

بررسی رفتار جریان باد و ذرات معلق ($PM_{2.5}$, PM_{10}) پیرامون پوسته بلوک‌های ساختمانی در بافت مسکونی طرح تفصیلی شهر عسلویه*

محسن محمدی

دانشجوی دکتری معماری، دانشکده هنر و معماری، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

زهرا قیابکلو

دانشیار گروه معماری، دانشکده معماری، دانشکده‌گان هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران (نویسنده مسئول مکاتبات)

E-mail: ghiabaklou@ut.ac.ir

حامد مضطرزاده

دانشیار گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

چکیده

ذرات معلق پیامدهای مخرب بر سلامت افراد دارند. سرعت باد، فاکتور مهم در تعیین غلظت ذرات است. هندسه شهری بر سرعت باد و در نتیجه کیفیت هوا تأثیرگذار است. پایش کیفیت هوای شهر از طریق اندازه‌گیری ذرات و پارامترهای جوی صورت می‌گیرد و تأثیرگذاری بافت بر پراکندگی آلاینده‌ها لحاظ نمی‌شود. پژوهش حاضر، با هدف مطالعه رفتار جریان باد و ذرات معلق پیرامون ساختمان‌ها در کدهای ارتفاعی، معابر و جبهه‌های مختلف، در یک بافت مسکونی در شهر عسلویه انجام شد. تأثیر رفتار باد بر پراکندگی ذرات، همچنین تأثیر ارتفاع، جهت‌گیری معابر و بناها، بر رفتار باد و ذرات بررسی شد. سرعت، فشار، آشفتگی، مسیر حرکت باد، و سرعت، غلظت و مسیر حرکت ذرات، در سطح زمین و ارتفاعات مختلف، معابر هم‌راستا با جریان باد و عمود بر آن، جبهه‌های رو و پشت به باد، با شبیه‌سازی در نرم‌افزار آنسیس‌فلوئنت نسخه ۲۰۲۱ تعیین شد. در ارتفاعات بالاتر بنا، با افزایش سرعت و تلاطم جریان، طول سایه باد در معابر و جبهه‌های پشت به باد کاهش یافت. تجمع ذرات فاقد جرم در جبهه‌های پشت به باد در محدوده سایه باد مشاهده شد. بیشترین و کمترین غلظت ذرات معلق به ترتیب در جبهه رو به باد و سایه باد مشاهده شد. یافته‌ها در مطالعه آسایش حرارتی و مقاومت مصالح با توجه به بار باد در فضاهای شهری نیز سودمند خواهد بود.

کلیدواژه‌ها: کیفیت هوای بیرون، ذرات معلق، بادخور، دره‌های شهری، ضریب دید به آسمان

* این مقاله برگرفته از رساله دکتری محسن محمدی با عنوان «سامانه سرمایشی به‌همراه تهویه با هوای بدون غبار برای مناطق آلوده در اقلیم گرم و مرطوب (نمونه موردی: ساختمان‌های مسکونی شهر عسلویه)» است که به راهنمایی دکتر زهرا قیابکلو و مشاوره دکتر حامد مضطرزاده در دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز، در حال انجام است.

مقدمه

آلودگی هوای بیرون، یک نگرانی جهانی است و علاوه بر اینکه بزرگ‌ترین تهدید زیست‌محیطی برای سلامت عمومی در سراسر جهان (UNEP, 2022) محسوب شده و سالانه منجر به مرگ زودرس ۷ میلیون فرد در جهان می‌شود (UNEP, 2022; WHO, 2022b)، بر اقتصاد کشورها نیز اثرات منفی دارد (Cong, Wang, & Huang, 2022). نتایج یک مطالعه در ایران که در سال ۲۰۲۰ انتشار یافته است (Pishgar *et al.*, 2020)، نشان داد در شهر تهران، طی یک دوره ده ساله، ۴۳۱۷۷ فرد بر اثر بیماری‌های دستگاه تنفسی جان خود را از دست داده‌اند. ذرات معلق مهم‌ترین آلاینده هوا به‌ویژه در شهرهای بزرگ جهان معرفی شده‌اند (WHO, 2022a) که منشأ طبیعی و یا مصنوعی (فعالیت‌های انسانی) دارند. در ایران نیز تعداد سال‌های از دست‌رفته عمر به‌واسطه مرگ‌ومیر منتسب به ذرات معلق و بیماری‌های تنفسی، روند افزایشی داشته است (Pishgar *et al.*, 2020; Poursafa *et al.*, 2015). ایران به‌علت قرارگیری در کمربند خشک و نیمه‌خشک، در معرض طوفان‌های ریزگرد قرار دارد. در استان بوشهر پدیده ریزگرد خسارتی به همراه داشته است و افزایش آلودگی‌های خاک و آب‌وهوا در منطقه صنعتی عسلویه، تهدید جدی برای ساکنان و کارکنان این مناطق معرفی شده است (نادری‌زاده، خادمی، ایوبی، ۱۳۹۵).

مورفولوژی شهری و کیفیت محیط‌های مصنوع، بر سلامت عمومی افراد از جنبه‌های گوناگون تأثیرگذار است (Fathi *et al.*, 2020). از این‌رو، برای رفع مشکلات شهرها بررسی ساختار و ویژگی‌های کالبدی آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد. این امر، در مورد معضل آلودگی هوا نیز صادق است. سرعت باد در میان پارامترهای دما و رطوبت نسبی هوا و تابش خورشید (دمای متوسط تابشی)، نوع فعالیت و پوشش افراد، بیشترین تأثیرگذاری را بر آسایش حرارتی در فضاهای شهری به‌ویژه در اقلیم گرم و مرطوب دارد (Abdollahzadeh & Biloria, 2021). در این اقلیم، باد با به جریان انداختن هوا در اطراف بدن و تبخیر از سطح پوست و در نتیجه کاهش دمای مؤثر، آسایش حرارتی افراد را فراهم می‌سازد. به‌علاوه، سرعت و جهت باد، (علاوه بر فشار، رطوبت و دمای هوا)، بر غلظت ساعتی ذرات معلق هوای بیرون، تأثیرگذار هستند (Hrdličková, Michálek, Kolář, & Veselý, 2008; Kuo *et al.*, 2008; Vardoulakis & Kassomenos, 2008). بنابراین رفتار جریان باد، از فاکتورهای مهم در تعیین غلظت ذرات در فضاهای شهری است. از سوی دیگر، هندسه شهری^۱ یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر سرعت باد و در نتیجه کیفیت هوا و آسایش حرارتی هوای بیرون و میکرواقلیم‌ها است.

بنابراین، راهکارهای برنامه‌ریزی و طراحی شهری، بر شرایط تهویه شهر و در نتیجه کاهش اثرات آلودگی جوی تأثیرگذار هستند؛ اگرچه در ارائه دستورالعمل‌ها کمتر به این تأثیرگذاری توجه شده است (Badach, Wojnowski, & Gębicki, 2023). پایش کیفیت هوای شهر در گزارش‌های زیست‌محیطی، و همچنین ارزیابی کیفیت هوای بیرون در پژوهش‌های مختلف، تنها از طریق اندازه‌گیری غلظت ذرات و مقادیر پارامترهای جوی و تکنیک‌های آماری صورت می‌گیرد و تأثیرگذاری هندسه بافت شهری بر پراکندگی آلاینده‌ها لحاظ نمی‌شود. علاوه بر اینکه تعداد سایت‌های پایش کیفیت هوای شهر، اندک و محدود به یک یا چند نقطه از شهر هستند، در این سایت‌ها تنها به تعیین غلظت برخی آلاینده‌ها (از جمله ذرات معلق) می‌پردازند. در نتیجه این روش، اطلاعات کافی و جامع برای کنترل آلودگی هوای شهر و یا راهکارهایی برای بهبود آسایش حرارتی بر مبنای الگوی فضایی شهر ارائه نمی‌دهد. در این میان، شبیه‌سازی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی، می‌تواند در ارزیابی الگوی جریان باد و پراکندگی آلاینده‌ها و در نتیجه پیش‌بینی وضعیت آسایش حرارتی و کیفیت هوای شهری به کار رود.

در شبیه‌سازی، رویدادها و فرایندهای واقعی بازسازی می‌شوند. در سایر روش‌های پژوهش، مفروضات مختلفی

در مورد ماهیت دقیق علت و معلولی سیستم یا پدیده یا موضوع مورد مطالعه وجود دارند. در شبیه‌سازی، پیچیدگی ذاتی پدیده یا سیستم مورد مطالعه، خود به عنوان یک فرض مطرح و بررسی می‌شود. براین اساس، اگرچه در سایر روش‌های پژوهش، از چگونگی و چرایی یک پدیده پرسش می‌شود^۲، در شبیه‌سازی، پرسش «چه می‌شود اگر؟»^۳ (Dooley, 2002) مطرح است. بازتاب شرایط واقعی و شباهت با آن، تکرارپذیری و کامل بودن داده‌های دریافتی از ویژگی‌های این روش می‌باشند (Groat & Wang, 2013). نرم‌افزارهای رایانه‌ای پدیده‌های طبیعی و مصنوعی را در مقیاس‌های خرد و کلان شبیه‌سازی می‌کنند. شبیه‌سازی به طراحان و برنامه‌ریزان کمک می‌کند آینده‌های جایگزین را در یک محیط کم‌خطر مصنوعی ارزیابی کنند و گزینه‌های جایگزین نیز ارزیابی شوند تا طرحی که به بهترین وجه با نیازهای آنان متناسب است، انتخاب کنند (Clipson, 1993). نخستین گام ضروری برای مطالعات شبیه‌سازی، تعریف هدف است. چنانچه «مطالعه به روش شبیه‌سازی فرضیه محور»^۴ مدنظر باشد، برای پرسش یا پرسش‌هایی که در راستای هدف از مطالعه بیان می‌شوند، یک یا چند فرضیه قابل آزمون نیز ارائه می‌شود (Law, 2015; Lorig, Lebherz, Berndt, & Timm, 2017). اگرچه فرضیه به‌طور معمول، روابط احتمالی متغیرها یا پدیده‌ها را براساس دانش یا مشاهدات موجود بیان می‌کند، پرسش، در جست‌وجوی کشف یا توضیح جنبه‌ای از موضوع مورد بررسی است بدون اینکه هیچ فرضیه یا ادعایی داشته باشد.

با توجه به موارد بالا، هدف اصلی (کلان) مطالعه حاضر، مدل‌سازی و بررسی رفتار باد و ذرات معلق پیرامون بلوک‌های ساختمانی، در سطح زمین و در کدهای ارتفاعی مختلف، در محدوده‌ای از بافت مسکونی عسلویه است. در راستای هدف مذکور، چهار هدف خرد مطرح شد: بررسی جهت، سرعت، فشار، آشفتگی، و مسیر حرکت^۵ جریان باد در کدهای ارتفاعی مختلف، معابر هم‌راستا با باد و عمود بر جریان باد، و جبهه‌های رو و پشت به باد؛ بررسی جهت، سرعت، و ردیابی حرکت^۶ ذرات معلق در کدهای ارتفاعی مختلف، معابر هم‌راستا با باد و عمود بر جریان باد، و جبهه‌های رو و پشت به باد؛ بررسی تأثیر ارتفاع، جهت‌گیری معابر و بناها نسبت به باد بر رفتار جریان باد و ذرات معلق؛ بررسی رفتار ذرات بر مبنای رفتار جریان باد (پیروی یا عدم پیروی حرکت ذرات از جریان باد). در راستای اهداف ذکر شده، پرسش‌های زیر مطرح شد:

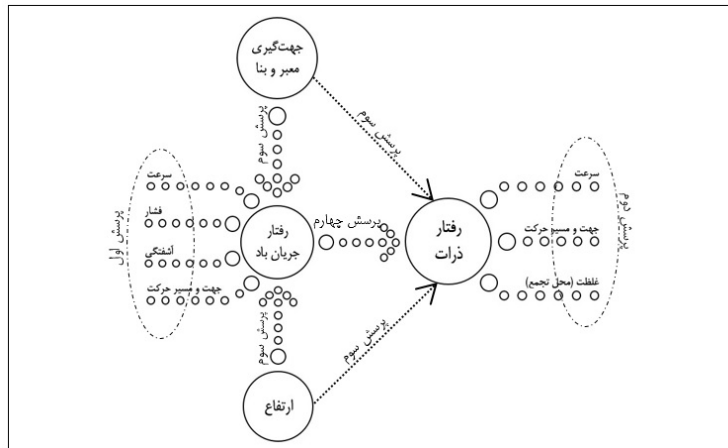
۱. جهت و مسیر حرکت، سرعت، فشار، و آشفتگی جریان باد در کدهای ارتفاعی، معابر، و جبهه‌های مختلف در بافت مسکونی مورد نظر چگونه است؟
۲. سرعت، جهت و مسیر حرکت، و غلظت ذرات معلق در کدهای ارتفاعی، معابر، و جبهه‌های مختلف در بافت مسکونی مورد نظر چگونه است؟
۳. ارتفاع بنا، جهت‌گیری معابر و جهت‌گیری بناها نسبت به باد، چگونه بر رفتار جریان باد و ذرات معلق تأثیرگذار هستند؟ پراکندگی آلاینده‌ها و محل تجمع ذرات کجاست یا در واقع غلظت ذرات در چه ارتفاع و چه معابری و چه جبهه‌هایی بیشتر است؟
۴. رفتار و مسیر حرکت ذرات بر مبنای رفتار و جهت جریان باد چگونه است؟ (رفتار ذرات معلق از جریان باد پیروی می‌کند؟)

فرضیات زیر در پاسخ به پرسش‌ها مطرح شد:

۱. به نظر می‌رسد ارتفاع بنا و جهت‌گیری معابر و بناها نسبت به باد، بر رفتار جریان باد و ذرات معلق تأثیرگذار باشند. به گونه‌ای که در ارتفاع بیشتر و معابر هم‌راستا با باد و جبهه‌های رو به باد، سرعت هوا بیشتر و غلظت ذرات (تجمع ذرات در معبر) کمتر است؛ و در ارتفاع کمتر و معابر عمود بر جریان باد و جبهه‌های پشت به باد، سرعت هوا کمتر و غلظت ذرات بیشتر است. این فرضیه، پرسش‌های اول تا سوم را هدایت می‌کند. در ارتباط با

تأثیر ارتفاع، جهت‌گیری معابر و بناها نسبت به باد، بر سایر پارامترهای توصیف‌کننده رفتار جریان باد و ذرات، مانند فشار، آشفته‌گی، و مسیر حرکت، در این مرحله نمی‌توان فرضیه‌ای ارائه داد. برای نمونه مشخص نیست جریان‌های گردابی در چه ارتفاع، چه بخش‌هایی از معبر، و چه جبهه‌هایی بیشتر تشکیل می‌شود.

۲. به نظر می‌رسد در کدهای ارتفاعی، معابر و جبهه‌های مختلف، رفتار ذرات از الگوی حرکت جریان باد پیروی می‌کند. به گونه‌ای که با افزایش سرعت باد، سرعت حرکت ذرات افزایش، و غلظت ذرات کمتر، و با کاهش سرعت باد، سرعت حرکت ذرات نیز کاهش و غلظت ذرات بیشتر می‌شود. همچنین مسیر حرکت ذرات بر مسیر حرکت جریان باد منطبق است. این فرضیه در پاسخ به پرسش چهارم مطرح شد. مدل مفهومی شکل (۱)، متغیرهای مورد بررسی و پرسش‌های مطرح‌شده را نمایش می‌دهد.



شکل ۱. مدل مفهومی از متغیرها و پرسش‌های پژوهش

پیشینه و مبانی نظری

آلاینده‌های اصلی هوا را می‌توان در سه گروه، شامل ذرات^۷ (گردوغبار، گرده، آلاینده‌های ثانویه، دوده چراغ، با قطر ۰/۰۱ تا ۱۰۰ میکرومتر)، آلاینده‌های آلی فرار (فرمالدهید، بنزن، آمونیاک، با قطر ۰/۰۰۰۱ تا ۰/۰۰۱ میکرومتر)، و میکروارگانیزم‌ها (باکتری‌ها با قطر ۰/۲ تا ۱۰ میکرومتر و ویروس‌ها با قطر ۰/۰۱ تا ۰/۳ میکرومتر) دسته‌بندی کرد (Zhang et al., 2011). طبق گزارش آژانس حفاظت از محیط‌زیست آمریکا، در هوای بیرون، مونوکسیدکربن، سرب، دی‌اکسید نیتروژن، ازن، ذرات معلق، و دی‌اکسید گوگرد، آلاینده‌های رایج هستند (EPA, 2023a). «ذرات معلق»^۸، ذرات جامد و یا قطرات مایع موجود در هوا هستند که در اندازه‌های میکروسکوپی یا کوچک‌تر و با میکروسکوپ الکترونی، و یا مانند گردوغبار و دوده، با چشم نامجهز قابل تشخیص هستند (EPA, 2023b). طبق تعریف پژوهشکده محیط‌زیست، مرکز تحقیقات آلودگی هوا (۱۳۹۷)، ذرات معلق هوا، ذرات جامد و مایع پراکنده‌شده در هوا و بزرگ‌تر از مولکول‌های مجزا (مولکول‌هایی با قطر تقریباً ۱ نانومتر) و کوچک‌تر از ۵۰۰ میکرومتر هستند. منابع تولید و انتشار ذرات معلق را در دو دسته با منشأ طبیعی یا انسانی (Duffney, Stanek, & Brown, 2023) می‌توان جای داد. ذرات معلق هوا با توجه به اندازه، در انواع درشت^۹ (قطر بین ۲/۵ تا ۱۰ میکرون)، ذرات ریز^{۱۰} (قطر بین ۰/۱ تا ۲/۵ میکرون) (Jun He et al., 2022)، و همچنین ذرات بسیار ریز^{۱۱} (قطر بین ۰/۱ میکرون و کمتر) طبقه‌بندی می‌شوند. ذرات معلق کوچک‌تر از ۱۰ میکرون^{۱۲}، ذرات معلق درشت و قابل استنشاق با قطر بزرگ‌تر از ۲/۵ میکرون و کوچک‌تر از ۱۰ میکرون هستند. ذرات کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون^{۱۳}، ذرات ریز با قطر ۲/۵ میکرون یا کمتر هستند.

در مطالعات مختلف، تکنیک‌ها و روش‌های متعددی برای بررسی و تبیین سطوح آلودگی هوا در مناطق شهری معرفی و ارزیابی شده است. برای نمونه در یک مطالعه (Ozcan & Cubukcu, 2018)، با استفاده از تکنیک‌های آمار فضایی^{۱۴}، مشخص شد که وجود مناطق صنعتی، نوع سوخت فسیلی برای گرمایش، و توپوگرافی، از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده آلودگی هوای شهر هستند. در مطالعه دیگر (Badach et al., 2023)، یک روش ارزیابی یکپارچه مبتنی بر شبیه‌سازی و ابزارهای پردازش داده‌های جغرافیایی^{۱۵}، برای بررسی تأثیر شکل شهری (در مقیاس خرد)^{۱۶} بر شرایط تهویه و پراکندگی آلودگی به کار گرفته شده است. در این روش، از دینامیک سیالات محاسباتی (نرم‌افزار اتودسک سی‌اف‌دی ۲۰۲۱)^{۱۷} و سیستم اطلاعات جغرافیایی^{۱۸} استفاده شده است. نتایج نشان داد که سطح اشغال^{۱۹}، تراکم ساختمان^{۲۰}، و بلوک‌بندی^{۲۱}، شاخص‌های مفیدی برای مدیریت کیفیت هوای شهری هستند. طبق یافته‌های پژوهشی که با هدف بررسی تأثیر محیط انسان‌ساخت بر کیفیت هوای شهر در نرم‌افزار آرکم‌پ^{۲۲} انجام شد (زبردست، ریاضی، ۱۳۹۴)، غلظت آلاینده‌ها در نواحی مرکزی و غیر مرکزی شهر متفاوت بودند. علاوه بر این، در مطالعات گوناگون، راهکارهای مختلف برای کنترل آلودگی هوا و بهبود کیفیت هوای شهر پیشنهاد شده است. برای نمونه در یک مطالعه، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان جایگزین سایر منابع انرژی، و در مطالعات دیگر، گیاه‌پالایی^{۲۳} یا نقش گیاهان در کاهش آلودگی هوا با استفاده از روش‌های آماری و همچنین مرور ادبیات، مورد بررسی قرار گرفته است (Gharbi, Kammoun, & Kefi, 2023; Han et al., 2022).

در مطالعه جریان باد و ارزیابی شرایط آب‌وهوایی در دره‌های شهری^{۲۴} و خیابان‌هایی که بلوک‌های ساختمانی را از یکدیگر جدا می‌کنند، فاکتورهای نسبت تصویر^{۲۵} و ضریب دید به آسمان^{۲۶} حائز اهمیت هستند. نسبت تصویر، نسبت ارتفاع متوسط ساختمان‌ها به عرض خیابان در یک دره شهری است. بر این اساس، معابر شهری را می‌توان در دو دسته عمیق^{۲۷} یا کم عمق^{۲۸} جای داد. مقادیر این نسبت، بر میزان دریافت تابش، سایه‌اندازی روی بناها، سرعت باد، و در نتیجه آسایش حرارتی افراد در معبر و کیفیت هوای شهر تأثیرگذار است. مقدار ضریب دید به آسمان، از صفر تا یک متغیر است. ضریب صفر به معنی مسدود شدن آسمان با موانع، و ضریب یک، به معنی امکان مشاهده کامل آسمان است. این ضریب، در تعیین میزان حرارتی که یک دره شهری در شب در خود حفظ می‌کند، حائز اهمیت است. آسمان در شب، با توجه به اینکه خنک‌تر از ساختمان‌هایی است که در طول روز گرم شده‌اند، همانند یک چاه حرارتی^{۲۹} عظیم عمل می‌کند. هر چه ضریب مذکور به عدد یک نزدیک‌تر باشد، دره شهری، سریع‌تر خنک می‌شود (Chatzidimitriou & Yannas, 2017; Dirksen, Ronda, Theeuwes, & Pagani, 2019).

در پژوهش‌هایی که به کمک شبیه‌سازی، سعی در بررسی رفتار جریان باد و توصیف کیفیت هوای شهر داشته‌اند، اغلب بر ساختمان‌های بلندمرتبه و الگوهای شهری مدرن تمرکز شده است و جریان باد در اطراف یک بنا و یا مجموعه‌ای از بلوک‌های منفرد و مجزا مطالعه شده است. در مواردی، با شبیه‌سازی رایانه‌ای تأثیر فرم ساختمان بر الگوی جریان باد در اطراف بناهای بلندمرتبه بررسی شده است. برای نمونه، در یک مطالعه (رضایی، خسروی، سعادت‌جو، ۱۳۹۵)، با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت نسخه ۲۰۱۴، با هدف دستیابی به فرم‌هایی بهینه از نظر تأمین آسایش اقلیمی در اطراف بنا، تأثیر تغییر فرم مقطع طولی ساختمان بر الگوی جریان باد در اطراف یک بنای بلندمرتبه با ارتفاع بیشتر از ۵ طبقه مورد تحلیل قرار گرفته است. برخی مطالعات، تأثیر هندسه شهری، جهت‌گیری^{۳۰} خیابان یا ساختمان، و یا خوشه‌بندی ساختمان‌ها^{۳۱} را بر آسایش حرارتی ارزیابی کرده‌اند. در مطالعات شبیه‌سازی، اغلب تنها با هدف بررسی تأثیر جریان باد بر آسایش حرارتی افراد در سطح پیاده‌رو، سرعت جریان باد در سطح زمین ارزیابی شده است. برای نمونه در یک مطالعه (Muniz-Gãal, Pezzuto, de Carvalho, & Mota, 2020)، با استفاده از نرم‌افزار انویمت^{۳۲}، تأثیر نسبت ارتفاع ساختمان‌ها به عرض دره شهری ارزیابی شده است. علاوه بر این، در مطالعات پیشین، به تأثیر جریان باد و جریان‌های توربولانسی و گرداب‌ها در معابر، بر غلظت و مسیر حرکت ذرات آلاینده کمتر توجه شده است.

با توجه به موارد بیان شده، در مطالعه حاضر، به جای بهره‌گیری از تکنیک آماری و مقایسه غلظت ذرات و سرعت باد، به بررسی تأثیرگذاری هندسه بافت بر سرعت هوا و پراکندگی ذرات و در نتیجه کیفیت هوای شهر، از طریق شبیه‌سازی پرداخته شده است. همچنین به جای ارزیابی سرعت باد در دره‌های خیابانی محصور شده در میان آسمان خراش‌ها و تأثیر آن بر آسایش حرارتی در سطح معبر، رفتار جریان باد و ذرات آلاینده در کدهای ارتفاعی، معابر و جهت‌گیری‌های مختلف رو به باد و پشت به باد، در یک الگوی شهری متداول در شهر عسلویه بررسی شده است. برای توصیف رفتار جریان باد و ذرات، پارامترهای سرعت، فشار، آشفتگی، غلظت، جهت و مسیر حرکت مدنظر قرار گرفته است.

روش‌شناسی تحقیق

محدوده مورد مطالعه

مطابق با طرح تفصیلی شهر عسلویه ویرایش سال ۱۳۹۱ (اخذشته از شهرداری شهر عسلویه)، کاربری‌های این شهر، در دو محدوده «تراکم کم» و «تراکم بالا» (شکل ۲) تعریف شده است. محدوده کم‌تراکم، بخش مرکزی است که در قسمت میانی نقشه شهر قرار گرفته و محدوده‌های تراکم بالا در طرفین آن واقع شده‌اند. در محدوده کم‌تراکم، بافت‌های پُر و موجود شهر واقع شده‌اند. دارابودن ویژگی‌های اجتماعی و فرهنگی، و در نتیجه، تغییر و تحول بسیار محدود، و لزوم وضع ضوابطی برای حفظ بافت موجود و اعمال کمترین تغییرات، از جمله مشخصات این محدوده است. به همین دلیل، ساخت‌وسازها در این محدوده، عمدتاً از نوع واحدهای مسکونی تک‌خانوری و دو خانوری است. ضوابط تفکیکی زمین، تناسب قطعات و تراکم، در جدول (۲ و ۱) ارائه شده است. منطقه مورد مطالعه در محدوده «تراکم بالا» در شکل (۲) نمایش داده شده است. بخشی از بافت مسکونی در طرح تفصیلی واقع در محدوده با تراکم بالا مدلسازی شد (شکل ۲). مدل شبیه‌سازی شده و جهت‌گیری معابر و ساختمان‌ها، و عرض معابر در شکل (۲) نمایش داده شده است.

طبق جدول (۲)، در ضوابط تراکمی در محدوده با تراکم بالا، حداکثر تعداد طبقات، ۴ طبقه (بدون احتساب پیلوت) تعیین شده است. چنانچه حداکثر ارتفاع طبقات مدنظر قرار گیرد (حدود ۱۶ متر)، نسبت تصویر در معابر ۸ متری، ۲ خواهد بود. ارتفاع کاربری صنعتی، ۱۲ متر در نظر گرفته شد. از آنجاکه بررسی جریان باد در فضای پشت این کاربری، جزء اهداف مطالعه حاضر نبود و تنها رفتار جریان باد در معابر و در میان بلوک‌های ساختمانی مدنظر بود، به‌منظور کاهش حجم محاسباتی، تنها ۴۰ متر از عرض ۱۴۰ متری این قطعه شبیه‌سازی شد. از میان بلوک‌های ساختمانی که در عرض فضای سبز و در طول ۶۰ و عرض ۳۰ متر قرار گرفته‌اند، حجمی به ابعاد ۳۰ در ۳۰ متر مدلسازی شد. از ترسیم کاربری تأسیسات و تجهیزات شهری در پشت بلوک‌های مسکونی صرف‌نظر شد تا رفتار باد در فضای خالی پشت ساختمان‌ها نیز بررسی شود.

جدول ۱. ضوابط تفکیک زمین، تناسبات قطعات، در محدوده‌های کم‌تراکم و پرتراکم شهر عسلویه

محدوده	حداقل مساحت (متر مربع)	حداقل عرض قطعات تفکیکی (متر)	حداکثر ارتفاع بنا تا زیر سقف (متر)	ارتفاع جان‌پناه
کم‌تراکم	۲۴۰	۱۰	۵/۳ یک طبقه و ۸/۸۰ دو طبقه	۱/۱۰
پرتراکم	۳۰۰	۱۰	-	-

* این عدد برای قطعات مستطیل، دوزنقه و متوازی‌الاضلاع صادق است. برای سایر اشکال، یک‌دوم بزرگ‌ترین ضلع قطعه در نظر گرفته می‌شود.

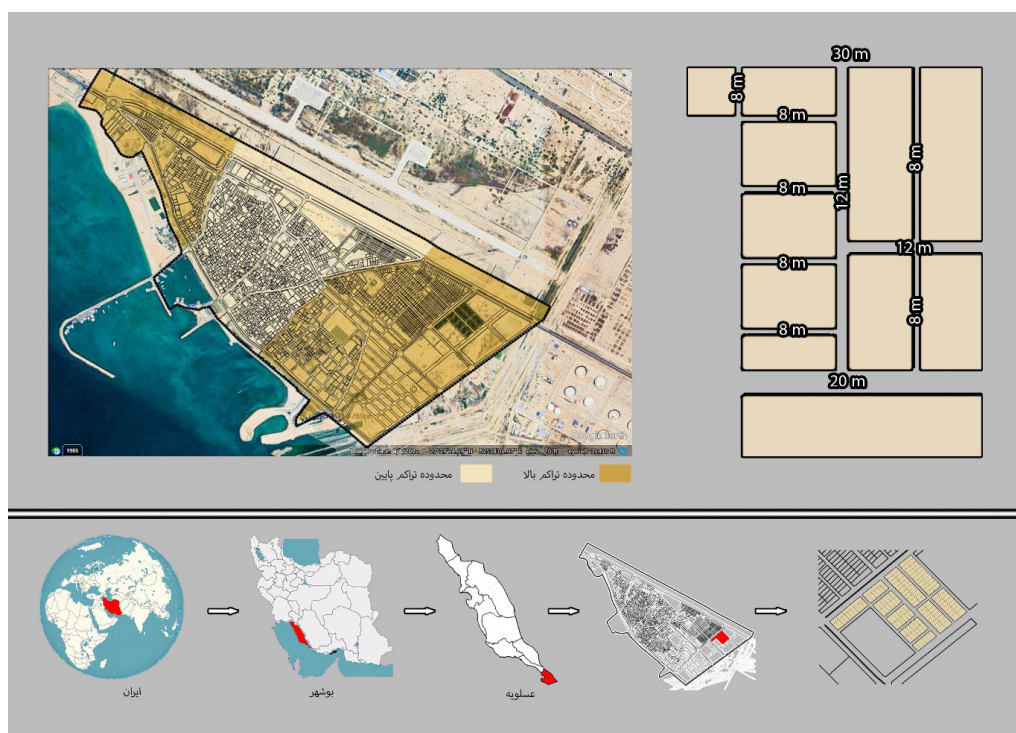
منبع: طرح تفصیلی شهر عسلویه، ۱۳۹۱

جدول ۲. ضوابط تراکمی در محدوده کم‌تراکم و پرتراکم شهر عسلویه

محدوده	حداقل مساحت قطعه (مترمربع)	حداکثر تراکم مجاز (%)	حداکثر سطح اشغال (%)	حداکثر تعداد طبقات	حداکثر مجاز تعداد واحد	حداقل فضای باز به ازای هر واحد (مترمربع)	حداقل عرض معبّر
کم‌تراکم	۱۰۰-۲۰۰	۱۰۰	۶۰	۲	۲	۳۰	۸
	۲۰۱-۲۴۰	۱۲۰	۶۰	۲	۴	۲۵	۱۰
	بیش از ۲۴۰	۱۵۰	۶۰	۳	-	۲۵	۱۲
پرتراکم	۱۰۰-۲۰۰	۱۲۰	۶۰	۲	۲	۲۵	۸
	۲۰۱-۳۰۰	۱۵۰	۶۰	۳	۶	۲۰	۱۲
	۳۰۱-۵۰۰	۱۸۰	۶۰	۳	-	۲۰	۱۶
	بیش از ۵۰۰	۲۴۰	۶۰	۴	-	۲۰	۲۰

* حداکثر تعداد واحد، متغیر است و براساس رعایت سطح اشغال و حداقل فضای باز به ازای هر واحد، تأمین می‌شود.

منبع: طرح تفصیلی شهر عسلویه، ۱۳۹۱



شکل ۲. منطقه مورد مطالعه

مدلسازی

تعریف شرایط مرزی: شبیه‌سازی در سه بُعد در نرم‌افزار انسیس فلوئنت نسخه ۲۰۲۱ انجام شد. پلان حجم

تعریف شده در نرم افزار، در شکل (۲) نمایش داده شده است. تونل باد اطراف ساختمان ها به صورت یک محفظه بسته با ارتفاع ۴۰ متر و با شرط مرزی سیمتری^{۳۳} تعیین شد. در مجموع مساحت ۱۲۹۲۷۶ مترمربع و طول ۳۷۸ متر به عنوان میدان حل تعریف شد.

باد به عنوان سیالی با دانسیته و ویسکازیت به ترتیب معادل $1/225 \text{ kg/m}^3$ و $1/7894e \text{ kg/ms}$ تعریف شد. بیشینه سرعت باد بر مبنای آمار اخذ شده از اداره هواشناسی، طی یک دوره یازده ساله (۱۳۹۰-۱۴۰۰)، معادل ۱۲ متر بر ثانیه تعیین شد. ثبت اطلاعات در ایستگاه های هواشناسی، به طور معمول، در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین و در مناطق باز انجام می شود. از سوی دیگر، به دلیل نیروی اصطکاک، در نزدیکی سطح زمین، سرعت باد کاهش می یابد (قیابکلو، ۱۳۹۵). بنابراین به منظور تعیین سرعت جریان باد در سطوح پایین تر از ایستگاه های هواشناسی، از معادله ۱ که توسط انجمن گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع آمریکا (ASHRAE, 2009) پیشنهاد شده است، استفاده شد. در این معادله، ارتفاع گرادیان باد در مرکز شهری معادل ۴۶۰ متر، ارتفاع گرادیان باد در منطقه مرجع یعنی ایستگاه هواشناسی معادل ۲۷۰ متر، ارتفاع مرجع اندازه گیری برای ایستگاه هواشناسی معادل ۱۰ متر، ضریب بافت برای مراکز شهری معادل ۰/۳۳ و برای منطقه مرجع یعنی ایستگاه هواشناسی معادل ۰/۱۴ در نظر گرفته شد. سرعت باد، در ارتفاع ۱۳/۳۰ متری (کف طبقه آخر به علاوه آکابه پنجره) برای ساختمان های واقع در مراکز شهری، برای سرعت باد مرجع ۱۲ متر بر ثانیه، برابر با ۵/۹۱۲ (۶ متر بر ثانیه) محاسبه شد. جهت وزش باد غالب (نسیم دریا به خشکی) در نظر گرفته شد. موقعیت خط ساحل، شرایط مختلف فصلی و عوارض ساحلی مانند کوه ها، بر شکل گیری باد در سواحل خلیج فارس تأثیرگذار هستند. با پیشروی از نیمه غربی به شرق خلیج فارس، از قدرت بادهای نظام مند کاسته می شود و نسیم های دریا و خشکی به واسطه نزدیک شدن کوه ها به ساحل، بر الگوی باد منطقه تأثیرگذارتر هستند (کميجانی، ناهید، ۱۳۹۷).

$$V_H = V_m \times \left(\frac{\delta_m}{H_m}\right)^{a_m} \times \left(\frac{H}{\delta}\right)^a \quad \text{معادله ۱}$$

در معادله فوق:

V_H : سرعت باد در ارتفاع مورد نظر (متر بر ثانیه)

V_m : سرعت باد مرجع (متر بر ثانیه)

δ : ارتفاع گرادیان باد در منطقه مورد نظر (متر)

δ_m : ارتفاع گرادیان باد در منطقه مرجع (متر)

H : ارتفاع مورد نظر (متر)

H_m : ارتفاع مرجع اندازه گیری (۱۰ متر برای ایستگاه هواشناسی)

a : ضریب بافت برای منطقه مورد نظر

a_m : ضریب بافت برای منطقه مرجع

کیفیت شبکه: با توجه به هندسه، مش چهاروجهی در نظر گرفته شد. محاسبات تا رسیدن به یافته های مستقل از شبکه انجام شد. شبکه با ابعاد المان (اجزای شبکه)^{۳۴} برابر با ۰/۰۱، با تعداد نود و المنت ۹۲۲۲۹۴ و ۶۵۳۱۷۱ مناسب تشخیص داده شد. مقادیر میانگین پارامترهای نسبت تصویر^{۳۵} و خوابیدگی^{۳۶} که معرف کیفیت این نوع شبکه هستند، به ترتیب معادل ۱/۷۹۱۲ و ۰/۲۱۰۶۷ محاسبه شد. مقادیر ۱ تا ۵ برای پارامتر اول و ۰ تا ۰/۵ برای پارامتر دوم، بیانگر کیفیت مناسب شبکه است.

مدل ها و روش های حل: برای حل، شرایط پایدار و غیروابسته به زمان تعیین شد. نوع حلگر، مبتنی بر فشار در نظر گرفته شد. جریان باد، به صورت توربولانسی و با مدل کی-اپسیلون ریلایزبل^{۳۷}، همراه با توابع دیواره استاندارد^{۳۸} (در پردازش نزدیک دیواره)^{۳۹} برای جریان توربولانسی تعریف شد. از آنجاکه این مدل آشفتگی، از

ترم‌های مستقلى برای اعمال اثر چرخش و دوران برخوردار است، از گزینه تأثیر سطوح خمیده از طریق تابع اصلاح انحناء^{۴۰} به‌طور جداگانه صرف‌نظر شد.

به‌منظور تعریف یک جریان دو فازى، از مدل فاز گسسته^{۴۱} استفاده شد. برای مدلسازى جریان‌های چندفازى، رویکردهای اوایلر-لاگرانژ و اوایلر-اوایلر قابل استفاده است. در رویکرد اول، فاز سیال، پیوسته و ذرات، فاز پراکنده هستند که جرم، مومنتم و انرژی را با فاز سیال مبادله می‌کنند. در این رویکرد، می‌توان مسیر حرکت ذرات را مشخص کرد. از این رویکرد در مدل فاز گسسته استفاده می‌شود. در شرایطی که جریان سیال بر ذرات از طریق نیروی درگ و آشفته‌گی جریان تأثیرگذار است، اما ذرات تأثیری روی جریان سیال ندارند، و یا جریان سیال بر ذرات اثرگذار است و ذرات نیز بر مومنتم و توربولانس جریان سیال تأثیرگذار هستند، این مدل، از جمله روش‌های قابل استفاده است. به‌منظور مدلسازى حرکت ذرات، ذرات فاقد نیروی جنبشی (نوع بی‌اثر)^{۴۲} و از جنس مس، به‌عنوان ذراتی با منبع فعالیت‌های انسانی و فراوانی بالا در شهر عسلویه (نادری‌زاده، ایوبی، خادمی، ۱۳۹۵؛ نادری‌زاده، خادمی، ایوبی، ۱۳۹۵)، با دانسیته معادل 8978 kg/m^3 در نظر گرفته شد. در پژوهش‌های مختلف درباره فلزات سنگین موجود در گردوغبار در کشورها و شهرهای مختلف، به بررسی غلظت، منابع انتشار، و اثرات بهداشتی فلزاتی از جمله سرب، کادمیوم، روی، منگنز، مس، نیکل، کبالت و کروم پرداخته شده است. بیش از پنجاه درصد آلودگی گردوغبار، مربوط به مس بوده است (Vlasov, Liu, Yan, Birch, 2021). یافته‌های پژوهش‌های مشابه خارج از ایران نیز، مانند (Kosheleva, & Kasimov, 2021; Pan, Lu, & Lei, 2017; & Zhu, 2014)، نشان می‌دهد که سطوح مس با فعالیت‌های انسانی، و سطوح نیکل با فعالیت‌های طبیعی مرتبط هستند.

حداقل و حداکثر قطر ذرات، 0.1 و 10 میکرون (ذرات $PM_{2.5}$ و PM_{10}) (معادل $1e-7$ و 0.00001 متر) تعیین شد. سرعت حرکت و انتشار ذرات برابر با سرعت سیال (6 متر بر ثانیه) تعیین شد. قانون درگ کروی^{۴۳} لحاظ شد. به نیرویی که به یک جسم در حال حرکت در یک سیال، در جهت حرکت جریان سیال، و خلاف جهت حرکت آن جسم وارد می‌شود، نیروی درگ گفته می‌شود. درگ کروی، نیروی مقاومتی است که یک جسم کروی (مانند ذرات) هنگام حرکت در یک سیال (مانند هوا) با آن مواجه می‌شود. اثر نواسانات سرعت آشفته آبی بر مسیر ذرات، با روش ردیابی تصادفی^{۴۴} و مدل رصد اتفاقی^{۴۵} بررسی شد. در این روش، پراکندگی آشفته ذرات، با استفاده از سرعت لحظه‌ای ذرات و در امتداد مسیر ذره پیش‌بینی می‌شود و با محاسبه مسیر برای تعداد مشخصی از ذرات، اثرات اتفاقی آشفته‌گی روی ذره لحاظ می‌شود. روش‌های حل برای تمام پارامترها و از جمله سرعت، فشار، توربولانس و آشفته‌گی، مرتبه دوم در نظر گرفته شد.

یافته‌ها

رفتار جریان باد

در پرسش اول، وضعیت جهت و مسیر حرکت، سرعت، فشار و آشفته‌گی جریان باد در کدهای ارتفاعی و معابر مختلف و جبهه‌های رو و پشت به باد، مطرح شد. در پاسخ به این پرسش، در جدول (۳)، بردارها و کانتورهای سرعت باد (برحسب متر بر ثانیه)، مسیر حرکت، فشار (برحسب پاسکال) و انرژی جنبشی آشفته‌گی^{۴۶} جریان باد، در سطح زمین و در ارتفاع‌های 3 ، 6 ، 9 ، 12 و 15 متری از سطح زمین نمایش داده شده است (برای کانتورهای سرعت جریان باد، ارتفاع 50 سانتی‌متری از سطح زمین نمایش داده شده است. روی سطح زمین، سرعت هوا در همه بخش‌ها، صفر یا بسیار به صفر نزدیک، و تشخیص تفاوت سرعت در بخش‌های مختلف، دشوار است). رنگ‌آمیزی مسیر حرکت جریان باد، براساس سرعت باد (برحسب متر بر ثانیه) انجام شده است.

همچنین، سایه باد در فضای پشت ساختمان‌ها در برش و نمای پرسپکتیوی نمایش داده شده است. با استفاده از تصاویر ارائه‌شده در جدول (۳)، می‌توان به بخش اول پرسش سوم (چگونگی تأثیر ارتفاع بنا، جهت‌گیری معابر و جهت‌گیری بناها نسبت به باد، بر رفتار جریان باد) نیز پاسخ داد.

تأثیر ارتفاع، جهت‌گیری معابر و بناها بر سرعت باد: طبق کانتورهای سرعت باد در جدول (۳)، سرعت باد در بافت مورد نظر، از صفر متر بر ثانیه در سطح معبر، به بیش از ۱۰ متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۵ متری از سطح زمین رسیده است. در مجموع می‌توان بیان داشت، با افزایش ارتفاع از سطح زمین، سرعت هوا افزایش داشته است و بخش اول از فرضیه اول مورد تأیید است. لازم به ذکر است که سرعت باد در معابر با عمق کمتر (کاهش نسبت تصویر) بیشتر است و جریان باد به عمق بیشتری از معبر نفوذ کرده است.

در سطح زمین، تفاوت قابل توجه در سرعت باد در معابر و جبهه‌های مختلف مشاهده نمی‌شود. در هر ارتفاع، در معابر هم‌راستا با باد، سرعت جریان هوا بیشتر از معابر عمود بر باد است. از آنجاکه ساختمان‌ها همچون سدی در برابر باد عمل کرده‌اند، برای مثال، در ارتفاع ۳ متری از سطح زمین، سرعت باد در معابر عمود بر جریان باد و نزدیک‌تر به دهانه ورود باد به بافت، بیشتر از سرعت باد در معابر عمود بر باد و دورتر از دهانه ورود هوا قرار گرفته‌اند. در بخش دوم از فرضیه اول، احتمال افزایش سرعت باد در معابر هم‌راستا با جریان، و کاهش سرعت باد در معابر عمود بر جریان بیان شد. طبق یافته‌های این بخش، این فرضیه رد می‌شود. چراکه با افزایش فاصله از دهانه ورود هوا به بافت، نمی‌توان چنین شرایطی را انتظار داشت. همچنین، هرچه سرعت باد بیشتر باشد، به عمق بیشتری از معبر نفوذ می‌کند.

در جبهه رو به باد، سرعت جریان بیشتر از جبهه‌های پشت به باد است. با افزایش ارتفاع از سطح زمین، منطقه فاقد باد در جبهه پشت به باد (سایه باد) کوچک‌تر می‌شود. بنابراین، بخش سوم از فرضیه اول نیز مورد تأیید نیست. چراکه با افزایش ارتفاع از سطح زمین، نمی‌توان چنین شرایطی را انتظار داشت. لازم به ذکر است که طول سایه باد (منطقه‌ای از پشت بادشکن که در آن، باد تأثیری ندارد و فشار منفی است (Grondzik & Kwok, 2019; Lechner, 2015))، به ارتفاع و عرض بادشکن و تخلخل آن نیز وابسته است. در بادشکن‌های صلب با تراکم زیاد مانند بناها (درمقابل بادشکن‌های سبک با تراکم کم، و متوسط یا نیمه‌متراکم مانند درختان) که باد را از خود عبور نمی‌دهند، جریان بلافاصله پس از عبور از بادشکن، به علت فشار منفی، به سمت پایین منحرف می‌شود و در نتیجه سایه باد کوچک‌تر است. در جدول (۳)، محدوده سایه باد نمایش داده شده است (برش C-C).

تأثیر ارتفاع، جهت‌گیری معابر و بناها بر فشار باد: طبق تصاویر کانتورهای فشار جریان باد در جدول (۳)، با افزایش ارتفاع از سطح زمین، اختلاف قابل توجه در فشار جریان باد مشاهده نمی‌شود. با این حال در مجموع، با افزایش ارتفاع، فشار باد در جبهه‌های رو به جریان باد، کاهش یافته است. فشار منطقه سایه باد در جبهه‌های پشت به باد افزایش داشته است.

در معابر هم‌راستا با باد و یا عمود بر جریان باد، تفاوت قابل توجه مشاهده نمی‌شود. بیشترین فشار جریان باد، در جبهه‌های رو به باد، به‌ویژه در دهانه ورود هوا به بافت و محل برخورد آن به بناها مشهود است. در ارتباط با تأثیر ارتفاع و جهت‌گیری معابر و بناها بر فشار جریان باد، فرضیه‌ای ارائه نشده است. با این حال، وجود حداکثر میزان فشار استاتیکی در جبهه‌های ساختمانی رو به باد (بادخورها)، می‌تواند مؤید ضرورت و اهمیت انتخاب نوع و مقاومت مصالح با توجه به بار جریان باد باشد.

تأثیر ارتفاع، جهت‌گیری معابر و بناها بر آسفتگی باد: طبق کانتورهای انرژی جنبشی جریان باد در جدول

(۳)، انرژی جنبشی آشفته‌گی که معیاری برای تعیین کمی شدت تلاطم جریان است، در جبهه پشت به باد افزایش می‌یابد. با افزایش ارتفاع از سطح زمین نیز جریان متلاطم‌تر می‌شود. با پیوستن باد به جریان آزاد از میزان تلاطم کاسته می‌شود. در زوایای تغییر جهت باد، جریان متلاطم ایجاد شده است.

تأثیر ارتفاع، جهت‌گیری معابر و بناها بر جهت و مسیر حرکت جریان باد: طبق بردارها و مسیر حرکت جریان باد در جدول (۳)، با افزایش ارتفاع از سطح زمین، بردارهای جریان افزایش یافته و منطقه فاقد باد در جبهه‌های پشت به باد کاهش یافته است. جریان گردبادی در جبهه پشت به باد در آخرین ردیف ساختمان‌ها (منطقه سایه باد) مشاهده می‌شود.

در معابر هم‌راستا با باد، بردارها و مسیر حرکت جریان، در راستای طولی معبر قرار دارند. در معابر عمود بر باد، جریان‌های متلاطم و فاقد جهت‌گیری مشخص ایجاد شده است. حتی با افزایش فاصله از دهانه ورود هوا به بافت نیز چنین شرایطی برقرار است.

مطابق با مسیر حرکت جریان باد در نمای پرسپکتیوی در جدول (۳)، و برش C-C، بلوک‌های ساختمانی موافقی در برابر باد هستند و باعث می‌شوند که جریان باد، ابتدا به سمت بالا، و سپس در جبهه پشت به باد ساختمان (منطقه سایه باد)، به سمت پایین حرکت کند.

رفتار ذرات معلق

در پرسش دوم، سرعت، غلظت و محل تجمع، و جهت و مسیر حرکت ذرات معلق مطرح شد. در پاسخ به این پرسش، در تصاویر ارائه‌شده در جدول (۴)، غلظت، جهت و مسیر حرکت^{۴۷} ذرات فاقد جرم و ردیابی^{۴۸} ذرات معلق نمایش داده شده است. به مسیر حرکت هر ذره رنگ متفاوتی اختصاص داده شده است. رهگیری ذرات معلق دارای جرم، براساس سرعت و قطر ذرات در شش سطح مختلف ارائه شده است. کانتورهای غلظت ذرات در سطح زمین و در ارتفاع‌های ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ متری از سطح زمین نمایش داده شده است. پاسخ به بخش دوم پرسش سوم (تأثیر ارتفاع و جهت‌گیری معابر و بناها نسبت به باد، بر رفتار ذرات معلق نیز از طریق تصاویر جدول (۴) امکان‌پذیر است.

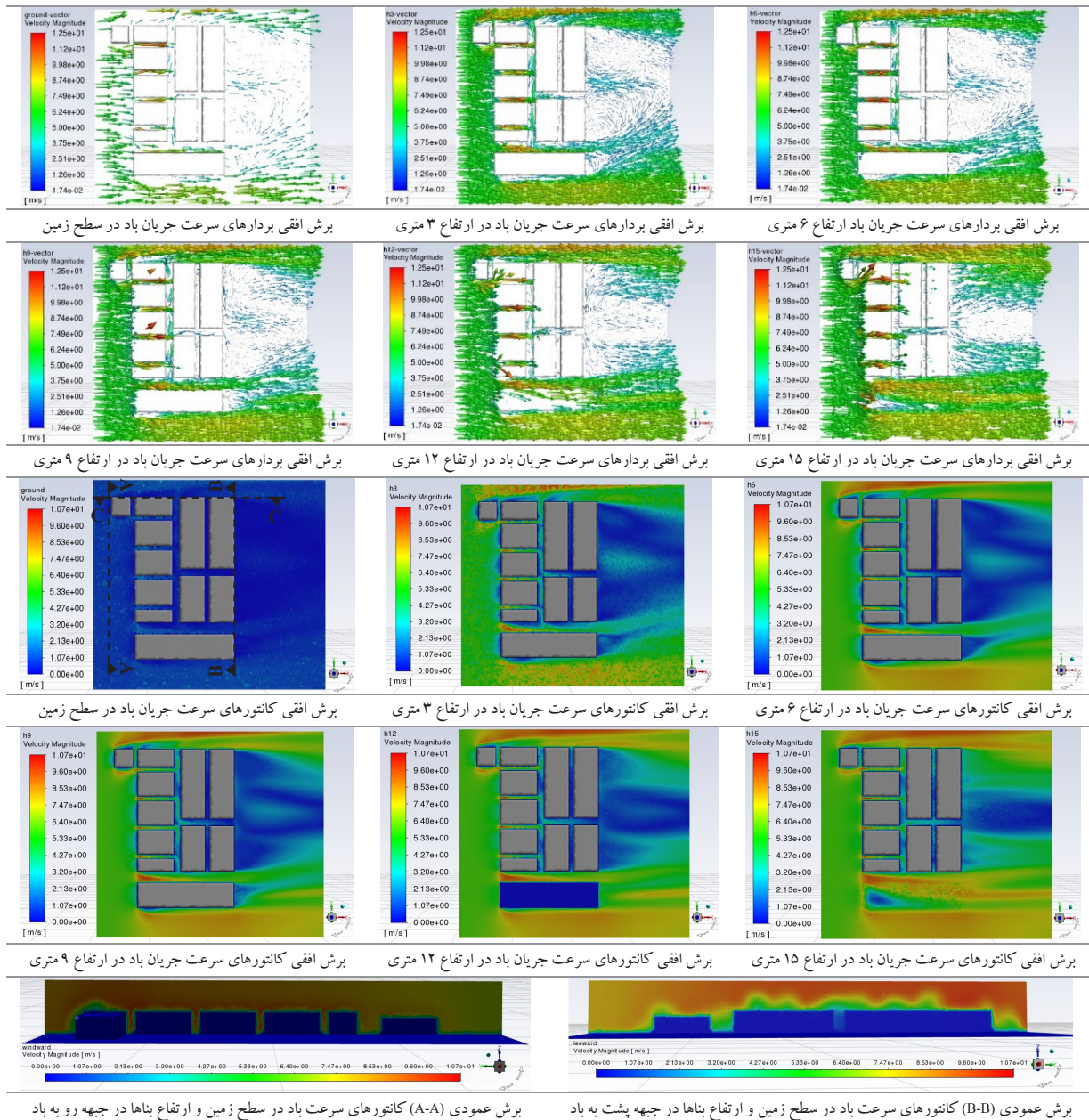
تأثیر ارتفاع و جهت‌گیری معابر و بناها بر سرعت حرکت ذرات: طبق تصاویر مسیر حرکت ذرات، ارائه‌شده در جدول (۴)، ارتباط مشخصی میان ارتفاع از سطح زمین و سرعت ذرات فاقد جرم مشاهده نمی‌شود. با کاهش ارتفاع، سرعت ذرات معلق اندکی افزایش یافته است. از آنجاکه در ارتفاع پایین‌تر، سرعت هوا کمتر است، سرعت حرکت ذرات معلق از سرعت جریان باد پیروی نکرده است و بخش اول فرضیه دوم تأیید نمی‌شود. تأثیرگذاری جهت‌گیری معابر یا بناها بر سرعت حرکت ذرات فاقد جرم و یا ذرات معلق مشهود نیست.

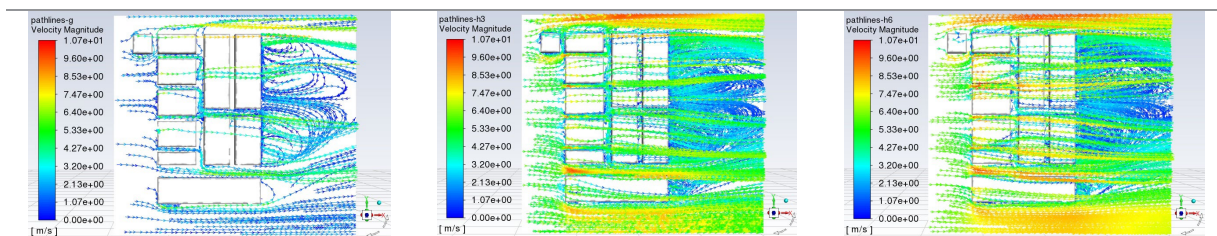
تأثیر ارتفاع و جهت‌گیری معابر و بناها بر غلظت ذرات: در هر ارتفاع، کانتورهای غلظت ذرات (جدول ۳) در معابر و جبهه‌های مختلف، با کانتورهای سرعت جریان باد هم‌خوانی دارند. غلظت ذرات معلق تا حد زیادی از سرعت جریان باد پیروی کرده است. غلظت ذرات در منطقه سایه باد (جدول ۴، برش C-C) به صفر رسیده است. بنابراین، بخش دوم فرضیه دوم تأیید نمی‌شود. در ابتدای پژوهش، تصور بر این بود که کاهش سرعت باد در سطح زمین، منجر به افزایش نشست و در نتیجه افزایش غلظت ذرات می‌شود.

تأثیر ارتفاع و جهت‌گیری معابر و بناها بر جهت و مسیر حرکت ذرات: مسیر حرکت ذرات فاقد جرم در ارتفاع، معابر و جبهه‌های مختلف (ارائه‌شده در جدول ۴)، از حرکت جریان باد (ارائه‌شده در جدول ۳) تبعیت کرده است. بنابراین تجمع این ذرات در جبهه پشت به باد و محدوده سایه باد مشاهده می‌شود. با افزایش ارتفاع، حتی در

منطقه فاقد باد جبهه پشت به باد در آخرین ردیف ساختمان‌ها (محدوده سایه باد)، مسیر حرکت ذرات معلق تغییر نکرده است (ذرات نشست نکرده‌اند). در هیچ موردی، تغییری در مسیر حرکت ذرات معلق مشاهده نمی‌شود. بنابراین بخش سوم فرضیه دوم مورد تأیید نیست و ذرات معلق از حرکت جریان باد تبعیت نمی‌کنند. در مجموع، در هر ارتفاع، بیشترین و کمترین غلظت ذرات معلق، به ترتیب، در دهانه رو به باد، و در منطقه سایه باد مشاهده می‌شود (جدول ۴).

جدول ۳. سرعت، مسیر حرکت، فشار و انرژی جنبشی آشفتگی جریان باد در سطح زمین و ارتفاع‌های ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ متری از سطح زمین

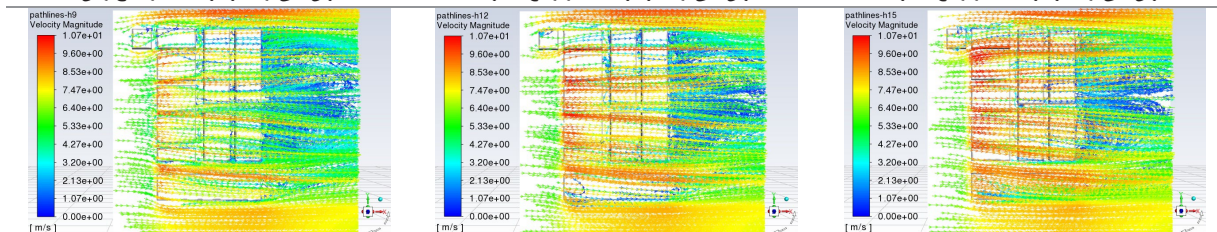




برش افقی از مسیر حرکت باد در سطح زمین

برش افقی از مسیر حرکت باد در ارتفاع ۳ متری

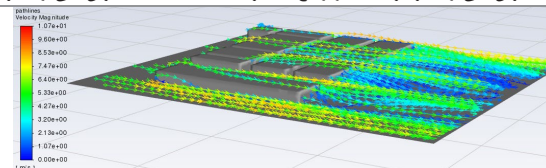
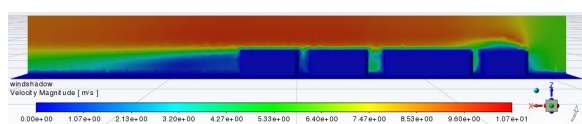
برش افقی از مسیر حرکت باد در ارتفاع ۶ متری



برش افقی از مسیر حرکت باد در ارتفاع ۹ متری

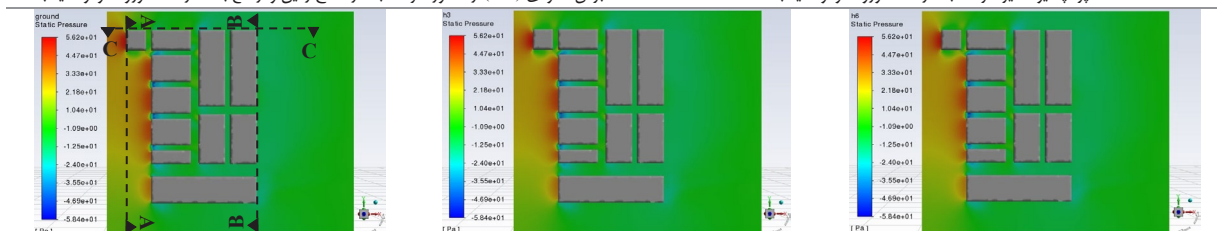
برش افقی از مسیر حرکت باد در ارتفاع ۱۲ متری

برش افقی از مسیر حرکت باد در ارتفاع ۱۵ متری



برش عمودی (C-C) از کانتور سرعت باد در سطح زمین و ارتفاع بناها در دهانه ورود هوا و سایه باد

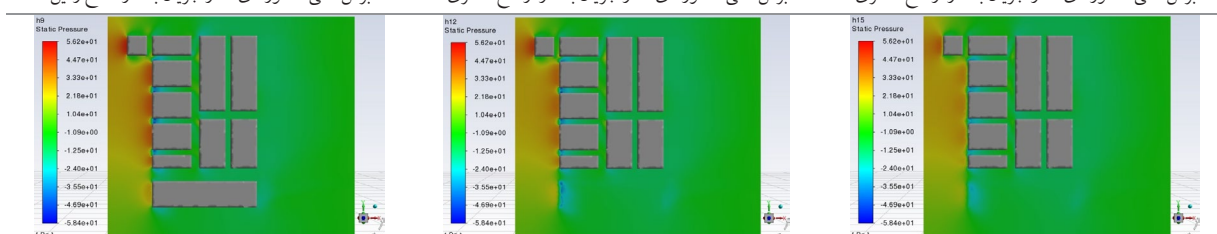
پرسپکتیو مسیر حرکت باد در دهانه ورود هوا و سایه باد



برش افقی کانتورهای فشار جریان باد در سطح زمین

برش افقی کانتورهای فشار جریان باد در ارتفاع ۳ متری

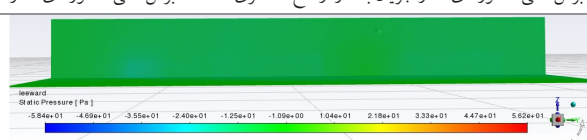
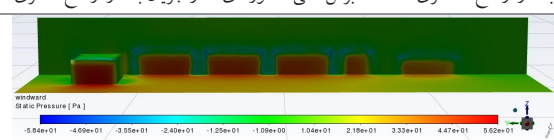
برش افقی کانتورهای فشار جریان باد در ارتفاع ۶ متری



برش افقی کانتورهای فشار جریان باد در ارتفاع ۹ متری

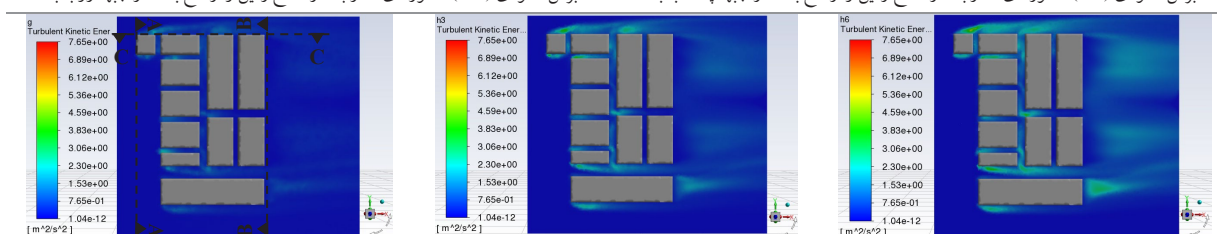
برش افقی کانتورهای فشار جریان باد در ارتفاع ۱۲ متری

برش افقی کانتورهای فشار جریان باد در ارتفاع ۱۵ متری



برش عمودی (A-A) کانتورهای فشار باد در سطح زمین و ارتفاع بناها در جبهه رو به باد

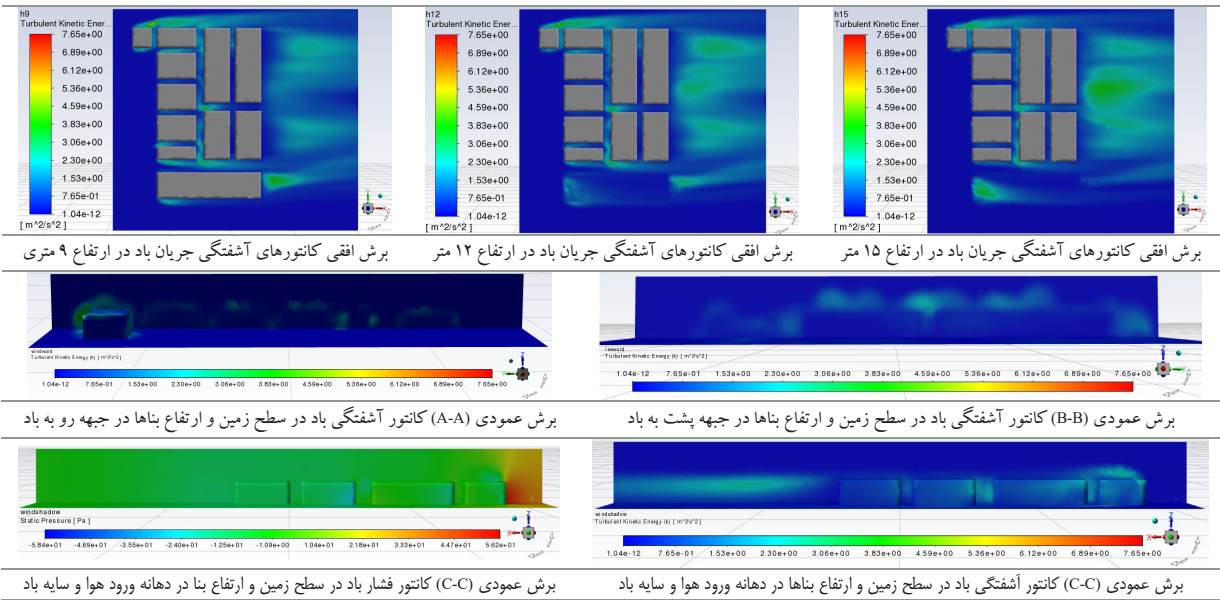
برش عمودی (B-B) کانتورهای فشار باد در سطح زمین و ارتفاع بناها در جبهه پشت به باد



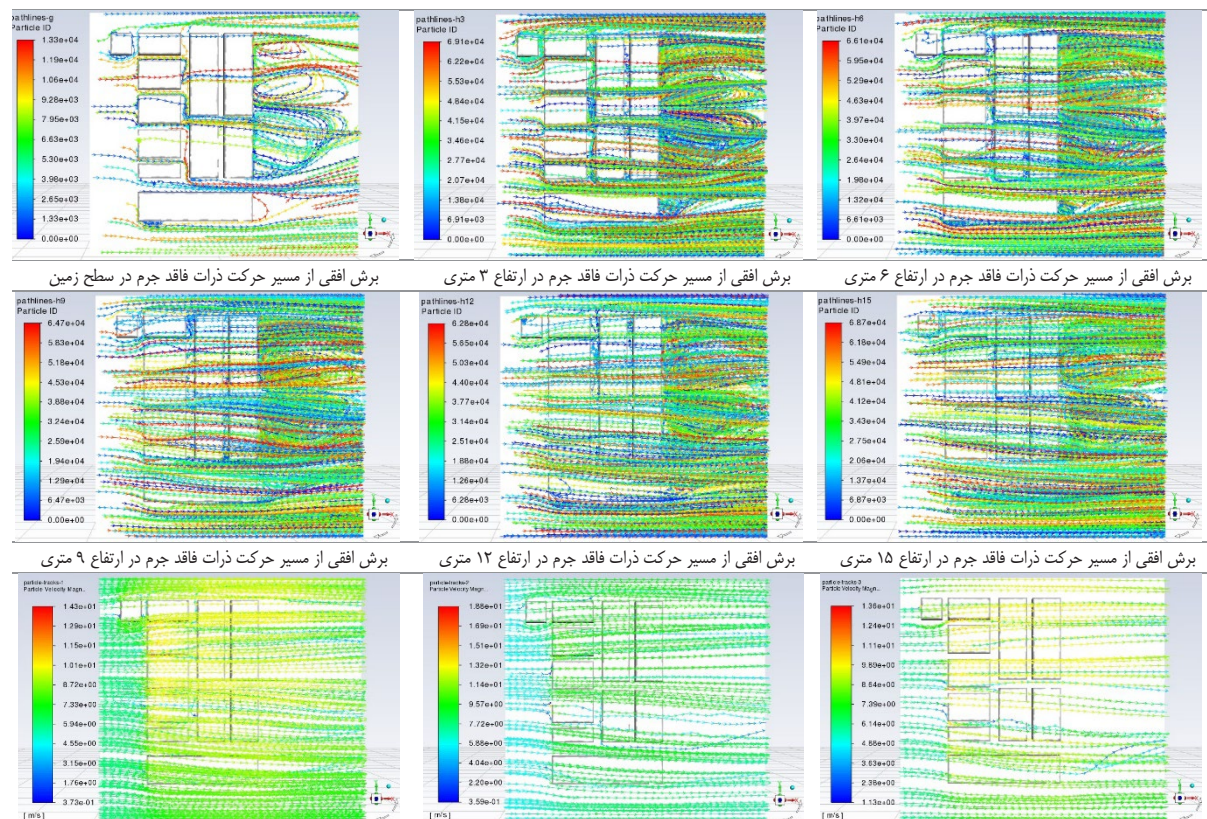
برش افقی کانتورهای آشفتگی جریان باد در سطح زمین

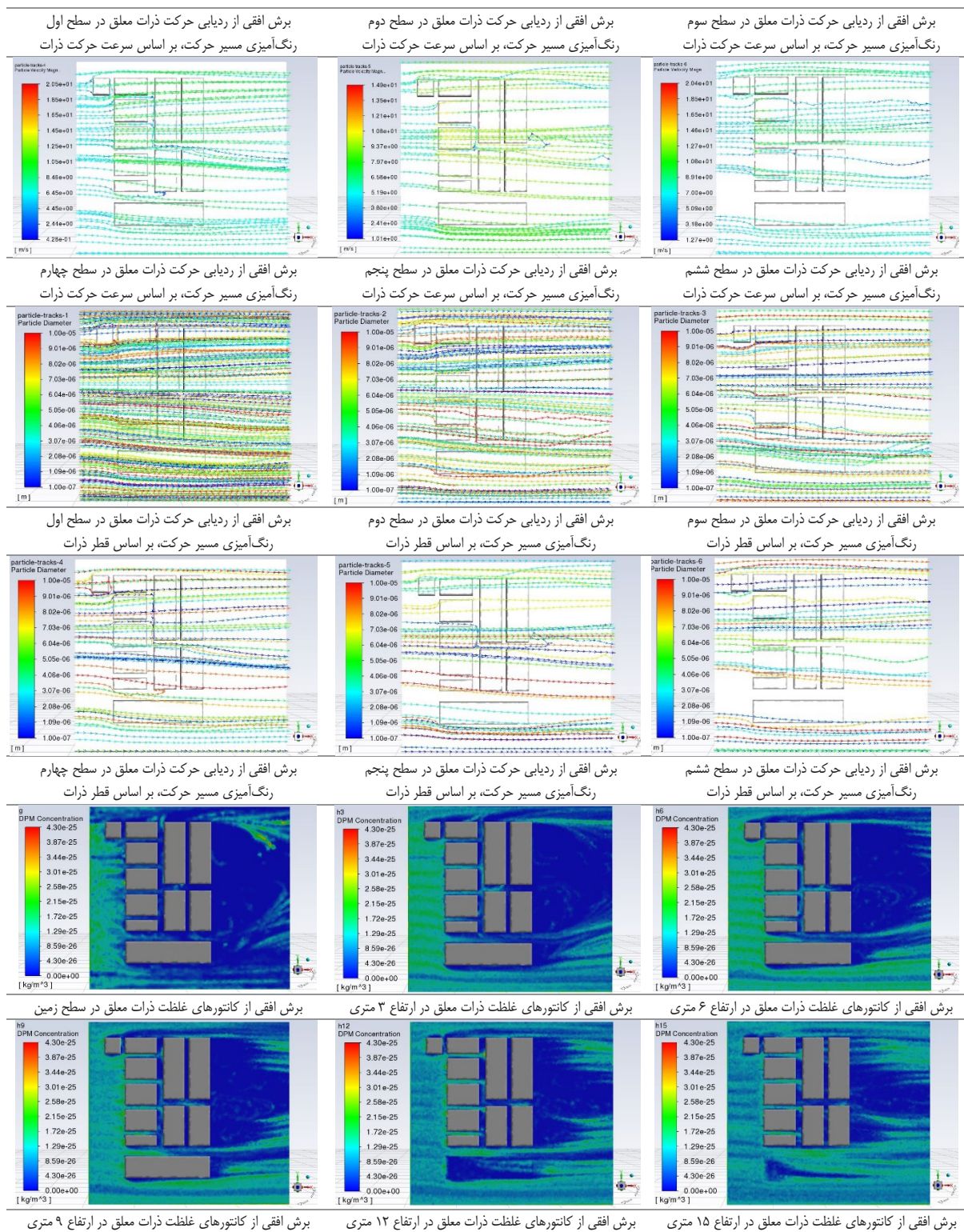
برش افقی کانتورهای آشفتگی جریان باد در ارتفاع ۳ متری

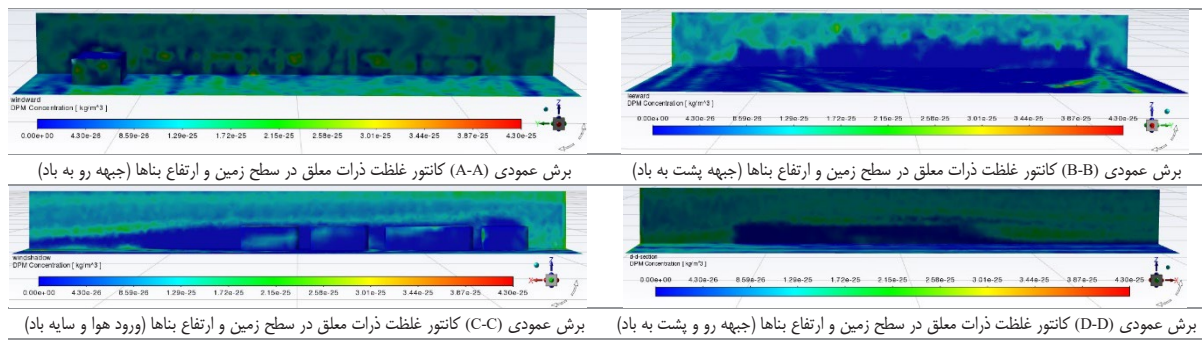
برش افقی کانتورهای آشفتگی جریان باد در ارتفاع ۶ متری



جدول ۴. رهگیری ذرات در شش سطح مختلف، و غلظت ذرات معلق در سطح زمین و ارتفاعهای ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ متری از سطح زمین







بحث

مطالعه حاضر با هدف بررسی رفتار جریان باد و ذرات معلق پیرامون بلوک‌های ساختمانی در کدهای ارتفاعی مختلف، معابر هم‌راستا با جریان باد و عمود بر جریان باد، و جبهه‌های رو و پشت به باد، به روش شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی انجام شد. در راستای هدف اصلی مذکور، چهار هدف تعیین شد؛ شامل: بررسی رفتار جریان باد؛ بررسی رفتار ذرات؛ بررسی تأثیر ارتفاع و جهت‌گیری معابر و بناها نسبت به باد، بر رفتار جریان باد و ذرات؛ بررسی ارتباط رفتار ذرات با جریان باد، سرعت، فشار، انرژی جنبشی آشفتگی، جهت و مسیر حرکت، برای توصیف رفتار باد تعیین شد. سرعت، جهت و مسیر حرکت، و غلظت و محل تجمع، در توصیف رفتار ذرات مدلسازی شد.

یافته‌ها نشان داد ارتفاع و جهت‌گیری معابر و بناها بر جریان باد تأثیرگذار هستند؛ به گونه‌ای که با افزایش ارتفاع، سرعت جریان باد افزایش می‌یابد. وجود ناهم‌واری‌ها و افزایش نیروی اصطکاک بر جریان هوا، این تأثیرگذاری را توجیه‌پذیر می‌کند. همچنین در مجاورت محل ورود هوا، سرعت باد، در معابر هم‌راستا با جریان و جبهه‌های رو به باد، بیشتر است. تأثیر هندسه بافت بر سرعت، فشار و آشفتگی جریان باد و ایجاد جریان‌های متلاطم و گردبادی، در بحث آسایش حرارتی و انتخاب نوع و مقاومت مصالح در معابر و فضاهای شهری حائز اهمیت است. بنابراین الگوی مناسب بافت شهری در کاهش اثرات آلودگی جوی سودمند است. شبیه‌سازی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی، می‌تواند در ارزیابی الگوی جریان باد و پراکندگی آلاینده‌ها و در نتیجه پیش‌بینی کیفیت هوای شهر به کار رود.

طبق یافته‌ها، ارتفاع و جهت‌گیری معابر و بناها، بر رفتار ذرات معلق به‌طور مستقیم تأثیر ندارند؛ اما از طریق تأثیر بر جریان باد، بر رفتار ذرات معلق تأثیرگذار هستند. کاهش غلظت ذرات آلاینده با کاهش سرعت باد در منطقه سایه باد مشاهده شد. در برخی پژوهش‌ها از طریق تکنیک‌های آماری، ارتباط معنادار میان پارامترهای جوی از جمله سرعت باد در فصول مختلف سال و غلظت ذرات معلق نشان داده شده است. در برخی مطالعات، همبستگی آماری مثبت و در برخی، همبستگی منفی میان سرعت باد و غلظت ذرات معلق گزارش شده است. برای نمونه مراجعه کنید به: (Behrooz *et al.*, 2022; Cichowicz, Wielgosiński, & Fetter, 2020; Dominick, Latif, Juahir, Aris, & Zain, 2012; Liu *et al.*, 2020). با این حال، پایش غلظت ذرات در سایت‌های پایش کیفیت هوا، و سنجش پارامترهای جوی در سایت‌های هواشناسی، نمی‌تواند معیار مناسبی برای ارزیابی کیفیت هوا در یک محدوده خاص از بافت شهر ارائه دهد. مقایسه این دو متغیر با روش‌های آماری، تأثیر هندسه بافت بر جریان باد و پراکندگی آلاینده‌ها را لحاظ نمی‌کند.

پیروی ذرات فاقد جرم از جریان باد و تجمع آن‌ها در منطقه سایه باد، حاکی از اهمیت محاسبات مربوط به این محدوده در طراحی فضاهای شهری در مجاورت ساختمان‌های مرتفع است. لازم به ذکر است که مطابق با پژوهش‌های پیشین مانند (Ghasemi, Toghraie, & Abdollahi, 2020; Institute for Environmental

(Research, 2018) نیز ذرات با قطر بزرگتر از ۱ و کوچکتر از ۲۰ میکرومتر، از حرکت سیالی که آن‌ها را حمل می‌کند، پیروی می‌کنند. ذراتی با قطر بزرگتر از ۲۰ میکرومتر، سریع‌تر ته‌نشین می‌شوند. با توجه به هزینه‌های محاسباتی بالای شبیه‌سازی عددی به روش مطالعه حاضر، برای مدلسازی جریان هوا در مقیاس شهری، در یک مطالعه (Xu, Gao, & Zhang, 2023)، روش‌های عددی سریع‌تر و ساده‌تر^{۴۹} پیشنهاد شده است.

نتیجه‌گیری

در مجموع به‌طور خلاصه می‌توان بیان داشت بیشترین و کمترین غلظت ذرات معلق به‌ترتیب در جبهه رو به باد و سایه باد، و تجمع ذرات فاقد جرم نیز در جبهه‌های پشت به باد در محدوده سایه باد، قابل مشاهده است. ازسوی دیگر، در ارتفاعات بالاتر بنا، با افزایش سرعت و تلاطم جریان، طول سایه باد در معابر و جبهه‌های پشت به باد کاهش می‌یابد.

یافته‌ها در مطالعه آسایش حرارتی و مقاومت مصالح با توجه به بار باد در فضاهای شهری نیز سودمند خواهد بود. در این مطالعه، دمای هوا ثابت فرض شد. بررسی تأثیر سایر پارامترهای جوی مانند دما، و همچنین تغییرات نسبت تصویر، بر پراکندگی ذرات در بافت شهری در ادامه این پژوهش می‌تواند صورت گیرد. همچنین، سایر روش‌های شبیه‌سازی جریان هوای بیرون، برای ارزیابی کیفیت هوا در معابر شهری برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود.

پی‌نوشت‌ها

1. Urban geometry
2. What happened, and how?, and why?
3. What if?
4. Hypothesis-driven simulation studies
5. Pathlines
6. Particle tracks
7. Suspended particles
8. Particulate Matter (PM)
9. Coarse particles
10. Fine particles
11. Ultra fine particles
12. PM_{10}
13. $PM_{2.5}$
14. Spatial statistic techniques
15. Geospatial data processing tools
16. Micro-scale urban form
17. Autodesk CFD 2021
18. Geographic information system (GIS)
19. Plan area density (λ_P)
20. Gross floor area ratio (λ_{GFA})
21. Occlusivity (Oc)
22. Arc Map

jne.2016.59763

- وزارت راه و شهرسازی، اداره کل راه و شهرسازی استان بوشهر (۱۳۹۱). طرح تفصیلی شهر عسلویه: دفترچه ضوابط و مقررات ساختمانی.

- Abdollahzadeh, N., & Biloria, N. (2021). Outdoor thermal comfort: Analyzing the impact of urban configurations on the thermal performance of street canyons in the humid subtropical climate of Sydney. *Frontiers of Architectural Research*, 10(2), 394-409. doi:https://doi.org/10.1016/j.foar.2020.11.006.
- ASHRAE. (2009). *ASHRAE Handbook, Fundamentals*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.
- Badach, J., Wojnowski, W., & Gębicki, J. (2023). Spatial aspects of urban air quality management: Estimating the impact of micro-scale urban form on pollution dispersion. *Computers, Environment and Urban Systems*, 99, 101890. doi:https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2022.101890.
- Behrooz, R. D., Mohammadpour, K., Broomandi, P., Kosmopoulos, P. G., Gholami, H., & Kaskaoutis, D. G. (2022). Long-term (2012-2020) PM10 concentrations and increasing trends in the Sistan Basin: the role of Levar wind and synoptic meteorology. *Atmospheric Pollution Research*, 13(7), 101460. doi:https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101460.
- Chatzidimitriou, A., & Yannas, S. (2017). Street canyon design and improvement potential for urban open spaces; the influence of canyon aspect ratio and orientation on microclimate and outdoor comfort. *Sustainable cities and society*, 33, 85-101. doi:https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.05.019.
- Cichowicz, R., Wielgosiński, G., & Fetter, W. (2020). Effect of wind speed on the level of particulate matter PM10 concentration in atmospheric air during winter season in vicinity of large combustion plant. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 77(1-2), 35-48. doi:https://doi.org/10.1007/s10874-020-09401-w.
- Clipson, C. (1993). Simulation for planning and design: A review of strategy and technique. *Environmental simulation: Research and policy issues*, 23-57. doi:https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1140-7_2.
- Cong, X., Wang, H., & Huang, J. (2022). Urban Management in the Dynamic Relationship between the Occurrence of Environmental Pollution Accidents and Economic Development in China. *Journal of Environmental and Public Health*, 2022, 3751028. doi:https://doi.org/10.1155/2022/3751028.
- Dirksen, M., Ronda, R., Theeuwes, N., & Pagani, G. (2019). Sky view factor calculations and its application in urban heat island studies. *Urban Climate*, 30, 100498. doi:https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100498.
- Dominick, D., Latif, M. T., Juahir, H., Aris, A. Z., & Zain, S. M. (2012). An assessment of influence of meteorological factors on PM10 and NO2 at selected stations in Malaysia. *Sustainable Environment Research*, 22, 305-315.
- Dooley, K. (2002). Simulation research methods. In J. Baum (Ed.), *Companion to Organizations* (829-848). London: Blackwell.
- Duffney, P., Stanek, L., & Brown, J. (2023). Air pollution: Sources, regulation, and health effects. *Encyclopedia of Toxicology (Fourth Edition)*, 1, 215-228. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824315-2.00754-5.
- EPA. (2023a). *Outdoor Air Quality: Three Categories of Indicators. Report on the Environment*. Retrieved January 1, 2024 from https://www.epa.gov/report-environment/outdoor-air-quality#:~:text=These%20six%20pollutants%20(carbon%20monoxide,human%20health%20and%20the%20environment.
- EPA. (2023b). *Particulate Matter (PM) Basics*. Retrieved January 15, 2024 from https://www.epa.

gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics.

- Fathi, S., Sajadzadeh, H., Mohammadi Sheshkal, F., Aram, F., Pinter, G., Felde, I., & Mosavi, A. (2020). The role of urban morphology design on enhancing physical activity and public health. *International journal of environmental research and public health*, 17(7), 2359. doi:https://doi.org/10.3390/ijerph17072359.
- Gharbi, I., Kammoun, A., & Kefi, M. K. (2023). To what extent does renewable energy deployment reduce pollution indicators? the moderating role of research and development expenditure: Evidence from the top three ranked countries. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1096885. doi:https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1096885.
- Ghasemi, M., Toghraie, D., & Abdollahi, A. (2020). An experimental study on airborne particles dispersion in a residential room heated by radiator and floor heating systems. *Journal of Building Engineering*, 32, 101677. doi:https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101677.
- Groat, L. N., & Wang, D. (2013). *Architectural research methods*. New York: John Wiley & Sons.
- Grondzik, W. T., & Kwok, A. G. (2019). *Mechanical and electrical equipment for buildings*. Hoboken, New Jersey: John wiley & sons.
- Han, Y., Lee, J., Haiping, G., Kim, K.-H., Wanxi, P., Bhardwaj, N., Min Oh, J., & Brown, R. J. (2022). Plant-based remediation of air pollution: a review. *Journal of Environmental Management*, 301, 113860. doi:https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113860.
- Hrdličková, Z., Michálek, J., Kolář, M., & Veselý, V. (2008). Identification of factors affecting air pollution by dust aerosol PM10 in Brno City, Czech Republic. *Atmospheric Environment*, 42(37), 8661-8673. doi:https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.08.017.
- Hu, X., Huang, H., Ruan, J., & Wang, W. (2023). Pollution Reduction, Informatization and Sustainable Urban Development—Evidence from the Smart City Projects in China. *Sustainability*, 15(13), 10030. doi:https://doi.org/10.3390/su151310030.
- Jun He, Chen, K., Xu, J., Sun, Y., Xu, J., & Yong Sun. (2022). *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Boston: Elsevier.
- Kuo, C.-Y., Chen, P.-T., Lin, Y.-C., Lin, C.-Y., Chen, H.-H., & Shih, J.-F. (2008). Factors affecting the concentrations of PM10 in central Taiwan. *Chemosphere*, 70(7), 1273-1279. doi:https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.07.058.
- Law, A. M. (2015). *Simulation modeling and analysis* (Vol. 2). New York: McGraw-hill
- Lechner, N. (2015). *Heating, cooling, lighting: Sustainable design methods for architects*. Hoboken, New Jersey: John wiley & sons.
- Liu, E., Yan, T., Birch, G., & Zhu, Y. (2014). Pollution and health risk of potentially toxic metals in urban road dust in Nanjing, a mega-city of China. *Science of the total environment*, 476, 522-531. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.01.055.
- Liu, Z., Shen, L., Yan, C., Du, J., Li, Y., & Zhao, H. (2020). Analysis of the Influence of Precipitation and Wind on PM2. 5 and PM10 in the Atmosphere. *Advances in Meteorology*, 2020(5), 1-13. doi:https://doi.org/10.1155/2020/5039613.
- Lorig, F., Lebherz, D. S., Berndt, J. O., & Timm, I. J. (2017). *Hypothesis-driven experiment design in computer simulation studies*. Retrieved 30 April, 2024 from file:///C:/Users/user/Downloads/WSC_2017_final.pdf.
- Muniz-Gäl, L. P., Pezzuto, C. C., de Carvalho, M. F. H., & Mota, L. T. M. (2020). Urban geometry and the microclimate of street canyons in tropical climate. *Building and Environment*, 169, 106547. doi:https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106547.

- Nghiem, M., & Berg, A. (2022). *Reducing air pollution in cities: Evaluate the gap in population engagement and policy strategies*. Retrieved 30 April, 2024 from <https://www.designsociety.org/publication/45809/>
- Ozcan, N. S., & Cubukcu, K. M. (2018). The Relationship between Urban Air Pollution and Urban Planning Decisions. *Asian Journal of Quality of Life*, 3(11), 181-192. doi:<https://doi.org/10.21834/ajqol.v3i11.134>.
- Pan, H., Lu, X., & Lei, K. (2017). A comprehensive analysis of heavy metals in urban road dust of Xi'an, China: contamination, source apportionment and spatial distribution. *Science of the total environment*, 609, 1361-1369. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.004>.
- Pishgar, E., Fanni, Z., Tavakkolinia, J., Mohammadi, A., Kiani, B., & Bergquist, R. (2020). Mortality rates due to respiratory tract diseases in Tehran, Iran during 2008-2018: a spatiotemporal, cross-sectional study. *BMC Public Health*, 20(1), 1-12. doi:<https://doi.org/10.1186/s12889-020-09495-7>.
- Poursafa, P., Kelishadi, R., Ghasemian, A., Sharifi, F., Djalalinia, S., Khajavi, A., . . . Qorbani, M. (2015). Trends in health burden of ambient particulate matter pollution in Iran, 1990-2010: findings from the global burden of disease study 2010. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 18645-18653. doi:<https://doi.org/10.1007/s11356-015-5545-9>.
- UNEP. (2022). *Pollution Action Note - Data you need to know*. Retrieved 4 July, 2023 from <https://www.unep.org/interactive/air-pollution-note/>.
- Vardoulakis, S., & Kassomenos, P. (2008). Sources and factors affecting PM10 levels in two European cities: Implications for local air quality management. *Atmospheric Environment*, 42(17), 3949-3963. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.12.021>.
- Vlasov, D., Kosheleva, N., & Kasimov, N. (2021). Spatial distribution and sources of potentially toxic elements in road dust and its PM10 fraction of Moscow megacity. *Science of the total environment*, 761, 143267. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143267>.
- WHO. (2022a). *Ambient (outdoor) air pollution*. Retrieved 16 September, 2023 from [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).
- WHO. (2022b). *Household air pollution*. Retrieved 4 July, 2023 from <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>.
- Xu, X., Gao, Z., & Zhang, M. (2023). A review of simplified numerical approaches for fast urban airflow simulation. *Building and Environment*, 234, 110200. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110200>.
- Zhang, Y., Mo, J., Li, Y., Sundell, J., Wargocki, P., Zhang, J., . . . Leung, M. H. (2011). Can commonly-used fan-driven air cleaning technologies improve indoor air quality? A literature review. *Atmospheric Environment*, 45(26), 4329-4343. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.05.041>.

COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Journal of Architecture and Urban Planning. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



نحوه ارجاع به این مقاله

محمدی، محسن؛ قیابکلو، زهرا و مضطرزاده، حامد (۱۴۰۳). بررسی رفتار جریان باد و ذرات معلق ($PM_{2.5}$, PM_{10}) پیرامون پوسته بلوک‌های ساختمانی در بافت مسکونی طرح تفصیلی شهر عسلویه. نشریه علمی نامه معماری و شهرسازی، ۱۷(۴۴)، ۴۳-۲۳.

DOI: 10.30480/AUP.2024.5175.2115

URL: http://aup.journal.art.ac.ir/article_1344.html



Investigating the behavior of wind flow and Particulate Matter ($PM_{2.5}$, PM_{10}) around building block skins in the residential context of Asalouyeh detailed plan

Mohsen Mohammadi

Ph.D. Candidate, Department of Architecture, Faculty of Art and Architecture, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

Zahra Ghiabaklou

Associate Professor, Department of Architecture, School of Architecture, College of Fine Arts, University of Tehran, Tehran, Iran (Corresponding Author)

Hamed Moztaazadeh

Associate Professor, Department of Architecture, Faculty of Art and Architecture, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

Abstract

Air pollution negatively affects people's health and the economies of countries. Air pollutants can be categorized into three groups: Particulate Matter (PM), Volatile Organic Compounds, and microorganisms. Particulate Matter is the most important air pollutant, especially in major cities worldwide. Particulate Matter is classified into three groups according to their size: large particles (with a diameter between 2.5–10 microns), fine particles (with a diameter between 0.1–2.5 microns), and ultrafine particles (with a diameter between 0.1 microns and less). The wind flow behavior is an important factor in determining the particle concentrations in urban spaces. On the other hand, the urban geometry affects the wind velocity and consequently the outdoor air quality. Therefore, the proper design of urban context can be beneficial in reducing the impact of air pollution. However, this influence is often overlooked in the guidelines. Outdoor air quality is monitored by measuring particle concentrations and atmospheric parameters and the effect of the context on the dispersion of pollutants is not taken into account. Additionally, there are only a few urban air quality monitoring locations. The concentration of some pollutants (including PM) is determined in these monitoring stations. Therefore, they do not provide sufficient and comprehensive data to control urban air pollution. The Computational fluid dynamics analysis can be used to evaluate the wind flow behavior and pollutant dispersion and as a result, predict the urban air quality. This research aimed to study the behavior of wind flow and PM around buildings at different heights, street canyons, and building sides in a part of the residential context of Asalouyeh City. Accordingly, it investigated the effect of wind flow behavior on particle dispersion as well as the effect of height, and street and building orientation on wind flow behavior and PM dispersion. A section of the residential context in a high-density area was selected as the case study. The wind velocity, pressure, turbulence, flow pathlines, PM velocity and concentration, and particle tracks were defined at ground level, at different heights, in streets aligned with the wind direction and perpendicular to it, and on the windward and leeward side faces using CFD simulation in Ansys-Fluent 2021. An area of 129276 square meters with a length of 378 meters was simulated as a wind tunnel. Findings showed that the buildings act as a windbreak and cause wind velocity to decrease significantly in the leeward side face. As the height increased, resulting in higher wind velocity and turbulence, the length of the wind shadow decreased in the leeward side face. At higher altitudes, as the wind joined the free stream, flow turbulence was reduced. Accumulation of massless particles was observed in the leeward side face in the wind shadow area. The highest and lowest PM concentrations were observed in the windwards and the wind shadow, respectively. Therefore, the PM concentrations follow the wind velocity. Findings can be useful in studying outdoor air quality, as well as evaluating thermal comfort and choosing materials according to wind loads in urban spaces.

Keywords: Outdoor air quality, particulate matter, windward, street canyons, sky view factor