



The CFD Study of Building Form and Its Impact on Indoor Air Quality in Urban Residential Fabric (The Case of District 1 of Shiraz)

Mozhgan Kamali¹, Aliakbar Heidari^{*2}, Yaghowb Peyvastehgar³

Received 12/Jun/2023

Revised 08/Oct/2023

Accepted: 24/Dec/2023

(PP.: 197-219)

Abstract

Introduction: The increasing air pollution in large cities and its direct impact on human health have highlighted the importance of indoor air quality (IAQ) more than ever before. One of the key factors influencing IAQ is the form and arrangement of buildings within the urban fabric, which affects airflow patterns and pollutant infiltration. This study aims to investigate the impact of building form on natural ventilation and indoor air quality in the residential fabric of Shiraz City.

Methodology: Three common building form typologies — stepped, L-shaped, and T-shaped — were modeled and rotated in different orientations within a regular urban layout. Simulations were conducted using Autodesk CFD with the SST $k-\omega$ turbulence model. Air velocity and NO₂ concentration were selected as the main evaluation parameters. Finally, all samples were ranked using the multi-criteria decision-making (MCDM) TOPSIS method.

Results and Discussion: The results revealed that the stepped form facing the wind direction (C-04) performed best in enhancing airflow and reducing pollutant concentration. Conversely, the L-shaped form parallel to the wind direction (B-01) exhibited the weakest performance. Comparison with ASHRAE standards showed that only the C-pattern fell within the acceptable range of natural ventilation.

Conclusion: The findings emphasize that building form design is not merely an aesthetic decision but a crucial determinant of environmental health and thermal comfort. Even minor adjustments in the orientation or proportions of a building can significantly improve airflow behavior and reduce pollutant penetration. Consequently, adopting stepped or articulated building forms in dense residential areas can serve as an effective strategy for improving indoor air quality and mitigating the adverse impacts of urban pollution. Considering such design factors from the early stages of urban planning can contribute to achieving sustainable and health-oriented architecture.

Keywords: Building form, Air quality, Air pollution, Air velocity, Low-rise buildings, Computational Fluid Dynamics (CFD).

¹Ph.D. in Architecture, Department of Architecture and Urban Planning, Yasuj Branch, Islamic Azad University, Yasuj, Iran.

²Associate Prof. of Architecture, Faculty Member of Department of Architecture, Yasouj Uni., Yasouj, Iran (Corresponding Author) Aliakbar_heidari@yu.ac.ir.

³Associate Prof., Department of Architecture and Urban Planning, Yasouj Branch, Islamic Azad Uni., Yasouj, Iran.

مطالعه CFD فرم ساختمان و تأثیر آن بر کیفیت هوای داخل در بافت مسکونی شهری

(مورد پژوهی: منطقه یک شهر شیراز)

مژگان کمالی¹، علی اکبر حیدری^{2*} و یعقوب پیوسته گر³

تاریخ پذیرش: 03/دی/1402	تاریخ بازنگری: 16/مهر/1402	تاریخ دریافت: 21/تیر/1402
(صفحات: 219-197)		

چکیده

مقدمه: افزایش آلودگی هوا در شهرهای بزرگ و تأثیر مستقیم آن بر سلامت ساکنان، ضرورت توجه به کیفیت هوای داخل ساختمان‌ها را بیش از پیش آشکار کرده است. یکی از عوامل مؤثر در این زمینه، فرم و آرایش ساختمانی در بافت شهری است که بر الگوی جریان باد و میزان نفوذ آلاینده‌ها اثرگذار است. پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر فرم ساختمان بر تهویه طبیعی و کیفیت هوای داخل در بافت مسکونی شهر شیراز انجام شده است.

روش تحقیق: سه الگوی رایج فرم ساختمانی شامل پلکانی، L شکل و T شکل با چرخش‌های مختلف در یک بافت منظم شبیه‌سازی شدند. تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار Autodesk CFD و مدل آشفتگی SST k- ω انجام گرفت و شاخص‌های سرعت جریان و غلظت آلاینده NO_2 به عنوان معیارهای اصلی ارزیابی در نظر گرفته شدند. در پایان، نمونه‌ها با روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس رتبه‌بندی شدند.

نتایج و بحث: نتایج نشان داد فرم پلکانی در جهت‌گیری رو به باد (C-04) بیشترین کارایی را در افزایش سرعت جریان هوا و کاهش غلظت آلاینده‌ها دارد. در مقابل، فرم L شکل موازی با جهت باد (B-01) ضعیف‌ترین عملکرد را نشان داد. مقایسه الگوها با استانداردهای ASHRAE نیز بیانگر آن بود که تنها الگوی C در محدوده قابل قبول تهویه طبیعی قرار می‌گیرد.

نتیجه‌گیری: یافته‌ها تأکید می‌کنند که طراحی فرم ساختمان نه تنها جنبه‌ای زیبایی‌شناسانه، بلکه نقشی حیاتی در سلامت محیطی و آسایش حرارتی دارد. تغییرات جزئی در نحوه چرخش یا تناسب فرم می‌تواند رفتار جریان هوا را به‌طور چشمگیری بهبود بخشد و نفوذ آلاینده‌ها را کاهش دهد. در نتیجه، به کارگیری فرم‌های پلکانی یا ترکیبی با سطوح شکست‌دار در طراحی بافت‌های مسکونی متراکم می‌تواند راهکاری کارآمد برای ارتقای کیفیت هوای داخل ساختمان‌ها و کاهش اثرات منفی آلودگی شهری باشد. توجه به این ملاحظات در مراحل اولیه طراحی شهری، گامی مؤثر در جهت تحقق معماری پایدار و سلامت‌محور است.

واژگان کلیدی: فرم ساختمان، کیفیت هوا، آلودگی هوا، سرعت هوا، ساختمان‌های کم ارتفاع، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD).

¹ دکترای معماری، گروه معماری و شهرسازی، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران.

² دانشیار معماری، عضو هیئت علمی گروه معماری دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران (نویسنده مسئول). Aliakbar_heidari@yu.ac.ir

³ دانشیار گروه معماری و شهرسازی، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران.

1- مقدمه

فرم، مفهومی فراگیر است و معانی مختلفی را شامل می‌شود. در هنر و طراحی، این واژه عموماً به عنوان فرم ساختاری به کار برده می‌شود که به معنی نحوه سازماندهی و چیدمان عناصر و قسمت‌های مختلفی است که ترکیب‌بندی را می‌سازند و تصویری یکپارچه ارائه می‌دهند. هر فرم دارای ویژگی شکل، اندازه، رنگ و بافت مشخصی است (Ching, 2022). یک فرم بیرونی موضوعات مهمی مانند: خصوصیات مواد، روش‌های ایجاد فرم و بهره‌وری را بیان می‌کند. همیشه بین فرم (تصویر) ساختمان و معنای بیان شده آن در معماری ایرانی رابطه عمیقی وجود داشته است. دسته‌های مختلف این رابطه با توجه به مکانیسم معماری شامل ساختار فیزیکی و سازمان فضایی است (Sabounchi, 2020).

کیفیت هوای داخلی اشاره به چگونگی هوای داخل و اطراف سازه‌ها و ساختمان‌ها دارد که مرتبط با راحتی و سلامتی ساکنان آن است. اطلاع از آلاینده‌های داخلی رایج و کنترل آن‌ها می‌تواند خطرات ناشی گرفته از آنها را کاهش دهد و کیفیت هوا را بهبود بخشد. 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 (Mostafazadeh & Savalanpour, 2016).

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 (J. Yang et al., 2020). بر همین اساس هدف از پژوهش حاضر تحلیل تیپولوژیک فرم ساختمان‌ها (با تغییر در

ساختار فیزیکی و ثابت بودن سازمان فضایی) 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. بر این اساس سؤالات به شرح زیر قابل طرح هستند:

- تغییر در الگوی بافت شهری (متأثر از تغییر فرم و آرایش ساختمان) چه تأثیری بر نفوذ آلاینده‌ها (افزایش یا کاهش غلظت آلاینده درون ساختمان) درون ساختمان دارد؟
- مشخصه‌های فرم ساختمانی بهینه در ارتباط با تغییر الگوی رفتار باد در هر بافت شهری برای افزایش کیفیت هوا (سرعت بیشینه و غلظت آلاینده کمینه) چگونه است؟

1-1- پیشینه و مبانی نظری تحقیق

یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر شکل شهری مورفولوژی ساختمان است. مورفولوژی ساختمان به ویژگی‌های ساختمان، ساختار و طراحی ساختمان و هندسه ساختمان بستگی دارد (Geekiyange et al., 2017). می‌تواند شکل کلی یا پیکربندی داخلی سازه ساختمان را تعریف کند (Huybers, 2002). با ادامه سرعت شهرنشینی، تراکم بسیاری از شهرها نیز برای پاسخ‌گویی به تقاضای فزاینده برای فضای زندگی و کار در حال افزایش است (Glaeser, 2011). در همین حال، شکل و عملکرد یک شهر مدرن با خطوط سه بعدی محیط ساخته شده آن تعریف می‌شود بنابراین، مورفولوژی شهری، شکل سه بعدی یک شهر، پیامدهای قابل توجهی برای پایداری، کارایی و انعطاف‌پذیری، و کنترل آلاینده‌ها در یک شهر دارد (Bonczak & Kontokosta, 2019). از آنجایی که افراد بیشتر عمر خود را در داخل ساختمان‌ها می‌گذرانند، به راحتی می‌توان فهمید که مهمترین محیط در ارتباط با سلامت ما، محیط داخلی است. در چند سال گذشته، تعداد فزاینده‌ای از شواهد علمی نشان داده‌اند که هوای داخل ساختمان‌ها می‌تواند به طور جدی‌تری نسبت به هوای بیرون به‌ویژه در بزرگترین و صنعتی‌ترین شهرها آلوده

شود. منابع آلودگی که گازها یا ذرات را در هوا منتشر می‌کنند، علت اصلی مشکلات کیفیت هوای داخل ساختمان‌ها هستند (Tomčů'ik & Šenitková, 2013). هدف اصلی ساختمان‌ها ایجاد فضای داخلی مناسب‌تر برای افراد و فرآیندها نسبت به فضای باز است که باعث توجه روزافزون به محیط داخلی به عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل سلامت و رفاه کاربران ساختمان می‌شود. اما آنچه در ارتباط با اقلیم و آب‌وهوا مورد بررسی قرار می‌گیرد تنها اقلیم حرارتی نیست. بررسی حرکت آزاد هوا (باد) در یک پیکره‌بندی شهری، در بسیاری از مسایل محیطی مربوط به باد از جمله طراحی تهویه طبیعی و پراکندگی آلاینده هوا و ... بسیار مؤثر است. مسایل کیفیت هوای داخل ساختمان در ساختمان‌هایی که تهویه ناکافی دارند بیشتر دیده می‌شود. بدیهی است که برای به حداقل رساندن قرار گرفتن در معرض آلاینده‌های داخل ساختمان، نیاز به افزایش عرضه هوای بیرون به 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 از بهترین کیفیت برخوردار باشد یا غلظت عوامل منفی تا حد معقولی پایین باشد. دو رویکرد کلاسیک برای رسیدن به سطح مورد نیازی از کیفیت هوای داخلی برای کاهش نفوذ آلاینده‌ها وجود دارد. یکی از طریق رقیق‌سازی و دیگری با کنترل منبع آلاینده است. امروزه به نظر می‌رسد که رقیق‌سازی هنوز رویکرد پذیرفته شده‌تری است. این روشی است برای به دست آوردن کیفیت بهتر هوای داخلی (Senitkova, 2007). همان‌طور که گفته شد طراحی مناسب مورفولوژی و شکل شهری یکی از عواملی است که می‌تواند به کاهش آلاینده‌ها در فضای داخلی کمک کند. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2022)، در پژوهش خود به بررسی تأثیر ارتفاع و تراکم ساختمان بر کیفیت هوای شهری در 15 شهر در کشور چین پرداخته‌اند. پژوهش آنها راهکارهایی برای بهبود شرایط فضای شهری با کاهش آلودگی هوا ارائه می‌دهد. ماینگ (Maing, 2022)، در پژوهش خود به بررسی تأثیر تراکم بلوک‌ها بر الگوی تهویه شهری پرداخته است. بر اساس نتایج او،

بلوک‌های بزرگ باید از طریق افزایش تخلخل، نه تنها در امتداد محیط، بلکه با افزودن حفرات درونی (void) به یک مدل برنامه‌ریزی شهری سالم، قابل زندگی و قابل تنفس تبدیل شوند. چن و همکاران (Chen et al., 2021)، تأثیر مورفولوژی و هندسه شهری بر تهویه خارجی در تعدادی ردیف ساختمانی را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که افزایش فاصله ساختمان‌ها باعث افزایش میانگین سرعت هوا در سطح حرکت عابرین پیاده می‌شود. همچنین در بافت نقطه‌ای منظم نسبت به نا منظم، میانگین سرعت هوا بیشتر است. پنگ و همکاران (Peng et al., 2021)، تهویه شهری در خیابان‌های یک بافت مسکونی شهری و تأثیر چرخش ساختمان و جهت خیابان بر تهویه را مورد تحقیق قرار داده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داد که خیابان‌های شمالی-جنوبی نسبت به خیابان‌های شرقی-غربی تهویه بهتری برای همه جهت‌های باد ایجاد می‌کنند. حسان و همکاران (Hassan et al., 2020)، بهبود کیفیت هوای خارج با توجه به فرم نمای ساختمان را بررسی نموده‌اند. با توجه به این تحقیق، نمونه‌های دارای نما با صفحات عمودی، افقی و شبکه‌ای، غلظت آلاینده PM_{10} را بین 70 تا 90 درصد کاهش می‌دهند. جوانرودی و همکاران (Javanroodi et al., 2018)، تأثیر فرم ساختمان بر افزایش پتانسیل تهویه خارجی، در اقلیم گرم‌وخشک را بررسی کردند. بر اساس این پژوهش فرم مناسب ساختمان در بافت شهری می‌تواند پتانسیل تهویه‌ی خارجی را تا 15 درصد افزایش دهد. یاسین (Yassin, 2011)، تأثیر شکل و ارتفاع سقف بر کیفیت هوای خارجی در خیابان را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که با کاهش ارتفاع سقف، غلظت آلاینده افزایش می‌یابد. همچنین سقف‌های شیب‌دار و دوزنقه‌ای شکل غلظت آلاینده را کاهش می‌دهند اما سقف مسطح آن را افزایش می‌دهد.

در بیشتر تحقیقات پیشین به ارزیابی میزان ارتباط شکل شهری و تهویه هوا و در تعداد کمی به ارتباط شکل شهری و کیفیت هوا و فراوانی آلاینده‌ها توجه شده است. این تحقیقات که عموماً موضوع تهویه هوا و کیفیت هوا را در سه مقیاس شهر، محله و بلوک شهری مورد بررسی

قرار می‌دهند، 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 برنامه ریزی و طراحی شهری به منظور بهبود تهویه هوا و کیفیت هوا و ایجاد یک محیط شهری سالم و پایدار منجر می‌شود (Ewing & Rong, 2008).

- در اکثر پژوهش‌های انجام شده، میزان آلاینده‌ها عموماً در فضای بیرون مورد بررسی قرار گرفته و کمتر پژوهشی بر تأثیر این متغیر در فضای داخلی ساختمان تمرکز نموده است؛
- در بیشتر پژوهش‌ها دو متغیر سرعت هوا و غلظت آلاینده‌ها به عنوان متغیر وابسته مورد سنجش قرار گرفته است؛
- روش مورد استفاده در این تحقیقات عموماً روش‌های تجربی شامل استفاده از آزمایش در مقیاس واقعی و یا کوچک شده، استفاده از روش شبیه‌سازی CFD و روش‌های ترکیبی شامل استفاده از روش تجربی و شبیه‌سازی به صورت توأمان است. در این ارتباط استفاده از روش‌های تحلیل CFD (با استفاده از نرم‌افزار) از عمومیت بیشتری برخوردار بوده است.

- در تعداد کمی از پژوهش‌های انجام شده، تأثیر مورفولوژی شهری بر کیفیت هوا و میزان انتشار آلودگی مورد بررسی قرار گرفته است؛
- فرم شهری، فرم نمای ساختمان‌ها و شبکه معابر و ارتفاع و تراکم ساختمان‌ها از جمله مهم‌ترین شاخص‌هایی هستند که تأثیر آنها بر کیفیت هوا و الگوی انتشار آلودگی مورد بررسی قرار گرفته است؛
- در این پژوهش‌ها، آلاینده‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که از جمله مهم‌ترین آنها می‌توان به

جدول 1- پیشینه تحقیق

Tab. 1- Research background

نویسنده	موضوع اصلی	مؤلفه‌ها	ذرات آلاینده	شاخص‌ها	روش مطالعه (نظری / تجربی)
(Zhang et al., 2022)	فرم بلوک شهری	ارتفاع و تراکم ساختمان	PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 , CO , O_3 , and SO_2	C	مقیاس واقعی
(Maing, 2022)	فرم بلوک شهری	تراکم بلوک	—	$\bar{V}$	مقیاس واقعی / CFD
(Chen et al., 2021)	مورفولوژی	عرض خیابان، ارتفاع ساختمان، آرایش ساختمان	—	ACH, T, $\bar{V}$	CFD
(Peng et al., 2021)	فرم بلوک شهری	چرخش ساختمان و جهت خیابان	—	LMA, $\bar{V}$, τ_d	CFD
(Qin et al., 2020)	انواع سایت و ساختمان	شکل ساختمان با توجه به فرم شهری	NO_2	LMA, $\bar{V}$, C	CFD
(Gülten & Öztö, 2020)	پیکربندی شهری	موقعیت خیابان و ساختمان (آرایش و فرم ساختمان)	—	$\bar{V}$	CFD
(Hassan et al., 2020)	مورفولوژی	فرم نمای ساختمان	PM_{10}	C	CFD
(Javanroodi et al., 2018)	فرم بلوک شهری	فرم ساختمان	—	$\bar{V}$, C_p	CFD
(Shirzadi et al., 2018)	پیکربندی شهری	آرایش و تراکم شهری	—	Q, $\bar{V}$, C_p	CFD
(Peng et al., 2017)	مورفولوژی	شکل‌های متفاوت با جهت-گیری‌های مختلف	—	T, $\bar{V}$	CFD
(Mei et al., 2017)	مورفولوژی	تراکم ساختمان	—	ACH, Q, LMA, $\bar{V}$	CFD
(Azizi & Javanmardi, 2017)	فرم بلوک شهری	ارتفاع و عرض بلوک شهری	—	$\bar{V}$, C_p	CFD
(F. Yang et al., 2013)	فرم و تراکم شهری	فرم شهری و فرم ساختمان	—	T, $\bar{V}$	مقیاس واقعی
(Yassin, 2011)	فرم بلوک شهری	شکل و ارتفاع سقف	—	C, $\bar{V}$	CFD

• در این پژوهش‌ها، فرم ساختمان و تأثیر آن بر الگوی انتشار آلاینده‌ها در محیط درون بنا کمتر مورد بررسی قرار گرفته است.

• جایگاه منحصر به فرد و نوآوری اصلی پژوهش حاضر در میان پژوهش‌های پیشین در موارد زیر قابل تبیین است:

• تمرکز بر کیفیت هوای "داخلی" در ارتباط با "فرم کلی ساختمان":
بسیاری از پژوهش‌های پیشین، اگرچه به کیفیت هوا و تهویه پرداخته‌اند، اما تمرکز اصلی آن‌ها بر فضای "خارجی" ساختمان و محوطه شهری بوده است. تعداد کمی از تحقیقات به تأثیر مستقیم متغیرهای مورفولوژیک بر کیفیت هوای "داخلی" ساختمان پرداخته‌اند. تحقیق حاضر به طور خاص بر میزان ورود آلاینده‌ها و تغییر الگوی جریان هوا در "فضای درونی" ساختمان در پاسخ به تغییرات فرم ساختمان تمرکز دارد. این تمایز حیاتی است، چرا که ساعات زیادی از زندگی روزمره افراد در داخل ساختمان سپری می‌شود و کیفیت هوای داخلی تأثیر مستقیمی بر سلامت و آسایش آن‌ها دارد.

• بررسی جامع و تطبیقی فرم‌های رایج ساختمان در یک بافت مسکونی خاص:

در حالی که برخی مطالعات به بررسی تأثیر فرم‌های خاص یا عناصر جزئی‌تر (مانند نمای ساختمان) پرداخته‌اند، این پژوهش با استخراج و مقایسه سیستماتیک سه فرم رایج و کلی ساختمان‌های کوتاه‌مرتبه (پلکانی، L شکل، و T شکل) در حالات مختلف چرخش، رویکردی جامع‌تر را در پیش گرفته است.

• ترکیب تحلیل CFD با روش تصمیم‌گیری چندمعیاره برای بهینه‌سازی فرم:

این تحقیق علاوه بر شبیه‌سازی‌های CFD برای ارزیابی پارامترهای سرعت هوا و غلظت آلاینده NO_2 ، از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس (TOPSIS) نیز بهره برده است. این رویکرد این امکان را می‌دهد تا با در نظر گرفتن همزمان چندین معیار (سرعت هوا و غلظت آلاینده)، به شناسایی "بهترین" و "بدترین" الگوهای

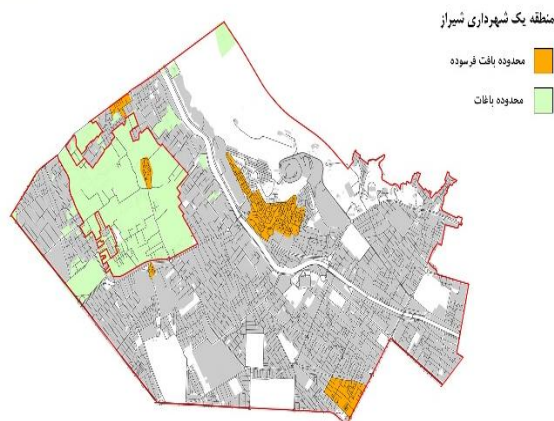
فرمی از منظر کیفیت هوای داخلی پرداخته شود. این ترکیب از تحلیل شبیه‌سازی و ارزیابی جامع با استفاده از MCDM، به ارائه راهکارهای طراحی مشخص و قابل اتکا کمک

می‌کند و وجه تمایز دیگری برای این پژوهش است. به طور خلاصه، در حالی که پژوهش‌های پیشین عمدتاً بر تهویه و کیفیت هوای خارجی و تأثیرات مورفولوژی شهری بر آن متمرکز بوده‌اند، تحقیق حاضر با کاوش عمیق‌تر در چگونگی تأثیر "فرم ساختمان" بر "کیفیت هوای داخلی" و با رویکردی تطبیقی بر روی فرم‌های رایج و استفاده از تحلیل چندمعیاره برای بهینه‌سازی طراحی، جایگاه ویژه‌ای در ادبیات موضوع پیدا می‌کند و به پر کردن شکاف‌های موجود در دانش مرتبط با طراحی اقلیمی و سلامت ساختمان کمک شایانی می‌نماید.

2- روش تحقیق

بر اساس آنچه عنوان شد در این پژوهش به تحلیل تأثیر مورفولوژی شهری بر نحوه انتشار آلودگی ناشی از ترافیک وسایل نقلیه پرداخته می‌شود. الگوی مورفولوژی شهری بر اساس فرم بافت‌های مسکونی موجود در شهر شیراز انتخاب شد. از میان آلاینده‌های متأثر 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 پژوهش به این صورت انجام شد که در گام نخست با استفاده از نرم‌افزار Grasshopper، آلترناتیوهای مختلف فرم ساختمان در یک بافت مسکونی میان مرتبه بر اساس دو متغیر حجم و ضریب فشردگی تولید شد. (فرم‌های تولید شده در نرم‌افزار گرس‌هاپر با کدهای داده شده به نرم‌افزار (بر اساس تعداد مدول‌ها، تعداد طبقات و...) مقایسه شد و صحت آن توسط نگارندگان مورد بررسی قرار گرفت که نشان دهنده تطابق فرم‌های تولیدی با ورودی‌های نرم‌افزار بود). در مرحله بعد، از بین فرم‌های تولید شده، شبیه‌ترین گزینه‌ها به ساختمان‌های موجود در بافت مسکونی منطقه یک شهر شیراز انتخاب شدند. با استفاده از تکنیک نمونه‌گیری هدفمند با مطالعات میدانی انجام شده در مورد فرم ساختمان‌های سه طبقه

شهر گرم‌ونیمه‌خشک (BSH) است (Landofaryan, 2011). با توجه به نتایج ایستگاه سینوپتیک ماهانه و سالانه شهر شیراز، متوسط دمای سالانه در این شهر به ترتیب 17 و 19 درجه سانتی‌گراد و میانگین سرعت سالانه باد 6.48 متر بر ثانیه است (Tutiempo Network, 2021; Mohammadi & Roshan, 2009). مطابق گلباد سالیانه شیراز باد غالب شهر از سمت شمال غربی است (EPW data (2007-2021) in Climate Consultant 6.0 software). شهر شیراز از یازده منطقه تشکیل شده است که منطقه 1، 2 و 4 پرجمعیت‌ترین و مناطق 1، 6، 9 و 10 دارای بیشترین مساحت است. 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 1 تا 4 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 1).



شکل 1- نقشه منطقه یک شهر شیراز
Fig. 1- Map of District 1 of Shiraz City

2-2- نمونه‌های مورد تحقیق

2-2-1- تولید فرم ساختمان‌ها

همان‌گونه که پیش از این اشاره شد، در این پژوهش به منظور تولید فرم از الگوریتم اگریگیشن (aggregation) در نرم‌افزار گرس‌هاپر استفاده شد. برای این منظور از پلاگین وِاسپ (wasp) استفاده شد. فرم‌های تولید شده از یک مکعب با ابعاد $9 \times 9 \times 9$ ساخته شد که خود

مسکونی منطقه یک شهر شیراز، فرم‌هایی که دارای فراوانی بالاتری بودند، به سه فرم ساختمانی محدود شدند که منطبق بر فرم‌های متناظر خود، تولید شده در نرم‌افزار گرس‌هاپر، بودند. سایر فرم‌های تولید شده در گرس‌هاپر به دلیل عدم انطباق با فرم‌های منطقه یک شهر شیراز و یا فراوانی پایین فرم‌ها در این منطقه، مورد بررسی قرار نگرفته و حذف شده‌اند. در مرحله سوم انواع بافت‌هایی که از چرخش الگوی ساختمانی انتخاب شده قابل استخراج بودند، تعیین شد. بافت‌های تعیین شده در مرحله چهارم با استفاده از شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار CFD مورد تحلیل قرار گرفت 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 رتبه‌بندی شوند. مبنای مقایسه نتایج و به بیان دیگر، معیارهای مورد استفاده در روش تصمیم‌گیری چند معیاره تاپسیس در این پژوهش رسیدن به سرعت هوای بیشینه و غلظت آلاینده‌ی کمینه بوده است). متغیرهای مورد بررسی در پژوهش حاضر در جدول 2 قابل مشاهده است.

جدول 2- متغیرهای تحقیق

Tab. 2- Research variables

فرم ساختمان (ثابت‌ها: ارتفاع، حجم و تعداد طبقات)	
متغیرها: ضریب فشردگی و به تبع آن مساحت سطح اشغال، نسبت ارتفاع به مساحت سطح اشغال، مساحت دیوار، مساحت پوسته، مساحت طبقات، محیط، طول، عرض، متغیر)	متغیر مستقل
کیفیت هوا (سرعت هوا و غلظت آلاینده)	متغیر وابسته
تهویه طبیعی	متغیر میانجی

2-2-1- معرفی محدوده مورد مطالعه

شیراز پنجمین شهر پرجمعیت ایران و مرکز استان فارس است (SCI, 2022) بر اساس دسته‌بندی کوپن، اقلیم این

متشکل از 27 سلول مکعبی با ابعاد $3 \times 3 \times 3$ هستند. خروجی این بخش، تولید 100 فرم بود که دارای حجم ثابت و ضرایب فشردگی مختلف بودند (شکل 2). در فرایند تولید این فرم‌ها دو قانون در گرس‌هایپر تعریف شد:

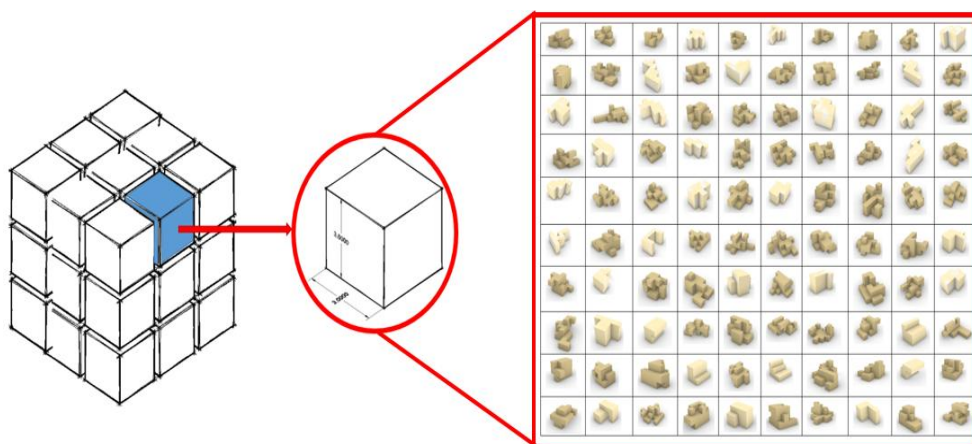
- 1- سلول‌های تولیدی باید از لبه به یکدیگر متصل شوند نه از گوشه‌ها؛
- 2- پیکره‌بندی‌های (configuration) تولید شده باید یک فرم یکپارچه باشد و نمی‌تواند از دو فرم مجزا تشکیل شده باشد.

2-2-2- 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 3). 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 موردی مورد استفاده قرار گرفت.

از میان 100 نمونه فرم تولید شده در گرس‌هایپر در مرحله قبل، 3 نمونه دارای بیشترین شباهت با ساختمان‌های

موجود در منطقه 1 شهر شیراز بودند. بر همین اساس از این 3 فرم به منظور تولید بافت‌های نمونه موردی استفاده شد. نمونه‌های موردی در این پژوهش شامل بافت‌هایی با الگوی نقطه‌ای منظم هستند که متشکل از یک ساختمان هدف و 24 ساختمان در اطراف آن است (شکل 3). ساختمان هدف در تمام نمونه‌های موردی دارای فرم یکسان مکعب مستطیل شکل با ابعاد $3H \times 15L \times 9W$ 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 3 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 شده‌اند. با توجه به ثابت بودن جهت باد (شمال غربی به جنوب شرقی)، به منظور تحلیل تأثیر باد بر وجوه مختلف فرم‌ها، چهار چرخش 90 درجه‌ای بر فرم‌ها اعمال شد و به این ترتیب تعداد بافت‌های نمونه موردی به 12 نمونه ارتقا یافت (جدول 4). علاوه بر این 12 بافت نمونه موردی، در این پژوهش یک بافت نیز به عنوان نمونه مرجع در نظر گرفته شد که در آن تمام 24 ساختمان تشکیل دهنده بافت، به فرم یک مکعب ساده پیرامون ساختمان هدف چیده شده‌اند (شکل 3). منبع آلودگی در این پژوهش، یک خیابان با عرض 12 متر واقع در شمال غربی سایت است (شکل 3).

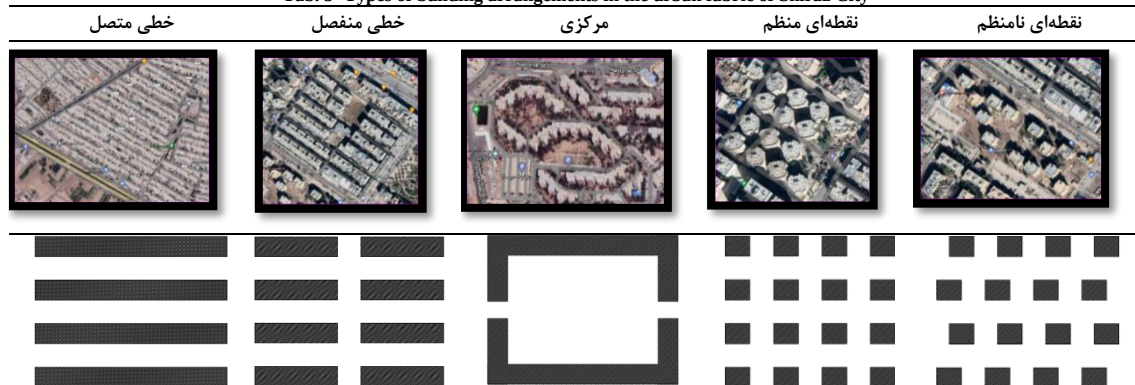


شکل 2- 100 فرم ساختمانی تولید شده در گرس‌هایپر بر اساس الگوریتم اگریگیشن

Fig. 2- 100 building forms generated in Grasshopper based on the aggregation algorithm

جدول 3- انواع آرایش ساختمانی بافت شهری در شهر شیراز

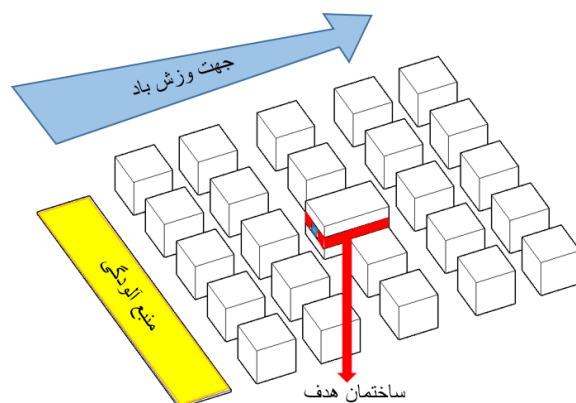
Tab. 3- Types of building arrangements in the urban fabric of Shiraz City



جدول 4- نمونه‌های موردی با توجه به بافت شهری، فرم ساختمان‌ها و نحوه چرخش ساختمان‌ها

Tab. 4-Case studies based on urban fabric, building forms, and building orientation patterns

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



شکل 3- فرم بافت نمونه مبنا و مدول‌های آن

Fig. 3- The base sample fabric form and its modules

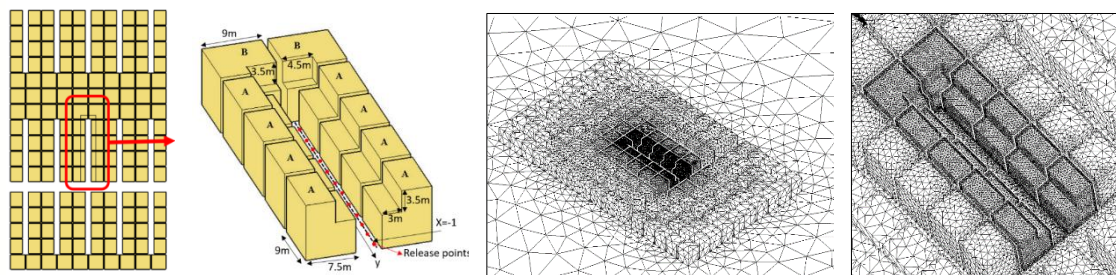
2-3- اعتبارسنجی نرم افزار مورد بررسی

نرم افزار مورد استفاده در پژوهش حاضر Autodesk CFD (2018) است. اعتبارسنجی این نرم افزار بر اساس پژوهش Bady et al., 2011 انجام شده است. در پژوهش آنها چهار مدل همسان از ساختمان های شهری مورد بررسی قرار گرفته است که تیپ I به منظور اعتبار سنجی در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است. اندازه گیری ها در ارتفاع عابر پیاده در امتداد خیابان محصور شده توسط بلوک های نوع A و B انجام شده است (شکل 4). در ساخت این مدل هشت بلوک نوع A و دو بلوک نوع B با ارتفاع یکسان (9 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 جهت های مختلف باد فراهم شود. در پژوهش (Bady et al.,) شش جهت برخورد باد با مدل مورد تحلیل قرار گرفته است که در این پژوهش، اعتبار سنجی تنها تحت زاویه 0° و 90° انجام شده است. نتایج شبیه سازی در قالب نمودارهای سرعت باد و غلظت آلاینده ها در ارتفاع 1.5 متری از سطح زمین در فضای مرکزی مدل ارائه می شود.

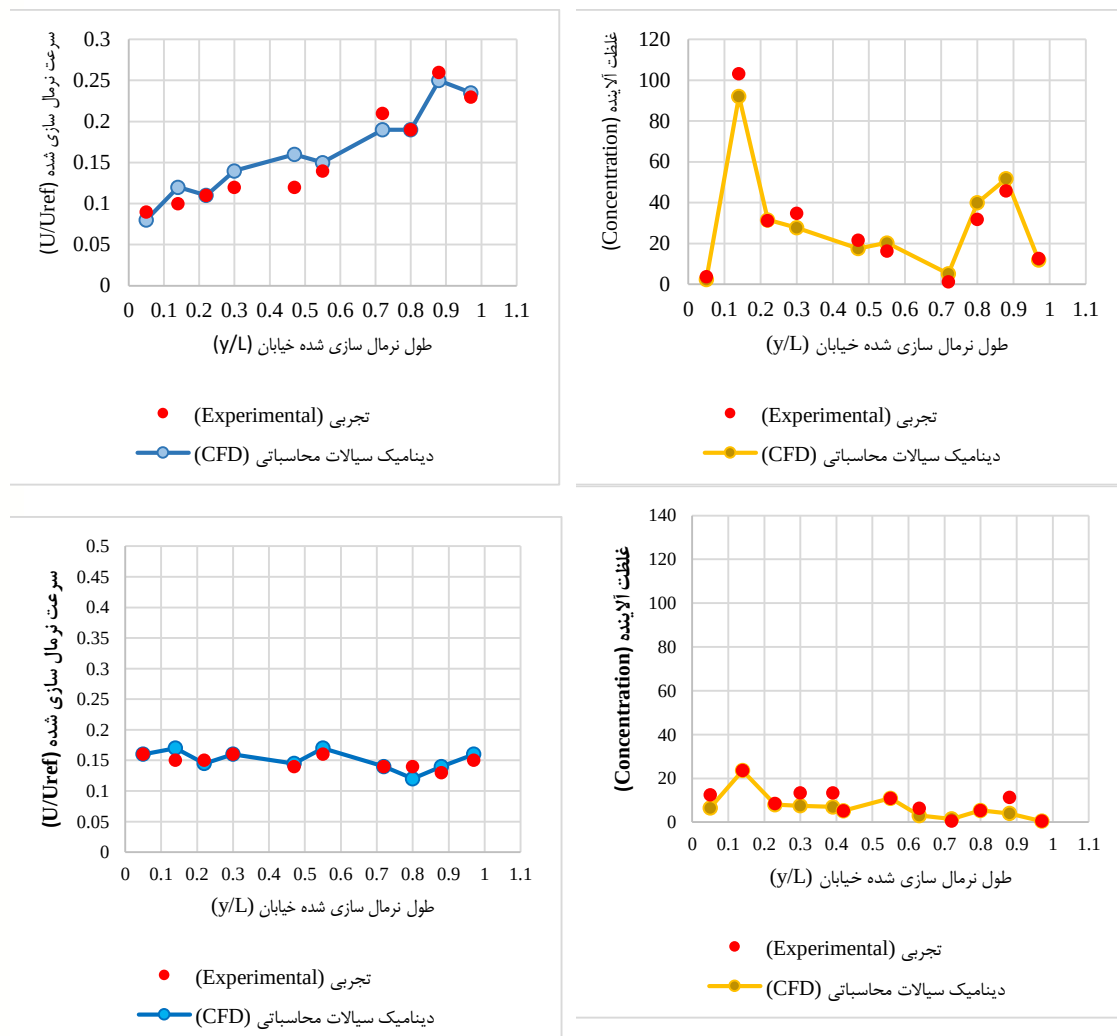
اندازه گیری سرعت باد ورودی و شدت آشفتگی جریان برخوردی با استفاده از بادسنج دمای ثابت کاوشگر سیم داغ 1 بعدی (CTA, Dantec) با فرکانس 1.0 کیلوهرتز و زمان نمونه برداری 65 ثانیه در هر مکان اندازه گیری انجام شده است. برای اندازه گیری سرعت باد، سرعت مرجع 4.6 متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. در حالی که برای اندازه گیری غلظت گاز، سرعت 0.78 متر بر ثانیه اعمال شده است. اندازه گیری غلظت آلاینده با یک آشکارساز یونیزاسیون شعله با پاسخ دهی بالا (FID) (THC-2 A, TECHNICAS) مجهز به سوزن نمونه برداری به طول 11 میلی متر و قطر 0.15 میلی متر انجام شده است. مخلوطی از اتیلن و هوای مصنوعی به عنوان گاز ردیاب استفاده می شود. غلظت اتیلن در گاز ردیاب 12100 ppm است. یک کنترل کننده جریان جرمی (Ohkura-Rikens) میزان جریان مخلوط هوای مصنوعی

اتیلن را تنظیم می کند که از نقاط رهاسازی آزاد می شود. یک سیستم اکتساب داده (NR-2000 KEYENCE) همراه با یک رایانه شخصی برای ثبت داده های غلظت استفاده می شود. فرکانس نمونه برداری 10 هرتز برای 45 ثانیه برای میانگین غلظت در هر مکان اندازه گیری در نظر گرفته شده است

شبکه محاسباتی متشکل از یک شبکه 1064479 سلولی دارای سلول های چهار وجهی برای اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفته است (شکل 4). با توجه به این که نتایج ارائه شده در نمونه اعتبار سنجی بر اساس دو متغیر سرعت هوا و غلظت آلاینده ارائه شده است لذا در این پژوهش نیز دو مدل مجزا با سرعت های متفاوت در ورودی شرایط مرزی استفاده شده است؛ به این ترتیب به منظور بررسی داده های سرعت هوا و غلظت آلاینده، به ترتیب از سرعت های 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- ω جهت حل استفاده شده است و جریان شبیه سازی شده تراکم ناپذیر است. در بخش جنرال اسکالار ضریب انتشار $1.37e-05 \text{ m}^2/\text{s}$ برای آلاینده اتیلن، وارد شده است. در شبیه سازی اعتبارسنجی، مقادیر متوسط خارج شده باقی مانده (ARO) برای میدان سرعت u ، 10^{-5} متر بر ثانیه، برای میدان سرعت v ، 10^{-6} متر بر ثانیه، و برای فشار برابر با 10^{-11} پاسکال است. شکل 5 مقایسه نتایج CFD و داده های تجربی پژوهش بیدی و همکارانش (2011) را در ارتباط با دو متغیر سرعت باد و غلظت آلاینده ها نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود، انطباق نسبتاً زیادی میان نتایج CFD و Experiment وجود دارد. میانگین خطا در جهت باد 0° ، برای سرعت باد 9% و برای غلظت آلاینده ها، 7% و در جهت 90° وزش باد، برای سرعت باد 5% و برای غلظت آلاینده ها، 6% است. بنابراین می توان اعتبار نرم افزار را جهت شبیه سازی نمونه های پژوهش حاضر تأیید نمود.



شکل 4- آرایش خیابان‌ها در مدل اعتبارسنجی (سمت چپ) و شبکه محاسباتی در نرم‌افزار Autodesk CFD (سمت راست)
Fig. 4- Street arrangement in the validation model (left) and computational grid in Autodesk CFD software (right)



شکل 5- مقایسه نتایج تونل باد و CFD در اعتبارسنجی، سرعت باد (بالا سمت چپ) و غلظت آلاینده (بالا سمت راست) در جهت 0° وزش باد و سرعت باد (پایین سمت چپ) و غلظت آلاینده (پایین سمت راست) در جهت 90° وزش باد

Fig. 5- Comparison of wind tunnel and CFD validation results: wind speed (top left) and pollutant concentration (top right) under 0° wind direction, and wind speed (bottom left) and pollutant concentration (bottom right) under 90° wind direction

2-4- تنظیمات شبیه‌سازی در CFD

در نظر گرفته شده است (شکل 6). در ساخت شبکه مش در دامنه محاسباتی از مش چهار وجهی استفاده شده است که تعداد سلول‌ها در نمونه‌های مورد تحقیق

با توجه به این‌که در نمونه‌های موردی، ارتفاع ساختمان‌های بافت، 9m است ($H=9m$)، ابعاد دامنه محاسباتی معادل $W \times D \times H = 249 \times 363 \times 90 \text{ m}^3$

استاندارد اشری مقایسه می‌شوند و با استفاده از روش چند معیاره تاپسیس نمونه‌های بهینه معرفی می‌شوند.

- نمونه مبنا

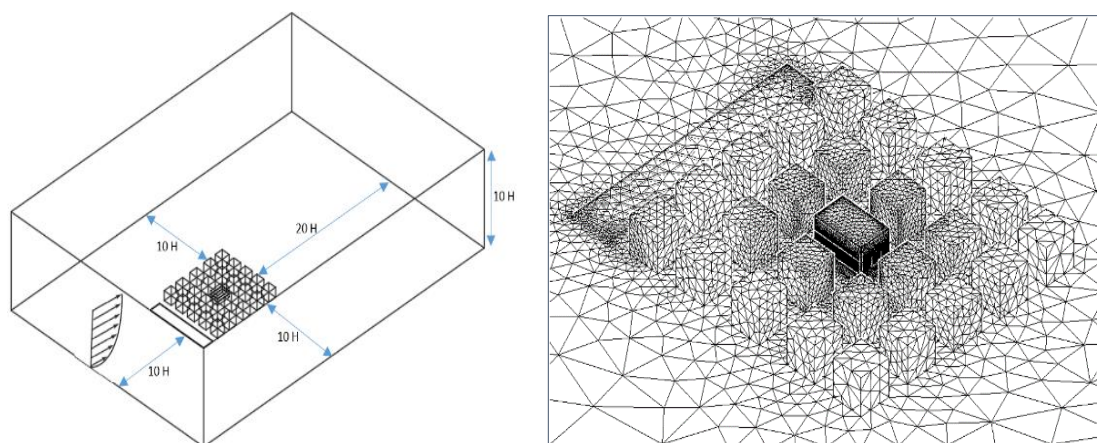
شکل 7 کانتورهای غلظت NO_2 را برای نمونه مبنا نشان می‌دهد. همان گونه که از کانتورها نمایان است، رنگ آبی نشان دهنده غلظت کم و رنگ قرمز نشان دهنده غلظت زیاد آلاینده‌هاست.

تأثیر فرم ساختمان در مقیاس شهری بر ورود آلاینده‌ها به داخل: کانتورهای غلظت (شکل 7) نشان می‌دهند که فرم ساختمان‌ها در بافت مسکونی، موجب افزایش چشم‌گیر غلظت آلاینده‌ها در جبهه پشت به باد ساختمان‌ها می‌شود. این تجمع آلاینده‌ها در نزدیکی نماها، به دلیل ایجاد گردابه‌های هوایی (Recirculation Zones) ناشی از برخورد باد با فرم ساختمان، خطر ورود بیشتر این آلاینده‌ها از طریق بازشوها به فضای داخلی را افزایش می‌دهد. برعکس، معابر شمالی- جنوبی که در امتداد جهت باد غالب قرار دارند، به دلیل هدایت و تسریع جریان باد در این گذرگاه‌ها (مشابه اثر معبر)، غلظت آلاینده‌های کمتری دارند. این تهویه مؤثرتر در فضاهای بیرونی می‌تواند به کاهش ورود آلاینده‌ها به ساختمان‌های مجاور در این معابر کمک کند.

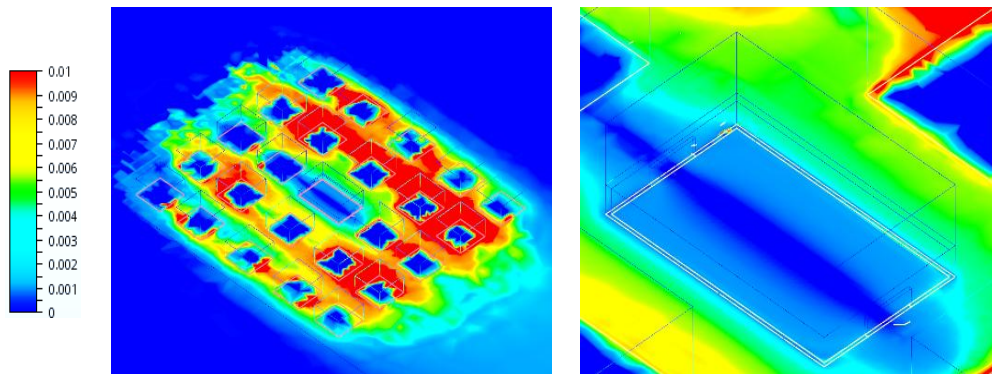
بین 1234231 تا 1285225 در نوسان است. در شکل 6 الگوی مش نمونه مبنا نشان داده شده است. در این پژوهش از مشخصات لایه مرزی جو (ABL) تحت شرایط خنثی در مدل سازی استفاده شده است. در ورودی دامنه سرعت 6.48 m/s و دمای 19.17 درجه سانتی گراد و در خروجی دامنه فشار استاتیکی صفر در نظر گرفته شده است. همچنین نرخ جریان جرمی 5 و اسکالار 0.01 برای منبع آلاینده در نظر گرفته شده است. سایر تنظیمات پارامترهای حل، برای شبیه‌سازی CFD نمونه‌ها، با تنظیمات استفاده شده در اعتبار سنجی یکسان است. با این تفاوت که آلاینده مورد تحلیل در نمونه‌های موردی، NO_2 است. بنابراین ضریب انتشار $1.54 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ، در بخش جنرال اسکالار وارد شده است. در شبیه‌سازی اصلی، مقادیر متوسط خارج شده باقی مانده (ARO) برای میدان سرعت u ، و میدان سرعت v 10^{-6} متر بر ثانیه، و برای فشار برابر با 10^{-8} پاسکال است.

3- نتایج و بحث

در این بخش به تحلیل نتایج شبیه‌سازی 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



شکل 6- دامنه محاسباتی (سمت چپ) و الگوی مش (سمت راست) در نمونه مبنا
Fig. 6- Computational domain (left) and mesh pattern (right) in the base model



شکل 7- کانتور غلظت برای نمونه مبنا

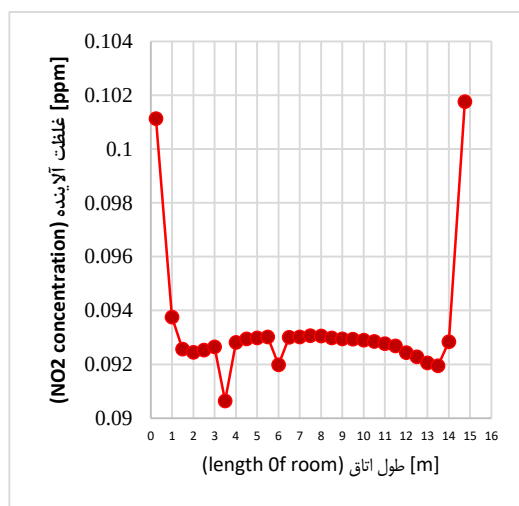
Fig. 7- Concentration contour for the base model

جریان هوای داخلی، که متأثر از فرم کلی اتاق و محل بازشوهاست، توزیع آلاینده‌های وارد شده از خارج را کنترل می‌کند. این یافته‌ها بر اهمیت فرم ساختمان و نحوه تعامل آن با جریان هوای بیرونی و داخلی در کنترل کیفیت هوای داخل تأکید دارند.

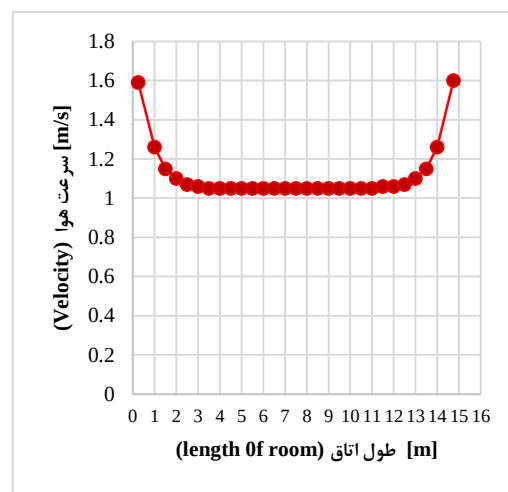
الگوی A -

در این بخش، بررسی تأثیر فرم T شکل ساختمان و چرخش 90 درجه‌ای آن (نمونه‌های A-01 تا A-04) بر الگوی جریان هوا در بافت و به تبع آن، ورود آلاینده‌ها و کیفیت هوای داخل ساختمان هدف انجام شده است.

شکل 8 و 9 به ترتیب مقادیر عددی سرعت هوا و غلظت آلاینده‌ها درون ساختمان هدف را در امتداد محور طولی اتاق و در ارتفاع 4.5 متری از سطح زمین نشان می‌دهد. تأثیر فرم ساختمان بر توزیع آلاینده در داخل: در مقیاس ساختمان هدف، فرم و موقعیت بازشوها مستقیماً بر کیفیت هوای داخل تأثیر می‌گذارند. همان‌طور که در شکل‌های 8 و 9 مشاهده می‌شود، افزایش غلظت آلاینده‌ها در نزدیکی بازشوهای ورودی و خروجی نشان‌دهنده نقاط اصلی ورود آلاینده‌های خارجی به داخل است. سرعت بالای جریان هوا در این نواحی (شکل 8) نقش انتقال‌دهنده آلاینده‌ها به درون را ایفا می‌کند. شیب غلظت در طول اتاق نیز تأیید می‌کند که الگوی

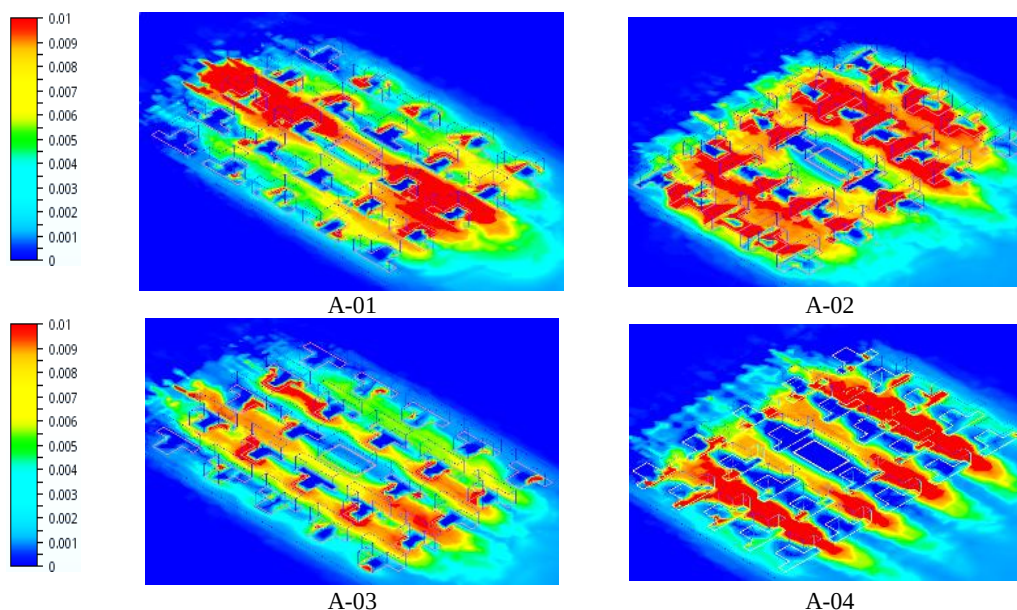


شکل 9- غلظت آلاینده در طول ساختمان هدف برای نمونه مبنا
Fig. 9- Pollutant concentration along the target building for the base model



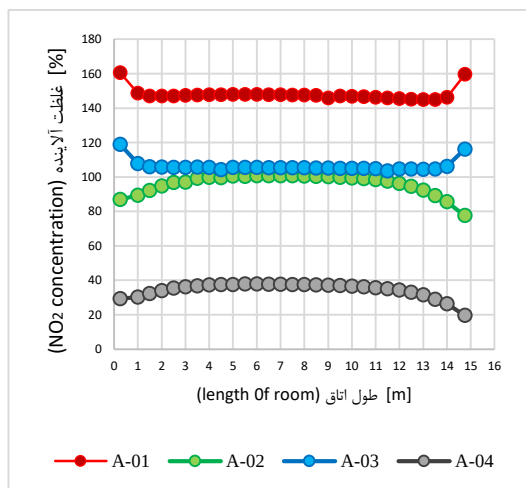
شکل 8- سرعت هوا در طول ساختمان هدف برای نمونه مبنا
Fig. 8- Air velocity along the target building for the base model

- نمونه‌های A-01 و A-03: جهت‌گیری ساختمان و انتقال آلاینده به داخل در A-01 و A-03، جهت‌گیری ساختمان هدف در سایت تأثیر مستقیمی بر توزیع آلاینده‌ها در محیط اطراف و سپس ورود آنها به فضای داخلی دارد. در A-01، فرم T شکل و نحوه قرارگیری آن باعث شده که بیشترین غلظت آلاینده‌ها در معبر شرقی تجمع یابد. این تجمع آلاینده‌ها در نزدیکی نما، مستقیماً منجر به افزایش غلظت در امتداد دیوار شرقی ساختمان هدف می‌شود که نشان‌دهنده ورود بیشتر آلاینده‌های خارجی از طریق بازشوهای این جبهه به داخل است. به همین ترتیب در A-03، چرخش ساختمان، تمرکز آلاینده‌ها را به معبر غربی و سپس به امتداد دیوار غربی ساختمان هدف منتقل کرده است. این همبستگی آشکار بین تجمع آلاینده در معبر و غلظت داخلی، بر نقش حیاتی جهت‌گیری فرم ساختمان در کنترل کیفیت هوای داخل تأکید می‌کند.
- مکش هوا و پیامدهای آن بر کیفیت داخلی در A-02: آرایش خاص بلوک‌های پیرامونی (بزرگترین ضلع رو به باد و ضلع کوچک پشت به باد) فضاهای خالی ایجاد می‌کند که منجر به مکش جریان هوا به سمت ضلع کوچک بلوک‌ها و افزایش غلظت آلاینده در آن نواحی می‌شود. اگرچه معابر اصلی اطراف
- ساختمان هدف غلظت کمتری دارند، اما این تجمع آلاینده در نزدیکی بلوک‌های همسایه می‌تواند بر کیفیت هوای داخلی ساختمان هدف، به خصوص در صورت وجود بازشوهای جانبی، تأثیر منفی بگذارد.
- ممانعت از جریان و محافظت از هوای داخلی در A-04: جهت‌گیری متفاوت بلوک‌های پیرامونی (بزرگترین ضلع در جبهه پشت به باد) یک سطح سایه باد بزرگتر ایجاد می‌کند. این بلوک مجاور ساختمان هدف مانند یک مانع مؤثر عمل کرده و با تغییر مسیر باد، تا حد زیادی از ورود آلاینده‌ها به ساختمان هدف جلوگیری نموده است (شکل 10). این نتیجه نشان می‌دهد که فرم و جهت‌گیری هوشمندانه ساختمان‌های همسایه می‌تواند به طور چشم‌گیری بر تهویه طبیعی و کاهش ورود آلاینده‌های خارجی به فضای داخلی کمک کند.
- تأثیر کلی چرخش فرم بر کیفیت هوای داخلی: مقایسه کلی الگوها، اهمیت فرم و جهت‌گیری ساختمان را در کنترل کیفیت هوای داخل به خوبی نشان می‌دهد. بیشترین غلظت آلاینده‌ها درون ساختمان هدف در A-01 و کمترین آن در A-04 مشاهده شده است (شکل 12). این تفاوت مستقیماً با الگوهای سرعت هوا (شکل 11) همخوانی دارد:

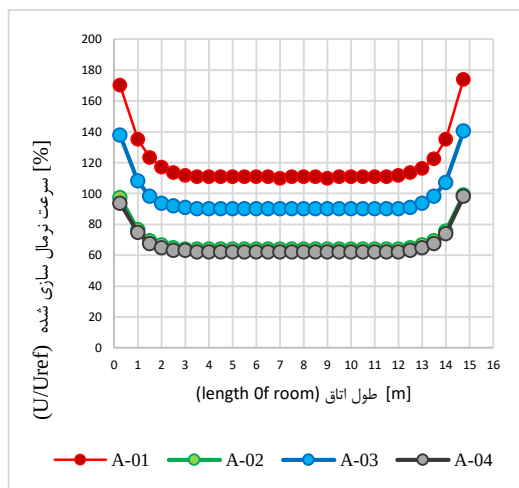


شکل 10- کانتور الگوی انتشار غلظت آلاینده‌ها در بافت شهری با الگو A

Fig. 10- Contour of pollutant concentration dispersion pattern in the urban fabric with Pattern A



شکل 12- غلظت آلاینده در طول ساختمان هدف برای الگوی A
Fig. 12- Pollutant concentration along the target building for Pattern A



شکل 11- سرعت هوا در طول ساختمان هدف برای الگوی A
Fig. 11- Air velocity along the target building for Pattern A

که جهت‌گیری مشابه بازوی L، الگوی انتشار آلاینده‌ها را به نحوی تغییر داده که بر کیفیت هوای داخلی ساختمان هدف تأثیر می‌گذارد.

- B-02 (جهت‌گیری فرم L و کاهش ورود آلاینده): در نمونه B-02، قرار گرفتن بازوی بزرگ‌تر فرم L در جبهه رو به باد، به طور مؤثری از ورود آلاینده‌ها به ساختمان هدف جلوگیری کرده است (شکل 13). این وضعیت به دلیل شکل‌گیری الگوی جریان هوای مطلوب در اطراف ساختمان است که آلاینده‌ها را از بازوهای ورودی دور می‌کند. اگرچه در این نمونه معابر غربی غلظت بیشتری دارند (به دلیل قرارگیری بازوی بزرگ‌تر در امتداد جبهه غربی)، اما فرم کلی و جهت‌گیری آن توانسته از انتقال این آلاینده‌ها به فضای داخلی ساختمان هدف جلوگیری نماید.

- تأثیر کلی چرخش فرم L بر کیفیت هوای داخلی: مقایسه سرعت و غلظت آلاینده‌ها در ساختمان هدف، تأثیر فرم L شکل و چرخش آن را بر کیفیت هوای داخلی آشکار می‌سازد. بیشترین غلظت آلاینده‌ها درون ساختمان هدف در B-01 و کمترین آن در B-02 مشاهده شده است (شکل 15). این یافته‌ها با الگوهای سرعت هوا (شکل 14) همخوانی دارند، جایی که بیشترین سرعت در B-03 و کمترین سرعت در B-01 مشاهده شده است. این نتایج به وضوح نشان می‌دهند که فرم L شکل ساختمان و

سرعت بالای هوا در A-01 انتقال آلاینده‌ها را افزایش داده، در حالی که کاهش سرعت در A-04 ورود آنها را محدود کرده است. این نتایج به وضوح بیانگر آن است که حتی تغییرات جزئی در چرخش فرم ساختمان T شکل، می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر الگوی جریان هوا در مقیاس شهری و به تبع آن، بر میزان و نحوه ورود آلاینده‌های بیرونی و در نهایت، کیفیت هوای داخلی ساختمان‌ها داشته باشد.

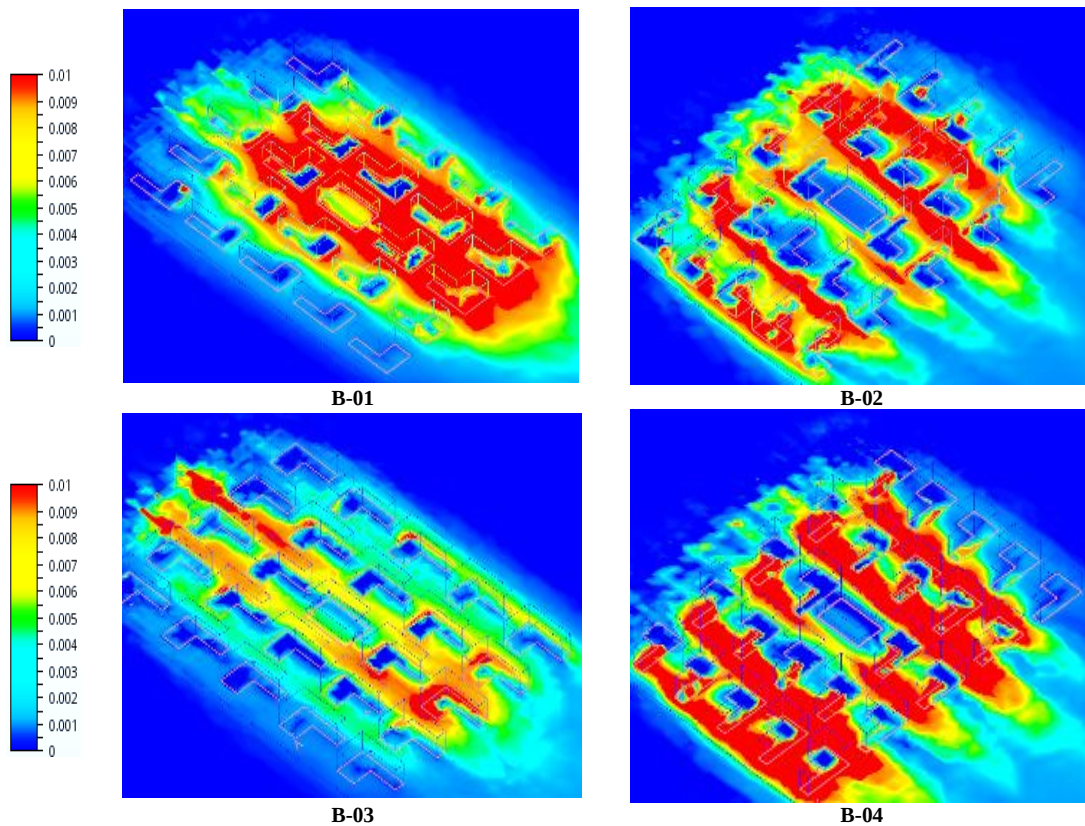
الگوی B -

این بخش به بررسی تأثیر فرم L شکل ساختمان و چرخش 90 درجه‌ای آن (نمونه‌های B-01 تا B-04) بر الگوی جریان هوا و میزان ورود آلاینده‌ها به فضای داخلی ساختمان هدف می‌پردازد (اشکال 13، 14 و 15).

- B-01 و B-03 (جهت‌گیری بازوی L و تأثیر بر آلودگی داخلی): نمونه‌های B-01 و B-03 رفتارهای مشابهی در توزیع آلاینده‌ها در بافت پیرامون ساختمان هدف از خود نشان می‌دهند. در B-01، قرار گرفتن بازوی بزرگ‌تر فرم L در جبهه غربی منجر به افزایش غلظت آلاینده‌ها در معابر شرقی ساختمان هدف شده است. این تجمع آلاینده‌ها در نزدیکی نما، به طور بالقوه ورود آلاینده‌های بیشتری را به فضای داخلی ساختمان هدف از سمت شرق تسهیل می‌کند. در B-03 نیز، می‌توان نتیجه گرفت

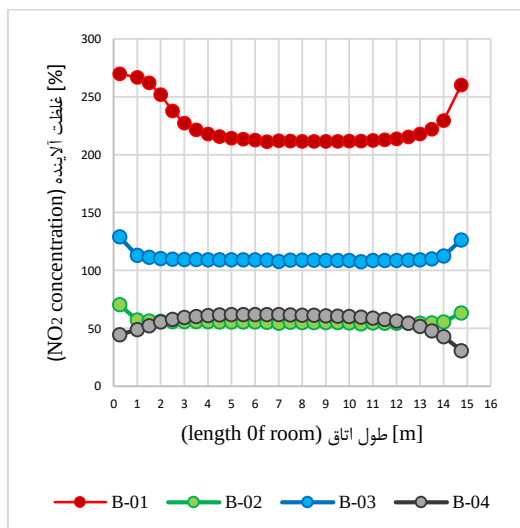
و تجمع آلاینده‌های خارجی در فضای داخلی دارد.

نحوه جهت‌گیری آن در سایت، نقش حیاتی در کنترل الگوهای جریان هوا و در نتیجه، میزان ورود

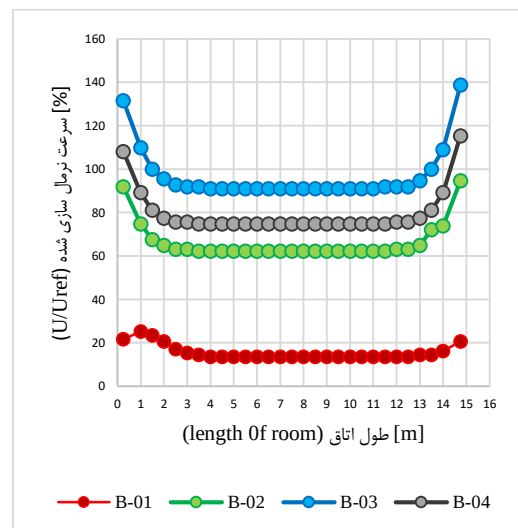


شکل 13- کانتور الگوی انتشار غلظت آلاینده‌ها در بافت شهری با الگوی B

Fig. 13- Contour of pollutant concentration dispersion pattern in the urban fabric with Pattern B



شکل 15- غلظت آلاینده در طول ساختمان هدف برای الگوی B
Fig. 15- Pollutant concentration along the target building for Pattern B

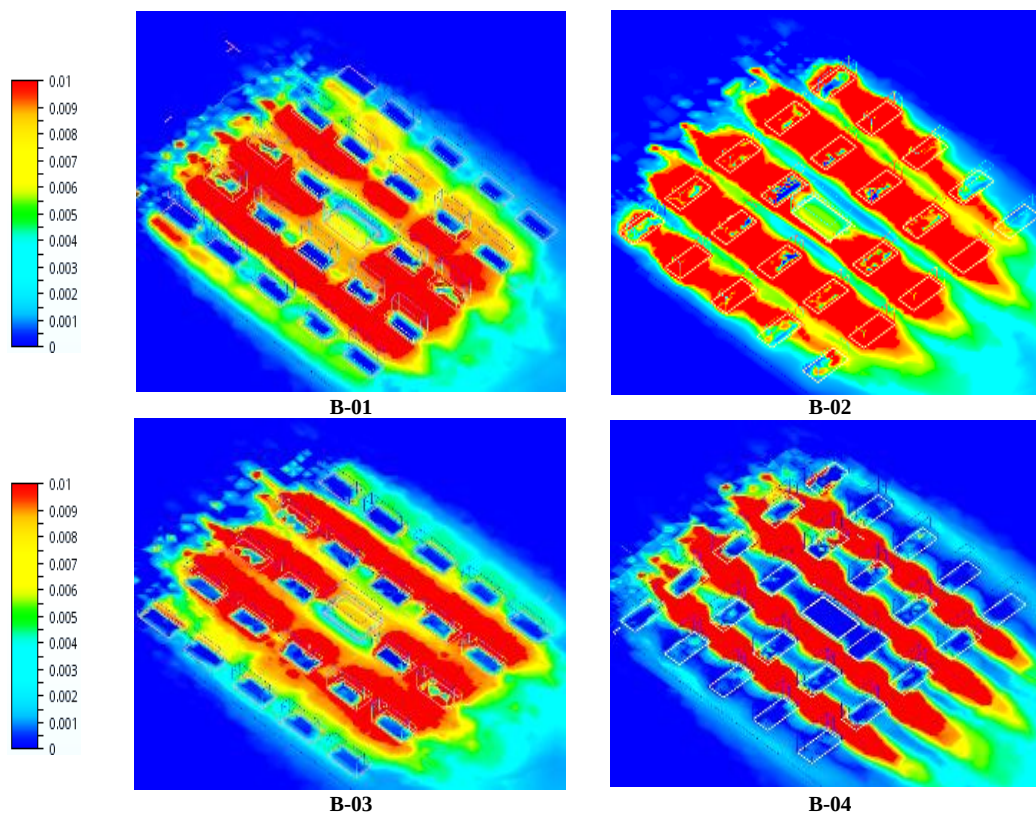


شکل 14- سرعت هوا در طول ساختمان هدف برای الگوی B
Fig. 14- Air velocity along the target building for Pattern B

جریان هوا و میزان ورود آلاینده‌ها به فضای داخلی ساختمان هدف بررسی می‌کند (اشکال 16، 17 و 18).

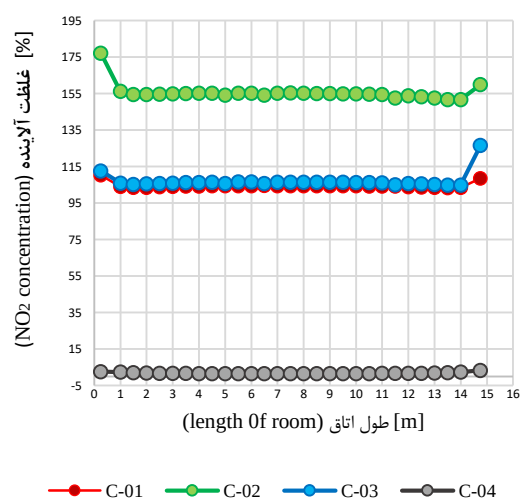
C - الگوی

این بخش، تأثیر فرم پلکانی ساختمان و چرخش‌های 90 درجه‌ای آن (نمونه‌های C-01 تا C-04) را بر الگوی

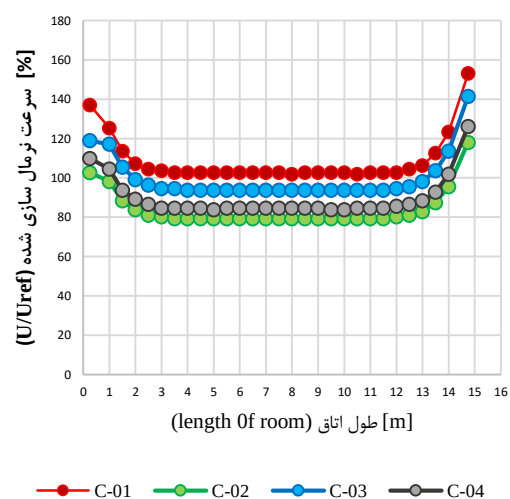


شکل 16- کانتور الگوی انتشار غلظت آلاینده‌ها در یافت شهری با الگوی C

Fig. 16- Contour of pollutant concentration dispersion pattern in the urban fabric with Pattern C



شکل 18- غلظت آلاینده در طول ساختمان هدف برای الگوی C
Fig. 18- Pollutant concentration along the target building for Pattern C

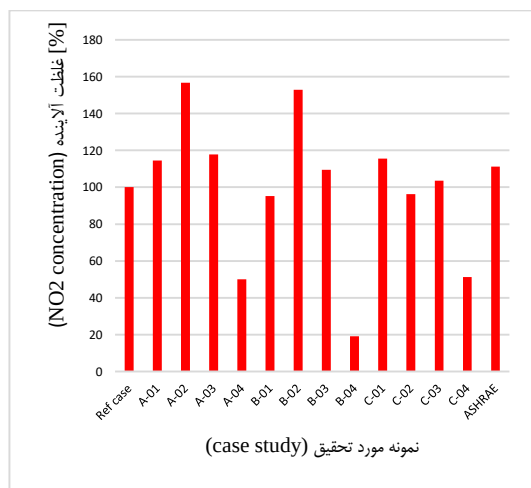


شکل 17- سرعت هوا در طول ساختمان هدف برای الگوی C
Fig. 17- Air velocity along the target building for Pattern C

(شکل 17) در اطراف ساختمان هدف است؛ جایی که بیشترین سرعت در C-01 و کمترین آن در C-02 دیده می‌شود. این یافته‌ها نشان می‌دهند که فرم پلکانی و چرخش آن، با تغییر الگوی جریان هوا در بافت، به طور مستقیم بر میزان و نحوه ورود آلاینده‌های خارجی و کیفیت هوای داخل ساختمان تأثیر می‌گذارد.

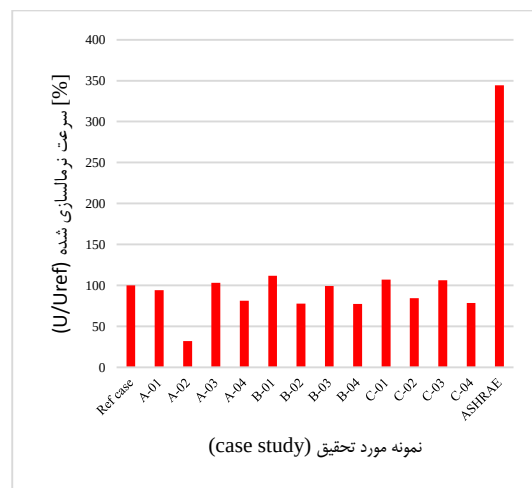
شکل 19 و 20 به ترتیب میانگین سرعت هوا و غلظت NO_2 را در نمونه‌های موردی در مقایسه با استاندارد اشری نشان داده‌اند. همان‌گونه که از شکل 19 در ارتباط با سرعت هوا پیدا است، در تمام نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش سرعت، کمتر از حد مجاز استاندارد اشری است. کمترین سرعت در نمونه‌های موردی به ترتیب مربوط به B-01 و C-02 و بیشترین میزان آن مربوط به A-01 است (شکل 19). شکل 20 نشان می‌دهد که کمترین میزان غلظت آلاینده‌ها به ترتیب در C-04 و A-04 مشاهده شده است؛ این در حالی است که بیشترین میزان آن در B-01 قابل مشاهده است. همچنین در میان نمونه‌ها علاوه بر B-01، A-01 و C-02 نیز دارای غلظت آلاینده‌های بالاتر از محدوده مجاز اشری می‌باشند (شکل 20).

- C-01 و C-03: (جهت‌گیری پلکانی و ورود آلاینده): در C-01 و C-03، نحوه قرارگیری فرم پلکانی بر انتشار آلودگی در بافت پیرامون تأثیرگذار است. در C-01، بیشترین غلظت آلاینده‌ها در امتداد جداره غربی ساختمان هدف مشاهده می‌شود. این تمرکز آلاینده‌ها در نزدیکی این نما، نشان‌دهنده ورود احتمالی بیشتر آلاینده‌ها از طریق بازشوهای این جبهه به فضای داخلی است. در C-03 نیز، با چرخش فرم، این تجمع به جداره شرقی ساختمان هدف منتقل شده است. این نتایج بر اهمیت جهت‌گیری فرم پلکانی در هدایت جریان‌های آلاینده و تأثیر مستقیم آن بر کیفیت هوای داخل تأکید دارند.
- C-02 و C-04 (تأثیر بر آلاینده‌گی معابر و کیفیت هوای داخلی): در C-02 و C-04، بیشترین غلظت آلاینده‌ها در خیابان‌های شمالی-جنوبی شکل گرفته است (شکل 16). این افزایش آلاینده‌گی در معابر، می‌تواند خطر ورود این آلاینده‌ها را به ساختمان‌های مجاور این خیابان‌ها افزایش دهد. با این حال، مقایسه نتایج کلی نشان می‌دهد که بیشترین غلظت آلاینده‌ها درون ساختمان هدف در C-02 و کمترین آن در C-04 مشاهده شده است (شکل 18). این تفاوت به دلیل الگوهای متفاوت سرعت هوا



شکل 20- میانگین غلظت آلاینده در نمونه‌های موردی در مقایسه با استاندارد اشری

Fig. 20- Average pollutant concentration in the case studies compared to the ASHRAE standard



شکل 19- میانگین سرعت نمونه‌های موردی در مقایسه با استاندارد اشری

Fig. 19- Average wind speed of the case studies compared to the ASHRAE standard

بر اساس نتایج روش تاپسیس، بهترین گزینه از نظر معیارهای کاهش غلظت NO_2 و افزایش سرعت تهویه به ترتیب در C-04 و B-04 مشاهده شده است. این در حالی است که بدترین نمونه‌ها از منظر معیارهای مذکور به ترتیب در B-01 و C-02 مشاهده شده است. برای مقایسه اختلاف عددی نمونه‌ها در روش تاپسیس، جدول شاخص شباهت برای هر نمونه براساس دو معیار سرعت هوای بیشینه و غلظت آلاینده کمینه، در ادامه ارائه شده است (هرچقدر شاخص شباهت به عدد یک نزدیک‌تر باشد نشانه برتری آن گزینه است (جدول 5).

جدول 5- مقایسه شاخص شباهت برای هر یک از نمونه‌ها
Tab-5. Comparison of the similarity index for each sample

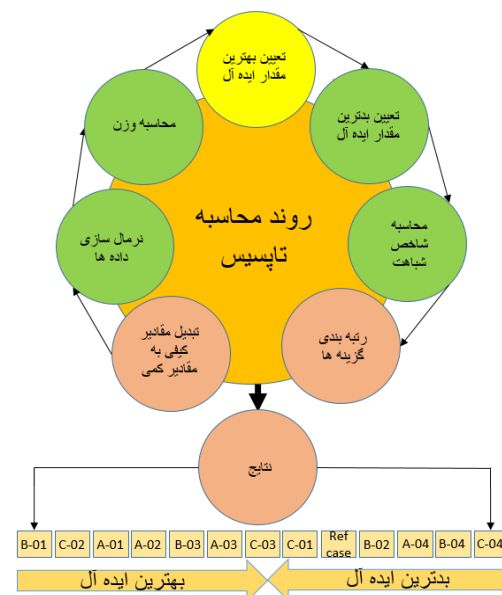
شاخص شباهت	نمونه مورد بررسی	شاخص شباهت	نمونه مورد بررسی	شاخص شباهت	نمونه مورد بررسی
0.87	C-01	0	B-01	0.6	A-01
0.51	C-02	0.79	B-02	0.73	A-02
0.76	C-03	0.74	B-03	0.76	A-03
0.87	C-04	0.82	B-04	0.8	A-04

4- نتیجه‌گیری

هدف اصلی تحقیق حاضر بررسی تأثیر 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. 12 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 شده‌اند. بر این اساس مهم‌ترین نتایج به دست 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.
- میانگین غلظت NO_2 در ساختمان هدف در میان نمونه‌های موجود در الگوی C با فرم پلکانی و الگوی B با فرم L شکل به ترتیب کمترین و بیشترین

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 بالا نمی‌توان بهینه‌ترین نمونه را شناسایی نمود. بر همین اساس از تکنیک تصمیم‌گیری چند معیاره تاپسیس (MCDM) برای این منظور استفاده شده است. در این روش، تعدادی گزینه و تعدادی معیار برای تصمیم‌گیری وجود دارد که با توجه به معیارها، گزینه‌ها می‌بایست رتبه‌بندی 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 ایده‌آل مثبت (بهترین حالت ممکن) نامیده می‌شود. گزینه دیگر شامل بدترین حالت‌های ممکن است که اصطلاحاً ایده‌آل منفی نامیده می‌شود. معیارها می‌توانند دارای ماهیت مثبت یا منفی باشند، همچنین واحد اندازه‌گیری آنها نیز می‌تواند متفاوت باشد (Hanine et al., 2016) در شکل 21 روند رتبه‌بندی نمونه‌ها از ایده‌آل مثبت تا ایده‌آل منفی در روش تاپسیس به همراه نتایج آن در پژوهش حاضر ارائه شده است (شکل 21).



شکل 21- روند رتبه‌بندی نمونه‌ها از ایده‌آل مثبت تا ایده‌آل منفی با استفاده از روش تاپسیس

Fig. 21- Ranking trend of the samples from positive ideal to negative ideal using the TOPSIS method

میزان است. این به این معنی است که استفاده از فرم پلکانی در بافت شهری به صورت نسبی آلودگی کمتری را به فضای درون ساختمان هدایت می‌کند. در مقابل، فرم L شکل، با توجه به موازی بودن بازوی بزرگتر فرم L با جریان باد و همچنین عرض کم بازوی بزرگ فرم L، باعث تمرکز بیشتر آلودگی در محدوده بافت شهری شده و همین امر به صورت نسبی باعث افزایش انتقال آلودگی به درون ساختمان هدف می‌شود.

- در الگوی C، در حالتی که بخش پلکانی بنا رو به باد باشد (C-04)، کمترین میزان غلظت NO_2 در ساختمان هدف مشاهده شده است.
- در الگوی B، در حالتی که بازوی بزرگتر بنای L شکل موازی جهت باد قرار گرفته است (B-01)، بیشترین میزان غلظت NO_2 در ساختمان هدف مشاهده شده است.
- از میان الگوهای مورد بررسی، به طور میانگین الگوی B با فرم L شکل و الگوی C با فرم پلکانی به ترتیب دارای کمترین و بیشترین سرعت هوا در ساختمان هدف بوده‌اند.
- از میان نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش، B-01 و A-01 به ترتیب دارای کمترین و بیشترین میانگین سرعت هوا در فضای درون ساختمان هدف هستند.
- با در نظر گرفتن تأثیر همزمان سرعت هوا و غلظت آلاینده به عنوان عوامل تعیین کننده کیفیت هوای درون در این پژوهش، نتایج استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره ی تاپسیس (MCDM) نشان داد که C-04 و B-01 به ترتیب بهترین و بدترین نمونه‌های مورد بررسی از نظر IAQ هستند (در C-04 جهت شیب فرم پلکانی رو به باد قرار دارد و در در B-01 کشیدگی ساختمان L شکل در امتداد جریان باد قرار دارد).
- با مقایسه نتایج این پژوهش با پژوهش‌های مشابه می‌توان گفت: بسیاری از تحقیقات اخیر مانند (Cárdenas Rodríguez et al., 2016) به ارتباط شکل شهری و فراوانی آلاینده‌ها توجه

ویژه‌ای نشان داده‌اند. تحقیق حاضر نیز این ارتباط را تأیید می‌کند، اما تمرکز اصلی بر تأثیر مستقیم فرم ساختمان بر الگوی انتشار آلودگی در بافت شهری و سپس ورود آن به فضای داخلی بوده است (Cárdenas Rodríguez et al., 2016). در پژوهش خود به بررسی رابطه بین آلودگی هوای محلی و ساختار شهری در شهرهای اروپایی پرداخته و نشان دادند که ساختار شهری اثرات قابل توجهی بر غلظت آلاینده دارد. نتایج پژوهش حاضر نیز با این یافته همسو است و به‌طور خاص نشان می‌دهد که چرخش بلوک‌های ساختمانی و فضاهای پر و خالی آنها، الگوی انتشار آلودگی در بافت را تغییر داده و اما در عین حال مستقیماً بر کیفیت هوای داخل تأثیر می‌گذارد (Fan et al., 2017). الگوی بازشو و نسبت ابعاد خیابان و تأثیر آن بر انتشار منواکسید کربن را بررسی کرده‌اند. اگرچه پژوهش حاضر مستقیماً به الگوی بازشو یا نسبت ابعاد خیابان نپرداخته است، اما نتایج پژوهش به ویژه در نمونه مبنا و الگوی A، نشان می‌دهد که نزدیکی به بازشوهای ورودی/خروجی و نحوه قرارگیری ساختمان در معبر (مثل "هدایت و تسریع جریان باد در گذرگاه‌ها") مستقیماً بر غلظت آلاینده در داخل ساختمان تأثیر می‌گذارد (Ng & Chau, 2014). تأثیر نفوذپذیری ساختمان و نسبت ابعاد را بر غلظت مونواکسید کربن بررسی کرده و نشان دادند که با افزایش نسبت ابعاد، میزان قرار گرفتن در معرض باد افزایش می‌یابد. این پژوهش به‌طور غیر مستقیم با این مفهوم مرتبط است؛ فرم‌های مختلف ساختمان و چرخش آنها می‌توانند نفوذپذیری بافت را تغییر داده و بر الگوی جریان هوا و در نتیجه، غلظت آلاینده‌ها در نقاط ورودی به ساختمان تأثیر بگذارند. بنابراین نتایج این مطالعه حاکی از آن است که رقیق شدن هوای آلوده در فضای داخلی ساختمان به شدت با ساختار 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 بینش بهتر



idealized building arrays under unsteady diurnal cycles in summer. *Building and Environment*, 206, 108344. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108344>

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

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>

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>

Gülten, A., & Öztö, H. F. (2020). Analysis of the natural ventilation performance of residential areas considering different urban configurations in Elazığ, Turkey. *Urban Climate*, 34, 100709. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100709>

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>

Hanine, M., Boutkhoul, 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>

Hassan, A. M., Fatah El Mokadem, A. A., Megahed, N. A., & Abo Eleinen, O. M. (2020). Improving outdoor air quality based on building morphology: Numerical investigation. *Frontiers of Architectural Research*, 9(2), 319–334. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foar.2020.01.001>

در مورد ظرفیت چیدمان فرم هایی مانند L، T و پلکانی در بافت شهری کمک می کند. 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 تأثیر فرم ها بر کیفیت هوای درون ساختمان ها می تواند لحاظ شود.

References

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>

Azizi, M. M., & Javanmardi, K. (2017). The Effects of Urban Block Forms on the Patterns of Wind and Natural Ventilation. *Procedia Engineering*, 180, 541–549. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.213>

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>

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>

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>

Ching, F. D. K. (2022). *Architecture: Form, Space, and Order* (Trans. Z. Gharagazlou). Tehran University Press [in Persian].

Chen, G., Rong, L., & Zhang, G. (2021). Impacts of urban geometry on outdoor ventilation within

- residential streets and impact of building form variation. *Sustainable Cities and Society*, 67, 102735. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102735>
- Peng, Y., Gao, Z., & Ding, W. (2017). An Approach on the Correlation between Urban Morphological Parameters and Ventilation Performance. *Energy Procedia*, 142, 2884–2891. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.412>
- 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
- Qin, H., Lin, P., Lau, S. S. Y., & Song, D. (2020). Influence of site and tower types on urban natural ventilation performance in high-rise high-density urban environment. *Building and Environment*, 179, 106960. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106960>
- SCI. (2022). Statistical Center of Iran.
- Senitkova, I. (2007). Indoor environment parameters for sustainable buildings design. *Selected Scientific Papers/Journal of Civil Engineering*, 2, 35–48.
- Shirzadi, M., Naghashzadegan, M., & A. Mirzaei, P. (2018). Improving the CFD modelling of cross-ventilation in highly-packed urban areas. *Sustainable Cities and Society*, 37, 451–465. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.11.020>
- Sabounchi, M., Zabihi, H., & Majedi, H. (2020). A semiotic approach to form analysis in contemporary architecture. *Armanshahr Architecture and Urban Development*, 13(30), 139–149 [in Persian]. doi: 10.22034/aaud.2020.139655.1592
- Tomčůvik, T., & Šenitková, I. (2013). Interior materials impact to indoor air quality. *Advanced Science Letters*, 19(3), 955–959.
- Tutiempo Network, S. L. (2021). <https://en.tutiempo.net/climate/ws-408210.html>.
- Yang, F., Qian, F., & Lau, S. S. Y. (2013). Urban form and density as indicators for summertime outdoor ventilation potential: A case study on high-rise housing in Shanghai. *Building and Environment*, 68, 102–112.
- Javanroodi, K., Mahdavinejad, 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>
- Landofaryan. (2011). Shiraz. Landofaryan.tripod.com
- Maing, M. (2022). Superblock transformation in Seoul Megacity: Effects of block densification on urban ventilation patterns. *Landscape and Urban Planning*, 222, 104401. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104401>
- Mei, S.-J., Hu, J.-T., Liu, D., Zhao, F.-Y., Li, Y., Wang, Y., & Wang, H.-Q. (2017). Wind driven natural ventilation in the idealized building block arrays with multiple urban morphologies and unique package building density. *Energy and Buildings*, 155, 324–338. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.019>
- 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>
- Mostafazadeh, A., & Savalanpour, H. (2016). *Study and evaluation of indoor air quality*. Tehran Municipality – Air Quality Control Company [in Persian].
- 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>
- 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>
- Peng, Y., Gao, Z., Buccolieri, R., Shen, J., & Ding, W. (2021). Urban ventilation of typical



Yassin, M. (2011). Impact of height and shape of building roof on air quality in urban street canyons. *Atmospheric Environment - ATMOS ENVIRON*, 45, 5220–5229. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.05.060>

Zhang, A., Xia, C., & Li, W. (2022). Exploring the effects of 3D urban form on urban air quality: Evidence from fifteen megacities in China. *Sustainable Cities and Society*, 78, 103649. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103649>

Environment, 70, 122–137. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.019>

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/https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101941>