نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال دوم، شماره ۱، بهار ۱۳۹٤

صفحات ٦٢-٤٣

# مدل‌سازی مکانی ـ زمانی سه‌بعدی پراکنش آلاینده‌ی اکسید های ازت هوا ناشی از ترافیک در تقاطع خیابان ولی‌عصر ـ فاطمی شهر تهران

فریماه بخشی‌زاده، کارشناس ارشد گروه سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشگاه خوارزمی.

هانی رضائیان، استادیار گروه سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات مکانی دانشگاه خوارزمی.

مهری اکبری[1]، استادیار گروه آب و هواشناسی، دانشگاه خوارزمی.

دریافت مقاله: ۹۳/۶/۱۴ پذیرش نهایی: ۹۳/۱۲/۱۸

## چکیده

یکی از مشکلات اصلی شهرها افزایش سریع آلودگی هواست که ترافیک وسایل نقلیه یکی از مهم ترین عوامل آن به‌شمار می‌رود. مدیریت هدفمند این عامل آلوده‌کننده نیازمند اطلاعات صحیح و دقیق از نحوه‌ی انتشار آلاینده‌ها در شرایط گوناگون مکانی و زمانی است. دراین‌باره، پژوهش حاضر نحوه‌ی انتشار سه‌بعدی آلودگی حاصل از اکسیدهای نیتروژن (NOx) را در مقیاس میکرو بررسی و با استفاده از مدل GRAL ۲ محدوده‌ی تقاطع ولی‌عصر ـ فاطمی شهر تهران را در فصل زمستان مطالعه می‌کند. با توجه به این، خودروها به‌منزله‌ی مهم‌ترین عامل آلاینده به مدل معرفی شد و فرآیند مدل‌سازی در نُه ارتفاع متفاوت (از ۱/۷ تا ۵۲/۵ متری) انجام گردید. برای بررسی ویژگی‌های فضایی و زمانی داده‌های میزان غلظت آلاینده‌ی NOx از روش‌های خودهم‌بستگی فضایی عمومی و محلی موران استفاده گردید. میزان شاخص موران معادل ۰/۷ تا ۰/۹ در حالت دوبعدی و معادل ۰/۲۲ در حالت سه‌بعدی در نتایج حاصل نشان‌دهنده‌ی وجود سطح بالایی از خودهم‌بستگی فضایی مثبت معنادار است که گواه صحت عملکرد شبیه‌سازی صورت گرفته است. تحلیل شاخص موران محلی/انسلین نشان‌دهنده‌ی غلبه‌ی نقاط بالاـبالا در ارتفاعات پایین تا متوسط و افزایش نقاط پایین‌ـپایین در ارتفاع‌های بالاتر است. همچنین، وجود خوشه‌های آلودگی نسبتاً پایدارتر در ارتفاع‌های مختلف در تقاطع‌ها و ناپایداری وضعیت خوشه‌بندی آلودگی هوا در نزدیکی ساختمان‌ها در نتایج حاصل مشهود است.

واژگان کلیدی: مدل اولرین لاگرانژین (GRAL)، ترافیک وسایط نقلیه، آلاینده‌ی $NO_x$، شهر تهران، خودهم‌بستگی فضایی.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.1.43 ]

[1]. نویسنده مسئول

Email: MehryAkbary@Khu.ac.ir

۲.Graz Lagrangian Model - GRAL

**مقدمه**

یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی شهرها از جمله کلان‌شهر تهران، آلودگی هوای ناشی از ترافیک وسایل نقلیه است (Morabia et al., ۲۰۰۹). در چند دهه‌ی گذشته، به‌منظور کاستن غلظت آلاینده‌های ناشی از خودروها، متولیان امر در شهرهای بزرگ به اقدام‌هایی برای اصلاح در حوزه‌ی مدیریت ترافیک پرداختند (Keuken et al., ۲۰۱۰). تحقیقات صورت‌گرفته دراین‌باره نشان می‌دهد که مدیریت ترافیک به‌صورت چشمگیری در بهبود کیفیت هوا مؤثر است ( Oettl et al., ۲۰۰۲ و Panis et al, ۲۰۱۱ ). شهر تهران ــبا متوسط ترافیک روزانه وسایل نقلیه بیش از دو میلیونــ در حدود ۲۰۰ روز از سال را در شرایط بحرانی آلودگی هوا به‌سر می‌برد. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که ۹۰٪ وزن کل آلاینده‌های هوای شهر تهران حاصل از ترافیک وسایل نقلیه است (Atash, ۲۰۰۷). براین‌اساس، تحقیقات درباره‌ی مدل‌سازی انتشار آلاینده‌های هوا می‌توانند اطلاعات لازم را برای اجرای راهبردهای آتی کنترل آلودگی هوا فراهم کنند (صفوی و علیجانی، ۱۳۸۵).

مدیریت هدف‌مند آلودگی هوای شهرها، به‌ویژه آلودگی ناشی ازترافیک، نیازمند اطلاعات صحیح و دقیق از نحوه‌ی انتشار منابع آلاینده است. این مهم در سطوح گوناگون فراگیر[۱] شامل محدوده‌های مکانی بالاتر از ۱۰ کیلومتر، منطقه‌ای[۲] شامل محدوده‌های مکانی بالاتر ۱ تا ۱۰ کیلومتر و محلی[۳] شامل محدوده‌های زیر ۱ کیلومتر بررسی می‌شود.

پدیده‌ی انتشار آلاینده‌های هوا، به‌ویژه در سطح محلی، تحت تأثیر عوامل متعددی از قبیل شرایط فیزیکی و هندسی زمین، معابر، ساختمان‌ها، جریان هوای ناشی از وزش باد، ترافیک و شرایط جوی است. تعدد و تنوع این عوامل سبب پیچیدگی مدل‌سازی آلودگی هوا می‌شود. براین‌اساس، روش مدل‌سازی پایین به بالا از طریق تشکیل مدل‌های دیفرانسیلی مکان‌مند، زمان‌مند و پویا راهکار مناسب برای مطالعه‌ی نقش عوامل گوناگون در نحوه‌ی شکل‌گیری الگوهای آلایندگی هوا در سطح محلی محسوب می‌گردد (Vardoulakis et al., ۲۰۰۳). با توجه به این‌که اجرای این راهکار نیازمند تعداد اقلام داده‌ی فراوان با حجم و قدرت تفکیک بسیار و همچنین سامانه‌هایی با قدرت پردازش قوی است، بیشتر پژوهش‌ها در این زمینه عمدتاً در سطوح فراگیر و گاه در سطح منطقه‌ای مطالعه شده‌اند و در سطوح محلی تحقیق‌های کمتری صورت گرفته است. برای نمونه (Beevers et al., ۲۰۱۲) به‌منظور بررسی میزان آلاینده‌های هوا در حوالی معابر و جاده‌های سطح شهر لندن از مدل منطقه‌ای موسوم به CMAQ-Urban[۴] استفاده کردند. نتایج این تحقیق کاهش میزان غلظت آلاینده‌های NOx و $NO_۲$ را با فاصله‌گرفتن از مرکز شهر نشان می‌دهد. به‌منظور شبیه‌سازی انتشار آلاینده‌های $NO_۲$ و $PM_{۱۰}$ ناشی از ترافیک در شهرهای هلند، از مدل پراکندگی OSPM [۵] استفاده شده است (Wang et al, ۲۰۰۸). در این شبیه‌سازی پارامترهای اصلی مدل شامل طول و عرض خیابان، ارتفاع ساختمان، سرعت و جهت باد، درجه‌ی حرارت هوا، آلودگی پس‌زمینه، حجم ترافیک، نوع وسیله‌ی نقلیه محیط بودند. نتایج حاصل نشان‌دهنده‌ی کاهش میزان متوسط غلظت آلاینده‌ها با دورشدن از سطح خیابان‌هاست.

---

۱. Global

۲. Regional

۳. Local

۴. Community Multi-scale Air Quality Model - CMAQ

۵. Operational Street Pollution Model - OSPM

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.1.43 ]

عتابی و همکاران (۱۳۸۶) در زمینه‌ی شبیه‌سازی انتشار آلودگی هوای ناشی از ترافیکِ شهر تهران با استفاده از مدلی منطقه‌ای موسوم به ADMS-Urban[۱] به مطالعه‌ی نحوه‌ی انتشار ذرات در محدوده‌ی کلان‌شهر تهران با درنظرگرفتن شرایط پیچیده توپوگرافی پرداختند. نتایج شبیه‌سازی مذکور نشان داد، که به‌علت حجم بالای وسایل نقلیه‌ی عبوری و ترافیک جاده‌ای اتوبان تهران-کرج، منطقه‌ی ۲۲ تهران بیشترین غلظت ذرات معلق را داراست. در تحقیق دیگری، دهنوی و همکاران (۱۳۸۳) برای پیش‌بینی آلودگی هوای ناشی از جریان‌های ترافیکی با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا در سطح خیابان‌های تهران در بازه‌ی زمانی کوتاه، از مدل منطقه‌ای ارائه‌شده‌ی مؤسسه‌ی تحقیقاتی استنفورد موسوم به Street-SRI [۲] استفاده کردند (Vardoulakis et al., ۲۰۰۳). این مطالعه نشان داد که متغیرهای حجم تردد و سرعت نرمال باد مؤثرترین متغیرها در سطح منطقه‌ای هستند. (Chen et al., ۲۰۱۲) در تحقیقات انجام‌شده برای مدل‌سازی انتشار آلودگی هوا در سطح محلی عمدتاً از روش‌های برازش معمول و زمین‌آماری[۳] استفاده کردند. این روند درباره‌ی مطالعات مربوط به هوای شهر تهران نیز مشاهده‌پذیر است. برای نمونه، محمدی (۱۳۹۲) با استفاده از تحلیل مناطق حائل با فواصل ۵۰۰ متری معابر شهر تهران و با استفاده از مدل برازش مبتنی بر کاربری اراضی موسوم بهLUR [۴]، به بررسی هم‌بستگی مکانی انتشار آلاینده $NO_۲$ پرداخت. نتایج این تحقیق نشان داد که هم‌بستگی مکانی در فصول بهار و تابستان از فصول پاییز و زمستان بیشتر است و ازاین‌رو تخمین میزان آلاینده‌ی $NO_۲$ در آن‌ها با استفاده از مدل LUR دقت بالاتری دارد. شعبانی و همکاران (۱۳۹۰) نیز با استفاده از روش زمین‌آماری کریجینگ توزیع آلاینده‌های جوی را در کلان‌شهر تهران مدل‌سازی کردند و به بررسی انواع مدل‌های خودهم‌بستگی مکانی از جمله مدل‌های واریوگرام کروی، نمایی، گوسین و خطی پرداختند. نتیجه‌ی این مطالعه نشان داد در مواقعی که ایستگاه‌های آلودگی‌سنجی توزیع مناسبی به‌لحاظ ارتفاع و فاصله نداشته باشند، روش‌های برازش زمین‌آماری بهتر از روش‌های برازش معمول، آلودگی هوا را مدل می‌کنند.

همچنین، تحقیقاتی نیز با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی نزدیک به سطح محلی از جمله مدل Hysplit [۵] (Akbary and Farahbakhshi ., ۲۰۱۵) و مدل TAPM [۶] در محدوده‌ی شهر تهران صورت گرفتند. شمسی‌پور و همکاران (۱۳۹۱) با با استفاده از مدل منطقه‌ای آلودگی هوا موسوم به TAPM به بررسی الگوی پراکنش آلودگی هوای ناشی از ترافیک کلان شهر تهران در شرایط وزش باد پرداختند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که در طول روز به‌علت گرمایش سطحی انرژی جنبشی افزایش می‌یابد که سبب افزایش تلاطم‌های هم‌رفتی و صعود هوا می‌شود. در تحقیقی دیگر، قنبری و همکاران (۱۳۸۸) نیز با استفاده از مدل TAPM با درنظرگرفتن الگوی باد به بررسی رفتار آلودگی هوا در سطح شهر تهران پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که غلظت عناصر آلاینده‌ی هوای شهر تهران از شمال به جنوب و از غرب به شرق افزایش پیدا می‌کند.

---

۱. Atmospheric Dispersion Modeling System - ADMS

۲. Stanford Research Institute - SRI

۳. Geostatistics

۴. Land Use Regression

۵. Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model

۶. The Air Pollution Model

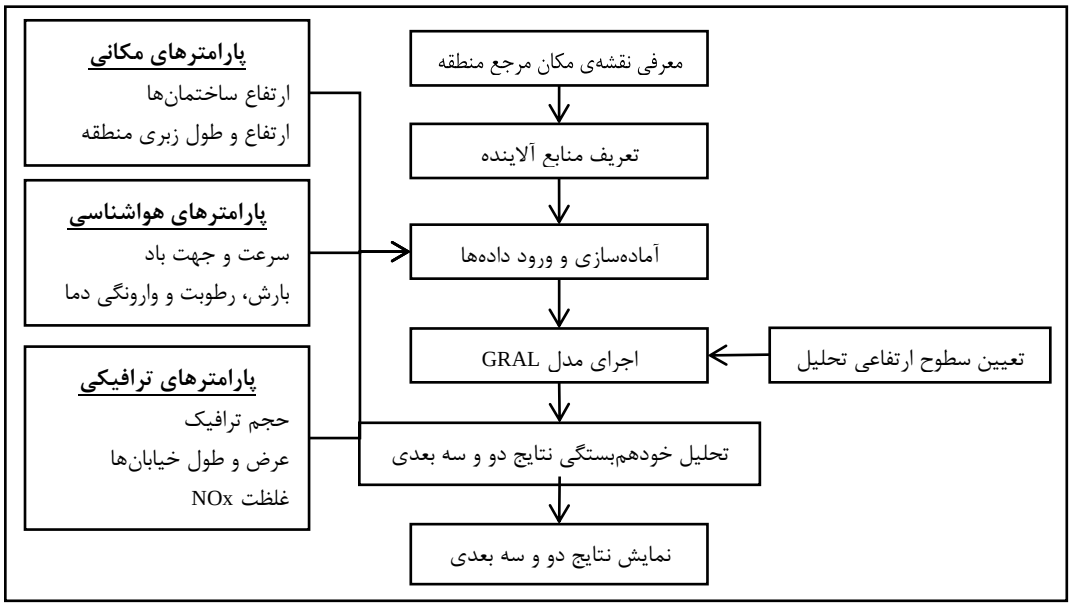
[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.1.43 ]

با توجه به آنچه گفته شد، بیشترِ تحقیقات صورت‌گرفته در سطح فراگیر، منطقه‌ای و گاه در همسایگی سطح محلی (بازه‌ی ۱ کیلومتری) بودند. این در حالی است که پژوهش حاضر با هدف مطالعه‌ی نقش عامل مکان در بازه‌های زمانی دل‌خواه در انتشار آلودگی هوای ناشی از ترافیک وسایل نقلیه، به شبیه‌سازی و بررسی این پدیده در سطحی محلی در محدوده‌ی تقاطع خیابان ولی‌عصر-فاطمی می‌پردازد که یکی از پرترددترین تقاطع‌های شهر تهران محسوب می‌شود. دراین‌زمینه، به بررسی الگوی خودهم‌بستگی آلاینده در مقیاس محلی در محدوده‌ی با شعاع کمتر از ۵۰۰ متر و در بازه‌های زمانی با قدرت تفکیک یک دقیقه پرداخته می‌شود. در این تحقیق، تأمین مشخصات عنوان‌شده به انتخاب مدل انتشار GRAL منتهی شد. انتخاب این مدل از میان تعدادی از مدل‌های مطرح در زمینه‌ی انتشار آلایندگی هوا در سطح محلی صورت گرفت. تعدادی از مدل‌هایی که در جریان انتخاب مدل GRAL در تحقیق حاضر بررسی شدند به همراه ویژگی‌های آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است. ترتیب مدل‌ها در جدول ۱ براساس میزان مناسبت با مشخصات مدنظر این تحقیق لحاظ شده است.

## داده‌ها و روش کار

با توجه به مطالب گفته‌شده در بخش قبل، روش تحقیق مورد استفاده به‌صورت شماتیک در شکل ۱ آمده است. دراین‌باره، پس از آماده‌سازی داده‌های مورد نیاز برای اجرای شبیه‌سازی انتشار آلودگی هوای ناشی از گاز NOx خروجی از اتومبیل‌ها، سعی می‌شود (از نظر میزان خودهم‌بستگی حاصل در نتایج) صحت نتایج حاصل در حالت دو بعدی و سه بعدی مطالعه شود.




**شکل ۱: چارچوب کلی مدل‌سازی با مدل GRAL.**

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.1.43 ]

چنان‌که در جدول ۱ نشان داده شد، پژوهشکده‌ی موتورهای درون‌سوز و ترمودینامیک[۱] مدل GRAL را برای احتراق و ترمودینامیک داخلی موتورها ارائه کرده است. این مدل در زمره‌ی مدل‌های لاگرانژین ـ اولرین برای شبیه‌سازی انتشار ذرات به‌صورت پایین به بالا و در سطوح محلی است (Semmelrock, ۲۰۱۳). مدل‌های لاگرانژین[۲] ارائه‌دهنده‌ی مدل ریاضی انتشار یک توده‌ی آلاینده به‌صورت بسته‌ای از ذرات با حرکت تصادفیِ جو در قالب شبکه‌ی مختصات با فریم متحرک هستند. انتشار تعداد فراوانی از توده‌های آلاینده در این مدل‌ها با محاسبات آماری شبیه‌سازی می‌شود. ازآنجاکه در مدل‌های انتشار لاگرانژین غلظت آلاینده‌ها از طریق شمارش ذرات در حجم تعیین می‌گردد، اغلب زمان محاسبه‌ی این مدل‌ها طولانی‌تر از سایر مدل‌هاست. این در حالی است که در مدل‌های اولرین[۳] حرکت هم‌زمان تعداد فراوانی از توده‌های آلاینده با استفاده از فرآیندهای موازی در قالب شبکه‌ی مختصات با فریم ثابت تبدیل به مدل می‌شود. ترکیب روش‌های لاگرانژین و اولرین با هدف ایجاد مدل‌های تعدیل‌شده و بهبودیافته از نظر حجم و سرعت محاسبات، مانند مدل GRAL، صورت می‌گیرد (Turner, ۱۹۹۴).

**جدول۱: برخی از از مدل‌های بررسی‌شده برای مدل‌سازی انتشار آلاینده‌های هوا (U.S. Environmental Protection Agency, ۲۰۰۲)**

| ردیف | نام | روش محاسباتی | سطح مقیاس | محدوده‌ی انتشار | نوع آلاینده‌ها | هندسه‌ی منبع آلاینده | قدرت تفکیک مکانی | قدرت تفکیک زمانی |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | GRAL* | لاگرانژین- اولرین | ناحیه‌ای | ۱۰۰ متر تا ۲۰ کیلومتر | گاز، ذرات | خطی، نقطه‌ای | بدون محدودیت | ۱۰ دقیقه تا ۱ ساعت |
| ۲ | CAR-FMI | گوسین | ناحیه‌ای، منطقه‌ای | کمتر از ۱ کیلومتر | گاز شامل CO, NO۲ و SO۲، ذرات شامل PM۱۰ | خطی | وابسته به مقیاس منطقه | ۱ ساعت تا ۲۴ ساعت |
| ۳ | SPRAY | لاگرانژین | کوچک و ناحیه ای | کمتر از ۱ کیلومتر | گاز شامل Nox و SO۲ | نقطه‌ای، خطی، سطحی، حجمی | افقی:<۱ متر عمودی:<۱ متر | ۱ دقیقه |
| ۴ | OSPM | جعبه‌ای | ناحیه‌ای | کمتر از ۱ کیلومتر | گاز شامل CO,NO۲ و SO۲، ذرات شامل PM۱۰ | خطی | بدون محدودیت | ۱ساعت |

* مدل استفاده‌شده در این تحقیق.

Oettle (۲۰۱۵) یک روش مدل‌سازی چند مقیاسی را با درنظرگرفتن آثار عوارض پیچیده و ساختمان‌ها در پراکندگی آلاینده‌های حوضه‌ی داخلی آلپ (اتریش) به‌کار گرفت. در این مطالعه، با درنظرگرفتن اثر ترکیبی توپوگرافی و موانع (ساختمان‌ها)، شبیه‌سازی در مقیاس میکرو (< ۱ کیلومتر) و مزو (میان مقیاس ۲ تا ۲۰ کیلومتر) و با استفاده از روش شبیه‌سازی ذرات لاگرانژی ـ مدل GRAL صورت گرفت. سپس، داده‌های هواشناسی سرعت و جهت باد و کلاس‌های

۱. Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics
۲. Lagrangian Model
۳. Eulerian Model

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.1.43 ]

پایداری، که عمدتاً درباره‌ی مدل‌های گوسی نیز استفاده می شود، به مدل معرفی شدند. نتایج شبیه‌سازی بیانگر آن بود که غلظت متوسط سالیانه‌ی آلاینده‌ها در این حوضه با شرایط سرعت پایین باد و وارونگی دما تابع الگوهای بسیار پیچیده‌ای است. بااین‌حال، با توجه به ساده‌سازی در استخراج اطلاعات ورودی هواشناسی و چند پیش‌فرض ساختگی درباره‌ی شرایط مرزی از مدل‌های میدان باد میان مقیاس، برای محاسبه‌ی زمان و مکان دقیق از تغییرات غلظت آلاینده‌ها، به شاخص‌های دقیق دخیل در پراکنش و نحوه‌ی حرکت آلاینده‌ها در برخورد با موانع و عوارض زمینی نیاز است.

در تحقیق صورت‌گرفته از سوی اُتل و همکاران (۲۰۰۱)، آن‌ها با درنظرگرفتن سرعت پایین باد و شرایط جو آرام عملکرد دو مدل انتشار آلودگی هوای CAR-FMI و GRAL را برای مدل‌سازی انتشار آلاینده $NO_x$ در اطراف یک خیابان (نمونه‌ی‌منبع خطی آلودگی) ارزیابی کردند. نتیجه نشان‌دهنده‌ی صحت بالاتر شبیه‌سازی حاصل مدل GRAL از مدل CAR-FMI است.

با توجه به مشخصات روش تحقیق اتخاذشده (شکل ۲) همچنین با توجه به انتخاب نمونه‌ی مطالعاتی مناسبی که رابطه‌ی کیفیت جریان ترافیک و آلودگی هوا را در شبکه‌ی ترافیکی درون شهری مشخص کند و تأثیرات محلی (از جمله تأثیر ساختمان‌ها و منابع انتشار شامل خودروهای عبوری از خیابان‌ها) در اطراف آن محسوس باشد، تقاطع خیابان ولی‌عصر و فاطمی واقع در منطقه‌ی شش تهران در این پژوهش انتخاب شد (شکل ۱). همچنین وجود اطلاعات هواشناسی و ایستگاه سنجش آلودگی هوا نیز در انتخاب محدوده‌ی مطالعه لحاظ شد. ایستگاه سنجش آلودگی هوا در تقاطع مذکور (مرکز شکل ۲) واقع شده است که داده‌های آن از سازمان کنترل کیفیت هوای شهر تهران، وابسته به شهرداری تهران، اخذ گردید. مضاف‌براین، با توجه به استفاده از مدل GRAL در سطح محلی در این تحقیق، ابعاد محدوده‌ی شبیه‌سازی در حدود ۲۰۰ متر در ۲۰۰ متر به مرکزیت تقاطع تقاطع خیابان ولی‌عصر و فاطمی درنظر گرفته شد.

نقشه‌ی مسطحاتی مکان مرجع منطقه در مقیاس ۱:۲۰۰۰ (شامل ساختمان‌ها و خیابان‌ها) از اداره‌ی مسکن و شهرسازی استان تهران اخذ گردید. برای تعیین منابع آلاینده و برای شبیه‌سازی آلاینده‌ها در سطح خیابان‌ها، که هدف اصلی در این پژوهش است، منابع آلاینده به‌صورت خطی تعریف شدند. در مورد منابع خطی آلاینده‌ها (خیابان‌ها)، خط مرکزی خیابان‌ها، پهنای خیابان‌ها، سرعت طرح مربوط به خیابان (سرعت بهینه‌ای که در طراحی مسیر درنظر گرفته می شود)، نوع ترافیک از نظر حجم، تعداد وسایل نقلیه‌ی عبوری به‌صورت روزانه، جهت ترافیک و شیب معبر لحاظ گردید. به‌دلیل وسعت و موقعیت ارتباطی شبکه‌ی مورد بررسی، وجود تعداد زیاد خیابان‌های فرعی و دردسترس‌نبودن اطلاعات دقیقِ خیابان‌های فرعی صرفاً خیابان‌های اصلی درنظر گرفته شدند. دراین‌زمینه، شبکه‌ی معابر مورد مطالعه در قالب شش قطعه معبر یک‌طرفه‌ی همگن از نظر ترافیک عبوری لحاظ گردیدند (شکل ۳).

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.1.43 ]

**شکل ۲: محدوده‌ی مکانی محدوده‌ی مطالعه (GoogleMaps, ۲۰۱۵).**

**شکل ۳: تعریف خط خیابان‌ها و ساختمان‌ها در محیط نرم‌افزار GRAL.**

چنان‌که عنوان شد ساختمان‌ها، به‌صورت یکی از عوامل فیزیک مدل، در انتشار آلاینده‌ها تأثیرگذار هستند. براثر وزش باد، آلاینده‌ها در برخورد با ساختمان‌ها دچار اغتشاش می‌گردند و غلظت آن‌ها در اطراف و پشت ساختمان بیشتر می‌شود (Villalvazo et al.۲۰۱۲). درباره‌ی تعیین مشخصات ساختمان‌ها در این تحقیق، ارتفاع ساختمان‌هایی که در حاشیه‌ی خیابان‌های محدوده‌ی مطالعه قرار داشتند با مراجعه محلی و شمارش تعداد طبقات (با احتساب متوسط ارتفاع ۳ متر برای هر طبقه) محاسبه و به نقشه منتقل گردید. همچنین، به‌دلیل محدوده‌ی کوچک مورد مطالعه (شعاع ۱۰۰ متر) و ساختار

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.1.43 ]

فیزیکی منطقه، در پیش‌فرض اولیه‌ی مدل، منطقه به‌صورت هموار درنظر گرفته شد. طول زبری سطح با توجه به ناهمواری‌های موجود در دامنه‌ی مدل‌سازی حدود ۰/۲ متر درنظر گرفته شد.

فایل هواشناسی به‌صورت مجزا و با توجه به داده‌های موجود براساس هفت پارامتر اصلی به‌ترتیب تاریخ، ساعت، سرعت باد، جهت باد و کلاس‌های پایداری تهیه و به مدل معرفی شد. این فایل براساس داده‌های موجود در سازمان کنترل کیفیت هوای تهران در سال ۱۳۸۶ و در فصل زمستان تهیه گردید.

برای محاسبه‌ی میزان غلظت آلاینده‌ی $NO_x$ ناشی از ترافیک، اطلاعات ترافیکی از شرکت مطالعات جامع حمل‌ونقل تهران اخذ گردید. اطلاعات مربوطه به‌صورت ساعتی پردازش شد و با اعمال میزان غلظت $NO_x$ برای انواع خودروها در سرعت‌های متفاوت میزان غلظت $NO_x$ برای خیابان‌ها محاسبه و به شبکه‌ی خیابان‌های مدل (شکل ۳) متصل گردید.

برای بررسی حرکت دینامیک و زمان‌مند مدل در جریان حرکت عمودی آلودگی به سمت بالا، خروجی مدل در ارتفاعات مختلف محاسبه شد. دراین‌باره، مدل در ۱۰ سطح ارتفاعی الف) ۱/۷ متر؛ ب) ۷/۵ متر؛ ج) ۱۰ متر؛ د) ۱۲/۵ متر؛ ه) ۱۵ متر؛ و) ۲۰ متر؛ ز) ۲۵متر؛ ح) ۳۰ متر و ط) ۵۲/۵ متر از سطح خیابان اجرا گردید. حد ارتفاع ۱/۷ متری معادل ارتفاع متوسط فردی بالغ و سایر حدود ارتفاعی براساس تغییرات ارتفاعی ساختمان‌های تعریف شده در مدل لحاظ شد.

برای بررسی و مقایسه‌ی مقادیر خودهم‌بستگی فضایی خروجی مدل در ارتفاعات مختلف،آماره‌ی موران عمومی[۱] برای هرکدام از ارتفاعات عنوان شده به‌صورت جداگانه محاسبه گردید. نتیجه نشان‌دهنده‌ی سطح خوشه‌بندی موجود در نتایج شبیه‌سازی انتشار آلودگی است که با مقدار بین ۱ و ۱- مشخص می‌گردد. مقدار نزدیک به ۱ نشان‌دهنده‌ی وجود سطح بالای خوشه‌بندی و خودهم‌بستگی است و در مقابل مقدار نزدیک به ۱- نشان‌دهنده‌ی خودهم‌بستگی مکانی پایین و تشکیل الگوهای پراکندگی در جریان انتشار آلودگی است (Anselin, ۱۹۵۵).

برای آشکارسازی الگوی فضایی تفاوت‌های محلی از آماره‌ی خودهم‌بستگی فضایی موران محلی[۲] استفاده شد. این شاخص تفاوت فضایی میزان غلظت را بین هر موقعیت با موقعیت‌های مجاورش محاسبه می‌کند. با توجه به این‌که محاسبه‌ی آماره‌های موران در محیط نرم‌افزار ArcGIS ۱۰.x انجام شده است، خروجی این نرم‌افزار نتایج محاسبه‌ی خودهمبستگی موران محلی را به چهار گروه تقسیم می‌کند.

۱. نقاط بالا-بالا[۳]: نقاطی که دارای میزان غلظت بالا هستند و از اطراف نیز بوسیله نقاطی در بر گرفته شده اند که دارای میزان غلظت بالا هستند. با توجه به نحوه پراکندگی این نقاط خوشه‌های با میزان آلودگی بالا تشخیص داده شدند.

۲. نقاط پایین-پایین[۴]: نقاطی که دارای میزان غلظت پایین هستند و از اطراف نیز بوسیله نقاطی در بر گرفته شده‌اند که دارای میزان غلظت پایین هستند. با توجه به نحوه پراکندگی این نقاط خوشه‌های با میزان آلودگی پایین تشخیص داده شدند.

۳. نقاط پایین-بالا[۱]: نقاطی که غلظت پایینی دارند، اما از اطراف با نقاطی احاطه شده‌اند که غلظت بالا دارند.

---

۱. Global Moran Index
۲. Local Moran Index
۳. High-High (HH)
۴. Low-Low (LL)

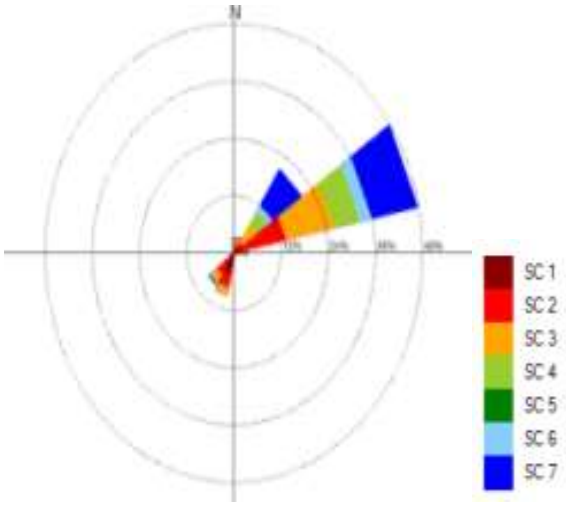
[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.1.43 ]

۴. نقاط بالا-پایین[۲]: نقاطی که غلظت بالا دارند، اما از اطراف با نقاطی احاطه شده‌اند که غلظت پایین دارند.

## شرح و تفسیر نتایج

بررسی گلباد حاصل از پردازش داده‌های هواشناسی منطقه‌ی مطالعه برای فصل زمستان و هفت کلاس پایدار[۳] جو محاسبه‌شده نشان می‌دهد که جهت باد غالب شمال شرق و شمالی است و سرعت متوسط باد بین ۲تا ۳ متر بر ثانیه در حال نوسان است (شکل ۴). همچنین، نمودار سرعت متوسط باد در طی شبانه‌روز (شکل ۵) نشان می‌دهد که، در ساعت‌های اولیه‌ی نیمه‌شب، سرعت باد نسبتاً پایین است و جو نسبتاً پایداری بر منطقه حاکم است. حداقل سرعت باد در نیمه‌شب از ۱/۵ متر بر ثانیه تا حداکثر ۳ متر بر ثانیه متغیر است که هم‌گونی نسبی دارد. از ساعت ۶ صبح به بعد، روندی تدریجی در افزایش سرعت باد مشاهده می‌شود و به‌خصوص در ساعت ۹ صبح این روند شدت پیدا می‌کند و در حوالی ظهر به بالاترین مقدار خود می‌رسد.

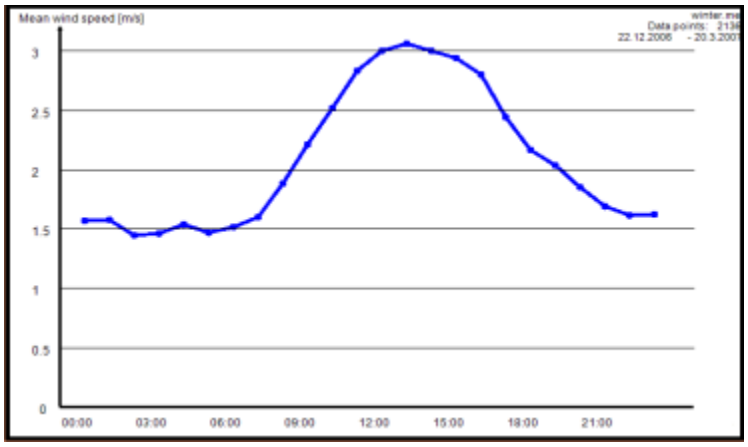
نمودار فرکانس جهت باد سه جهت غالب وزش باد را (شکل ۶) در منطقه‌ی مطالعه نشان می‌دهد که وزش بادهایی با جهت شمال شرق فرکانس‌های بالاتری دارند. سرعت نسبتاً پایین باد در ساعت‌های اولیه‌ی نیمه‌شب ازیک‌سو و برودت نسبی و پایداری جو ازسوی‌دیگر، سبب تجمع آلاینده‌ها در سطوح پایین جو و منجر به افزایش غلظت آلاینده‌ها در ساعت‌های اولیه‌ی صبح می‌شود.



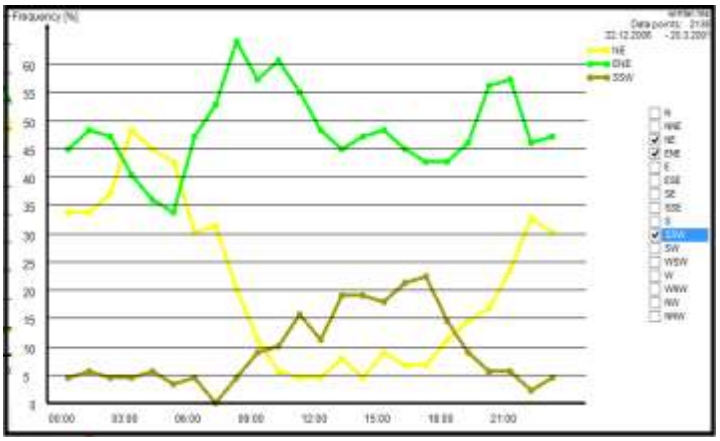

**شکل ۴: گلباد محدوده‌ی مطالعاتی در فصل زمستان**
**(کلاس‌های پایداری جو از SC۱ تا SC۷ مشخص شده‌اند).**

[۱]. Low-High (LH)
[۲]. High-Low (HL)
[۳]. Stability Class - SC

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.1.43 ]



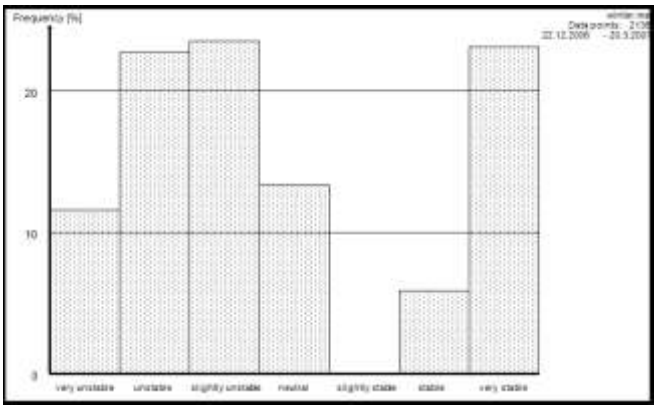

**شکل ۵: نمودار متوسط سرعت باد ساعتی در منطقه‌ی مطالعه**
**(محور افقی بیانگر زمان و محور عمودی بیانگر سرعت متوسط برحسب متر بر ثانیه).**



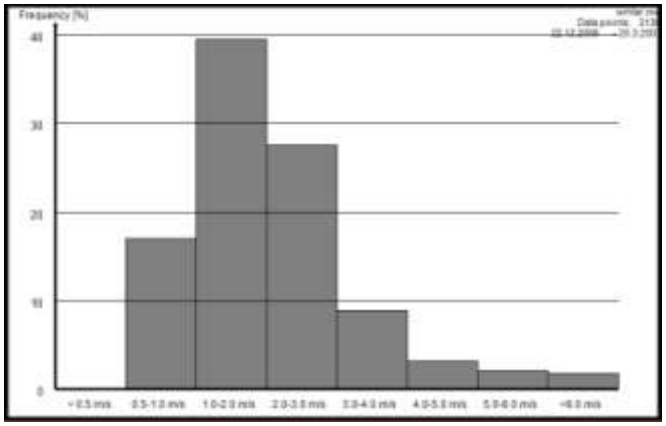

**شکل۶: نمودار فرکانس‌های جهت باد ساعتی در منطقه‌ی مطالعه**
**(محور افقی بیانگر زمان و محور عمودی بیانگر فرکانس برحسب درصد).**

با توجه به نمودار توزیع کلاس‌های پایداری (شکل ۷)، مشخص می‌شود که در این فصل با ورود سامانه‌های غربی به کشور و افزایش روزهای همراه با وزش باد و خنک‌شدن تدریجی هوا جو منطقه‌ی مطالعه در کلاس پایداری B قرار می‌گیرد. اما در نیمه‌های شب جو پایداری در منطقه‌ی حاکم و کلاس پایداری بهG تبدیل می‌شود. در حوالی ساعت ۱۵ تا ۲۳، در بیشتر مواقع کلاس پایدار C غالب است و در بعضی روزها نیز کلاس پایداری D حاکم است. همچنین، شکل ۸ نشان می‌دهد که در فصل زمستان فراوانی وزش بادهایی با سرعت بالای ۳ متر بر ثانیه کاهش پیدا می‌کند و به‌ندرت این چنین بادهایی مشاهده می‌شود. ازاین‌رو، بیشتر اوقات جو پایداری در منطقه‌ی حاکم است.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.1.43 ]




**شکل۷: نمودار فرکانس‌های توزیع کلاس‌های پایداری جو منطقه‌ی مطالعه**
**(محور افقی بیانگر کلاس پایداری و محور عمودی بیانگر فرکانس برحسب درصد).**

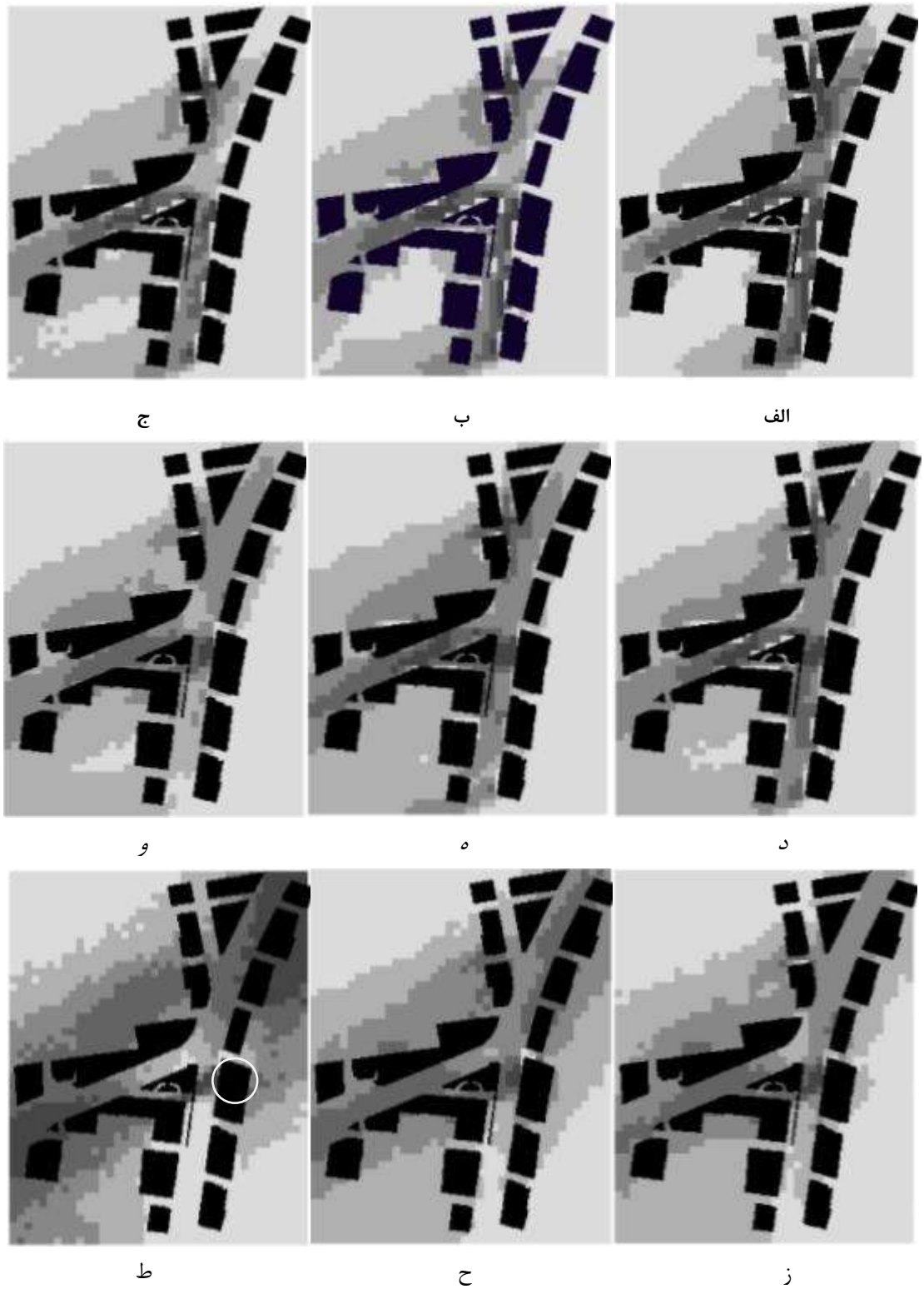



**شکل۸: نمودار فرکانس توزیع کلاس‌های باد منطقه‌ی مطالعه**
**(محور افقی بیانگر سرعت بر حسب متر بر ثانیه و محور عمودی بیانگر فرکانس برحسب درصد).**

شکل ۹ نمای دوبعدی از نتایج حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از مدل GRAL در ۹ ارتفاع درنظر گرفته شده در ابعاد سلولی ۱۰ متر را نمایش می‌دهد. در طول خیابان‌ها، به‌ویژه خیابان ولی‌عصر به‌دلیل حجم ترافیک بیشتر میزان متوسط غلظت NOx بالاتر است. همچنین، کاهش غلظت آلاینده‌ها با نزدیک‌شدن به حاشیه‌ی خیابان‌ها ناشی از تأثیر ساختمان‌ها در جهت هدایت جریان‌های هوا به سمت بالا مشهود است. این در حالی است که در شکل ۹ افزایش غلظت آلاینده‌ها در فضای پشت ساختمان‌ها ناشی از ریزش جریان‌های اوج گرفته موسوم به پدیده‌ی Down Wash است.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.1.43 ]




**شکل ۹: نقشه‌ی دو بعدی پراکنش آلاینده‌ی $NO_x$ به‌ترتیب در ارتفاع‌های الف) ۱/۷ متر؛ ب) ۷/۵ متر؛ ج) ۱۰ متر؛ د) ۱۲/۵ متر؛ ه) ۱۵ متر؛ و) ۲۰ متر؛ ز) ۲۵متر؛ ح) ۳۰ متر و ط) ۵۲/۵ متر از سطح خیابان. چندضلعی‌های سیاه نشان‌دهنده‌ی موقعیت ساختمان‌ها است و سلول‌های خاکستری نشان‌دهنده‌ی افزایش متوسط غلظت آلودگی از روشن به تیره‌اند.**

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.1.43 ]

در شکل ۹، با افزایش ارتفاع، میزان پراکندگی و غلظت آلاینده کاهش می‌یابد. یکی از مهم‌ترین عوامل این امر وزش باد است که میزان آن با افزایش ارتفاع فراوان می‌شود. هرچه سرعت باد بیشتر باشد، شعاع انتشار بیشتر و غلظت آلودگی کمتر می‌شود. گفتنی است که افزایش سرعت باد تا حدود ۱۰ متری با شیبی سریع رخ می‌دهد که این پدیده نیز در نتایج خروجی مدل مشهود است (شکل ۹).

با توجه به میزان غلظت آلاینده‌ی $NO_x$ ثبت‌شده با سنسور نصب‌گردیده در ایستگاه فاطمی و نتایج به‌دست آمده از مدل و در نگاهی به نمودارهای خروجی مدل و مقایسه‌ی کلی آن‌ها، در توصیف روند تغییر غلظت $NO_x$ در ساعت‌های شبانه‌روز می‌توان به کاهش میزان اکسیدهای نیتروژن تا ساعت ۴ بامداد اشاره کرد. صبحگاه و با آغاز تردد خودروها در خیابان‌ها غلظت آلاینده بالا می‌رود و در ساعات ۷ و ۸ صبح به نقطه‌ی اوج خود می‌رسد. با افزایش شدت تابش خورشید، افزایش نسبی دما و ایجاد حرکات صعودی در هوای شهر پراکندگی آلاینده‌ها فراوان می‌شود و، با وجود کاهش ناچیز تردد خودروها، غلظت به میزان فراوانی پایین می‌آید، یکی دیگر از دلایل این مسئله را می‌توان افزایش سرعت باد در این ساعت‌ها دانست. غلظت در ساعت ۲ بعداز ظهر به حداقل خود می‌رسد و بعد از آن با کاهش دما و سرعت باد و با افزایش ترددها، به‌تدریج غلظت NOx افزایش می‌یابد و در ساعات ۲۱ و ۲۲ به‌اوج خود می‌رسد و از آن پس تا بامداد روز بعد به تدریج کاهش می‌یابد.

جدول ۲ مقادیر خودهم‌بستگی فضایی موران در سطح فراگیر را برای مقادیر غلظت آلاینده‌ی NOx در نُه سطح ارتفاعی شبیه‌سازی‌شده (شکل ۹) نشان می‌دهد. بررسی مقادیر جدول ۲ نشان‌دهنده‌ی معناداربودن وجود خودهم‌بستگی در سطح اطمینان ۹۵ درصد است. بنابراین، فرضیه‌ی صفر مبنی بر اتفاقی‌بودن و عدم ارتباط مکانی در نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی رد می‌شود که گواه صحت عملکرد مدل در سطح فراگیر است.

**جدول ۲: مقادیر خودهم‌بستگی فضایی موران عمومی غلظت آلاینده‌ی NOx در نُه سطح ارتفاعی شبیه‌سازی شده**

| ارتفاع شبیه‌سازی از سطح خیابان (متر) | ۱/۷ | ۷/۵ | ۱۰ | ۱۲/۵ | ۱۵ | ۲۰ | ۲۵ | ۳۰ | ۵۲/۵ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| مقدار آماره‌ی موران فراگیر | ۰/۷۰۷ | ۰/۷۹۲ | ۰/۷۷۶ | ۰/۷۰۵ | ۰/۷۷۵ | ۰/۸۲۳ | ۰/۸۳۷ | ۰/۸۳۲ | ۰/۹۶۰ |
| z-score | ۱۶/۶۲ | ۱۸/۶۲ | ۱۸/۳۰ | ۱۸/۳۶ | ۱۸/۴۶ | ۱۹/۸۲ | ۲۰/۲۲ | ۲۰/۱۲ | ۲۲/۵۳ |

از بررسی مقادیر جدول شماره‌ی ۲، مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع میزان خودهم‌بستگی (آماره‌ی موران) افزایش می‌یابد که ناشی از تلاطم کمتر جریان هوا در ارتفاع‌های بالاتر است. در ارتفاع ۵۲/۵ متری نقاطی که در همسایگی یک‌دیگر قرار دارند شباهت بسیار زیاد و تفاوت اندکی دارند. اما در ارتفاعات پایین اختلاف مقادیر غلظت افزایش می‌یابد و رفته‌رفته شباهت مکانی کم می‌شود. عدم وقوع روند افزایشی در ارتفاع‌های۱۰ تا ۱۵ متری و ۳۰ متری نیز بیانگر وجود عوامل متلاطم‌کننده جریان هواست که دلیل آن تغییر سطوح ارتفاعی ساختمان‌های اطراف خیابان است.

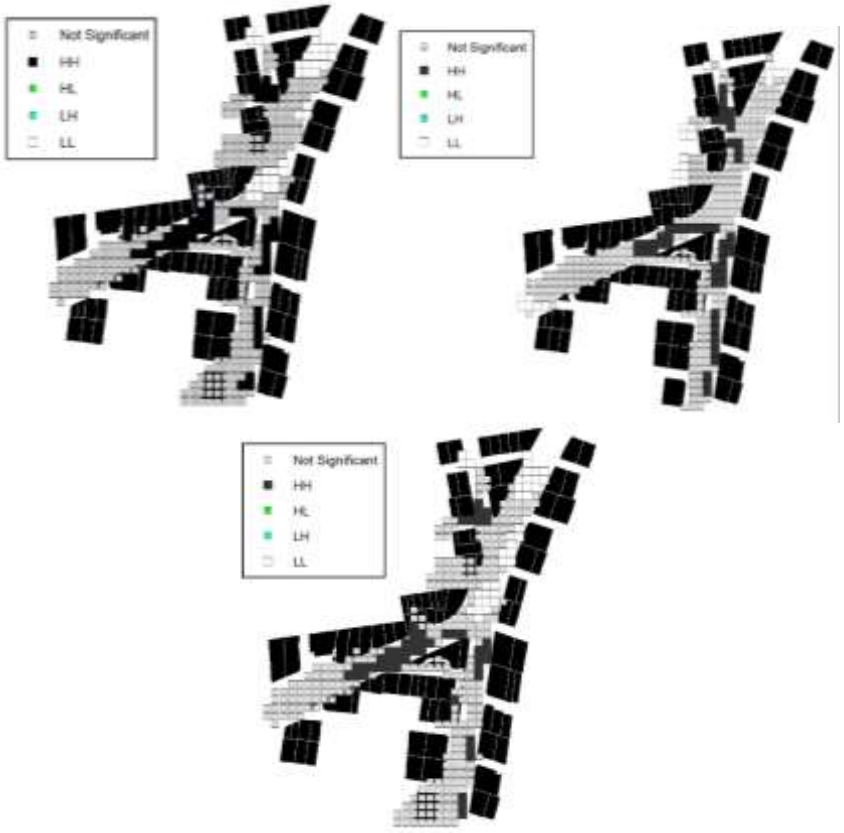
چنان‌که در شکل ۹ مشاهد می‌شود، در ارتفاع‌های بالای بیست متر به‌تدریج خوشه‌های با مساحت کوچک کاهش می‌یابد و خوشه‌هایی که از نظر فضایی وسعت بیشتری دارند باقی می‌مانند. دراین‌میان، خوشه‌بندی‌های واقع در نقاطی از خیابان‌ها که مقدار غلظت آلاینده‌ی بالایی دارند (مانند تقاطع خیابان ولی‌عصر و فاطمی که در شکل ۹ـط با دایره مشخص

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.1.43 ]

شده است) موجودبودن خود را در همه‌ی ارتفاعات حفظ کرده‌اند و حتی در ارتفاعات بالا نیز خوشه‌های مذکور را می‌توان دید.

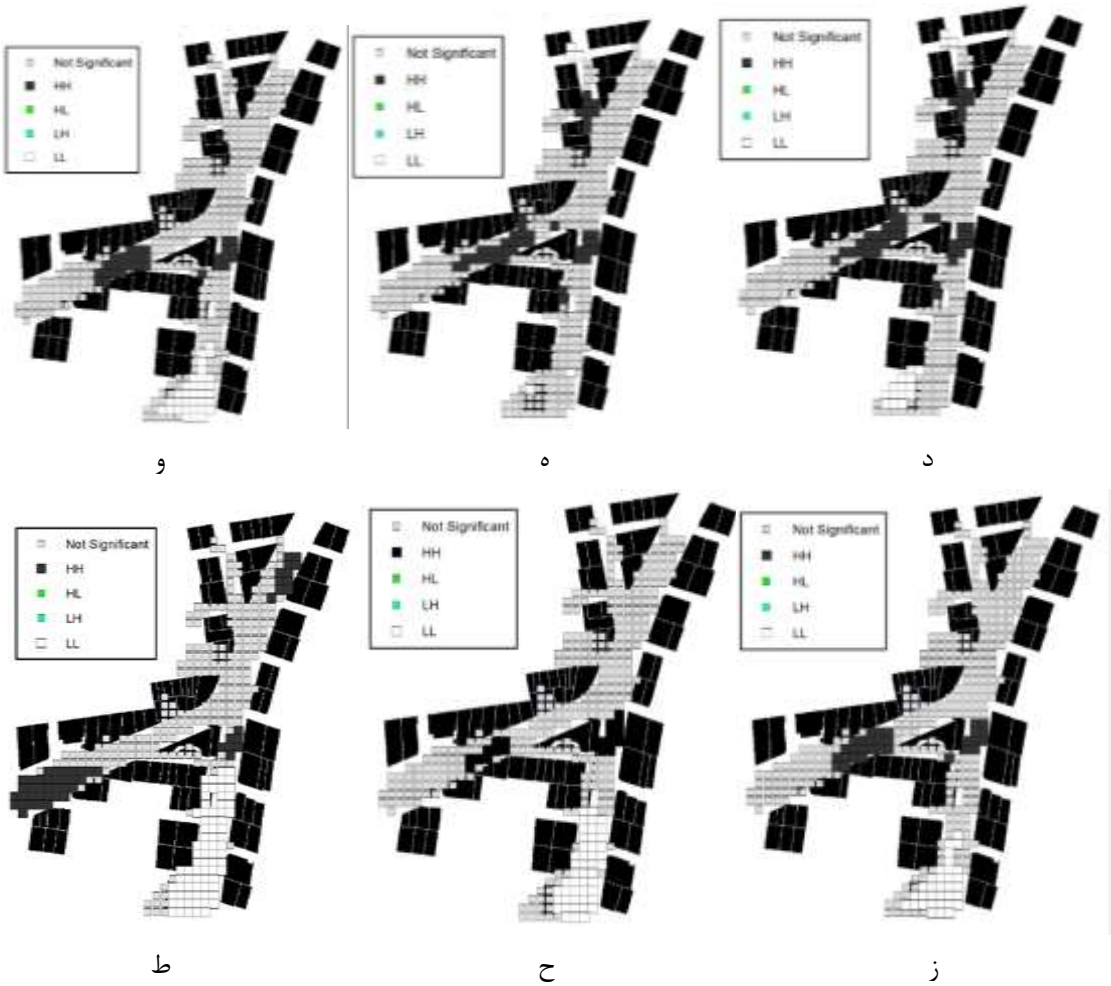
شکل ۱۰ نیز نتایج محاسبه‌ی خودهم‌بستگی فضایی محلی با استفاده از آماره‌ی موران محلی را برای نُه ارتفاع شبیه‌سازی‌شده نشان می‌دهد. برای بررسی نتایج تعداد نقاط کلاسه‌بندی شده در کلاس‌های بالا-بالا و پایین-پایین برای همه‌ی خروجی‌های مدل (در همه‌ی ارتفاعات) شمارش شد و روند تغییرات این نقاط بررسی گردید. بررسی تغییرات نقاط بالا-بالا نشان داد که تعداد این نقاط تا ارتفاع ۱۵ متری تقریباً ثابت است و از ارتفاع ۲۰ تا ۳۰ متری تقریباً کاهش می‌یابد و در ارتفاع ۵۲/۵ متری دوباره افزایش پیدا می‌کند. این خوشه‌ها تا ارتفاع ۱۵ متری در سطح کل فضای محدوده‌ی مطالعه پراکنده شدند، اما با افزایش ارتفاع پراکنش خوشه‌های بالا-بالا تضعیف گردیدند.




الف ب ج

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.1.43 ]



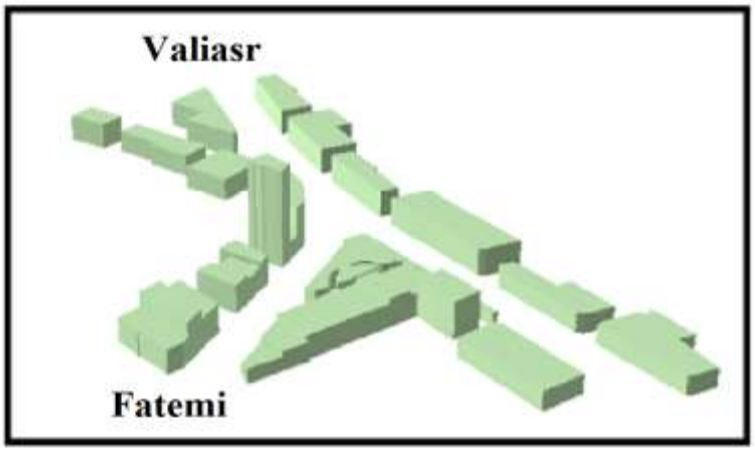

**شکل ۱۰: نقشه‌ی آنالیز خودهم‌بستگی موران برای میزان NOx به ترتیب در ارتفاع‌های الف) ۱/۷ متر؛ ب) ۷/۵ متر؛ ج) ۱۰ متر؛ د) ۱۲/۵ متر؛ ه) ۱۵ متر؛ و) ۲۰ متر؛ ز) ۲۵متر؛ ح) ۳۰ متر و ط) ۵۲/۵ متر از سطح خیابان. چندضلعی‌های سیاه نشان‌دهنده‌ی موقعیت ساختمان‌هاست.**

چنانکه در شکل ۱۰ نشان داده شده است، خوشه‌هایی با خودهم‌بستگی مکانی پایین در ورودی خیابان‌های فرعی منتهی به خیابان‌های اصلی قرار دارند. خوشه‌های با همبستگی بسیار بالا در قسمت‌هایی از مسیر مشاهده شد که اصولاً با ترافیک سنگین و حجم بالایی از خودروها به دو راهی ختم می‌شود. هرچه در راستای قائم از سطح خیابان‌ها دور شویم و به سطوح بالاتر از ارتفاعات ساختمان‌ها حرکت کنیم، شعاع پراکنش آلودگی بیشتر می‌شود و به همان نسبت نقاط با مقادیر بالا کاهش می‌یابند. در ارتفاعات پایین‌تر از ارتفاع ساختمان‌ها، جریان باد به‌راحتی نمی‌تواند جابه‌جا شود و ساختمان‌ها به‌صورت ناهمواری‌ها و ایجاد اصطکاک سرعت باد را کاهش می‌دهند. بدین‌ترتیب، جریان هوا قادر به جابه‌جایی آلاینده‌ها نیست. ازاین‌رو، مقادیر بالای آلاینده‌ها در نزدیکی سطح خیابان‌ها رخ می‌دهد. تحلیل شاخص موران محلی/انسلین نشان‌دهنده‌ی غلبه‌ی نقاط بالا-بالا در ارتفاعات پایین تا متوسط و افزایش نقاط پایین-پایین در ارتفاع‌های بالاتر است در حالی که در بخش‌های میانی خوشه‌بندی مشخصی وجود ندارد.

برای ایجاد خروجی نمایشی یک‌پارچه از شبیه‌سازی انجام شده، نتایج شبیه‌سازی در نُه سطح ارتفاعی (شکل ۹) در قالب لایه‌ای سه‌بعدی ساماندهی گردید (شکل ۱۱). سپس، آنالیز موران فراگیر و محلی برای لایه‌ی مذکور صورت گرفت.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.1.43 ]

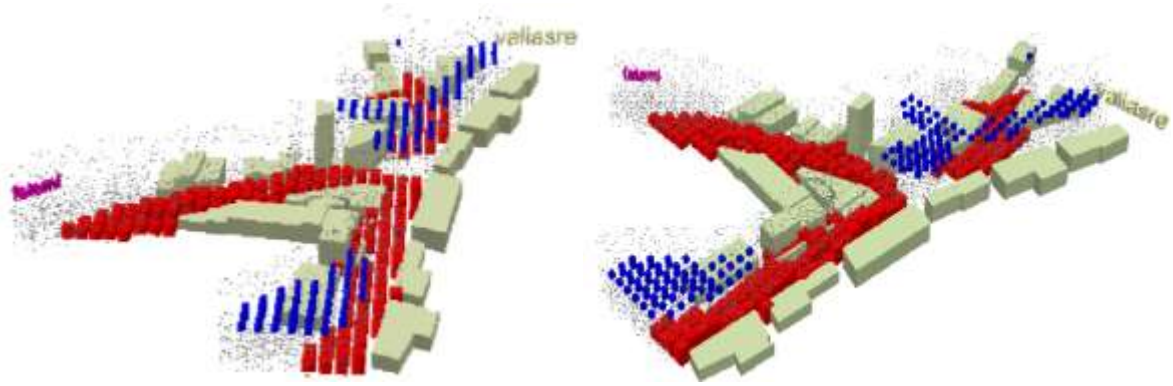
بدین‌منظور، ماتریس وزن با بازه‌ی مکانی ۲۰ متری و بازه‌ی زمانی ۲۰ ثانیه‌ای درنظر گرفته شد و سرعت پخش آلودگی یک متر بر ثانیه منظور گردید. میزان آماره‌ی موران فراگیر در این حالت معادل ۰/۲۲۹برآورد شد که برای نمایش سه‌بعدی پراکنش آلاینده‌ها مناسب است. تحلیل مقدار آماره‌ی موران محلی برای لایه‌ی سه‌بعدی یک‌پارچه نشان می‌دهد که نقاط با خوشه‌های بالا-بالا نسبت به خوشه‌های پایین-پایین پراکنش زمانی بالاتری دارند.




**شکل ۱۱: نمای سه‌بعدی از ساختمان‌های محدوده‌ی ترافیکی مورد مطالعه.**

با توجه به نقشه‌ی خروجی محدوده‌ی اصلی مقادیر غلظت بالا، آلاینده‌ی NOx محدود به خیابان ولی‌عصر، فاطمی و قسمت‌هایی از دوراهی یوسف آباد به سمت شمال است. دلیل اصلی استقرار خوشه‌های با مقادیر بالا در سطح این خیابان‌ها را می‌توان به حجم ترافیک بالا و جهت وزش باد در این منطقه اشاره کرد. همان‌طوری‌که در قسمت آنالیز داده‌های هواشناسی اشاره شد؛ جهات غالب وزش باد در منطقه‌ی مطالعه شمال شرق، جنوب غرب و شمالی است.

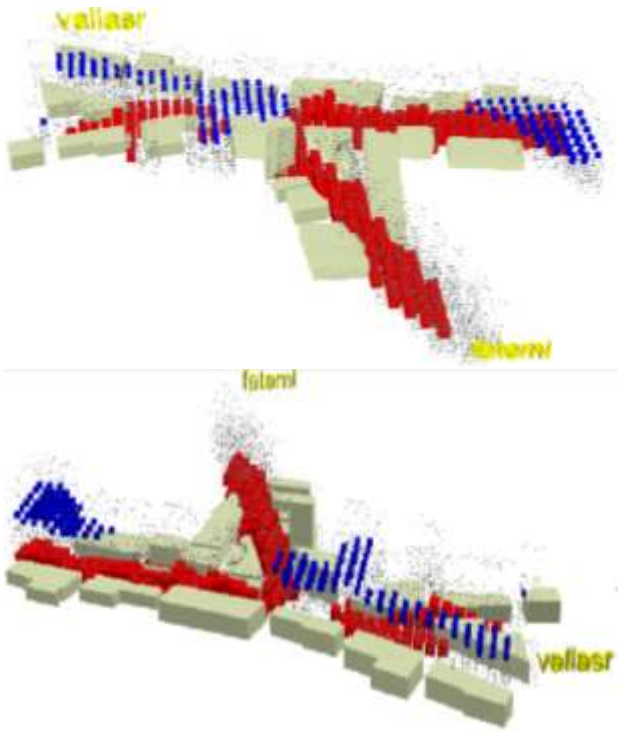
در مورد آلودگی هوای ناشی از ترافیک، سرعت جریان ترافیک و انتشار آلاینده‌ها شاخصی مهم در نحوه‌ی پراکنش آلاینده‌ها شناخته شده است. به‌طورکلی، مدیریت سرعت سبب کاهش آلاینده‌ها می‌شود. به‌همین‌علت، بسیاری از کشورها مثل انگلستان، اسپانیا، سوئد، پرتغال و هلند برای بهبود کیفیت هوا از طرح مدیریت سرعت بهره می‌برند (Kurakula, et al., ۲۰۰۸). شکل شماره‌ی ۱۲ نتایج شبیه‌سازی سه بعدی را از نماهای گوناگون نمایش می‌دهد.




ب الف

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.1.43 ]




ج د

ساختمان همبستگی بالا-بالا همبستگی پایین-پایین سایر همبستگی‌ها

**شکل ۱۲: شمایی سه‌بعدی از نحوه‌ی پراکنش غلظت آلاینده‌ی NOx در ارتفاعات مدل‌سازی شده از نماهای متفاوت.**

علاوه‌بر میانگین سرعت، یکی دیگر از دلایل تولید آلاینده‌ها افزایش و کاهش سرعت است، همان‌طورکه جریان ترافیک از نوع توقف ـ حرکت در مقایسه با جریان روان و یک‌نواخت ترافیک به‌مراتب دارای غلظت آلاینده‌ی بیشتری است. در نقشه‌ی سه‌بعدی آلودگی هوا، در قسمت ورودی خیابان‌های فاطمی و ولی‌عصر به دو راهی یوسف آباد، با توجه به حجم بالای ترافیک و سرعت پایین وسایل نقلیه به‌علت تعیین جهت گردش وسایل نقیله، غلظت آلاینده‌ها به‌مراتب بیشتر می‌شود و نتایج تحلیل موران نیز بیانگر همین مطلب است. خوشه‌بندی در این بخش از نوع بالا-بالا است و همبستگی فضایی معنادار را از خود نشان دادند. براین‌اساس، بخش‌هایی از محدوده‌ی مطالعه، که دارای ترافیک روان‌تر و پویاترند، بیشتر در خوشه‌های پایین-پایین قرار دارند. ترافیک‌های روان‌تر آلاینده‌های بیشتری منتشر می‌کنند؛ در صورتی که در جریان‌های ترافیک متراکم‌ترند، غلظت آلاینده‌ها در فواصل کمتری افزایش پیدا می‌کند.

## نتیجه گیری

نتایج نشان می‌دهد که سطوح غلظت آلاینده در اطراف خیابان‌های محدوده‌ی مطالعه به چند شاخص از قبیل هندسه‌ی خیابان، پهنای خیابان، حجم ترافیک عبوری و شرایط هواشناسی وابسته است. همچنین، پراکندگی آلاینده‌ها در این خیابان‌ها در کل به میزان تبادلات جریان عمودی جو در سطح پشت‌بامها با خیابان‌های فرعی بستگی دارد. براساس نتایج شبیه‌سازی، در طول خیابان‌ها به‌ویژه خیابان ولی‌عصر میزان متوسط غلظت مقدار بالاتری دارد. خیابان‌هایی که ترافیک

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.1.43 ]

بالاتری دارند میزان غلظت بالاتر است که با نزدیک‌شدن به حاشیه‌ی خیابان‌ها کاهش چشمگیری در میزان آن مشاهده می‌شود. دلیل این را می‌توان ساختمان‌های در حاشیه‌ی خیابان‌ها دانست که تحت تأثیر باد آلاینده‌ها می‌توانند نواحی پیرامون ساختمان را آلوده کنند و با برخورد جریان هوا با ساختمانی ناچار به‌بالارفتن از ساختمان شوند و در جهت باد پناه جمع گردند. وقتی توده‌هوا در پشت ساختمان محبوس می‌شود، غلظت آلاینده‌ها افزایش پیدا می‌کند. ارتفاع ساختمان‌ها در میزان آشفتگی توده‌هوایی که در پشت ساختمان جمع می‌شود اثر به‌سزایی دارد. نیروی اصطکاک یا ناهمواری‌های سطح زمین اصولاً عامل بازدارنده‌ی باد هستند. این ناهمواری‌ها هم سرعت باد را کاهش می‌دهند و هم جهت آن را عوض می‌کنند. وقتی باد در مسیر حرکت خود در خیابان‌ها با ساختمان‌های مجاور به دام می‌افتد، براثر برخورد با ساختمان‌ها سرعت آن کاهش پیدا می‌کند و از ساختمان بالا می‌رود و در بالا جهت آن تغییر می‌کند. در ارتفاع‌های پایین (کمتر از ارتفاعات ساختمان‌ها) میزان غلظت آلاینده افزایش پیدا می‌کند و میزان آلودگی محدود به همان سطح خیابان‌ها می‌شود و ساختمان‌ها نقش مانعی را در پراکنش آلاینده‌ها ایفا می‌کند.

در بالای این ارتفاع افزایش سرعت ادامه می‌یابد که تغییر در سرعت باد با ارتفاع به عوارض زمین و زمان بستگی دارد. هرچه سرعت باد بیشتر باشد، قدرت پخش و ترقیق آلودگی در هوا بیشتر است. در ارتفاع‌های بالا به همان نسبت که غلظت آلودگی کاهش پیدا می‌کند، شعاعی که آلودگی پخش می‌شود نیز بیشتر می‌شود. سرعت باد با افزایش ارتفاع تا حدود دَه متری خیلی سریع افزایش می‌یابد. نتایج بیانگر آن است که در سطوح پایینی سطح زمین، غلبه با خوشه‌های با میزان آلودگی بالاست و با افزایش ارتفاع از سطح زمین خوشه‌های با میزان آلودگی پایین افزایش پیدا می‌کند.

نتایج تحلیل داده‌های هواشناسی با مدل GRAL نشان داد که میزان آلودگی هوا در این تقاطع بیشتر تحت تأثیر الگوی باد است و از جهت و سرعت آن تبعیت می‌کند. با توجه به این‌که جهت غالب وزش باد در این منطقه شمال شرق است، پهنه‌های با میزان آلودگی بالا بیشتر در جنوب و غرب این خیابان‌ها مشاهده می‌شود. در مواردی نیز سرعت باد به اندازه‌ای نیست که آلاینده‌ها را جابه‌جا و از شهر خارج کند. به‌عبارتی، باد وجود داشت، ولی سرعت آن برای جابه‌جایی آلاینده‌ها کافی نبود. در سطوح پایین، نحوه‌ی پخش و پراکنش آلاینده‌ها بیشتر تحت تأثیر موانع اطراف و حجم ترافیک خیابان‌هاست و ساختمان‌ها به‌صورت مانعی در برابر پراکنش آلاینده‌ها عمل می‌کنند. از طرفی، سرعت باد به‌علت تأثیر ناهمواری‌ها کمتر است. با افزایش ارتفاع سرعت باد هم افزایش پیدا می‌کند و سبب پراکنش آلاینده‌ها در شعاع بیشتری می‌شود. در ایستگاه فاطمی، با بررسی داده‌های ثبت‌شده درباره‌ی سرعت و جهت باد در ایستگاه سنجش آلودگی هوا هیچ بادی بالاتر از سرعت آستانه اتفاق نیفتاده است تا بتواند آلودگی را رفع کند. فقدان باد با سرعت‌های بالاتر از آستانه سبب افزایش تراکم آلودگی در داخل شهر شده است.

تقاطع‌ها نقش بسیار مهمی در شبکه‌ی ارتباطی دارند. اگر تقاطع‌ها به نحوی تنظیم نشده باشند که بتوانند حجم ترافیک محورهای متقاطع را با سرعت مقبولی جابه‌جا کنند، سبب کندی جریان ترافیک و تأخیر می‌شوند. هرچه جریان ترافیک کندتر باشد، سبب افزایش غلظت آلاینده‌ها می‌شود و از طرف دیگر ترافیک‌های روان‌تر آلاینده‌ها را بیشتر پخش می‌کنند.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.1.43 ]

## منابع

دهنوی، محسن؛ غلامرضا شیران و ناصر پورمعلم. ۱۳۸۳. تخمین آلودگی هوا ناشی از جریان‌های ترافیکی در خیابان‌های شهری، *اولین کنگره‌ی ملی مهندسی عمران*، دانشگاه صنعتی شریف، تهران.

شعبانی، افشین؛ مهسا شاه‌بختی و رحیم‌علی عباسپور. ۱۳۹۰. مدل‌سازی توزیع آلاینده‌های جوی در کلان‌شهر تهران با استفاده از روش‌های آماری و زمین آماری، *همایش ملی ژئوماتیک*، تهران.

شمسی‌پور، علی‌اکبر؛ فهیمه نجیب‌زاده و زینب حسین پور. ۱۳۹۱. شبیه‌سازی الگوی پراکنش آلودگی هوا در شرایط وزش باد، *جغرافیا و مخاطرات محیطی*،**۴**: ۱۹-۳۶.

صفوی،یحیی؛ بهلول علیجانی. ۱۳۸۵. بررسی عوامل جغرافیایی درآلودگی هوای تهران، *پژوهش‌های جغرافیایی*، **۵۸**: ۹۹-۱۱۲.

عتابی، فریده؛ مجید عباسپور؛ عبدالرضا کرباسی و سید علیرضا حاجی سید میرزاحسینی. ۱۳۸۶. مدل‌سازی انتشار ذرات معلق با به‌کارگیری مدل ADMS-Urban، مجله‌ی *علوم و تکنولوژی محیط زیست*، **۹(۱)**: ۱-۱۶.

قنبری، حسینعلی؛ قاسم عزیزی. ۱۳۸۸. شبیه‌سازی عددی رفتار آلودگی هوای تهران براساس الگوی باد، *پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی*، **۶۸**: ۱۵-۳۲.

محمدی، اکبر؛ مهدی قرخلونره. ۱۳۹۲. به‌کارگیری مدل آماری LUR در مدل‌سازی فضایی آلاینده‌ی $NO_۲$ در شهر تهران، دانشگاه صنعتی شریف، *دومین همایش ملی مدیریت آلودگی هوا و صدا*، تهران.

Akbary, M.; Farahbakhshi, M. ۲۰۱۵. Analyzing and Tracing of DustHazard in Recent Years in Kermanshah Province. International Journal of Environmental Research (IJER), **۹**: **(۲)**: ۶۷۳-۶۸۲.

Anselin, L. ۱۹۹۵. Local Indicators of Spatial Association-LISA. Journal of Geographical Analysis, **۲۷**: ۹۳-۱۱۵.

Atash, F. ۲۰۰۷. The deterioration of urban environments in developing countries: Mitigating the air pollution crisis in Tehran, Iran. Journal of Cities, **۲۴(۶)**: ۳۹۹–۴۰۹.

Beevers, S. D.; Kitwiroon, N., Williams, M. L., Carslaw, D. C. ۲۰۱۲. One way coupling of CMAQ and a road source dispersion model for fine scale air pollution predictions. Atmospheric Environment, **۵۹**: ۴۷–۵۸.

Chen, L.; Wang, Y, Li, P, Ji, Y, Kong, S, Li, Z. ۲۰۱۲. A land use regression model incorporating data on industrial point source pollution. Journal of Environmental Sciences, **۲۴(۷)**: ۱۲۵۱–۱۲۵۸.

GoogleMaps. ۲۰۱۵. Fatemi-Valiasr Junction (۳۵□۴۳'۱۶.۱۰"N, ۵۱□۲۴'۳۰.۵۶"E), ftom https://www.google.com/maps/@۳۵.۷۲۱۲۲۶,۵۱.۴۰۷۷۶۷۸,۳۲۳m/data=!۳m۱!۱e۳?hl=en.

Keuken, M. P, Jonkers, S, Wilmink, I. R, Wesseling, J. ۲۰۱۰. Reduced NOx and PM۱۰ emissions on urban motorways in The Netherlands by ۸۰ km/h speed management. Science of the Total Environment, **۴۰۸**: ۲۵۱۷–۲۵۲۶.

Kurakula, V. K., Kuffer, M. (۲۰۰۸). ۳D Noise Modeling for Urban Environmental Planning and Management. REAL CORP, **۴۳۲**(۱): ۵۱۷-۵۲۳.

Morabia, A., Amstislavski, P. N., Mirer, F. E., Amstislavski, T. M., Eisl, H., Wolff, M. S. ۲۰۰۹. Air Pollution and Activity During Transportation by Car, Subway, and Walking. American Journal of Preventive Medicine, **۳۷**(۱): ۷۲-۷۷.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.1.43 ]

Oettl, D. ۲۰۱۵. A multiscale modelling methodology applicable forregulatory and buildings on pollutant dispersion: a case study for an inner Alpine basin. Environ Sci Pollut Res, DOI ۱۰.۱۰۰۷/s۱۱۳۵۶-۰۱۵-۴۹۶۶-۹.

Oettl, D.; Kukkonen, J., Almbauer, R. A., Sturm, P. J., Pohjola, M., HaKrkoKnen, J. ۲۰۰۱. Evaluation of a Gaussian and a Lagrangian model against a roadside dataset, with focus on low wind speed conditions. Atmospheric Environment, **۳۵**: ۲۱۲۳-۲۱۳۲.

Panis, L. L. I., Beckx, C., Broekx, S., Vlieger, I. D., Schrooten, L., Degraeuwe, B. ۲۰۱۱. PM, NOx and CO۲ emission reductionsfromspeedmanagement policies inEurope. Transport Policy, *۱۸*(**۱**), ۳۲-۳۷.

Semmelrock, G. ۲۰۱۳. Documentation of the Lagrangian Particle Model GRAL (Graz Lagrangian Model).

Vardoulakis, S.; Fisher, B. E. A., Pericleous, K., Gonzalez-Flesca, N. ۲۰۰۳. Modeling air quality in street canyons: a review. Atmospheric Environment, **۳۷**(**۲**): ۱۵۵-۱۸۲.

Turner, D.B. ۱۹۹۴. Workbook of atmospheric dispersion estimates: an introduction to dispersion modeling.

U.S. Environmental Protection Agency, E. ۲۰۰۲. Example Application of Modeling Toxic Air Pollutants in Urban Areas (No. EPA-۴۵۴/R-۰۲-۰۰۳).

Villalvazo, L., Davila, E., Reed, G. ۲۰۱۲. Guidance for Air Dispersion Modeling: San Joaquin Valley Air Pollution Control District.

Wang, G.; van den Bosch, F. H. M, Kuffer, M. ۲۰۰۸. Modelling urban traffic air pollution dispersion. Paper presented at the The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.1.43 ]