

## تحلیل رابطه آلودگی هوای تهران با ترافیک و شرایط جو برای کاهش مخاطرات



سعید بازگیر\*

استادیار، گروه جغرافیای طبیعی دانشکده جغرافیا دانشگاه تهران

مجتبی قدیری معصوم (mghadiri@ut.ac.ir)

استاد، گروه جغرافیای انسانی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

علی اکبر شمسی پور (shamsipr@ut.ac.ir)

استادیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

شیوا سیدی سرنجیانه (shiwa.sayedi@gmail.com)

کارشناس ارشد، مخاطرات محیطی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱/۲۶ - پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۲/۳۰)

### چکیده

آلودگی هوا از مهم‌ترین مخاطرات زیست‌محیطی کلانشهرهاست که شناخت عوامل مؤثر بر آن کمک شایانی به کاهش آثار آن خواهد کرد. حل این مشکل نیازمند مطالعات دقیق در زمینه شناسایی متغیرهای مؤثر بر آلاینده‌هاست. هدف این پژوهش بررسی تغییرات شاخص کیفیت هوا در ارتباط با شرایط جوی و ترافیک در شهر تهران طی ۶۰ روز (۱۵ آبان تا ۱۵ دی، معادل ۶ نوامبر تا ۵ ژانویه) برای هر یک از سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۱ بوده است. به منظور محاسبه همبستگی و تحلیل رگرسیون بین شاخص‌های کیفیت هوا (میانگین و بیشینه) با متغیرهای ترافیک و هواشناسی از ضریب همبستگی پیرسون و تحلیل رگرسیون استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که شاخص ناپایداری جو (شاخص  $k_1$ ) بیشترین تأثیر را بر تغییرات آلودگی هوا داشته است. در خصوص تخمین شاخص کیفیت هوا، مدل‌های رگرسیون ساده و چندگانه خطی در سال ۱۳۹۰، دقیق‌ترین مدل در تخمین بیشینه شاخص کیفیت هوا و دارای کمترین انحراف نسبی بوده است (انحراف نسبی ۰/۰۵- در مدل اول و ۰/۱- در مدل دوم). دستاورد شایان توجه در این تحقیق همبستگی غیر مستقیم بین تعداد خودرو و شاخص کیفیت هواست که بر خلاف انتظار است. به نظر می‌رسد تولید آلاینده‌ها در دو حالت حرکت و توقف خودروها، دو مقوله کاملاً متفاوت است که باید با دیگر روش‌های علمی بررسی شود.

**واژه‌های کلیدی:** ترافیک، تهران، شرایط جو، مخاطره آلودگی هوا.

## مقدمه

آلودگی هوا از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی کلانشهرهاست که با توجه به آثار زیانبار آن، شناخت عوامل مؤثر بر آن می‌تواند در کاهش آثار آن مؤثر باشد [۷،۱۷،۲۳]. در ماه‌های سرد سال به دلیل تابش شبانه زمینی، هوای سرد مجاور زمین در زیر هوای گرم‌تر سطوح بالاتر قرار می‌گیرد و سبب ایجاد یک لایه وارونه می‌شود که از جابه‌جایی هوا جلوگیری می‌کند. پدیده مذکور، وارونگی دمای هوا نامیده می‌شود. به همین دلیل طی ماه‌های آذر تا بهمن، آلودگی هوا از دیگر ماه‌ها بیشتر است [۲۰،۴].

تراکم زیاد خودروها، ساختمان‌های بلند، و هوای آرام و بدون باد، سبب افزایش غلظت آلاینده‌های هوا در حد خطرناک شده و آلودگی هوا را به یکی از اساسی‌ترین معضلات زیست‌محیطی تهران تبدیل کرده است [۳].

از جمله تحقیقات در خصوص آلودگی هوا و ارتباط آن با ترافیک، می‌توان به تحقیقی در لس‌آنجلس آمریکا اشاره کرد که اثر ذرات معلق بر سلامت را بررسی کرده است [۲۸]. از نتایج این تحقیق می‌توان به تأثیر متغیرهای هواشناسی بر نوسانات غلظت ذرات با قطر کمتر از  $0/1$  میکرون اشاره کرد. از نتایج این تحقیق می‌توان به اثر افزایش سرعت باد در کاهش غلظت ذرات و کاهش دما یا افزایش رطوبت نسبی در افزایش غلظت آلاینده‌ها اشاره کرد. طی مطالعه دیگری در چهار منطقه مختلف در اسلو نروژ، رابطه بین آلودگی هوا و شرایط جوی و همچنین وضعیت ترافیک بررسی شد [۲۱]. از نتایج این تحقیق می‌توان به افزایش غلظت ذرات معلق با قطر کمتر از  $10$  و  $2/5$  میکرون با کاهش دما در دماهای زیر صفر درجه سلسیوس اشاره کرد. همچنین اثر کاهشی وزش باد و اثر افزایش رطوبت نسبی بر آلاینده‌ها از دیگر نتایج این تحقیق بوده است. همچنین در مطالعه دیگری، آلودگی هوای ناشی از ترافیک در دو خیابان پاریس و تأثیر آنها در فصول زمستان و تابستان بررسی شد [۲۶]. از نتایج تحقیق ایشان می‌توان به این نکته اشاره کرد که ترکیبی از پایش ترافیک به‌همراه استفاده از مدلسازی آلاینده‌های مؤثر در کیفیت هوا می‌تواند کمک مؤثرتری به مدیریت شهری در زمینه آلودگی باشد.

در ایران در زمینه آلودگی هوا نیز تحقیقاتی انجام گرفته که از جمله آنها تحقیقی درباره تخمین آلودگی هوای ناشی از جریان‌های ترافیکی در خیابان‌های شهری تهران است [۱۶]. در این تحقیق عوامل اثرگذار بر غلظت آلاینده‌ها بر پایه آمار ترافیکی و جوی در هشت ایستگاه در شهر تهران مشخص شد و در نهایت براساس روش‌های موجود مدلسازی صورت گرفت. نتایج پیش‌بینی مدل‌های به‌دست‌آمده به‌خوبی با داده‌های مشاهده‌شده تطابق نشان دادند. در تحقیق

دیگری، تغییرات مکانی و زمانی آلودگی‌های مربوط به مونواکسیدکربن و ذرات معلق با قطر کمتر از ۱۰ میکرون با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی در شهر تهران تعیین شد [۱۹]. مقدار آلاینده‌های هوا در شهر سبزواری نیز طی تحقیقی بررسی شد [۱]. در این تحقیق دیده شد که غلظت مونواکسید کربن در همه ماه‌ها و غلظت دی‌اکسید گوگرد در برخی ماه‌ها از حد استاندارد فراتر بود، ولی غلظت دی‌اکسید نیتروژن در هیچ ماهی فراتر از حد استاندارد نبود. اشرافی و همکاران امکان پیش‌بینی روزانه غلظت مونواکسیدکربن در شهر تهران را با استفاده از مدل تلفیقی عصبی-فازی براساس تحلیل پایداری جو، بررسی کردند [۳]. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل توسعه داده شده براساس گرادپان باد و دما می‌تواند با دقت بیشتری در پیش‌بینی غلظت روزانه مونواکسیدکربن به کار گرفته شود. شمسی‌پور و امینی نیز به شبیه‌سازی الگوی پراکنش مونواکسید کربن با مدل خرداقلیمی Envi-Met در مسیر آزادی - تهرانپارس پرداختند [۱۴]. نتایج، گویای بیشترین تمرکز آلودگی در بخش‌هایی با تراکم بافت شهری مانند چهارراه ولیعصر و ضلع شرقی میدان آزادی به‌ویژه در ساعت‌های آغازین روز، و کمترین مقادیر در معبرهای باز مانند ضلع غربی میدان آزادی، ضلع جنوبی سه‌راه تهرانپارس، فضاهای سبز و نواحی دور از کانون انتشارات به‌خصوص در ساعات میانی روز بود.

هدف پژوهش حاضر بررسی تغییرات شاخص کیفیت هوا در ارتباط با شرایط جوی و ترافیک در شهر تهران طی ۶۰ روز از سال (۱۵ آبان تا ۱۵ دی، معادل ۶ نوامبر تا ۵ ژانویه) برای هر یک از سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۱ بوده است. نکته شایان ذکر در این مطالعه محدودیت دریافت داده‌های ترافیکی از شرکت کنترل ترافیک شهرداری تهران بود که دیگر بخش‌های تحقیق را تحت تأثیر قرار داد، به‌طوری که تحلیل روابط همبستگی و علی و معلولی (رگرسیون) تنها برای سال‌های ۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱ طی روزهای ۱۵ آبان تا ۱۵ دی در هر سال و برای برخی از تقاطع‌های تهران انجام گرفت. همچنین اگر وضع هوا و به‌خصوص شرایط ناپایداری جو در روزهای آتی با پیش‌بینی دقیق‌تری صورت گیرد، می‌توان با توصیه‌ها و هشدارهای به‌موقع از تردد غیرضروری گروه‌های حساس به آلاینده‌های هوا در خیابان‌ها جلوگیری کرد و خسارت‌های جانی و مالی ناشی از بیماری‌های تنفسی و قلبی را کاهش داد. با توجه به محدودیت اخذ داده از شرکت کنترل ترافیک شهرداری تهران، تنها در برخی از تقاطع‌ها و آن هم برای دو ماه از سال (۱۵ آبان تا ۱۵ دی) طی سال‌های ۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱ داده در اختیار قرار گرفت و به‌همین دلیل سایر داده‌ها شامل آلاینده‌ها و عناصر هواشناسی نیز در همین محدوده زمانی در

تحلیل‌های آماری بررسی شد. بنابراین محدوده مورد مطالعه شامل برخی تقاطع‌های موجود در مناطق ۲، ۵، ۹ و ۱۸ در شهر تهران بوده است.

### روش تحقیق

#### محاسبه روابط همبستگی و علی و معلولی (رگرسیون) متغیرها

در این مطالعه به منظور محاسبه همبستگی بین شاخص‌های کیفیت هوا با متغیرهای ترافیک و هواشناسی مربوط به سطح زمین شامل بارش، سرعت باد، کمینه و بیشینه دمای هوا، بیشینه سرعت باد و همچنین داده‌های جو بالا (شاخص -  $k_i$ ) از ضریب همبستگی پیرسون<sup>۱</sup> استفاده شده است (رابطه ۱). برای یافتن روابط علی و معلولی بین متغیرهای مختلف با شاخص کیفیت هوا نیز از تحلیل رگرسیون ساده و چندگانه خطی استفاده شده است. در مدل‌های آماری رگرسیونی، شاخص کیفیت هوا به عنوان متغیر وابسته ( $Y$ )؛ و سایر متغیرها (تعداد خودرو، بارش، دمای هوا، سرعت باد و شاخص -  $k_i$ ) به عنوان متغیر مستقل ( $X$ ) استفاده شدند [۸]. بررسی نرمال بودن داده‌ها با آزمون ناپارامتری کولموگروف-اسمیرنوف<sup>۲</sup> انجام گرفت که بر این اساس کلیه داده‌ها دارای توزیع نرمال بود و همچنین آماره داربین-واتسون<sup>۳</sup> نیز بر استقلال باقی مانده داده‌ها از یکدیگر دلالت داشت [۶،۲۷].

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

در این رابطه

$X, Y, \bar{X}, \bar{Y}$  به ترتیب شاخص کیفیت هوا و متغیرهای دیگر (تعداد خودرو، دمای هوا و ...) و میانگین‌های آنهاست.

#### اعتبارسنجی<sup>۴</sup> مدل‌های آماری تخمین آلاینده‌های هوا

به منظور برآورد دقت معادلات آماری تخمین آلاینده‌های هوا، مقدار انحراف نسبی<sup>۵</sup> آنها از رابطه ۲ محاسبه شد. هر چه این مقدار به عدد صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده خطای کمتر مدل آماری در برآورد متغیر وابسته است [۲۲].

1. Pearson Correlation Coefficient
2. Kolmogorov-Smirnov test
3. Darbin-Watson statistic
4. Model Validation
5. Relative Deviation, RD

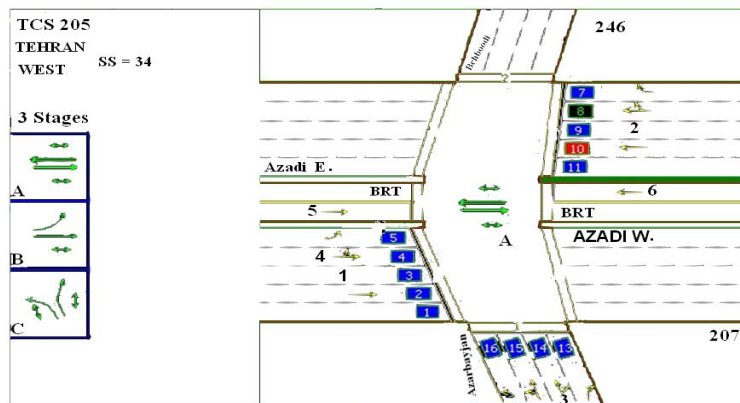
$$RD = \frac{(Y_e - Y_a)}{Y_a} \times 100 \quad (2)$$

در این معادله  $Y_e$  و  $Y_a$  به ترتیب مقادیر تخمینی و واقعی شاخص کیفیت هوا و RD بر حسب درصدند.

### داده‌های تحقیق

#### داده‌های ترافیک (تعداد خودرو)

داده‌های تعداد خودروهای عبوری در هر ۱۵ دقیقه طی شبانه‌روز از تقاطع‌های تحت مطالعه از شرکت کنترل ترافیک شهرداری تهران دریافت شد. به دلیل محدودیت در تهیه داده‌های یادشده، چهارراه‌های تحت مطالعه شامل مسیرهای آزادی-بهبودی، عدل-میرزایی، قزوین-شمشیری، کارگر-گردآفرید، گل‌ها-لاله و هنگام-فرجام بودند. سامانه‌های هوشمند حمل‌ونقل<sup>۱</sup> مجموعه‌های دستاوردهای فناوری اطلاعات در حمل‌ونقل‌اند که آمارگیری خودکار از پارامترهای ترافیکی و مواردی از این قبیل، متعلق به این مجموعه محسوب می‌شوند [۲، ۱۸]. در حال حاضر در تهران دوربین‌هایی به صورت لحظه‌ای تعداد خودروها را بدون تفکیک نوع آن در تقاطع‌های خیابان‌ها شمارش می‌کنند. دوربین‌های مذکور در هر چهارراه نصب شده‌اند. شکل ۱ موقعیت دوربین‌های نصب‌شده در مسیر عبور خودروها در تقاطع آزادی-بهبودی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. محل نصب دوربین‌های ثبت تعداد خودروها (نمونه، چهارراه آزادی-بهبودی)

### داده‌های آلودگی هوا

دسته دوم از داده‌های مورد استفاده، آمار آلاینده‌های هوای شهر تهران شامل مونواکسید کربن، دی‌اکسید گوگرد، دی‌اکسید نیتروژن، ازن سطح زمین و ذرات معلق هوا (۱۰ و ۲/۵ میکرون) بود که از ۲۱ ایستگاه متعلق به شرکت کنترل کیفیت هوای شهرداری تهران با مقیاس زمانی ساعتی تهیه شد. از بین ایستگاه‌های سنجش آلاینده‌های هوا، ایستگاه‌های واقع در میدان فتح، پونک، شادآباد و دانشگاه صنعتی شریف که نزدیک‌ترین ایستگاه‌ها به چهارراه‌های تحت مطالعه بودند انتخاب و بر این اساس شاخص کیفیت هوا در این ایستگاه‌ها محاسبه شد. مطالعات زیادی در معرفی شاخص‌های کیفیت هوا انجام گرفته که در این تحقیق از شاخص کیفیت هوا<sup>۱</sup> استفاده شده است. شاخص کیفیت هوا توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا معرفی شد که برای پنج آلاینده شامل ازن سطح زمین، ذرات معلق هوا (۱۰ و ۲/۵ میکرون) مونواکسید کربن، دی‌اکسید گوگرد و دی‌اکسید نیتروژن به کمک رابطه ۳ محاسبه می‌شود. جدول ۱، طبقات شاخص کیفیت هوا به همراه نقاط شکست هر یک از آلاینده‌های مورد نظر را نشان می‌دهد [۱۳،۹].

$$I_p = \frac{I_{Hi} - I_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}}(C_p - BP_{Lo}) + I_{Lo} \quad (3)$$

در این رابطه:  $I_p$  شاخص کیفیت هوا برای آلاینده  $p$ ؛  $C_p$  غلظت اندازه‌گیری شده برای آلاینده  $p$ ؛  $BP_{Hi}$  نقطه شکستی که بزرگ‌تر یا مساوی  $C_p$  (جدول ۱) است؛  $BP_{Lo}$  نقطه شکستی که کوچک‌تر یا مساوی  $C_p$  (جدول ۱) است؛  $I_{Hi}$  مقدار AQI منطبق بر  $BP_{Hi}$  (جدول ۱)؛ و  $I_{Lo}$  مقدار AQI منطبق بر  $BP_{Lo}$  (جدول ۱) است.

پس از تحلیل داده‌های اندازه‌گیری شده آلاینده‌های مذکور، دو متغیر میانگین شاخص کیفیت هوا<sup>۲</sup> و بیشینه شاخص کیفیت هوا<sup>۳</sup> استخراج و به‌عنوان متغیرهای وابسته در تحلیل‌های آماری شرکت داده شدند.

### داده‌های هواشناسی

داده‌های هواشناسی مربوط به سطح زمین شامل بارش، سرعت باد، دماهای کمینه، بیشینه و بیشینه سرعت باد دیدبانی شده از ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی سازمان هواشناسی کشور شامل مهرآباد، اقدسیه و مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و همچنین داده‌های جو بالای ایستگاه مهرآباد تهیه شد [۱۰]. از داده‌های جو بالا برای محاسبه شاخص  $k_i$  به‌عنوان نمایه ناپایداری شرایط جوی استفاده است.

1. Air Quality Index, AQI
2. AQI Average, AQIAvg
3. AQI Maximum, AQIMax

جدول ۱. طبقات شاخص کیفیت هوا به همراه نقاط شکست هر یک از آلاینده‌ها [۹]

نقاط شکست									
O <sub>3</sub> (ppm)	O <sub>3</sub> (ppm)	PM <sub>2.5</sub> (ug/m)	CO(ppm)	SO <sub>2</sub> (ppm)	NO <sub>2</sub> (ppm)	AQI	طبقه‌بندی کیفیت هوا		
۸ ساعته	۸ ساعته	۲۴ ساعته	۸ ساعته	۲۴ ساعته	یک ساعته				
۰-۰/۵۶۰	-	۰-۱۵/۴	۰-۴/۴	۰-۰/۰۲۴	۰-۰/۰۵۳	۰-۵۰	خوب		
۰/۰۶۰-۰/۰۷۵	-	۱۵/۵-۲۵/۰	۴/۵-۹/۴	۰/۳۵-۰/۱۴۴	۰/۵۴-۰/۰۱	۵۰-۱۰۰	متوسط		
۰/۰۷۶-۰/۰۹۵	۰/۱۲۵-۰/۱۶۴	۲۵/۱-۶۵/۴	۹/۵-۱۲/۴	۰/۱۴۵-۰/۲۲۴	۰/۱۰۰-۰/۳۶	۱۰۱-۱۵۰	ناسالم برای گروه‌های حساس		
۰/۰۹۶-۰/۱۱۵	۰/۱۶۵-۰/۲۰۴	۶۵/۵-۱۵۰/۴	۱۲/۵-۱۵/۴	۰/۲۲۵-۰/۳۰۴	۰/۳۶۱-۰/۶۴	۱۵۱-۲۰۰	ناسالم		
۰/۱۱۶-۰/۳۷۴	۰/۲۰۵-۰/۴۰۴	۱۵۰/۵-۲۵۰/۴	۱۵/۵-۳۰/۴	۰/۳۰۵-۰/۶۰۴	۰/۶۵۰-۰/۱۲۴	۲۰۱-۳۰۰	خیلی ناسالم		
(۱)	۰/۴۰۵-۰/۵۰۴	۲۵۰/۵-۳۵۰/۴	۳۰/۵-۴۰/۴	۰/۶۰۵-۰/۸۰۴	۱/۲۵-۱/۶۴	۳۰۱-۴۰۰	خطرناک		
	۰/۵۰۵-۰/۶۰۴	۳۵۰/۵-۵۰۰/۴	۴۰/۵-۵۰/۴	۰/۸۰۵-۱/۰۰۴	۱/۶۵-۲/۰۴	۴۰۱-۵۰۰			

وقتی غلظت ازن هشت‌ساعته از ۳۷۴ ppm فراتر رود، مقدار AQI ۱ تا ۳۰۱ یا بالاتر باید با استفاده از غلظت ازن یک‌ساعته محاسبه شود.

توفان‌های تندری ممکن است در کمتر از بیست دقیقه شکل بگیرند و آثار مخربی داشته باشند. این گونه توفان‌ها ممکن است با تگرگ، باران‌های سنگین، آذرخش‌های مرگبار، بادهای توفندهای مخرب همراه باشند [۲۰]. با بررسی جو در مدت زمان شکل‌گیری توفان‌های تندری، پارامترهایی محاسبه می‌شوند که شرایط تشکیل توفان و همچنین چگونگی ناپایداری جو یا احتمال همرفت هوا را نشان می‌دهند. از شاخص‌های پرکاربرد در این زمینه می‌توان به شاخص  $k_i$  اشاره کرد که در آن از دما و دمای نقطه شبنم در سه تراز فشاری ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ میلی‌باری استفاده می‌شود. توسط این نمایه امکان رخداد توفان تندری بر پایه آهنگ کاهش دما، محتوای رطوبتی جو پایین و گسترش قائم لایه مرطوب محاسبه می‌شود. در محاسبه این شاخص مقادیر بالای دمای نقطه شبنم نشان‌دهنده وجود رطوبت در تراز پایین و افزایش رخداد پدیده همرفت است [۵،۲۵]. مقدار شاخص  $K_i$  با استفاده از رابطه ۴ به دست می‌آید.

$$K_i = (T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T_{700} - T_{d700}) \quad (۴)$$

در این رابطه:  $T_{850}$ ،  $T_{700}$  و  $T_{500}$  دما به ترتیب در ترازهای ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ میلی‌بار و  $T_{d850}$  و  $T_{d700}$  دمای نقطه شبنم به ترتیب در ترازهای ۸۵۰ و ۷۰۰ میلی‌بار بر حسب درجه سلسیوس‌اند. هرچه این شاخص بزرگ‌تر باشد شدت ناپایداری بیشتر است [۱۵].

### بحث و نتایج

جدول ۲ ضرایب همبستگی بین میانگین شاخص کیفیت هوا با سایر متغیرها را نشان می‌دهد. در سال ۱۳۸۹ بیشترین همبستگی بین شاخص مذکور با دمای کمینه به دست آمده (۰/۴۰۶) و سایر متغیرها رابطه معناداری با این شاخص نداشتند. در سال ۱۳۹۰،  $AQI_{Avg}$  با متغیرهای بارش و تعداد خودرو و شاخص  $k_i$  رابطه معناداری داشتند که این روابط در خصوص هر سه متغیر معکوس است. جهت عکس تغییرات میانگین شاخص کیفیت هوا با بارش و شاخص  $k_i$  توجیه‌پذیر بود، چراکه با وجود بارندگی و ناپایداری هوا، از مقدار آلاینده‌های هوا کاسته می‌شود. در سال ۱۳۹۱ میانگین شاخص کیفیت هوا تنها با بارش و شاخص  $k_i$  همبستگی معنادار داشت که جهت تغییرات آنها غیرمستقیم بوده است.



جدول ۲. ضرایب همبستگی به همراه سطح معناداری متغیرهای مختلف با میانگین شاخص کیفیت هوا

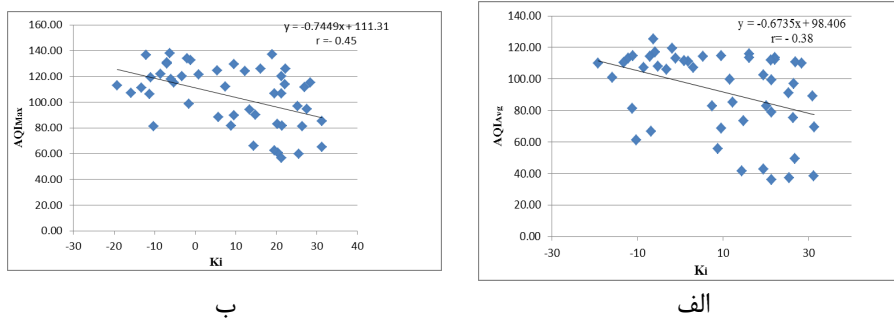
سال	متغیر	بارش (mm)	باد میانگین سرعت (m/s)	باد بیشینه سرعت (m/s)	دمای کمینه (°C)	دمای متوسط (°C)	دمای بیشینه (°C)	شاخص $k_i$	تعداد خودرو
۸۹		<sup>ns</sup> ۰	<sup>ns</sup> ۰/۱۳۹	<sup>ns</sup> ۰/۳۴۳	<sup>**</sup> ۰/۴۰۶	<sup>ns</sup> ۰/۳۴۱	<sup>ns</sup> ۰/۲۷۴	<sup>ns</sup> ۰/۲۶۳	<sup>ns</sup> ۰/۲۶۳
۹۰		<sup>*</sup> ۰/۳۲۸	<sup>ns</sup> ۰/۲۲۵	<sup>ns</sup> ۰/۱۱۹	<sup>ns</sup> ۰/۰۸۷	<sup>ns</sup> ۰/۰۳۴	<sup>ns</sup> ۰/۱۴۹	<sup>**</sup> ۰/۳۸۹	<sup>*</sup> ۰/۳۶۱
۹۱		<sup>**</sup> ۰/۳۶۹	<sup>ns</sup> ۰/۲۴۹	<sup>ns</sup> ۰/۰۹۱	<sup>ns</sup> ۰/۰۴۲	<sup>ns</sup> ۰/۱۳۹	<sup>ns</sup> ۰/۲۷۵	<sup>*</sup> ۰/۳۲۱	<sup>ns</sup> ۰/۰۳۵

\* معنادار در سطح ۵ درصد، \*\* معنادار در سطح ۱ درصد، ns: Non-significant (بی معنا)

در خصوص ضرایب همبستگی بیشینه شاخص کیفیت هوا با سایر متغیرها در سال ۱۳۸۹ هیچ کدام از متغیرها با بیشینه شاخص کیفیت هوا همبستگی معناداری نداشت، در حالی که در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱ بیشترین همبستگی به ترتیب با تعداد خودرو (۰/۵۱۵-) و شاخص  $k_i$  (۰/۴۵۹-) و همچنین با بارش (۰/۴۴۳-) وجود داشت که در هر سه مورد در سطح ۱ درصد معنادار بوده است. نکته شایان توجه، همبستگی منفی تعداد خودرو و بیشینه شاخص کیفیت هوا (۰/۵۱۵-) است که این حالت در خصوص میانگین شاخص کیفیت هوا نیز رخ داده است (۰/۳۶۱-)، به نظر می‌رسد که تعداد خودرو و عبور آنها در مسیر قرارگیری دوربین‌ها در حالت توقف و روان بودن دو مقوله جداگانه است که نیازمند تحقیق بیشتری است؛ چراکه تعداد خودروهای عبوری دلیل تولید آلاینده بیشتر در محل نیست و چه بسا در ترافیک‌های سنگین و توقف کامل خودروها با تعداد کمتری نسبت به حالت روان بودن ترافیک، انتظار تولید آلاینده بیشتری می‌رود. با توجه به همبستگی بیشتر شاخص ناپایداری هوا (شاخص  $k_i$ ) با شاخص کیفیت هوا در مقایسه با سایر متغیرها، نمودار تغییرات شاخص کیفیت هوا نسبت به شاخص ناپایداری هوا در شکل ۲ به عنوان نمونه نشان داده شده است.

به منظور محاسبه روابط رگرسیونی بین میانگین و بیشینه شاخص کیفیت هوا (متغیر مستقل) و سایر پارامترهای هواشناسی و تعداد خودرو (متغیرهای مستقل)، از معادلات رگرسیون ساده و چندگانه خطی استفاده شد. بدین منظور در محیط نرم افزار SPSS به روش پله به پله ۱ داده‌ها وارد مدل شد و تحلیل‌های آماری لازم بر روی آنها انجام گرفت. به منظور ارزیابی دقت مدل‌های مختلف، قبل از مدل‌سازی، حدود ۲۰ درصد داده‌ها به طور تصادفی کنار گذاشته شد و مدل‌سازی با استفاده از ۸۰ درصد باقی‌مانده داده‌ها انجام گرفت [۲۶].

#### 1. Stepwise Method



شکل ۲. نمودار تغییرات میانگین (الف) و بیشینه (ب) شاخص کیفیت هوا نسبت به شاخص ناپایداری هوا (۱۳۹۰)

با توجه به این نکته که در سال ۱۳۸۹ رابطه معناداری بین هیچ یک از متغیرهای مستقل با بیشینه شاخص کیفیت هوا وجود نداشت، معادلات آماری نیز در این سال محاسبه نشده‌اند. براساس نتایج، بیشترین تأثیر بر بیشینه شاخص کیفیت هوا را متغیرهای بارش و شاخص  $k_i$  در سال ۱۳۹۰ داشتند، به طوری که افزایش هر واحد از این دو متغیر، مقدار بیشینه شاخص کیفیت هوا را ۸ واحد کاهش داده است.

مقادیر انحراف نسبی (RD) میانگین شاخص کیفیت هوای واقعی و تخمینی توسط مدل آماری در سال ۱۳۸۹ در جدول ۳ آورده شده است. به منظور رعایت اختصار تنها جدول مربوط به این سال آورده شده و برای سایر سال‌ها موارد برجسته توضیح داده شده‌اند. براساس این جدول کمترین خطای نسبی مربوط به روز ۳۰ نوامبر ۲۰۱۰ (۹ آذر ۱۳۸۹) به مقدار ۰/۴ و بیشترین آن در تاریخ ۲۵ نوامبر ۲۰۱۰ (۴ آذر ۱۳۸۹) به مقدار ۱۰۵ است.

در سال ۱۳۹۰ کمترین مقدار انحراف نسبی میانگین شاخص کیفیت هوا به کمک معادله با متغیر بارش تخمین زده شده که برابر ۴ درصد مربوط به روز ۹ دسامبر ۲۰۱۱ (۱۸ آذر ۱۳۹۰) و بیشترین آن ۲۳۵/۵ درصد در روز ۸ نوامبر (۱۷ آبان ۱۳۹۰) بوده است. در مورد شاخص  $k_i$  در همین سال کمترین مقدار انحراف نسبی برابر ۲/۷- درصد مربوط به ۲۹ نوامبر ۲۰۱۱ (۸ آذر ۱۳۹۰) و بیشترین آن ۳۱۸/۱ درصد در روز ۸ نوامبر (۱۷ آبان ۱۳۹۰) بوده است. در سال ۱۳۹۱ در مورد میانگین شاخص کیفیت هوا کمترین مقدار انحراف نسبی در معادله با متغیر بارش برابر ۰/۴- درصد مربوط به روز ۳ ژانویه ۲۰۱۲ (۱۳ دی ۱۳۹۱) و بیشترین آن ۹۹/۴ درصد در روز ۲۴ نوامبر (۳ آذر ماه ۱۳۹۱) بوده است. در خصوص بیشینه شاخص کیفیت هوا در سال ۱۳۹۱، کمترین

مقدار انحراف نسبی در معادله با متغیر بارش برابر ۰/۴ درصد مربوط به روز ۸ ژانویه ۲۰۱۲ (۱۷ آذر ۱۳۹۱) و بیشترین آن ۴۵/۸ درصد در روز ۲۴ نوامبر (۳ آذر ۱۳۹۱) بوده است.

جدول ۳. مقادیر انحراف نسبی میانگین شاخص کیفیت هوای واقعی و مشاهده شده در روز های منتخب، سال ۱۳۸۹ (متغیر مستقل، دمای کمینه)

تاریخ	میانگین شاخص کیفیت هوا (واقعی)	میانگین شاخص کیفیت هوا (تخمینی)	RD (درصد)
۲۰۱۰/۱۱/۱۱	۱۰۹/۵۰	۹۲/۳۱	-۱۵/۷
۲۰۱۰/۱۱/۱۳	۸۷/۸۸	۹۹/۷۹	۱۳/۵
۲۰۱۰/۱۱/۲۵	۵۷/۶۰	۱۱۸/۱۰	۱۰۵/۰
۲۰۱۰/۱۱/۳۰	۱۱۱/۶۷	۱۱۲/۱۲	۰/۴
۲۰۱۰/۱۲/۲	۱۶۱/۶۱	۱۰۷/۲۶	-۳۳/۷
۲۰۱۰/۱۲/۳	۱۴۳/۳۰	۱۰۳/۱۵	-۲۸/۰

به منظور بررسی تأثیر همزمان متغیرهای مستقل بر کیفیت هوا از رگرسیون چندگانه خطی استفاده شد. در خصوص سال ۱۳۹۱ هیچ یک از مدل های آماری معنادار نبودند. در سال ۱۳۸۹ متغیرهای کمینه دمای هوا و شاخص  $k_i -$  با تأثیر منفی در معادله ظاهر شده اند. این معادله در سطح ۵ درصد معنادار است. در سال ۱۳۹۰ از بین مدل های مورد بررسی، براساس آزمون معناداری ضریب رگرسیون، دو مدل انتخاب شد. در مدل اول ناپایداری هوا با تأثیر منفی و دمای میانگین با تأثیر مثبت در معادله ظاهر شده، در حالی که در مدل دوم علاوه بر این دو متغیر، تعداد خودرو نیز با تأثیر منفی در معادله وارد شده است. در مدل اول دمای بیشینه هوا با تأثیر مثبت و تعداد خودرو با تأثیر منفی در معادله ظاهر شده، در حالی که در مدل دوم علاوه بر این دو متغیر، شاخص ناپایداری جو نیز با تأثیر منفی در معادله وارد شده است. جدول ۴ مقادیر انحراف نسبی (RD) میانگین شاخص کیفیت هوا براساس برآورد معادلات رگرسیونی چندگانه خطی در سال ۱۳۸۹ را نشان می دهد. براساس این جدول، کمترین خطا مربوط به ۳۰ نوامبر ۲۰۱۰ (۹ آذر ۱۳۹۱) برابر ۰/۷- درصد و بیشترین خطا مربوط به روز ۲۵ نوامبر ۲۰۱۰ (۴ آذر ۱۳۹۱) برابر ۹۸/۸ درصد مشاهده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، به منظور کاهش مخاطرات ناشی از آلودگی هوا می توان به کمک مدل های آماری که در آن شاخص  $k_i -$  به عنوان متغیر مستقل ظاهر شده، با پیش بینی دقیق تر کیفیت هوا و توصیه ها و هشدارهای

به موقع از تردهای غیر ضروری گروه‌های حساس به آلاینده‌ها جلوگیری کرد و در نهایت خسارت‌های جانی و مالی ناشی از بیماری‌های تنفسی و قلبی را کاهش داد.

جدول ۴. مقادیر انحراف نسبی میانگین شاخص کیفیت هوای واقعی و مشاهده شده در روزهای منتخب، سال ۱۳۸۹ (متغیر مستقل، دمای کمینه و شاخص ناپایداری هوا)

تاریخ	میانگین شاخص کیفیت هوای واقعی	میانگین شاخص کیفیت هوای تخمینی	RD (درصد)
۲۰۱۰/۱۱/۱۱	۱۰۹/۵۰	۸۹/۶۵	-۱۸/۱
۲۰۱۰/۱۱/۱۳	۸۷/۸۸	۹۸/۳۲	۱۱/۹
۲۰۱۰/۱۱/۲۵	۵۷/۶۰	۱۱۴/۴۹	۹۸/۸
۲۰۱۰/۱۱/۳۰	۱۱۱/۶۷	۱۱۰/۸۹	-۰/۷
۲۰۱۰/۱۲/۲	۱۶۱/۶۱	۱۰۶/۰۶	-۳۴/۳
۲۰۱۰/۱۲/۳	۱۴۳/۳۰	۱۰۶/۹۱	-۲۵/۴

### نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که شاخص ناپایداری هوا (شاخص- $k_i$ ) بیشترین تأثیر را بر نوسان آلودگی هوا داشته، به طوری که اثر معکوس آن سبب سالم‌تر شدن کیفیت هوا شده است. شرعی‌پور و بیدختی نیز در مطالعات خود به این جمع‌بندی رسیده بودند که آلودگی هوای شهر تهران با وارونگی‌های دمای سطحی رابطه مستقیم داشته و تداوم و شدت آلودگی هوا همراه با شرایط سکون بر جو و کاهش سرعت باد همبستگی معنادار و دوره‌های آلوده در تهران با حرکات نزولی در جو (پایداری بیشتر) همراه بوده است. پس از این شاخص، بیشترین همبستگی در سال‌های مورد مطالعه با متغیر بارش (همبستگی از  $-۰/۳۲۸$  تا  $-۰/۴۴۳$ ) بوده است. در همین سال ماه نوامبر از ماه دسامبر سالم‌تر بود که یکی از دلایل آن می‌تواند افزایش دما در طول روز و شکستن لایه وارونه باشد. از دیگر نتایج این تحقیق می‌توان به همبستگی منفی بین تعداد خودرو و بیشینه شاخص کیفیت هوا ( $r=-۰/۵۱۵$ ) و همچنین میانگین شاخص کیفیت هوا ( $r=-۰/۳۶۱$ ) اشاره کرد که از دستاوردهای بحث برانگیز این مطالعه بوده است. به نظر می‌رسد که تعداد خودرو و عبور آنها از مسیر قرارگیری دوربین‌ها در حالت توقف و روان بودن دو موضوعی است که باید با دقت بیشتری بررسی شوند؛ چرا که تعداد خودروهای عبوری دلیل بر تولید آلاینده بیشتر در

محل نیست و چه بسا در ترافیک‌های سنگین و توقف کامل خودروها با تعداد کمتر نسبت به حالت روان بودن ترافیک، انتظار می‌رود آلاینده بیشتری تولید شود.

### منابع

- [۱]. احمدی آسور، اکبر؛ الله‌آبادی، احمد (۱۳۹۰). سنجش میزان آلاینده‌های شهر سبزوار، مجله دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی سبزوار، دوره ۱۸: ۱۴۷-۱۴۰.
- [۲]. اسدی، مسعود (۱۳۸۸). تبیین نقش حمل‌ونقل عمومی در محیط زیست پایدار شهری: مطالعه موردی، منطقه ۶ تهران با رویکرد محیط زیست پایدار شهری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران.
- [۳]. اشرفی، خسرو؛ هشیاری‌پور، غلامعلی؛ نجار اعرابی، بابک؛ کشاورزی شیرازی، هما (۱۳۹۱). پیش‌بینی روزانه غلظت کربن منوکسید با استفاده از مدل تلفیقی انتخاب پیشرو-عصبی فازی براساس تحلیل پایداری جو: بررسی موردی، شهر تهران، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۸، شماره ۲: ۲۰۱-۱۸۳.
- [۴]. امیریگی، حسن؛ احمدی آسور، اکبر (۱۳۸۶). بهداشت هوا و روش‌های مبارزه با آلاینده‌های محیطی و صنعتی، تهران، انتشارات اندیشه رفیع.
- [۵]. انصافی مقدم، طاهره (۱۳۷۲). بررسی ارتباط آلودگی هوای تهران و ارتباط آن با وارونگی دمای جو (اینورژن)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- [۶]. آذر، عادل؛ مؤمنی، منصور (۱۳۸۸). آمار و کاربرد آن در مدیریت، جلد دوم، تحلیل آماری، تهران، انتشارات سمت.
- [۷]. جعفری، حمیدرضا؛ حسن پور، سیروس؛ رحیلی خراسانی، لیلا؛ پوراحمد، احمد (۱۳۹۳). کاربرد سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) در مکان‌یابی و تحلیل فضایی- مکانی آلودگی و منابع آلاینده‌های هوا در کلانشهر کرمانشاه، محیط‌شناسی، دوره ۴۰، شماره ۱: ۶۴-۵۱.
- [۸]. رضائی، عبدالمجید (۱۳۸۶). مفاهیم آمار و احتمالات. مشهد، نشر مشهد.
- [۹]. زارعی محمودآبادی، هادی؛ دهقانی طرزجانی، فریده (۱۳۹۰). آلودگی هوا، میبد، نشر دانشگاه آزاد اسلامی واحد میبد.
- [۱۰]. سازمان هواشناسی کشور (۱۳۹۰). سالنامه‌های هواشناسی.
- [۱۱]. شرعی‌پور، زهرا (۱۳۸۹). بررسی غلظت آلاینده‌های هوا و ارتباط آن با پارامترهای هواشناسی، چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، تهران، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

- [۱۲]. شرعی پور، زهرا؛ بیدختی، علی اکبر (۱۳۸۸). شرایط هواشناختی جو بالا و وضعیت حاد آلودگی هوا (مطالعه موردی، شهر تهران)، محیط شناسی، شماره ۳۵: ۱۴-۱.
- [۱۳]. شرکت کنترل کیفیت هوای تهران (۱۳۹۱). گزارش سالانه کیفیت هوای تهران در سال ۱۳۹۰، تهران، شماره گزارش QM91/02/06(U)/01.
- [۱۴]. شمسی پور، علی اکبر؛ امینی، ژوان (۱۳۹۲). شبیه سازی الگوی پراکنش CO با مدل خرد اقلیمی Envi-met در مسیر آزادی-تهرانپارس، جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۷: ۱۰۳-۸۵.
- [۱۵]. صادقی حسینی، علیرضا؛ رضائیان، مهتاب (۱۳۸۵). بررسی تعدادی از شاخص های ناپایداری و پتانسیل بارورسازی ابرهای همرفتی منطقه اصفهان، مجله فیزیک زمین و فضا، جلد ۳۲، شماره ۲: ۹۸-۸۳.
- [۱۶]. صادقی دهنوی، محسن؛ شیران، غلامرضا؛ پورمعلم، ناصر (۱۳۸۳). تخمین آلودگی هوا ناشی از جریان های ترافیکی در خیابان های شهری، اولین کنگره ملی مهندسی عمران، NCCE، تهران، دانشگاه صنعتی شریف.
- [۱۷]. علیجانی، بهلول (۱۳۸۴). رابطه بین توزیع فشار و تراکم آلاینده های شهر تهران، پژوهش های جغرافیایی، دوره ۳۷، شماره ۲: ۴۹-۳۹.
- [۱۸]. عیسائی، محمدتقی (۱۳۸۴). سیستم های هوشمند حمل و نقل، تهران، انتشارات آذر.
- [۱۹]. متکان، علی اکبر؛ شکیب، علی رضا؛ پورعلی، سید حسن؛ بهارلو، ایمان (۱۳۸۸). تعیین تغییرات مکانی و زمانی آلودگی های منواکسید کربن و ذرات معلق، با استفاده از تکنیک های GIS در شهر تهران، سنجش از دور و GIS ایران، سال اول، شماره ۱: ۷۲-۵۷.
- [۲۰]. مرادی، محمد (۱۳۹۰). مقدمه ای بر هواشناسی دینامیکی ۱، تهران، نشر سیدباقر حسینی.

- [21]. Aldrin, M.; Haff, I. H. (2005). Generalised additive modelling of air pollution, traffic volume and meteorology. *Atmospheric Environment*, 39(11): 2145-2155.
- [22]. Bazgeer, S. (2005). Land use change analysis in the sub mountainous region of Punjab using remote sensing, GIS and agro meteorological parameters. Ph.D Dissertation, Punjab Agricultural University (PAU), Ludhiana, India.
- [23]. Colville, R. N.; Kaur, S.; Britter, R.; Robins, A.; Bell, M. C.; Shallcross, D. E.; D.A.P.P.L.E. Project Co-investigators (2005). Sustainable development of urban transport systems and human exposure to air pollution. *Science of the total environment*, (334-335): 481-487.
- [24]. Marinaki, A.; Spiliotopoulos, M.; Michalopoulou, H. (2006). Evaluation of atmospheric instability indices in Greece. *Advances in Geosciences*. 7(131): 131-135.

- 
- [25]. Vardoulakis, S.; Gonzalez-Flesca, N.; Fisher, B. E. A. (2002). Assessment of traffic-related air pollution in two street canyons in Paris: implications for exposure studies. *Atmospheric Environment*, 36(6): 1025-1039.
- [26]. Willmott, C. J. (1982). Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 63(11): 1309-1369.
- [27]. Zhu, Y.; Hinds, W. C.; Kim, S.; Shen, S.; Sioutas, C. (2002). Study of ultrafine particles near a major highway with heavy-duty diesel traffic. *Atmospheric Environment*. 36(27); 4323-4335.