

## Journal of Urban Environmental Planning and Development

Vol 4, No 13, Spring 2024


p ISSN: 2981-0647 - e ISSN:2981-1201

Journal Homepage:<http://juep.iaushiraz.ac.ir/>

### Research Paper

## Effect of Building Form on Wind Velocity and Pollutant Concentration in Urban Residential Context (Case Study: District 1 of Shiraz City)

**Mozhgan Kamali:** Ph.D. Student in Architecture, Yasuj Islamic Azad University, Yasuj, Iran.

**Ali Akbar Heidari\***  : Associate Professor, Department of Technical and Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran.

**Yaghowb Peyvastehtar**  : Associate Professor of Architecture and Urban Planning, Yasuj Branch , Islamic Azad University, Yasuj, Iran

Received: 2023/10/29 **PP** 67-82 **Accepted:** 2023/11/25

### Abstract

With the increasing use of motor vehicles in cities, the amount of traffic-related pollutants is growing and affects indoor air quality. One of the influencing factors for the pollutant's penetration into the urban context and the change of its diffusion speed (depending on the air velocity) is building form. The purpose of this research is to investigate the effect of building form on pollutant concentration and air velocity inside the building. The method in this research is applied and mixed research. For this purpose, 3 common building forms have been investigated in district 1 of Shiraz city. These forms create 12 different urban contexts with four 90 degree rotations in a regular pavilion-shaped context. Each context is placed in the vicinity of an urban highway as a pollutant source. Examining the cases has been done through CFD simulation. Steady 3-dimensional flow using the SST- $\omega$  turbulence model has been used to simulate the cases, which have been numerically solved based on the Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations. The validation of the CFD software used in this research has been done in comparison with the wind tunnel tests and has yielded acceptable results. The results showed that the building form has a significant effect on the air quality inside the building. Also, based on the results of the TOPSIS multi-criteria decision-making method, the best and the worst building forms in order to increase the air velocity and reduce the concentration of pollutants inside the building, respectively, related to the form with an overhang, facing the windward, and an overhang, facing the leeward.

**Keywords:** *Building Form, Air Quality, Air Pollutant, Air Velocity, Computational Fluid Dynamics (CFD).*



**Citation:** Kamali, M., Heidari, A. A., & Peyvastehtar, Y. (2024) . **Effect Of Building Form on Wind Velocity and Pollutant Concentration in Urban Residential Context (Case Study: District 1 of Shiraz City)**, *Journal of Urban Environmental Planning and Development*, 4(13), 67-82.



© The Author(s) **Publisher:** Islamic Azad University of Shiraz

**DOI:**

\* **Corresponding author:** Ali Akbar Heidari, **Email:** [aliakbarheidari.iust@gmail.com](mailto:aliakbarheidari.iust@gmail.com), **Tell:** +989171455494

## Extended Abstract

### Introduction

According to estimates, about 91% of the world's urban population is exposed to various types of pollution (WHO, 2016; Pepe et al., 2019). Air pollution in cities is caused by various factors such as the activities of industries and factories, traffic of cars and the use of fossil fuels for cooling and heating of buildings. Meanwhile, the traffic of cars in cities is one of the most important factors in the production and spread of pollution in urban spaces (Zhao et al., 2020). The spread of pollution in urban spaces depends on various factors, including meteorological factors (like wind speed and its direction), urban morphological characteristics (such as the geometry and arrangement of the buildings), urban density and the location of the pollution source (Blocken et al., 2013; Di Sabatino et al., 2018; Hang et al., 2015; He et al., 2020a, 2020b; Miao et al., 2020). In this regard, the role of urban morphology in the spread of pollution is one of the fields that has received less attention in urban research and environmental design. In most of this research, the relationship between urban form and air ventilation has been investigated and in a small number of them the relationship between urban form and air quality and the pollutant abundance have been studied. (Yang, Shi, Shi, et al., 2020). As mentioned above, in this research the impact of urban morphology on pollution spread caused by vehicular traffic is analyzed. The purpose of this research is to analyze the typological form of buildings in an urban context in terms of indoor air quality indicators. In order to measure the air quality inside the building, two parameters of the pollutant concentration and the air velocity will be examined. According to the objectives of the research, the following questions are answered in this research:

1. What effect does the change in the pattern of the urban context (affected by the change in the form and arrangement of the building) have on the penetration of pollutants in the building?
2. What are the characteristics of the optimal building form in relation to the pattern of wind behavior to increase air quality?

### Methodology

Based on what was mentioned, in this research, the impact of urban morphology on pollution spread caused by vehicular traffic is analyzed. The pattern of urban morphology is selected based on the form of existing residential context in Shiraz city. Among the pollutants affected by urban traffic, , which has the highest concentration and abundance (73 ) in the annual concentration chart of Shiraz city (PlumeLabs, 2022), will be investigated. The research process is carried out in such a way that, in the first step, using Grasshopper software, different alternatives for the residential building form are generated. In this step, form generation is performed based on two variables, volume and relative compactness. In the next step, among the generated forms, the most similar options to the existing buildings in the residential context of district one in Shiraz City are selected. In the third step, the types of context that can be extracted from the rotation of the selected building patterns are determined. The determined contexts are analyzed in the fourth step using numerical simulation in CFD, and the wind velocity and concentration of pollutants within the target building are measured. Finding the best building configuration in the context in order to reduce the concentration of pollutants and increase the air velocity (in the target building) is the last step in this research which is done using the TOPSIS MCDM.

### Results and discussion

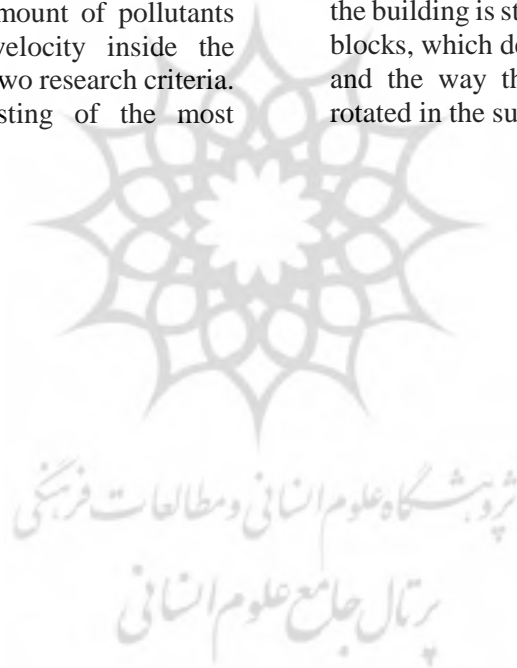
In this section, the results of air velocity and concentration analyses inside the target building are presented. For the reference case, the increase of concentration along the longitudinal walls and its decrease in the middle part of the target building can be seen. For Configuration A, in cases A-01 and A-03 depending on the direction of the overhang, the pollution diffusion pattern has been transferred to the passage in front of the overhang. In A-02, in addition to the north-south streets, the wind flow containing the pollutants has also been drawn into the east-west streets, which has caused the accumulation of pollutants in this area and its entry into the interior of the target building. In A-04, the negative pressure area reduces the concentration of pollutants in the south face of the buildings (due to the increase in the wind shadow and the decrease in the wind flow containing pollutants). Therefore, the entry of pollutants into the target building has

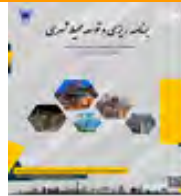
been reduced. For Configuration B, cases B-01 and B-03 have similar behavior in pollution diffusion patterns in the context. In case B-02 in the target building, the concentration has gradually increased from the sides of the building towards the middle. In Case B-04, in the target building, the pollutant concentration is low, and the particle dispersion is uniform. For Configuration C, in cases C-01 and C-03, Pollutant accumulation is on the front facing the facade overhang. In case C-02, the middle part of the target building has the highest concentration of pollutants. In case C-04 in the target building, the dispersion of particles is low and uniform.

### **Conclusion**

The main purpose of this research is to investigate the effect of different building configurations in an urban context on IAQ. In this paper, reducing the amount of pollutants and increasing the air velocity inside the building are considered as two research criteria. 12 urban contexts consisting of the most

common forms of low-rise buildings in Shiraz city in a regular pavilion-shaped urban form are considered case studies and are simulated in CFD. Based on this, the most important results obtained are as follows: The rotation of building blocks in an urban context causes a change in the pollution diffusion pattern. In this regard, the form of blocks and their filled and empty spaces play an important role in the diffusion pattern. The average concentration in the target building in configuration C and configuration A are the lowest and the highest, respectively. configuration A with an overhang and configuration C with a façade overhang have the lowest and highest air velocity in the target building, respectively. The results of using TOPSIS MCDM showed that A-04 and A-02 are the best and the worst examined cases in terms of IAQ. The results of this study indicate that the dilution of polluted air in the interior of the building is strongly related to the form of the blocks, which depends on both the form pattern and the way the buildings are arranged and rotated in the surrounding context.





# فصلنامه برنامه ریزی و توسعه محیط شهری

دوره ۴، شماره ۱۳، بهار ۱۴۰۳


شاپا چاپی: ۰۶۴۷-۲۹۸۱ شاپا الکترونیکی: ۱۲۰۱-۲۹۸۱


Journal Homepage: <http://juerp.iaushiraz.ac.ir/>

## مقاله پژوهشی

### تاثیر فرم ساختمان بر سرعت هوا و غلظت آلاینده در بافت مسکونی شهری (مورد مطالعه: منطقه یک شهر شیراز)

مژگان کمالی: دانشجوی دکتری معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، یاسوج، ایران

علی اکبر حیدری\* : دانشیار گروه معماری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

یعقوب پیوسته گر : دانشیار گروه معماری و شهرسازی، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۰۸ صص ۶۷-۸۲ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۰۴

## چکیده

با افزایش روزافزون استفاده از وسایل نقلیه موتوری در شهرها میزان آلاینده‌های ناشی از ترافیک رو به رشد است و کیفیت هوای داخل را تحت تاثیر قرار می‌دهد. یکی از عوامل تاثیرگذار بر نفوذ آلاینده‌ها به بافت و تغییر سرعت انتشار آن (وابسته به سرعت هوا) فرم ساختمان است. بنابراین هدف از پژوهش حاضر بررسی تاثیر فرم ساختمان بر غلظت آلاینده و سرعت هوای داخل ساختمان است. روش تحقیق در پژوهش حاضر از نوع کاربردی و ترکیبی است. به منظور انجام تحقیق حاضر ۳ فرم رایج شهری در منطقه یک شهر شیراز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این فرم‌ها با چهار چرخش ۹۰ درجه در بافت شهری نقطه‌ای منظم، ۱۲ نمونه بافت شهری متفاوت ایجاد می‌کنند. هر بافت در مجاورت یک اتوبان شهری به عنوان منبع آلاینده قرار گرفته است. بررسی نمونه‌ها از طریق شبیه سازی CFD انجام پذیرفته است. جریان ثابت سه بعدی با استفاده از مدل آشفتگی SST-K $\omega$  جهت شبیه سازی نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است که به صورت عددی بر اساس معادلات رینولدز میانگین ناویر استوکس (RANS) حل شده است. اعتبارسنجی نرم افزار CFD مورد استفاده در این تحقیق در مقایسه با آزمایشات تونل باد انجام گرفته است و نتایج قابل قبولی به همراه داشته است. نتایج نشان داد که فرم ساختمان تاثیر قابل توجهی بر کیفیت هوای درون ساختمان دارد. همچنین بر اساس نتایج روش تصمیم گیری چند معیاره تاپسیس، بهترین و بدترین الگوی فرمی ساختمان به منظور افزایش سرعت هوا و کاهش غلظت آلاینده‌های درون بنا به ترتیب مربوط به فرم با پیشامدگی بالکن مانند، رو به جهت باد و پیشامدگی بالکن مانند، پشت به جهت باد است.

واژه‌های کلیدی: فرم ساختمان، کیفیت هوا، آلودگی هوا، سرعت هوا، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD).

استناد: کمالی، مژگان؛ حیدری، علی اکبر و پیوسته گر، یعقوب (۱۴۰۲). تاثیر فرم ساختمان بر سرعت هوا و غلظت آلاینده در بافت

مسکونی شهری (مورد مطالعه: منطقه یک شهر شیراز)، فصلنامه برنامه‌ریزی و توسعه محیط شهری، ۴(۱۳)، ۶۷-۸۲.

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز

© نویسندگان



DOI:



## مقدمه

بر اساس توضیح سازمان بهداشت جهانی در سال ۲۰۲۲، ۹۹ درصد از جمعیت جهان هوای آلوده بیش از حد تنفس می‌کنند (Nakharutai et al., 2022). علاوه بر تهویه ضعیف هوا، آلاینده‌های هوای مرتبط با ترافیک برای مشکلات کیفیت هوای شهری بسیار مهم هستند. در دهه‌های گذشته، مطالعه پراکندگی آلاینده‌های ترافیکی تحت تأثیر سطوح مختلف تهویه و فرم شهری بوده است (Jaremit et al., 2023). تهویه شهری یک استراتژی کاهش موثر است که به طور گسترده برای کاهش آلودگی هوا و تجمع گرما به ویژه در شهرهای فشرده و پرتراکم استفاده می‌شود به این شرط که به عاملی برای انتقال آلودگی محیط شهری به درون ساختمان تبدیل نشود (Feng et al., 2021; Yang et al., 2020).

اثرات ناشی از ذرات آلاینده‌ی هوا بر سلامتی انسان ممکن است زمان کوتاهی پس از مجاورت یا سال‌ها بعد نمایان شود. کیفیت پایین هوای داخلی به شکل وسیعی به عنوان یکی از مشکلات مهم اقتصادی، زیست محیطی و بهداشتی محسوب می‌شود (Mostafa-zadeh & Savalanpour, 2015).

به طور کلی انتشار آلودگی در سطح فضاهای شهری به عوامل مختلفی بستگی دارد که از جمله آنها می‌توان به عوامل هواشناسی (مانند سرعت و جهت باد)، ویژگی‌های مورفولوژی شهری (مانند هندسه و آرایش ساختمان‌ها)، تراکم شهری و موقعیت منبع آلودگی اشاره نمود (Blocken et al., 2013; Di Sabatino et al., 2018; Hang et al., 2015; He et al., 2020a, 2020b; Miao et al., 2020). در این ارتباط نقش مورفولوژی شهری به ویژه فرم ساختمان بر انتشار آلودگی‌ها از جمله مواردی است که با وجود اهمیت زیاد در تحقیقات شهری و طراحی محیطی کمتر مورد توجه قرار گرفته است (Yang, et al., 2020). این در حالی است که یک فرم بیرونی موضوعات مهمی مانند: خصوصیات مواد، تکنیک‌های ایجاد فرم و بهره‌وری را بیان می‌کند (Sabunchi et al., 2020). بر همین اساس هدف از پژوهش حاضر تحلیل تیپولوژیک فرم ساختمان‌ها در یک بافت شهری از نظر شاخص کیفیت هوای داخل است. به منظور سنجش کیفیت هوای داخل بنا از دو پارامتر میزان غلظت آلاینده‌های ورودی به بنا و سرعت هوای درون بنا استفاده خواهد شد. فرض تحقیق حاضر بر این است که ایجاد فرم ساختمانی کارآمد یکی از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر ایجاد محیط مسکونی بدون آلاینده می‌باشد. بر این اساس سوالات به این شرح قابل طرح هستند:

۱. تغییر در الگوی بافت شهری (متاثر از تغییر فرم و آرایش ساختمان) چه تاثیری بر نفوذ آلاینده‌ها در ساختمان دارد؟
۲. مشخصه‌های فرم ساختمانی بهینه در ارتباط با الگوی رفتار باد برای افزایش کیفیت هوا چگونه است؟

## پیشینه و مبانی نظری تحقیق

آلودگی هوا به عنوان یک مشکل عمده در شهرهای پرتراکم در آسیا شناخته شده است (Schwela et al., 2016). در یک محیط شهری با تراکم بالا، گروه‌های ساختمانی نزدیک به هم، جریان هوا را ضعیف می‌کنند و در نتیجه پراکندگی آلاینده‌ها را محدود می‌کنند (Fernando et al., 2001; Ng, 2009). بنابراین آلودگی هوای سطح خیابان‌ها به یک مسئله زیست محیطی شدید در شهرهای پرتراکم تبدیل شده است (EPD, 2022). در این میان، آلاینده‌های ناشی از ترافیک شهری به سختی رقیق می‌شوند و به آرامی پراکنده می‌شوند، که منجر به اثرات شدید بر کیفیت هوای داخل می‌شود (Li et al., 2017).

مورفولوژی شهری با برنامه‌ریزی و طراحی مناسب به طور قابل توجهی پراکندگی آلودگی را بهبود می‌بخشد. و در نتیجه خطر ابتلا به بیماری را کاهش می‌دهد (Shi et al., 2018). یکی از مهم‌ترین فاکتورهای تاثیرگذار بر شکل (مورفولوژی) شهری، مورفولوژی ساختمان است. فرم و مورفولوژی ساختمان به ویژگی‌های ساختمان، ساختار و طراحی ساختمان و هندسه ساختمان بستگی دارد (Geekiyange et al., 2017). فرم‌ها هر ساختاری که داشته باشند، تمایل ما این است که آن‌ها را به منظم‌ترین و ساده‌ترین آرایه‌ها کاهش دهیم. هرچه یک شکل منظم‌تر و ساده‌تر باشد، راحت‌تر رویت و فهم می‌شود. از دوران یا امتداد شکل‌های اصلی حجم‌هایی با فرم‌های متفاوت منتظم ایجاد می‌شوند؛ به این فرم‌ها که عبارتند از مخروط، کره، هرم، استوانه، مکعب، شکل‌های افلاطونی گفته می‌شود. یک فرم حقیقی باید حاوی مقیاس یا اندازه، تناسب و هماهنگی<sup>۱</sup> باشد (Mansouri, 2000). فرانسیس دی. کی. چینگ در کتاب «معماری: فرم، فضا، نظم» به تبیین تعدادی دیگر از خصوصیات فرم که می‌توانند با توجه به دیدگاه ما نسبت به فرم متمایز باشند، می‌پردازد که در زیر به معرفی آن‌ها پرداخته شده است:

<sup>1</sup> Measure

<sup>2</sup> Proportion

<sup>3</sup> Harmony

- تغییر زاویه دید یا پرسپکتیو، ظواهر و شکل‌های متفاوتی از فرم را برای ما به تصویر می‌کشد.
  - فاصله‌ی ما از فرم، اندازه‌های ظاهری آن را معین می‌کند.
  - موقعیت روشنائی محدوده‌ای که فرم در آن مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد بر ساختار شکل و مقدار واضح بودن آن تأثیرگذار است.
  - قلمرو دیداری اطراف فرم، بر قابلیت ما در ادراک و بازشناسی آن تأثیرگذار می‌باشد (D.K.Ching, 2022).
- هدف اصلی از طراحی فرم ساختمان‌ها ایجاد فضای داخلی مناسب تر برای افراد و فرآیندها نسبت به فضای باز است که باعث توجه روزافزون به محیط داخلی به عنوان یکی از اصلی ترین عوامل سلامت و رفاه کاربران ساختمان می‌شود. بدیهی است که برای به حداقل رساندن قرار گرفتن در معرض آلاینده‌های داخل ساختمان، نیاز به افزایش عرضه هوای بیرون در داخل ساختمان‌ها وجود دارد. علاوه بر این، مصالح ساختمانی، فرم و سازه‌های ساختمانی و فعالیت‌های داخلی باید بر اساس این اصل انتخاب شوند که سطح هوای داخل باید از بهترین کیفیت برخوردار باشد یا غلظت عوامل منفی باید تا حد معقولی پایین باشد (Senitkova, 2007).
- همان طور که گفته شد طراحی مناسب مورفولوژی و شکل شهری یکی از فاکتورهایی است که می‌تواند به کاهش آلاینده‌ها در فضای داخلی کمک کند. در سال‌های گذشته، مطالعات متعددی به بررسی تأثیر مورفولوژی شهری بر عملکرد تهویه شهری و پراکندگی آلودگی هوا چه در مقیاس بلوک ساختمانی و ساده چه در مقیاس شهری و پیچیده پرداخته‌اند (Feng et al., 2021; Yang et al., 2020).

جدول ۱- پیشینه تحقیق

نویسنده	موضوع اصلی	ذرات آلاینده	متغیر مستقل	متغیر وابسته	روش مطالعه	هدف پژوهش
Cárdenas Rodríguez et al., 2016	الگوی فرم شهری	NO <sub>2</sub> , PM <sub>10</sub> , SO <sub>2</sub>	تراکم و پراکندگی شهری	C, ρ, A, T	تجربی	بررسی رابطه بین آلودگی هوای محلی و ساختار شهری
Fan et al., 2017	الگوی فرم شهری	CO	الگوی بازشو و نسبت ابعاد خیابان	C, $\bar{V}$	CFD	تدوین شاخص جدید برای ارزیابی کیفیت هوا و آسایش باد
Ramponi et al., 2015	الگوی فرم شهری	-	تراکم شهری و عرض خیابان، جهت باد	LMA, $\bar{V}$ , $\mathbb{I}_p$	CFD	بررسی تهویه خارجی برای الگوهای شهری های موازی با خیابان
Zhu et al., 2021	الگوی فرم شهری	ذرات بسیار ریز (UFP)	ارتفاع و آرایش ساختمان، جهت باد	C	تجربی - CFD	های بررسی اثرات طراحی مختلف محیط ساخته شده بر غلظت ذرات فوق ریز سطح خیابان
An et al., 2019	الگوی فرم شهری	-	ارتفاع و آرایش ساختمان	C, $\bar{V}$	CFD	کاهش مشکلات زیست محیطی بالقوه برای کشف طرح های ساختمانی بهینه
(Xie et al., 2005)	الگوی فرم ساختمان	-	شکل سقف و ساختار ساختمانی محیط	C, $\bar{V}$	CFD	ها از شبیه سازی انتشار آلاینده آگروز و وسایل نقلیه در یک دره خیابان در یک محیط شهری
Lu & Peng, 2023	الگوی فرم شهری	PM <sub>1</sub>	ارتفاع پل، نسبت ابعاد و فاصله خط مرکزی	C, $\bar{V}$ , RH, T, TKE	مقیاس واقعی / CFD	نشان دادن تأثیر پل بر توزیع ها در دره خیابان عمودی آلاینده
Alwetaishi & Gadi, 2021	الگوی فرم ساختمان	-	شکل بادگیر	$\bar{V}$	مقیاس کوچک شده / CFD	بررسی اشکال جدید و نوآورانه بادگیرها برای بهبود سرعت هوا در داخل
(Tao et al., 2022)	الگوی فرم ساختمان	-	شکل NVDSF (نمای دو پوسته با تهویه طبیعی) و اتاق، اندازه درجه‌های تامین هوا، ارتفاع نصب و نسبت ابعاد	Q, LMA, VE	CFD	بررسی عملکرد نمای دو پوسته با تهویه طبیعی بر کیفیت هوای داخل
Wu & Chen, 2023	الگوی فرم ساختمان	CO	های مسکونی تیپولوژی بلوک	C, F <sub>total</sub> , PFR, NEV	CFD	بررسی تأثیر انواع مختلف بلوک های مسکونی بر انتشار آلاینده های ترافیکی

نویسنده	موضوع اصلی	ذرات آلاینده	متغیر مستقل	متغیر وابسته	روش مطالعه	هدف پژوهش
Niu et al., 2018	الگوی فرم ساختمان	$PM_{2.5}$	جهت باد، فاصله ساختمان و ارتفاع سطح زمین	C	CFD	بررسی تأثیر انتشارات ترافیک بر کیفیت هوا در دره خیابان
Ng & Chau, 2014	الگوی فرم ساختمان و خیابان	CO	نفوذپذیری ساختمان و نسبت ابعاد	C, $\bar{V}$	CFD	ارزیابی اثربخشی پیکربندی های مختلف
Nguyen et al., 2019	الگوی فرم ساختمان	$C_2H_6$ , $SF_6$	شکل سقف و نسبت ابعاد	C, $\bar{V}$ , TKE	CFD	بررسی الگوی جریان و های پراکندگی آلاینده در دره های شهری با الگوی خیابان هندسی متفاوت
Huang et al., 2015	الگوی فرم ساختمان	-	شکل و ارتفاع سقف	C, $\bar{V}$ , TKE	CFD	شبیه سازی جریان و پراکندگی آلاینده در یک دره خیابان شهری

منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲

در این پژوهش‌ها به تحلیل پارامترهایی چون ارتفاع و تراکم ساختمان، عرض خیابان‌ها، نوع آرایش ساختمان‌ها، چرخش ساختمان‌ها و فرم نمای آنها در بافت‌های شهری می‌پردازند. نتایج این تحقیقات نیز معمولاً به ارائه استراتژی‌های مختلف برنامه‌ریزی و طراحی شهری به منظور بهبود تهویه هوا و کیفیت هوا و ایجاد یک محیط شهری سالم و پایدار منجر می‌گردد (Ewing & Rong, 2008). در جدول ۱ بخشی از این تحقیقات ارائه شده است. از تحلیل جدول فوق، موارد زیر قابل برداشت است:

در سال‌های اخیر، توجه فزاینده‌ای به توزیع آلاینده‌ها در بلوک‌های شهری و همبستگی آن با پیکربندی شهری انجام شده است (Liu et al., 2021; Zheng et al., 2021). با این حال، این مطالعات بیشتر به بررسی موضوع در مقیاس شهری پرداخته‌اند و تأثیر مورفولوژی ساختمان بر الگوی توزیع آلاینده به ندرت انجام گرفته است. بیشتر این تحقیقات تحلیل مورفولوژی شهری بر کیفیت هوا را در محیط‌های بیرونی از جمله معابر انجام داده‌اند و لذا تأثیر این موضوع بر کیفیت هوای داخل کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. فرم شهری، ارتفاع و آرایش ساختمان‌ها، شکل سقف ساختمان، نسبت ابعاد، شکل نما و شکل پنجره، از جمله مهم‌ترین شاخص‌هایی هستند که تأثیر آنها بر کیفیت هوا و الگوی انتشار آلودگی مورد بررسی قرار گرفته است؛ از جمله مهم‌ترین آلاینده‌هایی که در پژوهش‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند می‌توان به  $CO$ ،  $NO_2$ ،  $PM_{10}$ ،  $SO_2$ ،  $PM_1$ ،  $UFP$ ،  $PM_{2.5}$ ،  $SF_6$ ،  $C_2H_6$  اشاره کرد. از بین این آلاینده‌ها،  $CO$  در تحقیقات بیشتری مورد استفاده قرار گرفته است. در بیشتر پژوهش‌ها دو متغیر سرعت هوا و غلظت آلاینده‌ها به عنوان متغیرهای وابسته تحقیق مورد سنجش قرار گرفته است. روش مورد استفاده در این تحقیقات عموماً شبیه‌سازی CFD بوده است و در اکثر تحقیقات از مدلسازی سه بعدی استفاده شده است.

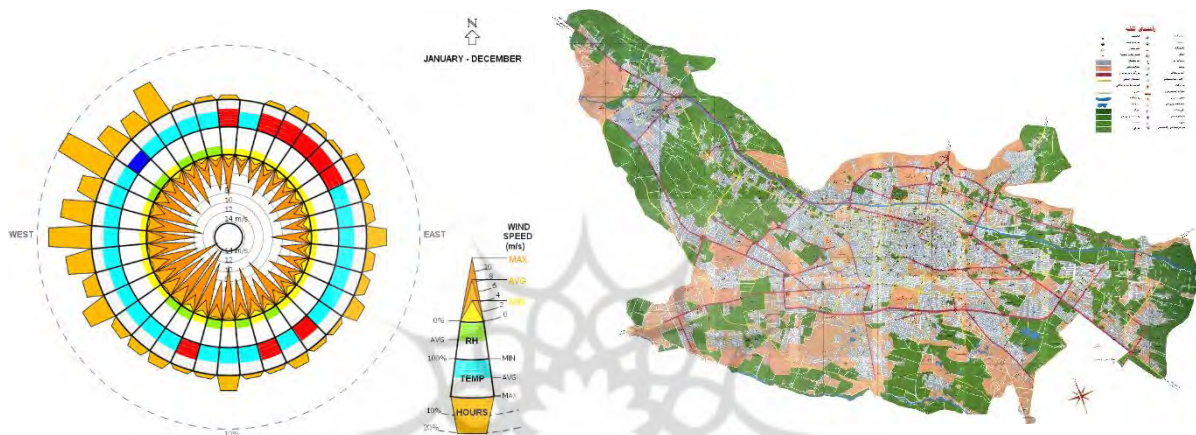
## مواد و روش تحقیق

بر اساس آنچه عنوان شد در این پژوهش به تحلیل تأثیر فرم ساختمان بر نحوه انتشار آلودگی ناشی از ترافیک وسایل نقلیه پرداخته می‌شود. جامعه آماری مورد بررسی در پژوهش حاضر ساختمان‌های مسکونی منطقه یک شهر شیراز می‌باشند. الگوی بافت شهری بر اساس فرم بافت های مسکونی موجود در شهر شیراز انتخاب گردید. از میان آلاینده‌های متاثر از ترافیک شهری، آلاینده  $NO_2$  که دارای بالاترین غلظت و فراوانی ( $73 \mu g/m^3$ ) در نمودار سالانه غلظت شهر شیراز است، مورد بررسی قرار گرفت (PlumeLabs, 2022). فرایند تحقیق به این صورت انجام گرفت که در گام اول با استفاده از نرم افزار Grasshopper، آلترناتیوهای مختلف فرم ساختمان در یک بافت مسکونی میان مرتبه بر اساس دو متغیر حجم و ضریب فشردگی تولید گردید. در مرحله بعد، از بین فرم‌های تولید شده، شبیه‌ترین گزینه‌ها به ساختمان‌های موجود در بافت مسکونی منطقه یک شهر شیراز انتخاب شدند. در مرحله سوم انواع بافت‌هایی که از چرخش الگوی ساختمانی انتخاب شده قابل استخراج بودند، تعیین گردید. بافت‌های تعیین شده در مرحله چهارم با استفاده از شبیه‌سازی عددی در CFD مورد تحلیل قرار گرفتند و سرعت باد و غلظت آلاینده‌ها درون ساختمان هدف در هر بافت مورد سنجش قرار گرفت. یافتن بهترین فرم ساختمانی در بافت به منظور کاهش غلظت آلاینده‌ها و افزایش سرعت هوا (در ساختمان هدف) آخرین مرحله در این پژوهش بود که با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره تاپسیس انجام گرفت. در این روش، تعدادی گزینه و تعدادی معیار برای تصمیم‌گیری وجود دارد که با توجه به معیارها، گزینه‌ها می‌بایست رتبه بندی شوند. روند رتبه بندی نمونه‌ها از ایده آل مثبت تا ایده آل منفی یعنی بازه‌ای از بهترین تا بدترین حالت‌های ممکن است.

## محدوده مورد مطالعه

شیراز پنجمین شهر پرجمعیت ایران و مرکز استان فارس است (SCI, 2022) بر اساس دسته بندی کوپن، اقلیم این شهر گرم و نیمه خشک (BSH) است (Landofaryan, 2011). با توجه به نتایج ایستگاه سینوپتیک ماهانه و سالانه شهر شیراز، متوسط دمای سالانه در این شهر به ترتیب ۱۹/۱۷ درجه سانتی گراد و میانگین سرعت سالانه باد ۶/۴۸ متر بر ثانیه است (Mohammadi, 2021; Tuttempo Network, 2021; Roshan, 2009). مطابق گلباد سالبانه شیراز باد غالب شهر از سمت شمال غربی است (شکل ۱) (EPW data (2007-2021) in (Climate Consultant 6.0 software).

شهر شیراز از یازده منطقه تشکیل شده است که منطقه ۱، ۲ و ۴ پرجمعیت‌ترین و مناطق ۱، ۶، ۹ و ۱۰ دارای بیشترین مساحت هستند. بنابراین منطقه یک هم به عنوان وسیع‌ترین و هم به عنوان پرجمعیت‌ترین منطقه شیراز، درصد بالایی از آلاینده‌های ناشی از ترافیک شهری را در خود دارد. غالب ساختمان‌های موجود در این منطقه کم ارتفاع (بین ۱ تا ۴ طبقه) هستند (Javanroodi et al., 2018). بر همین اساس در این پژوهش فرم ساختمان‌ها و الگوی بافت بر اساس نمونه‌های موجود در این منطقه در نظر گرفته شد.

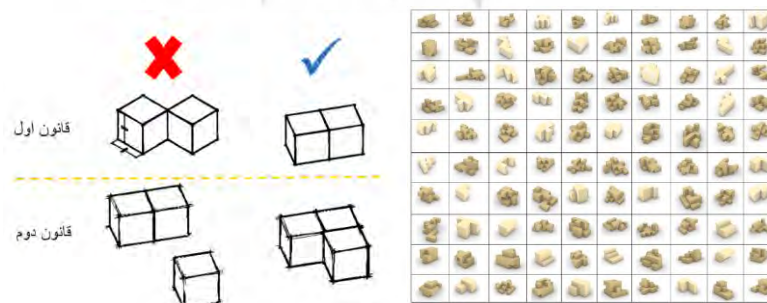


شکل ۱: نقشه شهر شیراز (سمت راست) (منبع: Kamrani, 2013)، گلباد سالانه شهر شیراز (سمت چپ) (منبع: EPW data, 2022)

## نمونه‌های موردی تحقیق

### تولید فرم ساختمان‌ها

همانگونه که پیش از این اشاره شد، در این پژوهش به منظور تولید فرم از الگوریتم اگریگیشن (aggregation) در نرم افزار گرس‌هاپر استفاده شد. برای این منظور از پلاگین واسب (wasp) استفاده شد. فرم‌های تولید شده از یک مکعب با ابعاد ۹×۹×۹ ساخته شدند که خود متشکل از ۲۷ سلول مکعبی با ابعاد ۳×۳×۳ هستند. خروجی این بخش، تولید ۱۰۰ فرم بود که دارای حجم ثابت و ضرایب فشردگی مختلف بودند (شکل ۲). در فرایند تولید این فرم‌ها دو قانون در گراس‌هاپر تعریف شد: (۱) سلول‌های تولیدی باید از لبه به یکدیگر متصل شوند نه از گوشه‌ها؛ (۲) پیکره‌بندهای (configuration) تولید شده باید یک فرم یکپارچه باشد و نمی‌تواند از دو فرم مجزا تشکیل شده باشد.



شکل ۲- صد فرم ساختمانی تولید شده در گرس‌هاپر (سمت راست)، قوانین تولید فرم (سمت چپ) (منبع: نگارندگان)



## تعیین فرم بافت

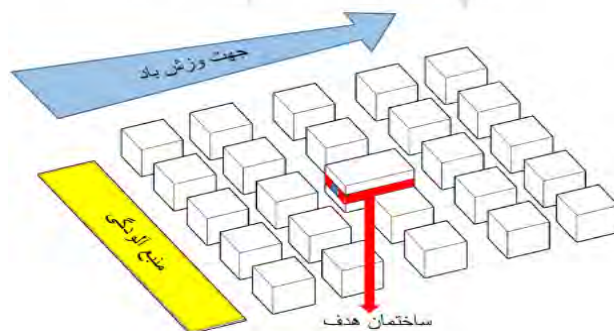
یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار باد در اطراف ساختمان‌ها، فرم آنها و نحوه پیکره‌بندی آنها نسبت به یکدیگر (آرایش ساختمانی) است (Allegri et al., 2012; Niachou et al., 2008). در منطقه یک شیراز پنج الگوی پیکره‌بندی ساختمانی قابل مشاهده است: الگوی خطی منفصل، خطی متصل، مرکزی، نقطه‌ای منظم و نقطه‌ای نامنظم (جدول ۲). از بین این پنج الگو، نقطه‌ای منظم، یکی از رایج‌ترین الگوهای پیکره‌بندی بافت مسکونی در شهر شیراز است. بر همین اساس این الگو به عنوان الگوی پایه در ساخت نمونه‌های مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۲- انواع آرایش ساختمانی بافت شهری در شهر شیراز

خطی متصل	خطی منفصل	مرکزی	نقطه‌ای منظم	نقطه‌ای نامنظم
				
				



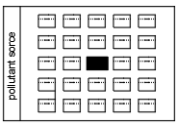
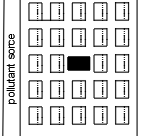
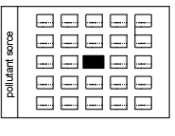
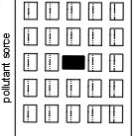


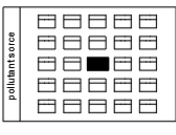
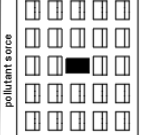
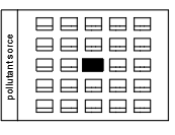
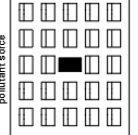


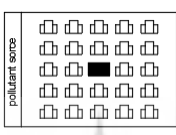
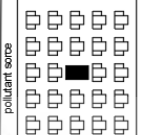
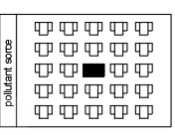
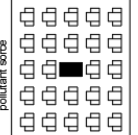
منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲

از میان ۱۰۰ نمونه فرم تولید شده در گرس‌هاپر در مرحله قبل، ۳ نمونه دارای بیشترین شباهت با ساختمان‌های موجود در منطقه ۱ شهر شیراز انتخاب شدند. بر همین اساس از این ۳ فرم به منظور تولید بافت‌های نمونه‌های موردی استفاده شد. نمونه‌های موردی در این پژوهش شامل بافت‌هایی با الگوی نقطه‌ای منظم هستند که متشکل از یک ساختمان هدف و ۲۴ ساختمان در اطراف آن است (شکل ۳). ساختمان هدف در تمام نمونه‌های موردی دارای فرم یکسان مکعب مستطیل شکل با ابعاد  $3H \times 9W \times 15L$  است. این ساختمان دارای تهویه دو طرفه با دو پنجره با ابعاد  $2 \times 3 \text{ m}^2$  در دو جبهه شمال غربی و جنوب شرقی است. سایر ساختمان‌های شکل دهنده بافت در نمونه‌های موردی برگرفته از الگوی انتخابی در مرحله قبل است؛ به این ترتیب که هر کدام از فرم‌های انتخابی (از A تا C) در دو لایه به صورت منظم در اطراف ساختمان هدف چیده شدند. با توجه به ثابت بودن جهت باد (شمال غربی به جنوب شرقی)، به منظور تحلیل تأثیر باد بر وجوه مختلف فرم‌ها، چهار چرخش ۹۰ درجه‌ای بر فرم‌ها اعمال گردید و به این ترتیب تعداد بافت‌های نمونه موردی به ۱۲ نمونه ارتقا یافت (جدول ۳). علاوه بر این ۱۲ بافت نمونه موردی، در این پژوهش یک بافت نیز به عنوان نمونه مرجع در نظر گرفته شد که در آن تمام ۲۴ ساختمان تشکیل دهنده بافت، به فرم یک مکعب ساده پیرامون ساختمان هدف چیده شده‌اند (شکل ۳). منبع آلودگی در این پژوهش، یک خیابان با عرض ۱۲ متر واقع در شمال غربی سایت است (شکل ۳).



شکل ۳- فرم بافت نمونه مبنا و مدول‌های آن (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲)

جدول ۳- نمونه‌های موردی با توجه به بافت شهری، فرم ساختمان‌ها و نحوه چرخش ساختمان‌ها

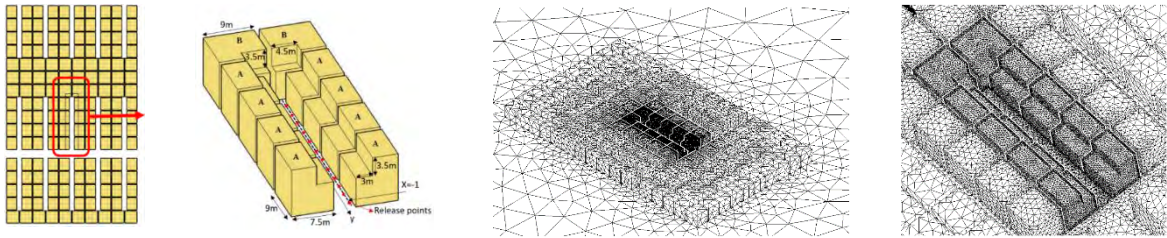
فرم ساختمانی موجود در بافت شیراز	فرم تولید شده در گرس هاپر	لیست نهایی نمونه‌ها			
					
الگو A		A-01	A-02	A-03	A-04
					
الگو B		B-01	B-02	B-03	B-04
					
الگو C		C-01	C-02	C-03	C-04

منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲

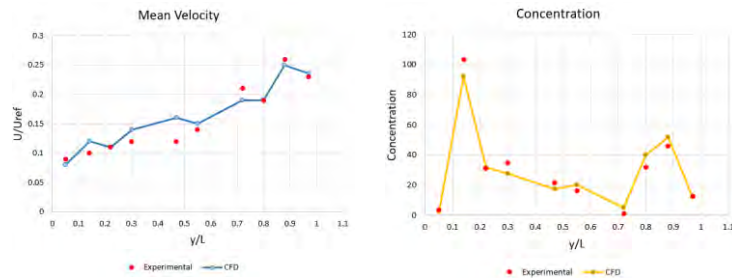
## اعتبارسنجی نرم افزار مورد بررسی

نرم افزار مورد استفاده در پژوهش حاضر (Autodesk CFD (2018 می‌باشد. اعتبارسنجی این نرم افزار بر اساس پژوهش Bady et al., 2011 انجام گرفته است. در پژوهش آنها چهار مدل همسان از ساختمان‌های شهری مورد بررسی قرار گرفته است که تیپ I به منظور اعتبارسنجی در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است. اندازه‌گیری‌ها در ارتفاع عابر پیاده در امتداد خیابان محصور شده توسط بلوک‌های نوع A و B انجام شده است (شکل ۴). در ساخت این مدل هشت بلوک نوع A و دو بلوک نوع B با ارتفاع یکسان (۹ متر) و فواصل یک متری از یکدیگر مورد استفاده قرار گرفته است. مدل ساخته شده بر روی یک صفحه گردان در داخل تونل باد قرار داده شده تا امکان بررسی اثرات جهت‌های مختلف باد فراهم شود. در پژوهش Bady et al شش جهت برخورد باد با مدل مورد تحلیل قرار گرفته شده است که در این پژوهش، اعتبارسنجی تنها تحت زاویه  $0^\circ$  انجام گرفته است. نتایج شبیه‌سازی در قالب نمودارهای سرعت باد و غلظت آلاینده‌ها در ارتفاع ۱.۵ متری از سطح زمین در فضای مرکزی مدل ارائه می‌شود.

شبکه محاسباتی متشکل از یک شبکه  $1064479$  سلولی دارای سلول‌های منشوری و شش وجهی برای اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفته است. (شکل ۴) با توجه به اینکه نتایج ارائه شده در نمونه اعتبارسنجی بر اساس دو متغیر سرعت هوا و غلظت آلاینده ارائه شده است لذا در این پژوهش نیز دو مدل مجزا با سرعت‌های متفاوت در ورودی شرایط مرزی استفاده شده است؛ به این ترتیب به منظور بررسی داده‌های سرعت هوا و غلظت آلاینده، به ترتیب از سرعت‌های  $4/6$  m/s و  $0/78$  m/s در ورودی شرایط مرزی استفاده شده است. در خروجی شرایط مرزی، فشار استاتیک صفر اعمال شده است. در این پژوهش معادلات سه بعدی ثابت RANS در ترکیب با مدل آشفتگی SST k- $\omega$  جهت حل استفاده شده است و جریان شبیه‌سازی شده تراکم ناپذیر است. در بخش جنرال اسکالار ضریب انتشار  $1/37 e-05$  m<sup>2</sup>/s برای آلاینده اتیلن، وارد شده است. شکل ۵ مقایسه نتایج CFD و داده‌های تجربی پژوهش بیدی و همکارانش (۲۰۱۱) را در ارتباط با دو متغیر سرعت باد و غلظت آلاینده‌ها نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، انطباق نسبتاً زیادی میان نتایج CFD و Experiment وجود دارد. میانگین خطا برای سرعت باد ۹٪ و برای غلظت آلاینده‌ها، ۷٪ می‌باشد. بنابراین می‌توان اعتبار نرم افزار را جهت شبیه‌سازی نمونه‌های پژوهش حاضر تایید نمود.



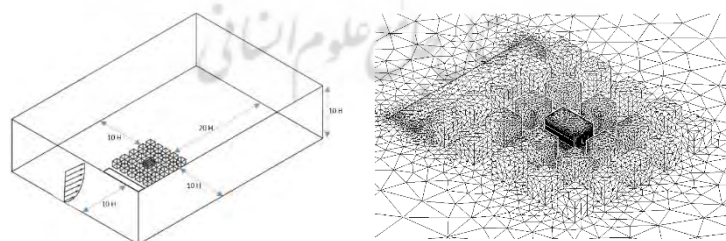
شکل ۴- آرایش خیابان‌ها در مدل اعتبارسنجی (سمت چپ) و شبکه محاسباتی در نرم افزار Autodesk CFD (سمت راست) (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲)



شکل ۵: مقایسه نتایج تونل باد و CFD در اعتبارسنجی، سرعت باد (سمت چپ) و غلظت آلاینده (سمت راست) (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲)

### تنظیمات شبیه سازی در CFD

با توجه به اینکه در نمونه‌های موردی، ارتفاع ساختمان‌های بافت، می‌باشند ( $H = 9m$ )، ابعاد دامنه محاسباتی معادل  $363 \times 249 \times m^3$  در نظر گرفته شده است (شکل ۶). در ساخت شبکه مش در دامنه محاسباتی از مش شش وجهی استفاده شده است که تعداد سلول‌ها در نمونه‌های موردی تحقیق بین ۱۲۳۴۲۳۱ تا ۱۲۸۵۲۲۵ در نوسان بود. در شکل ۶ الگوی مش نمونه مبنا نشان داده شده است. در این پژوهش از مشخصات لایه مرزی جو (ABL) تحت شرایط خنثی در مدل سازی استفاده شده است. در ورودی دامنه سرعت  $m/s$  و  $6/48$  و دمای  $19/17$  درجه سانتی گراد و در خروجی دامنه فشار استاتیکی صفر در نظر گرفته شده است. همچنین نرخ جریان جرمی  $5$  و اسکالار  $0.1$  برای منبع آلاینده در نظر گرفته شده است. سایر تنظیمات پارامترهای حل، برای شبیه سازی CFD نمونه‌ها، با تنظیمات استفاده شده در اعتبار سنجی یکسان است. (بخش ۳-۳) با این تفاوت که آلاینده مورد تحلیل در نمونه‌های موردی  $NO_2$  می‌باشد. بنابراین ضریب انتشار  $1/54e-05 m^2/s$ ، در بخش جنرال اسکالار وارد شد.



شکل ۶: دامنه محاسباتی (سمت چپ) و الگوی مش (سمت راست) در نمونه مبنا (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲)

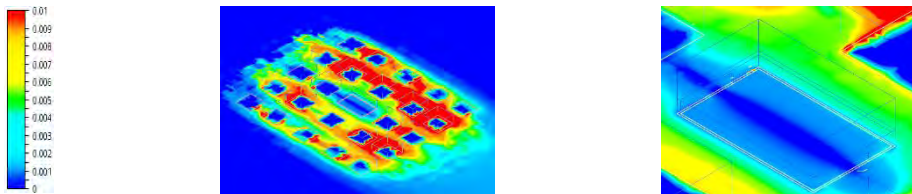
### بحث و ارائه یافته‌ها

در این بخش به تحلیل نتایج شبیه سازی نمونه‌های موردی در ارتباط با دو متغیر سرعت هوا و غلظت آلاینده  $NO_2$  درون ساختمان هدف (target building) پرداخته می‌شود. سپس نتایج حاصل از تحلیل‌ها با مقادیر استاندارد اثری مقایسه می‌شوند و با استفاده از روش چند معیاره تاپسیس نمونه‌های بهینه معرفی می‌شوند.



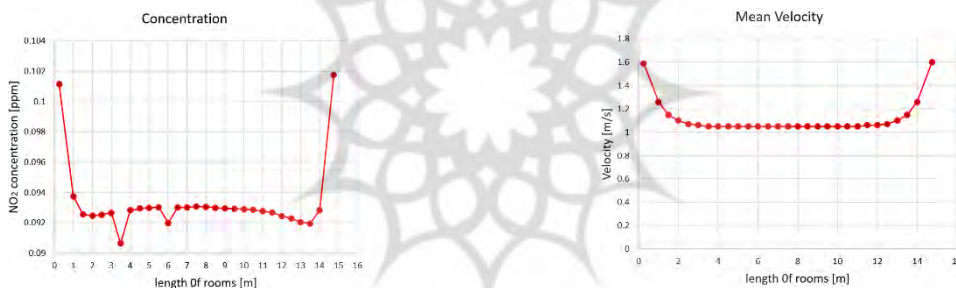
## نمونه مینا

شکل ۷ کانتورهای غلظت  $NO_2$  را برای نمونه مینا نشان می‌دهد. همانگونه که از کانتورها نمایان است، رنگ آبی نشان دهنده غلظت کم و رنگ قرمز نشان دهنده غلظت زیاد آلاینده‌ها است. همانگونه که در کانتور پلان بافت مشاهده می‌شود، غلظت آلاینده‌ها در کل سایت به طور یکنواخت پراکنده شده است اما در اطراف ساختمان هدف با تغییر فرم ساختمان به مکعب مستطیل الگوی پراکندگی ذرات آلاینده تغییر کرده است به گونه‌ای که در محدوده‌ی اطراف ساختمان هدف غلظت آلاینده کاهش یافته است. در کانتور پلان ساختمان هدف، افزایش غلظت در امتداد دیوارهای طولی و کاهش آن در بخش میانی بنا قابل مشاهده است (شکل ۷).



شکل ۷- کانتور غلظت برای نمونه مینا (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲)

شکل ۸ و ۹ به ترتیب مقادیر عددی سرعت هوا و غلظت آلاینده‌ها درون ساختمان هدف را در امتداد محور طولی اتاق و در ارتفاع ۴/۵ متری از سطح زمین نشان می‌دهد. بر اساس نمودار غلظت، در نزدیکی بازوهای ورودی و خروجی هوا، غلظت  $NO_2$  افزایش چشمگیری نسبت به بخش میانی اتاق داشته است. با افزایش فاصله نسبت به بازو ورودی، مقدار غلظت دارای شیب صعودی و از مرکز اتاق به سمت بازو خروجی، دارای شیب نزولی است (شکل ۹). این روند در ارتباط با مقادیر سرعت درون اتاق نیز نمود دارد؛ به این ترتیب که سرعت هوا در نزدیکی بازوها در حداکثر میزان ممکن و در بخش میانی اتاق به صورت یکنواخت قرار دارد (شکل ۸).



شکل ۸- سرعت هوا در طول ساختمان هدف برای نمونه مینا (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲)

شکل ۹- غلظت آلاینده در طول ساختمان هدف برای نمونه مینا (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲)

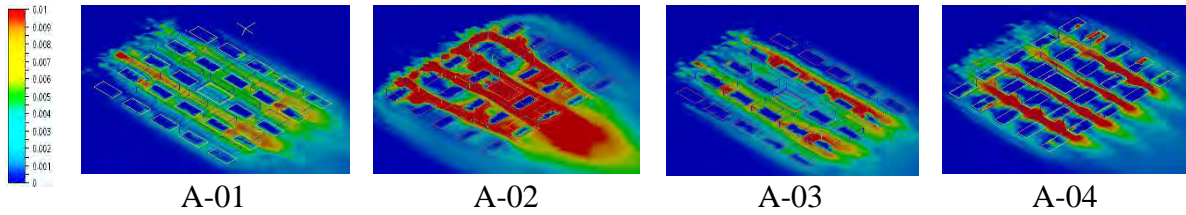
## الگو A

تصاویر ۱۰، ۱۱ و ۱۲ به ترتیب کانتورهای غلظت  $NO_2$ ، نمودار سرعت هوا و غلظت درون ساختمان هدف را برای نمونه‌های موجود در الگو A نشان می‌دهد. فرم پایه در این کانفیگوریشن، یک فرم دارای پیش‌آمدگی است که با چرخش ۹۰ درجه‌ای آن، کیس‌های A-01 تا A-04 شکل گرفته‌اند. مهمترین یافته‌های مربوط به این کانفیگوریشن شامل موارد زیر است:

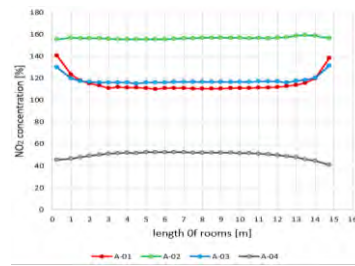
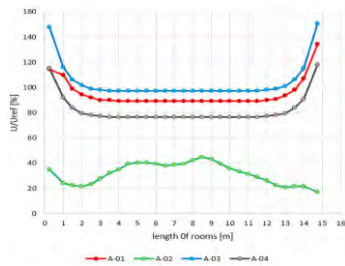
- کیس‌های A-01 و A-03 دارای رفتاری یکسان در الگوی انتشار آلودگی در بافت هستند. به این ترتیب که در هر دو نمونه، بسته به جهت پیش‌آمدگی، الگوی انتشار آلودگی به معبر مقابل پیش‌آمدگی انتقال یافته است؛ به این ترتیب که در A-01 و A-03 غلظت آلاینده‌ها به ترتیب در معابر غربی و شرقی ساختمان هدف افزایش یافته است.
- در A-02 با استقرار پیش‌آمدگی در جبهه پشت به باد، جریان باد حاوی آلاینده به جز خیابان‌های شمالی-جنوبی به داخل خیابان‌های شرقی-غربی هم کشیده شده است که این عمل باعث انباشت آلاینده‌ها در این محدوده و ورود آن به فضای داخلی ساختمان هدف شده است.
- در A-04 (استقرار پیش‌آمدگی در جبهه رو به باد)، محدوده فشار منفی باعث کاهش غلظت آلاینده‌ها در جبهه‌ی جنوبی ساختمان‌ها (به دلیل افزایش سایه باد و کاهش جریان باد حاوی آلاینده) می‌شود. بنابراین از ورود آلاینده‌ها به درون ساختمان هدف کاسته شده است (شکل ۱۰).



از میان کیس‌های موجود در کانفیگوریشن A، بیشترین و کمترین غلظت  $NO_2$  در ساختمان هدف به ترتیب در A-02 و A-04 مشاهده شده است (شکل ۱۱). همچنین بیشترین و کمترین میزان سرعت هوا به ترتیب در A-02 و A-03 مشاهده شده است (شکل ۱۲).



شکل ۱۰- کانتور الگوی انتشار غلظت آلاینده‌ها در بافت شهری با الگو A (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲)



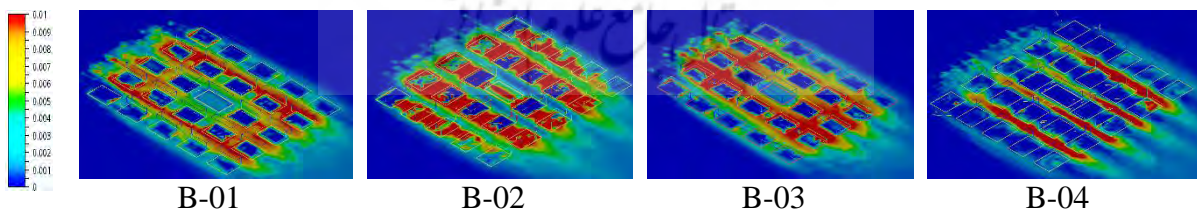
شکل ۱۲- سرعت هوا در طول ساختمان هدف برای الگو A (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲)

شکل ۱۱- غلظت آلاینده در طول ساختمان هدف برای الگو A (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲)

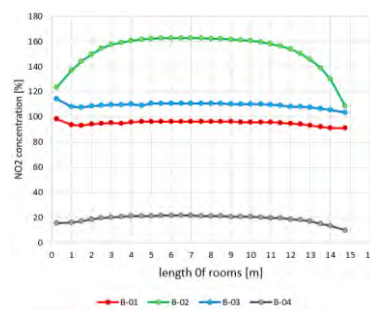
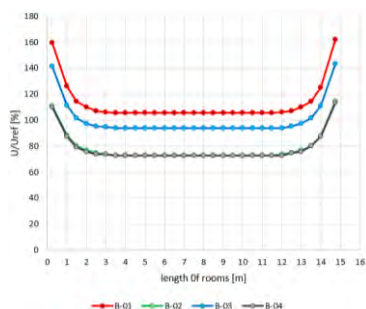
## B الگو

شکل ۱۳، ۱۴ و ۱۵ به ترتیب کانتورهای غلظت  $NO_2$ ، نمودار سرعت هوا و غلظت درون ساختمان هدف را برای نمونه‌های موجود در الگو B نشان می‌دهد. فرم پایه در این کانفیگوریشن، یک فرم پلکانی است که با چرخش ۹۰ درجه‌ای آن، کیس‌های B-01 تا B-04 شکل گرفته‌اند. مهمترین یافته‌های مربوط به این کانفیگوریشن شامل موارد زیر است:

- کیس‌های B-01 و B-03 از نظر نحوه توزیع آلودگی در بافت دارای رفتاری مشابه هستند. در هر دو کیس، انتشار آلودگی در خیابان‌ها تقریباً یکنواخت و زیاد است. این در حالی است که در ساختمان هدف با ایجاد سایه باد در محدوده اطراف آن غلظت آلاینده کاهش می‌یابد. در کیس B-02 غلظت آلاینده در خیابان‌های شمالی-جنوبی یکنواخت است. در خیابان‌های شرقی-غربی در ضلع جنوبی ساختمان‌ها غلظت آلاینده زیاد است. بنابراین در ساختمان هدف از کناره‌های ساختمان به سمت میانه آن غلظت  $NO_2$  به تدریج افزایش یافته است. در کیس B-04 غلظت آلاینده در خیابان‌های شمالی-جنوبی بسیار زیاد و در خیابان‌های شرقی-غربی بسیار اندک می‌باشد. بنابراین در ساختمان هدف غلظت آلاینده کم و پراکندگی ذرات یکنواخت است (شکل ۱۳). از میان کیس‌های موجود در کانفیگوریشن B، بیشترین و کمترین غلظت  $NO_2$  در ساختمان هدف به ترتیب مربوط به B-02 و B-04 مشاهده شده است (شکل ۱۴). - بیشترین میزان سرعت هوا در ساختمان هدف مربوط به B-01 و کمترین میزان آن مربوط به B-02 و B-04 مشاهده شده است (شکل ۱۵).



شکل ۱۳: کانتور الگوی انتشار غلظت آلاینده‌ها در بافت شهری با الگو B (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲)

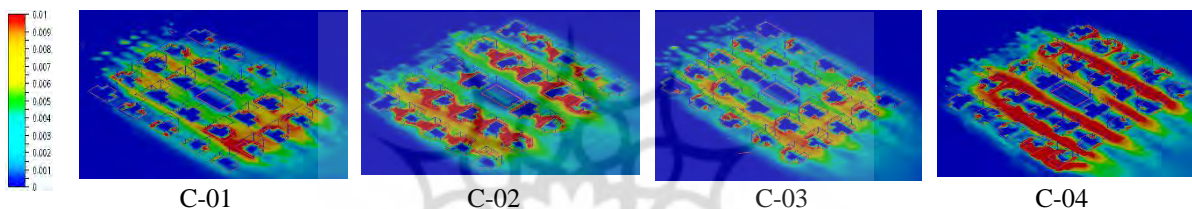


شکل ۱۴: غلظت آلاینده در طول ساختمان هدف برای الگو B (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲)

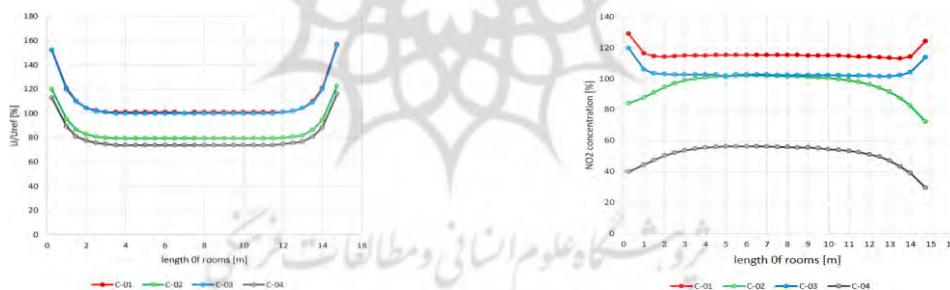
### الگو C

شکل ۱۶، ۱۷ و ۱۸ به ترتیب کانتورهای غلظت  $NO_2$ ، نمودار غلظت و سرعت هوای درون ساختمان هدف را برای نمونه‌های موجود در الگو C نشان می‌دهد. فرم پایه در این کانفیگوریشن، یک فرم با پیش‌آمدگی در نما است که با چرخش ۹۰ درجه‌ای آن، کیس‌های C-01 تا C-04 شکل گرفته‌اند. مهمترین یافته‌های مربوط به این کانفیگوریشن شامل موارد زیر است:

- کیس‌های C-01 و C-03 دارای رفتاری مشابه در انتشار آلودگی در بافت هستند (تجمع آلاینده در جبهه‌ی رو به پیشامدگی نما). در C-01 بیشترین غلظت آلاینده در بخش شرقی ساختمان هدف شکل گرفته است؛ این در حالی است که در C-03، بیشترین تمرکز غلظت در جبهه غربی ساختمان مشاهده شده است.
- در کیس C-02 که دارای پیشامدگی نما پشت به باد است، غلظت آلاینده‌ها در خیابان‌های شرقی-غربی بیشتر از معابر عمود بر آن است. همچنین بخش میانی ساختمان هدف در این کیس دارای بیشترین میزان غلظت آلاینده‌ها است.
- در کیس C-04 که پیشامدگی نما رو به باد است، غلظت آلاینده در خیابان‌های شمالی-جنوبی زیاد و در جبهه پشت به باد ساختمان‌ها (محدوده سایه باد) کم است. بنابراین در ساختمان هدف پراکندگی ذرات کم و یکنواخت است (شکل ۱۶).
- از میان کیس‌های موجود در کانفیگوریشن C، بیشترین و کمترین غلظت  $NO_2$  در ساختمان هدف به ترتیب مربوط به C-01 و C-04 مشاهده شده است (شکل ۱۷). همچنین بیشترین هوا در C-01 و C-03 و کمترین میزان آن در C-04 مشاهده شده است (شکل ۱۸).

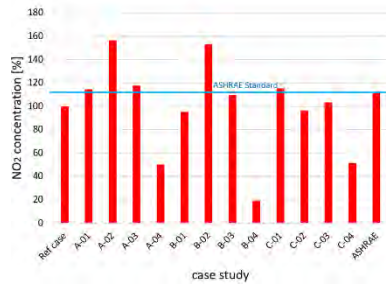


شکل ۱۶- کانتور الگوی انتشار غلظت آلاینده‌ها در بافت شهری با الگو C (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲)

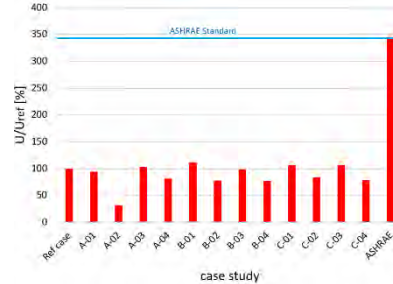


شکل ۱۷- غلظت آلاینده در طول ساختمان هدف برای الگو C (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲)

شکل ۱۹ و ۲۰ به ترتیب میانگین سرعت هوا و غلظت  $NO_2$  را در نمونه‌های موردی در مقایسه با استاندارد اشری نشان داده‌اند. همانگونه که از شکل ۱۹ در ارتباط با سرعت هوا پیداست، در تمام نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش سرعت کمتر از حد مجاز استاندارد اشری است. کمترین سرعت در نمونه‌های موردی به ترتیب مربوط به A-02 و B-04 و بیشترین میزان آن مربوط به B-01 است (شکل ۱۹). شکل ۲۰ نشان می‌دهد که کمترین میزان غلظت آلاینده‌ها به ترتیب در B-04 و A-04 مشاهده شده است؛ این در حالی است که بیشترین میزان آن در A-02 قابل مشاهده است. همچنین در میان نمونه‌ها علاوه بر A-02، A-01، A-03، B-02، و C-01 نیز دارای غلظت آلاینده‌های بالاتر از محدوده مجاز اشری می‌باشند (شکل ۲۰).



شکل ۲۰- میانگین غلظت آلاینده در نمونه های موردی در مقایسه با استاندارد اشری (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲)



شکل ۱۹- میانگین سرعت نمونه‌های موردی در مقایسه با استاندارد اشری (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲)

با توجه به اینکه در این پژوهش کاهش نفوذ آلاینده‌ها به دورن بنا و افزایش سرعت هوا در تهویه به عنوان عوامل تعیین کننده کیفیت هوای درون (IAQ) مد نظر قرار دارند لذا از نتایج به دست آمده در فوق نمی‌توان بهترین نمونه را شناسایی نمود. بر همین اساس از تکنیک تصمیم‌گیری چند معیاره‌ی تاپسیس (MCDM) برای این منظور استفاده شد. در این روش، تعدادی گزینه و تعدادی معیار برای تصمیم‌گیری وجود دارد که با توجه به معیارها، گزینه‌ها می‌بایست رتبه بندی شوند و یا اینکه به هر یک از آن‌ها یک نمره کارایی اختصاص داده شود. اساس این روش بر استفاده از دو گزینه فرضی از میان گزینه‌های موجود است. یکی از این گزینه‌ها مجموعه‌ای از بهترین مقادیر مشاهده شده در ماتریس تصمیم‌گیری است که اصطلاحاً ایده آل مثبت (بهترین حالت ممکن) نامیده می‌شود. گزینه دیگر شامل بدترین حالت‌های ممکن است که اصطلاحاً گزینه ایده آل منفی نامیده می‌شود. معیارها می‌تواند دارای ماهیت مثبت یا منفی باشند، همچنین واحد اندازه‌گیری آنها نیز می‌تواند متفاوت باشد. (Hanine et al., 2016) در شکل ۲۱ روند رتبه بندی نمونه‌ها از ایده آل مثبت تا ایده آل منفی در روش تاپسیس به همراه نتایج آن در پژوهش حاضر ارائه شده است (شکل ۲۱).



شکل ۲۱- روند رتبه بندی نمونه‌ها از ایده آل مثبت تا ایده آل منفی با استفاده از روش تاپسیس (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲)

بر اساس نتایج روش تاپسیس، بهترین گزینه از نظر معیارهای کاهش غلظت  $NO_2$  و افزایش سرعت تهویه به ترتیب در A-04 و B-04 مشاهده شده است. این در حالی است که بدترین نمونه‌ها از منظر معیارهای مذکور به ترتیب در A-02 و B-02 مشاهده شده است.

### نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها

هدف اصلی تحقیق حاضر بررسی تاثیر الگوهای متفاوت فرم ساختمان در یک بافت شهری بر کیفیت هوای درون فضا است. در این پژوهش کاهش میزان آلاینده‌ها و افزایش سرعت هوای درون فضا به عنوان دو پارامتر تعیین کننده کیفیت هوای درون فضا (IAQ) مد نظر قرار گرفته است. ۱۲ نمونه موردی متشکل از رایج‌ترین فرم‌های ساختمان‌های مسکونی کوتاه‌مرتبه در شهر شیراز در یک بافت شهری نقطه‌ای منظم به عنوان نمونه‌های موردی در نظر گرفته و در CFD شبیه سازی شد. بر این اساس مهم ترین نتایج بدست آمده به شرح زیر است:

- چرخش بلوک‌های ساختمانی در یک بافت شهری باعث تغییر در الگوی انتشار آلودگی در آن بافت می‌شود. در این ارتباط فرم بلوک‌ها و فضاهای پر و خالی آنها بر الگوی انتشار نقش مهمی دارد.



- در نمونه‌های B-01، B-03 و C-02 فرم مکعب مستطیل شکل ساختمان هدف در تغییر الگوی جریان باد تاثیرگذار است.
- میانگین غلظت  $NO_2$  در ساختمان هدف در میان نمونه‌های موجود در الگو C با پیشامدگی در نما و الگو A با پیشامدگی بالکن مانند، به ترتیب کمترین و بیشترین میزان است. این بدین معنی است که استفاده از فرم دارای پیشامدگی در نما به دلیل ایجاد محدوده فشار منفی، باعث تمرکز کمتر آلودگی در محدوده سایه باد شده و همین امر به صورت نسبی آلودگی کمتری را به فضای درون ساختمان هدایت می‌کند و در مقابل فرم دارای پیشامدگی بالکن مانند، باعث افزایش انتقال آلودگی به درون دیگر ساختمان‌های موجود در بافت می‌شود.
- در الگو B، در حالتی که بخش پلکانی بنا پشت به باد باشد (B-04)، کمترین میزان غلظت  $NO_2$  در ساختمان هدف مشاهده شده است.
- در الگو A، در حالتی که پیشامدگی پشت به جهت باد قرار گرفته است (A-02)، بیشترین میزان غلظت  $NO_2$  در ساختمان هدف مشاهده شده است.
- از میان الگوهای مورد بررسی، به طور میانگین الگو A با پیشامدگی بالکن مانند و الگو C با پیشامدگی در نما به ترتیب دارای کمترین و بیشترین سرعت هوا در ساختمان هدف بودند.
- از میان نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش، A-02 و B-01 به ترتیب دارای کمترین و بیشترین میانگین سرعت هوا در فضای درون ساختمان هدف هستند.
- با در نظر گرفتن تاثیر همزمان سرعت هوا و غلظت آلاینده به عنوان عوامل تعیین کننده کیفیت هوای درون در این پژوهش، نتایج استفاده از تکنیک تصمیم گیری چند معیاره‌ی تاپسیس (MCDM) نشان داد که A-04 و A-02 به ترتیب بهترین و بدترین نمونه‌های مورد بررسی از نظر IAQ هستند (در A-04 پیشامدگی رو به جهت باد قرار دارد و در A-02 پیشامدگی پشت به جهت باد قرار دارد). نتایج این مطالعه حاکی از آن است که رقیق شدن هوای آلوده در فضای داخلی ساختمان به شدت با ساختارهای فرم بلوک‌ها مرتبط است که هم به الگوی فرم و هم به نحوه چیدمان و چرخش ساختمان‌ها در بافت پیرامون بستگی دارد. نتایج این مقاله به بیش‌های بهتر در مورد ظرفیت چیدمان فرم‌هایی مانند L، T و پلکانی در بافت شهری کمک می‌کند. با توجه به پارامترهای محدود در نظر گرفته شده در این مطالعه، در تحقیقات پیش رو بررسی سایر الگوهای فرمی با تغییر در تعداد طبقات برای درک کامل تاثیر فرم‌ها بر کیفیت هوا درون ساختمان‌ها می‌تواند لحاظ شود.

## References

1. Allegrini, J., Dorer, V., & Carmeliet, J. (2012). Influence of the urban microclimate in street canyons on the energy demand for space cooling and heating of buildings. *Energy and Buildings*, 55, 823–832. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.013>
2. Alwetaishi, M., & Gadi, M. (2021). New and innovative wind catcher designs to improve indoor air quality in buildings. *Energy and Built Environment*, 2(4), 337–344. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.06.009>
3. An, K., Wong, S.-M., & Fung, J. C.-H. (2019). Exploration of sustainable building morphologies for effective passive pollutant dispersion within compact urban environments. *Building and Environment*, 148, 508–523. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.11.030>
4. Bady, M., Kato, S., Takahashi, T., & Huang, H. (2011). An experimental investigation of the wind environment and air quality within a densely populated urban street canyon. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99(8), 857–867. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jweia.2011.06.005>
5. Blocken, B., Tominaga, Y., & Stathopoulos, T. (2013). CFD simulation of micro-scale pollutant dispersion in the built environment. *Building and Environment*, 64, 225–230. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.01.001>
6. Cárdenas Rodríguez, M., Dupont-Courtade, L., & Oueslati, W. (2016). Air pollution and urban structure linkages: Evidence from European cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1–9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.190>
7. Di Sabatino, S., Buccolieri, R., & Kumar, P. (2018). *Spatial Distribution of Air Pollutants in Cities BT - Clinical Handbook of Air Pollution-Related Diseases* (F. Capello & A. V. Gaddi (eds.); pp. 75–



- 95). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-62731-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-62731-1_5)
8. D.K.Ching, F. (2022). Architecture: form, space and order (Z. Karagzlou (ed.)). Tehran University Publishing Institute. <https://yektabook.com/product/6165/mamari-farm-faza-o-nazm>
  9. EPD. (2022). *An Overview on Air Quality and Air Pollution Control in Hong Kong*. Environmental Protection Department. [https://www.epd.gov.hk/epd/english/environmentinhk/air/air\\_maincontent.html](https://www.epd.gov.hk/epd/english/environmentinhk/air/air_maincontent.html)
  10. Ewing, R., & Rong, F. (2008). The Impact of Urban Form on US Residential Energy Use. *Housing Policy Debate - HOUS POLICY DEBATE*, 19, 1–30. <https://doi.org/10.1080/10511482.2008.9521624>
  11. Fan, M., Chau, C. K., Chan, E. H. W., & Jia, J. (2017). A decision support tool for evaluating the air quality and wind comfort induced by different opening configurations for buildings in canyons. *Science of The Total Environment*, 574, 569–582. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.083>
  12. Feng, W., Ding, W., Fei, M., Yang, Y., Zou, W., Wang, L., & Zhen, M. (2021). Effects of traditional block morphology on wind environment at the pedestrian level in cold regions of Xi'an, China. *Environment, Development and Sustainability*, 23(3), 3218–3235. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00714-0>
  13. Fernando, H. J. S., Lee, S. M., Anderson, J., Princevac, M., Pardyjak, E., & Grossman-Clarke, S. (2001). Urban Fluid Mechanics: Air Circulation and Contaminant Dispersion in Cities. *Environmental Fluid Mechanics*, 1(1), 107–164. <https://doi.org/10.1023/A:1011504001479>
  14. Geekiyange, D., Ramachandra, T., & Rotimi, J. (2017). *A Morphology-Based Model For Forecasting Cooling Energy Demand Of Condominium Buildings In Sri Lanka*. <https://openrepository.aut.ac.nz/server/api/core/bitstreams/090325f7-cd93-462d-aed5712f27b6ebd9/content>
  15. Hang, J., Wang, Q., Chen, X., Sandberg, M., Zhu, W., Buccolieri, R., & Di Sabatino, S. (2015). City breathability in medium density urban-like geometries evaluated through the pollutant transport rate and the net escape velocity. *Building and Environment*, 94, 166–182. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.08.002>
  16. Hanine, M., Boutkhoum, O., Tikniouine, A., & Agouti, T. (2016). Application of an integrated multi-criteria decision making AHP-TOPSIS methodology for ETL software selection. *SpringerPlus*, 5(1), 263. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-1888-z>
  17. He, B.-J., Ding, L., & Prasad, D. (2020a). Relationships among local-scale urban morphology, urban ventilation, urban heat island and outdoor thermal comfort under sea breeze influence. *Sustainable Cities and Society*, 60, 102289. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102289>
  18. He, B.-J., Ding, L., & Prasad, D. (2020b). Urban ventilation and its potential for local warming mitigation: A field experiment in an open low-rise gridiron precinct. *Sustainable Cities and Society*, 55, 102028. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102028>
  19. Huang, Y., He, W., & Kim, C.-N. (2015). Impacts of shape and height of upstream roof on airflow and pollutant dispersion inside an urban street canyon. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(3), 2117–2137. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3422-6>
  20. Jareemit, D., Liu, J., & Srivanit, M. (2023). Modeling the effects of urban form on ventilation patterns and traffic-related PM2.5 pollution in a central business area of Bangkok. *Building and Environment*, 244, 110756. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110756>
  21. Javanroodi, K., Mahdavejad, M., & Nik, V. M. (2018). Impacts of urban morphology on reducing cooling load and increasing ventilation potential in hot-arid climate. *Applied Energy*, 231, 714–746. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.116>
  22. Kamrani, A. (2013). Map of Shiraz city. Urban planning online, Iran's specialized urban planning database. <https://www.shahrsazionline.com/?s=Shahr+Shiraz+map>
  23. Landofaryan. (2011). *Shiraz*. Landofaryan.tripod.com
  24. Li, Z., Xu, J., Ming, T., Peng, C., Huang, J., & Gong, T. (2017). Numerical Simulation on the Effect of Vehicle Movement on Pollutant Dispersion in Urban Street. *Procedia Engineering*, 205, 2303–2310. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.104>
  25. Liu, M., Chen, H., Wei, D., Wu, Y., & Li, C. (2021). Nonlinear relationship between urban form and

- street-level PM<sub>2.5</sub> and CO based on mobile measurements and gradient boosting decision tree models. *Building and Environment*, 205, 108265. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108265>
26. Lu, K.-F., & Peng, Z.-R. (2023). Impacts of viaduct and geometry configurations on the distribution of traffic-related particulate matter in urban street canyon. *Science of The Total Environment*, 858, 159902. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159902>
27. Mansouri, b. (2000). The concept of shape in Western architecture. *Architecture and Culture*, 1(1), 131-135.
28. Miao, C., Yu, S., Hu, Y., Bu, R., Qi, L., He, X., & Chen, W. (2020). How the morphology of urban street canyons affects suspended particulate matter concentration at the pedestrian level: An in-situ investigation. *Sustainable Cities and Society*, 55, 102042. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102042>
29. Mostafa-zadeh, A., & Savalanpour, H. (2015). Study and evaluation of indoor air quality. Tehran Municipality - Air Quality Control Company of Tehran Municipality.
30. Nakharutai, N., Traisathit, P., Thongsak, N., Supasri, T., Srikummoon, P., Thumronglaohapun, S., Hemwan, P., & Chitapanarux, I. (2022). Impact of Residential Concentration of PM<sub>2.5</sub> Analyzed as Time-Varying Covariate on the Survival Rate of Lung Cancer Patients: A 15-Year Hospital-Based Study in Upper Northern Thailand. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 19, Issue 8). <https://doi.org/10.3390/ijerph19084521>
31. 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. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.06.013>
32. Ng, W.-Y., & Chau, C.-K. (2014). A modeling investigation of the impact of street and building configurations on personal air pollutant exposure in isolated deep urban canyons. *Science of The Total Environment*, 468–469, 429–448. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.077>
33. Nguyen, V. T., Nguyen, C., & Nguyen, J. (2019). Numerical Simulation of Turbulent Flow and Pollutant Dispersion in Urban Street Canyons. *Atmosphere*, 10, 683. <https://doi.org/10.3390/atmos10110683>
34. Niachou, K., Hassid, S., Santamouris, M., & Livada, I. (2008). Experimental performance investigation of natural, mechanical and hybrid ventilation in urban environment. *Building and Environment*, 43(8), 1373–1382. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.046>
35. Niu, H., Wang, B., Liu, B., Liu, Y., Liu, J., & Wang, Z. (2018). Numerical simulations of the effect of building configurations and wind direction on fine particulate matters dispersion in a street canyon. *Environmental Fluid Mechanics*, 18(4), 829–847. <https://doi.org/10.1007/s10652-017-9563-7>
36. PlumeLabs. (2022). *Air quality in Shiraz*. Air.Plumelabs. [https://air.plumelabs.com/air-quality-in-Shiraz-tV9?utm\\_source=accuweather&utm\\_medium=current\\_aq\\_widget&utm\\_campaign=#ae16](https://air.plumelabs.com/air-quality-in-Shiraz-tV9?utm_source=accuweather&utm_medium=current_aq_widget&utm_campaign=#ae16)
37. Ramponi, R., Blocken, B., de Coo, L. B., & Janssen, W. D. (2015). CFD simulation of outdoor ventilation of generic urban configurations with different urban densities and equal and unequal street widths. *Building and Environment*, 92, 152–166. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.018>
38. Sabunchi, M., Zabihi, H., & Majdi, H. (2020). Semiotic approach to form analysis in contemporary architecture. *Arman Shahr Architecture and Urbanism*, 13(30), 139-149. <https://www.sid.ir/paper/202282/fa>
39. Schwela, D., Haq, G., Huizenga, C., Han, W. J., & Fabian, H. (2016). *Urban Air Pollution in Asian Cities: Status, Challenges and Management*. Routledge. <https://www.routledge.com/Urban-Air-Pollution-in-Asian-Cities-Status-Challenges-and-Management/Schwela-Haq-Huizenga-Han-Fabian-Ajero/p/book/9781138986589>
40. SCI. (2022). *Statistical Center of Iran*. <https://www.amar.org.ir/english>
41. Senitkova, I. (2007). Indoor environment parameters for sustainable buildings design. *Selected Scientific Papers/Journal of Civil Engineering*, 2, 35–48.
42. Shi, Y., Xie, X., Fung, J. C.-H., & Edward Ng. (2018). Identifying Critical Building Morphological

- Design Factors of Street-level Air Pollution Dispersion in High-Density Built Environment Using Mobile Monitoring. *The University of Liverpool*. <https://livrepository.liverpool.ac.uk/3159222/>
43. Tao, Y., Yan, Y., Fang, X., Zhang, H., Tu, J., & Shi, L. (2022). Solar-assisted naturally ventilated double skin façade for buildings: Room impacts and indoor air quality. *Building and Environment*, 216, 109002. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109002>
44. Tutiempo Network, S. L. (2021). <https://en.tutiempo.net/climate/ws-408210.html>.
45. Wu, Y., & Chen, H. (2023). The diffusion of traffic pollutants in different residential blocks based on spatial morphological clustering. *Building and Environment*, 228, 109860. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109860>
46. Xie, X., Huang, Z., & Wang, J. (2005). Impact of building configuration on air quality in street canyon. *Atmospheric Environment*, 39(25), 4519–4530. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.03.043>
47. Yang, J., Shi, B., Shi, Y., Marvin, S., Zheng, Y., & Xia, G. (2020). Air pollution dispersal in high density urban areas: Research on the triadic relation of wind, air pollution, and urban form. *Sustainable Cities and Society*, 54, 101941. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101941>
48. Yang, J., Shi, B., Zheng, Y., Shi, Y., & Xia, G. (2020). Urban form and air pollution disperse: Key indexes and mitigation strategies. *Sustainable Cities and Society*, 57, 101955. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101955>
49. Zheng, T., Li, B., Li, X.-B., Wang, Z., Li, S.-Y., & Peng, Z.-R. (2021). Vertical and horizontal distributions of traffic-related pollutants beside an urban arterial road based on unmanned aerial vehicle observations. *Building and Environment*, 187, 107401. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107401>
50. Zhu, L., Ranasinghe, D., Chamecki, M., Brown, M. J., & Paulson, S. E. (2021). Clean air in cities: Impact of the layout of buildings in urban areas on pedestrian exposure to ultrafine particles from traffic. *Atmospheric Environment*, 252, 118267. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118267>