدول ۲. مدل‌ها و شرایط بررسی شده در پژوهش جاری

Table 2. The models and conditions examined in the current study

شماره مدل	عرض پنجره (mm)	ارتفاع پنجره (mm)	نرخ تناسب (-)
۱	۱۸	۴۶	۲/۵۶
۲	۲۳	۳۶	۱/۵۶
۳	۲۸/۸	۲۸/۸	۱
۴	۳۰	۲۷/۶	۰/۹۲
۵	۳۶	۲۳	۰/۶۴
۶	۴۰	۲۰/۷	۰/۵۲
۷	۴۶	۱۸	۰/۳۹

۴- نتایج

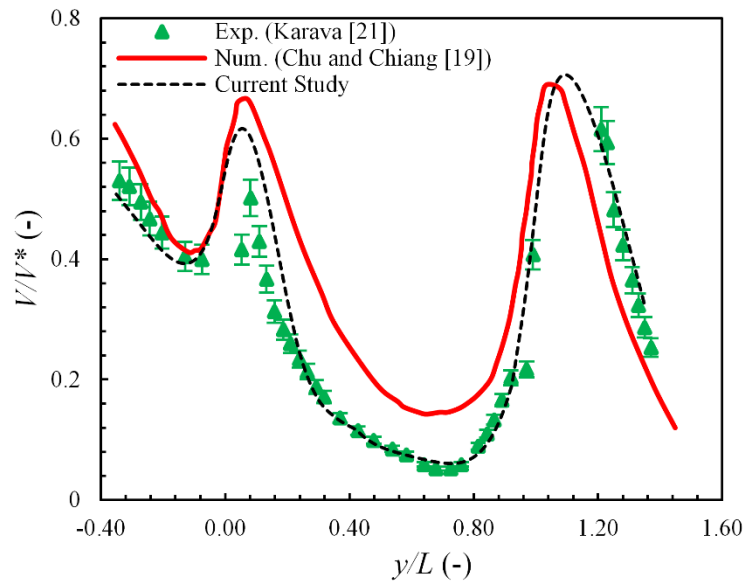
۴-۱- اعتبارسنجی نتایج

به منظور اعتبارسنجی نتایج بدست آمده، از مقایسه نتایج مورد نظر با مطالعه تجربی ارائه شده توسط کاراوا [۲۱] در دانشگاه کن کاردیا کانادا و مطالعه عددی انجام شده با روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ توسط چو و چیانگ [۱۹] استفاده شده است. در شکل ۳-الف نتایج مربوط به پروفیل سرعت نقاط موجود بر خط اتصال مراکز ورودی و خروجی ساختمان که در صفحه میانی ساختمان واقع هستند، نشان داده شده و در شکل ۳-ب نیز درصد خطای کار عددی حاضر در مقایسه با کار تجربی مرجع [۲۱] گزارش شده است. مطابق شکل ۳-ب، میانگین خطای نتایج کار عددی حاضر حدود ۸ درصد می‌باشد، با این توضیح که فقط در چند نقطه محدود، خطای موجود دارای مقدار بالایی است که دلیل اصلی آن به خطای نتایج کار تجربی

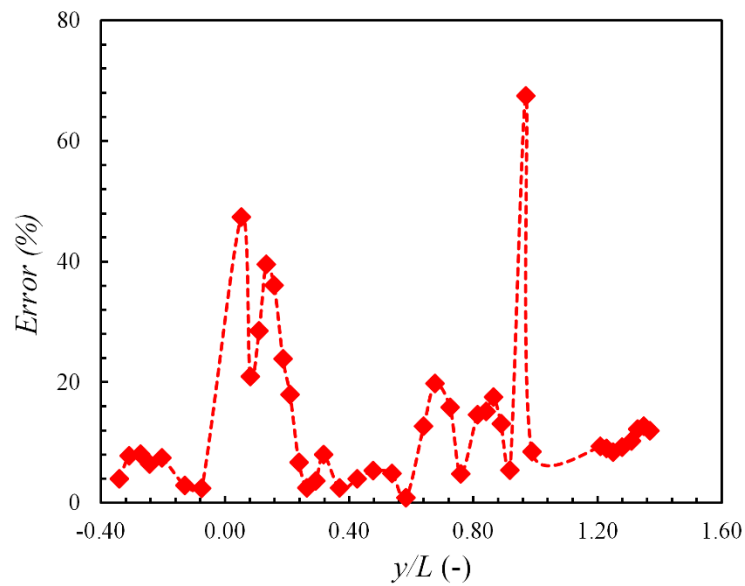
مربوط می‌شود، زیرا در نقاط مذکور، روند نتایج کار تجربی با نقاط مجاور آن همخوانی نداشته، در حالی که در کار عددی حاضر و کار عددی ارائه شده در مرجع [۱۹] روند نتایج دارای الگوی مشابهی می‌باشد. در نهایت، مقایسه نتایج بدست آمده با دو فعالیت صورت گرفته توسط مراجع مذکور، انطباق تقریباً مناسبی را بین نتایج نشان می‌دهد.

اعتبارسنجی نتایج مربوط به جهت وزش باد با استفاده از مطالعه تجربی صورت گرفته توسط اها و همکارانش [۲۸] صورت گرفته است. بدین منظور نتایج بدست آمده در این پژوهش برای مدل مرجع مذکور به همراه نتایج همان مرجع در شکل ۴ نشان داده شده است. مقایسه نتایج بدست آمده در شکل ۴-ب بیانگر تطابق تقریباً مناسب نتایج کار عددی حاضر و کار تجربی با درصد خطای کمتر از ۸ درصد می‌باشد.

به منظور کاهش هزینه محاسباتی مطالعه عددی حاضر و دستیابی



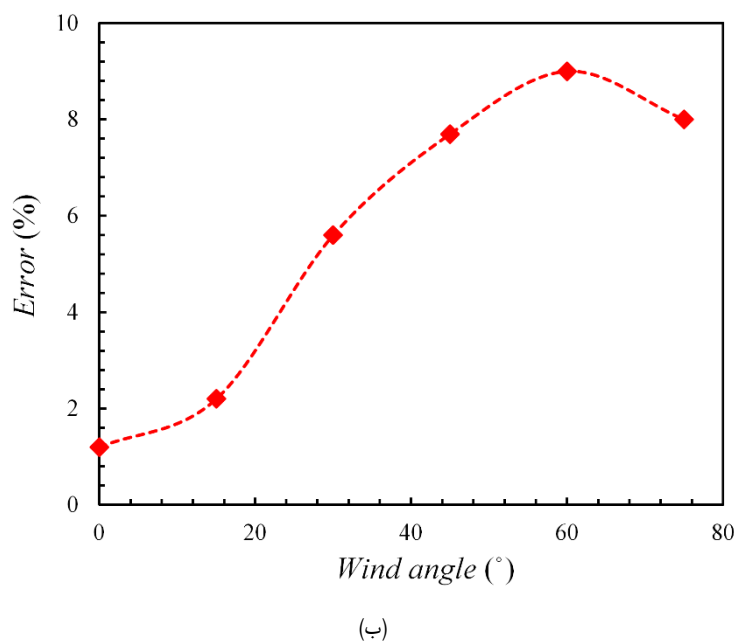
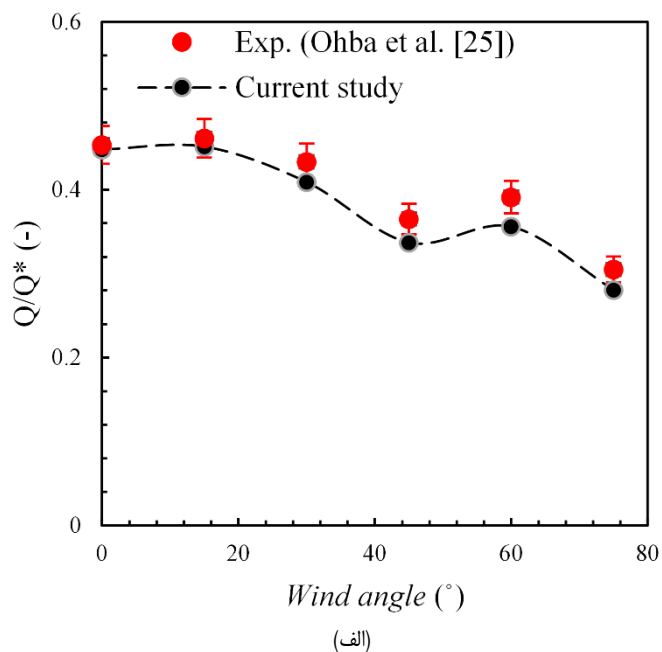
(الف)



(ب)

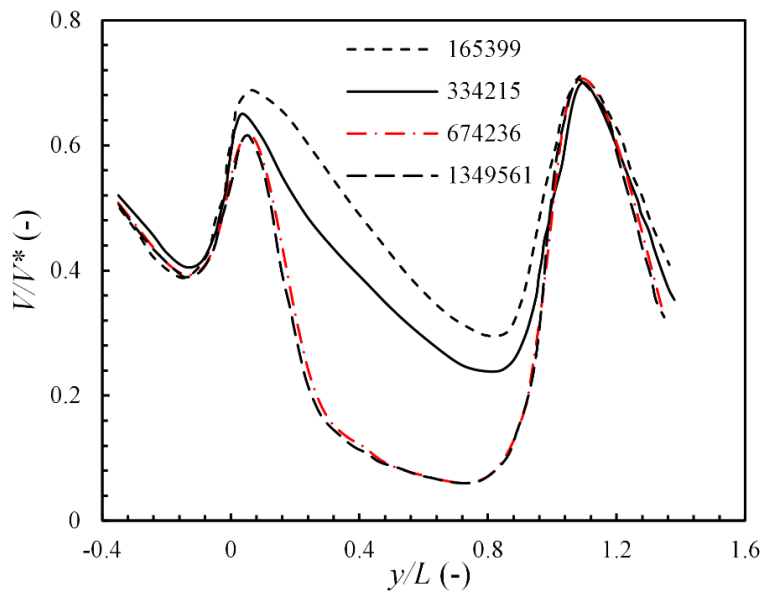
شکل ۳. الف) مقایسه سرعت بدست آمده مربوط به نقاط موجود بر خط اتصال مراکز ورودی و خروجی ساختمان واقع در صفحه میانی ساختمان توسط کاراوا [۲۱]، چو و چیانگ [۱۹] و کار عددی حاضر و ب) درصد خطای کار عددی حاضر در مقایسه با کار تجربی مرجع [۲۱]

Fig. 3. Comparison of the velocity obtained for points on the line connecting the centers of the building's entry and exit located in the building's middle plane, as provided by Karava [21], Chu and Chiang [19], and the present numerical work, and b) the percentage error of the present numerical work compared to the experimental reference [21]



شکل ۴. الف) مقایسه نتایج بدست آمده در زاویه‌های متفاوت وزش باد بین داده‌های تجربی اهبا و همکاران [۲۸] و نتایج کار عددی حاضر و ب) درصد خطای کار عددی حاضر در مقایسه با کار تجربی مرجع [۲۸]

Fig. 4. a) Comparison of the results obtained at different wind angles between the experimental data of Ohba et al [28] and the results of the present numerical study, and b) the percentage error of the present numerical study compared to the experimental reference [28]



شکل ۵. بررسی استقلال از مش حل عددی مطالعه حاضر برای شبکه‌های محاسباتی با تعداد سلول ۱۶۵۳۹۹، ۳۳۴۲۱۵، ۶۷۴۲۳۶ و ۱۳۴۹۵۶۱ مربوط به پروفیل سرعت نقاط موجود بر خط اتصال مراکز ورودی و خروجی ساختمان واقع در صفحه میانی ساختمان

Fig. 5. Examination of the mesh independence of the present numerical study for computational grids with cell counts of 165399, 334215, 674236, and 1349561, based on the velocity profile of points on the line connecting the centers of the building's entry and exit located in the building's middle plane

آن‌ها اثرات جدایش جریان و جریان آشفته شدیدتر است) زمانی عملکرد قابل قبولی دارد که مقدار $+y$ کمتر از یک باشد. بدین منظور شکل ۶ کانتر توزیع $+y$ در مجاورت دیواره‌های ساختمان مورد شبیه‌سازی را نشان می‌دهد که مقدار آن در تمامی جداره‌ها کمتر از یک است.

۴-۲ نتایج حل عددی

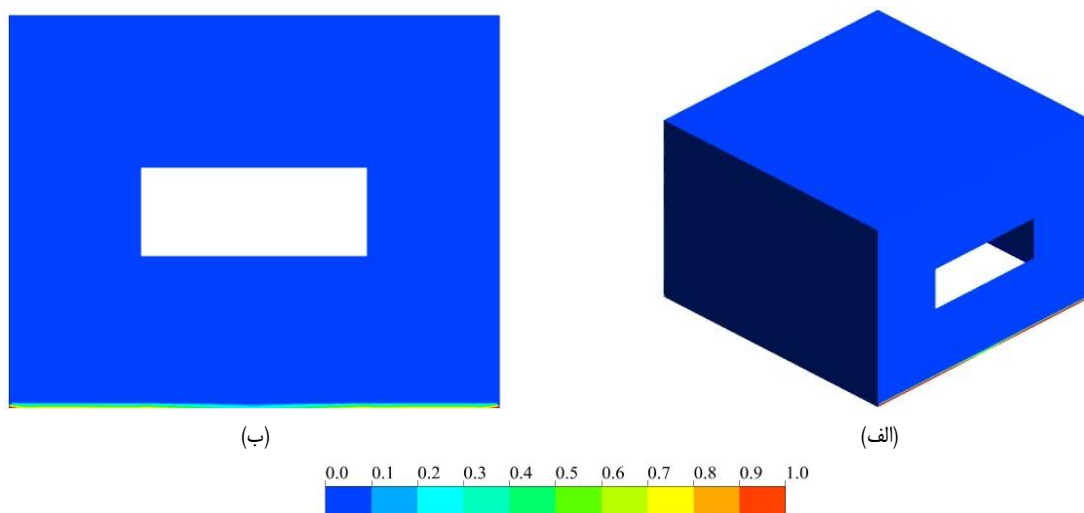
مدل‌های بررسی شده در این پژوهش، تحت جریان باد با زاویه صفر و زاویه‌های غیر صفر قرار داده شده‌اند. در قسمت اول ارائه نتایج، مدل‌ها با زاویه وزش باد صفر درجه مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. در واقع مفهوم زاویه وزش صفر این است که جهت وزش باد عمود بر دیواره رو به باد مربوط به ساختمان می‌باشد. به منظور بی‌بعد نمودن مقدار دبی بدست آمده در مدل‌های مختلف، از مقدار دبی مرجع استفاده می‌شود. مقدار دبی مذکور از رابطه (۱۰) بدست می‌آید.

$$Q^* = V^* \times d^* \times H^* = 6.97 \times 0.023 \times 0.036 = 5.77(10^{-3}) \frac{m^3}{s} \quad (10)$$

به دقت قابل قبول نتایج، شبکه‌های محاسباتی با تعداد سلول ۱۶۵۳۹۹، ۳۳۴۲۱۵، ۶۷۴۲۳۶ و ۱۳۴۹۵۶۱ بررسی گردیده است. مطابق شکل ۵، پروفیل سرعت نقاط موجود بر خط اتصال مراکز ورودی و خروجی ساختمان واقع در صفحه میانی ساختمان برای هر چهار شبکه محاسباتی ترسیم شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد، شبکه محاسباتی با تعداد ۶۷۴۲۳۶ سلول، از دقت مناسبی برخوردار بوده و نیازی به بهره‌گیری از شبکه محاسباتی ریزتر نمی‌باشد.

یکی از موضوعات مهم در شبیه‌سازی جریان هوا در ساختمان‌ها، مدل‌سازی جریان در مجاور دیواره‌ها است. بدین منظور در مطالعه حاضر همانطور که پیش‌تر از این بیان شد، مدل توربولانسی انتقال تنش برشی کی-امگا استفاده شده است. این مدل به دلیل ترکیب دو مدل کی-اپسیلون^۱ که بیشتر برای جریان‌های دور از دیوار مناسب بوده و همچنین مدل کی-امگا^۲ که برای جریان‌های نزدیک به دیواره مناسب است، قادر است رفتار جریان را به طور دقیق در نواحی نزدیک به دیوار و در داخل ساختمان شبیه‌سازی کند. این مدل در شبیه‌سازی جریان‌های نزدیک به دیوار (که در

1 K-ε
2 K-ω



شکل ۶. کانتور توزیع y^+ در مجاورت دیواره‌های ساختمان در مدل مرجع شبیه‌سازی شده، (الف) نمایش توزیع مذکور در دیواره‌های ساختمان به صورت سه بعدی و (ب) نمایش توزیع مذکور در دیواره پشت به باد به صورت دو بعدی

Fig. 6. The contour of the y^+ distribution near the walls of the building in the simulated reference model: a) 3D representation of the distribution on the building walls, and b) 2D representation of the distribution on the leeward wall

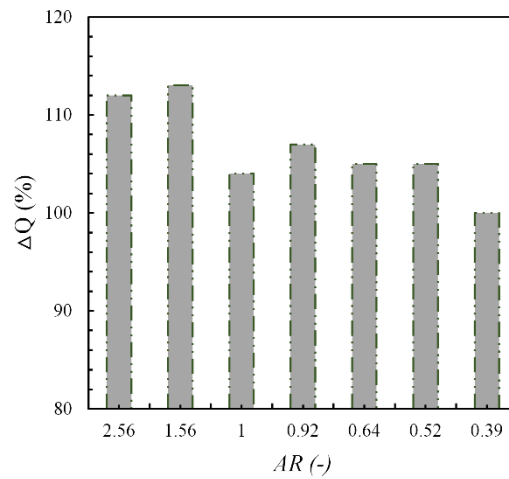
محدوده ۰ الی ۷۵ درجه برای مقادیر مختلف نرخ تناسب در شکل ۸ ترسیم گردیده است.

بررسی نتایج نشان می‌دهد که برای زوایای وزش بزرگ‌تر از ۲۰ درجه، افزایش زاویه وزش باد منجر به کاهش شدیدی در مقدار نرخ تهویه می‌شود و در مدل‌هایی که زوایای وزش باد کمتر از ۲۰ درجه، در یک نرخ تناسب معین، تغییرات محسوسی مشاهده نمی‌گردد. بررسی نتایج بیانگر این است که بیشترین نرخ تهویه در زوایای ۰ تا ۳۰ درجه ایجاد می‌شود که تطابق زیادی با نتایج مرجع [۲۹] دارد. بررسی دقیق‌تر نتایج در این قسمت نشان می‌دهد که بیشترین میزان نرخ تهویه در نرخ تناسب ۱/۵۶ و به ازای زاویه وزش باد صفر درجه اتفاق می‌افتد. همچنین مشاهده می‌شود که برای نرخ‌های تناسب مختلف، بیشینه مقدار نرخ تهویه در زاویه وزش ۰ تا ۱۵ درجه واقع می‌شود. بررسی نتایج در زوایای وزش بیشتر از ۳۰ درجه، برای پنجره‌های با ابعاد مختلف، نشان می‌دهد که نرخ تهویه مستقل از ابعاد پنجره می‌باشد.

در شکل ۹ نمودار تغییرات پروفیل سرعت نقاط موجود بر خط اتصال مراکز ورودی و خروجی ساختمان واقع در صفحه میانی ساختمان، به ازای مقادیر مختلف نرخ تناسب رسم گردیده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، در ناحیه قبل از پنجره واقع بر دیواره رو به باد تا مکان

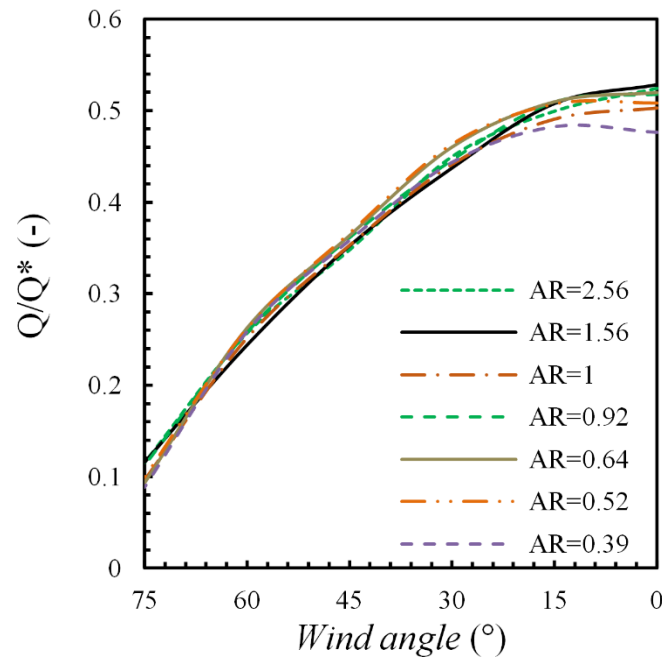
مقدار سرعت مرجع که در رابطه فوق استفاده شده است، مربوط به مقدار پروفیل سرعت در مکانی به ارتفاع H می‌باشد که برابر $6/97 \text{ m/s}$ می‌باشد. در شکل ۷ مقادیر مختلف نرخ تهویه در حالت وزش باد با زاویه صفر درجه برای ابعاد مختلف پنجره‌ها ارائه گردیده است. نتایج بدست آمده در شکل ۷ نشان دهنده آن است که بیشترین مقدار تهویه در مدل با نرخ تناسب ۱/۵۶ و کمترین آن در مدل با نرخ تناسب ۰/۳۹ بدست می‌آید. همچنین با افزایش نسبت عرض به ارتفاع پنجره، مقدار دبی به صورت کلی کاهش یافته است. سیر نزولی ذکر شده برای پنجره‌های با ابعاد نزدیک به پنجره مربعی دارای شدت بیشتری بوده، به طوری که در مدل با نرخ تناسب ۱، نمودار دارای کمترین مقدار در محدوده مذکور می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که استفاده از پنجره‌های مستطیلی شکل نسبت به پنجره‌های مربعی شکل جهت افزایش نرخ تهویه ترجیح داده می‌شود. مقایسه نتایج برای پنجره‌های با نرخ تناسب متفاوت، بیانگر آن است که حداکثر تأثیر تغییر این پارامتر بر روی نرخ تهویه در حدود ۱۳٪ بوده که نسبت به نتایج بدست آمده توسط مرجع [۸] از مقدار کمتری برخوردار است.

در قسمت دوم ارائه نتایج، اثر جهت وزش باد بر روی نرخ تهویه بررسی شده است. بدین منظور تغییرات نرخ تهویه در زوایای مختلف وزش باد در



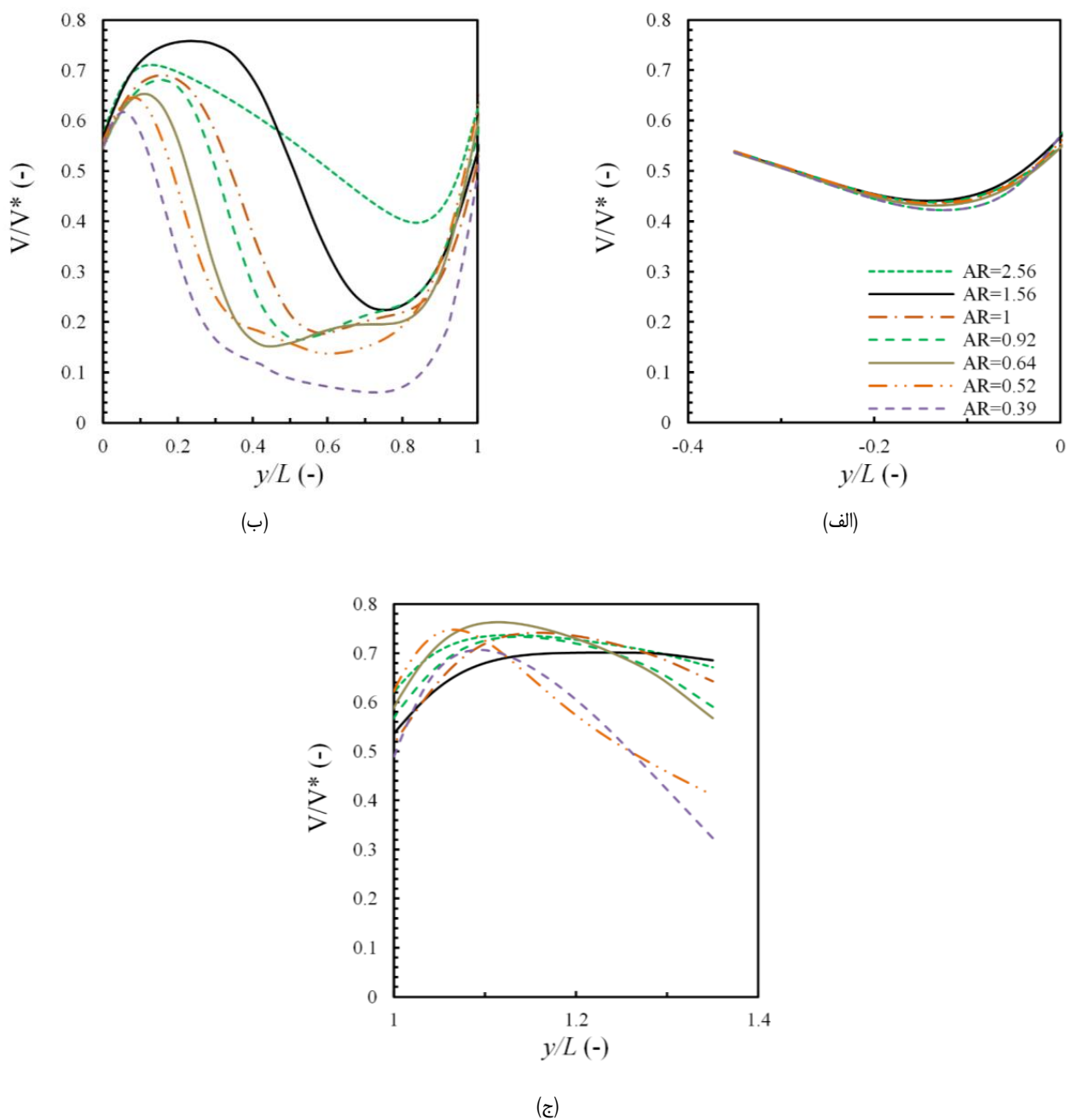
شکل ۷. درصد افزایش نرخ دبی حجمی برای مدل‌های با ابعاد پنجره متفاوت در زاویه وزش صفر درجه باد نسبت به مدل مرجع

Fig. 7. The percentage increase in volumetric flow rate for models with varying window dimensions at a 0° wind angle compared to the reference model



شکل ۸. مقدار پارامتر بدون بعد مربوط به دبی برای مدل‌های با ابعاد پنجره متفاوت و زاویه‌های وزش متفاوت

Fig. 8. The value of the dimensionless parameter related to the flow rate for models with different window dimensions and varying wind angles



شکل ۹. پروفیل سرعت بدست آمده مربوط به نقاط موجود بر خط اتصال مراکز ورودی و خروجی ساختمان واقع در صفحه میانی ساختمان برای مدل‌های با ابعاد پنجره متفاوت در سه ناحیه مختلف، (الف) جلوی ساختمان، (ب) نواحی داخلی ساختمان و (ج) پشت ساختمان

Fig. 9. The velocity profile obtained for points on the line connecting the centers of the building's entry and exit located in the building's middle plane for models with different window dimensions in three distinct areas: a) Front of the building, b) Interior areas of the building, and c) Rear of the building

شده است. مقدار ضریب فشار از رابطه (۱۱) بدست می‌آید.

$$C_p = \frac{1}{2} \frac{\Delta P}{\rho V^*{}^2} \quad (11)$$

در رابطه فوق، P مربوط به اختلاف فشار استاتیک در هر نقطه و فشار استاتیک مرجع بوده و ρ مقدار چگالی سیال است که برابر با $1/225 \text{ kg/m}^3$ می‌باشد.

کانتور ضریب فشار در صفحه عمودی میانی ساختمان اطلاعات دقیقی از توزیع فشار در اطراف ساختمان در پاسخ به جریان هوا و باد ارائه می‌دهد. در نواحی روبه‌باد نواحی فشار مثبت مشاهده می‌شود، جایی که جریان هوا به ساختمان برخورد کرده و متراکم شده و در نواحی پشت به باد، فشار منفی یا کم شده است. بررسی تغییرات ضریب فشار به ازای نرخ‌های تناسب مختلف نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع پنجره از میزان تغییرات ضریب فشار در محوطه داخلی ساختمان کاسته می‌شود. تغییرات فشار در ناحیه روبروی دیواره رو به باد در بین مدل‌های مختلف، بیشتر از ناحیه پشت دیواره پشت به باد می‌باشد. این نکته توسط مو و همکاران [۳۰] نیز برای ساختمان‌های دارای ارتفاع و طول مختلف بیان شده که تغییر ابعاد ساختمان منجر به تغییرات گسترده در دیواره رو به باد (بخش فشار مثبت) شده و تغییرات در دیواره پشت به باد (بخش فشار منفی) اندک است. این مسئله نشان می‌دهد که تغییر ابعاد پنجره، پارامتر مهمی جهت افزایش مقدار دبی ورودی به ساختمان می‌باشد. در شکل ۱۲ نیز کانتور ضریب فشار در صفحه افقی میانی برای دو نسبت تناسب مختلف که مربوط به پنجره‌های با هندسه مستطیل شکل و مربع شکل می‌باشند، نمایش داده شده است. مقایسه شکل‌های ۱۱ و ۱۲ بیانگر این مطلب است که تغییرات ضریب فشار در این صفحه نیز مشابه صفحه عمودی میانی است.

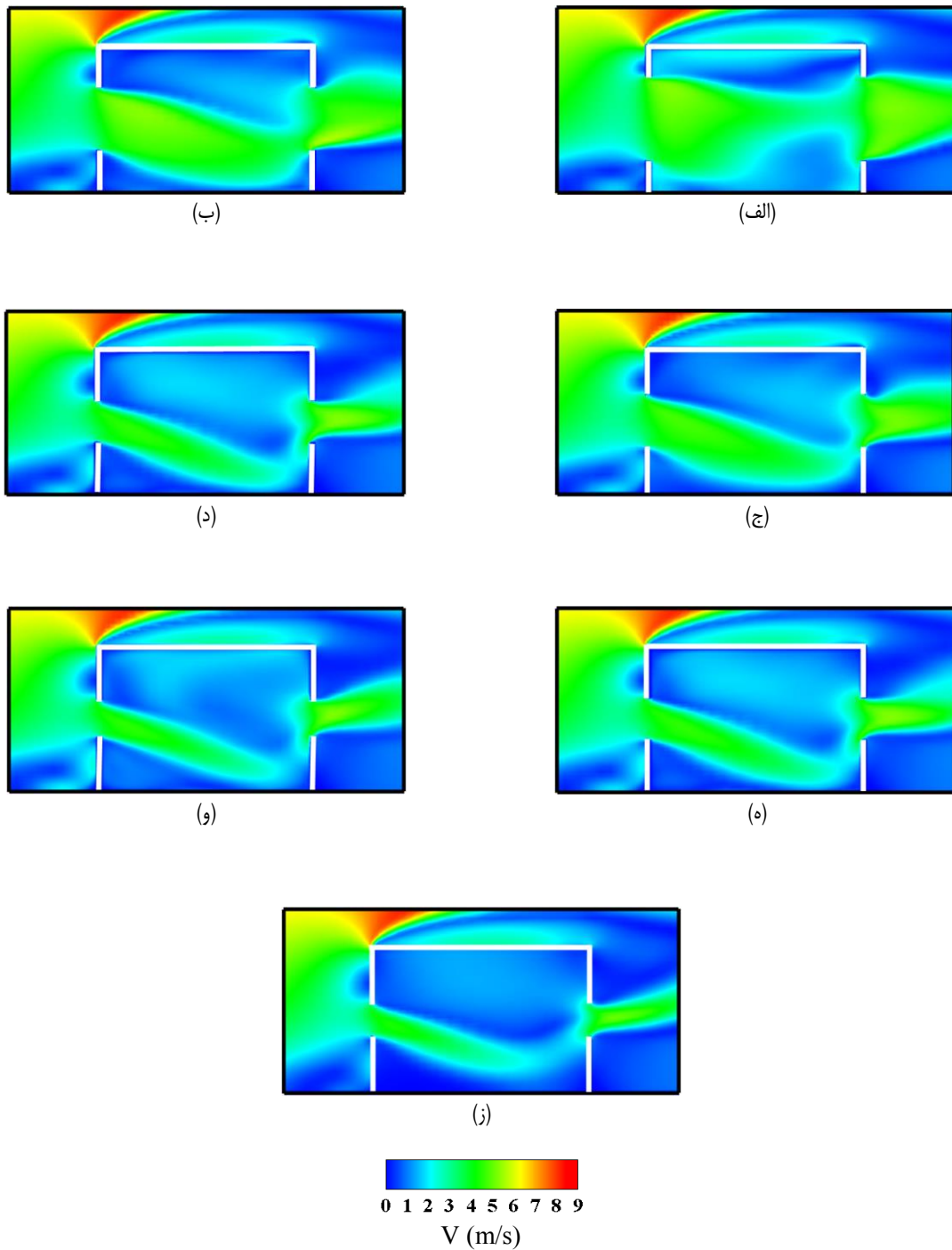
به منظور بررسی بیشتر الگوهای ایجاد شده برای ابعاد مختلف پنجره، از مقدار سرعت بی‌بعد می‌توان استفاده نمود. بررسی مقدار سرعت مورد نظر در منطقه سکونت افراد در داخل ساختمان، نتایج جالبی را ارائه می‌دهد. به منظور مشاهده تفاوت بین مدل‌های مختلف، منطقه سکونت افراد در صفحه میانی ساختمان بررسی شده است. این منطقه در واقع از سطح زمین تا بالای پنجره مدل مرجع وسعت دارد. منطقه مذکور به دلیل حضور ساکنین در آن، مهم‌ترین منطقه ساختمان می‌باشد. در جدول ۳ مقدار سرعت بی‌بعد مذکور برای مدل‌های با نرخ‌های تناسب مختلف ارائه شده است.

پنجره ($0 < \frac{y}{L}$) مقادیر سرعت واقع بر خط مذکور، تقریباً مستقل از نرخ تناسب می‌باشد. در واقع نتایج بدست آمده در حالت‌های مختلف منطبق بر داده‌های بدست آمده از کار تجربی می‌باشد. در این محدوده ابتدا از مقادیر سرعت کاسته شده و سپس بر مقدار آن افزوده می‌شود که این موضوع به علت تغییرات سطح مقطع جریان عبوری از پنجره می‌باشد. روند تغییرات سرعت در فضای داخل ساختمان ($0/2 < \frac{y}{L} < 1$)، برای مقادیر مختلف نرخ تناسب، یکسان است. در این منطقه، ابتدا به علت افزایش ناگهانی سطح مقطع عبور جریان پس از مکان پنجره رو به باد از سرعت جریان به شدت کاسته می‌شود. در ناحیه میانی ساختمان ($0/4 < \frac{y}{L} < 0/8$) به علت عدم تغییرات سطح مقطع و ثابت بودن دبی جریان، مقدار سرعت تا رسیدن به پنجره واقع بر دیواره پشت به باد مقدار تقریباً ثابتی دارد. در ناحیه مجاور پنجره واقع بر دیواره پشت به باد در ناحیه داخلی ساختمان ($0/8 < \frac{y}{L} < 1$)، با کاهش سطح مقطع جریان به دلیل حضور پنجره، بر مقدار سرعت افزوده شده و پس از عبور از پنجره مذکور، جریان دچار کاهش سرعت می‌شود.

همانطور که در شکل فوق مشخص است، در صورت استفاده از پنجره‌های با ابعاد مختلف، ناحیه مجاور پنجره رو به باد در فضای داخلی ساختمان ($0/8 < \frac{y}{L} < 0/2$)، بیشتر از سایر نواحی تحت تأثیر قرار می‌گیرد و همانگونه که بیان شد، به ازای نرخ تناسب کوچک‌تر، مقادیر مربوط به پروفیل سرعت در داخل ساختمان از سایر مدل‌ها بیشتر بوده و در نتیجه میزان دبی ورودی به ساختمان نیز بیشتر می‌گردد.

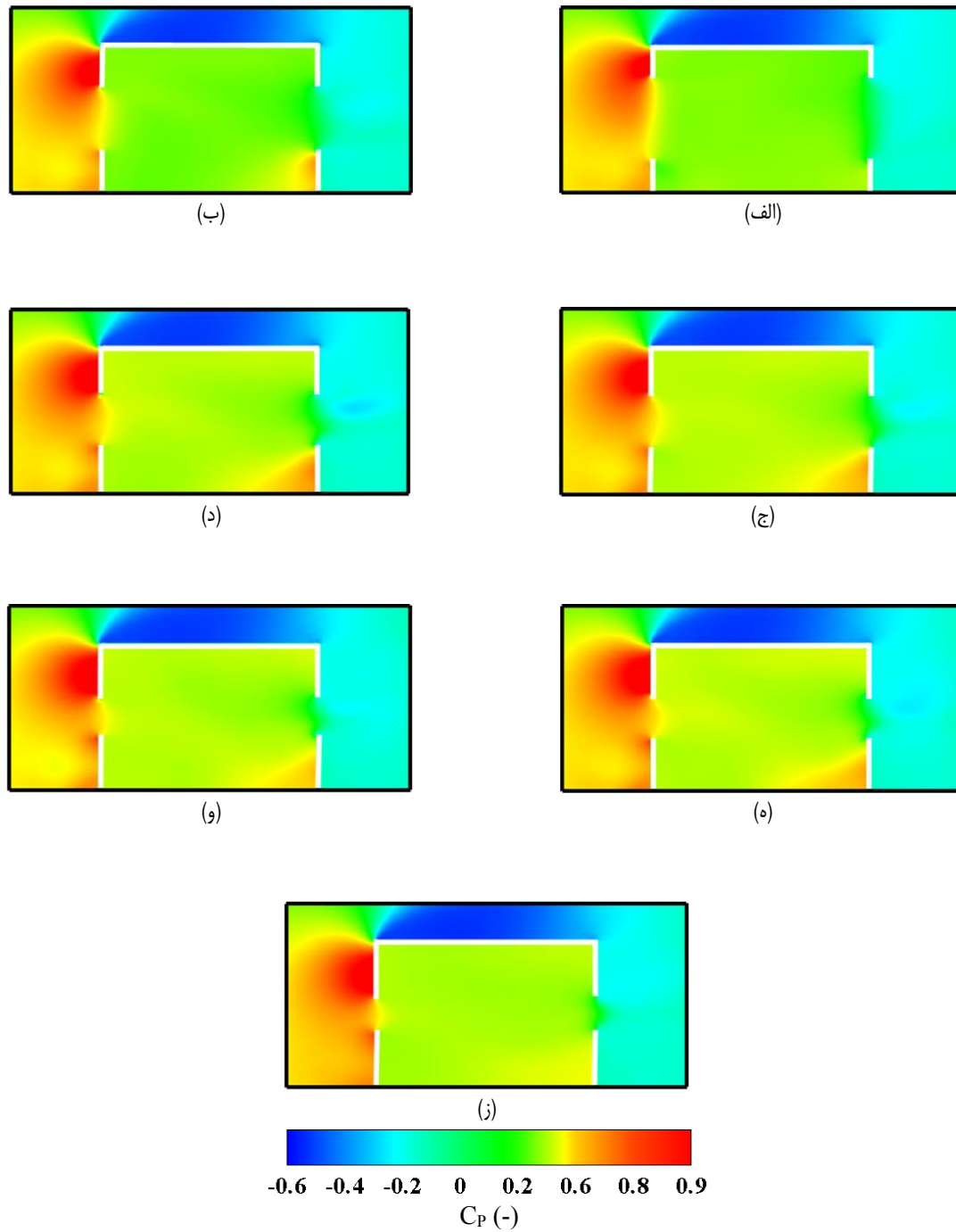
کانتور توزیع سرعت ابزاری مهم برای تحلیل جریان‌های آشفته و درک بهتر الگوهای جریان در هندسه‌های مختلف است. در شکل ۱۰ کانتور تغییرات سرعت در صفحه میانی برای مدل‌های ساختمان با ابعاد مختلف پنجره نشان داده شده است. توزیع مورد نظر نشان‌دهنده گستره مناطقی با سرعت‌های بالا، کم و همچنین نواحی با سرعت صفر (نواحی سکون) می‌باشد. مناطق با سرعت بالا در جلوی ساختمان و مناطق با سرعت پایین در دیواره‌های پشت به باد قابل مشاهده می‌باشند. اختلاف میان کانتورهای مختلف، مربوط به قسمت نزدیک به ورودی به پنجره رو به باد تا ناحیه بعد از پنجره پشت به باد می‌باشد که این موضوع به علت تغییر در ارتفاع پنجره‌ها می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع پنجره‌ها، از نواحی سرعت بالا در نواحی داخلی ساختمان کاسته شده و بر نواحی سکون و با سرعت پایین افزوده می‌شود. همچنین در تمامی حالت‌ها ناحیه‌ای با سرعت ماکزیمم در لبه ابتدایی پشت بام ایجاد می‌شود.

در شکل ۱۱ کانتور ضریب بدون بعد فشار در صفحه میانی نشان داده



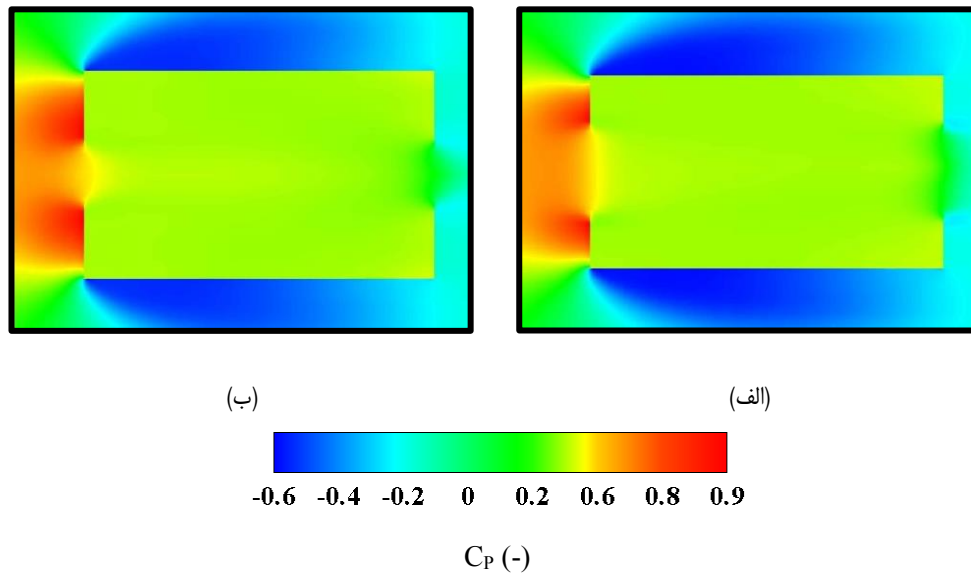
شکل ۱۰. کانتور تغییرات سرعت برای مدل‌های با مقادیر متفاوت نرخ تناسب (الف) $AR=2/56$ ، (ب) $AR=1/56$ ، (ج) $AR=1$ ، (د) $AR=0/92$ ، (ه) $AR=0/64$ ، (و) $AR=0/52$ و (ز) $AR=0/39$

Fig. 10. The velocity contour for models with different AR values: a) $AR = 2.56$, b) $AR = 1.56$, c) $AR = 1$, d) $AR = 0.92$, e) $AR = 0.64$, f) $AR = 0.52$, and g) $AR = 0.39$



شکل ۱۱. کانتور ضریب فشار در صفحه عمودی میانی ساختمان برای مدل‌های با مقادیر متفاوت نرخ تناسب (الف) $AR=2/56$ ، (ب) $AR=1/56$ ، (ج) $AR=1$ ، (د) $AR=0/92$ ، (ه) $AR=0/64$ ، (و) $AR=0/52$ و (ز) $AR=0/39$

Fig. 11. The pressure coefficient contour on the vertical middle plane of the building for models with different AR values: a) $AR = 2.56$, b) $AR = 1.56$, c) $AR = 1$, d) $AR = 0.92$, e) $AR = 0.64$, f) $AR = 0.52$, and g) $AR = 0.39$



شکل ۱۲. کانتور ضریب فشار در صفحه میانی افقی ساختمان برای مدل‌های با مقادیر متفاوت نرخ تناسب (الف) $AR=0.39$ و (ب) $AR=1$

Fig. 12. The pressure coefficient contour on the horizontal middle plane of the building for models with different AR values: a) $AR = 0.39$, and b) $AR = 1$

پایینی سکونت، نسبت به منطقه بالایی حساسیت کمتری دارد. این منطقه نیز در صورت استفاده از مدل‌های با نرخ تناسب کمتر، دارای مقادیر سرعت بدون بعد بیشتری خواهد بود. همچنین در مدل‌های با نرخ تناسب کمتر از یک، سرعت متوسط برای منطقه سکونت دارای مقدار بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها می‌باشد. تحلیل صورت گرفته بر روی منطقه‌های بالایی و پایینی سکونت نشان می‌دهد که استفاده از پنجره‌های با ابعاد مختلف، منطقه بالایی سکونت را نسبت به منطقه پایینی، بیشتر تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. جریان وارد شده از پنجره ورودی ساختمان برای مدل‌های دارای نرخ تناسب بزرگ‌تر از یک به سمت قسمت پایین ساختمان وارد می‌شود و با افزایش این مقدار نواحی دارای ارتفاع بیشتر در فضای داخلی ساختمان بیشتر تحت تأثیر جریان ورودی قرار می‌گیرند. مطابق استاندارد ASHRAE [۳۱] برای دمای کارکردی بالاتر از $25/5$ درجه سانتیگراد ($77/9$ درجه فارنهایت)، حداکثر سرعت هوا باید $0/8$ متر بر ثانیه (160 فوت در دقیقه) برای فعالیت‌های اداری سبک و عمدتاً کم تحرک، مانند دفاتر باشد. مطابق نتایج ارائه شده در جدول ۳، در صفحه میانی ساختمان سرعت $1/46$ الی $4/88$ متر بر ثانیه بوده که باید توجه داشت میزان سرعت اشاره

تفاوت مقادیر بدست آمده در این جدول نشان دهنده تأثیرگذاری ابعاد پنجره بر الگوی جریان داخل ساختمان می‌باشد. حداکثر اختلاف موجود در بین داده‌های این جدول برای حالت‌های مختلف حدود 55% می‌باشد. استفاده از پنجره‌های با ارتفاع بیشتر سبب می‌شود تا پارامتر سرعت بی‌بعد برای جریان موجود در منطقه سکونت، افزایش قابل توجهی داشته باشد. روند تغییرات نشان داده شده بیانگر این مطلب است که چنانچه سطح مقطع پنجره ساختمان‌ها یکسان باشد، استفاده از پنجره‌های مربعی و همچنین پنجره‌های با ارتفاع بیشتر نسبت به پنجره‌های با عرض بیشتر، منطقه سکونت را بیشتر تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. با تقسیم منطقه مذکور به دو منطقه پایینی و بالایی، می‌توان نواحی داخل ساختمان را با دقت بیشتری مورد تحلیل قرار داد. منطقه پایینی از سطح زمین تا ارتفاع میانه پنجره حالت مرجع و منطقه بالایی از ارتفاع میانه پنجره حالت مرجع تا ارتفاع بالای پنجره این مدل وسعت دارد. افزایش نسبت عرض به ارتفاع پنجره به صورت کلی سبب می‌شود تا از میزان تأثیرگذاری جریان ورودی به ساختمان بر منطقه بالایی کاسته شود و این تأثیر برای پنجره‌های مستطیلی که ارتفاع آن‌ها از عرض آن‌ها بیشتر باشد، تفاوت قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد. منطقه

جدول ۳. مقدار پارامتر بدون بعد سرعت برای منطقه سکونت افراد در صفحه میانی

Table 3. The value of the dimensionless velocity parameter for the occupant area in the middle plane

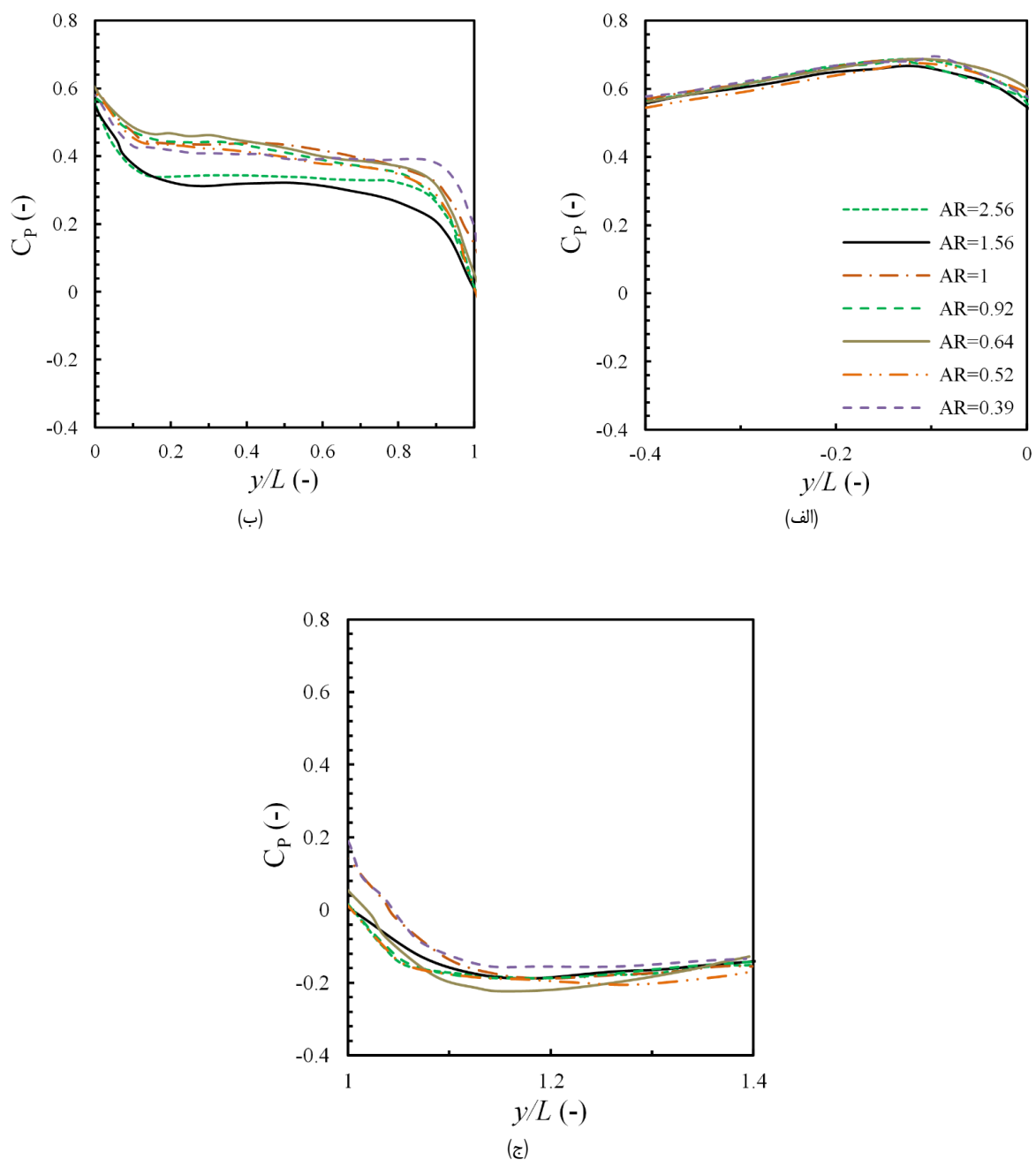
مقدار پارامتر بدون بعد مربوط به سرعت			نرخ تناسب (-)
$ V /V^*$			
مقادیر مربوط به کل منطقه سکونت افراد	مقادیر مربوط به نیمه پایینی منطقه سکونت افراد	مقادیر مربوط به نیمه بالایی منطقه سکونت افراد	
۰/۶۴	۰/۶۱	۰/۷۵	۲/۵۶
۰/۷۰	۰/۷۰	۰/۶۶	۱/۵۶
۰/۴۷	۰/۴۹	۰/۳۷	۱
۰/۳۷	۰/۳۸	۰/۲۹	۰/۹۲
۰/۳۶	۰/۳۷	۰/۲۹	۰/۶۴
۰/۳۴	۰/۳۵	۰/۲۶	۰/۵۲
۰/۳۱	۰/۳۳	۰/۲۱	۰/۳۹

یک این امکان را فراهم می‌کند تا با استفاده از این نوع مدل‌ها، مقدار دبی ورودی به ساختمان نیز افزایش یابد.

به منظور بررسی بیشتر شرایط جریان داخل و خارج ساختمان در شکل ۱۴ کانتور سه بعدی و دو بعدی خطوط جریان در داخل و خارج ساختمان برای دو مدل با ضریب تناسب ۰/۳۹ (مدل مرجع) و ضریب تناسب ۱ (مدل با پنجره مربع شکل) ترسیم گردیده است. در اثر برخورد باد به دیواره رو به باد، توده‌ای از آن به سمت کناره‌ها و حجمی از آن نیز به سمت بالا حرکت می‌کند. از سوی دیگر، در محدوده‌های ارتفاعی نزدیک به سقف، جریانی تمایل دارد که از سمت ورودی به خروجی حرکت نماید. حجم هوای عبوری به سمت بالا که پس از برخورد با دیواره بوجود آمده، در واقع مانعی بر سر راه جریان‌هایی است که در ارتفاعی نظیر سقف در حال عبور از قسمت ورودی به قسمت خروجی می‌باشند. وجود این مانع سبب می‌شود تا گردابه‌های جریان در قسمت ابتدایی بام ساختمان به وجود آیند. لازم بذکر است که با افزایش فاصله از لبه ابتدایی دیواره، به تدریج از مقدار گردابه‌ها کاسته می‌شود. در این شکل نمونه‌ای از منطقه گردابه ایجاد شده در قسمت بام ساختمان مشخص است. مشابه توضیح ذکر شده برای لبه ابتدایی بام ساختمان، می‌توان برای دیواره‌های جانبی ساختمان نیز از این تحلیل استفاده نمود.

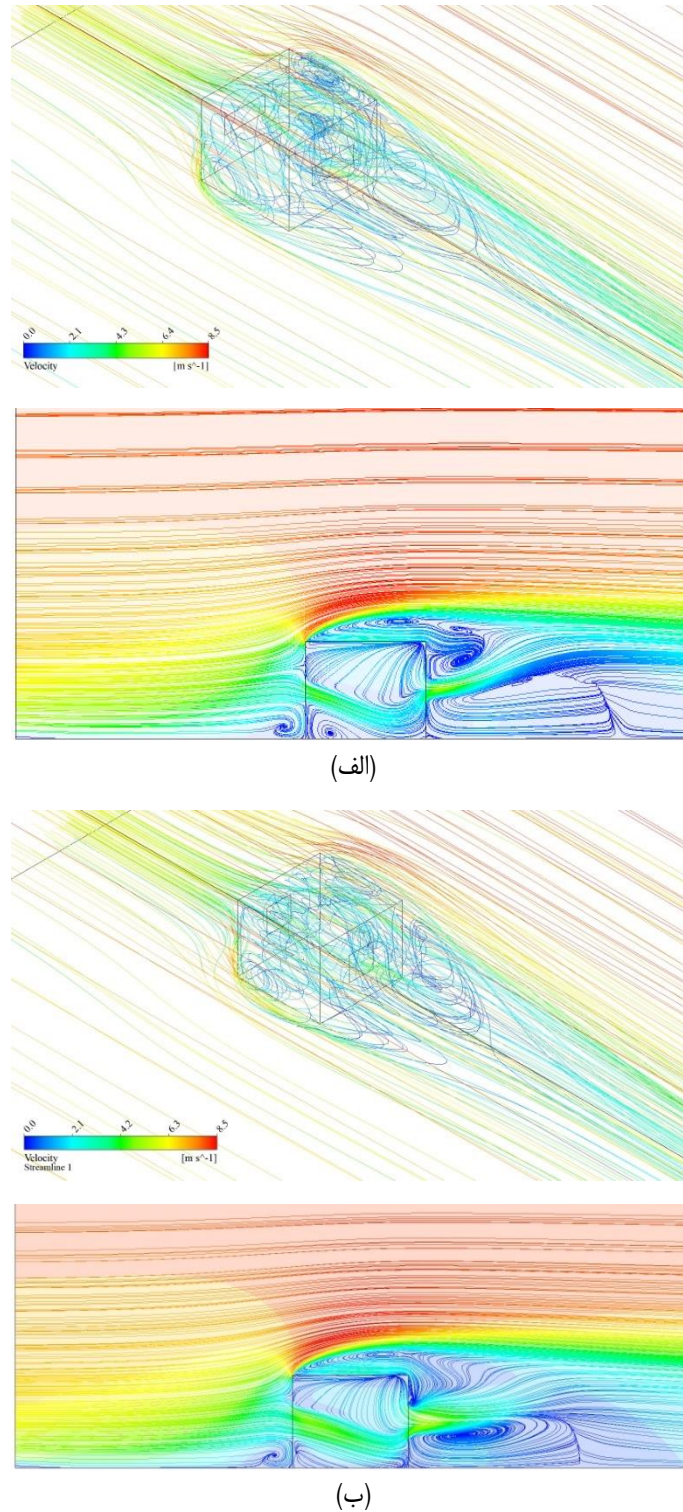
شده در این جدول مربوط به صفحه میانی ساختمان و همچنین مربوط به نیمه بالایی و پایینی منطقه سکونت افراد بوده و در سایر مناطق ساختمان، مقادیر سرعت پایین‌تری مشاهده می‌شود که به مقادیر مندرج در استاندارد مذکور نزدیک خواهد بود.

اختلاف فشار اطراف ساختمان از دیگر پارامترهای مؤثر در تهویه طبیعی است. در شکل ۱۳ مقادیر ضریب فشار در راستای خط اتصال دو مرکز مقاطع ورودی و خروجی ساختمان برای حالت‌های مختلف ترسیم گردیده است. دلیل اصلی کاهش فشار جریان عبوری از ساختمان، افت فشار ایجاد شده در دو مقطع ورودی و خروجی می‌باشد. به صورت کلی فشار جریان در فضای داخلی ساختمان برای تمامی مدل‌ها دارای مقدار ثابتی می‌باشد. در مدل‌های دارای پنجره‌های مستطیلی که ارتفاع پنجره از عرض آن بیشتر است، به دلیل وجود گردابه‌های قوی‌تر در قسمت ورودی ساختمان افت فشار شدیدتری مشاهده شده است، لذا مقدار فشار مربوط به فضای داخلی این نوع ساختمان‌ها نسبت به سایر مدل‌ها کمتر می‌باشد. افت فشار به وجود آمده در قسمت خروجی نیز برای مدل‌های با نرخ تناسب کوچک‌تر از یک نسبت به مدل‌های با نرخ تناسب بیشتر از یک، شدیدتر می‌باشد. افت فشار بیشتر ایجاد شده در منطقه ورودی ساختمان برای مدل‌های با نرخ تناسب کمتر از



شکل ۱۳. ضریب فشار بدست آمده مربوط به نقاط موجود بر خط اتصال مراکز ورودی و خروجی ساختمان واقع در صفحه میانی ساختمان در مطالعه عددی حاضر برای مدل‌های با ابعاد پنجره متفاوت در سه ناحیه مختلف، (الف) جلوی ساختمان، (ب) نواحی داخلی ساختمان و (ج) پشت ساختمان

Fig. 13. The pressure coefficient obtained for points on the line connecting the centers of the building's entry and exit located in the building's middle plane in the present numerical study, for models with different window dimensions in three distinct areas: a) Front of the building, b) Interior areas of the building, and c) Rear of the building



شکل ۱۴. کانتور سه بعدی و دو بعدی خطوط جریان در داخل و خارج ساختمان، (الف) ساختمان با نرخ تناسب پنجره برابر ۰/۳۹ و (ب) ساختمان با نرخ تناسب پنجره برابر ۱

Fig. 14. 3D and 2D streamline contours inside and outside the building with different AR values: a) AR = 0.39, and b) AR = 1

۵- جمع‌بندی

- تغییرات فشار در ناحیه روبروی دیواره رو به باد در بین مدل‌های مختلف، بیشتر از ناحیه پشت دیواره پشت به باد می‌باشد.
- استفاده از پنجره‌های مربعی و همچنین پنجره‌های با ارتفاع بیشتر نسبت به پنجره‌های با عرض بیشتر، منطقه سکونت را بیشتر تحت تأثیر خود قرار می‌دهد.
- جریان وارد شده از پنجره ورودی ساختمان برای مدل‌های دارای نرخ تناسب بزرگ‌تر از یک، به سمت قسمت پایین ساختمان وارد می‌شود و با افزایش این مقدار نواحی دارای ارتفاع بیشتر در فضای داخلی ساختمان بیشتر تحت تأثیر جریان ورودی قرار می‌گیرند.
- افت فشار بیشتر ایجاد شده در منطقه ورودی ساختمان برای مدل‌های با نرخ تناسب بیشتر از یک، سبب افزایش نرخ دبی ورودی به این نوع ساختمان‌ها می‌شود.

منابع

- [1] Z. Jiang, T. Kobayashi, T. Yamanaka, M. Sandberg, A literature review of cross ventilation in buildings, *Energy and Buildings*, 291 (2023) 113143.
- [2] A. Buonomano, C. Forzano, G. Giuzio, A. Palombo, New ventilation design criteria for energy sustainability and indoor air quality in a post Covid-19 scenario, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 182 (2023) 113378.
- [3] W. Su, Z. Ai, J. Liu, B. Yang, F. Wang, Maintaining an acceptable indoor air quality of spaces by intentional natural ventilation or intermittent mechanical ventilation with minimum energy use, *Applied Energy*, 348 (2023) 121504.
- [4] R. Ramponi, B. Blocken, "CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters", *Building and Environment*, 53 (2012) 34-48.
- [5] X. Zhang, A.U. Weerasuriya, J. Wang, C.Y. Li, Z. Chen, K.T. Tse, J. Hang, Cross-ventilation of a generic building with various configurations of external and internal openings, *Building and environment*, 207 (2022) 108447.
- [6] S. Díaz-Calderón, J. Castillo, G. Huelsz, Evaluation of different window heights and facade porosities in naturally cross-ventilated buildings: CFD validation, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 232

در این پژوهش سعی شده است تا تهویه ناشی از جریان هوا در اطراف و داخل ساختمان مورد بررسی قرار بگیرد. در این زمینه ابتدا سعی شده است تا روش مطالعه عددی در نظر گرفته شده، اعتبار سنجی گردد. جهت مدل‌سازی جریان از معادلات ناویر-استوکس میان‌گیری شده در سه بعد و در حالت دائمی به همراه مدل توربولانسی انتقال تنش برشی کی-امگا استفاده گردیده است. لازم به ذکر است در این تحقیق، جریان داخل و خارج ساختمان همزمان با یکدیگر مورد بررسی قرار داده شده‌اند.

یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر روی جریان داخلی و نرخ تهویه ساختمان ابعاد پنجره ساختمان می‌باشد، لذا در این پژوهش سعی شده است تا ۷ مدل با پنجره‌های دارای سطح مقطع یکسان مورد بررسی قرار بگیرند. علاوه بر این، همه مدل‌های اشاره شده در ۶ زاویه وزش متفاوت مورد بررسی و تحلیل قرار داده شده‌اند. در ادامه به نکته‌های مهم بدست آمده در این مقاله اشاره شده است.

- بیشترین مقدار تهویه در ساختمان در مدل با نرخ تناسب $1/56$ و کمترین آن در مدل با نرخ تناسب $0/39$ بدست آمده است. همچنین با افزایش نسبت عرض به ارتفاع پنجره، مقدار دبی ورودی به ساختمان، به صورت کلی کاهش یافته است.
- استفاده از پنجره‌های مستطیلی شکل در ساختمان، نسبت به پنجره‌های مربعی شکل جهت افزایش نرخ تهویه ترجیح داده می‌شود.
- برای زاویه‌های وزش بزرگ‌تر از 20 درجه، افزایش زاویه وزش باد منجر به کاهش شدیدی در مقدار نرخ تهویه می‌شود و در مدل‌هایی که زوایای وزش باد کمتر از 20 درجه، در یک نرخ تناسب معین، تغییرات محسوسی مشاهده نمی‌گردد.
- در زوایای وزش بیشتر از 30 درجه، برای پنجره‌های با ابعاد مختلف، نرخ تهویه مستقل از ابعاد پنجره می‌باشد.
- در فضای داخل ساختمان $(1 < \frac{V}{L} < 0/2)$ برای مقادیر مختلف نرخ تناسب، روند تغییرات سرعت برای نقاط واقع بر خط اتصال ورودی و خروجی از ساختمان، یکسان است.
- در صورت استفاده از پنجره‌های با ابعاد مختلف، ناحیه مجاور پنجره رو به باد در فضای داخلی ساختمان، بیشتر از سایر نواحی داخلی، تحت تأثیر قرار می‌گیرد.
- با افزایش ارتفاع پنجره‌ها، از نواحی سرعت بالا در نواحی داخلی ساختمان کاسته شده و بر نواحی سکون و با سرعت پایین افزوده می‌شود.

- tunnel experiments, in: *Building Simulation*, Springer, 13 (2020) 1353-1372.
- [17] Y. Jiang, D. Alexander, H. Jenkins, R. Arthur, Q. Chen, "Natural ventilation in buildings: measurement in a wind tunnel and numerical simulation with large-eddy simulation", *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 91 (2003) 331-353.
- [18] M. Shirzadi, P.A. Mirzaei, Y. Tominaga, LES analysis of turbulent fluctuation in cross-ventilation flow in highly-dense urban areas, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 209 (2021) 104494.
- [19] C. Chu, B. Chiang, Wind-driven cross ventilation in long buildings, *Building and Environment* 80 (2014) 150-158.
- [20] Fluent User Manual. Fluent Inc., (1998).
- [21] P. Karava, "Airflow Prediction in Buildings for Natural Ventilation Design: Wind Tunnel Measurements and Simulation.", Phd thesis, Concordia University, Montreal Quebec, (2008).
- [22] Y. Tominaga, A. Mochida, R. Yoshie, H. Kataoka, T. Nozu, M. Yoshikawa, T. Shirasawa, "AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings", *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96 (2008) 1749-1761.
- [23] B.E. Launder, D.B. Spalding, The numerical computation of turbulent flows, in: *Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion*, Elsevier, (1983) 96-116.
- [24] T. Cebeci, P. Bradshaw, *Momentum transfer in boundary layers*, Washington, (1977).
- [25] B. Blocken, J. Carmeliet, T. Stathopoulos, CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings—effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95(9-11) (2007) 941-962.
- [26] ANSYS fluent user's guide, release 19.0, ANSYS Inc, Canonsburg, (2018).
- [27] R. Ramponi, B. Blocken, "CFD simulation of (2023) 105263.
- [7] M. Jesson, M. Sterling, C. Letchford, C. Baker, Aerodynamic forces on the roofs of low-, mid-and high-rise buildings subject to transient winds, *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 143 (2015) 42-49.
- [8] T. Van Hooff, B. Blocken, "Coupled urban wind flow and indoor natural ventilation modelling on a high-resolution grid: A case study for the Amsterdam ArenA stadium", *Environmental Modelling & Software*, 25 (2010) 51-65.
- [9] O.P. James, L. Chun-Ho, "CFD simulations of natural ventilation behaviour in high-rise buildings in regular and staggered arrangements at various spacings", *Energy and Buildings*, 43 (2011) 1149-1158.
- [10] Y. Wu, A. Yang, L. Tseng, C. Liu, "Myth of ecological architecture designs: Comparison between design concept and computational analysis results of natural-ventilation for Tjibaou Cultural Center in New Caledonia", *Energy and Buildings* 43 (2011) 2788-2797.
- [11] H. Montazeri, B. Blocken, "CFD simulation of wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: Validation and sensitivity analysis", *Building and Environment* 60 (2013) 137-149.
- [12] C. Chu, B. Chiang, "Wind-driven cross-ventilation with internal obstacles", *Energy and Buildings*, 67 (2013) 201-209.
- [13] C. Chu, Y. Chiu, Y. Wang, "An experimental study of wind-driven cross ventilation in partitioned buildings", *Energy and Buildings*, 42 (2010) 667-673.
- [14] G. Evola, V. Popov, "Computational analysis of wind driven natural ventilation in buildings", *Energy and Buildings*, 38 (2006) 491-501.
- [15] T. Norton, J. Grant, R. Fallon, D. Sun, "Optimising the ventilation configuration of naturally ventilated livestock buildings for improved indoor environmental homogeneity", *Building and Environment*, 45 (2010) 983-995.
- [16] M. Shirzadi, P.A. Mirzaei, Y. Tominaga, CFD analysis of cross-ventilation flow in a group of generic buildings: Comparison between steady RANS, LES and wind

- 2014(1) (2014) 794650.
- [30] B. Mou, B.-J. He, D.-X. Zhao, K.-w. Chau, Numerical simulation of the effects of building dimensional variation on wind pressure distribution, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 11(1) (2017) 293-309.
- [31] B. ASHRAE, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Addendum d to ANSI/ASHRAE Standard 55-2004, Proposed Addendum d to Standard 55-2004, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA, USA, (2008).
- cross-ventilation flow for different isolated building configurations: Validation with wind tunnel measurements and analysis of physical and numerical diffusion effects”, *Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, (104-106) (2012) 408-418.
- [28] M. Ohba, K. Irie, T. Kurabuchi, Study on airflow characteristics inside and outside a cross-ventilation model, and ventilation flow rates using wind tunnel experiments, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89(14-15) (2001) 1513-1524.
- [29] Z. Huifen, Y. Fuhua, Z. Qian, Research on the impact of wind angles on the residential building energy consumption, *Mathematical Problems in Engineering*,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Shaker, E. Ebrahimi Fordoei, *CFD Simulation Investigation for Flow of Inside and Outside of Building: Impact of the Window Dimensions and the Wind Directions*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 56(9) (2024) 1249-1274.

DOI: [10.22060/mej.2025.23327.7745](https://doi.org/10.22060/mej.2025.23327.7745)



