

Evaluation of Natural Ventilation Performance Using Modeling of Urban Forms in the Old Context of Shiraz Metropolis

Ardalan Aflaki^{1*}, Saghar Hasani², Seyedeh Aida Hosseini³, Amin Habibi⁴, Mohammad Nikkar⁵

1. Assistant Professor, Department of Architecture, University of Guilan, Rasht, Iran

2. Master of Urban Planning, Apadana Institute of Higher Education, Shiraz, Iran

3. PhD Candidate in Urban Planning, Faculty of Art and Architecture, Shiraz University, Shiraz, Iran

4. Associate Professor, Department of Architecture, Shiraz University, Shiraz, Iran

5. Assistant Professor, Department of Architecture, Shiraz University, Shiraz, Iran

Highlights:

Natural ventilation is a relevant passive design strategy to reduce pollutants in street corridors. According to results, gradual incident of building heights from the street edge increases the removal efficiency of wind.

The optimal air speed of 1.2 to 1.5 ms⁻¹ and normal distribution of air flow decrease air contaminant when the normal distribution of air pressure increases the effectiveness of natural ventilation in street.

ARTICLE INFO

UPK, 2024

VOL. 8, Issue 3, PP, 120-139

Received: 15 Apr. 2024

Accepted: 14 Sep. 2024

Article Type:

Research article

Keywords: Urban form, natural ventilation, air flow pattern, air quality, urban street

Cite this article:

Aflaki, A. , Hasani, S. , Hoseini, S. A. , Habibi, A. and Nikkar, M. (2024). Evaluation of natural ventilation performance using modeling of urban forms in the old context of Shiraz metropolis. *Urban Planning Knowledge*, 8(3), 120-139.

DOI: [10.22124/upk.2025.28792.1980](https://doi.org/10.22124/upk.2025.28792.1980)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: The rapid urbanization since the Industrial Revolution has significantly altered cities, replacing natural surfaces with buildings, which impacts near-ground meteorological conditions like temperature, wind, and humidity. This leads to pollution, urban heat islands, and higher energy demands. Urban ventilation, influenced by factors like urban design, can help mitigate these effects.

Studies on urban ventilation focus on macro, meso, and micro scales, with micro-scale studies using CFD simulations and wind tunnel experiments to optimize airflow. In Shiraz, rapid development, destruction of greenery, and heavy traffic have made it the eighth most polluted city in Iran. This study examines the historical fabric of District 8 in Shiraz, focusing on building arrangement and its effect on airflow and pollution. The goal is to use CFD simulations and data to improve natural ventilation and address pollution, enhancing Shiraz's environment and quality of life in the face of climate change and urban growth.

Methodology: The historical fabric of Shiraz, covering an area of 395.90 hectares, houses a population of around 92,173 people, with a density of 199 people per hectare. It is located between Karim Khan Zand and Lotfali Khan Zand streets. According to cultural heritage regulations, building heights in this area should range from one to two stories; however, along the periphery of the fabric, particularly the ring surrounding it (between Qa'ani, Timuri, Saadi, and Tawhid streets), there are three- to four-story buildings, and even taller structures. In main streets such as Karim Khan Zand, Lotfali Khan Zand, and Ahmadi, there is also a trend towards taller buildings.

For this research, an area of District 8 along Lotfali Khan Zand Street was selected due to its minimal changes and preservation of the original form and structure of buildings. However, within the old fabric, newly constructed buildings with varying heights have altered the original arrangement. This study uses a quantitative approach and simulation with the FloEFD software to assess airflow within the studied fabric. After library research and reviewing the existing site conditions, the initial model was created using the software.

To evaluate the impact of research components on airflow and pollutant reduction on Lotfali Khan Zand Street, two additional models were created. In the first model, building heights increase from the street edge into the fabric, while in the second model, the height decreases as it approaches the street. The

*Corresponding Author: ar.aflaki@guilan.ac.ir



software uses the Navier-Stokes equations and the k- ϵ model to calculate wind direction and intensity, with advanced meshing techniques to improve computational accuracy. For simplification and to fit within system limitations, details like green spaces and intricate building features were excluded from the modeling.

The models in FloEFD were designed using SolidWorks, integrated within the software. These models were based on existing maps and field data from buildings on Lotfali Khan Zand Street and the layers behind them. Irregularities in building heights cause air to be trapped in the fabric, hindering proper air exchange and ventilation. For fluid calculations, the computational domain was considered as a rectangular box around the model. Additionally, environmental data such as temperature, wind speed, and air pressure were input based on average meteorological data.

This study evaluates three components: building heights (A), street widths (B), and urban block arrangements (C), by altering these parameters in the simulation software and analyzing their impacts on airflow, permeability, pressure, and temperature. Three different models were examined:

1. Model 1: The existing situation with buildings scattered at irregular heights ranging from one to three stories.
2. Model 2: Units with lower density and fewer stories (one to two stories) at the street edge, with taller buildings (three to six stories) behind them.
3. Model 3: Taller buildings (three to six stories) at the street edge, with shorter units (one to two stories) behind them.

In the simulation, parameters such as primary and secondary wind speeds, static and dynamic pressures, and the temperature of the incoming airflow were chosen as the objectives for analysis. All models were pre-meshed with advanced techniques before simulation.

Results: Simulation model analysis: The simulation findings were reviewed using horizontal (Cut Plot), vertical (Surface Plot), and airflow trajectory (Flow Trajectories) distributions. The three models studied were:

1. Existing fabric model: Irregular building dispersion.
2. Lower floors at the street edge and higher floors behind: Relatively improved ventilation.
3. Higher floors at the street edge and lower floors behind: The most effective model for proper airflow.

Conclusion: In the studied area, creating diverse block arrangements and considering various building heights can enhance urban ventilation. The arrangement of buildings—lower heights near the street edge and taller ones behind—can improve wind flow, optimize natural ventilation, and significantly reduce pollutant levels. These findings offer valuable insights for urban planning, especially for areas in Shiraz, to help mitigate pollution and enhance the quality of life for residents.



ارزیابی عملکرد تهویه طبیعی با استفاده از مدل سازی فرم های شهری در بافت قدیم کلان شهر شیراز

اردلان افلاکی^{۱*}، ساغر حسینی^۱، سیده آیدا حسینی^۲، امین حبیبی^۳، محمد نیک کار^۴

۱. استادیار گروه معماری، دانشکده معماری و هنر، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
۲. دانش آموخته کارشناسی ارشد شهرسازی، موسسه آموزش عالی آپادانا، شیراز، ایران
۳. کاندیدای دکتری شهرسازی، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
۴. دانشیار بخش معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
۵. استادیار بخش معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

نکات برجسته:

تهویه طبیعی به عنوان یک راهکار طراحی غیرفعال در کاهش آلاینده ها در کریدورهای شهری نقش موثری دارد. براساس یافته های تحقیق، شیب تدریجی ارتفاع ساختمان ها از جداره به سمت بافت دربرگیرنده خیابان در افزایش کارایی تهویه طبیعی در خروج آلاینده ها تاثیر بسزایی دارد. توزیع فشار هوای مناسب در کریدورهای شهری و سرعت جریان هوا بین ۱/۲ تا ۱/۵ متر بر ثانیه به توزیع نرمال جریان هوا کمک می کند که در نهایت منجر به خروج آلاینده ها از سطوح مختلف خیابان می شود.

چکیده

اطلاعات مقاله

بیان مسئله: با توسعه شهرها در عصر حاضر، مشکلات و پدیده هایی مانند جزایر گرمایی شهری، کاهش کیفیت هوا در بافت شهرها و عدم آسایش حرارتی در فضاهای عمومی شهرها چالش های عمیقی برای زیست شهروندان به وجود آورده اند. از طرف دیگر، در مطالعات معماری و شهری، کمتر مطالعه ای به ویژگی های فرم و شکل شهرها به منظور افزایش تهویه طبیعی در خیابان ها به عنوان فضاهای عمومی پرتردد در شهرها پرداخته است.

هدف: این مطالعه با در نظر گرفتن تراکم و ارتفاع ساختمان ها در جداره یک خیابان شهری در بافت میانی کلان شهر شیراز، به ارزیابی مدل های ممکن در جهت افزایش تهویه طبیعی و در نتیجه کاهش گرمای محیط شهری و خروج بهتر آلاینده ها می پردازد.

روش: روش انجام تحقیق از نوع کمی و از ابزار شبیه سازی محاسبات دینامیک سیالات برای مدل سازی جریان باد در محیط شهری استفاده شده است. بر این اساس نرم افزار FloEFD پس از اعتبارسنجی در این مطالعه قرار گرفت و پس از مدل سازی در محیط داخلی نرم افزار سه مؤلفه دما، فشار، سرعت جریان هوا و الگوی حرکتی جریان هوا بین مدل های ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفت.

یافته ها: یافته های مطالعه نشان می دهد مدل دوم که با افزایش تدریجی تعداد طبقات از جداره خیابان به سمت بافت در نظر گرفته شده است، توزیع هوا و سرعت مناسب جریان هوای مناسب تری نسبت به دیگر مدل های بررسی شده، داشته است. بر اساس نتایج عددی، سرعت جریان در این مدل تا ۲/۲ متر بر ثانیه افزایش داشته است. نتیجه گیری: در ارتباط با الگوی جریان هوا در مدل بهینه، جریان با شدت سرعت بیشتر و در تمامی نقاط بافت و خیابان مورد مطالعه پراکنده شده است که این امر منجر می تواند به خروج بهتر گرما و آلاینده ها از محیط خیابان منجر شود. مدل دوم یعنی افزایش تدریجی ارتفاع ساختمان ها از لبه خیابان به سمت بافت بهترین سرعت جریان هوا به منظور تهویه طبیعی در خیابان فراهم می کند. همچنین الگوی حرکتی جریان در مدل دوم نسبت به دو مدل دیگر بهتر می تواند در توزیع جریان در نقاط مختلف خیابان عمل کند به طوری که توزیع دما و فشار متوازن در نقاط مختلف منجر به افزایش کارایی تهویه در محیط خیابان گردیده است.

دانش شهرسازی، ۱۴۰۳

دوره ۸، شماره ۳، صفحات ۱۳۹-۱۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۴

نوع مقاله:

پژوهشی

کلید واژه ها: فرم شهری، تهویه طبیعی، الگوی حرکتی جریان هوا، کیفیت هوا، خیابان شهری

ارجاع به این مقاله:

افلاکی، اردلان، حسینی، ساغر، حسینی، سیده آیدا، حبیبی، امین و نیک کار، محمد. (۱۴۰۳). ارزیابی عملکرد تهویه طبیعی با استفاده از مدل سازی فرم های شهری در بافت قدیم کلان شهر شیراز. دانش شهرسازی، ۸ (۳) ۱۳۹-۱۲۰.

DOI: [10.22124/upk.2025.28792.1980](https://doi.org/10.22124/upk.2025.28792.1980)

بیان مسئله

از آغاز انقلاب صنعتی، مردم به طور فزاینده‌ای در مناطق شهری ساکن شده‌اند و توسعه سریع اقتصاد جهانی منجر به افزایش شدید جمعیت شهری گردیده است (He et al, 2019; Yang et al, 2021). این امر علاوه بر اینکه موجب شده سطوح طبیعی شهرها، به تدریج با ساخت‌وسازهای شهری جایگزین شود، به دلیل سرعت تخریب و بازسازی‌ها در طی زمان، منجر به ساختمان‌سازی در ارتفاع‌ها و اندازه‌های مختلف و به وجود آمدن فرم‌های ناهمگون و پیچیده نیز گردیده است (Hou et al, 2021). این تغییرات تأثیرات قابل توجهی بر شرایط هواشناسی نزدیک به زمین، از جمله دما، فشار، میدان باد و رطوبت داشته که سبب افزایش آلودگی‌ها و روند صعودی میانگین دمای سطوح شهری گردیده است (Chapman et al, 2017). درواقع، گرما و آلودگی‌ها به طور مداوم تولید می‌شوند اما قابلیت تخلیه‌ی مؤثر و به موقع را ندارند و این باعث می‌شود که اقلیم شهری یک دور باطل را تشکیل دهد (Zongci et al, 2016). این عوامل سبب شده‌اند که اکنون تقاضای مصرف انرژی در محیط‌های شهری، سهم بالایی از کل تقاضای انرژی انسان را تشکیل دهد (Hou et al, 2021; Peng et al, 2020). برای مقابله با این معضلات، نیازمند تهویه با راندمان بالا به جهت توانایی در حذف آلاینده‌ها، گرمای اضافی و همچنین بهبود شرایط جوی شهرها می‌باشیم، زیرا این عوامل رابطه‌ی بسیار نزدیکی با میزان و نوع حرکت باد دارند (You & Ding, 2017; Wang et al, 2021). در این راستا، معماران، طراحان و برنامه‌ریزان شهری معتقد هستند که فرم‌های حاکم بر فضاهای شهری، یکی از عوامل مهم و مؤثر بر شرایط تهویه طبیعی هستند و یک فرم شهری خوب، نقش مهمی در تنظیم ریزاقلیم شهری و کاهش سرانه‌ی اثرات منفی زیست‌محیطی یک شهر ایفا می‌کند (Delmastro & Gargiulo, 2020; Jing et al, 2019). درواقع، تهویه‌ی طبیعی باید با بهره‌برداری از ویژگی‌های فیزیکی سطح شهری برای کاهش مؤثر مشکلات به وجود آمده، در مرحله‌ی طراحی و قبل از اجرا، بررسی شود و مورد ارزیابی قرار گیرد (Yang et al, 2020; Krüger et al, 2011; Shan et al, 2018).

برای بررسی شاخص‌های مورفولوژیکی مرتبط با کارایی تهویه شهری، لازم است رابطه بین ویژگی‌های فرم شهری و عملکرد تهویه مورد مطالعه قرار گیرد. مطالعات موجود در مورد تهویه شهری را می‌توان به سه مقیاس تقسیم کرد: ماکرو (Yuan et al, 2014)، مزو (You et al, 2017)، و مقیاس خرد (Buccolieri et al, 2010; Ji et al, 2019). مقیاس ماکرو و مزو، عمدتاً بر روی میدان‌های بادی اهرمی در ارتفاع‌های بالا و میدان‌های بادی اهرمی سایه‌بان شهری متمرکز شده‌اند که معمولاً به شبیه‌سازی‌های عددی مانند مدل‌سازی‌های پیش‌بینی‌های آب‌وهوا متکی هستند (Ren et al, 2014). در مقابل، مطالعات در مقیاس خرد، عمدتاً بر میدان‌های بادی نزدیک به زمین متمرکز شده‌اند، تحقیقاتی که عمدتاً از طریق شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و آزمایش‌های تونل باد انجام می‌شود (Li et al, 2019). زیرا به طراحان و برنامه‌ریزان شهری این امکان را می‌دهند که شاخص‌های مورفولوژیکی مربوط به تهویه‌ی شهری را ارزیابی و بر اساس محدوده‌ی مورد نظر، تنظیم نمایند (Voordeckers et al, 2021). بنابراین، در میان این مقیاس‌ها، تحقیقات بر روی فرم‌های فضای شهری در مقیاس خرد از اهمیت بیشتری برخوردار است، زیرا طراحان شهری، فضاهای محلی را به عنوان گره‌های طراحی در نظر می‌گیرند و با چیدمان ساختمان‌های اطراف (مانند طول، ارتفاع، شکل و فاصله) ابتدا فرم فضاهای محلی را کنترل می‌نمایند و سپس تحقیقات را تا مقیاس شهر توسعه می‌دهند.

کلان‌شهر شیراز به لحاظ جمعیتی پنجمین شهر بزرگ ایران و بزرگ‌ترین شهر جنوب کشور محسوب می‌شود. دارا بودن ویژگی‌های بالقوه همچون آب‌وهوای بهتر نسبت به دیگر شهرهای جنوبی، مرکز خدمات پزشکی و درمانی، وجود امکانات آموزشی، تجاری و...، منجر شده تا این کلان‌شهر به طور روزافزون، جمعیت بیشتری را به خود جذب نماید و در پی آن توسعه‌ی سریع و غیرقابل‌کنترلی را رقم زند. این عوامل و همچنین قطع درختان و تخریب باغات در این کلان‌شهر تاریخی و کهن، منجر شده تا این شهر که روزی به داشتن آب‌وهوای پاک مشهور بود، لقب هشتمین شهر آلوده‌ی کشور را به خود بگیرد. از سویی؛ شیراز به علت دارا بودن آب‌وهوای گرم و نیمه‌خشک، روزبه‌روز استفاده از وسایل خنک‌کننده‌ی مبتنی بر گازهای گلخانه‌ای افزایش یافته و واقع‌شدن بین دو رشته‌کوه انتهایی جنوبی زاگرس منجر به محبوس شدن بیشتر هوا گردیده است. از سوی دیگر، بر اساس آمارهای مدیرکل حفاظت محیط‌زیست فارس؛ در حال حاضر روزانه در سطح شهر شیراز بیش از ۸۰۰ هزار خودرو در حال تردد بوده و بیش از ۷۵ درصد آلودگی هوا ناشی از احتراق سوخت در وسایل نقلیه موتوری است، همچنین خودروهای فرسوده با عمر بالای ۲۰ سال که به دلیل مصرف بالای بنزین حجم زیادی از گازهای آلاینده را وارد هوا می‌کنند، ۲۲ درصد از آلودگی‌های هوای شهر شیراز را ۲۵ هزار خودرو فرسوده این شهر ایجاد می‌کنند. بر اساس آمار ارائه‌شده ۹۳ درصد از مینی‌بوس‌های شهری، ۴۷ درصد از اتوبوس‌های درون‌شهری و ۳۷ درصد از تاکسی‌های شهر شیراز فرسوده هستند. مجموع این عوامل موجب شده تا آلودگی و

جزایر گرمایی، روندی صعودی‌ای را در شیراز در پیش بگیرند و آینده‌ی روشن آن را مورد تهدید قرار دهند. از این رو، پژوهشگران بیش‌ازپیش به دنبال راه‌حل‌هایی برای حل مشکلات پیش‌آمده در این کلان‌شهر تاریخی و کهن هستند (Iran Statistics Center, 2015).

بنابر آنچه بیان گردید؛ این پژوهش بخشی از بافت تاریخی و قدیمی کلان‌شهر شیراز که در منطقه‌ی ۸ آن واقع است را با توجه به موقعیت جغرافیایی و تردد خودروها، آلودگی‌های هوا، غلظت گازهای آلاینده دی‌اکسید کربن، اکسیدهای ازت، گردوغبار و... مورد بررسی قرار می‌دهد. همچنین نحوه قرارگیری ساختمان‌ها و نسبت‌های ارتفاعی که موجب بیشتر شدن و یا بسته شدن محیط و در نتیجه افزایش و محبوس شدن ذرات آلوده و گرما می‌گردد را نیز تحلیل می‌نماید. بنابراین هدف این مقاله، ارزیابی فاکتورهای مؤثر در کالبد شهری به‌منظور افزایش تهویه طبیعی در بافت میانی شهر شیراز است تا با بهبود شیوه‌های طراحی شهری از طریق تحقیقات نوآورانه و فناوری، از جمله شبیه‌سازی‌های CFD و داده‌های تجربی در شیراز، به توسعه محیط‌های شهری انعطاف‌پذیر و سازگار با اقلیم کمک کند. با مواجهه شهر شیراز با چالش‌های فزاینده مرتبط با تغییرات اقلیمی و افزایش جمعیت، بهره‌برداری از این بینش‌ها در ایجاد فضاهای شهری که نه تنها کارا بلکه مطلوب برای کیفیت بالای زندگی باشند، بسیار حائز اهمیت خواهد بود.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

شکل‌شناسی شهری و تهویه طبیعی از گذشته تاکنون، از حوزه‌های پژوهشی مهم در برنامه‌ریزی شهری هستند که بر پایداری محیطی و راحتی انسانی تأثیر می‌گذارند. در گذشته، برنامه‌ریزی شهری باد را به‌عنوان یک عامل حیاتی در نظر گرفته است. به‌طور مشابه، شهرهای یونان باستان مانند الینتوس برای پاسخگویی به اقلیم بهینه برنامه‌ریزی شده بودند (Pakzad, 2017). در روم نیز ویتروسیوس، بر برنامه‌ریزی شهری مبتنی بر اقلیم تأکید داشت و برای چیدمان خیابان‌ها که به‌عنوان بادشکن عمل می‌کنند، استدلال کرد. در دوره رنسانس، اندیشمندان مانند آلبرتی بر اهمیت نور خورشید کافی و تهویه در طراحی شهری برای ارتقاء سلامت تأکید داشتند (Morris, 2012). این تأکید تاریخی بر عوامل محیطی تا دوره مدرن ادامه یافت. نظریه شهر صنعتی تونی گارنیه، از پیشگامان برنامه‌ریزی شهری مدرن - که در ابتدای قرن بیستم ارائه شد جزو اولین طرح‌ها پس از انقلاب صنعتی است که به حفظ آب و هوایی پیاده‌ها توجه نشان داده است (Ostrovsky, 2015). وی پروژه‌ی «شهر صنعتی» خود را با خط آسمان منقطع طراحی می‌کند؛ که تهویه و نورگیری کامل و مناسب را ممکن می‌سازد (Bahraini et al, 2012). روابط مفید بین هندسه خیابان و خرد اقلیم شهری را شناسایی کرد و هنگ‌کنگ پس از تجربه‌ی سارس در سال ۲۰۰۳، پروژه‌های توسعه‌ی «ارزیابی‌های تهویه‌ی هوا» را به اجرا درآورد (Ng, 2009). در نهایت، مفهوم «شهر قابل‌تنفس»، معرفی شده توسط نتوفیتو و بریتزی در سال ۲۰۰۵، توانایی مناطق شهری برای تهویه خود با پراکندگی آلاینده‌ها و گرما را توصیف نمود (Panagiotou et al, 2010).

بررسی‌ها نشان داده‌اند که فرم پیچیده‌ی شهری ممکن است منجر به یک سطح زیرین جوی ناهموار شود که با وقوع گرداب‌های هوایی محلی، فرارفت هوایی در مقیاس کوچک و پیچیده، محیط باد داخل شهر را بر اثر وجود سازه‌های ناهمگون، از بادهای منطقه‌ای دست‌نخورده دور می‌کند. برای حل این معضل، باید شاخص‌های اثرگذار مورد شناسایی قرار گیرند. شاخص‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند:

- گروه اول شامل شاخص‌های اساسی است که برای ارزیابی محیط باد در فضای و ارتباط آن با آسایش باد استفاده می‌شود که شامل «سرعت» و «جهت» باد است و معمولاً برای انعکاس ویژگی‌های اساسی میدان جریان استفاده می‌شود (Ng et al, 2011; Razak et al, 2013). نسبت سرعت باد می‌تواند به‌طور شهودی تأثیر فرم فضایی شهری را بر میدان جریان محلی منعکس کند و به‌عنوان یکی از معیارها برای ارزیابی یک محیط باد مشخص، مورد استفاده قرار گیرد (Blocken et al, 2016; Van Druenen et al, 2019).

- گروه دوم شاخص‌ها، امکان ارزیابی کارایی به‌اصطلاح «تهویه‌ی فضای باز شهری» یا «تهویه‌ی شهری» که معمولاً به‌عنوان «تنفس شهری» یا «قابلیت تنفس شهر» نامیده می‌شود را می‌دهد. درواقع این شاخص‌ها بیانگر میزان توانایی یک منطقه شهری برای رقیق کردن آلاینده‌ها، گرما و رطوبت و تبادل هوا بین محیط ساخته‌شده‌ی شهری و هوای آزاد اطراف آن می‌باشند (Antoniou et al, 2017). به بیانی جامع‌تر؛ این شاخص‌ها بر شاخص‌های گروه اول تأثیرگذار بوده و قادر به بهبود یا نزول کیفیت آن‌ها در فضاهای شهری هستند. این شاخص‌ها می‌توانند عوامل مانند مورفولوژی شهری، ارتفاع و جهت ساختمان‌ها، نسبت توده به فضا، نسبت عرض خیابان به ارتفاع ساختمان‌ها میزان پوشش گیاهی، جهت‌گیری خیابان و دیگر مواردی که بر میزان دما و فشار هوا نیز تأثیرگذار بوده و در مجموع میزان تبادل

و در نهایت قابلیت تنفس شهر را مشخص می‌نمایند. در ادامه به بررسی شاخص‌های گروه دوم تهویه فضای باز شهری و میزان اثربخشی آن‌ها از نگاه پژوهشگران، پرداخته خواهد شد.

≠ **ارتفاع ساختمان‌ها:** لی^۱ و همکاران (2023)، نشان دادند که حذف ساختمان‌های بلند از مسیر باد می‌تواند الگوهای جریان هوا را تحت تأثیر قرار دهد. تومیناگا و شیرزادی^۲ (2021) نیز ضمن تأیید این امر یک گام جلوتر رفته و معتقد هستند ساختمان‌های بلند، نوسان سرعت باد را ایجاد می‌کنند که می‌تواند آزاردهنده باشد. توپارلار^۳ و همکارانش (2015)، با نگاهی جامع‌تر بیان داشتند که وجود ساختمان‌ها با ارتفاع‌های مختلف، الگوی جریان هوای پویاتر، تهویه و راحتی بیشتری ایجاد می‌کند.

≠ **نسبت ارتفاع ساختمان به عرض خیابان:** ژانگ^۴ و همکاران (2024)، معتقد هستند که رعایت مقدار بهینه‌ی این نسبت، موجب کارایی جریان باد می‌شود و کاهش جزایر حرارتی را در پی خواهد داشت. بارمان^۵ و همکارانش (2021)، یک بعد دیگر اضافه نموده و اثبات نمود که رعایت این امر قادر است تا فاصله‌ی نور روز و زاویه‌ی تابش خورشیدی را نیز تنظیم کند. در این باره یانگ^۶ و همکارانش (2021)، معتقدند که عریض کردن خیابان می‌تواند سرعت دفع آلاینده‌ها را بهبود بخشد. اما نظر بوربیا و بوشریبا^۷ (۲۰۱۰)، متفاوت است و بیان داشته‌اند که خیابان‌های باریک‌تر با نسبت ابعادی بالاتر، می‌تواند یک کریدر بادی ایجاد کند که جریان هوا و خنک‌کنندگی را افزایش می‌دهد.

≠ **نمای آسمان:** فاکتور نمای آسمان یک شاخص مورفولوژیکی سه‌بعدی است که میزان باز بودن آسمان فضا را منعکس می‌کند (Chen et al, 2012). یو و دینگ^۸ (2021)، در پژوهش خود بیان داشتند که میزان باد طبیعی در مناطق ساخته‌شده، به‌طور قابل‌توجهی با نمای آسمان همبستگی دارد. در همین راستا، لیو^۹ و همکارانش (2020) این رابطه را خطی ارزیابی کردند. همچنین یانگ^{۱۰} و همکاران وی (2013)، معتقدند افزایش ۱۰ درصدی میزان باز بودن فاکتور نمای آسمان، می‌تواند سرعت باد را ۷ تا ۸ درصد افزایش دهد.

≠ **چیدمان هندسی:** عثمان^{۱۱} (2011)، در تحقیق خود به این نتیجه رسید که چیدمان هندسی بلوک‌های شهری، به رفتار باد شکل می‌دهد. در این باره، یوان و نگ^{۱۲} (۲۰۱۴)، نیز معتقدند که عقب‌نشینی مناسب ساختمان‌ها و ارتفاعات متغیر آن‌ها، می‌تواند جریان باد را بهبود بخشد و به قول بلوکن^{۱۳} و همکارانش (2014)، موجب راحتی و ایمنی باد گردد. در همین راستا، عزیزی و جوانمردی^{۱۴} (2017)، بیان داشتند که ارتفاع بلوک‌های شهری و عرض خیابان‌های کناری، موجب اختلاف فشار خواهد شد که این امر بیشترین تأثیر را بر تهویه طبیعی دارد.

≠ **کانال‌های تهویه شهری:** چن^{۱۵} و همکاران (2017)، بیان می‌دارند بهینه‌سازی نسبت‌های ابعادی و جهت‌گیری کانال‌های شهری، به‌طور قابل‌توجهی جریان هوا و پراکندگی آلاینده‌ها را بهبود می‌بخشد. در همین راستا، بینگ^{۱۶} و همکارانش (2021)، با بررسی ابعاد جامع‌تری، اثبات نموده‌اند که ساخت کانال‌های تهویه شهری، موجب تبادل هوا، کاهش جزایر گرمایی، کاهش مصرف انرژی ساختمان‌ها و هدایت باد طبیعی خواهد شد.

≠ **پوشش گیاهی و زیرساخت سبز:** ژی^{۱۷} و همکارانش (2020)، در مطالعه‌ی خود بیان داشتند زیرساخت‌های سبز، علاوه بر بهبود تهویه طبیعی، موجب کاهش جزایر حرارتی می‌شود. در همین راستا، نتایج تحقیقات لی^۱ و همکارانش (2010)، نیز حاکی از آن بود

1. Li

2. Tominaga & Shirzadi

3. Toparlar

4. Zhang

5. Barman

6. Yang

7. Bourbia & Boucheriba

8. You & Ding

9. Liu

10. Yang

11. Osman

12. Yuan & Ng

13. Blocken

14. Azizi & Javanmardi

15. Chen

16. Bing

17. Xie

که قرار دادن استراتژی پارک‌ها و فضاهای سبز درون ماتریس شهری، می‌تواند جزایر حرارتی را مختل نموده و از طریق تهویه‌ی بهتر، خنک‌کنندگی را ارتقاء بخشد. همچنین سانتاموریس^۲ (2014)، نیز معتقد است درختان نه تنها سایه می‌اندازند، بلکه الگوهای باد را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند. این موضوع در تحقیق نورتون^۳ و همکارانش (2015)، نیز تکرار شده است؛ آن‌ها علاوه بر موارد پیشین، به اهمیت بام‌های سبز نیز اشاره نموده‌اند و در تکمیل این نظر، پرینی و ماگلیوکو^۴ (2014)، اثبات نمودند این سبزی‌نگی زمانی دارای اثربخشی بهتر است که بر روی نمای ساختمان‌ها اجرا شود، زیرا علاوه بر موارد دیگر، عایق حرارتی برای محیط داخلی نیز محسوب می‌شود.

≠ **جنس نمای ساختمان:** هوهمکارانش (2013)، بیان داشتند ادغام مواد متخلخل در طراحی ساختمان و تقویت نفوذپذیری آن، می‌تواند تهویه‌ی طبیعی را در اطراف ساختمان بهبود بخشد.

≠ **جهت‌گیری ساختمان:** شارپلز و بن سالم^۶ (2001)، در پژوهش خود تأکید می‌کنند که تراز ساختمان‌ها نسبت به جهت‌های باد غالب می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی حرکت هوا در مناطق شهری را بهبود بخشد و به‌راحتی حرارتی بهتر و کاهش مصرف انرژی برای خنک‌سازی کمک کند.

≠ **تراکم:** توپارلار^۷ و همکارانش (2015)، در مقاله‌ی خود بیان داشتند که ساختمان‌های با تراکم و ارتفاع کم، تهویه‌ی بهتری را نسبت به بلوک‌هایی با ساختمان‌های مرتفع و تراکم بالا دارند. یوهسون^۸ و همکارانش (2021)، نیز به این نتیجه رسیدند که کاهش تراکم فرم‌ها و بلوک‌های شهری، منجر به بهبود حرکت باد می‌شود اما اگر این امر بیش‌ازاندازه اجرا شود، نیروی باد بسیار زیاد و آزار دهنده‌ای را در پی خواهد داشت. اما شیانگ^۹ و همکارانش (۲۰۲۱)، با کمی نگاه متفاوت، معتقدند که چیدمان پراکنده با ارتفاع بلندتر ساختمان‌ها، می‌تواند موجب افزایش دو برابری سرعت باد شود و دفع آلاینده‌ها را بهبود بخشد.

در این مطالعه با توجه به شرایط موجود شهر شیراز، مؤلفه‌های ارتفاع ساختمان‌ها، نسبت ارتفاع ساختمان به عرض خیابان، چیدمان هندسی بلوک‌های شهری و تراکم و اثر آن‌ها بر شرایط محیطی خیابان شهری موردتوجه قرار گرفته است. با توجه به مطالعات گذشته، این مؤلفه‌های ساختار شهری در میزان تبادل جریان هوا اثر مستقیم و کارا دارند که در توسعه‌های بافت‌های شهری در ایران و به‌طور خاص در شهر شیراز کمتر مورد توجه واقع شده‌اند. همچنین نتایج به‌دست‌آمده از تحقیقات گذشته متناقض هستند به‌طوری‌که عریض یا باریک بودن خیابان هردو می‌تواند در افزایش تهویه طبیعی مؤثر باشد. لذا نیاز به انجام یک مطالعه که نتایج دقیقی ارائه دهد، محسوس است. روش به‌کارگیری این مؤلفه‌های در ساختار شهری از نوع مدل‌سازی و شبیه‌سازی جریان هوا در بافت شهری بوده است که در مطالعات گذشته بسیار محدود مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

روش پژوهش

محدوده مورد مطالعه

بافت تاریخی شیراز، در مساحت ۳۹۵/۹۰ هکتاری خود، جمعیتی در حدود ۹۲۱۷۳ نفری را در خود جای‌داده است و دارای تراکم ۱۹۹ نفر در هکتار است. این منطقه حد فاصل خیابان‌های کریم‌خان زند و لطفعلی‌خان زند قرار دارد. بنابر ضوابط و مقررات سازمان میراث فرهنگی، ساختمان‌های درون بافت باید با ارتفاع یک تا دو طبقه ساخته شوند، اما متأسفانه در لبه‌های بافت بخصوص رینگ دور بافت (در حدفاصل خیابان‌های قآنی و تیموری، سعدی و توحید) گرایش واحدهای سه و چهار طبقه و حتی بیشتر نیز وجود دارد، همچنین در لبه‌های خیابان‌های اصلی منطقه مانند کریم‌خان زند، لطفعلی‌خان زند و احمدی نیز گرایش به طبقات بیشتر است (Detailed plan of Shiraz city, 2013).

1. Lee

2. Santamouris

3. Norton

4. Perini, K., & Ottele

5. Hu

6. Sharples & Bensalem

7. Toparlar

8. Yu-Hsuan

9. Xiang

به منظور انجام این پژوهش، یک محدوده از مناطق مسکونی منطقه ۸ شیراز انتخاب گردید که در کنار خیابان لطفعلی خان زند انتخاب قرار گرفته است. دلیل انتخاب این محدوده آن است که کمترین دخل و در آن صورت گرفته و درواقع ساختمان‌های آن تا حد امکان فرم و شکل اصلی خود را حفظ نموده‌اند. از سویی، در لایه‌لای این بافت، ساختمان‌های جدید نوساز با طبقات متفاوت نیز بنا گردیده است که چیدمان اصلی بافت را دچار تغییراتی کرده است. شکل ۱ محدوده مورد مطالعه و همچنین ساختار خیابان‌های واقع در محدوده از منظر تراکم، ارتفاع ساختمان‌ها و نسبت ارتفاع ساختمان‌ها به عرض خیابان را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت محدوده‌ی مورد مطالعه در کلان شهر شیراز

کلان شهر شیراز تحت تأثیر بادهای شمال غربی، جنوبی و محلی قرار دارد که به چهار دسته تقسیم می‌گردد: ۱- بادهای شمالی که سرد و خشک هستند و از سمت سیبری به ایران می‌وزند. ۲- بادهای غربی که باران آور هستند و از سمت دریای مدیترانه و اقیانوس اطلس به سوی ارتفاعات زاگرس می‌وزند. ۳- توده‌هوای جنوبی که گرم و خشک است و از عربستان به سمت فارس و شیراز می‌وزد. ۴- توده هوایی که از سمت کوهستان در خلاف جهت توده‌هوای جنوبی می‌وزد (Shatrian, 2014). در این میان، جایگاه خیابان لطفعلی خان زند در شرق شیراز است و وجود ساختمان‌های بلند، عدم رعایت نسبت ارتفاع به عرض خیابان‌ها، عدم دید مناسب آسمان و دیگر موارد، موجب شده تا این محدوده از تهویه‌ی مناسبی برخوردار نباشد. شکل ۲ خیابان مورد مطالعه و جهت باد غالب شرق به غرب که به موازات محور خیابان است را نشان می‌دهد.

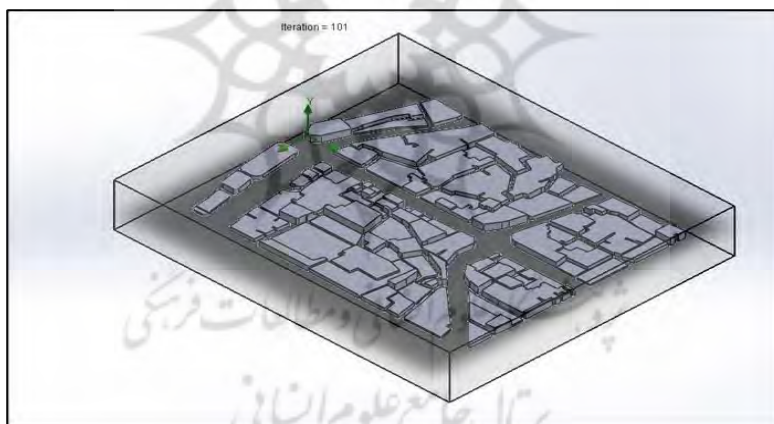


شکل ۲. جهت باد غالب در محدوده مورد مطالعه

به منظور ارزیابی جریان هوا در بافت مورد مطالعه، این تحقیق از روش کمی و از ابزار شبیه سازی بهره گرفته است. لذا پس از مطالعات کتابخانه‌ای و برداشت‌های اولیه از وضع موجود سایت، مدل اولیه با بهره‌گیری از نرم افزار FloEFD ایجاد شده است. برخی از نویسندگان دیگر نیز به جهت شبیه سازی باد در فضاهای داخلی یا محیط‌های شهری، از این نرم افزار استفاده نموده‌اند که در این میان می‌توان به تحقیقات صورت گرفته توسط هتی و اسلیوکا^۲ (2021)، ماکابوتاس^۳ و همکارانش (2020) و سرتسر و کاراداغ^۴ (2018)، اشاره کرد. در ادامه به منظور ارزیابی تأثیر مؤلفه‌های تحقیق برگرفته شده از پیشینه تحقیق بر میزان افزایش جریان هوا و کاهش اثرات آلاینده‌ها در خیابان لطفعلی خان زند، دو مدل دیگر در نرم افزار ایجاد شد. در مدل اول ارتفاع ساختمان‌ها از لبه خیابان به سمت بافت افزایش یافته حال آنکه در مدل دوم، ارتفاع با نزدیک شدن به خیابان مورد مطالعه روند کاهشی داشته است. نرم افزار مورد اشاره از معادلات Navier Stock Equation و از مدل $k-\epsilon$ جهت محاسبه جهت و شدت جریان باد استفاده می‌کند. به منظور حل معادلات، نرم افزار از روش شبکه بندی پیشرفته^۵ جهت افزایش دقت و کیفیت مسیر جریان استفاده می‌کند. با توجه به انجام شبیه سازی در یک بازه زمانی معقول و قابل انجام با توجه به محدودیت سیستم در آنالیز و تحلیل، مدل‌های ایجاد شده ساده سازی شده‌اند به طوری که فضاهای سبز و جزئیات ساختمان‌ها در مدل سازی در نظر گرفته نشده‌اند.

مدل‌های ایجاد شده در نرم افزار FloEFD همراه با شبکه بندی

مدل ایجاد شده با بهره‌گیری از نرم افزار Solidworks که به صورت Built-in در نرم افزار FloEFD قرار دارد، ایجاد شده است. این مدل بر اساس نقشه‌های وضع موجود و پس از برداشت میدانی از ساختمان‌های واقع در جداره خیابان لطفعلی خان زند و لایه‌های پشت این جداره‌ها ایجاد شده است. با توجه به شکل ۳، چنین به نظر می‌رسد که پراکندگی و عدم حفظ تعداد طبقات بر اساس نظمی خاص، منجر به محبوس شدن هوای میانی بافت گردیده و تهویه طبیعی و تبادل هوا به خوبی صورت نمی‌گیرد. به منظور انجام محاسبات سیالات در مدل ایجاد شده، محفظه محاسباتی^۶ مطابق با مکعب مستطیل ایجاد شده در اطراف مدل لحاظ گردیده است. همچنین داده‌های اولیه محیطی همچون دما، شدت جریان و فشار هوا با توجه به متوسط داده‌های هواشناسی به نرم افزار داده شده است.



شکل ۳. محدوده مورد مطالعه مدل سازی شده در نرم افزار

^۱ FloEFD یک نرم افزار شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است که برای تحلیل جریان سیالات، انتقال حرارت و سایر پدیده‌های فیزیکی در مهندسی طراحی شده است. کلمه FloEFD یک نام تجاری است که توسط شرکت Mentor Graphics (اکنون متعلق به Siemens است) برای نرم افزار شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) انتخاب شده است.

می‌توان کلمه FloEFD را بدین صورت تجزیه کرد:

Flo، اشاره به جریان سیالات (Flow)

EFD، اشاره به دینامیک سیالات محاسباتی (Engineering Fluid Dynamics).

² . Heteyi & Szlivka

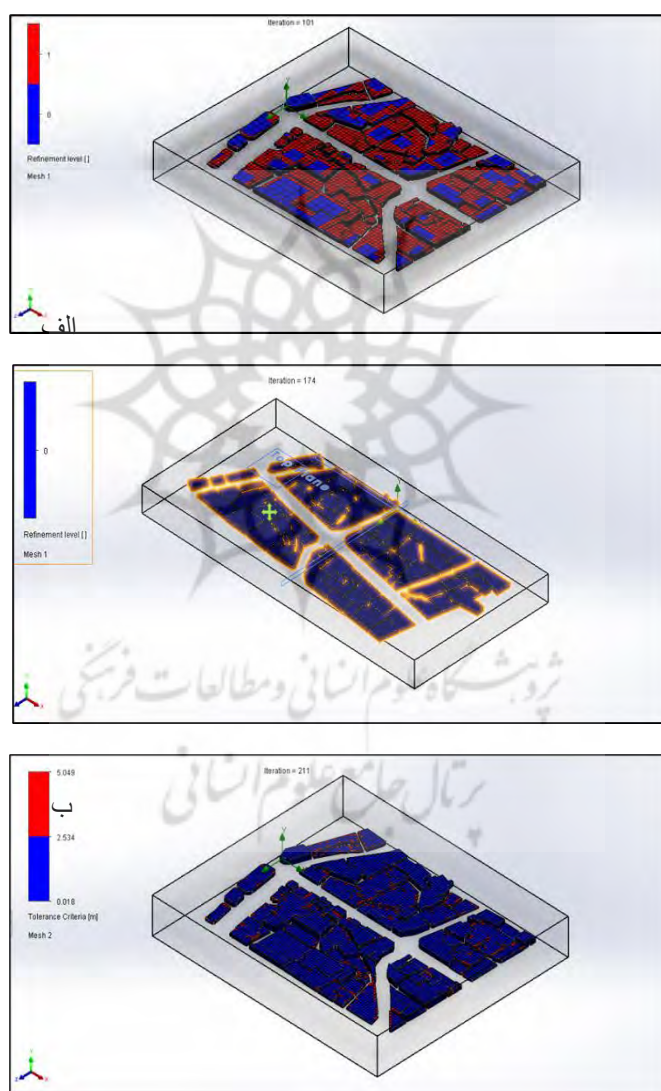
³ . Macabutas

⁴ . Serteser & Karadag

⁵ Adaptive Meshing

⁶ Computational Domain

پس از بررسی محدوده‌ی مورد مطالعه در وضع موجود، این پژوهش در نظر دارد تا سه مؤلفه‌ی؛ A (ارتفاع ساختمان‌ها)، B (عرض خیابان‌ها) و C (نحوه چیدمان بلوک‌های شهری) را در محدوده‌ی مورد مطالعه مورد ارزیابی قرار دهد و با تغییر این پارامترها در نرم‌افزار شبیه‌سازی، میزان تغییر جریان و سرعت نفوذپذیری هوا، فشار و دما را تحلیل نماید. برای این منظور، به تجزیه و تحلیل محدوده‌ی مورد نظر در سه مدل متفاوت پرداخته شده است. در مدل اول وضع موجود بررسی شده است که در آن ساختمان‌ها در ارتفاع یک تا سه طبقه به طور نامنظم در بافت پراکنده شده‌اند. در مدل دوم واحدهای با تراکم کمتر و تعداد طبقات کمتر (یک الی دو طبقه) در لبه‌ی خیابان‌ها و تعداد طبقات بیشتر در پشت (سه تا شش طبقه) آن‌ها قرار گرفته است. در مدل سوم واحدهای با تعداد طبقات بیشتر (سه تا شش طبقه) در لبه خیابان قرار گرفته‌اند و در پشت آن‌ها واحدهای با تعداد طبقات کمتر (یک الی دو طبقه) قرار گرفته است. به منظور بررسی سرعت جریان هوا و نحوه رفتار باد در سه مدل بررسی شده، پارامترهای شدت جریان اولیه و ثانویه باد، فشار ثابت و دینامیک و دمای جریان هوای ورودی به عنوان اهداف شبیه‌سازی و حل معادلات دینامیک سیالات برای آن‌ها هدف گذاری شده است. همچنین پیش از انجام شبیه‌سازی هر سه مدل با شبکه‌بندی پیش رفته، تقسیم‌بندی شده‌اند. شکل ۴ شبکه‌های ایجاد شده برای هر سه مدل را نمایش می‌دهد.



شکل ۴. شبکه‌بندی پیش از شبیه‌سازی، الف: مدل اول وضعیت موجود، ب: مدل دوم ارتفاع کم به زیاد، ج: مدل سوم ارتفاع زیاد به کم.

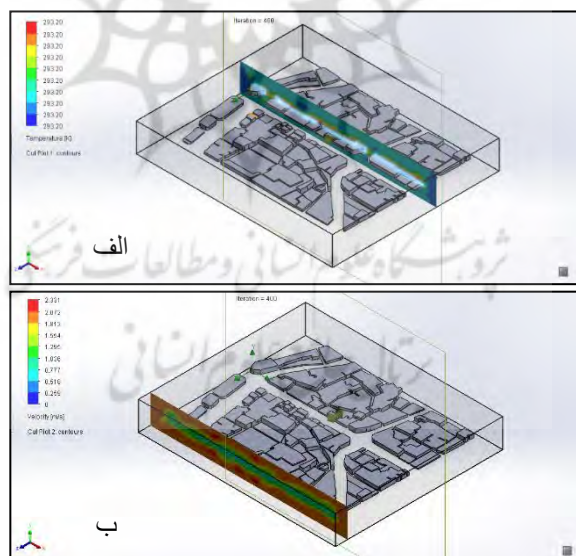
یافته‌ها و بحث

نتایج حاصل از شبیه‌سازی بر اساس توزیع افقی^۱، توزیع عمودی^۲ و مسیر جریان هوا^۳ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. در هر توزیع، مدل‌ها به سه دسته‌ی ۱. وضع موجود بافت، ۲. واحدهای با تراکم کمتر و تعداد طبقات کمتر در لبه‌ی خیابان‌ها و تعداد طبقات بیشتر در پشت آن‌ها و ۳. واحدهای با تعداد طبقات بیشتر در لبه‌ی خیابان و در پشت آن‌ها واحدهای با تعداد طبقات کمتر، در نظر گرفته شده است. دما، فشار و جریان هوا، در مدل‌های ذکر شده مورد تحلیل قرار گرفت و با مقایسه مدل‌ها بهترین حالت برای ایجاد جریان هوا مناسب در خیابان مورد مطالعه ارائه شده است.

توزیع عمودی متغیرهای تحقیق

≠ توزیع عمودی برای مدل اول (وضع موجود بافت) برحسب دما، فشار و جریان هوا

شکل ۵ به ترتیب توزیع دما و سرعت جریان هوا را برای وضعیت موجود نشان می‌دهد. توزیع عمودی برای این مدل، حاکی از آن است که دما به‌طور میانگین ۲۰/۰۵ درجه سانتی‌گراد بوده است. اما در بعضی از نقاط به دلیل فشردگی بیشتر، دما بالاتر رفته و کیفیت تهویه افت پیدا کرده است. فشار هوا به‌طور کلی ۱۰۱۲۵۰ پاسکال بوده است و نشان‌دهنده‌ی توزیع فشار یکنواخت در کلیه نقاط مورد مطالعه بوده است. به دلیل اینکه ارتفاع ساختمان‌ها از نظم و قاعده‌ی خاصی پیروی نمی‌کند، سرعت و جریان هوا متغیر بوده و تهویه به‌خوبی صورت نگرفته است، به‌خصوص در بخش‌های میانی که فشردگی بافت بیشتر بوده است. علاوه بر این توزیع فشار یکنواخت سبب شده است که جریان هوای ناشی از اختلاف فشار بین دونقطه کمتر شدت یابد و این مسئله باعث یکجا ماندن آلاینده‌های موجود در هوا شده است. به‌منظور بررسی بهتر توزیع جریان و سرعت هوا، شکل ۵ (ب) برش عمودی از خیابان موردنظر را نمایش می‌دهد. با توجه به شکل، سرعت جریان هوا بین ۱ تا ۲٫۳ متر بر ثانیه در نقاط مختلف در نوسان بوده است. همچنین جریان در نزدیکی زمین و در ارتفاع بالاتر و نزدیک به خط آسمان ساختمان‌ها به بیشترین میزان خود رسیده است. این درحالی است که با توجه به شدت جریان کمتر از ۱ متر بر ثانیه در میانه ارتفاعی خیابان، تهویه مناسبی صورت نگرفته است.



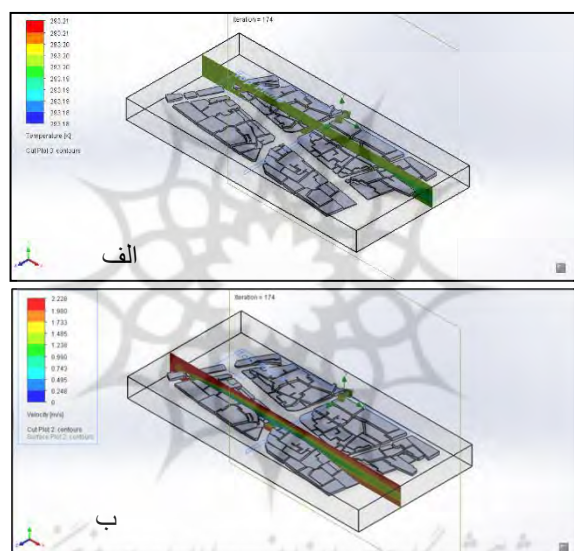
شکل ۵. توزیع عمودی دما (الف) و سرعت جریان هوا (ب) برای وضعیت موجود خیابان مورد مطالعه

¹ Cut Plot

² Surface Plot

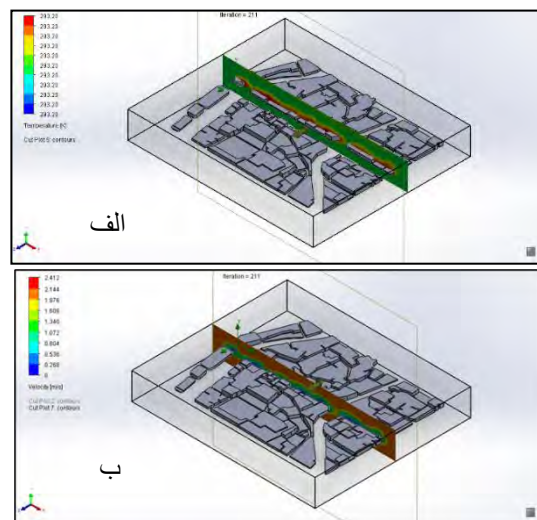
³ Flow Trajectories

توزیع عمودی برای مدل دوم (واحد‌ها با ارتفاع کم به زیاد از لبه‌ی خیابان) برحسب دما، فشار و جریان هوا با توجه به شکل ۶، توزیع عمودی دما و سرعت جریان هوا برای مدل دوم بیانگر آن است که دمای هوا به‌طور میانگین بین ۲۰/۰۵ الی ۲۰/۰۸ درجه سانتی‌گراد بوده است و در طول شبیه‌سازی وضعیت دما ثابت باقی‌مانده است. نکته‌ی حائز اهمیت این است که در لبه‌ی خیابان که ساختمان‌ها کوتاه‌تر بوده‌اند، دمای هوا به‌طور جزئی پایین‌تر و با بالا رفتن ارتفاع، دما نیز افزایش یافته است. دلیل این پدیده سبک‌تر بودن هوای گرم و میل حرکت به سمت بالا بوده است. اما از سویی به سبب تردد وسایل نقلیه در خیابان و افزایش آلاینده‌ها، دمای هوا در بخش ساختمان‌های قرارگرفته در کنار لبه‌ی خیابان نیز افزایش یافته است. بنابراین دما در بخش ساختمان‌های کوتاه مرتبه و بلندمرتبه، به تعادل نسبتاً مطلوبی رسیده و تهویه‌ی طبیعی بهتر صورت گرفته است. فشار هوا نیز، در بخش‌هایی با ساختمان‌های کوتاه‌تر، کمتر از بخش‌های بلندتر است اما به‌طور کلی فشار معادل با ۱۰۱۳۰۰ پاسکال بوده است که وضعیت نسبتاً مطلوبی را نشان می‌دهد. باوجوداینکه سرعت جریان هوا در این مدل نیز در نقاط مختلف، متفاوت بوده است، اما همانند مدل اول نوسان زیادی را نشان نمی‌دهد. همچنین با توجه به اینکه ارتفاع ساختمان‌ها از کم به زیاد متغیر است و طبق قاعده‌ای مشخص تغییر می‌کند، سرعت جریان هوا به یک‌میزان مشخص تغییر پیدا کرده و قابل کنترل بوده است، لذا در این مدل تهویه طبیعی بهتر صورت گرفته است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، سرعت جریان هوا از ۱/۲ تا ۲/۲ متر بر ثانیه در پروفایل عمودی خیابان در نوسان بوده است که با توجه به توزیع یکنواخت و الگوی حرکتی جریان (کانتورهای شکل)، تهویه مؤثر صورت گرفته است.



شکل ۶. توزیع عمودی دما (الف) و سرعت جریان هوا (ب) برای مدل دوم (واحد‌ها با ارتفاع کم به زیاد از لبه‌ی خیابان)

توزیع عمودی برای مدل سوم (واحد‌ها با ارتفاع زیاد به کم از لبه‌ی خیابان) برحسب دما، فشار و جریان هوا توزیع عمودی برای مدل سوم نشان می‌دهد که دما در بخش‌هایی از بافت که ساختمان‌ها کوتاه هستند، کمتر و در قسمت‌های لبه‌ی خیابان بیشتر بوده است. همچنین وجود آلاینده‌ها در خیابان نیز، منجر به بالاتر رفتن دما در بخش لبه‌ی خیابان شده است. از سویی، این ساختمان‌های بلند، سبب محبوس شدن هوا در بخش‌های پشتی شده که بالا رفتن فشار، کاهش سرعت جریان هوا، عدم مطلوبیت تهویه‌ی طبیعی و کمبود اکسیژن را در پی داشته است. شکل ۷ توزیع افقی دما و سرعت جریان هوا برای مدل سوم را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷ (ب)، سرعت جریان هوا در لایه محبوس شده در خیابان به بیشتر از ۱/۳ متر بر ثانیه نرسیده است. لذا این جریان قادر نخواهد بود که آلاینده‌های حبس شده در پروفیل خیابان را به راحتی خارج کند. ارتفاع زیاد ساختمان‌ها در لایه اول نمای خیابان منجر به عدم نفوذپذیری جریان هوا به داخل خیابان شده است. از طرف دیگر، تهویه با اختلاف دما و به طریق دودکشی غیرممکن به نظر می‌رسد به‌طوری‌که لایه‌های آلوده هوا به دلیل سنگین بودن به سمت لایه‌های بالاتر حرکت نکرده‌اند و در نتیجه جریان عمودی مؤثری از هوا در این مدل ایجاد نشده است.



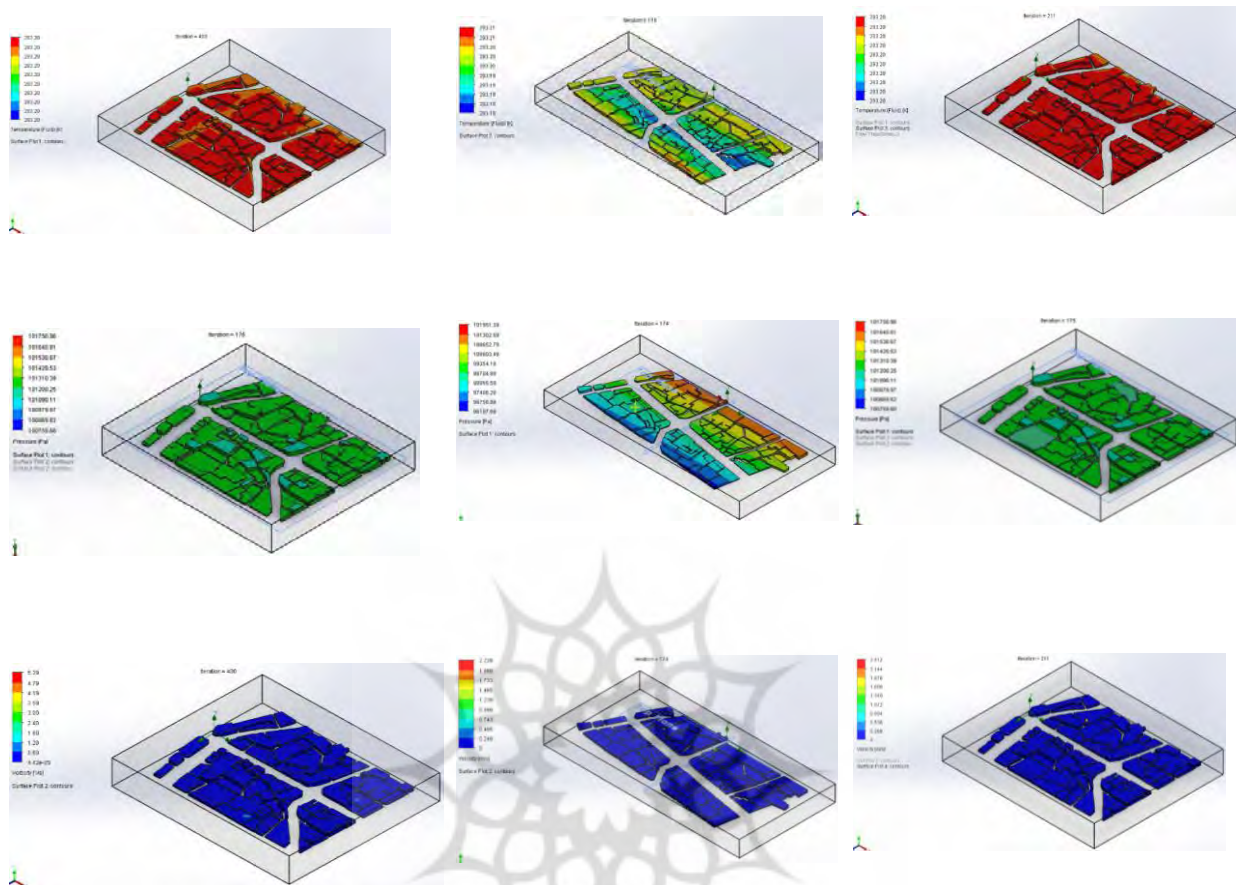
شکل ۷. توزیع افقی دما (الف) و سرعت جریان هوا (ب) برای مدل سوم (واحد‌ها با ارتفاع زیاد به کم از لبه‌ی خیابان)

توزیع افقی متغیرهای تحقیق

توزیع افقی برای مدل اول (وضع موجود بافت) برحسب دما، فشار و جریان هوا $\neq$ توزیع افقی برای مدل اول بیانگر آن است که دما در بیشترین مقدار قرار دارد. تنها در قسمتی از بناها که کمترین ارتفاع‌ها را داشته و از بابت نواحی اطراف توسط ساختمان‌های مرتفع‌تر احاطه نشده است دما اندکی کمتر شده است. بیشترین فشار هوای ثبت شده ۱۰۱۳۱۰ پاسکال و کمترین فشار هوا ۱۰۱۰۰۰ است، این در حالی است که فشار در حالت معمول بایستی ۱۰۱۳۲۵ پاسکال باشد. به علت پایین بودن فشار و از سویی گرم بودن هوا، تهویه‌ی طبیعی به درستی صورت نگرفته است و همچنین سرعت جریان هوا با شدت بسیار کم و بدون نوسان (به‌طور یکنواخت) روی داده است. شکل ۸ (الف، ب، ج) دما، فشار و جریان هوا را در حالت وضع موجود نشان می‌دهد.

توزیع افقی برای مدل دوم (واحد‌ها با ارتفاع کم به زیاد از لبه‌ی خیابان) برحسب دما، فشار و جریان هوا $\neq$ با توجه به شکل ۸ (ه، و، ز)، توزیع افقی مدل دوم نشان می‌دهد که دمای هوا در این مدل نسبتاً مطلوب است که در بخش لبه‌ی خیابان به کمترین میزان خود رسیده است. فشار از کمترین میزان خود که ۹۱۵۰۰ پاسکال در لبه‌ی خیابان بوده است، رفته‌رفته بیشتر شده و به ۱۰۱۳۰۲ پاسکال رسیده است. این بدین معناست که فشار در حال نوسان بوده است و حداقل میزان تا حداکثر میزان را داشته است. توزیع مناسب ساختمان‌ها و دما و فشار مطلوب، موجب شده است تا جریان هوا در تبادل خوبی با بخش‌های مختلف باشد و منجر به تهویه‌ی بهتر گردد، که در نتیجه آلاینده‌های هوا بهتر از فضای خیابان خارج شوند.

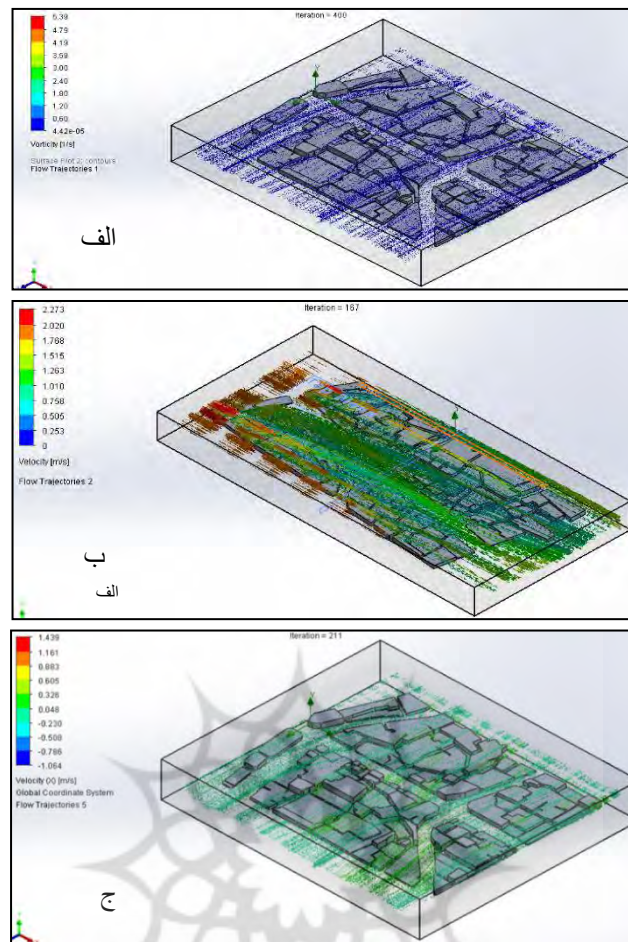
توزیع عمودی برای مدل سوم (واحد‌ها با ارتفاع زیاد به کم از لبه‌ی خیابان) برحسب دما، فشار و جریان هوا $\neq$ درنهایت با توجه به شکل ۸ (ح، و، ت) توزیع عمودی برای مدل سوم نشان می‌دهد که دمای هوا در تمامی نواحی زیاد بوده و تغییر فشار زیادی دیده نشده است. عدم تغییر فشار موجب شده جریان هوا در همه‌جا به‌طور یکسان باشد و عدم حرکت و تبادل جریان هوا به دلیل وجود ساختمان‌های بلند در لبه، منجر به عدم وقوع تهویه‌ی مطبوع شده است.



شکل ۸. توزیع عمودی دما، فشار و جریان هوا برای سه مدل شبیه‌سازی (الف، ب، ج) مدل اول، (ه، و، ز) مدل دوم، (ح، و، ت) مدل سوم

توزیع جریان هوا برای مدل‌های شبیه‌سازی

با توجه به شکل ۹ (الف)، سرعت جریان هوا در کمترین میزان خود بوده و به‌صورت یکسان در بافت توزیع شده است. این در حالی است که نتایج سرعت جریان هوا برای مدل دوم حاکی از آن است که دما و فشار هوا از کمترین مقدار تا حد مطلوب در جریان بوده و یک مقدار ثابت را نشان نمی‌دهد. با توجه به شکل ۹ (ب)، طیف رنگ‌های متفاوت بیانگر تبادل مطلوب جریان هوا از کمترین سرعت به بیشترین سرعت در تمام نواحی بوده است. رنگ سبز که دارای درصد بیشتری در این مدل است، بیانگر سرعت متعادل و مطلوب $1/2$ تا $1/5$ متر بر ثانیه بوده است که این امر سبب تهویه‌ی طبیعی در حد مطلوب گردیده است. شکل ۹ (ج) توزیع سرعت جریان هوا برای مدل سوم را نشان می‌دهد که به دلیل توزیع نامناسب فشار هوا و بیش‌ازحد متعارف جو (101325)، جریان هوا به‌صورت یکنواخت بوده است. باینکه در این مدل نیز به‌مانند مدل قبل، سرعت جریان هوا به رنگ سبز بوده است، اما یکنواختی سرعت جریان منجر به عدم تهویه در حد مطلوب شده است.



شکل ۹. الگوی حرکتی جریان هوای ورودی در سه مدل شبیه‌سازی شده

جدول ۱ فاکتورهای بررسی شده دما، فشار و سرعت جریان هوا را برای سه مدل شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد. بررسی مدل دوم در هر سه حالت توزیع عمودی، افقی و الگوی حرکتی جریان هوا وضعیت مطلوب‌تری نسبت به مدل اول و سوم داشته است. در توزیع عمودی و الگوی حرکتی جریان هوا مدل دوم، دما، فشار و سرعت هوا مطلوب بوده است، درحالی‌که در توزیع افقی، سرعت هوا نسبتاً مطلوب شبیه‌سازی شده است. مطالعه انجام‌شده در سال ۲۰۲۰ که به اثر نسبت عرض خیابان به ارتفاع ساختمان‌ها (از ۰/۵ تا ۵) بر جریان هوا در محیط خیابان پرداخته است، با نتایج این مطالعه تطابق دارد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی خیابان‌ها با عمق کمتر بهتر می‌توانند در تهویه خیابان و جریان هوای مؤثر عمل کنند (X. Yang et al, 2020) در مطالعه‌ای دیگر در سال ۲۰۲۱ که اثر تناسب خیابان بر افزایش شدت جریان هوا با شبیه‌سازی مدل‌های فرضی انجام شد نتایج تحقیق نشان داد که خیابان با تناسب عمیق‌تر و به‌عنوان مثال با نسبت عرض به ارتفاع ۱ به ۶ باید مورد اجتناب قرار گیرد تا بتوان الگوی حرکتی جریان هوای بهتری در محیط خیابان ایجاد کرد (H. Yang et al, 2021) این نتایج نیز بر نتایج ارائه‌شده در این مطالعه مطابقت دارد و بیان می‌کند مدل ۳ ارائه‌شده نمی‌تواند در ارائه بهتر تهویه طبیعی در خیابان موردبررسی عمل کند. در مطالعه شبیه‌سازی شدت جریان هوا با توجه به اثر تناسب خیابان و تابش خورشیدی در خیابان شهری، نتایج دوبرخی محاسبات عددی نشان داد که با افزایش ارتفاع ساختمان نسبت به عرض خیابان، اختلاف دمای جبهه شرقی و غربی خیابان و سرعت جریان هوای افقی در سطح خیابان کاهش می‌یابد (Chen et al, 2020). در مطالعه‌ای دیگر در سال ۲۰۲۴ بر روی شکل شهری به‌منظور بهبود کیفیت جریان هوا در پیاده‌رو خیابان، نتایج نشان داد اضافه شدن برج‌های بلندمرتبه در لایه دوم خیابان منجر به کاهش ۲۰ درصدی جریان هوا می‌شود. همچنین با عقب راندن ساختمان‌های بلندمرتبه و حذف آن‌ها از حاشیه خیابان می‌توان میزان جریان هوا را تا

۷۳٪ افزایش داد (Baş et al, 2024). از طرف دیگر، بررسی توزیع عمودی در مدل سوم، برای دما، فشار و سرعت جریان هوا نامطلوب بوده است. دلیل این شرایط ارتفاع بلند ساختمان‌ها در حاشیه خیابان بوده است که مانع از نفوذ جریان هوا و یا خروج جریان هوا و تسویه آلاینده در محیط خیابان بوده است. این موضوع باعث بالا رفتن دما و توزیع نامتوازن فشار نیز شده است. الگوی حرکتی جریان هوا برای مدل سوم این موضوع را تأیید می‌کند به‌طوری‌که دما و فشار ثابت و نامطلوب بوده است و سرعت هوا نسبتاً مطلوب بوده است. مقایسه مدل دوم و مدل اول برحسب الگوی جریان هوا نشان می‌دهد که با زیاد شدن ارتفاع از لبه خیابان، جریان از الگوی حرکتی بهتری نسبت به وضع موجود برخوردار بوده است.

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر به بررسی فاکتورهای مؤثر در کالبد شهری به‌منظور افزایش تهویه طبیعی در بافت میانی شهر شیراز پرداخته است. به این منظور ارتفاع ساختمان‌های حاشیه خیابان لطفعلی‌خان زند در سه مدل متفاوت مورد مطالعه قرار گرفتند تا با مقایسه دما، فشار سرعت جریان و الگوی حرکتی هوا بهترین راهکار برای افزایش جریان هوا در محیط خیابان مورد مطالعه ارائه شود. به‌منظور مقایسه مدل‌های ایجاد شده در نرم‌افزار شبیه‌سازی محاسبات سیالات FloEFD، از نقشه‌های وضع موجود شیراز و نرم‌افزار SolidWorks استفاده شد. مدل‌های ایجاد شده پس از انجام شبکه‌بندی و انتخاب بهترین شبکه که نتایج وابسته به تعداد و اندازه‌های شبکه‌ها نباشند و همچنین ارائه داده‌های اولیه هواشناسی به نرم‌افزار مورد محاسبه قرار گرفتند. به این منظور دما، فشار و جریان هوا به‌عنوان اهداف شبیه‌سازی مورد توجه قرار گرفتند. نتایج مطالعه در سه حالت توزیع عمودی، افقی و الگوی جریان هوا برای سه مدل ایجاد شده در نرم‌افزار نشان دادند که مدل دوم یعنی افزایش تدریجی ارتفاع ساختمان‌ها از لبه خیابان به سمت بافت بهترین سرعت جریان هوا به‌منظور تهویه طبیعی در خیابان فراهم می‌کند. همچنین الگوی حرکتی جریان در مدل دوم نسبت به دو مدل دیگر بهتر می‌تواند در توزیع جریان در نقاط مختلف خیابان عمل کند به‌طوری‌که توزیع دما و فشار متوازن در نقاط مختلف منجر به افزایش کارایی تهویه در محیط خیابان گردیده است. بر این اساس، سرعت جریان هوا در توزیع عمودی و افقی مدل دوم تا ۲/۲ متر بر ثانیه افزایش داشته است. در ارتباط با الگوی جریان هوا، و بر اساس نتایج ارائه شده، جریان با شدت سرعت بیشتر و در تمامی نقاط بافت و خیابان مورد مطالعه پراکنده شده است که این امر منجر به خروج بهتر گرما و آلاینده‌ها از محیط خیابان خواهد شد. با توجه به نتایج، این مطالعه پیشنهاد می‌کند دیگر مؤلفه‌های خیابان‌های شهری از جمله پیش‌آمدگی و فرورفتگی نمای ساختمان‌ها، فعالیت‌ها و نفوذپذیری فیزیکی در مطالعات آینده مورد بررسی قرار گیرند تا میزان اثر آن‌ها بر کیفیت تهویه طبیعی معین گردد. همچنین با توجه به محل قرارگیری آلاینده در ارتفاع‌های مختلف در یک خیابان شهری، الگو و رفتار حرکتی جریان هوا برای خروج آلاینده‌ها با توجه به هندسه و فرم ساختمان‌ها در مقیاس یک محله شهری می‌تواند به‌عنوان زمینه مؤثر در مطالعات آینده مدنظر قرار گیرد. علاوه بر مطالعه سرعت و الگوی جریان هوا بر خروج آلاینده‌ها در یک خیابان شهری، و با توجه به معضل جزایر گرمایی شهری در کلان‌شهرها، مطالعات آینده اثر خنک‌کنندگی جریان هوا بر بافت خیابان‌های شهری و افزایش آسایش حرارتی بیرونی را می‌توانند مورد ارزیابی قرار دهند. در نهایت، اثر خنک‌کنندگی جریان هوا بر جسم ساختمان‌ها در محور خیابان‌ها و راهکارهای طراحی خیابان‌های شهری برای برخورد جریان هوا به جداره ساختمان‌ها می‌تواند از دیگر موضوعات برجسته در مطالعات آینده مورد توجه قرار گیرد.

جدول ۱: وضعیت دما، فشار و سرعت هوا در سه مدل شبیه‌سازی شده در حالات توزیع عمودی، افقی و الگوی حرکتی جریان هوا

راه‌نما	توزیع عمودی	توزیع افقی	الگوی حرکتی جریان هوا
مطلوب	■	■	■
نسبتاً مطلوب	■	■	■
نامطلوب	■	■	■
فاکتورهای بررسی			
دما	■	■	■
فشار	■	■	■
سرعت	■	■	■

References

- Air quality monitoring system of the country. (n.d.). Air Quality Monitoring System. Retrieved from <https://aqms.doe.ir/> (in persian)
- Antoniou, N., Montazeri, H., Wigo, H., Neophytou, M. K.-A., Blocken, B., & Sandberg, M. (2017). CFD and wind-tunnel analysis of outdoor ventilation in a real compact heterogeneous urban area: Evaluation using "air delay." *Building and Environment*, 126, 355–372. DOI: [10.1016/j.buildenv.2017.10.013](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.10.013)
- Azizi, M. M., & Javanmardi, K. (2017). The effects of urban block forms on the patterns of wind and natural ventilation. *Procedia Engineering*, 180, 541–549. DOI: [10.1016/j.proeng.2017.04.213](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.213)
- Bahraini, S. H., Baloki, B., & Taqban, S. (2012). Analysis of the theoretical foundations of contemporary urban design: First volume: Late 19th century to the seventh decade of the 20th century. (2nd ed.). Tehran: University of Tehran Press. (in persian) DOI: [10.52547/ciauj.8.2.535](https://doi.org/10.52547/ciauj.8.2.535)
- Barman, A., Roy, M., & Dasgupta, A. (2021). Climatic envelope as an urban planning tool to configure urban fabric of Guwahati city to support daylight and natural ventilation. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 10, 239–248. DOI: [10.35940/ijeat.C2208.0210321](https://doi.org/10.35940/ijeat.C2208.0210321)
- Baş, H., Andrianne, T., & Reiter, S. (2024). City configurations to optimize pedestrian-level ventilation and wind comfort. *Sustainable Cities and Society*, 114, Article 105745. DOI: [10.1016/j.scs.2024.105745](https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105745)
- Bing, D., Zhaoyin, Y., Wupeng, D., Xiaoyi, F., Yonghong, L., Chen, C., & Liu, Y. (2021). Improving building thermal energy efficiency through integrated planning. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 657, Article 012009. DOI: [10.1088/1755-1315/657/1/012009](https://doi.org/10.1088/1755-1315/657/1/012009)
- Blocken, B. (2014). 50 years of computational wind engineering: Past, present and future. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 129, 69–102. DOI: [10.1016/j.jweia.2014.03.008](https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.03.008)
- Blocken, B., Stathopoulos, T., & Van Beeck, J. (2016). Pedestrian-level wind conditions around buildings: Review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment. *Building and Environment*, 100, 50–81. DOI: [10.1016/j.buildenv.2016.02.004](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.004)
- Bourbia, F., & Boucheriba, F. (2010). Impact of street design on urban microclimate for semi-arid climate (Constantine). *Renewable Energy*, 35(2), 343–347. DOI: [10.1016/j.renene.2009.07.017](https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.017)
- Buccolieri, R., Sandberg, M., & Di Sabatino, S. (2010). City breathability and its link to pollutant concentration distribution within urban-like geometries. *Atmospheric Environment*, 44(15), 1894–1903. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2010.02.022](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.02.022)
- Chapman, S., Watson, J. E. M., Salazar, A., et al. (2017). The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: A systematic review. *Landscape Ecology*, 32, 1921–1935. DOI: [10.1007/s10980-017-0561-4](https://doi.org/10.1007/s10980-017-0561-4)
- Chen, G., Yang, X., Yang, H., Hang, J., Lin, Y., Wang, X. (2020). The influence of aspect ratios and solar heating on flow and ventilation in 2D street canyons by scaled outdoor experiments. *Building and Environment*, 185, Article 107159. DOI: [10.1016/j.buildenv.2020.107159](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107159)

- Chen, L., Hang, J., Sandberg, M., Claesson, L., Di Sabatino, S., & Wigo, H. (2017). The impacts of building height variations and building packing densities on flow adjustment and city breathability in idealized urban models. *Building and Environment*, 118, 344–361. DOI: [10.1016/j.buildenv.2017.03.042](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.03.042)
- Chen, L., Ng, E., An, X., Ren, C., Lee, M., Wang, U., He, Z., et al. (2012). Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: A GIS-based simulation approach. *International Journal of Climatology*, 32(1), 121–136. DOI: [10.1002/joc.2243](https://doi.org/10.1002/joc.2243)
- Delmastro, C., & Gargiulo, M. (2020). Capturing the long-term interdependencies between building thermal energy supply and demand in urban planning strategies. *Applied Energy*, 268, Article 114774. DOI: [10.1016/j.apenergy.2020.114774](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114774)
- Detailed plan of Shiraz city. (2013). Ministry of Roads and Urban Development, General Department of Roads and Urban Development of Fars Province. (in persian)
- Fars Environmental Protection Organization. (n.d.). (in persian) Retrieved from URL: <https://idefars.ir/fa/content/11>
- He, B. J., Zhao, Z. Q., Shen, L. D., Wang, H. B., & Li, L. G. (2019). An approach to examining performances of cool/hot sources in mitigating/enhancing land surface temperature under different temperature backgrounds based on Landsat 8 image. *Sustainable Cities and Society*, 44, 416–427. DOI: [10.1016/j.scs.2018.10.049](https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.049)
- Hetyei, C., & Szlivka, F. (2021). Counter-rotating dual rotor wind turbine layout optimisation. *Acta Polytechnica*, 61, 342–349. DOI: [10.14311/AP.2021.61.0342](https://doi.org/10.14311/AP.2021.61.0342)
- Hou, L., Yue, W., & Liu, X. (2021). Spatiotemporal patterns and drivers of summer heat island in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14(99), 7516–7527. URL: <https://www.spacesyntax.online/software-and-manuals/depthmap/>
- Hu, T., & Yoshie, R. (2013). Indices to evaluate ventilation efficiency in newly-built urban areas at pedestrian level. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 112, 39–51. DOI: [10.1016/j.jweia.2012.11.002](https://doi.org/10.1016/j.jweia.2012.11.002)
- Iran Statistics Center. (2015). (in persian) Retrieved from <http://www.amar.org.ir>
- Ji, H. M., Peng, Y. L., & Ding, W. W. (2019). A quantitative study of geometric characteristics of urban space based on the correlation with microclimate. *Sustainability*, 11(18), Article 4951. DOI: [10.3390/su11184951](https://doi.org/10.3390/su11184951)
- Jing, R., Wang, M., Zhang, Z., Wang, X., Li, N., Shah, N., & Zhao, Y. (2019). Distributed or centralized? Designing district-level urban energy systems by a hierarchical approach considering demand uncertainties. *Applied Energy*, 252, Article 113424. DOI: [10.1016/j.apenergy.2019.113424](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113424)
- Krüger, E. L., Minella, F. O., & Rasia, F. (2011). Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brazil. *Building and Environment*, 46(3), 621–634. DOI: [10.1016/j.buildenv.2010.09.006](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.09.006)
- Lee, J. A., Jung, D. Y., Chon, J. H., Lee, S. M., & Song, Y. B. (2010). An evaluation of human thermal comfort and improvement of thermal environment by spatial structure. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*, 38(5), 12–20. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/An-Evaluation-of-Human-Thermal-Comfort-and-of-by-Junga-Chon/667adfc2d5e042a7c0e4e0e08ddf3c0eea7e2a84>
- Li, J., Peng, Y. L., Ji, H. M., Hu, Y., & Ding, W. W. (2019). A wind tunnel study on the correlation between urban space quantification and pedestrian-level ventilation. *Atmosphere*, 10(10), Article 564. DOI: [10.3390/atmos10100564](https://doi.org/10.3390/atmos10100564)
- Li, Y. G., Liu, P., Li, Y., Yan, J. H., & Quan, J. (2023). Wind load characteristics of irregular-shaped high-rise buildings. *Advances in Structural Engineering*, 26(1), 3–16. DOI: [10.1177/13694332221120700](https://doi.org/10.1177/13694332221120700)
- Liu, Y. H., Xu, Y. M., Zhang, F. M., & Shu, W. J. (2020). A preliminary study on the influence of Beijing urban spatial morphology on near-surface wind speed. *Urban Climate*, 34, Article 100703. DOI: [10.1016/j.uclim.2020.100703](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100703)
- Macabutas, E., Tongco, A., & Taylor, G. (2020). Air temperature analysis of a residential house using SolidWorks Flow Simulation. *Civil Engineering and Architecture*, 8, 792–800. DOI: [10.13189/cea.2020.080506](https://doi.org/10.13189/cea.2020.080506)
- Morris, J. (2012). *The history of the shape of the city to the industrial revolution*. (12th ed.). Tehran: Iran University of Science and Technology Publications.

- Ng, E. (2009). Policies and technical guidelines for urban planning of high-density cities: Air ventilation assessment (AVA) of Hong Kong. *Building and Environment*, 44(7), 1478–1488. DOI: [10.1016/j.buildenv.2008.06.013](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.06.013)
- Ng, E., Yuan, C., Chen, L., Ren, C., & Fung, J. C. (2011). Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: A study in Hong Kong. *Landscape and Urban Planning*, 101, 59–74. DOI: [10.1016/j.landurbplan.2011.01.004](https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.01.004)
- Norton, B. A., Coutts, A. M., Livesley, S. J., Harris, R. J., Hunter, A. M., & Williams, N. S. (2015). Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 134, 127–138. DOI: [10.1016/j.landurbplan.2014.10.018](https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.018)
- Osman, M. (2011). Evaluating and enhancing design for natural ventilation in walk-up public housing blocks in the Egyptian desert climatic design region (Doctoral dissertation, University of Dundee). URL: <https://discovery.dundee.ac.uk/en/studentTheses/evaluating-and-enhancing-design-for-natural-ventilation-in-walk-u>
- Ostrovsky, V. (2015). Contemporary urbanization: From the first sources to its charter. (6th ed.). Tehran: University Publishing Center Publications.
- Pakzad, J. (2017). History of the city and urbanization in Europe from the beginning to the industrial revolution. (6th ed.). Tehran: Armanshahr Publications. (in persian)
- Panagiotou, I., Neophytou, M. K. A., Hamlyn, D., & Britter, R. E. (2013). City breathability as quantified by the exchange velocity and its spatial variation in real inhomogeneous urban geometries: An example from central London urban area. *Science of the Total Environment*, 442, 466–477. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2012.09.001](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.09.001)
- Peng, J., Qiao, R., Liu, Y., Blaschke, T., Li, S., Wu, J., Xu, Z., & Liu, Q. (2020). A wavelet coherence approach to prioritizing influencing factors of land surface temperature and associated research scales. *Remote Sensing of Environment*, 246, Article 111866. DOI: [10.1016/j.rse.2020.111866](https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111866)
- Perini, K., & Ottelé, M. (2014). Designing green façades and living wall systems for sustainable constructions. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 9(1), 31–46. DOI:10.2495/DNE-V9-N1-31-46
- Razak, A. A., Hagishima, A., Ikegaya, N., & Tanimoto, J. (2013). Analysis of airflow over building arrays for assessment of urban wind environment. *Building and Environment*, 59, 56–65. DOI: [10.1016/j.buildenv.2012.08.007](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.08.007)
- Ren, C., Yuan, C., Ho, C. K., et al. (2014). A study of air path and its application in urban planning. *Urban Planning Forum*, 2014(3), 52–60. (in Chinese) URL: https://www.researchgate.net/publication/297561480_A_Study_of_Air_Path_and_Its_Application_in_Urban_Planning_chengshitongfenglangdaojiqiguihuayingyong
- Santamouris, M. (2014). Cooling the cities: A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 103, 682–703. DOI: [10.1016/j.solener.2012.07.003](https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003)
- Serteser, N., & Karadag, I. (2018). Design for improving pedestrian wind comfort: A case study on a courtyard around a tall building. *Architectural Science Review*, 61(6), 492–499. DOI: [10.1080/00038628.2018.1492899](https://doi.org/10.1080/00038628.2018.1492899)
- Shan, Y., Guan, D., Hubacek, K., Zheng, B., Davis, S. J., Jia, L., Liu, J., Liu, Z., Fromer, N., Mi, Z., Meng, J., Deng, X., Li, Y., Lin, J., Schroeder, H., Weisz, H., & Schellnhuber, H. J. (2018). City-level climate change mitigation in China. *Science Advances*, 4(6), eaaq390. <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/15360/1/eaq0390.full.pdf>
- Sharples, S., & Bensalem, R. J. S. (2001). Airflow in courtyard and atrium buildings in the urban environment: A wind tunnel study. *Solar Energy*, 70(3), 237–244. DOI: [10.1016/S0038-092X\(00\)00092-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00092-X)
- Shatrian, R. (2014). Climate and architecture of Iran. (5th ed.). Tehran: Simai Danesh Publications. (in Persian)
- Tominaga, Y., & Shirzadi, M. (2021). Wind tunnel measurement of three-dimensional turbulent flow structures around a building group: Impact of high-rise buildings on pedestrian wind environment. DOI: [10.1016/j.buildenv.2021.108389](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108389)
- Toparlar, Y., Blocken, B., Vos, P. V., Van Heijst, G. J. F., Janssen, W. D., van Hooff, T., & Timmermans, H. J. P. (2015). CFD simulation and validation of urban microclimate: A case study for Bergpolder Zuid, Rotterdam. *Building and Environment*, 83, 79–90. DOI: [10.1016/j.buildenv.2014.08.004](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.004)

- Van Druenen, T., van Hooff, T., Montazeri, H., & Blocken, B. (2019). CFD evaluation of building geometry modifications to reduce pedestrian-level wind speed. *Building and Environment*, 163, Article 106293. DOI: [10.1016/j.buildenv.2019.106293](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106293)
- Voordeckers, D., Lauriks, T., Denys, S., Billen, P., Tytgat, T., & van Acker, M. (2021). Guidelines for passive control of traffic-related air pollution in street canyons: An overview for urban planning. *Landscape and Urban Planning*, 207, Article 103980. DOI: [10.1016/j.landurbplan.2020.103980](https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103980)
- Wang, Y., Guo, Z., & Han, J. (2021). The relationship between urban heat island and air pollutants and them with influencing factors in the Yangtze River Delta, China. *Ecological Indicators*, 129, Article 107976. DOI: [10.1016/j.ecolind.2021.107976](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107976)
- Xiang, S., Zhou, J., Fu, X., Zheng, L., Wang, Y., Zhang, Y., Yi, K., Liu, J., Ma, J., & Tao, S. (2021). Fast simulation of high-resolution urban wind fields at city scale. *Urban Climate*, 39, Article 100941. DOI: [10.1016/j.uclim.2021.100941](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100941)
- Xie, P., Yang, J., Wang, H., Fang, L., & Liu, Y. (2020). A new method of simulating urban ventilation corridors using circuit theory. *Sustainable Cities and Society*, 61, Article 102162. DOI: [10.1016/j.scs.2020.102162](https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102162)
- Yang, F., Qian, F., & Lau, S. (2013). Urban form and density as indicators for summertime outdoor ventilation potential: A case study on high-rise housing in Shanghai. *Building and Environment*, 70(1), 122–137. DOI: [10.1016/j.buildenv.2013.08.019](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.019)
- Yang, H., Chen, G., Wang, D., Hang, J., Li, Q., Wang, Q. (2021). Influences of street aspect ratios and realistic solar heating on convective heat transfer and ventilation in full-scale 2D street canyons. *Building and Environment*, 204, Article 108125. DOI: [10.1016/j.buildenv.2021.108125](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108125)
- Yang, J., Ren, J., Sun, D., Xiao, X., & Li, X. (2021). Understanding land surface temperature impact factors based on local climate zones. *Sustainable Cities and Society*. DOI: [10.1016/j.scs.2021.102818](https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102818)
- Yang, J., Wang, Y., Xue, B., Li, Y., Xiao, X., Xia, J. C., & He, B. (2021). Contribution of urban ventilation to the thermal environment and urban energy demand: Different climate background perspectives. *Science of the Total Environment*, 795, Article 148791.
- Yang, J., Zhan, Y. X., Xiao, X. M., Xia, J. H., Sun, W., & Li, X. M. (2020). Investigating the diversity of land surface temperature characteristics in different scale cities based on local climate zones. *Urban Climate*, 34, Article 100700. DOI: [10.1016/j.uclim.2020.100700](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100700)
- Yang, X., Zhang, Y., Hang, J., Lin, Y., Mattsson, M., Sandberg, M., ... (2020). Integrated assessment of indoor and outdoor ventilation in street canyons with naturally ventilated buildings by various ventilation indexes. *Building and Environment*, 169, Article 106528. DOI: [10.1016/j.buildenv.2019.106528](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106528)
- You, W., & Ding, W. (2021). Effects of urban square entry layouts on spatial ventilation under different surrounding building conditions. *Building Simulation*, 14(2), 377–390. DOI: [10.1007/s12273-020-0656-8](https://doi.org/10.1007/s12273-020-0656-8)
- You, W., & Ding, W. W. (2017). Improving the residential wind environment by understanding the relationship between outdoor space form and ventilation potential. *Proceedings of the 26th UIA 2017 Seoul World Architects Congress*, Seoul, Korea. DOI: [10.3390/atmos8060102](https://doi.org/10.3390/atmos8060102)
- You, W., Gao, Z., Chen, Z., & Ding, W. W. (2017). Improving residential wind environments by understanding the relationship between building arrangements and outdoor regional ventilation. *Atmosphere*, 8(6), Article 102. DOI: [10.3390/atmos8060102](https://doi.org/10.3390/atmos8060102)
- Yuan, C., & Ng, E. (2014). Practical application of CFD on environmentally sensitive architectural design at high-density cities: A case study in Hong Kong. *Urban Climate*, 8, 57–77. DOI: [10.1016/j.uclim.2013.12.001](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.12.001)
- Yuan, C., Ren, C., & Ng, E. (2014). GIS-based surface roughness evaluation in the urban planning system to improve the wind environment: A study in Wuhan, China. *Urban Climate*, 10, 585–593. DOI: [10.1016/j.uclim.2014.06.005](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.06.005)
- Yu-Hsuan, J., Chih-Yung, W., Zhengtong, L., & An-Shik, Y. (2021). Impacts of urban morphology on improving urban wind energy potential for generic high-rise building arrays. *Applied Energy*, 299, Article 117304. DOI: [10.1016/j.apenergy.2021.117304](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117304)
- Zhang, J., Wan, Y., Tian, M., Li, H., Chen, K., Xu, X., & Yuan, L. (2024). Comparing multiple machine learning models to investigate the relationship between urban morphology and PM2.5 based on mobile monitoring. *Building and Environment*, 248, Article 111032. DOI: [10.1016/j.buildenv.2023.111032](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111032)

Zongci, Z., Yong, L., Ying, J., et al. (2016). Possible reasons for wind speed reduction in China in the past 50 years. *Advances in Meteorological Science and Technology*, (3), 106–109. DOI: [10.1007/s13351-021-0143-x](https://doi.org/10.1007/s13351-021-0143-x)

