



عوامل موثر بر کیفیت هوا و کنترل توزیع آلاینده‌ها در دره خیابان‌های شهری

محمد کردوانی

دانشجوی کارشناسی ارشد

امیر امیدوار*

دانشیار

مسعود خراتی کوپایی

دانشیار،

دانشکده مهندسی مکانیک،

دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز،

چکیده: امروزه به واسطه ی افزایش جمعیت و کمبود فضای کافی برای ساخت و ساز، احداث ساختمان‌های بلند مرتبه در شهرهای بزرگ رواج پیدا کرده که این امر باعث پیدایش شکل خاصی از ساختارهای شهری، تحت عنوان دره خیابان‌های شهری شده است. شکل و توپوگرافی ساختارهای شهری بر نحوه توزیع و تهویه ی آلاینده‌ها در شهرهای بزرگ بسیار تاثیرگذار است. در این مقاله در ابتدا شاخص‌ها و استانداردهای کیفیت هوا در کشورهای مختلف بررسی و مقایسه شده است. سپس میزان تأثیر عوامل ساختاری مختلف بر توزیع آلاینده‌ها در دره خیابان‌های شهری بررسی و مقایسه شده است. نتایج حاکی از آن است که عواملی نظیر پیکربندی ساختمان، سرعت باد، جهت باد و کاشت درختان تأثیر زیادی بر نرخ تهویه و کیفیت هوا در دره خیابان‌های شهری دارد. اما گرمایش دیواره‌های ساختمان، نوع پوشش دهی سطوح جاده و نرخ ترافیک و آمد و شد وسایل نقلیه به نسبت تأثیر کمتری بر کیفیت هوا در دره خیابان‌های شهری دارد.

واژه‌های راهنما: آلودگی هوا، دره خیابان شهری، آلاینده، شاخص کیفیت هوا، ترافیک

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۲۰

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۴

Mohammad
Kordavani
MSc. Student

Amir Omidvar*
Associate Professor

Masoud Kharati
Koopae
Associate Professor,
Faculty of Mechanical
Engineering, Shiraz
University of Technology,
Shiraz

Factors affecting air quality and controlling the pollution distribution in urban canyon streets

Abstract: Today, due to rapid urbanization, population density growth, and lack of sufficient space for construction, the tendency to build high-rise buildings has become widespread in large cities. This has led to the rising of a particular form of an urban structure called the urban canyon streets. The shape and topography of urban structures have a significant impact on the ventilation and distribution of air pollutants in different areas of large cities. In this article, firstly, air quality metrics and standards in different countries are reviewed and compared. Then, the effect of different structural factors on the distribution of pollutants in the urban canyon streets was studied and compared. The results showed that factors such as building configuration, wind speed, wind direction, and tree planting significantly impact ventilation rate and air quality in urban canyon streets. However, the thermal condition of buildings' envelope, the covering type of the road surfaces, and the traffic rate have relatively more minor effects on the air quality in the urban canyon streets.

Keywords: Air pollution, Urban canyon street, Pollution, Air quality index, Traffic.

۱- مقدمه

مدل کوچک شده در فضای باز [۱۱] و استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی اشاره نمود [۱۲-۱۷]. به واسطه این‌که شبیه‌سازی‌های عددی از نظر دقت و هزینه، بهینه‌تر و به صرفه‌تر از سایر روش‌های مطالعاتی ذکر شده هستند، بیشتر بررسی‌های صورت گرفته در این حوزه را شامل می‌شوند که عمده این شبیه‌سازی‌های عددی مبتنی بر مدل‌های میانگین رینولدز ناویر-استوکس و شبیه‌سازی گردابه بزرگ است [۱۸].

در تحقیق حاضر سعی شده است در ابتدا شاخص‌های کاربردی و رایج اندازه‌گیری و تعیین آلودگی هوا در مناطق شهری و استانداردهای مربوط به آن معرفی و مقایسه گردد. در ادامه، به پدیده دره خیابان شهری و عوامل مهم در تعیین میزان سطح آلاینده در این حوزه پرداخته شده است. تحقیقات مختلفی که در زمینه انتشار آلاینده‌ها در دره‌های خیابان‌های شهری معرفی خواهد شد و عوامل مؤثر بر آن و همچنین راهکارهای کنترل سطح آلاینده‌ها در دره‌های خیابان‌های شهری معرفی خواهد شد.

۲- آلودگی هوا و شاخص‌های تعیین کیفیت هوا

یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای گزارش سطح شدت آلودگی هوا و اطلاع رسانی آن به مردم استفاده از شاخص‌های کیفیت هوا^۴ یا شاخص‌های آلودگی هوا^۵ است. در شاخص‌های کیفیت هوا، اطلاعات مربوط به آلودگی هوا ترکیب شده و استانداردی جهت مقایسه ارائه می‌شود. داده‌های جمع‌آوری شده با روش‌های مختلف تجمیع شده و به یک شاخص واحد تبدیل می‌شوند. این بدان معناست که سیستم‌های نمایه‌سازی^۶ و توصیفگرهای آلودگی هوا اغلب از یک کشور یا منطقه به کشور یا منطقه دیگر متفاوت است که در واقع یعنی هیچ روش پذیرفته شده جهانی و یکتایی وجود ندارد که برای همه کشورها مناسب باشد و بتوان بر اساس یک روش کلی مشخص، یک شاخص جهانی برای تمام کشورها و مناطق تعریف نمود [۱۹].

هدف اساسی هر شاخص کیفیت هوا، تبدیل غلظت اندازه‌گیری شده از آلاینده‌های هوا به یک شاخص عددی واحد با استفاده از مکانیسم مناسب است. بر این اساس می‌توان با در نظر گرفتن موارد زیر به یک معیار طراحی اصولمند برای شاخص کیفیت هوای ایده‌آل رسید [۱۹]:

۱- برای عموم افراد جامعه قابل درک باشد.

آلودگی هوا همواره یکی از تهدیدهای مهم برای سلامتی انسان‌ها بوده است. سازمان بهداشت جهانی در سال ۲۰۰۶ اعلام کرد که حدود ۲۵ درصد از کل مرگ و میرها در کشورهای در حال توسعه را می‌توان به طور مستقیم به عوامل محیطی نسبت داد [۱]. زمانی که سطح آلاینده‌ها در هوا از حد تعریف شده و مجاز آن بیشتر شود می‌تواند برای افسار حساس جامعه خطر آفرین باشد، بطوریکه قرار گرفتن طولانی مدت در معرض این آلاینده‌ها باعث تشدید بیماری‌های قلبی و ریوی خواهد شد [۲]. در سال ۲۰۱۶، در یک بررسی مشخص گردید که آلودگی هوا باعث مرگ ۴/۲ میلیون نفر در سال می‌شود که یک رقم قابل توجه است [۳]. در مطالعه دیگری که بر روی افراد ساکن در حاشیه آزادراه‌ها انجام شد نشان داده است که به خاطر دریافت سطح بیشتر آلاینده‌های مخرب می‌تواند با کاهش بیشتر عملکرد ریه در این افراد مرتبط باشد [۴]. یک سوال مهم و اساسی این است که آیا آن چه باعث بوجود آمدن آلودگی هوا می‌شود تنها وسایل یا منابعی هستند که آلاینده یا آلاینده‌هایی را از خود ساطع می‌کنند یا عوامل مهم دیگری نیز وجود دارند که باعث تشدید آلودگی هوا و به خطر انداختن سلامت انسان‌ها می‌شود و با شناسایی و بهینه‌سازی این عوامل تا چه میزان می‌توان کیفیت هوای شهری را بهبود بخشید. یکی از عوامل تاثیرگذار بر کیفیت هوا نحوه تهویه آلاینده‌های تولید شده در مناطق شهری است. در سال‌های اخیر با افزایش جمعیت و نیاز انسان‌ها به حضور در کلان شهرها برای استفاده از امکانات شهری بیشتر از یک طرف و کمبود فضای ساختمانی از سوی دیگر مهندسان را به ساخت بناهای بلندمرتبه سوق داده است. این ساختمان‌های بلندمرتبه باعث بوجود آمدن ساختارهای شهری ویژه‌ای تحت عنوان دره خیابان شهری شده است. دره خیابان‌های شهری می‌تواند بر عوامل محلی نظیر کیفیت هوا، دما، سرعت باد و جهت باد تاثیرگذار باشد [۵، ۶]. دره خیابان‌های شهری مهم‌ترین تاثیر را بر روی کیفیت هوای ساکنان این مناطق می‌گذارد و یک زمینه جدید مطالعاتی برای بررسی سطح کیفیت هوا، نحوه تهویه و انتشار آلودگی‌های تولید شده در این مکان‌ها را پیش روی محققان قرار داده است. محققان، پدیده انتشار آلاینده‌ها در دره خیابان‌های شهری را به طرق مختلفی مورد بررسی و مطالعه قرار داده‌اند که می‌توان به اندازه‌گیری میدانی [۷، ۸]، شبیه‌سازی تونل باد [۹، ۱۰]، آزمایش

⁴ Air quality index

⁵ Air pollution index

⁶ Indexing

¹ Urban Canyon Street

² Reynolds-averaged Navier-Stokes

³ large eddy simulation

مجاز است به جز یک مورد، هشدار آلودگی را بدهد).
با توجه به ویژگی‌های فوق الذکر، تاکنون شاخص‌های متنوعی برای تعیین کیفیت هوا در سطح جهان توسعه و معرفی شده است که در جدول ۱ لیستی از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت هوای موجود در جهان تا به امروز آمده است.

۲- قابل گسترش برای سایر آلاینده‌ها و میانگین زمان باشد.
۳- اجتناب از آلاینده‌های پنهان^۱ (گرفتگی زمانی رخ می‌دهد که شاخص آلودگی هوا نشان‌دهنده کیفیت بد هوا نباشد، علی‌رغم این‌که غلظت یک یا چند آلاینده هوا ممکن است به مقادیر غیر قابل قبولی برسد).

۴- اجتناب از ابهام (ابهام زمانی رخ می‌دهد که یک شاخص آلودگی هوا به‌رغم این واقعیت که غلظت همه آلاینده‌ها در حد

جدول ۱ بررسی برخی از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت هوای موجود [۱۹].

هدف یا کاربرد	فرد طراح یا سازمان طراح	سال طراحی	شاخص کیفیت هوا
ارزیابی وضعیت کیفیت هوا در کلان شهرها	Thomas and Ott	۱۹۷۵	Oak Ridge Air Quality Index (ORAQI)
برای گزارش مداوم وضعیت کیفیت هوا به عموم استفاده می‌شود	U.S. EPA, AQI	۱۹۷۶	AQI System of U.S. EPA
استفاده از API امکان دستیابی به درجه پیچیده‌ای از آلودگی هوای شهری را فراهم می‌کند.	Bezuglaya	۱۹۹۳	Integral Air Pollution Index (IAPI)
تعریف استهلاک کیفیت هوا با توجه به استاندارد	Singh G	۲۰۰۶	Air Quality Depreciation Index (AQDI)
بر اساس اثرات ترکیبی پنج آلاینده معیار (PM ₁₀ و O ₃ ، NO ₂ ، SO ₂ ، CO) با در نظر گرفتن استانداردهای اروپایی. مفید برای اطلاع رسانی به شهروندان و حفظ سلامت انسان در یک مجموعه شهری.	Kyrkilis	۲۰۰۷	Aggregate Air Quality Index (AQI)
مقایسه کیفیت هوای شهری در زمان واقعی	CITEAIR II Project, Europe	۲۰۰۸	Common Air Quality Index (CAQI)
برای تعریف وضعیت هوا به صورت نسبی	Bishoi	۲۰۰۹	New Air Quality Index (NAQI)
برای اطلاع رسانی به شهروندان در مورد وضعیت کیفیت هوای یک منطقه زباله شهری مفید است.	Cannistraro	۲۰۰۹	Pollution Index (PI)
اندازه‌گیری شاخص خطر مرگ و میر / مرگ و میر مرتبط با قرار گرفتن همزمان در معرض آلاینده‌های معمولی هوا و یک روش آماده برای مقایسه سهم نسبی هر آلاینده با خطر کل ارائه می‌دهد. یک مقیاس شاخص دلخواه ارتباط ریسک را تسهیل می‌کند. مقادیر شاخص ممکن است برای مناطق بسیار آلوده فراتر از ۰ باشد.	Sciard	۲۰۱۱	The Aggregate Risk Index (ARI)
یک رویکرد تجمعی جدید برای ارزیابی کیفیت هوا پیشنهاد شده است	Mandal	۲۰۱۲	Fuzzy Air Quality Index
-	Kumar and Goyal	۲۰۱۳	AQI Based on PCA-Neural Network Model

¹ Eclipsing

انتشار آلاینده‌ها و بوجود آمدن آلودگی هوا است که از جمله شایع‌ترین آلاینده‌های منتشر شده از این وسایل می‌توان به مونوکسیدکربن، اکسیدهای نیتروژن، اکسیدهای گوگرد، هیدروکربن‌های نسوخته، ذرات معلق (PM10 و PM2.5)، هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای^۳ و سایر ترکیبات آلی اشاره نمود [۲۰].

همان‌طور که گفته شد شاخص‌های کیفیت هوا تمام آلاینده‌ها را در نظر نمی‌گیرند و بر این اساس هر کشور یا منطقه با توجه به موقعیت جغرافیایی، سیاست‌های کلان دولت و وضع سلامت ساکنان خود اقدام به بررسی و پایش تعداد محدودی از آلاینده‌ها می‌کنند [۲۱]. جدول ۳ به مقایسه انواع آلاینده‌های مورد بررسی در برخی از کشورها می‌پردازد. همان‌طور که نوع و تعداد آلاینده‌های مورد بررسی از یک کشور یا منطقه تا کشور یا منطقه دیگر متفاوت است حد استاندارد غلظت آلاینده‌ها نیز برای تعیین شاخص کیفیت هوا در کشورهای مختلف متفاوت است. در جدول ۴ به حدود استاندارد غلظت برخی آلاینده‌ها برای برخی از کشورهای جهان اشاره شده است.

یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت هوا در جهان شاخصی است که توسط سازمان حفاظت از محیط زیست ایالات متحده با اندازه‌گیری پنج آلاینده رایج در دنیا بر اساس رابطه ۱ و استخراج اطلاعات متناسب با هر آلاینده از جدول ۲ محاسبه و منتشر می‌شود.

$$I_P = \frac{I_{Hi} - I_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}} (C_P - BP_{Lo}) + I_{Lo} \quad (1)$$

که در این رابطه:

I_P : شاخص کیفیت هوا برای آلاینده P است.

I_{Hi} : مقدار شاخص کیفیت هوا منطبق با BP_{Hi} است.

I_{Lo} : مقدار شاخص کیفیت هوا منطبق با BP_{Lo} است.

BP_{Hi} : نقطه شکستی که بزرگتر یا مساوی C_P است.

BP_{Lo} : نقطه شکستی که کوچکتر یا مساوی C_P است.

C_P : غلظت اندازه‌گیری شده (گردشده) برای آلاینده P است.

بر این اساس می‌توان بر حسب عدد بدست آمده سطح آلودگی هوا را به شش دسته‌ی خوب، متوسط، ناسالم برای گروه‌های حساس، ناسالم و خطرناک تقسیم‌بندی نمود. برای محاسبه میزان آلودگی هوا نیاز به شناخت انواع مختلف آلاینده‌ها است. آگروز وسایل نقلیه موتوری منبع مهمی برای

جدول ۲ نقاط شکست کیفیت هوا [۱۹].

نقاط شکست								AQI	طبقه‌بندی کیفیت هوا
(۱)	O ₃ (ppm)	O ₃ (ppm)	PM ₁₀ (μg/m ³)	PM _{2.5} (μg/m ³)	CO (ppm)	SO ₂ (ppm)	NO ₂ (ppm)		
۸ساعته	۰-۰/۰۵۹	-	۰-۵۴	۰/۰-۱۵/۴	۰-۴/۴	۰-۰/۰۳۴	۰-۰/۰۵۳	۰-۵۰	خوب
۸ساعته	۰/۰۶-۰/۰۷۵	-	۵۵-۱۵۴	۱۵/۵-۳۵/۰	۴/۵-۹/۴	۰/۰۳۵-۰/۱۴۴	۰/۰۵۴-۰/۱	۵۱-۱۰۰	متوسط
۸ساعته	۰/۰۷۶-۰/۰۹۵	۰/۱۲۵-۰/۱۶۴	۱۵۵-۲۵۴	۳۵/۱-۶۵/۴	۹/۵-۱۲/۴	۰/۱۴۵-۰/۲۲۴	۰/۱۰۱-۰/۳۶۰	۱۰۱-۱۵۰	ناسالم برای گروه‌های حساس
۸ساعته	۰/۰۹۶-۰/۱۱۵	۰/۱۶۵-۰/۲۰۴	۲۵۵-۳۵۴	۶۵/۵-۱۵۰/۴	۱۲/۵-۱۵/۴	۰/۲۲۵-۰/۳۰۴	۰/۳۶۱-۰/۶۴۰	۱۵۱-۲۰۰	ناسالم
۸ساعته	۰/۱۱۶-۰/۳۷۴	۰/۲۰۵-۰/۴۰۴	۳۵۵-۴۲۴	۱۵۰/۵-۲۵۰/۴	۱۵/۵-۳۰/۴	۰/۳۰۵-۰/۶۰۴	۰/۶۵-۱/۲۴	۲۰۱-۳۰۰	خیلی ناسالم
(۲)		۰/۴۰۵-۰/۵۰۴	۴۲۵-۵۰۴	۲۵۰/۵-۳۵۰/۴	۳۰/۵-۴۰/۴	۰/۶۰۵-۰/۸۰۴	۱/۲۵-۱/۶۴	۳۰۱-۴۰۰	خطرناک
		۰/۵۰۵-۰/۶۰۴	۵۰۵-۶۰۴	۳۵۰/۵-۵۰۰/۴	۴۰/۵-۵۰/۴	۰/۸۰۵-۱/۰۰۴	۱/۶۵-۲/۲۰۴	۴۰۱-۵۰۰	

(۱) در بیشتر مناطق AQI بر حسب مقادیر ازن هشت ساعته گزارش می‌شود اما در برخی از مناطق AQI بر اساس مقادیر ازن یک ساعته به احتیاط نزدیکتر است. در این شرایط AQI می‌بایست هم برای مقادیر ازن هشت ساعته و هم برای مقادیر ازن یک ساعته محاسبه شود هر کدام بیشتر باشد، گزارش شود.

(۲) وقتی ازن هشت ساعته از ۰/۳۷۴ فراتر رود مقدار AQI، ۳۰۱ یا بالاتر باید با استفاده از غلظت ازن یک ساعته محاسبه

³ Volatile organic compounds

¹ Break Point

² particulate matter

جدول ۳ انواع آلاینده‌های مورد بررسی در هر کشور یا ناحیه بر اساس سیاست‌های محیط زیستی هر کشور [۱۶].

نوع آلاینده مورد بررسی													کشور یا منطقه
Benzo(a) pyrene	As	NH3	TSP	Ni	Benzene	O3	Pb	SO2	NO2	CO	PM 2.5	PM 10	
×	×	×	×	×	×	×	×	✓	✓	✓	✓	✓	اتحادیه اروپا
×	×	×	×	×	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	ایالات متحده
×	×	×	×	×	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	استرالیا
×	×	×	×	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	آرژانتین
×	×	×	×	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	کره جنوبی
×	×	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	چین
✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	هند

جدول ۴ حدود استاندارد غلظت آلاینده در برخی از کشورها [۱۷].

حد استاندارد غلظت آلاینده						کشور یا منطقه
O3	SO2	NO2	CO	PM2.5	PM10	
120µg/m3	125µg/m3	80µg/m3	10mg/m3	25µg/m3	50µg/m3	اتحادیه اروپا
140µg/m3	140µg/m3	80µg/m3	9mg/m3	35µg/m3	150µg/m3	ایالات متحده
200µg/m3	150µg/m3	80µg/m3	10mg/m3	75µg/m3	150µg/m3	چین
180µg/m3	80µg/m3	80µg/m3	4mg/m3	60µg/m3	150µg/m3	هند

۳- دره خیابان شهری

ساختمان‌ها [۲۸]، واکنش‌های شیمیایی [۲۹] و حجم ترافیک [۳۰] از جمله عوامل مهم برای بررسی نحوه انتشار آلاینده‌ها در دره خیابان‌های شهری هستند. در ادامه به بررسی هر کدام از این عوامل پرداخته خواهد شد.

در لایه سایبان شهری^۱ یعنی پایین‌ترین قسمت لایه مرزی شهری، ویژگی‌های پراکندگی باد و آلاینده‌ها مستقیماً تحت تأثیر موانع و جریان هوا قرار می‌گیرد [۱۴]. دره خیابان شهری مطابق شکل ۱ به مکان‌هایی گفته می‌شود که خیابان، توسط ساختمان‌هایی از دو طرف احاطه می‌شود. بواسطه‌ی نرخ ترافیک، مقدار دود خروجی که از آگزوز وسایل نقلیه موتوری خارج و پراکنده می‌شود، دارای شدت متفاوتی است که منجر به قرار گرفتن ساکنان در معرض آلاینده‌های هوا می‌شود. بنابراین، بسته به ویژگی‌های جریان هوا، پراکندگی آلاینده‌ها می‌تواند نگران کننده باشد. در بیشتر شبیه‌سازی‌های عددی معمولاً اثرات یک عامل یا ترکیبی از عوامل مشخص می‌تواند در وجود آوردن تفاوت در شدت و یا نحوه پراکندگی آلاینده در دره خیابان شهری موثر باشد که عواملی نظیر نسبت ضریب منظری [۲۲]، جهت باد [۲۳]، اثرات دما [۲۴]، اثرات پوشش‌دهی جاده [۲۵]، اثرات وجود موانع [۲۶، ۲۷]، اثرات پیکربندی و سقف



شکل ۱ نمونه‌ای از دره خیابان شهری در نیویورک [۳۱].

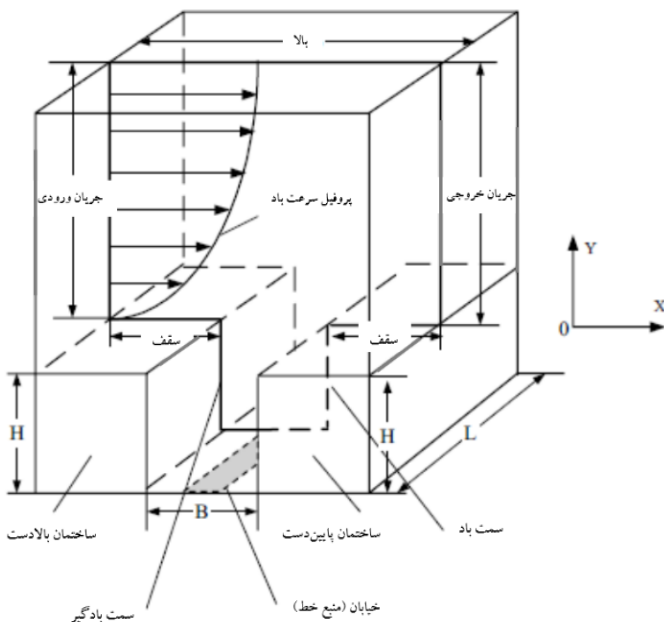
² Urban boundary layer

¹ Urban canopy layer

۳-۱- نسبت ضریب منظری

همانطور که از شکل ۳ مشخص است با کاهش نسبت منظری میزان غلظت آلاینده بدون بعد در هر دو سمت رو به باد و بادگیر ساختمان‌های پایین دست و بالا دست کاهش می‌یابد و مطابق شکل ۴ با افزایش نسبت منظری میزان غلظت آلاینده بدون بعد در هر دو سمت رو به باد و بادگیر به طور چشمگیری افزایش می‌یابد.

نتایج محاسبه شده نشان داده است که چرخش گردابه‌ها منجر به تغییر توزیع غلظت آلاینده در امتداد سطح دیوار ساختمان‌ها با نسبت منظری مختلف در دره خیابان شده است. به‌طور مثال برای دره خیابان با نسبت منظری واحد مطابق شکل ۵، چرخش تنها یک گردابه و برای نسبت ابعادی $\frac{1}{4}$ وجود چرخش دو گردابه باعث توزیع آلاینده‌ها در خیابان می‌شود.



شکل ۲ حوزه محاسباتی برای یک دره خیابان ایزوله، $B/H = 1$ [۳۳].

نتایج نشان می‌دهد که عریض‌تر کردن خیابان و کمتر نمودن ارتفاع ساختمان‌ها برای تهویه هوا و حذف آلاینده در دره خیابان شهری مطلوب‌تر است و باعث ایجاد کیفیت هوای بهتر برای ساکنان دره خیابان خواهد شد. از این رو پیکربندی دره خیابان تاثیر قابل توجهی بر نحوه پراکندگی آلاینده و میزان آن در دره خیابان شهری خواهد داشت.

یکی از مهم‌ترین پارامترها برای بررسی جریان در دره خیابان‌های شهری نسبت ضریب منظری^۱ (نسبت ارتفاع ساختمان به عرض خیابان) است که بر این اساس مطابق مطالعات انجام شده سه رژیم جریانی مختلف در نسبت‌های منظری (AR) مختلف وجود خواهد داشت [۳۲]:

- جریان هوای ناهموار جدا شده $(AR < 0.3)$
- جریان هوای مداخله گردابه $(0.3 < AR < 0.7)$
- جریان هوای اسکیمینگ^۴ $(AR < 0.7)$

در سال ۲۰۰۲ چان و همکاران [۳۳] دره خیابانی مطابق شکل ۲ را برای نسبت‌های منظری متفاوت به کمک شبیه‌سازی عددی و در محیط فلونت بر اساس مدل RANS برای سه مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد، RNG $k-\epsilon$ و Realizable $k-\epsilon$ مورد بررسی قرار دادند. این دره خیابان دارای دامنه فیزیکی واقعی 0.18 متر عرض و 0.24 متر ارتفاع بود که در نسبت منظری واحد، ارتفاع ساختمان و عرض خیابان برابر با 0.06 متر است. باد به صورت عمود بر دره خیابان در حال وزیدن است، همچنین گاز اتان به عنوان یک آلاینده از یک منبع با ابعاد 0.01 در 0.012 متر با نرخ 4 لیتر بر ساعت به دره خیابان تزریق می‌شد. آن‌ها برای ساده‌سازی، این مسئله را به صورت 2 بعدی و با فرض این که هوای درون دره خیابان را می‌توان به صورت یک جریان آشفته تراکم ناپذیر با چگالی هوا و آلاینده ثابت در نظر گرفت مورد مطالعه قرار دادند. در این بررسی برای نسبت منظری یک مطابق شکل ۳ مشخص شد که همواره میزان غلظت آلاینده بدون بعد که می‌توان آن را طبق رابطه ۲ محاسبه نمود (که در آن C کسر حجمی اتان است، H ارتفاع ساختمان است، L طول منبع خط است و Q_e نرخ جریان حجمی اتان است)، برای سمت بادگیر بسیار بیشتر از سمت رو به باد ساختمان‌ها است. مطابق شکل ۳-الف میزان غلظت آلاینده بدون بعد در سمت بادگیر به صورت تصاعدی از کف تا سقف ساختمان کاهش می‌یابد اما در صورتی که، غلظت آلاینده بدون بعد مطابق شکل ۳-ب در سمت رو به باد ساختمان پایین دست تقریباً با تغییرات ارتفاع ثابت است.

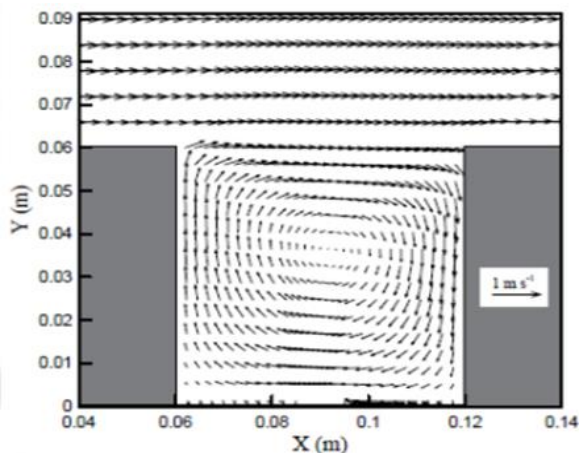
$$K = \frac{C \cdot U_{ref} \cdot H \cdot L}{Q_e} \quad (2)$$

^۱Wake interference airflow

^۴ Skimming airflow

^۱ Aspect ratio

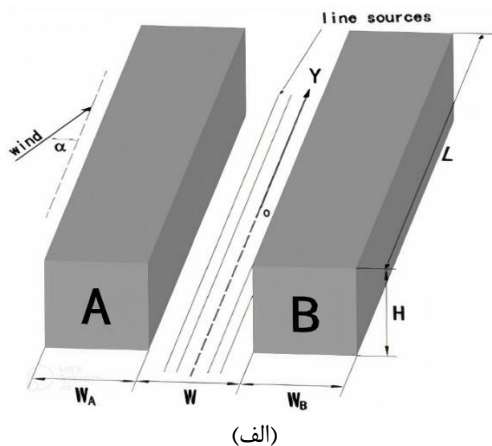
^۲ Isolated roughness airflow



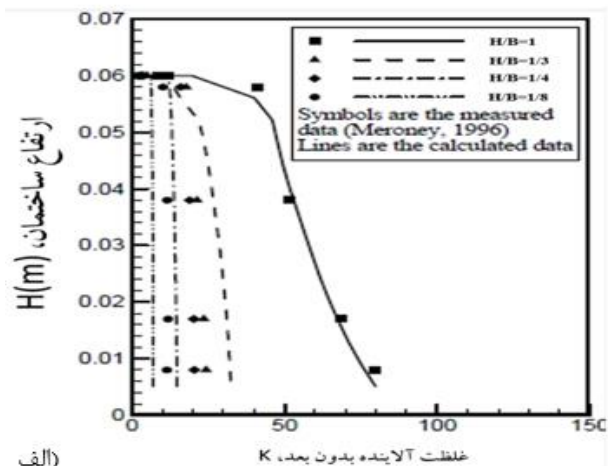
شکل ۵ گردش یک گرداب برای نسبت منظری واحد [۳۳].

۳-۲- تاثیر جهت باد

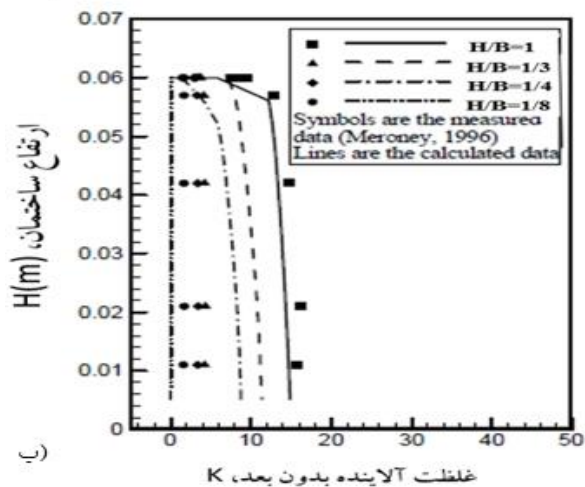
هانگ و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۲۳]، اثر جهت باد بر جریان هوا و پراکندگی آلاینده‌ها در یک دره خیابان طولانی به کمک روش دینامیک سیالات محاسباتی در نرم افزار فلوئنت را بررسی کردند. مطابق شکل ۶ هندسه مورد مطالعه شامل دو ساختمان مشابه که به موازات یکدیگر مرتب شده‌اند و نسبت طول خیابان به ارتفاع ساختمان برابر ۱۰ بود. هر ساختمان دارای سطح مقطع مربعی بودند. چهار منبع مولد خطی آلاینده به صورت موازی در کف خیابان تعبیه شده بود تا انتشار گازهای خروجی خودرو در جاده‌ای با ۴ خط را شبیه سازی نماید. از این منابع، گاز قابل ردیابی هگزا فلوراید گوگرد با سرعت ثابت آزاد می‌شد. در شکل ۶، α زاویه‌ی بین راستای باد و محور خیابان است. این بررسی از یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی سه‌بعدی بر اساس معادلات RANS و مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد جهت پیش‌بینی الگوی جریان و اعتبارسنجی نتایج با داده های به دست آمده از آزمایش تونل باد استفاده شد. بررسی‌ها برای هفت جهت باد (۰ درجه، ۱۵ درجه، ۳۰ درجه، ۴۵ درجه، ۶۰ درجه، ۷۵ درجه و ۹۰ درجه)، انجام شد.



(الف)

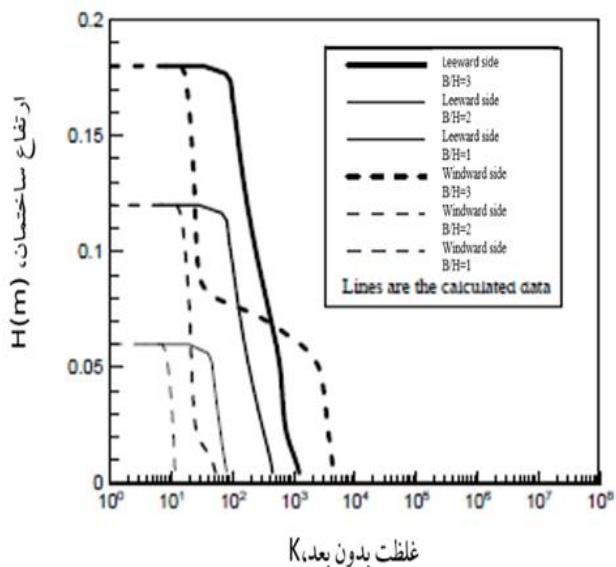


(الف)

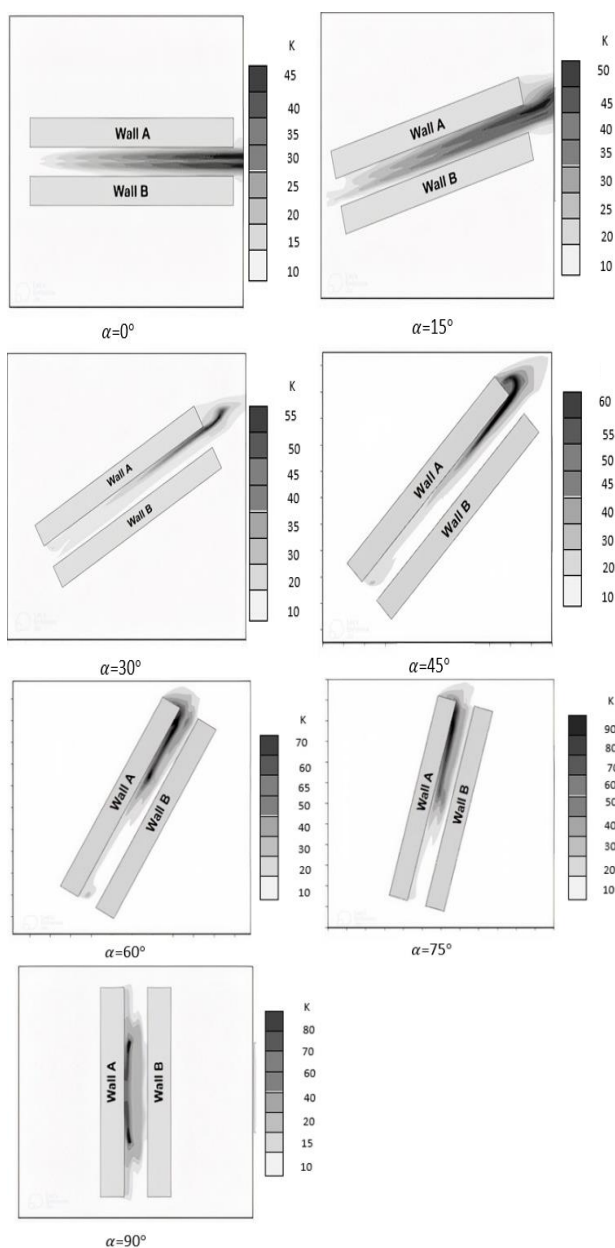


(ب)

شکل ۳ غلظت آلاینده بدون بعد برای نسبت منظری‌های متفاوت؛ (الف) در سمت بادگیر ساختمان بالادست، (ب) در سمت رو به باد ساختمان پایین دست [۳۳].



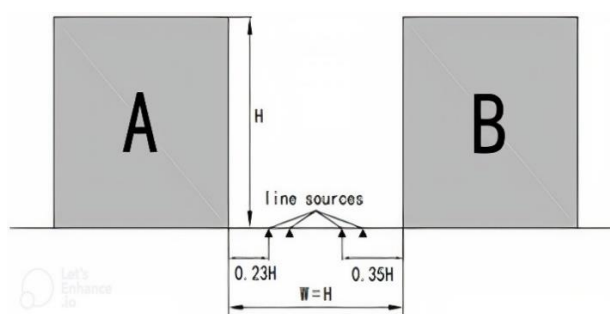
شکل ۴ غلظت آلاینده بدون بعد در سمت رو به باد و بادگیر ساختمان برای نسبت منظری‌های متفاوت [۳۳].



شکل ۷ وضعیت قرارگیری ساختمان‌ها در برابر زاویه‌های مختلف باد [۲۳].

۳-۳- اثرات دما

همواره در روز، شرایط جوی تحت تأثیر دما قرار می‌گیرد، زمانی که تابش خورشید باعث گرم شدن سطح نما، سقف ساختمان‌ها و سطوح زمین می‌شود که به نوبه خود دمای محیط در مجاورت ساختمان‌ها را گرم می‌کند و شرایط ناپایدار حرارتی ایجاد می‌کند. مطالعات نشان داده است که وضعیت پایداری جو و دیوارهای مختلف ساختمان گرم شده نیز به تغییرات جریان هوا و پراکندگی آلاینده‌ها در دره‌های خیابان کمک می‌کند [۳۴]. به طور کلی می‌توان دیواره‌هایی که توسط تابش خورشید در معرض گرم شدن قرار می‌گیرند را ۳ دیواره اصلی شامل سطح زمین (به طور مثال ساعت ۱۲ ظهر که خورشید به صورت عمود



سال سی و یکم، شماره دوم، خرداد و تیر ۱۴۰۱

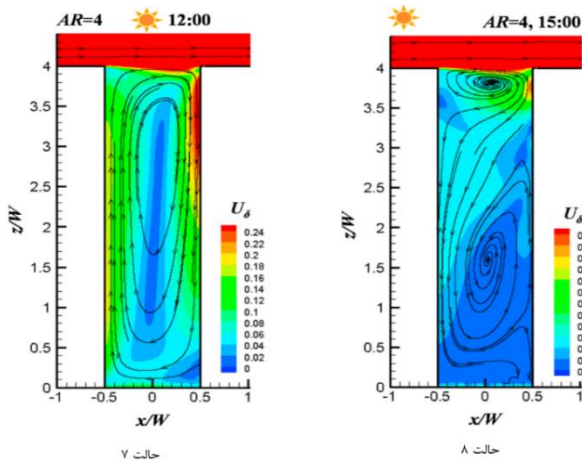
شکل ۶ الف) هندسه دره خیابان؛ ب) موقعیت‌های چهار منبع خطی تولید آلاینده قرار داده شده در کف خیابان [۲۳].

مطابق شکل ۷ بر روی دیوار سمت بادگیر، غلظت میانگین دیوار با α بسیار افزایش می‌یابد و مقادیر حداکثر غلظت روی دیوار زمانی که α ، ۷۵ درجه و کمترین آن‌ها زمانی که α ، صفر درجه است، اتفاق می‌افتد. در مقابل، در دیوار سمت باد، میانگین و حداکثر غلظت آلاینده‌ها بر روی دیوار هنگامی که α صفر درجه باشد، بیشترین است. سرانجام، در ارتفاع تنفس انسان (حدود ۱/۵ متر)، بیشترین غلظت در مسیر پیاده‌رو در کنار دیوار سمت بادگیر هنگامی که α برابر ۷۵ درجه باشد، رخ می‌دهد در حالی که بیشترین غلظت در مسیر پیاده‌روی نزدیک به دیوار سمت باد در زمان α صفر درجه مشاهده می‌شود. در جدول ۵ مقادیر ماکزیمم و میانگین غلظت آلاینده بدون بعد K بر روی دیواره‌های ساختمان A و B آورده شده است [۲۳]. در دیوار A غلظت میانگین با زاویه α بسیار افزایش می‌یابد (به‌عنوان مثال، غلظت میانگین تحت α برابر ۹۰ درجه، ۳/۸۲ برابر زمانی است که α صفر درجه است). میانگین غلظت روی دیوار A به‌طور قابل توجهی بیشتر از دیوار B برای هر یک از جهت‌های وزش مایل و عمود است. حداکثر غلظت بر روی دیوار A برای هر یک از جهت‌های مایل و عمود بر باد بسیار بیشتر از دیوار B است.

جدول ۵ مقادیر غلظت بدون بعد آلاینده بر روی دیواره‌های

ساختمان [۲۳]

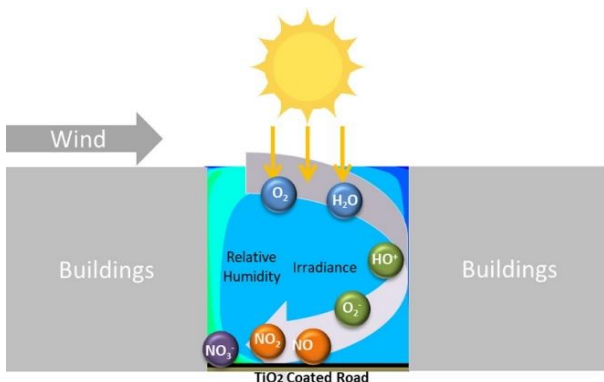
جهت باد (درجه)	میانگین غلظت بدون بعد		ماکزیمم غلظت بدون بعد	
	دیوار A	دیوار B	دیوار A	دیوار B
۰	۷/۴۰	۷/۳۹	۲۹/۰۷	۲۹/۰۸
۱۵	۹/۴۶	۴/۹۸	۳۰/۵۰	۱۵/۶۴
۳۰	۱۳/۲۵	۲/۶۹	۴۸/۸۴	۷/۴۸
۴۵	۱۴/۲۲	۲/۶۲	۵۶/۷۳	۷/۲۴
۶۰	۱۷/۲۸	۴/۳۹	۷۴/۸۲	۱۸/۰۰
۷۵	۲۳/۴۹	۵/۹۶	۱۰۱/۳۰	۱۴/۷۸
۹۰	۲۸/۲۵	۷/۰۸	۷۳/۱۳	۱۴/۸۵



شکل ۸ میدان جریان و سرعت نرمال شده (U_{δ}) در امتداد بخش مرکزی دره برای نسبت منطری ۱ (حالات ۱-۴) و نسبت منطری ۴ (حالات ۵-۸) با شرایط بدون گرما و با گرمایش دیواره‌ها بر اساس ساعت روز و جهت تابش خورشید [۳۵].

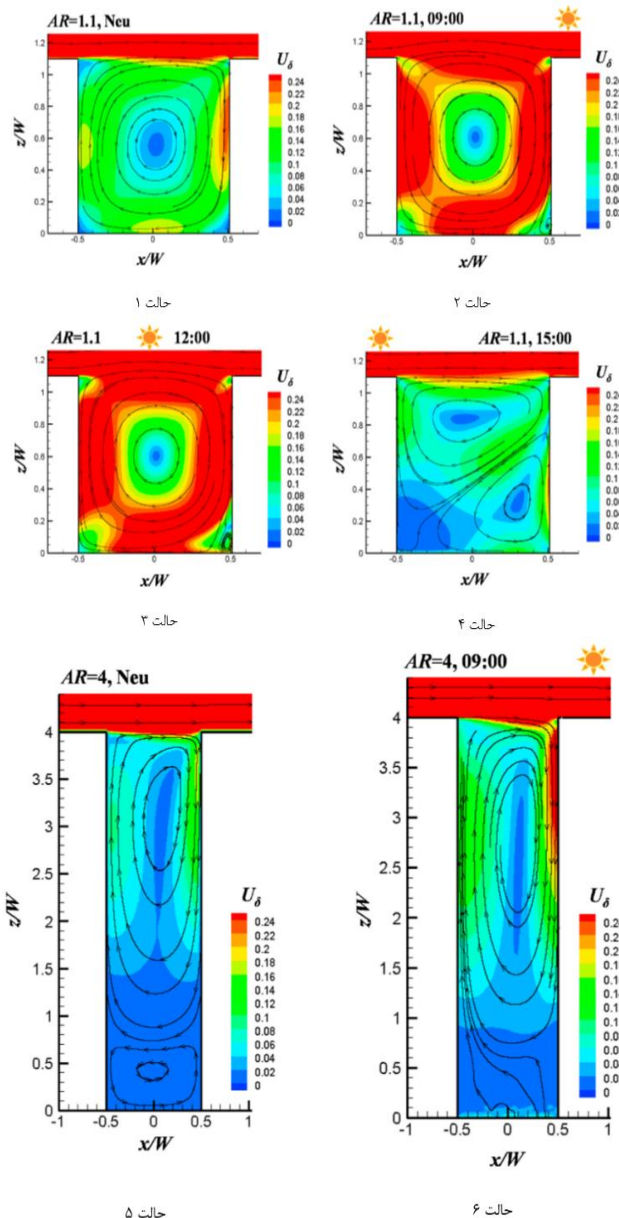
۴-۳- اثرات پوشش دهی جاده

زی و همکاران [۲۵] در سال ۲۰۲۰ تاثیرات پوشش دهی سطوح جاده بر کاهش غلظت آلاینده در یک دره خیابان شهری را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها یک دره خیابان با نسبت ابعاد واحد که در آن ارتفاع ساختمان و عرض خیابان برابر با ۲۰ متر و سطح خیابان آن به کمک نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم پوشش دهی شده بود را مطابق شکل ۹ و ۱۰ را به کمک نرم افزار فلونت به صورت ۲ بعدی و با در نظر گرفتن واکنش شیمیایی بین آلاینده‌ها و شرط مرزی همدمای برای تمامی دیواره‌ها شبیه‌سازی کردند. در این شبیه‌سازی که تغییرات رطوبت نسبی و میزان تابش در نظر گرفته شده بود، مشخص گردید که پوشش دهی سطح جاده باعث کاهش غلظت آلاینده‌های نیتریک اکسید و نیتروژن دی اکسید به میزان ۳/۷ و ۴/۳۱ درصد خواهد شد. علاوه بر آن در این بررسی مشخص شد که با افزایش رطوبت نسبی میزان غلظت آلاینده کاهش ولی با افزایش میزان تابش سطوح، غلظت آلاینده افزایش خواهد یافت.



شکل ۹ دره خیابان مورد بررسی به صورت گرافیکی [۲۵].

بر سطح زمین می‌تابد، دیواره سمت بادگیر (ساعت ۹ صبح) و دیواره رو به باد (ساعت ۳ بعد از ظهر) در نظر گرفت. چن و همکاران [۳۵] در سال ۲۰۲۱ به بررسی اثرات گرمایش ناشی از تابش خورشید بر دیواره‌های یک دره خیابان با در نظر گرفتن نسبت‌های ابعادی متفاوت مطابق شکل ۸ پرداختند بر این اساس زمانی که دیواره بادگیر یا سطح زمین گرم شوند در دره‌های کم عمق (حالت ۲ و ۳) گردش تک گردابه اصلی تقویت و در دره‌های عمیق (حالت ۶ و ۷) ساختار دو گردابه‌ای به یک گردابه‌ای تبدیل می‌شوند، که باعث بهبود کیفیت هوا در دره خیابان می‌شود. اما زمانی که دیواره رو به باد گرم شود در دره‌های کم عمق (حالت ۴) گردابه اصلی تغییر شکل داده و به تدریج یک گردابه فرعی در نزدیکی پایین دره ایجاد می‌شود همچنین برای دره‌های عمیق (حالت ۸) با تخریب ساختار جریان یک گردابه‌ای فرعی را به لایه پایینی اضافه می‌کند.



و عابران پیاده در دره خیابان شهری عمل می‌کند. تراکم سطح پوشش گیاهی یکی از عوامل بسیار مؤثر بر کیفیت هوا در دره خیابان‌های شهری است. به طور کلی کیفیت هوای درون دره خیابان، زمانی که از پوشش گیاهی با تراکم برگ پایین‌تر استفاده می‌شود مطلوب‌تر خواهد بود [۴۰].

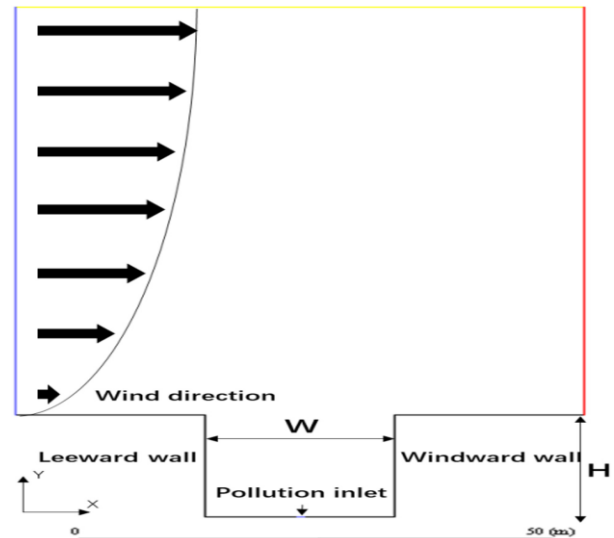
۳-۵-۱-۱- پرچین‌ها^۱

تحقیقات نشان داده است، زمانی که برای فضای سبز شهری از یک پرچین واقع در مرکز خیابان استفاده می‌شود کاهش غلظت و اثرات پراکندگی بهتری را نسبت به استفاده از دو پرچین جانبی ارائه می‌دهد [۴۱]. همچنین، استفاده ترکیبی از درختان و پرچین‌ها برای دریافت نتیجه بهتر برای افزایش کیفیت هوا در دره خیابان‌های شهری توصیه شده است [۴۲]. کومار و همکاران [۴۳] در سال ۲۰۲۲ به ارزیابی تاثیر پرچین بر میزان توزیع غلظت عمودی و افقی آلاینده‌های ناشی از وسایل نقلیه موتوری به صورت میدانی در یکی از محله‌های شهر لندن پرداختند. آنان دریافتند که وجود پرچین‌های همیشه سبز تاثیر قابل توجهی بر کاهش میزان توزیع عمودی آلاینده‌ها تا ۱۷ درصد در ارتفاع ۱ تا ۱/۷ متری دارد اما بر توزیع افقی غلظت آلاینده‌ها تاثیرات منفی و مثبتی خواهد داشت، همچنین در این پژوهش مشخص شده که اندازه ذرات آلاینده بر میزان کاهش غلظت توسط پرچین‌ها تاثیر دارد.

۳-۵-۱-۲- درختان

همانطور که پیش‌تر اشاره شد، استفاده از پوشش‌های گیاهی و کاشت درخت در دره خیابان‌های شهری می‌تواند تاثیر بسزایی در کیفیت هوا در این مناطق داشته باشد.

جهت کاشت درختان برای بهبود کیفیت هوا در یک دره خیابان شهری باید به این نکته توجه داشت که الگوی کاشت درخت و ارتفاع تنه به طور قابل توجهی بر جریان و پراکندگی آلاینده‌های ناشی از آگروز وسایل نقلیه تأثیر می‌گذارد [۴۴]. هنگامی که اندازه ارتفاع تنه درختان با اندازه ارتفاع ساختمان‌ها به صورت حدودی یکسان باشد ($\frac{7}{9}H$ تا $\frac{10}{9}H$) که H ارتفاع ساختمان، نرخ تبادل هوا به طور چشمگیری در داخل دره



شکل ۱۰ دره خیابان مورد بررسی توسط زی و همکاران [۲۵].

۳-۵- اثر وجود موانع

به‌طور کلی می‌توان موانع مؤثر بر تهویه دره خیابان‌های شهری را به ۳ بخش متخلخل، غیرمتخلخل و ترکیبی از دو نوع ذکر شده تقسیم نمود [۳۶]. از جمله موانع متخلخل می‌توان به درختان و درختچه‌هایی که دارای پوشش گیاهی هستند اشاره کرد. از جمله موانع غیرمتخلخل می‌توان به خودروهای پارک شده در اطراف خیابان‌ها و همچنین موانع صوتی موجود در حاشیه بزرگراه‌ها، که باعث کاهش نفوذ آلودگی صوتی ناشی از آمد و شد خودروها به مناطق مسکونی می‌شود، اشاره نمود [۳۷]. نکته حائز اهمیت این است که لازم است به آن توجه شود این است که وجود فضاهای خالی بین چندین مانع غیر متخلخل را نمی‌توان به عنوان تخلخل در نظر گرفت. در واقع متخلخل بودن و یا نبودن موانع بستگی به ویژگی‌های ذاتی موانع دارد نه به نحوه چیدمان آن‌ها. به عنوان مثال، وجود فضاهای خالی متوالی بین خودروهای پارک شده در حاشیه خیابان باعث نمی‌شود که آن‌ها را بتوان موانع متخلخل در نظر گرفت [۳۸]. موانع با سه روش متمایز از طریق پراکندگی، رسوب‌گذاری و واکنش‌های شیمیایی می‌توانند در کاهش سطح آلودگی هوا اثر گذار باشند [۳۹].

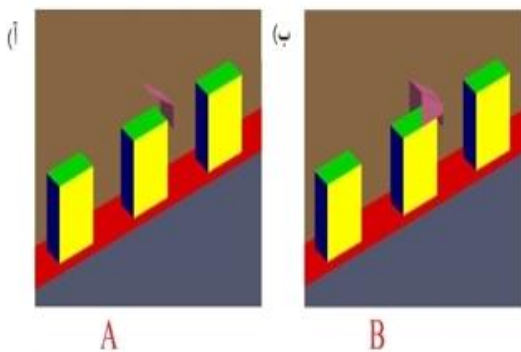
۳-۵-۱- موانع متخلخل

پوشش‌های گیاهی از جمله درختچه‌ها و درختان به عنوان یک مانع متخلخل بین منابع آلاینده (آگروز وسایل نقلیه)، ساکنان

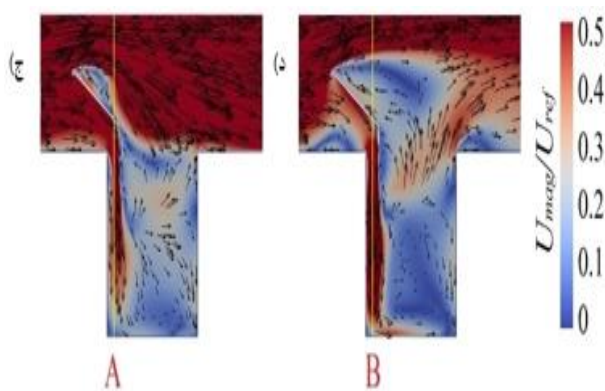
¹ Hedge

۳-۵-۲-۱- بادگیرها

مطابق شکل ۱۱ بادگیرها سازه‌هایی هستند که بر روی ساختمان‌های مشخص برای رقیق‌تر کردن غلظت آلاینده‌ها در دره خیابان مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله مهم‌ترین مزایا بادگیرها عدم اشغال فضای دره خیابان است. استفاده از بادگیرها می‌تواند سطوح غلظت آلاینده‌ها را در بهترین حالت تا ۳۷ درصد کاهش دهد [۴۶].



شکل ۱۱ الف) بادگیر و ب) بادگیر با دیواره‌های جانبی [۴۷].



ادامه شکل ۱۱ خطوط و بردارهای سرعت نرمال شده در دره خیابان برای (ج) بادگیر و (د) بادگیر با دیواره‌های جانبی [۴۷].

۳-۵-۲-۲- ساختمان‌های بالا برده شده

مطابق شکل ۱۲ به ساختمان‌های بلند مرتبه‌ای گفته می‌شود که معمولاً طبقه همکف یا اول آن‌ها به صورت توخالی ساخته می‌شود که با ایجاد یک نفوذپذیری به ساختمان باعث بهبود شرایط باد و کاهش میزان غلظت آلاینده در سطح تنفس انسان می‌شود. لازم به ذکر است که این سازه‌ها محیط خیلی ناراحت

خیابان بهبود می‌یابد [۴۵]. اولیواردیا و همکاران [۲۰]، در سال ۲۰۲۱ رفتار اکسیدهای نیتروژن^۱ و اوزون^۲ را به عنوان آلاینده‌های واکنشی در یک دره خیابان واقعی با استفاده از یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی همراه با یک مدل واکنش شیمیایی و مدل تاج درخت برای ۴ حالت زیر مورد مطالعه قرار دادند؛

۱- در حالت اول از کلیه واکنش‌های شیمیایی یا فتوشیمیایی و گونه درختی صرف نظر شد.

۲- در حالت دوم، واکنش‌های شیمیایی توسط مدل‌های سی بی ام چهارمدلسازی شد، اما گونه درختی استفاده نشد.

۳- در حالت سوم فرض شد که درختان در کنار جاده کاشته شده‌اند و واکنش‌های شیمیایی نیز در نظر گرفته شد. تراکم سطح برگ‌در پوشش تاج درخت ۰/۴۲ در نظر گرفته شد.

۴- در حالت چهارم، درختان در کنار جاده کاشته شدند و واکنش‌های شیمیایی نیز در نظر گرفته شد. تراکم سطح برگ پوشش تاج درخت ۱/۵۹ در نظر گرفته شد.

نتایج نشان داد که تأثیر تاج درخت بر سرعت باد به میدان جریان بستگی داشت و در مکان‌هایی که سرعت باد بیشتر بود معنی‌دارتر بود. از طرفی تأثیر تاج درخت بر غلظت آلاینده‌ها در جاهایی که سرعت باد کمتر بود، معنی‌دار بود، زیرا سرعت باد کمتر، باعث رکود آلاینده‌ها و ایجاد فرصت برای واکنش شیمیایی می‌شد. با توجه به این یافته‌ها می‌توان نتیجه گرفت که واکنش‌های شیمیایی و اثر آیرودینامیکی تاج درخت بر رفتار آلاینده‌های واکنش پذیر در دره خیابان‌ها تأثیر مؤثری دارد. بدین ترتیب مطابق با اثرات آیرودینامیکی سایبان درختان، غلظت محلی اکسیدهای نیتروژن در آزمایش‌ها به ترتیب در بدترین حالت تا ۵۱ درصد افزایش و در بهترین حالت تا ۱۱ درصد کاهش یافت.

۳-۵-۲- موانع غیرمتخلخل

از جمله موانع غیرمتخلخل می‌توان به اتومبیل‌های پارک شده، موانع صوتی^۳ بادگیرها، ساختمان‌های بالا برده شده^۴ و نظایر آن اشاره نمود. برخی از موانع غیر متخلخل تأثیرات بیشتری در نحوه پراکندگی آلاینده‌های ناشی از دود خودروها و در نتیجه بهبود کیفیت هوا خواهند داشت.

⁵ Noise Barrier

⁶ Lift-up buildings

¹ NO_x

² O₃

³ Carbon Bond Mechanism IV

⁴ Leaf Area Density

غلظت آلاینده در دره خیابانی که خیابان آن به عرض ۱۲ متر و طول ۸۰ متر، توسط ساختمان‌هایی به ارتفاع ۱۲ متر محصور شده است را به کمک روش شبیه‌سازی گردابه بزرگ در فلوئنت شبیه‌سازی کردند. آن‌ها چهار حالت مختلف زیر را در نظر گرفتند.

۱- دره خیابان بدون بالکن باشد.

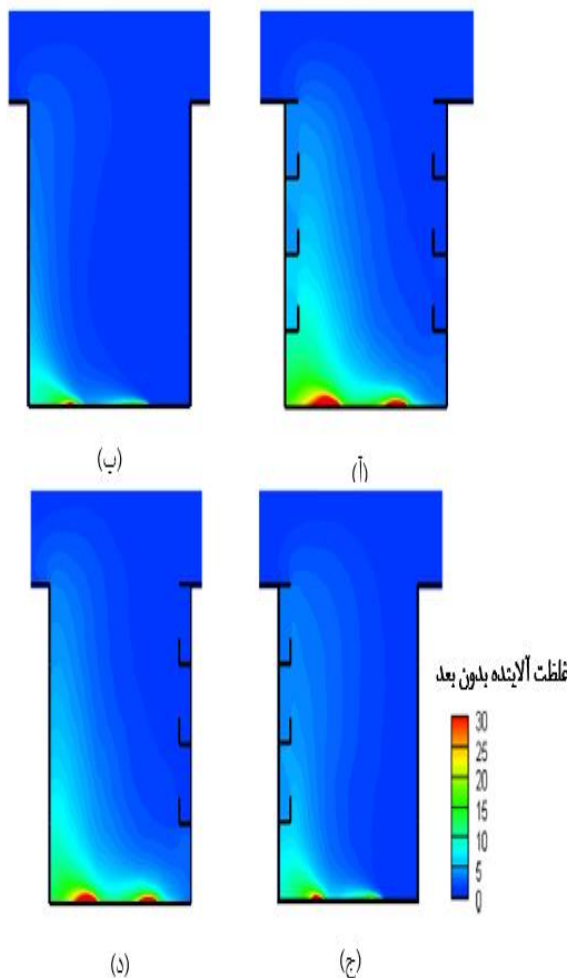
۲- بالکن‌ها در دو دیواره رو به باد و پشت باد قرار گرفته باشند.

۳- بالکن‌ها فقط در دیواره رو به باد قرار گرفته باشد.

۴- بالکن‌ها فقط در دیواره پشت به باد قرار گرفته باشد.

مطابق با شکل ۱۳ اساساً وجود بالکن باعث بیشتر شدن غلظت آلاینده در دره خیابان خواهد شد که وجود بالکن در سمت رو به باد بیشترین تاثیر را در بدتر کردن کیفیت هوای ساکنین خواهد داشت.

در جدول ۷ مقایسه‌ای بین حالت‌های مختلف وجود بالکن در برابر نبودن بالکن در دره خیابان شبیه‌سازی شده، آمده است.



شکل ۱۳ حالت‌های مختلف در نظر گرفتن بالکن در دره خیابان [۵۰].

(آ) هر دو سمت بالکن باشد، (ب) هر دو سمت بالکن نباشد،

(ج) سمت بادگیر بالکن باشد، (د) سمت رو به باد بالکن باشد.

کننده‌ای بواسطه افزایش سرعت باد برای عابران و ساکنان خود در فصول سرد سال ایجاد نمی‌کنند [۳۶]. در صورت استفاده از روش ساختمان‌های بالا برده شده می‌توان میزان غلظت آلاینده‌ها را مطابق جدول ۶ کاهش داد.



شکل ۱۲ یک ساختمان بالابر با ستون‌های جانبی در دانشگاه پلی تکنیک، هانگ هوم، هنگ کنگ [۴۸].

جدول ۶ میزان کاهش غلظت آلاینده برحسب طبقات [۴۹].

میزان کاهش غلظت آلاینده (به درصد)	بالا بردن طبقه از سطح زمین ساختمان (۱)
۳۴-۵۰	طبقه هم‌کف
۲۹-۳۸	طبقه اول
۶-۲۵	طبقه دوم

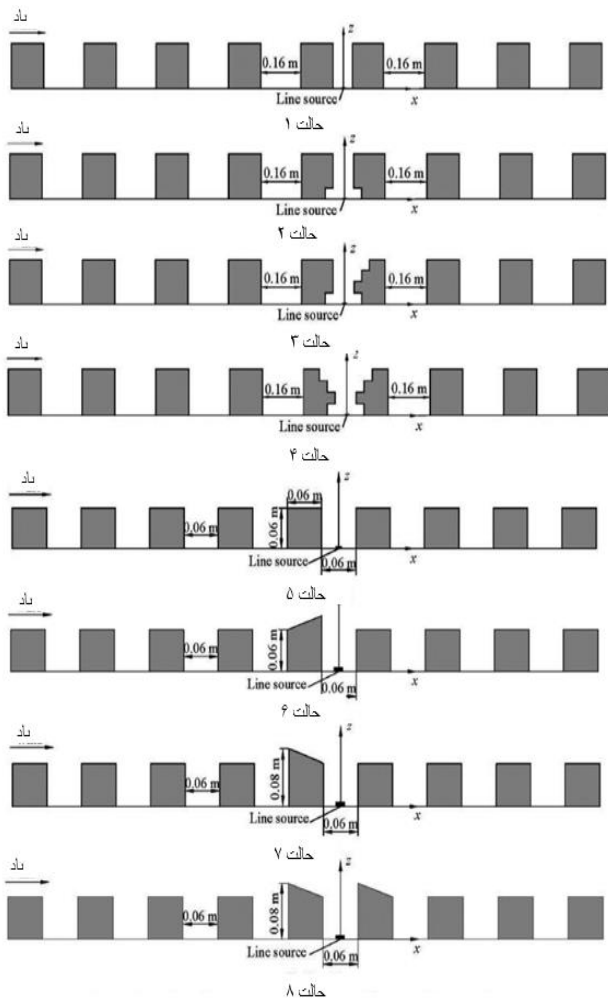
(۱) بالا بردن طبقه ساختمان از سطح زمین یعنی در نظر گرفتن یک فضای خالی مثلاً به ازای هر طبقه ۳ متر از سطح زمین که تنها در این فاصله ستون‌های ساختمانی قرار گرفته‌اند.

۳-۲-۵-۳- اثرات بالکن

در بررسی‌های انجام شده مشخص شد که یکی از عوامل تاثیرگذار بر میزان غلظت آلاینده در دره‌های خیابان شهری وجود بالکن‌ها در ساختمان‌ها می‌باشد. اثرات بالکن بر پراکندگی آلاینده در بیشتر شبیه‌سازی‌های عددی بواسطه‌ی ساده‌سازی‌های هندسی در نظر گرفته نمی‌شود که باعث کمتر تخمین زدن میزان آلاینده‌های موجود در دره خیابان می‌شود. خوشبختانه محققان در سال‌های اخیر به اهمیت در نظر گرفتن بالکن جهت نزدیک شدن نتایج حاصل از شبیه‌سازی به نتایج واقعی پرداخته‌اند. در سال ۲۰۲۲ ژنگ و همکاران [۵۰] تاثیر چیدمان بالکن‌ها در ساختمان‌های رو به باد و بادگیر بر میزان

۳-۶- اثرات پیکربندی و سقف ساختمان‌ها

پیکربندی ساختمان‌ها بر ساختار و نحوه پراکندگی آلاینده‌های تولیدی در دره خیابان‌ها اثر می‌گذارد [۲۸]. هیوانگ و همکاران [۵۳]. با استفاده از تونل باد دانشگاه علم و فناوری شانگهای به بررسی تاثیر پیکربندی‌های مختلف ساختمان و همچنین تاثیر شکل سقف ساختمان‌ها بر روی پراکندگی آلاینده‌ها پرداختند. آن‌ها مطابق شکل ۱۵ برای یک دره خیابان شهری ۸ حالت مختلف را در نظر گرفتند. غلظت آلاینده (دود) در داخل دره‌ها بر اساس روش پراکندگی نور اندازه‌گیری شد که نتایج آن در شکل ۱۶ آمده است. بر این اساس مشخص می‌شود، زمانی که ساختمان‌ها به صورت ۳ سطحی، با یک عقب نشینی که ایجاد راهرو در دو طرف خیابان می‌کند (حالت‌های ۳ و ۴) میزان غلظت آلاینده در سمت رو به باد بیشتر از سمت بادگیر است.

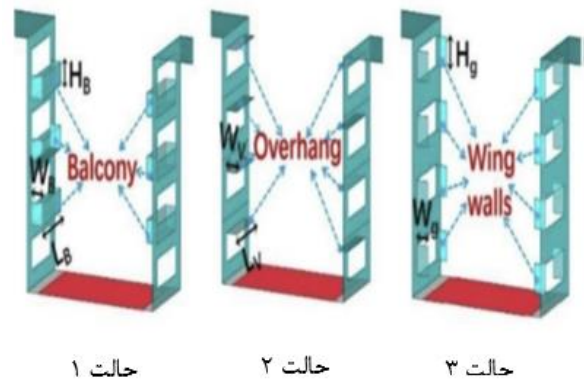


شکل ۱۵ پیکربندی‌های مختلف ساختمان‌ها در دره خیابان مورد مطالعه [۵۳].

جدول ۷ تاثیر بالکن بر سرعت متوسط و غلظت بدون بعد [۵۰].

وجود بالکن در سمت پشت به باد	وجود بالکن در سمت رو به باد	وجود بالکن در سمت رو به باد	وجود بالکن در هر دو سمت
سرعت متوسط در مرکز	کاهش نسبت به حالت بدون بالکن	کاهش نسبت به حالت بدون بالکن	کاهش نسبت به حالت بدون بالکن
غلظت بدون بعد	افزایش نسبت به حالت بدون بالکن	افزایش نسبت به حالت بدون بالکن	افزایش نسبت به حالت بدون بالکن

مورنا و مله [۵۱] در سال ۲۰۱۶ با الهام از اقلیم شهر ناپل به بررسی تاثیر عمق بالکن و فاصله‌ی افقی دو بالکن بر نحوه‌ی انتشار آلاینده در دره خیابانی با نسبت ابعاد ۳ پرداختند. در این بررسی مشخص شد که عمق و فاصله‌ی افقی دو بالکن دو عامل مهم در تشدید غلظت آلاینده در دره خیابان‌های عمیق خواهد بود. بر این اساس وجود بالکن به نوبه‌ی خود بر ساختار جریان تاثیر می‌گذارد و یک سوال اساسی این است که آیا شکل پوششی ساختمان (نمای ساختمان) هم در میزان غلظت آلاینده تاثیرگذار است؟ در سال ۲۰۲۰ کوی و همکاران [۵۲] سه حالت مختلف را برای برآمدگی دیواره‌های یک دره خیابان با نسبت‌های منطقی مختلف در نظر گرفتند. آن‌ها مطابق شکل ۱۴ تاثیر بالکن‌ها، طاق‌نماها^۱ و دیوارهای جانبی^۳ را به کمک دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی کردند و دریافتند که دیوار جانبی کمترین تاثیر و طاق‌نما بیشترین تاثیر را بر افزایش غلظت آلاینده در یک دره خیابان خواهد داشت و برجسته‌ترین تفاوت در نسبت ابعاد ۳ و بیشتر اتفاق خواهد افتاد.



شکل ۱۴ حالت‌های متفاوت بالکن در یک دره خیابان شهری [۵۲].

³ Wing walls

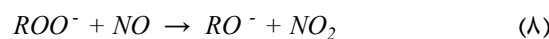
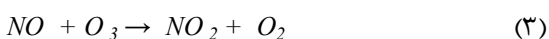
⁴ Light scattering technique

¹ Balcony

² Overhang

۷-۳- واکنش‌های شیمیایی

یکی از اصلی‌ترین ساده‌سازی‌ها جهت کاهش هزینه محاسباتی در شبیه‌سازی‌ها در نظر نگرفتن واکنش‌های شیمیایی بین آلاینده‌های منتشر شده از اگزوز خودروها و منابع آلاینده است. طبق گفته واردالوکیس و همکاران [۵۵]، اکثر آلاینده‌های موجود در دره خیابان مانند مونوکسیدکربن و سایر ترکیبات کربنی را می‌توان به عنوان گونه‌های عملاً بی اثر در نظر گرفت زیرا مدت زمان لازم برای واکنش دادن این آلاینده‌ها با یکدیگر بسیار بیشتر از زمانی است که این آلاینده‌ها در دره خیابان حضور دارند (زمان ماند). اما نکته‌ی حائز اهمیت وجود سایر آلاینده‌ها از جمله: اکسیدهای نیتروژن، اوزن و ترکیبات آلی فرار است که از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. NO که بیشتر NOx منتشر شده به عنوان گاز خروجی خودرو را تشکیل می‌دهد، با اوزن موجود در جو واکنش می‌دهد تا از طریق به اصطلاح واکنش تیتراسیون، NO2 تولید کند. NO2 با فوتولیز در حضور نور ماوراء بنفش به NO و رادیکال‌های اکسیژن تبدیل می‌شود. رادیکال‌های اکسیژن با اکسیژن واکنش داده و O3 تولید می‌کنند. ترکیبات آلی فرار همچنین رادیکال تولید می‌کنند و تبدیل NO به NO2 را افزایش می‌دهند. بنابراین، غلظت NO، NO2 و O3 در هوای کنار جاده نه تنها تحت تأثیر غلظت محیط و سطح انتشار هر آلاینده، بلکه تحت تأثیر تابش خورشیدی و غلظت ترکیبات آلی فرار نیز قرار می‌گیرد. روابط ۸-۳ این واکنش‌ها را بیان می‌کند [۲۰].

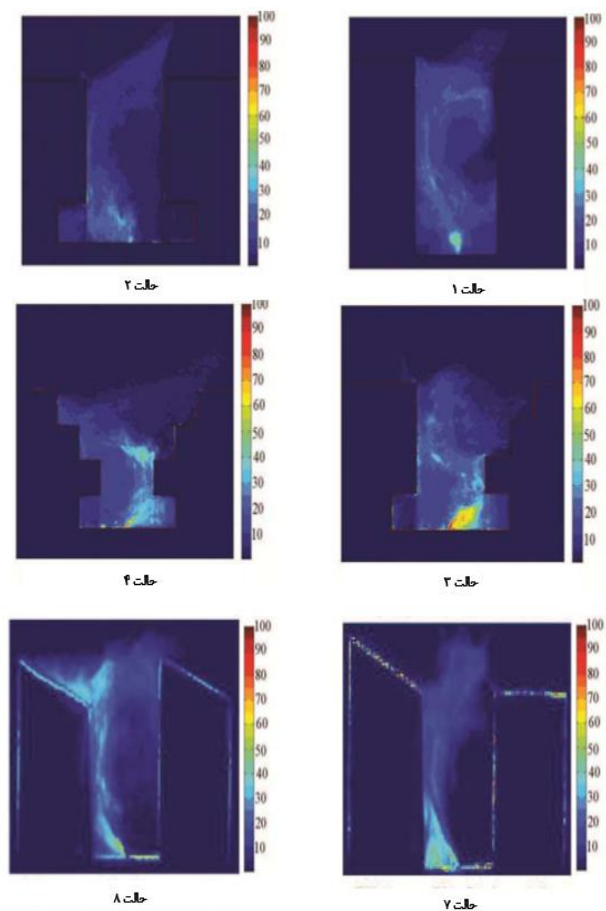


در نظر گرفتن واکنش‌های شیمیایی کمک شایانی به نزدیک‌تر شدن نتایج با واقعیت می‌کند.

۸-۳- حجم ترافیک

یکی از مواردی که می‌توان به کمک آن وضعیت کیفیت هوای دره خیابان‌های شهری را بهبود بخشید، تلاش برای کاهش آلاینده‌های تولیدی از سوی وسایل نقلیه موتوری است، که

زمانی که سقف ساختمان‌ها به صورت گوه‌ای شکل رو به بالا و یا رو به پایین ساخته شود (حالت ۸) در میزان غلظت آلاینده و نحوه‌ی پراکندگی آن نیز تغییرات عمده‌ای ایجاد می‌کند و در این حالت‌ها به طور کلی غلظت آلاینده در سمت بادگیر بسیار بیشتر از سمت رو به باد است. چنانچه از ترکیب سقف گوه‌ای-مسطح (حالت ۶) استفاده شود تمرکز آلاینده‌ها در پایین سمت بادگیر و اگر از ترکیب سقف گوه‌ای رو به پایین - گوه‌ای رو به پایین (حالت ۸) استفاده شود تمرکز آلاینده در بالای سمت بادگیر خواهد بود. شیب سقف‌های شیبدار ساختمان‌های واقع در یک دره خیابان شهری تأثیر بسیار مهمی در پراکندگی آلاینده‌ها و میزان غلظت آلاینده در خیابان دارد. ون و ایشیتین [۵۴] در سال ۲۰۱۸ یک مطالعه‌ی پارامتری ۲بعدی برای مشخص کردن تأثیر ارتفاع سقف در پراکندگی آلودگی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی انجام دادند. در این بررسی نشان داده شده است که سقف‌های شیبدار منجر به افزایش میانگین غلظت آلودگی هوا و در برخی حالات ایجاد کانون‌های شدید آلودگی در سمت بادگیر می‌شوند و سقف‌های شیبدار به ندرت برای تهویه دره خیابان‌ها مفید هستند.



شکل ۱۶ توزیع آلاینده در صفحه مرکزی دره در حالت‌های مختلف [۵۳].

۴- نتیجه‌گیری

این مقاله به بررسی شاخص‌ها و استانداردهای آلودگی هوا می‌پردازد. برای کاهش بیماری‌های قلبی و ریوی لازم است آلاینده‌ها را به صورت منظم پایش نمود و هر چه تعداد آلاینده‌های مورد بررسی بیشتر باشد شاخص انتخاب شده برای کیفیت هوا قابل اطمینان‌تر است. برای دقیق‌تر شدن نتایج می‌توان از شاخص‌هایی که واکنش‌های شیمیایی آلاینده‌ها را هم در نظر می‌گیرند استفاده نمود. دره خیابان‌های شهری به مکان‌هایی گفته می‌شود که خیابان توسط ساختمان‌های بلند مرتبه احاطه شده باشد. این ساختارها باعث تشدید آلودگی هوا می‌شود که کیفیت هوای ساکنین را تهدید کرده و سلامت آن‌ها را به خطر می‌اندازد. یکی از گام‌های مهم برای بهبود کیفیت هوای شهری، شهرسازی بر اساس در نظر گرفتن عوامل موثر بر تهویه دره خیابان شهری است که می‌توان به سرعت باد، جهت باد غالب، نسبت منطری، اثرات دما، کاشت درختان، موانع، اثرات سقف، نرخ ترافیک، میزان آلاینده‌گی وسایل نقلیه اشاره نمود. هر یک از عوامل یاد شده تأثیری متفاوت بر بهبود تهویه دره خیابان‌های شهری دارد که بیشترین تأثیر را عواملی نظیر نسبت منطری، سرعت باد، جهت باد غالب، پیکربندی ساختمان، شکل سقف و کاشت درختان دارند اما در مقابل کمترین تأثیر را اثرات دما، گرمایش دیواره‌های ساختمان، پوشش‌دهی جاده و نرخ ترافیک وسایل نقلیه ایفا می‌کند. در تحقیقات اخیر سعی شده تا اثرات تعاملی و ترکیبی پارامترهای موثر نیز مد نظر قرار گیرد. این امر به نزدیک‌تر شدن نتایج به واقعیت‌های موجود در دره خیابان‌های شهری کمک می‌کند و بررسی‌ها را از حالت ایده‌آل به حالت واقعی نزدیک‌تر می‌کند. نتایج این تحقیق می‌تواند به مدیران و برنامه‌ریزان عرصه شهرسازی و محیط زیست در مدیریت درست انباشتگی ساخت و سازهای شهری و کنترل کیفیت هوا در شهرهای بزرگ کمک نماید.

۵- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

نسبت ابعاد	AR
نقطه شکستی که بزرگتر یا مساوی C_p	BP_{Hi}
نقطه شکستی که کوچکتر یا مساوی C_p	BP_{Lo}
غلظت اندازه‌گیری شده (گردشده) برای آلاینده P	C_p
نورخورشید	hv
شاخص کیفیت هوا برای آلاینده p	I_p

می‌توان از طریق روش‌های مختلف نظیر آرام کردن ترافیک و کاهش حجم ترافیک و یا عدم اجازه تردد به وسایل نقلیه‌ای که حداقل‌های تعیین شده آلاینده‌گی را ندارند برآورده نمود. مارک بوگاچکی و همکاران [۵۶]. در سال ۲۰۲۰ ارزیابی تأثیر سازمان‌دهی مجدد ترافیک جاده‌ای بر کیفیت هوا در یک دره خیابان در شهر کراکوف لهستان را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مطابق شکل ۱۷ یک خیابان که شامل ۳۶ متر عرض و ۱۲۰ متر طول که توسط ساختمان‌هایی با ارتفاع ۱۸ تا ۲۱ متر محصور شده بود را با ۳ سناریو زیر؛

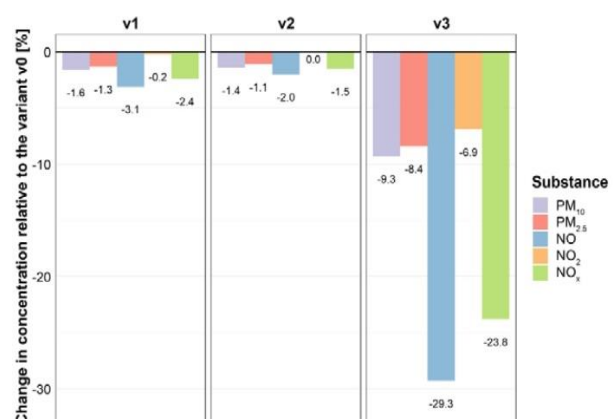
۱- باریک کردن مقطع خیابان با حذف یک لاین در هر دو جهت.
۲- محدود کردن حداکثر سرعت از ۷۰ کیلومتر در ساعت به ۵۰ کیلومتر در ساعت.

۳- مجاز کردن فقط خودروهای سواری و تجاری سبک در خیابان‌هایی که استاندارد یورو ۴ یا بالاتر را دارند.

را مورد ارزیابی قرار دادند. در این بررسی مطابق شکل ۱۸ بهترین نتیجه برای سناریو ۳ رقم خورد. سناریویی که باعث کاهش میانگین سالانه غلظت PM_{10} و $PM_{2.5}$ ، حدود ۸-۹٪ و برای NO_x تقریباً ۳۰٪ می‌شود.



شکل ۱۷ خیابان مورد بررسی در شهر کراکوف لهستان [۵۶].



شکل ۱۸ مقایسه سناریوهای مختلف جهت کاهش سطح آلاینده [۵۶].

- [9] Gromke, C., & Ruck, B., Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon—experimental investigation of the flow and concentration field, *Atmospheric Environment*, Vol. 41, No. 16, pp. 3287-3302, (2007).
- [10] Allegrini, J., A wind tunnel study on three-dimensional buoyant flows in street canyons with different roof shapes and building lengths, *Building and Environment*, Vol. 143, pp. 71-88, (2018).
- [11] Dallman, A., Magnusson, S., Britter, R., Norford, L., Entekhabi, D., & Fernando, H. J., Conditions for thermal circulation in urban street canyons, *Building and Environment*, Vol. 80, pp. 184-191, (2014).
- [12] Chew, L. W., Glicksman, L. R., & Norford, L. K., Buoyant flows in street canyons: Comparison of RANS and LES at reduced and full scales, *Building and Environment*, Vol. 146, pp. 77-87, (2018).
- [13] Salim, S. M., Buccolieri, R., Chan, A., & Di Sabatino, S., Numerical simulation of atmospheric pollutant dispersion in an urban street canyon: Comparison between RANS and LES, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 99, No. 2-3, pp. 103-113, (2011).
- [14] Reiminger, N., Vazquez, J., Blond, N., Dufresne, M., & Wertel, J., CFD evaluation of mean pollutant concentration variations in step-down street canyons, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 196, pp. 104032, (2020).
- [15] Akhter, M. N., Ali, M. E., Rahman, M. M., Hossain, M. N., & Molla, M. M., Simulation of air pollution dispersion in Dhaka city street canyon. *AIP Advances*, Vol. 11, No. 6, pp. 065022, (2021).
- [16] Niroobakhsh, A., Hassanzadeh, S., & Hoseinibalam, F., Flow and pollution concentration large-Eddy simulation and transition conditions for different street canyons and wind speeds: Environmental pollution reduction approach, *Urban Climate*, Vol. 35, pp. 100731, (2021).
- [17] Zheng, X., & Yang, J., Impact of moving traffic on pollutant transport in street canyons under perpendicular approach wind: An CFD analysis using large-eddy simulations, *Sustainable Cities and Society*, Vol. 82, pp. 103911, (2022).
- [18] Zhang, Y., Gu, Z., & Yu, C. W., Impact factors on airflow and pollutant dispersion in urban street canyons and comprehensive simulations: A review. *Current Pollution Reports*, Vol. 6, No. 4, pp. 425-439, (2020).

BP_{Hi}	مقدار شاخص کیفیت هوا منطبق با	I_{Hi}
	رادیکال آزاد	R^-
BP_{Lo}	مقدار شاخص کیفیت هوا منطبق با	I_{Lo}
	مدل توربولانسی ۲ معادله‌ای	$K-\epsilon$
	نیتریک اکسید	NO
	نیتروژن دی اکسید	NO_2
	اکسیدهای نیتروژن	NOx
	گاز اوزن	O_3
	گاز اکسیژن	O_2
	ذراتی که دارای قطر کمتر از ۱۰ میکرومتر	PM ₁₀

۶- مراجع

- [1] Pruss-Ustun, A., Wolf, J., Corvalán, C. F., Bos, R., Neira, M., Preventing disease through healthy environments: towards an estimate of the environmental burden of disease, *World Health Organization*, (2006).
- [2] Organization, W. H., Global health risks: mortality and burden of disease attributable to selected major risks, *World Health Organization*, (2009).
- [3] Organization, W. H., & Environment, W. E. C. f., WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide, *World Health Organization*, (2021).
- [4] Brugge, D., Durant, J. L., & Rioux, C., Near-highway pollutants in motor vehicle exhaust: a review of epidemiologic evidence of cardiac and pulmonary health risks, *Environmental health*, Vol. 6, No. 1, pp. 1-12, (2007).
- [5] Nunez, M., & Oke, T. R., The energy balance of an urban canyon. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 16, No. 1, pp. 11-19, (1977).
- [6] Lien, F., Yee, E., & Cheng, Y., Simulation of mean flow and turbulence over a 2D building array using high-resolution CFD and a distributed drag force approach, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 92, No. 2, pp. 117-158, (2004).
- [7] Richmond-Bryant, J., Isukapalli, S., & Vallero, D., Air pollutant retention within a complex of urban street canyons, *Atmospheric Environment*, Vol. 45, No. 40, pp. 7612-7618, (2011).
- [8] Karra, S., Malki-Epshtein, L., & Neophytou, M. K.-A., Air flow and pollution in a real, heterogeneous urban street canyon: A field and laboratory study, *Atmospheric Environment*, Vol. 165, pp. 370-384, (2017).

- [29] Gonzalez Olivardia, F. G., Zhang, Q., Matsuo, T., Shimadera, H., & Kondo, A, Analysis of pollutant dispersion in a realistic urban street canyon using coupled CFD and chemical reaction modeling. *Atmosphere*, Vol. 10, No. 9, pp. 479, (2019).
- [30] Zhao, Y., Jiang, C., & Song, X., Numerical evaluation of turbulence induced by wind and traffic, and its impact on pollutant dispersion in street canyons. *Sustainable Cities and Society*, Vol. 74, pp. 103142, (2021).
- [31] Alamy Stock Photo., Broadway urban canyon, URL <https://www.alamy.com/stock-photo-broadway-urban-canyon-soho-manhattan-new-york-city-124313203.html>, (2016).
- [32] Oke, T. R., Street design and urban canopy layer climate. *Energy and buildings*, Vol. 11, No. 1-3, pp. 103-113, (1988).
- [33] Chan, T. L., Dong, G., Leung, C. W., Cheung, C. S., & Hung, W., Validation of a two-dimensional pollutant dispersion model in an isolated street canyon, *Atmospheric Environment*, Vol. 36, No. 5, pp. 861-872, (2002).
- [34] Yazid, A. W. M., Sidik, N. A. C., Salim, S. M., & Saqr, K. M., A review on the flow structure and pollutant dispersion in urban street canyons for urban planning strategies, *Simulation*, Vol. 90, No. 8, pp. 892-916, (2014).
- [35] Chen, L., Hang, J., Chen, G., Liu, S., Lin, Y., Mattsson, M., Sandberg, M., & Ling, H., Numerical investigations of wind and thermal environment in 2D scaled street canyons with various aspect ratios and solar wall heating, *Building and Environment*, Vol. 190, pp. 107525, (2021).
- [36] Buccolieri, R., Carlo, O. S., Rivas, E., & Santiago, J. L., Urban Obstacles Influence on Street Canyon Ventilation: A Brief Review. *Environmental Sciences Proceedings*, Vol. 8, No. 1, pp. 11, (2021).
- [37] Huang, Y., Lei, C., Liu, C.-H., Perez, P., Forehead, H., Kong, S., & Zhou, J. L., A review of strategies for mitigating roadside air pollution in urban street canyons, *Environmental Pollution*, Vol. 280, pp. 116971, (2021).
- [38] Gallagher, J., Baldauf, R., Fuller, C. H., Kumar, P., Gill, L. W., & McNabola, A., Passive methods for improving air quality in the built environment: A review of porous and solid barriers, *Atmospheric Environment*, Vol. 120, pp. 61-70, (2015).
- [39] Jeanjean, A. P., Monks, P. S., & Leigh, R. J., Modelling the effectiveness of urban trees and grass on PM_{2.5} reduction via dispersion and
- [19] Kanchan, K., Gorai, A. K., & Goyal, P., A review on air quality indexing system, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, Vol. 9, No. 2, pp. 101-113, (2015).
- [20] Gonzalez Olivardia, F. G., Matsuo, T., Shimadera, H., & Kondo, A., Impacts of the Tree Canopy and Chemical Reactions on the Dispersion of Reactive Pollutants in Street Canyons, *Atmosphere*, Vol. 12, No. 1, pp. 34, (2021).
- [21] Fino, A., Vichi, F., Leonardi, C., & Mukhopadhyay, K., An overview of experiences made and tools used to inform the public on ambient air quality, *Atmosphere*, Vol. 12, No. 11, pp. 1524, (2021).
- [22] Li, X.-X., Liu, C.-H., & Leung, D. Y., Development of $k-\epsilon$ model for the determination of air exchange rates for street canyons. *Atmospheric Environment*, Vol. 39, No. 38, pp. 7285-7296, (2005).
- [23] Huang, Y.-D., Hou, R.-W., Liu, Z.-Y., Song, Y., Cui, P.-Y., & Kim, C.-N., Effects of wind direction on the airflow and pollutant dispersion inside a long street canyon. *Aerosol and Air Quality Research*, Vol. 19, No. 5, pp. 1152-1171, (2019).
- [24] Fellini, S., Ridolfi, L., & Salizzoni, P., Street canyon ventilation: Combined effect of cross-section geometry and wall heating. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 146, No. 730, pp. 2347-2367, (2020).
- [25] Xie, X., Hao, C., Huang, Y., & Huang, Z., Influence of TiO₂-based photocatalytic coating road on traffic-related NO_x pollutants in urban street canyon by CFD modeling. *Science of the Total Environment*, Vol. 724, pp. 138059, (2020).
- [26] Sun, D. J., & Zhang, Y., Influence of avenue trees on traffic pollutant dispersion in asymmetric street canyons: Numerical modeling with empirical analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 65, pp. 784-795, (2018).
- [27] Li, Z., Ming, T., Liu, S., Peng, C., de Richter, R., Li, W., Zhang, H., & Wen, C.-Y., Review on pollutant dispersion in urban areas-part A: Effects of mechanical factors and urban morphology. *Building and Environment*, Vol. 190, pp. 107534, (2021).
- [28] Nguyen, V. T., Nguyen, T. C., & Nguyen, J., Numerical simulation of turbulent flow and pollutant dispersion in urban street canyons. *Atmosphere*, Vol. 10, No. 11, pp. 683, (2019).

- [48] Zhang, X., Tse, K.-T., Weerasuriya, A. U., Li, S., Kwok, K. C., Mak, C. M., Niu, J., & Lin, Z., Evaluation of pedestrian wind comfort near 'lift-up' buildings with different aspect ratios and central core modifications, *Building and Environment*, Vol. 124, pp. 245-257, (2017).
- [49] Sha, C., Wang, X., Lin, Y., Fan, Y., Chen, X., & Hang, J., The impact of urban open space and 'lift-up' building design on building intake fraction and daily pollutant exposure in idealized urban models, *Science of the Total Environment*, Vol. 633, pp. 1314-1328, (2018).
- [50] Zheng, X., Montazeri, H., & Blocken, B., Impact of building façade geometrical details on pollutant dispersion in street canyons, *Building and Environment*, Vol. 212, pp. 108746, (2022).
- [51] Murena, F., & Mele, B., Effect of balconies on air quality in deep street canyons, *Atmospheric Pollution Research*, Vol. 7, No. 6, pp. 1004-1012, (2016).
- [52] Cui, D., Li, X., Du, Y., Mak, C. M., & Kwok, K., Effects of envelope features on wind flow and pollutant exposure in street canyons, *Building and Environment*, Vol. 176, pp. 106862, (2020).
- [53] Huang, Y.-d., Zeng, N.-b., Liu, Z.-y., Ye, S., & Xuan, X., Wind tunnel simulation of pollutant dispersion inside street canyons with galleries and multi-level flat roofs, *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, Vol. 28, No. 5, pp. 801-810, (2016).
- [54] Wen, H., & Malki-Epshtein, L., A parametric study of the effect of roof height and morphology on air pollution dispersion in street canyons, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 175, pp. 328-341, (2018).
- [55] Vardoulakis, S., Fisher, B. E., Pericleous, K., & Gonzalez-Flesca, N., Modelling air quality in street canyons: a review, *Atmospheric Environment*, Vol. 37, No. 2, pp. 155-182, (2003).
- [56] Bogacki, M., Oleniacz, R., Rzeszutek, M., Bzdziuch, P., Szulecka, A., & Gorzelnik, T., Assessing the impact of road traffic reorganization on air quality: a street canyon case study, *Atmosphere*, Vol. 11, No. 7, pp. 695, (2020).
- deposition at a city scale, *Atmospheric Environment*, Vol. 147, pp. 1-10, (2016).
- [40] Abhijith, K., Kumar, P., Gallagher, J., McNabola, A., Baldauf, R., Pilla, F., Broderick, B., Di Sabatino, S., & Pulvirenti, B., Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments—A review, *Atmospheric Environment*, Vol. 162, pp. 71-86, (2017).
- [41] Gromke, C., Jamarkattel, N., & Ruck, B., Influence of roadside hedgerows on air quality in urban street canyons, *Atmospheric Environment*, Vol. 139, pp. 75-86, (2016).
- [42] Santiago, J.-L., Buccolieri, R., Rivas, E., Calvete-Sogo, H., Sanchez, B., Martilli, A., Alonso, R., Elustondo, D., Santamaría, J. M., & Martin, F., CFD modelling of vegetation barrier effects on the reduction of traffic-related pollutant concentration in an avenue of Pamplona, Spain. *Sustainable Cities and Society*, Vol. 48, pp. 101559, (2019).
- [43] Kumar, P., Zavala-Reyes, J. C., Tomson, M., & Kalaiarasan, G., Understanding the effects of roadside hedges on the horizontal and vertical distributions of air pollutants in street canyons, *Environment international*, Vol. 158, pp. 106883, (2022).
- [44] Huang, Y.-d., Li, M.-z., Ren, S.-q., Wang, M.-j., & Cui, P.-y., Impacts of tree-planting pattern and trunk height on the airflow and pollutant dispersion inside a street canyon, *Building and Environment*, Vol. 165, pp. 106385, (2019).
- [45] Santiago, J.-L., Martilli, A., & Martin, F., On dry deposition modelling of atmospheric pollutants on vegetation at the microscale: Application to the impact of street vegetation on air quality, *Boundary-layer meteorology*, Vol. 162, No. 3, pp. 451-474, (2017).
- [46] Lauriks, T., Longo, R., Baetens, D., Derudi, M., Parente, A., Bellemans, A., Van Beeck, J., & Denys, S., Application of improved CFD modeling for prediction and mitigation of traffic-related air pollution hotspots in a realistic urban street, *Atmospheric Environment*, Vol. 246, pp. 118127, (2021).
- [47] Chew, L. W., Nazarian, N., & Norford, L., Pedestrian-level urban wind flow enhancement with wind catchers, *Atmosphere*, Vol. 8, No. 9, pp. 159, (2017).