



Journal of Environmental Studies

Vol. 47, No. 3, Autumn 2021

Journal Homepage: www.Jes.ut.ac.ir

Print ISSN: 1025-8620 Online ISSN 2345-6922

Assessing the Effects of Urban Canyon's Open Space and CO Dispersion with Using CFD (A Case Study of Tehran)

Document Type
Research Paper

Samira Yousefian¹, Mohammadreza pourjafar^{1*}, Mohammadjavad Mahdavinejad²,
Mohammad Moshfeghi³

Received
August 19, 2021

Accepted
November 6, 2021

1 Department of Urban Planning, Faculty of Art, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2 Department of Architecture, Faculty of Art, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3 Research Professor, Department of Mechanical Engineering, Sogang University, Seoul, Korea

DOI: 10.22059/JES.2021.327715.1008206

Abstract:

Cars are known as one of the major sources of air pollution in cities, and the dispersion of their pollution depends on various variables including urban form. This study aims to explain and analyze the causal relationships between mineralization and open space indices with air pollution and ventilation. This is quantitative research, which uses the computational fluid dynamic (CFD) technique in residential areas of Tehran. The CFD model has been validated through the wind tunnel experiments. Findings shown that in the forms in which wind direction is perpendicular to the street, ventilation is mostly done through the street's roof and by increasing the open space index and decreasing the mineralization index, the vertical ventilation decreases, and the horizontal ventilation via lateral openings increases. On the other hand, increasing the figures of the open space index, leads to a decrease in the amount of mass fraction at pedestrian height in the main street. Thus, a negative correlation is reported between them. Finally, regarding the mineralization and open space indices, the third form is evaluated as the most suitable form, which should be considered in the future developments of Tehran.

Key words: Open space, Mineralization, Air pollution, Air flow, CFD

* Corresponding Author:

Email: pourja_m@modares.ac.ir

Introduction

Metropolitans are increasingly facing the problem of air pollution due to the widespread presence of vehicles. Air pollution at the street level is a challenging issue of urban sustainable development. In addition to its sources of production, air pollution deals with a large number of factors such as urban morphology and ventilation, and urban wind. The latter can be considered as an important one since the long-term stability of air in an urban area can quickly stabilize pollutants and increase their volume in urban space. In addition, urban morphology can play a role in transfer pollution from one place to another by creating specified paths for wind. Thus, triple relationships are created between urban morphology, air flow and air pollution. Urban morphology as an independent variable directly affects the accumulation and dispersion of pollutants (as a dependent variable) and indirectly affects the air flow. In recent years, computational fluid dynamics (CFD) has been employed for assessment of a wide variety of variables and indices including: wind angle with respect to the street canyon, aspect ratio of the streets, the average height, different heights, street continuity ratio and street spatial closure ratio, neighborhood form (rectangular and square), length of the urban canyon, size of neighborhood, street architecture (roof configuration), degree of enclosure, plot ratio or floor area ratio (FAR). Adersoria et al. (2014), in their article, introduces an index called mineralization and considers it equivalent to land coverage, plot ratio, and packing ratio. According to their study, there is a marginal correlation between the particulate matter and mineralization index. Also, very little correlation has been discovered between CO pollutants and all 21 morphological factors. In Yang's study (2020), which was carried out with the help of CFD modeling on the scale of the neighborhood (200 m×200 m) with the square blocks arrangement (20 m×20 m), the land coverage factor with pollution dispersion has a negative correlation. Of course, the results in this study are very general and many factors are unclear. This study is intended to prove the existence or non-existence of a relationship between air quality (CO pollutants) and mineralization index in the neighborhood and open space index in the street canyon in Tehran (where the wind is perpendicular to the main street) with the help of CFD, which is known as a more reliable than statistical studies, due to better computational accuracy

Materials and Methods

The CFD simulations have been performed using Ansys Fluent. The validation of the all CFD settings (including mesh arrangement and turbulence model etc.) is based on experimental analysis (wind tunnel - reduced scale). The case study is located in the residential areas of Tehran, Iran. The GIS software and satellite images have been applied to select the case study. The dimensions of the neighborhood are 300 m wide, 300 m long, and 16 m high. The street width equals 12m. In the models, tetrahedral meshing for the inner region and hexahedral meshing for the outer region have been used (Hybrid mesh). The aspect ratio equal to 1.1 in inner region and is 1.15 in the whole geometry. The number of cells in the F1, F2, F3, and F4 is 7.3, 7.4, 7.4 and 7.5 million cells respectively for the simulation of one half of the geometry. The turbulence is simulated using RANS models, which are formed based on the temporal averaging of parameters. Due to high speed, low computational cost and acceptable accuracy of RANS models, RANS equations have been used in this research. Among the RANS models, the Realizable k-epsilon turbulence model has been selected, which has achieved better in validation part. The model is three-dimensional, isothermal, steady, and incompressible. Carbon monoxide (CO) is considered as the pollutant which is injection from two lines source (with 5 cm wide and 40 cm high) along the main street. The pollutant emission modeling method is the species transfer model (mixed-species).

Discussion of Results

Based on the CFD output, the maximum velocity at the pedestrian height (2 meters) in F1, F2, F3 and F4 respectively equals 4.27, 5.31, 5.31, and 5.35 (m/s), which has been created in the corners of windward blocks. In the other forms except for F1 (it lacks an East-West street), the maximum velocity is blown at the entrances of the streets which are parallel wind. By increasing the OS index in F1, F2, and F3 (0, 0.04, 0.27), the mean velocity at the main street increases (0.73, 0.75, 0.78), but in F4, where the index equals F3, we see a decrease in velocity (0.59) due to the difference in the shape and size of the open space in the neighborhood. The longer length of this space in F4 has minimized the canalization effect of the East-West street and consequently the wind velocity in the middle of the open space (where the main street passes). With the decrease of the MI index (0.88, 0.85, 0.8, 0.75), the average velocity in the whole domain decreases. But F1 is exception. Although it has the highest index, it also has the lowest velocity, which is

due to the lack of East-the West street in this form. Based on the maximum mass fraction, F4 is the worst form (0.0136). After that, F1, F3, and F2 are in the next ranks in terms of CO mass fraction with 0.0116, 0.0104, and 0.0103, respectively. The concentration of pollutants in all forms can be seen in the vicinity of the leeward wall (west side of the street). In F1, the accumulation of pollutants is in the middle of the street, in F2, it is inclined to the intersection, in F3, it is inclined in the vicinity of the open space, and in F4, it is in the middle of the enclosed sections of the street.

Considering the average mass fraction at the height of the pedestrian in the main street and comparing it between the forms, it should be said that the F3 has the best conditions. It is 10% less than F4, 20% less than F2, and 30% lower than F1. Based on the OS index, it can be said that with the increase of the index, the amount of pollutant in the main street decreases and there is a negative correlation between them. But in F4, due to the lower wind velocity, the amount of pollutants is slightly higher than the F3. The street roof (16 meters) in the F1, F2, F3, and F4 has the highest amount of pollutant respectively and their mass fraction average equals to 0.00066, 0.00052, 0.00041, and 0.00036. So, increasing in the OS index and decreasing in MI index (F1 to F4) cause a reduction in vertical ventilation (by the street roof) as well as an increase in horizontal ventilation (through lateral openings). The amount of CO mass fraction in the longitudinal profile in the sidewalk axis in the main street (near the western wall), in F1 at the beginning and end of the street is the minimum and in the center of the street, this amount has reached its maximum value of 0.0072. In F2, at the intersection of the East-West street and the main street, CO mass fraction is drastically reduced to zero. In the F3 and F4 at the open space, the amount of CO is very small. Based on the graph and contour outputs, F1 has the worst form and F4 has the best form. The average mass fraction in F4, F3, and F2 is 56.52%, 65.22%, and 82.61% of F1, respectively.

Conclusions

- There is a relationship between urban block forms and wind velocity. Wind velocity on streets that are parallel to the wind, is higher than streets that are perpendicular to the wind. In the first group, the canalization of the wind results in increases in the wind velocity at the beginning of the canyon. In this regard F2, F3, and F4 have the maximum wind velocity at the entrances of the East-West street. In these places air pollution is minimum. The corner of windward blocks is the other parts of the domain that have high wind velocity (corner effect).
- The wind velocity is low or even zero, next to the leeward walls, where the possibility of pollutant accumulation is high. In this regard, the intensity of pollutants is maximum next to the western walls of all four forms. The farther from these spaces toward intersections and open areas, the pollutants disperse more.
- There is a negative correlation between the OS index and the amount of pollution in all four forms. Thus, the more OS index causes the lower amount of CO mass fraction. However, since the main street and the increase in the size of the open space in F4 are not the same direction, the effects of the increase in the extent of opening areas on air pollution dispersion are complicated. It leads to a reduction in wind velocity and consequently increases air pollution. Finally, in terms of air quality, F3 is the most suitable form which has the lowest amount of air pollution in the main street. At the same time, F1 is known as the least efficient form.
- For street canyons with perpendicular wind flow, comparing F1 and F2 shows that shortening the length of street canyon (from 300 to 144 meters) results in lower amount of air pollution.
- Besides, increasing in the OS index and decreasing in the MI index (F1 to F4) cause a reduction in vertical ventilation (by the street roof) as well as an increase in horizontal ventilation (through lateral openings). In a way, it is obvious in the mass fraction contours that pollutants tend to exit through lateral opening.
- There has also been shown a negative correlation between the mass fraction and height. So, rising in height causes better air quality. This confirms the human exposure to pollution and danger
- In addition, also the results show a relationship between the increase in both wind velocity and ventilation rate with the decrease in the amount of CO, but the relationship could not be considered a direct relationship. The reason is that the ventilation is not only by horizontal movement of pollutants, but there are other vertical and turbulent flows too which causes ventilation.

ارزیابی تأثیر گشودگی فضایی کریدور شهری بر پراکنش آلاینده مونوکسید کربن با کمک CFD

سمیرا یوسفیان^۱، محمدرضا پورجعفر^{۱*}، محمدجواد مهدوی نژاد^۲، محمد مشفق^۳

۱ گروه شهرسازی، دانشکده هنر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲ گروه معماری، دانشکده هنر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳ استاد محقق، دانشکده مکانیک، دانشگاه سوگانگ کره جنوبی، سئول، کره

تاریخ پذیرش مقاله ۱۴۰۰/۸/۱۵

تاریخ وصول مقاله: ۱۴۰۰/۵/۲۸

چکیده

کلانشهرها به دلیل حضور گسترده خودرو با مشکل آلودگی هوا به طور فزاینده‌ای مواجه هستند که به طور جدی روی سلامتی افراد تأثیر می‌گذارد. آلودگی هوا در سطح خیابان با تعداد زیادی از متغیرها چون فرم شهری سرکار دارد. فرم شهری می‌تواند منجر به تشدید پدیده آلودگی یا تسهیل تهویه شود. تاکنون تأثیر برخی از شاخص‌های فرم شهری بر نحوه پخشایش آلاینده‌ها مورد بررسی قرار گرفته است اما شاخص معدنی شدن و شاخص گشودگی فضایی تاکنون مورد بررسی واقع نشده است که در این مطالعه قرار است روابط علت و معلولی بین آن‌ها و نحوه پراکنش آلاینده مونوکسید کربن (CO) شناخته و بیان شود. فرضیه پژوهش این است که تغییر شاخص گشودگی فضایی و معدنی شدن بر پراکنش CO تأثیرگذار است و عکس یکدیگر رفتار می‌کنند. در این تحقیق از روش کمی و تکنیک مدل‌سازی با کمک دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) استفاده شده و اعتبارسنجی مدل از طریق تونل باد صورت گرفته است. در فرم‌های مورد مطالعه که به صورت انتزاعی در بستر شهر تهران انتخاب شده‌اند، جهت باد عمود بر معبر است. نتایج نشان می‌دهد که هر دو شاخص اثرات آشکاری در پخشایش آلاینده‌های هوا در نزدیک به سطح زمین دارد. در نمونه‌ها تهویه غالباً از طریق سقف کریدور شهری صورت می‌گیرد و با افزایش شاخص گشودگی فضایی و کاهش شاخص مدنی شدن در فرم‌ها، از میزان تهویه عمودی کاسته و بر میزان تهویه در راستای افقی و از طریق دهانه‌های جانبی افزوده می‌شود. از سویی دیگر بین میزان شاخص گشودگی فضایی و میزان کسر حجمی آلاینده در ارتفاع عابر پیاده (ارتفاع ۲ متر) همبستگی منفی وجود دارد و با افزایش اولی، میزان آلاینده کاهش می‌یابد. در نهایت می‌توان گفت فرم سه مناسب‌ترین و فرم یک نامناسب‌ترین فرم به لحاظ شاخص‌های مورد مطالعه است و توصیه می‌شود برای توسعه‌های آتی در مناطق مسکونی شهر تهران مدنظر قرار گیرد.

کلید واژه

گشودگی فضایی، معدنی شدن، آلودگی هوا، جریان هوا، CFD

سر آغاز

آلاینده با منشأ انسانی یا طبیعی در جو است که برای حیات انسانی، گیاهی و جانوری مضر است (David Cooper and Alley, 1986). ورود حجم زیاد و متنوع آلاینده‌های ناشی از فعالیت‌ها و مداخلات انسانی به طبیعت و اتمسفر سبب برهم خوردن تعادل در جو و آلودگی هوا می‌شود. با توجه

آلودگی هوا (فارغ از شدت و منشأ آن‌ها) هم چون سایر چالش‌های زیست‌محیطی ناشی از برهم خوردن توازن در عناصر، سیستم و عملکرد محیط طبیعی و ارگانیسم است. به طور کلی منظور از آلودگی هوا، حضور ذرات

Email: pourja_m@modares.ac.ir

نویسنده مسئول:

DOI: 10.22059/JES.2021.327715.1008206

DOR: 20.1001.1.10258620.1400.47.3.3.3

سویی دیگر با تغییر در خرده اقلیم محل (متغیر میانجی) بر جریان هوا تأثیر می‌گذارد و بدین ترتیب به صورت غیرمستقیم بر تغییرات میزان آلاینده موثر است.

در خصوص رابطه‌ی میان مورفولوژی شهری و آلودگی هوا مطالعات مختلف در مقیاس‌های متفاوت از کلان تا خرد (منطقه‌ای، شهری، محله‌ای، بلوک شهری، ساختمان) صورت گرفته است.

پژوهشگرانی چون Mccarty و Kaza (۲۰۱۵)، Liu و همکاران (۲۰۱۶) و She و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعات خود در مقیاس کلان (منطقه‌ای) به بررسی رابطه‌ی بین کیفیت هوا و ساختار مکانی شهرها با متغیرهایی چون تعداد، اندازه، شکل، نظم، چندپارگی تکه‌های شهری، مساحت شهری، نسبت فشردگی، نسبت کشیدگی و ... پرداخته‌اند.

در مقیاس متوسط (شهری) نیز کسانی چون Borrego و همکاران (۲۰۰۶) ساختار توسعه پراکنده، توسعه خطی، توسعه فشرده را بررسی کرده‌اند، Hang و همکاران (۲۰۰۹) به تحلیل شکل کلی شهر، جهت‌گیری خیابان و پیکربندی خیابان (در مقیاس شهر) پرداخته است، Martins (۲۰۱۲) کیفیت هوا در دو سناریو توسعه آینده پراکنده و توسعه آینده فشرده بررسی کرده است و مشفق و یوسفیان (۱۳۹۹) نقش تغییرات الگوهای ساختار کالبدی شهر به ویژه شاخص‌های تغییر کاربری زمین و افزایش ساخت و ساز بر تغییرات مکانی آلاینده‌های هوای شهری را در شهر تهران ارزیابی کرده‌اند.

مطالعاتی که در مقیاس خرد (واحد همسایگی، کریدور شهری) به بررسی رابطه‌ی عوامل فرمال و کیفیت هوا پرداخته‌اند، غالباً دو روش را در پیش گرفته‌اند. دسته‌ی اول با روش‌های آماری تلاش کرده‌اند به کشف وجود ارتباط میان متغیرها بپردازند، مانند Edussuriya و همکاران (۲۰۱۴) که بر روی مورفولوژی و کیفیت هوا در محیط‌های مسکونی پراکندگی (۲۰ منطقه شهری) کار کرده‌اند و ارتباط بین ۲۱ پارامتر مورفولوژیک در سه سطح منطقه‌ای، شهری

به تعریف ویلر هر موضوعی که سلامت بشر را تهدید کند، برخلاف اصول توسعه پایدار می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که از نگاه توسعه پایدار، توجه به بحران آلودگی هوا که این روزها به عنوان یک چالش جهانی مطرح می‌باشد و اثرات سویی بر سلامت افراد جامعه دارد و منجر به مرگ زودرس، بیماری‌های قلبی و عروقی، برونشیت، اختلالات تنفسی و سرطان می‌شود، باید در اولویت قرار گیرد (حسنوند و ندافی، ۱۳۹۵). به همین دلیل است که آلودگی هوا در سطح خیابان یکی از نگرانی‌های اصلی در مکان‌های مسکونی در جهان است (Edussuriya et al., 2014)، که مهم‌ترین عامل آن خودرو می‌باشد (shen et al., 2017). آلودگی هوا در سطح خیابان به غیر از منابع تولید خود، با تعداد زیادی از متغیرهای پیچیده سرکار دارد که هنوز به درستی شناسایی و درک نشده‌اند. تهویه و شکل هندسی و فیزیکی محیط شهری یکی از این متغیرها است که به‌طور قابل توجهی بر آلودگی هوای شهری تأثیر می‌گذارد (Edussuriya et al., 2014).

باد شهری در بحث آلودگی هوا بسیار حائز اهمیت است، زیرا حمل و نقل آلودگی از یک مکان به مکان دیگر، با مسیرهای تعیین شده توسط عوامل مختلف مورفولوژیکی شهری را موجب می‌شود (Cionco and Ellefsen, 1998). پایداری طولانی مدت هوا در یک منطقه شهری می‌تواند به سرعت باعث تثبیت آلاینده‌ها و افزایش حجم آن‌ها در فضای شهری شود (Tominaga and Stathopoulos, 2013). در مجموع می‌توان گفت رفتار آیرودینامیکی باد در اطراف ساختمان‌ها در تراز پیاده، حاصل تعامل ویژگی‌های اولیه باد (سرعت وزش، شتاب، تواتر و ...) و ساختار کالبدی ساختمان‌ها (شکل، اندازه، ارتفاع و ...) است (Jackson, 1978).

بدین ترتیب روابط سه گانه‌ای بین مورفولوژی، جریان هوا و آلودگی هوا ایجاد می‌شود. مورفولوژی شهری به عنوان متغیر مستقل از یک سو به طور مستقیم بر نحوه‌ی تجمع آلاینده‌ها به عنوان متغیر وابسته تأثیر می‌گذارد و از

همکاران (۲۰۱۴) و Yang و همکاران (۲۰۲۰) به شاخص پوشش سطح در مطالعه‌ی خود پرداخته‌اند. Edussuriya و همکاران (۲۰۱۴) با بررسی ۲۱ عامل مورفولوژیکی، نتیجه می‌گیرند، فقط پنج متغیر مورفولوژیکی (تراکم محدوده، انعطاف‌پذیری، شدت زبری آیرودینامیکی، میزان متوسط فضای ساخته شده، فاکتور فشردگی) و چهار عامل توسعه زمین (نسبت ابعاد، فاصله بین ساختمان‌ها، ارتفاع متوسط ساختمان‌ها، انحراف استاندارد از ارتفاع ساختمان) با میزان پراکندگی ذرات جامد معلق ارتباط دارد. این مقاله شاخصی را با عنوان معدنی شدن ۳ معرفی می‌کند و آن را معادل عناوینی چون پوشش سطح ۴، نسبت طرح ۵، نسبت بسته‌بندی ۶ می‌داند. بر اساس این مقاله همبستگی بسیار کمی بین شاخص معدنی شدن و آلاینده‌ها وجود دارد. همچنین بین آلاینده CO و کلیه فاکتورهای مورفولوژیکی ۲۱ گانه بررسی شده در مقاله همبستگی خیلی کمی کشف شده است که هر دو نتیجه‌ی ذکر شده جای سوال دارد و مقاله حاضر قرار است به آن‌ها بپردازد. نکته دیگر اینکه، ضریب معدنی شدن، همبستگی و نسبت کانال خیابان به طور معنی‌داری با ذرات جامد ارتباط دارد...

در مطالعه‌ی Yang و همکاران (۲۰۲۰) با عنوان "فرم شهری و پراکندگی آلودگی هوا شاخص‌های کلیدی و استراتژی‌های کاهش" که با کمک مدل‌سازی CFD در مقیاس واحد همسایگی (۲۰۰ متر در ۲۰۰ متر) با چیدمان بلوک‌های مربع شکل ۲۰ متر در ۲۰ متر، انجام شده است، به بررسی رابطه‌ی ۵ شاخص مورفولوژیک - که یکی از آن‌ها نسبت پوشش سایت است - با میزان پراکندگی آلودگی هوا پرداخته‌اند. بر اساس مطالعات صورت گرفته مشخص شد که فاکتورهای پوشش سایت (مساحت ساختمان/ مساحت سایت) و میزان محصوریت (کل محیط بیرونی/ کل محیط پایه، به این مفهوم که نسبت مجموع طول اضلاع کناری کلیه ساختمان‌های لبه‌ی مرز بیرونی در محدوده مشخص شده به طول لبه کل قطعه‌ها در همان محدوده) با پراکندگی آلودگی هوا همبستگی منفی دارد.

و محلی را با آلودگی هوا بررسی کرده‌اند. در این روش‌ها نسبت دادن تغییرات آلاینده‌ها به عوامل مورفولوژیکی متفاوت در مقیاس وسیع صورت گرفته در حالی که سایر عوامل تأثیرگذار (که تعدادشان زیاد هست) کنترل نشده‌اند، در نتیجه، از یک سو روابط علت و معلولی بین متغیرها مشخص نمی‌باشد، از سوی دیگر نتایج حاصله از دقت کافی برخوردار نیستند. دسته‌ی دوم مطالعات با کمک ۲CFD به بررسی روابط بین متغیرها پرداخته‌اند که ملاک مطالعه ما می‌باشد. در میان این مطالعات، بررسی شاخص‌هایی چون نسبت ارتفاع به عرض یا نسبت ابعاد (Oke, 1988; Di Sabatino et al., 2008; Hang et al., 2012; Eeftens et al., 2013; Shen et al., 2017; Tan et al., 2019)، نسبت پیوستگی و بسته بودن خیابان (Shen et al., 2017)، ارتفاع متوسط (Hang et al., 2012)، تغییر ارتفاع ساختمان‌ها (Hang et al., 2012; Lin et al., 2014; Nosek et al., 2018; Tan et al., 2019; Yang et al., 2020)، زاویه جریان باد با کریدور شهری یا بلوک‌ها (Lin et al., 2014; Wang et al., 2017; Yang et al., 2020)، طول کریدور شهری (Hang et al., 2012)، ابعاد واحد همسایگی (Lin et al., 2014; Wang et al., 2017)، شکل واحد همسایگی (مستطیل، مربع) (Wang et al., 2017)، نوع معماری کریدور شهری (فرم سقف) (Kastner-Klein et al., 2004; Tan et al., 2019)، درجه محصوریت واحد همسایگی (Yang et al., 2020)، نسبت مساحت کف (FAR) (Yang et al., 2020) به چشم می‌خورد.

این مطالعه در پی آن است که به بررسی شاخص گشودگی فضایی در کریدور خیابانی و در واحد همسایگی و همچنین شاخص پوشش سطح در فرم‌های مختلف از طریق مدل‌سازی پخش CO در فضای شهری و با CFD بپردازد. بنابراین در زمره مطالعات در مقیاس خرد است. بررسی پیشینه تحقیقات مربوط به این حوزه نشان می‌دهد، به شاخص گشودگی فضایی در دره‌ی خیابانی و در مقیاس واحد همسایگی به طور خاص کسی نپرداخته است و تنها تحقیقات محدودی از جمله Edussuriya و

تغییرات کیفیت هوا و پاسخ گوئی محیط‌های شهری است. در این تحقیق تلاش می‌شود با توجه به شکاف موجود در ادبیات نظری و همچنین تناقض موجود در مطالعات پیشین به سؤالات زیر پاسخ داده شود:

آیا شاخص گشودگی فضایی و شاخص معدنی شدن بر پخشایش آلاینده مونوکسیدکربن تأثیرگذار هستند؟ در صورت مثبت بودن پاسخ، تأثیر آن‌ها به چه صورت است و پاسخگوترین فرم کدام است. فرض نویسندگان بر این قرار است که هر دو شاخص مذکور بر نحوه‌ی پخشایش آلاینده‌ها تأثیرگذار می‌باشند و نحوه‌ی تأثیرگذاری‌شان عکس یکدیگر هستند. با پاسخ گفتن به پرسش‌های مذکور و رد یا تأیید فرضیه تحقیق، و تبیین روابط علت و معلولی بین متغیرها با کمک دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، می‌توان به معیارهایی جهت نیل به طرح‌های پاسخ‌گوتر به مبحث کیفیت هوا در توسعه‌های آتی شهر تهران رسید.

مواد و روش بررسی

ابزار اصلی ارزیابی کالبد شهری، اندازه‌گیری میدانی، اندازه‌گیری آزمایشگاهی در مقیاس کامل و مقیاس کاهش‌یافته و روش‌های شبیه‌سازی عددی از جمله دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است (Blocken, 2015). در این پژوهش از تکنیک مدل‌سازی با کمک دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) استفاده شده است و اعتبارسنجی مدل از طریق اندازه‌گیری آزمایشگاهی (مقیاس کاهش‌یافته) صورت گرفته است. بنابراین نوع روش مورد استفاده روش کمی می‌باشد.

به منظور حل میدان جریان در CFD، چهار رویکرد مدل‌سازی اصلی برای جریان‌ات آشفته وجود دارد که عبارت‌اند از میانگین‌گیری معادلات ناویر استوکس (RANS)، شبیه‌سازی گردابه بزرگ (LES)، شبیه‌سازی گردابه منفصل (DES)، شبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS) (Setaihe et al., 2014). در این تحقیق از روش RANS و مدل آشفتگی ک- ϵ پسیلون تحقق‌پذیر ۱۳ استفاده

فاکتور میانگین ارتفاع (کل ارتفاع ساختمان‌ها/تعداد ساختمان‌ها) با پراکندگی آلودگی هوا، یک همبستگی مثبت دارند، به این معنی که هرچه ارتفاع متوسط بالاتر باشد، پراکندگی آلودگی هوا (که باعث ایجاد مناطقی با وزش باد شدید زاویه‌دار می‌شود و آلودگی جدید -گرد و غبار فراری- ایجاد می‌کند) نیز بیشتر می‌شود. بر اساس این مطالعات پارامتر نسبت مساحت کف (کل مساحت ساختمان‌ها/مساحت سایت) به طور مستقیم با پراکندگی آلودگی هوا ارتباط ندارد. رابطه‌ی اختلاف ارتفاع (بیشترین ارتفاع ساختمان-میانگین ارتفاع ساختمان‌ها) و پراکندگی آلودگی هوا یک رابطه خطی مستقیم نیست و با توجه به تغییر فضایی نسبتاً پیچیده آن ممکن است همبستگی مثبت یا منفی با پراکندگی آلودگی هوا داشته باشد.

بررسی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد، اول، بررسی شاخص گشودگی فضایی و معدنی شدن در مطالعات پیشین کمتر مد نظر قرار گرفته است و این تحقیقات غالباً مربوط به شاخص‌هایی از قبیل تراکم، ارتفاع، موقعیت استقرار و نسبت ابعاد می‌باشد. بنابراین تحقیق حاضر می‌تواند گامی رو به جلو در راستای گسترش قلمرو مطالعات تحلیلی در این زمینه تلقی شود. دوم، نتایج به دست آمده برای شرایط محیطی مختلف نتایجی متفاوت را نشان می‌دهد، که این مسئله اهمیت نمونه-محور بودن رابطه بین متغیرهای کالبدی و پخشایش آلاینده‌ها در کردورهای شهری را به طور خاص نشان می‌دهد. لذا این تحقیق با ایده گرفتن از فرم‌های کالبدی متداول در شهر تهران و بررسی تأثیر گشودگی فضایی در پخشایش و تهویه آلاینده‌های هوا (CO)، می‌تواند چارچوبی قابل اتکا برای بهره‌مندی از طراحی محیطی مبتنی بر کیفیت هوا در فرم‌های متداول شهر تهران تلقی گردد. سوم، تعیین و ردیابی تغییرات فرم‌های شهری مسئله‌ای نیازمند تبیین شاخص‌های کالبدی-فضایی مناسب و جامع است که بتواند جهت، ارتفاع، تناسبات، بازشوها، سطوح و... را در برگیرد. شناسایی این شاخص‌ها گامی موثر در آنالیز چگونگی

خیابان بر مجموع مساحت سطوح باز و بسته در نمای دو طرف خیابان است و بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

(۲)

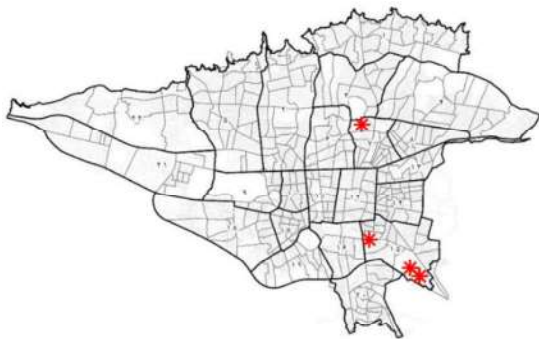
$$OS = \frac{\sum((street\ length \times mean\ height) - facade\ area)}{\sum(street\ length \times mean\ height)}$$

عرصه پژوهش

عرصه‌ی مورد بررسی در این مقاله در بخش مسکونی شهر تهران پایتخت کشور ایران واقع شده است. بر اساس نظم حاکم بر ساختار سازمان دهنده بلوک شهری تهران، می‌توان دو دسته کلی نام برد:

- بلوک‌هایی که دارای ساختار شطرنجی (مربع و مستطیل) که از دیدگاه نظم دارای نظم ساده است.
- بلوک‌هایی که دارای ساختار غیر شطرنجی و ارگانیک که از دیدگاه نظم دارای نظم پیچیده است.

لذا به دلیل دشوار بودن پیش‌بینی در سیستم پیچیده (حبیب و شکوهی، ۱۳۹۱: ۱۸)، از یک سو و همچنین احتمال بسیار پایین متشابه بودن بلوک‌هایی که دارای نظم پیچیده هستند و در نتیجه عدم قابلیت تعمیم نتایج حاصل از مدل‌سازی در این گونه بافت‌ها از سوی دیگر، عملاً جامعه هدف ما بلوک‌هایی هستند که دارای ساختار شطرنجی (دارای نظم ساده) می‌باشند.



شکل ۱. نقشه موقعیت فرم‌های منتخب

در میان بلوک‌هایی مسکونی دارای بافت شطرنجی، ۴ نوع واحد همسایگی انتخاب شده است که جدول ۱ خلاصه‌ای از ویژگی‌های آن‌ها را بیان می‌کند. از آنجایی که بر اساس نقشه‌ی وضع موجود تهران (شهرداری تهران،

شده است.

در حوزه مدل‌سازی فرم شهری برخی از محققین از هندسه فرضی (Huang et al., 2019; Wen and Malki-) واقعیت (Epshtein, 2018; Noseka et al., 2018 Hassan et al., 2020; Gao et al., 2018; Shen et al., 2013) و ترکیبی از هر دو روش (Marulanda T. et al., 2020; Hadavi and Pasdarshahri, 2019; Yuan et al., 2014) استفاده کرده‌اند. در این پژوهش با توجه به ساده‌سازی‌های صورت گرفته (لازمه‌ی طراحی پارامتریکی) در نمونه‌های موردی منتخب، می‌توان گفت از مدل‌سازی فرضی در بستر شهر تهران استفاده شده است. به منظور انتخاب فرم‌های مورد نظر از نرم‌افزار GIS و عکس‌های ماهواره‌ای بهره برده شده است.

پژوهش پیش رو در دسته‌ی تحقیقات کاربردی قرار می‌گیرد و می‌توان از نتایج آن در طرح‌های توسعه شهر تهران استفاده کرد. در بخش مدل‌سازی نیز از نرم‌افزار Solidworks برای ترسیم هندسه، از نرم‌افزار Fluent از خانواده Ansys Fluent برای حل میدان جریان و از نرم‌افزارهای Tecplot 360 و CFD-Post برای نمایش نتایج استفاده شده است.

شاخص‌ها تحقیق

در این تحقیق شاخص اول مورد بررسی شاخص معدنی شدن در واحد همسایگی است. بر اساس تعریف Edussuriya و (۲۰۱۴) شاخص معدنی شدن همان درصد سطوح غیر قابل نفوذ (مساحت کل - مساحت کل سطوح آبی، فضای سبز و فضای باز) است که بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$MI = \frac{\sum built\ area}{area} \quad (۱)$$

شاخص دوم شاخص گشودگی فضایی است که در فقط درون کریدور شهری (محور اصلی) محاسبه می‌شود و برابر با مجموع مساحت سطوح باز در نمای دو طرف

۱۳۹۸)، معابر با عرض ۱۲ متر بیشترین فراوانی را در پهنه‌های مسکونی دارند، لذا عرض ۱۲ متر ملاک عمل قرار گرفته است. ابعاد واحد همسایگی ۳۰۰ در ۳۰۰ متر است و ارتفاع آن ۱۶ متر (معادل چهار طبقه) در نظر گرفته شده است.

جدول ۱. فرم‌های منتخب و مقادیر شاخص‌ها

نام	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄
فرم				
وضع موجود و موقعیت نمونه موردی				
	منطقه ۱۵: مشیریه	منطقه ۱۵: مشیریه	منطقه ۷: آپادانا	منطقه ۱۵: شوش
مساحت فضای ساخته شده	۷۹۲۰۰	۷۶۰۳۲	۷۱۶۷۶	۶۷۳۲۰
مساحت فضای باز	۱۰۸۰۰	۱۳۹۶۸	۱۸۳۲۴	۲۲۶۸۰
مساحت سایت	۹۰۰۰۰			
MI	۰,۸۸	۰,۸۵	۰,۸	۰,۷۵
مجموع مساحت نمای دو سمت خیابان اصلی	۹۲۰۰	۸۸۱۶	۶۷۰۴	۶۷۰۴
دو برابر طول خیابان در ارتفاع متوسط دو سمت خیابان	۹۲۰۰			
OA	۰	۰,۰۴	۰,۲۷	۰,۲۷

اعتبارسنجی

می‌باشد که در فاصله‌ی ۰,۱۲ متری از یکدیگر قرار گرفته است. منابع آلاینده به صورت خطی و موازی یکدیگر هستند که به طور مداوم گاز ردیاب هگزا فلوراید گوگرد (SF₆) را با سرعت ثابت آزاد می‌کنند. زاویه باد موازی ساختمان‌ها می‌باشد.

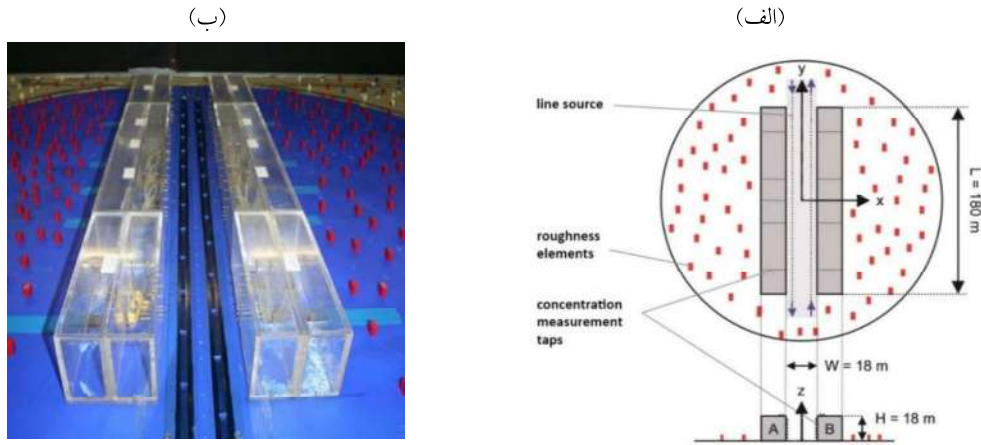
در تونل باد برای ارائه‌ی میزان غلظت در بخش‌های مختلف دامنه از غلظت نرمال شده (بی‌بعد) K استفاده شده است که از طریق رابطه زیر نرمال شده‌اند:

$$K = \frac{C_m H U_H}{Q/l} \quad (۳)$$

در این فرمول K غلظت نرمال شده، C_m غلظت

اعتبارسنجی لازمه‌ی هر تحلیل CFD می‌باشد. در این مطالعه تمامی داده‌های ورودی، شرایط مرزی و روش مورد استفاده اعتبارسنجی شده است. برای این منظور از نتایج آزمایشات صورت گرفته بر پیکربندی کریدور شهری در تونل باد با مقیاس کاهش یافته (مقیاس 1: 150) ساخته شده در موسسه فناوری کارلسروهه ۱۴، استفاده شده است (CODASC).

مدل تونل باد از دو ساختمان موازی تشکیل شده که ابعاد آن‌ها ۰,۱۲ متر (x) در ۰,۱۲ متر (z) در ۱,۲ (y)

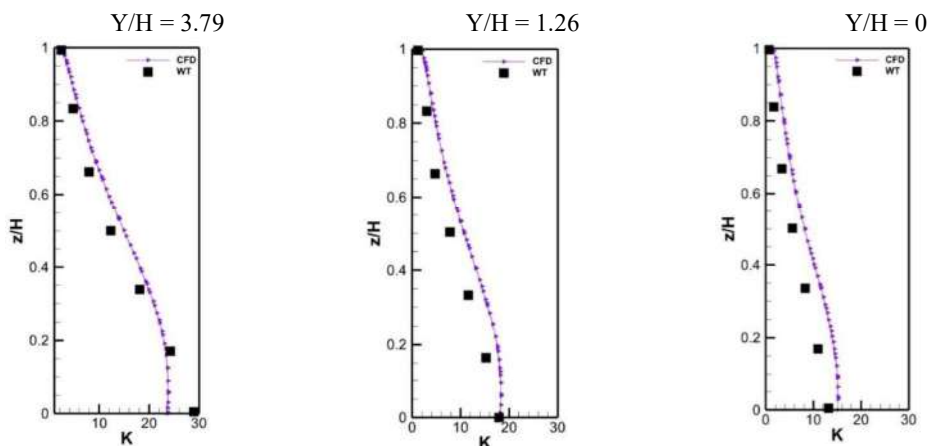


شکل ۲. (الف) تصویر شماتیک از کریدور شهری در تونل باد با نشان دادن سیستم مختصات و ابعاد اصلی (ب) تصویر از کریدور شهری در تونل باد (مقیاس: ۱/۱۵۰) (Moonen et al. 2011, CODASC)

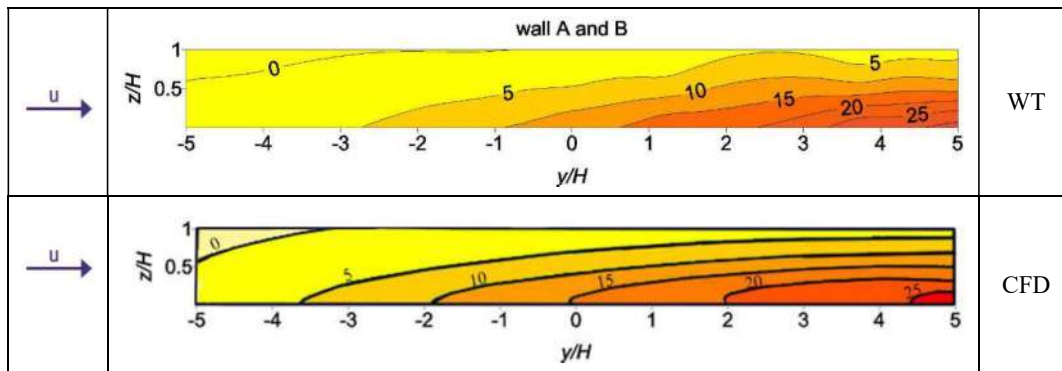
تونل باد و مطالعات صورت گرفته، مدل‌های مختلف با ویژگی‌های مختلف چون نوع مدل تربولانسی، عدد اشویت و... اجرا و نتایج آن بر اساس مقدار نرمال شده‌ی K با یکدیگر و با نتایج تونل باد مقایسه شده‌اند و در نهایت تنظیمات بهترین مدل به عنوان مدل اعتبارسنجی شده انتخاب شده است. شکل ۳ مقایسه‌ی غلظت آلاینده بی‌بعد K در مدل اجرا شده و تونل باد را در سه موقعیت متفاوت در نزدیکی دیوار A (که نتایج آن با نزدیکی دیوار B مطابقت دارد) و شکل ۴ مقایسه کانتورهای غلظت آلاینده بی‌بعد در تونل باد و در مدل منتخب را نمایش می‌دهند که مؤید شباهت نتایج مدل‌سازی با نتایج تونل باد است.

اندازه‌گیری شده آلاینده‌ی هگزا فلوراید گوگرد در مخلوط، ارتفاع ساختمان (m) و U_H سرعت جریان (m/s) در ارتفاع ساختمان است. l طول منبع خطی (m) و Q نرخ انتشار آلاینده از منبع خطی (m^2/s) یا به عبارتی قدرت منبع آلاینده می‌باشد. ارتفاع ساختمان ۰٫۱۲ متر و سرعت جریان در ارتفاع ساختمان ۴٫۷ متر بر ثانیه، طول منبع خطی معادل ۱٫۴۴ متر، مقدار Q معادل ۱۰ گرم بر ثانیه در نظر گرفته شده است (Salim et al., 2011; Huang et al., 2019).

پس از انجام تنظیمات هندسه و شبکه، نوبت به آن می‌رسد تنظیمات مدل صورت بگیرد. بر اساس تنظیمات



شکل ۳: مقایسه میزان غلظت آلاینده بی‌بعد K در سه خط عمودی در نزدیکی دیوار خیابان در مدل و تونل باد



شکل ۴. داده‌های غلظت آلاینده بی‌بعد K در تونل باد و مقایسه آن با CFD

تنظیمات مدل

آلاینده

آلاینده‌ی مورد نظر در این تحقیق مونوکسید کربن است. منبع آلاینده به صورت خطی (به عرض ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر) در طول خیابان اصلی در نظر گرفته شده که دارای دو لاین می‌باشد و فاصله آن تا دیوار نزدیک ۰.۲۸ متر است. آلاینده تنها در منبع انتشار، آن هم با دبی ثابت تعریف شده است (Huang et al., 2019; Wen and Malki-Epshtein, 2018; Shen et al., 2017). لازم به توضیح است که سرعت ورود آلاینده بسیار ناچیز و معادل 1.02×10^{-5} (بر اساس دبی ورودی) و تربولانس جریان ورود آلاینده صفر در نظر گرفته شده است (Wen and Malki-Epshtein, 2018). در سایر مرزها غلظت آلاینده صفر می‌باشد. میزان آلاینده ورودی در مدل‌ها، 3.44×10^{-4} کیلوگرم مونوکسیدکربن در هر ثانیه است که معادل $2.9 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ می‌باشد. لازم به توضیح است که غلظت آلاینده در تمامی گزینه‌ها یک مقدار ثابت در نظر گرفته شده است. روش مدل‌سازی پخشایش آلاینده، مدل انتقال گونه^{۱۵} (مدل دو گونه‌ای مخلوط) است که در آن، گونه یک، هوا و گونه دو، گاز مونوکسیدکربن است. واکنش‌های شیمیایی در مدل‌سازی نادیده گرفته شده است.

داده‌های اقلیمی

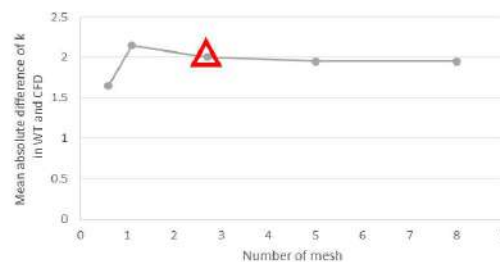
در این پژوهش از داده‌های ایستگاه سینوپتیک مهرآباد سال ۱۳۹۸ استفاده شده است. میانگین سالانه سرعت باد

در مرحله‌ی بعد آزمودن استقلال حل از شبکه صورت گرفته است. در این بخش در خط $Y/H=3.79$ در پنج حالت مختلف شبکه که مشخصات آن در جدول ۲ مشخص شده است، مدل ساخته و اجرا شده و میزان غلظت آلاینده در آن‌ها با یکدیگر و با تونل باد مقایسه شده است.

جدول ۲: اطلاعات شبکه برای هر مدل

تعداد کل سلول				
خیلی درشت	درشت	نرمال	خوب	خیلی خوب
۶۲۷۰۶۰	۱۱۶۸۷۲۸	۲۷۰۲۰۴۰	۵۰۲۲۹۷۲	۸۰۷۰۲۱۶

برای انجام مقایسه، میانگین قدرمطلق تفاضل غلظت آلاینده در تونل باد و مدل اجرا شده محاسبه شده است. همان‌طور که شکل ۵ مشخص است روند نمودار بر اساس انتظار کاهش است یعنی با ریز شدن شبکه نتایج بهتری حاصل شده است، اما با توجه به میزان تغییرات اندک (0.036)، شبکه ۲،۷ میلیونی و شبکه ۵ میلیونی (دقت قابل قبول)، می‌توان با توجه به افزایش قابل توجه هزینه محاسبات، شبکه‌ی ۲،۷ میلیونی را به عنوان تعداد سلول ملاک عمل در مدل‌سازی در نظر گرفت.



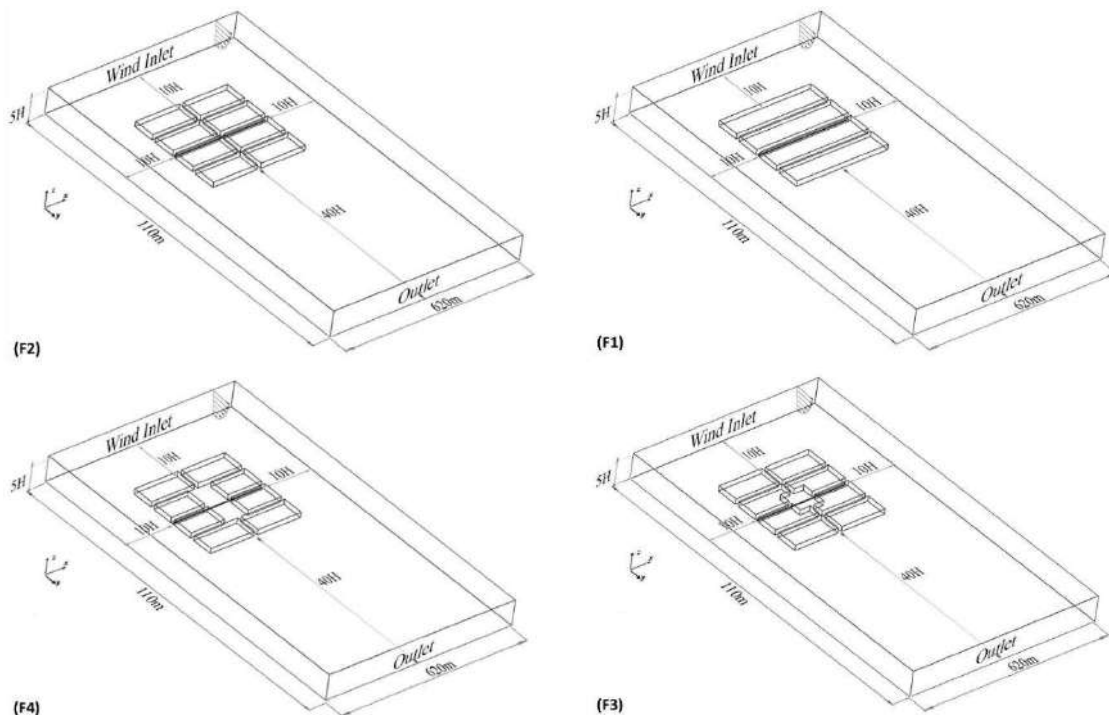
شکل ۵. نمودار آزمون استقلال حل از شبکه

در نظر گرفتن حداقل‌های ذکر شده در مطالعه تومیناگا و همکاران (Tominaga et al., 2008; Blocken, 2015) و همچنین ابعاد واحد همسایگی (۳۰۰*۳۰۰ متر) و ارتفاع بلوک‌ها (۱۶ متر) از یک سو و همگرایی قابل قبول نتایج از سویی دیگر، تعیین گردیده است. فاصله هندسه تا مرز ورودی و مرزهای کناری 10H، تا مرز خروجی 40H و ارتفاع دامنه 5H است. حل CFD نیز در یک دامنه سه‌بعدی انجام شده است (تصویر ۳).

۳،۱۱ متر بر نایه و جهت باد غالب غربی می‌باشد که به عنوان سرعت مرجع برای تعریف پروفیل سرعت مورد استفاده قرار گرفته است. میانگین سالیانه‌ی دمای هوا در ایستگاه سینوپتیک فرودگاه مهرآباد معادل ۱۸،۲ درجه سانتی‌گراد، فشار ۱۰۱۶ هکتوپاسکال (۱۰۱،۶ کیلوپاسکال) می‌باشد.

شرایط مرزی، شبکه‌بندی و نوع حل معادلات

اندازه دامنه محاسباتی استفاده شده برای تحلیل CFD با



تصویر ۶. هندسه مدل شده در فرم‌های F1، F2، F3 و F4

$$U(z) = U_{ref}(z_{ref}) \left[\frac{z}{z_{ref}} \right]^\alpha \quad (4)$$

$$I_u(z) = I_u(z_{ref}) \left[\frac{z}{z_{ref}} \right]^{\alpha_1} \quad (5)$$

$$k = \frac{u^2}{\sqrt{C_\mu}} \left(1 - \frac{z}{\delta} \right) \quad (6)$$

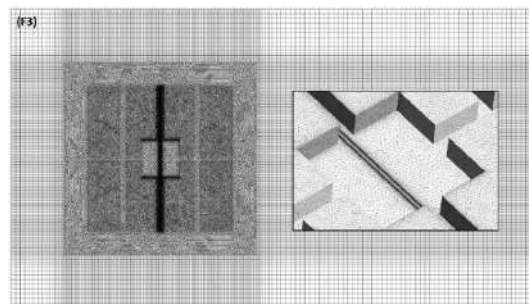
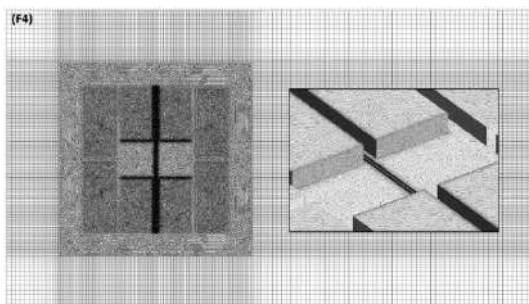
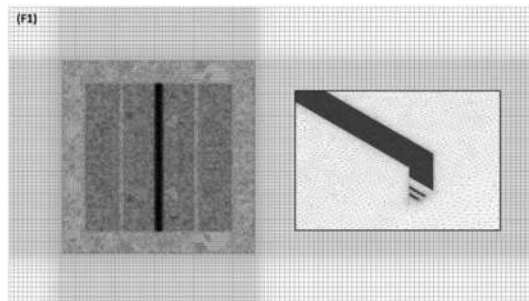
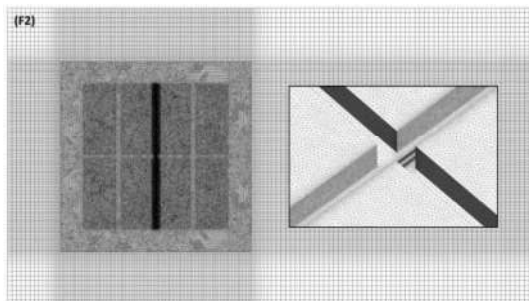
$$\varepsilon = \frac{u^3}{KZ} \left(1 - \frac{z}{\delta} \right) \quad (7)$$

در مدل‌ها از مش هیبریدی یا ترکیبی استفاده شده است بدین ترتیب که برای دامنه درونی که هندسه اصلی و فضای بلافصل آن را شامل می‌شود از شبکه بی‌سازمان با سلول‌های مثلثی و برای دامنه بیرونی از شبکه سازمان یافته

مرز ورودی (پروفیل سرعت)، مرز خروجی با گرادیان صفر، مرزهای دیواره‌های اطراف و بالا متقارن ۱۵ (تابع دیوار با شرط لغزش آزاد) و کف و دیوارهای کریدور شهری، دیوار با شرط عدم لغزش تنظیم شده‌اند. پروفیل‌های عمودی ورودی سرعت باد $U(z)$ ، شدت تلاطم $I_u(z)$ ، رابطه‌های انتقال انرژی جنبشی تلاطمی (k) و نرخ اتلاف تلاطمی (ε) به شرح زیر مشخص شده است (Salim et al., 2011; Huang et al., 2019):

باد، به منظور صرفه‌جویی در هزینه محاسبات، و با توجه به این که نتایج محاسبات در این هندسه‌ها متقارن می‌باشد، تنها برای نیمی از هندسه شبکه تولید و CFD حل شده است (Wang et al., 2017). با این حال تعداد سلول‌ها در فرم یک 7321594، فرم دو 7358107، فرم سه 7375380 و فرم چهار 7480204 می‌باشد. در تصویر ۴ شبکه مدل شده برای هر چهار فرم نمایش داده شده است.

استفاده شده است. برای مدل‌ها لایه‌ی مرزی شبکه در نظر گرفته شده که تعداد آن‌ها ۱۵ می‌باشد و نسبت ابعاد در کل هندسه ۱،۱۵ و در دامنه درونی ۱،۱ است. کوچک‌ترین اندازه پایه سلول‌ها مختص منبع آلاینده است که ۰،۰۵ متر است، این مقدار برای دیوارهای خیابان اصلی به ۰،۶ متر افزایش می‌یابد. لازم به توضیح است در فرم‌ها به دلیل متقارن بودن دامنه و هندسه و معبر اصلی نسبت به جریان



شکل ۷. شبکه مدل شده در فرم‌های F1، F2، F3 و F4

آشفتگی ناشی از ترافیک در نظر گرفته نشده است.

یافته‌های تحقیق

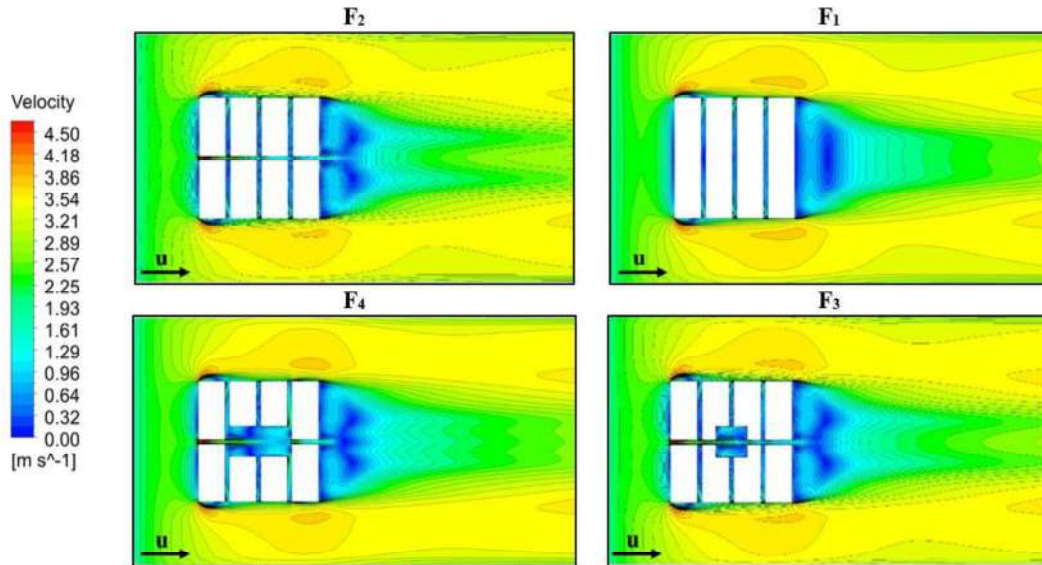
تحلیل جریان باد در فرم‌های شهری

همان‌طور که در تصویر ۵ و ۶ مشخص است در کنج‌های بلوک‌های ساختمانی مقابل باد و مدخل ورودی خیابان‌های موازی جریان هوا، سرعت باد به حداکثر خود می‌رسد و در حد فاصل آن‌ها با دیوار سرعت باد به شدت کاهش می‌یابد، لذا در هر چهار فرم، بیشینه سرعت در ارتفاع عابر پیاده (۲ متر) مربوط به همین مناطق بوده که به

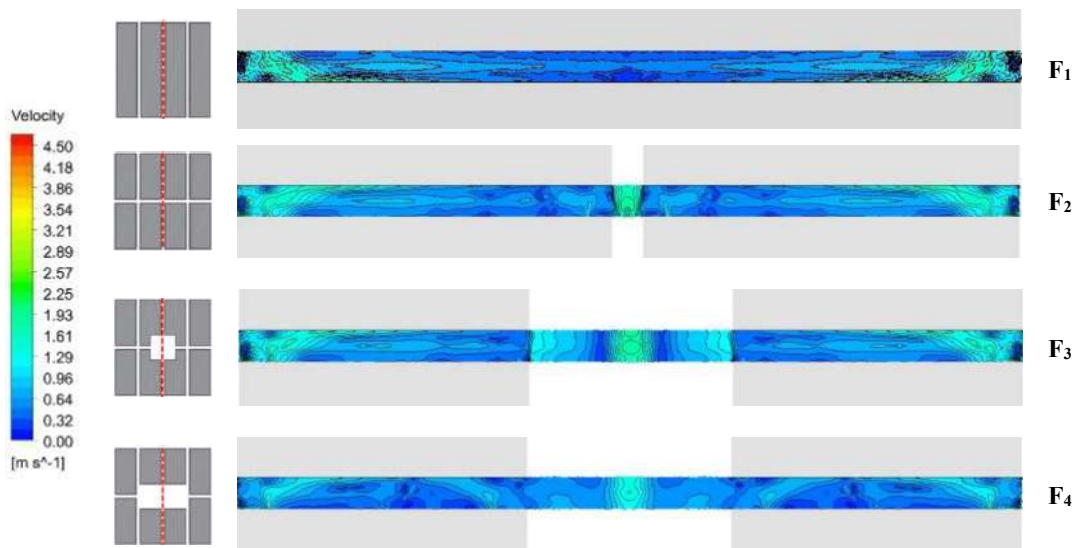
رویکرد مدل‌سازی در این پژوهش RANS است و در آن از مدل توربولانسی $k-\epsilon$ استفاده شده است. از میان مدل‌های $k-\epsilon$ ، مدل کا-اِپسِلین تحقیق‌پذیر (RKE) و عدد اشمیت توربولانسی برابر ۰،۳ (Huang et al., 2019) در نظر گرفته شده است که در بخش اعتبارسنجی نتایج بهتری را حاصل کرده است. در مدل‌سازی از تابع دیواره مقیاس‌پذیر استفاده شده است. نوع حل به لحاظ زمانی ثابت بوده و جریان باد به عنوان یک جریان تراکم ناپذیر در نظر گرفته شده است. همچنین اثرات حرارتی ناشی از گرمایش خورشیدی در کریدورهای شهری و اثرات

۲/۲۹ متر بر ثانیه در فرم یک و حداکثر ۳/۸۹ متر بر ثانیه در فرم چهار است. دلیل این امر عمود بودن باد غالب بر خیابان اصلی در هر چهار فرم و کاهش سرعت در آن محور می‌باشد.

ترتیب در فرم‌های یک، دو، سه و چهار معادل ۴/۲۷، ۵/۳۱، ۵/۳۱ و ۵/۳۵ متر بر ثانیه است. لازم به توضیح است که این مقدار در هیچ یک از فرم‌ها در کل دامنه و خیابان اصلی، نه تنها یکسان نمی‌باشد، بلکه دارای اختلاف حداقل



شکل ۸. سرعت جریان هوا در ارتفاع عابر پیاده در کل دامنه



شکل ۹. سرعت جریان هوا در ارتفاع عابر پیاده در محور اصلی

خیابان شرقی- غربی تجربه کرده است. در خصوص خیابان اصلی شرایط با کل دامنه متفاوت بوده و فرم سه میانگین بیشترین سرعت (۰/۷۸ متر بر ثانیه) و فرم چهار میانگین کمترین سرعت (۰/۵۹ متر بر ثانیه) را به خود اختصاص

بر اساس میانگین سرعت، فرم یک منجر به وزش باد ضعیف‌تر و فرم دو منجر به وزش باد شدیدتر نسبت به سایر فرم‌ها در کل دامنه می‌شود. ولی بر اساس بیشینه سرعت، فرم چهار وزش باد شدیدتری را در مدخل ورودی

داده است. لازم به توضیح است که با افزایش مقدار شاخص OS میزان سرعت در خیابان اصلی افزایش می‌یابد ولی ناگهان در فرم چهار که میزان شاخص با فرم سه برابر است شاهد کاهش سرعت می‌باشیم که دلیل آن تفاوت در شکل فضای باز در واحد همسایگی است. طول بیشتر این فضا در فرم چهار باعث شده تا اثر کانالیزاسیون محور غربی-شرقی در میانه‌ی فضای باز (محل عبور محور اصلی) به حداقل خود برسد.

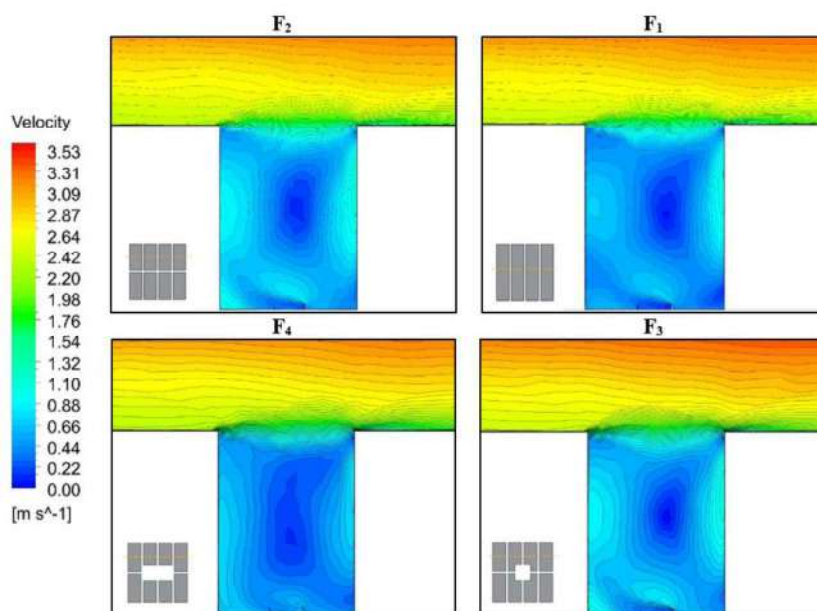
بر اساس جدول ۳ شاخص MI در فرم‌های یک تا چهار به ترتیب کاهش می‌یابد. با کاهش این شاخص میزان سرعت باد در کل دامنه در فرم‌های دو، سه و چهار نیز کاهش می‌یابد، اما در فرم یک با آن که بیشترین میزان شاخص را دارد، سرعت باد کمتر از سایر گزینه‌هاست. دلیل این امر عدم وجود محور شرقی-غربی (محور موازی جریان باد) در این فرم می‌باشد که منجر به کاهش میانگین سرعت شده است.

جدول ۳. سرعت جریان هوا در ارتفاع عابر پیاده (۲ متر) در کل دامنه و در خیابان اصلی و شاخص‌های MI و OA

فرم	شاخص MI	شاخص OS	در کل دامنه (m/s)		در خیابان اصلی (m/s)	
			بیشینه	میانگین	بیشینه	میانگین
F ₁	۰/۸۸	۰	۲/۸۲	۴/۲۷	۱/۹۸	۰/۷۳
F ₂	۰/۸۵	۰/۰۴	۲/۸۱	۵/۳۱	۱/۹۵	۰/۷۴
F ₃	۰/۸۰	۰/۳۷	۲/۷۹	۵/۳۱	۱/۹۲	۰/۷۸
F ₄	۰/۷۵	۰/۲۷	۲/۷۶	۵/۳۵	۱/۴۶	۰/۵۹

هر چهار فرم در مقطع عرضی خیابان تقریباً مشابه است. سرعت باد در دهانه کریدور شهری حدود ۱٫۵ متر بر ثانیه می‌شود. در مجاورت دیوارها سرعت به حدود ۰٫۷ و در قسمت‌های مرکزی مقطع به کمتر از ۰٫۲ کاهش می‌یابد.

همان‌طور بر اساس شکل ۱۰ مشخص است در دهانه‌ی سقف کریدورهای شهری کانتورهای سرعت بسیار به هم نزدیک بوده و سرعت جریان هوا افزایشی را تجربه می‌کند که در همه فرم‌ها قابل مشاهده است. نحوه‌ی رفتار باد در



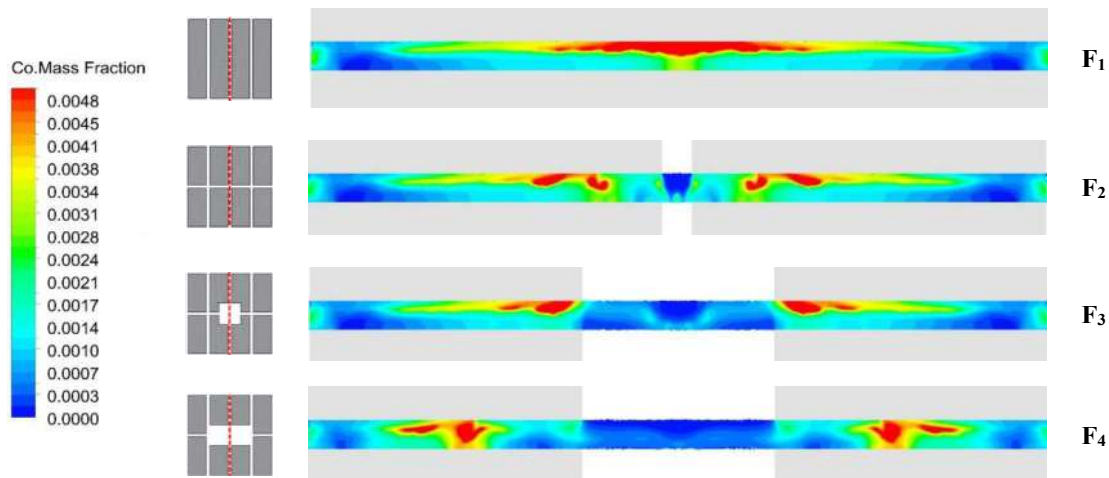
شکل ۱۰. سرعت جریان هوا در نیمرخ عرضی محور اصلی و موقعیت مقاطع

مجاورت دیوار پشت به باد (ضلع غربی خیابان) قابل مشاهده است. در فرم یک تجمع آلاینده‌ها در میانه محور و در فرم دو در میانه محور متمایل به تقاطع، در فرم سه متمایل در مجاورت گشودگی فضایی و در فرم چهار در میانه بخش‌های محصور خیابان است. با در نظر گرفتن میانگین میزان کسر جرمی در ارتفاع عابر پیاده در محور اصلی و مقایسه آن در بین فرم‌ها، باید گفت که فرم سوم بهترین شرایط را دارا می‌باشد. میانگین کسر جرمی در خیابان اصلی در این فرم ۱۰ درصد از فرم چهار، ۲۰ درصد از فرم دو و ۳۰ درصد از فرم یک کمتر است.

بر اساس شاخص OS نیز می‌توان گفت با افزایش شاخص میزان آلاینده در محور اصلی کمتر می‌شود و هم‌بستگی منفی بین آن‌ها وجود دارد. اما در گزینه چهار که شاخص آن برابر با گزینه‌ی سه است، به دلیل پایین‌تر بودن سرعت باد، میزان آلاینده کمی بیشتر از گزینه‌ی سوم است.

تحلیل میزان غلظت آلاینده در فرم‌ها

بر اساس مدل‌سازی صورت گرفته (شکل ۱۱ و جدول ۴) میزان میانگین کسر جرمی آلاینده در ارتفاع عابر پیاده در کل دامنه در فرم یک و دو برابر و کمی بیشتر از فرم سه و چهار می‌باشد که با هم برابرند. در نتیجه می‌توان گفت شاخص MI تأثیر چندانی در غلظت آلاینده در کل دامنه نگذاشته است. اما در داخل خیابان اصلی، فرم یک بدترین حالت (معادل ۰/۰۰۲) و فرم سه بهترین حالت (معادل ۰/۰۱۴) را به لحاظ میانگین به خود اختصاص داده است. در هر چهار فرم بیشترین میزان کسر جرمی آلاینده در ارتفاع عابر پیاده، در خیابان اصلی مشاهده شده است. بر اساس این شاخص (کسر جرمی بیشینه) فرم چهار بدترین فرم با ۰/۰۱۳۶ کسر جرمی آلاینده می‌باشد. بعد از آن فرم یک، سه و دو به ترتیب با ۰/۰۱۱۶، ۰/۰۱۰۴ و ۰/۰۱۰۳ در رتبه‌های بعدی به لحاظ کسر جرمی آلاینده قرار دارند. به لحاظ فضایی باید گفت تمرکز آلاینده‌ها در تمامی فرم‌ها در



شکل ۱۱. میزان کسر جرمی در محور اصلی در ارتفاع عابر پیاده (۲ متر) در فرم‌های F1، F2، F3 و F4

جدول ۴. مقایسه میزان کسر جرمی در ارتفاع عابر پیاده (دو متر) در فرم‌های F1، F2، F3 و F4

میزان کسر جرمی در ارتفاع عابر پیاده (دو متر)				شاخص OS	شاخص MI	فرم
در خیابان اصلی		در کل دامنه حل				
بیشینه	میانگین	بیشینه	میانگین			
۰/۰۱۱۶	۰/۰۰۲۰	۰/۰۱۱۶	۰/۰۰۰۰۱۸	0	۰/۸۸	F1
۰/۰۱۰۳	۰/۰۰۱۸	۰/۰۱۰۳	۰/۰۰۰۰۱۹	۰/۰۴	۰/۸۵	F2
۰/۰۱۰۴	۰/۰۰۱۴	۰/۰۱۰۴	۰/۰۰۰۰۱۷	۰/۲۷	۰/۸۰	F3
۰/۰۱۳۶	۰/۰۰۱۶	۰/۰۱۳۶	۰/۰۰۰۰۱۷	۰/۲۷	۰/۷۵	F4

در ادامه نمودارها و کانتورهای میزان کسر جرمی در نیمرخ طولی محور اصلی (در آکس پیاده روی ضلع غربی-دیوار پشت به باد) ارائه شده‌اند (شکل ۱۲، جدول ۶). در فرم یک در ابتدا و انتهای خیابان میزان غلظت آلاینده کمینه می‌باشد، چرا که به دلیل وجود گشودگی فضا در کنار آن‌ها بخشی از آلاینده‌ها از طریق دهانه‌ی عرضی خیابان دفع می‌شود، اما در مرکز خیابان این میزان به بیشینه مقدار خود یعنی ۰/۰۰۷۲ رسیده است. در فرم دو در محل تقاطع خیابان شرقی- غربی و محور اصلی میزان آلاینده به شدت کاهش یافته و به صفر می‌رسد. در فرم سوم و چهارم در محل گشودگی فضایی، میزان CO در کل نیمرخ گشودگی فضایی، بسیار ناچیز می‌باشد. در این دو فرم، ابعاد و شکل گشودگی فضایی (در عین یکسان بودن نیمرخ طولی آن‌ها) بر پخشایش آلاینده در بخش‌های ابتدایی و انتهایی محور اصلی تأثیر گذاشته است. میزان کسر جرمی در حالت میانگین در فرم‌های چهار، سه و دو به ترتیب معادل ۵۶/۵۲ درصد، ۶۵/۲۲ درصد و ۸۲/۶۱ درصد فرم یک می‌باشد. نمودار ۳ نیز مقایسه نمودار کسر جرمی CO در نیمرخ طولی در آکس پیاده‌روی محور اصلی (ضلع غربی خیابان) در ارتفاع عابر پیاده را در چهار گزینه با یکدیگر مقایسه کرده است. بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته در این بخش، فرم یک همچنان بدترین فرم و فرم چهار بهترین فرم شناسایی شده‌اند.

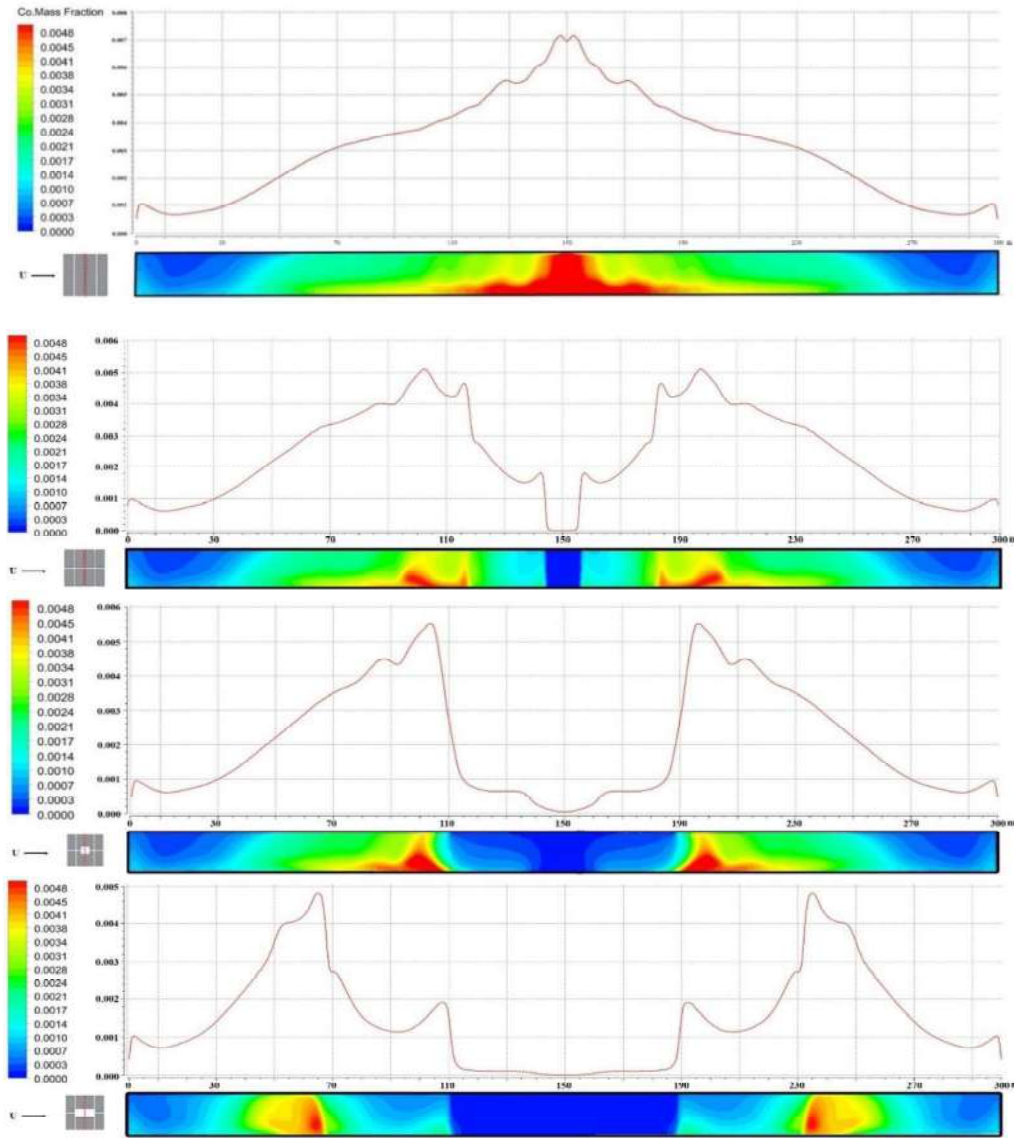
با بررسی میزان کسر جرمی آلاینده در ارتفاع سقف کریدور شهری (۱۶ متر) این نتیجه حاصل می‌شود که فرم یک، دو، سه، چهار به ترتیب دارای بیشترین میزان آلاینده بوده که معادل ۰/۰۰۰۶۶، ۰/۰۰۰۵۲، ۰/۰۰۰۴۱ و ۰/۰۰۰۳۶ می‌باشد. این بدان معناست که در گزینه‌ی یک بیشترین میزان تهویه از طریق سقف کریدور شهری صورت می‌گیرد و به آهستگی با افزایش شاخص OS (کاهش شاخص MI) و ایجاد تقاطع در محور (فرم دو) و سپس تبدیل آن به گشودگی فضایی (فرم سه و چهار) این میزان کاهش یافته و با این که در این فرم‌ها میزان کل آلاینده در ارتفاع عابر پیاده کمتر است، اما تهویه کمتری نیز در آن‌ها از طریق جابجایی عمودی آلاینده‌ها صورت می‌گیرد و بیشترین تخلیه از طریق دهانه‌های جانبی اتفاق می‌افتد (جدول ۵).

جدول ۵. مقایسه میزان کسر جرمی در سقف خیابان اصلی (۱۶ متر) در فرم‌های F1، F2، F3 و F4

فرم	شاخص OS	میزان کسر جرمی در سقف خیابان اصلی	
		میانگین	بیشینه
F1	۰	۰/۰۰۰۶۶	۰/۰۰۰۶۴
F2	۰/۰۰۴	۰/۰۰۰۵۲	۰/۰۰۰۳۵
F3	۰/۰۲۷	۰/۰۰۰۴۱	۰/۰۰۰۳۸
F4	۰/۰۲۷	۰/۰۰۰۳۶	۰/۰۰۰۳۹

جدول ۶: مقایسه میانگین و بیشینه کسر جرمی CO در نیمرخ طولی در آکس پیاده‌روی محور اصلی (ضلع غربی خیابان) در فرم‌های F1، F2، F3 و F4

فرم	کسر جرمی در نیمرخ طولی در آکس پیاده‌روی محور اصلی		
	میانگین	نرمال نسبت به F1	بیشینه
F1	۰/۰۰۲۳	۱۰۰	۰/۰۰۷۲
F2	۰/۰۰۱۹	۸۲/۶۱	۰/۰۰۵۳
F3	۰/۰۰۱۵	۶۵/۲۲	۰/۰۰۵۶
F4	۰/۰۰۱۳	۵۶/۵۲	۰/۰۰۵۰



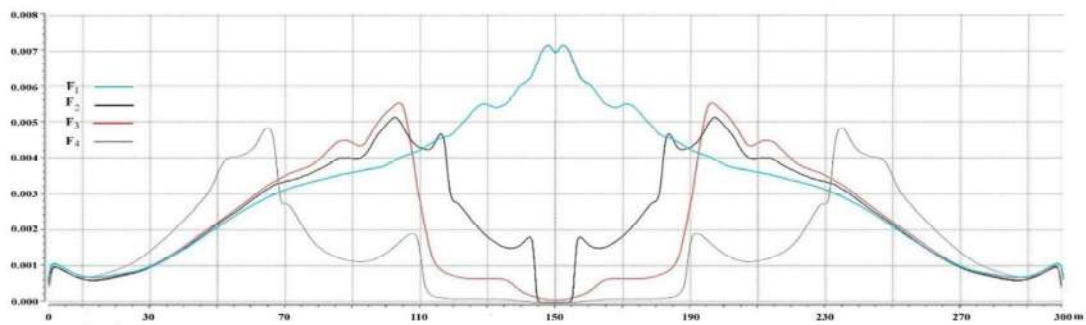
F₁

F₂

F₃

F₄

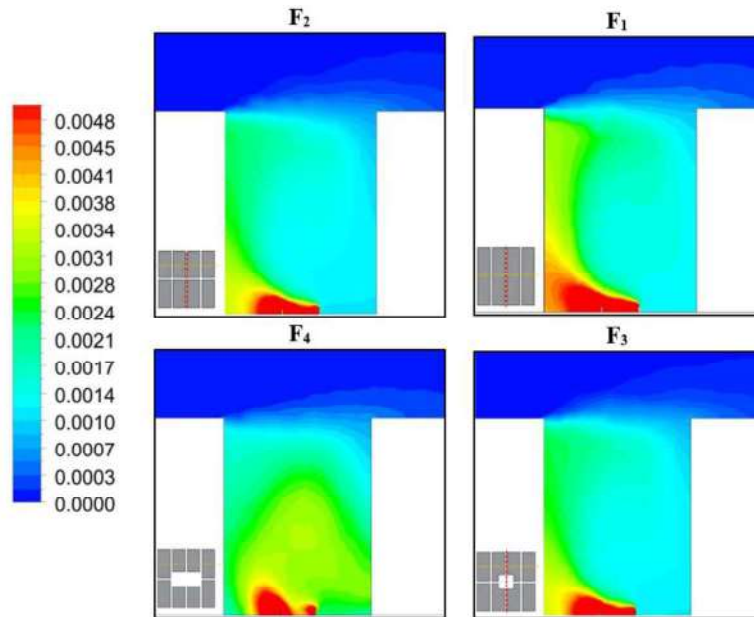
شکل ۱۲. الف) نمودار کسر جرمی CO در نیمرخ طولی در آکس پیاده‌روی محور اصلی (ضلع غربی خیابان) در ارتفاع عابر پیاده،
 ب) کسر جرمی CO در نیمرخ طولی در آکس پیاده‌روی محور اصلی (ضلع غربی خیابان)



شکل ۱۳. مقایسه نمودار کسر جرمی CO در نیمرخ طولی در آکس پیاده‌روی محور اصلی (ضلع غربی خیابان)
 در ارتفاع عابر پیاده در چهار گزینه

دارد. در فرم چهار میزان پخشایش آلاینده در کل خیابان بیش از سایر گزینه‌ها قابل مشاهده است و همین امر تمرکز آلاینده را در پیاده‌رو کنار دیوار پشت به باد کمتر کرده است.

در شکل ۱۳ کانتورهای میزان کسر جرمی در نیمرخ عرضی محور اصلی در هر چهار فرم ارائه شده است. همان طور که مشخص است در فرم یک غلظت آلاینده در پیاده‌روی کنار دیوار پشت به باد، نسبت به سایر فرم‌ها بیشتر است و شرایط نامناسب‌تری نسبت به سایر مقاطع



شکل ۱۴. سرعت جریان هوا در نیمرخ عرضی محور اصلی و موقعیت مقاطع

جدول ۷: مقایسه میانگین سرعت باد و کسر جرمی CO در ارتفاع عابر پیاده (دو متر) در کل دامنه و در خیابان اصلی در فرم‌های F_1, F_2, F_3, F_4

میانگین در خیابان اصلی		فرم
میزان کسر جرمی در ارتفاع عابر پیاده	سرعت باد (m/s)	
۰/۰۰۲۰	۰/۷۳	F_1
۰/۰۰۱۸	۰/۷۴	F_2
۰/۰۰۱۴	۰/۷۸	F_3
۰/۰۰۱۶	۰/۵۹	F_4

نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی رابطه‌ی شاخص گشودگی فضایی در طول کریدور شهری و همچنین شاخص مدنی شدن در کل واحد همسایگی با پراکنش آلاینده CO پرداخته شده است. به منظور انجام پژوهش از تکنیک

به منظور مقایسه‌ی نحوه‌ی ارتباط سرعت باد و تهویه کریدور شهری و کاهش میزان غلظت آلاینده منوکسیدکربن، میزان میانگین سرعت و میانگین غلظت در خیابان اصلی مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در جدول ۷ قابل مشاهده است در فرم سه، میانگین سرعت در خیابان اصلی از سایر گزینه‌ها بیشتر است، از سویی دیگر میزان غلظت از سه مورد دیگر کمتر می‌باشد. اما در فرم چهار با آن که میانگین سرعت کمتر از سایر فرم‌ها است با این حال میزان غلظت بعد از فرم سه کمترین می‌باشد. لذا نمی‌توان گفت که با افزایش سرعت میزان غلظت آلاینده نیز کاهش می‌یابد. چرا که تهویه تنها در اثر جابجایی افقی آلاینده‌ها صورت نمی‌گیرد و جابجایی عمودی آن‌ها و رفتار گردابه‌ها نیز در کیفیت تهویه تأثیرگذار هستند.

پاسخگوترین فرم نسبت به کیفیت هوا این فرم می‌باشد. بر همین اساس نیز فرم یک نامناسب‌ترین فرم تشخیص داده شده است.

همچنین با مقایسه‌ی فرم یک و دو می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش طول کریدور شهری از ۳۰۰ متر به ۱۴۴ متر در حالتی که جریان باد عمود بر کریدور شهری است، میزان غلظت آلاینده نیز کاهش می‌یابد.

با افزایش شاخص گشودگی فضایی در و کاهش شاخص مدنی شدن فرم‌ها (یک به چهار) از میزان تهویه عمودی (تهویه از طریق سقف کریدور شهری) کاسته شده و بر میزان تهویه در راستای افقی و از طریق دهانه‌های جانبی افزوده می‌شود. به گونه‌ای که به وضوح تمایل آلاینده‌ها در کانتورهای غلظت به خروج از دهانه‌های جانبی مشهود است.

بررسی ارتباط میزان غلظت آلاینده و افزایش ارتفاع نشان می‌دهد که این دو با یکدیگر همبستگی منفی دارند و با افزایش ارتفاع میزان غلظت آلاینده کاهش می‌یابد. این موضوع مؤید در معرض آلودگی و خطر قرار داشتن عابر پیاده می‌باشد.

یکی دیگر از نتایج قابل ذکر این است که اگرچه میان افزایش سرعت باد با افزایش تهویه و کاهش میزان آلاینده‌ی مونوکسیدکربن در فرم‌های مورد بررسی ارتباط وجود دارد اما نمی‌توان گفت این ارتباط مستقیم است، چرا که تهویه تنها در اثر جابجایی افقی آلاینده‌ها صورت نمی‌گیرد و جابجایی عمودی آن‌ها و رفتار گردابه‌ها نیز در تهویه تأثیرگذار هستند.

لازم به توضیح است که در حال حاضر انجام مطالعات پارامتریک در حوزه‌ی ارتباط فرم شهری و آلودگی هوا به ویژه در ایران در اول راه خود می‌باشد و پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی به بررسی ارتباط انواع دیگر فرم‌های شهری در مقیاس واحد همسایگی با میزان و نحوه‌ی پراکنش آلودگی هوا پرداخته شود. همچنین بررسی تأثیر تغییر نوع آلاینده به ویژه ذرات معلق (که به دلیل سنگین‌تر

مدل‌سازی با کمک دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) استفاده شده است و از معادلات RANS و مدل آشفتگی کا-اِپسیلون تحقیق‌پذیر بهره برده شده است. اعتبارسنجی مدل از طریق تونل باد (مقیاس کاهش‌یافته) صورت گرفته است. بر اساس تجزیه و تحلیل‌های صورت گرفته در بخش یافته‌های تحقیق می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

فرم بلوک‌های شهری بر سرعت باد تأثیر می‌گذارد. زمانی که این بلوک‌ها جداره‌های یک محور را شکل می‌دهند و این محور موازی جریان باد است، پدیده‌ی کانالیزاسیون شکل گرفته و سرعت در مدخل ورودی محور مقابل باد به حداکثر خود می‌رسد. به گونه‌ای که در فرم دو، سه و چهار میزان سرعت بیشینه در مدخل ورودی خیابان شرقی-غربی رخ داده است. در این مکان‌ها غالباً حضور آلاینده به حداقل ممکن می‌رسد. بخش‌های دیگری که سرعت باد در آن قسمت‌ها بالا است کنج‌های بلوک‌های مقابل باد است (اثر گوشه).

در کنار دیوارهای پشت به باد، سرعت باد کم و در مواقعی به صفر می‌رسد و دقیقاً این فضاها، فضاها مستعد تجمع آلاینده می‌شوند. به همین دلیل است که در هر چهار فرم در کنار جداره‌ی غربی خیابان شاهد تجمع آلاینده هستیم و بیشینه مقدار آلاینده در این مکان‌ها اتفاق افتاده است. از چه از این فضاها به سمت تقاطع‌ها و گشودگی فضایی پیش می‌رویم از شدت آلودگی کاسته می‌شود.

در فرم‌های بررسی شده بین شاخص گشودگی فضایی با میزان آلاینده همبستگی منفی وجود دارد یعنی با افزایش میزان شاخص، میزان کسر حجمی CO کاسته می‌شود. البته از آنجایی که افزایش ابعاد گشودگی فضایی در گزینه چهارم هم‌راستای خیابان اصلی نبوده است، افزایش ابعاد گشودگی تأثیر غیرمستقیم و پیچیده‌ای بر روی پخشایش آلاینده گذاشته که منجر به کاهش سرعت باد و در نتیجه افزایش میزان آلاینده شده است. در نهایت می‌توان گفت با توجه به این که در فرم سه شاهد کمترین میزان آلاینده در خیابان اصلی می‌باشیم، می‌توان گفت مناسب‌ترین و

11. Detached Eddy Simulation
12. Direct Numerical Simulation
13. K-Epsilon Realizable
14. Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
15. Species Transport
16. Symmetry

بودن آن‌ها منجر به ایجاد شرایط بحرانی‌تری در ارتفاع عابر پیاده به لحاظ تجمع آلاینده‌ها می‌شود، تغییر در زوایای باد و سرعت باد و دیگر عناصر اقلیمی در نحوه رفتار باد در بطن فرم‌های شهری مشخص، از دیگر پیشنهادات این مقاله برای مطالعات آتی می‌باشد.

تشکر و قدردانی

این مقاله برگرفته از رساله‌ی دکترای سمیرا یوسفیان با عنوان "اصول طراحی فرم‌های شهری آلودگی پناه (مورد مطالعه: نمونه فرم‌های بخش مسکونی تهران)" با راهنمایی جناب آقای دکتر پورجعفر و مشاوره‌ی اساتید دکتر مهدوی‌نژاد و دکتر مشفق‌ی در دانشگاه تربیت مدرس است.

یادداشت‌ها

1. Urban canyon
2. Computational Fluid Dynamics
3. Mineralization
4. Land coverage
5. Plot ratio
6. Packing ratio
7. fugitive dust
8. Case sensitive
9. Reynolds-Average-Navier-Stokes
10. Large Eddy Simulation

فهرست منابع

اداره هواشناسی فرودگاهی مهرآباد، (۱۳۹۸). گزارش هواشناسی سال ۱۳۹۸.

بنی طالبی، ا.؛ حسینی، ا.؛ استقامت، ف.؛ ریحانیان، م.؛ اتحادیان، م.ح.؛ حسینی، و. (۱۳۹۳). ضرایب انتشار آلاینده‌ی آگزوز در حالت گرم برای خودروهایی بنزین سوز داخل با استاندارد آلاینده‌ی یرو ۲، گزارش فنی، هسته پژوهشی سوخت، احتراق و آلاینده‌ی، دانشگاه صنعتی شریف.

حبیب، ف.؛ شکوهی، ع. (۱۳۹۱). شناخت و تحلیل مسائل شهری با استفاده از سیستم‌های فازی، هویت شهر، شماره ۱۰، سال ۶، ۱۷-۲۶.

حسنوند، م. ص. و ندافی، ک. (۱۳۹۵). آلودگی هوا و سلامت: مروری بر مطالعات و تحقیقات جهانی درباره اثرات آلودگی هوا. تهران: موسسه نشر شهر.

شهبازی، حسین؛ بابایی، مهدی؛ افشین، حسین (۱۳۹۴). سیاهه انتشار آلاینده‌ی شهر تهران برای سال مبنای ۱۳۹۲-جلد دوم: منابع متحرک. شرکت کنترل هوا شهرداری تهران.

مشفق‌ی، و. یوسفیان، س. (۱۳۹۸). ارزیابی نقش تغییرات الگوهای ساختار کالبدی شهر بر تغییرات مکانی آلاینده‌های هوای شهری (مطالعه موردی: شهر تهران) " نشریه علمی پژوهشی علوم و تکنولوژی محیط‌زیست (پذیرش شده).

Blocken, B. (2015). Computational fluid dynamics for urban physics: importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *building and environment*, 91, 219-245.

Borrego, C., Martins, H., tchepel, O., Salmim, L., Monteiro, A. & Miranda, A. I. (2006). How urban structure can affect city sustainability from an air quality perspective, *environmental modelling & software*: 21, 461-467.

Cionco, R. M. & Ellefsen, R. (1998). High resolution urban morphology data for urban wind flow modeling. *Atmospheric environment*, 32, 7-17.

CODASC, www.codasc.de

- David Cooper, C. & Alley, F. C. (2002). *Air pollution control: a design approach*, Waveland press.
- Di Sabatino, S., Buccolieri, R., Pulvirenti, B. & Britter, R.E. (2008) "Flow And Pollutant Dispersion in Street Canyons Using Fluent and Adms-Urban". *Environ Model Assess*, 13, 369-381.
- Edussuriya, P., Chan, A. & Malvin, A. (2014). Urban morphology and air quality in dense residential environments: correlations between morphological parameters and air pollution at street level. *Journal of engineering science and technology*, 9(1), 64 – 80.
- Eeftens, M., Beekhuizen, J., Beelen, R., Wang, M., Vermeulen, R., Brunekreef, B., Huss, A. & Hoek, G. (2013). Quantifying urban street configuration for improvements in air pollution models. *Atmospheric environment*, 72, 1-9.
- Gao, Z., Bresson, R., Qu, Y., Milliez, M., Munck, C. & Carissimo, B. (2018). High resolution unsteady rans simulation of wind, thermal effects and pollution dispersion for studying urban renewal scenarios in a neighborhood of toulouse, *urban climate*, 23, 114-130.
- Hadavi, M., Pasdarsahri, H. (2019). Quantifying impacts of wind speed and urban neighborhood layout on the infiltration rate of residential buildings, *Sustainable Cities And Society*. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101887>
- Hang, J., Sandberg, M. & Li, Y. (2009). Effect of urban morphology on wind condition in idealized city models. *Atmospheric environment*, 43, 869-876.
- Hang, J., Li, Y., Sandberg, M., Buccolieri, R. & Di Sabatino, S. (2012). The Influence of Building Height Variability on Pollutant Dispersion and Pedestrian Ventilation in Idealized High-Rise Urban Areas", *Building and Environment*, 56, 346-360.
- Hassan, A. M., El Mokadem, A. A. F., Megahed, N.A., Abo Eleinen, O. M., (2020). Improving outdoor air quality based on building morphology: Numerical investigation. *Frontiers of Architectural Research*. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2020.01.001>
- Huang, Y. D., Hou, R. W., Liu, Z. Y., Song, Y., Ui, P. Y. & Kim, C. N. (2019). Effects of wind direction on the airflow and pollutant dispersion inside a long street canyon. *Aerosol and Air Quality Research*, 19, 1152-1171.
- Jackson, P. (1978). The evaluation of windy environments. *Journal of building and environment* 13, 251- 260.
- Karra, S., Malki-Epshtein, L. & Neophytou, M.K. A. (2017). Air flow and pollution in a real, heterogeneous urban street canyon: a field and laboratory study. *Atmospheric Environment*, 165, 370–384.
- Lin, M., Hang, J., Li, Y., Luo, Z. & Sandberg, M. (2014). Quantitative ventilation assessments of idealized urban canopy layers with various urban layouts and the same building packing density. *building and environment*, 79, 152-167.
- Liu, Y., H. Arp, H. P., Song, X. & Song, Y. (2016). Research on the relationship between urban form and urban smog in china. *environment and planning b: planning and design*, 44 (2), 328-342.
- Martins, H. (2012) urban compaction or dispersion? An air quality modelling study. *Atmospheric Environment*, 54, 60-72.
- Marulanda Tobón, A., Moncho-Esteve, I. J., Martínez-Corral, J. & Palau-Salvador, G. (2020). Dispersion of co using computational fluid dynamics in a real urban canyon in the city center of valencia (spain). *Atmosphere*, 11(7), 693.
- Mccarty, J. & Kaza, N. (2015). Urban form and air quality in the United States. *Landscape and urban planning*, 139, 168-179.
- Moonen, P., Dorer, V. & Carmeliet, J. (2011). Evaluation of the Ventilation Potential of Courtyards and Urban Street Canyons Using RANS and LES. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99 (4), 414-423.
- Nosek, S., Fuka, V., Kukačka, L., Kluková, Z., Jaňoura, Z. (2018). Street-canyon pollution with respect to urban-array complexity: the role of lateral and mean pollution fluxes. *building and environment*, 138, 221-234.

- Oke, T.R. (1988). Street Design And Urban Canopy Layer Climate. *Energy And Buildings*, 11(1-3), 103-113.
- Salim, S.M., Buccolieri, R., Chan, A., Di Sabatino, S. (2011). Numerical simulation of atmospheric pollutant dispersion in an urban street canyon: comparison between rans and les. *journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 99, 103-113.
- Setaihe, K., Hamza, N., Mohammed, N. A., Dudek, S., Townshend, T. (2014). CFD modeling as a tool for assessing outdoor thermal comfort conditions in urban settings in hot arid climates. *journal of information technology in construction*, 19, 248-269.
- She, Q., Peng, X., Xu, Q., Long, L., Wei, N., Liu, M., Jia, W., Zhou, T., Han, J. & Xiang, W. (2017). Air quality and its response to satellite-derived urban form in the yangtze river delta, china. *Ecological indicators*, 297-306.
- Shen, J., Gao, Z., Ding, W., Yu, Y. (2017). An investigation on the effect of street morphology to ambient air quality using six real. *Atmospheric environment*, 164, 85-101.
- Tan, W., Li, C., Wang, K., Zhu, G., & Liu, L. (2019). Geometric effect of buildings on the dispersion of carbon dioxide cloud in idealized urban street canyons. *Process Safety and Environmental Protection*, 122, 271-280.
- Tominaga, Y. & Stathopoulos, T. (2013). CFD simulation of near-field pollutant dispersion in the urban environment: a review of current modeling techniques. *Atmospheric environment*, 79, 716-730.
- Wang, Q., Sandberg, M., Lin, Y., Yin, S., Hang, J. (2017). Impacts of urban layouts and open space on urban ventilation evaluated by concentration decay method. *Atmosphere*, 8, 169, 1-25.
- Wen, H. & Malki-Epshtein, L. (2018). A parametric study of the effect of roof height and morphology on air pollution dispersion in street canyons. *journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 175 , 328-341.
- 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.