

استفاده از مدل رگرسیون کاربری اراضی (LUR) برای پیش‌بینی آلاینده‌های NO₂، CO و PM₁₀ (مطالعه موردی: شهر تهران)

اکبر محمدی* - استادیار گروه معماری و شهرسازی، مرکز آموزش عالی فنی مهندسی بوئین‌زهره، قزوین
مهدی قرخلو نره - دانشیار جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
کرامت‌الله زیاری - استاد جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
احمد پوراحمد - استاد جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۴/۲۶ تأیید نهایی: ۱۳۹۴/۰۱/۲۴

چکیده

امروزه کیفیت هوای شهرهای بزرگ یکی از معضلات و چالش‌های اساسی کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه است. در این بین، پیدایش و شدت پدیده آلودگی در شهرها از عوامل گوناگونی مانند منابع آلودگی، عوامل هواشناسی و واکنش‌های شیمیایی بین آلاینده‌ها تأثیر می‌پذیرد. برای مدل‌سازی تمرکز آلاینده‌ها در محیط‌های شهری مدل‌های متفاوتی وجود دارد که در دو گروه مدل‌های بر پایه متد پخش و مدل‌های رگرسیون کاربری اراضی (LUR) طبقه‌بندی می‌شود. هدف این تحقیق پیش‌بینی تمرکز آلاینده‌های NO₂، PM₁₀ و CO در تهران با استفاده از روش رگرسیون کاربری اراضی در سال ۲۰۱۰ است. در پژوهش حاضر از متغیرهای مستقلی مثل مساحت کاربری اراضی، طول شبکه معابر و متغیرهای هواشناسی برای پیش‌بینی و مدل‌سازی آلاینده‌های فوق استفاده، و نتایج چشمگیری ارائه شده است. نتایج پژوهش نشانگر دقت زیاد این مدل در پیش‌بینی سه آلاینده مورد نظر، به‌ویژه در فصول گرم است.

واژه‌های کلیدی: آلودگی هوا، ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا، تهران، مدل رگرسیون کاربری اراضی (LUR).

مقدمه

آلودگی هوای شهرها پدیده‌ای اکولوژیکی است که در اثر به‌هم‌خوردن و نبود توازن در رابطه میان انسان و محیط به‌وجود می‌آید. اگر انسان ظرفیت تحمل و توانایی محیط طبیعی را نشناسد و بر فناوری‌های نوین تکیه کند، تعادل و موازنه اکولوژیکی را برهم می‌زند که این امر در زیستگاه‌های شهری به‌دلیل تمرکز جمعیت و استفاده از فناوری‌های نوین مشهودتر است. آلودگی هوا که عمدتاً در شهرهای بزرگ دیده می‌شود یکی از مشکلات عمده این شهرهاست. براساس آمار سازمان سلامت جهانی (WHO) سالانه ۲/۴ میلیون نفر در دنیا بر اثر آلودگی هوا جان خود را از دست می‌دهند (سازمان بهداشت جهانی، ۲۰۰۵). مرگ بیش از ۴ هزار نفر طی شش روز بر اثر مه دود فتوشیمیایی شهر لندن در سال ۱۹۵۲، و مرگ ۲۰ تن و بیماری بیش از ۶ هزار نفر بر اثر آلودگی هوا در شهر ۱۴ هزار نفری دنورای پنسیلوانیای در سال ۱۹۴۸ از حوادث مهمی است که بر اثر آلودگی هوا در دوران گذشته به‌وجود آمده است (عرفان‌منش، افیونی، ۱۳۸۵).

گفتنی است کیفیت هوای شهرها از عوامل مختلفی مانند منابع آلاینده، عوامل هواشناسی و اقلیمی، شرایط توپوگرافیکی و واکنش‌های شیمیایی بین آلاینده‌ها تأثیر می‌پذیرد که هر یک نقشی خاص و جداگانه در شکل‌گیری پدیده آلودگی و به‌دنبال آن تأثیر منفی بر کیفیت هوا دارند. منابع آلاینده که منشأ اصلی تولید آلاینده‌ها هستند، در دسته‌بندی کلی به منابع نقطه‌ای، خطی و سطحی تقسیم می‌شوند. تأثیرگذاری این منابع در کیفیت هوای شهر با توجه به نقش و عملکرد شهر متفاوت است؛ برای مثال در شهرهایی با نقش و عملکرد صنعتی-کارگاهی، نقش منابع سطحی (پهنه‌های صنعتی) از بقیه منابع چشمگیرتر است. البته در سال‌های اخیر و در شهرهای بزرگ کشور، رشد و توسعه مالکیت اتومبیل شخصی در شهرها، کیفیت نامناسب سوخت مصرفی در اتومبیل‌ها و رعایت‌نکردن استانداردهای مربوط به کاهش آلاینده‌ها در ساخت اتومبیل‌ها، نقش منابع خطی را از دیگر منابع پررنگ‌تر کرده است.

شایان ذکر است که تأثیرگذاری عوامل و پدیده‌های هواشناسی و اقلیمی مانند دما، رطوبت، جهت و سرعت وزش باد، جزایر حرارتی، وارونگی دمایی و وضعیت جو بالا از دو طریق صورت می‌گیرد:

۱. تأثیرگذاری بر تمرکز و پراکنش افقی و عمودی آلاینده‌ها؛

۲. تأثیرگذاری بر واکنش‌های شیمیایی آلاینده‌ها.

از دیگر عوامل تأثیرگذار بر کیفیت هوای شهرها، انجام واکنش‌های شیمیایی بین آلاینده‌هاست. این واکنش‌ها تحت شرایط خاص از نظر هواشناسی و وجود عناصر خاصی صورت می‌گیرد. مدل‌های موجود در زمینه کیفیت هوای شهرها به دو دسته تقسیم می‌شود:

الف) مدل‌های بر پایهٔ متد پخش: این مدل‌ها با استفاده از داده‌هایی مثل میزان انتشار از منابع، داده‌های هواشناختی، شکل و فرم زمین و واکنش‌های شیمیایی میان آلاینده‌ها، تمرکز آن‌ها را در مقیاس‌های مختلف (منطقه تا خیابان) پیش‌بینی می‌کنند، همچنین برای پیش‌بینی تمرکز آلاینده‌ها نیازمند مدل‌های ترکیبی کاربری اراضی- حمل‌ونقل به‌عنوان پیش‌نیاز هستند.

ب) مدل رگرسیون کاربری اراضی (LUR): مدل‌های پخش به داده‌های ورودی بسیار زیاد و قدرت محاسباتی قوی برای ارائهٔ نتایج پذیرفته در ابعاد زمانی و مکانی نیاز دارند. طی سال‌های گذشته مدل رگرسیون کاربری اراضی (LUR) به‌عنوان جایگزین این مدل‌ها توسعه پیدا کرده و در ارائهٔ نقشه‌های آلودگی با رزولوشن بالا استفاده شده است، همچنین برای پیش‌بینی آلاینده‌ها خصوصیات و ویژگی‌های اطراف ایستگاه‌های سنجش آلودگی مانند کاربری اراضی، حجم ترافیک، ارتفاع، طول شبکهٔ معابر و شرایط هواشناسی را به‌عنوان متغیرهای مستقل، و تمرکز آلاینده‌ها را در ایستگاه سنجش به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته است و این تمرکز را در نقاط بدون سنجش آلاینده با استفاده از تحلیل رگرسیونی پیش‌بینی می‌کند.

تحقیق اولیه درخصوص LUR در پروژه SAVIAH^۱ معرفی شد که اتحادیه اروپا از نظر مالی از آن حمایت می‌کرد. این مطالعه پروژه‌های چندمرکزی بود که شهرهای هادرسفیلد^۲ و لندن (انگلستان)، بیلتوون^۳ (هلند)، پراگ (جمهوری چک) و ورشو (لهستان) را شامل می‌شد و هدف آن توسعه و معتبرسازی روش‌هایی برای تحلیل رابطه میان آلودگی هوا و سلامتی در مقیاس کوچک بود. در این پروژه رابطه میان میزان NO₂ اندازه‌گیری، و متغیرهای مستقل مانند کاربری اراضی (مسکونی با تراکم بالا و صنعتی)، جریان‌های ترافیکی (مشاهده‌شده، پیش‌بینی‌شده) و ارتفاع سنجیده شده است که ضریب تعیین (R²) برای هادرسفیلد ۰/۶۱ و برای آمستردام ۰/۶۲ به دست آمد که در مقایسه با مدل‌های پخش چشمگیر است (بریگس و دیگران، ۱۹۹۷).

مدلی که بریگس و دیگران برای مطالعه آلاینده‌ها در شهر پراگ به کار برده‌اند دربرگیرنده حجم ترافیک است، اما مدلی که برای شهر آمستردام استفاده کرده‌اند، به دلیل نبود اطلاعات حجم ترافیک از طول انواع معابر به عنوان متغیر مستقل استفاده کرده است. در جدول زیر متغیرهای مدل‌های مختلف که در این مطالعات کاربرد داشته به طور خلاصه توضیح داده شده است. از مجموع این مطالعات دو مورد به بخشی از پروژه SAVIAH^۴ مربوط است. نتیجه به کارگیری مدل LUR در شهرهای هادرسفیلد، آمستردام و پراگ به ترتیب ضریب تعیین (R²) ۰/۶۱، ۰/۶۲ و ۰/۷۲ را نشان می‌دهد. این مدل‌ها حجم ترافیک وزن‌دهی شده، کاربری اراضی و ارتفاع را به عنوان متغیرهای مستقل و پیش‌بینی‌کننده در نظر گرفته‌اند.

دومین مورد از این مطالعات دربرگیرنده مدل تجدیدنظر شده LUR با همان سه متغیر مستقل قبلی است که برای چهار شهر انگلستان (هادرسفیلد، هامراسمیت-الینگ، نورث همپتون و شفیلد) به کار برده شده است. برآور و دیگران تعداد متغیرهای مستقل به کار برده شده را در مدل LUR با کاربرد آن در ناحیه شهری استکهلم، مونیخ و شهرهای هلند که برای مدل‌سازی PM_{2.5} استفاده شده بود، توسعه دادند. مدل‌های LUR که در این مطالعات استفاده شد، دربرگیرنده متغیرهای پیش‌بینی‌کننده شامل حجم ترافیک (در نزدیک‌ترین معبر یا تعداد معابر در یک بافر معین) و تعداد واحدهای مسکونی و تراکم جمعیت است.

در مطالعات جدیدتر، مدل LUR برای مدل‌سازی آلاینده NO₂ در مونترال، ناحیه شهری سن‌دیه‌گو و کالیفرنیا به کار برده شد که آخرین استفاده از آن برای مونترال شامل متغیرهای مستقل زیر است (گیلبرت و دیگران، ۲۰۰۵):

- فاصله تا نزدیک‌ترین بزرگراه؛
- حجم ترافیک در نزدیک‌ترین بزرگراه؛
- طول بزرگراه‌ها در شعاع ۱۰۰ متری ایستگاه‌های اندازه‌گیری؛
- طول معابر فرعی در شعاع ۵۰۰ متری از ایستگاه‌های اندازه‌گیری؛
- مساحت فضاهای باز در شعاع کمتر از ۱۰۰ متر ایستگاه‌های اندازه‌گیری؛
- تراکم جمعیت در شعاع ۲۰۰۰ متری از ایستگاه‌های اندازه‌گیری.

مدل دیگری که راس و دیگران در کالیفرنیا استفاده کردند شامل متغیرهای مستقل زیر است (راس و دیگران، ۲۰۰۶):

- طول معابر در شعاع ۴۰ متری؛
- حجم ترافیک در شعاع ۴۰ تا ۱۰۰۰ متری؛

- فاصله تا سواحل.

ریان و دیگران مدلی را برای سطوح نمونه‌گیری ECAT^۱ شده^۱ (کربن اولیه که قابل نسبت‌دهی به ترافیک است) در سین‌سیناتی اوهایو ارائه کردند که متغیرهای پیش‌بینی‌کننده مهم در این مطالعه عبارت است از (ریان و دیگران، ۲۰۰۷):

- ارتفاع به‌عنوان قوی‌ترین عامل پیش‌بینی‌کننده؛

- شمار کامیون‌ها در شعاع ۴۰۰ متری؛

- طول مسیرهای اتوبوس در شعاع ۱۰۰ متری.

اعتبارسنجی هریک از مدل‌های LUR با روش‌های زیر سنجیده شده است:

- مقایسه سطوح پیش‌بینی‌شده آلاینده‌ها با مدل و سطوح نمونه‌گیری شده در ایستگاه‌هایی که در مدل وارد نشده‌اند

(در مطالعات بریگس و دیگران (۱۹۹۷) راس و دیگران (۲۰۰۶) و گیلبرت و دیگران (۲۰۰۵))؛

- میانگین خطاهای پیش‌بینی (برائر و دیگران، ۲۰۰۵)؛

- آنالیز بوت استرپینگ^۲ برای ارزیابی حساسیت پارامترهای مدل راس و دیگران (۲۰۰۶) ریان و دیگران (۲۰۰۷).

بریگس و دیگران در مطالعه خود در شهرهای آمستردام، پراگ و هادرسفیلد هشت تا ده ایستگاه اندازه‌گیری را به‌عنوان ایستگاه‌های مرجع برای سنجش اعتبار انتخاب کردند. مقایسه سطوح اندازه‌گیری‌شده آلاینده NO₂ و نتایج مدل (ضریب تعیین بین ۰/۷۹ تا ۰/۸۷) نشان‌دهنده پیش‌بینی خوب سطوح NO₂ در ایستگاه‌های مرجع است (بریگس و دیگران، ۱۹۹۷).

گیلبرت و دیگران نیز در پژوهش خود مقایسه‌ای بین سطوح پیش‌بینی‌شده و هفت ایستگاه مرجع انجام دادند که ضریب همبستگی ۰/۵۲ درصد را نشان می‌دهد (گیلبرت و دیگران، ۲۰۰۵). کاربرد مدل راس و دیگران برای دوازده ایستگاه اعتبارسنجی نشان می‌دهد که تمام سطوح پیش‌بینی‌شده ۱/۵ برابر متوسط سطوح مشاهده‌شده با میانگین برآورد خطای 2.1PPB است (راس و دیگران، ۲۰۰۶).

براور و دیگران میانگین خطاهای پیش‌بینی (جزر دوم مجموع تفاوت در تمرکز مشاهده‌شده در سایت i و تمرکز پیش‌بینی‌شده در سایت i در مدلی که بدون سایت i ساخته شده است) را برای اعتبارسنجی مدل LUR به‌کار بردند که (RMSE) برای PM_{2.5} از ۱/۱ تا ۱/۶ میلی‌گرم بر متر مکعب برآورد شد.

آنالیز بوت استرپینگ در دو مطالعه راس و ریان برای ارزیابی حساسیت پارامترهای مدل برآوردشده انجام، و در هر دو مدل پنج نمونه به‌صورت تصادفی پیش از اجرا حذف شد.

باید توجه داشت که مدل LUR قابلیت‌های مناسبی برای برآورد آلاینده‌ها دارد که یکی از مهم‌ترین آن‌ها انتقال و کاربرد آن در مکان‌های مختلف است، البته باید در نحوه انتخاب متغیرهای مناسب دقت کافی داشت؛ به‌عنوان نمونه در مدل LUR سین سیناتی، ارتفاع متغیر پیش‌بینی‌کننده مهمی است، اما در مدل نهایی سان‌دیگو این متغیر وارد مدل نمی‌شود؛ زیرا توپوگرافی دو مکان متفاوت، و فاصله تا سواحل در مدل سان‌دیگو به‌عنوان متغیر پیش‌بینی‌کننده مطرح است، اما در مکان‌های که دور از سواحل قرار دارد چندان مهم نیست.

علاوه‌بر انتخاب درست متغیرها، در انتخاب شعاع (بافر) مناسب از ایستگاه‌های سنجش نیز دقت کافی وجود دارد. به‌طور کلی انتخاب شعاع به مدت و نحوه از بین رفتن آلاینده‌های مدل‌سازی‌شده بستگی دارد؛ مثلاً این شعاع برای آلاینده NO₂ وسیع‌تر و برای سایر آلاینده‌ها و متغیرهای جغرافیایی احاطه‌کننده ایستگاه‌های اندازه‌گیری کوچک‌تر است.

جدول ۱. طبقه‌بندی متغیرهای جغرافیایی در مدل‌های LUR

شاخص	متغیر	توضیحات متغیر	مأخذ	
نوع معابر	معبر نوع ۱	معابر با سطح سرویس بیش از ۲۵۰۰۰ نفر	بریگس و دیگران، ۱۹۹۷	
	معبر نوع ۲	معابر با سطح سرویس ۵۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰ نفر	بریگس و دیگران، ۱۹۹۷	
	معبر نوع ۳	معابر با سطح سرویس ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ نفر	بریگس و دیگران، ۱۹۹۷	
	بزرگراه	بدون توضیح	گیلبرت و دیگران، ۲۰۰۵	
	معبر اصلی	بدون توضیح	گیلبرت و دیگران، ۲۰۰۵	
	معبر اصلی	میانگین شمار ترافیک روزانه بیش از ۵۰۰۰۰	راس و دیگران، ۲۰۰۶	
	معبر اصلی	میانگین شمار روزانه کامیون بیش از ۱۰۰۰	ریان و دیگران، ۲۰۰۷	
	معبر با ترافیک بالا	معابر با سطح سرویس بیش از ۲۵۰۰۰ نفر	برائر و دیگران، ۲۰۰۳	
	معبر با ترافیک متوسط	معابر با سطح سرویس ۱۰۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰ نفر	برائر و دیگران، ۲۰۰۳	
	معبر فرعی	بدون توضیح	گیلبرت و دیگران، ۲۰۰۵	
شمار ترافیک	مسیر اتوبوس	مسیرهای حمل‌ونقل عمومی	ریان و دیگران، ۲۰۰۷	
	حجم ترافیک وزن‌دهی شده	$15 \times (\text{حجم ترافیک در بافر } 40 \text{ متری}) + (\text{حجم ترافیک در بافر } 300-40)$	بریگس و دیگران، ۱۹۹۷	
	حجم ترافیک	بدون توضیح	بریگس و دیگران، ۱۹۹۷	
	شمار ترافیک در نزدیک‌ترین بزرگراه	بدون توضیح	گیلبرت و دیگران، ۲۰۰۵	
	میانگین روزانه شمار ترافیک	میانگین تعداد ماشین‌هایی که در دو طرف حرکت می‌کنند - طی روزهای هفته (وسیله نقلیه/کیلومتر طی شده در ساعت)	راس و دیگران، ۲۰۰۶	
	شدت ترافیک	وسایل نقلیه/روز	برائر و دیگران، ۲۰۰۳	
	شدت ترافیک وسایل نقلیه سنگین	ترافیک سنگین/روز	برائر و دیگران، ۲۰۰۳	
	میانگین روزانه شمار کامیون‌های	میانگین تعداد کامیون‌هایی که در دو طرف حرکت می‌کنند	ریان و دیگران، ۲۰۰۷	
	کاربری اراضی	ارتفاع	ارتفاع	بریگس و دیگران، ۱۹۹۷
		ارتفاع	ارتفاع	راس و دیگران، ۲۰۰۶
عامل پوشش زمین		جمع وزن دهی شده سطوح صنعتی و مسکونی با تراکم بالا	بریگس و دیگران، ۱۹۹۷	
پوشش زمین		سطوح زمین‌های ساخته‌شده	بریگس و دیگران، ۱۹۹۷	
کاربری صنعتی		سطوح اختصاص‌یافته به کاربری صنعتی	گیلبرت و دیگران، ۲۰۰۵	
فضاهای باز		سطوح اختصاص‌یافته به فضاهای باز	گیلبرت و دیگران، ۲۰۰۵	
کاربری تجاری		سطوح اختصاص‌یافته به کاربری تجاری	گیلبرت و دیگران، ۲۰۰۵	
کاربری اداری/صنعتی		سطوح اختصاص‌یافته به کاربری اداری/صنعتی	گیلبرت و دیگران، ۲۰۰۵	
تراکم خانوار		تعداد مساکن در سطح بافر	گیلبرت و دیگران، ۲۰۰۵	
تراکم جمعیت		جمعیت در سطح بافر	راس و دیگران، ۲۰۰۶	
کاربری اراضی	کاربری اراضی	سطوح پوشیده‌شده توسط کاربری صنایع، صنایع سنگین و نواحی مسکونی چند خانواری	راس و دیگران، ۲۰۰۶ ریان و دیگران، ۲۰۰۷	
	فاصله تا ساحل	فاصله تا سواحل اقیانوس	راس و دیگران، ۲۰۰۶	

منبع: در ستون آخر جدول به منابع اشاره شده است.

در پژوهشی که ژو و دیگران انجام دادند، مشخص شد ذرات معلق بسیار ریز که از بزرگراه‌ها نشئت می‌گرفتند تا ۳۰۰

متر از نواحی اطراف یافت می‌شدند؛ بنابراین، بافرهایی در این اندازه یا بزرگ‌تر برای این تحقیق مناسب است (ژو و دیگران، ۲۰۰۲).

انتخاب اندازه بافرها در مدل‌های LUR بسیار مهم و ضروری است؛ زیرا این بافرها متغیرهای مؤثر بر آلاینده‌ها مانند ترافیک، اندازه معابر و کاربری اراضی را نشان می‌دهد. به‌طور کلی متغیرهای ترافیکی در مدل LUR براساس نوع آلاینده‌ها و داده‌های در دسترس انتخاب می‌شود؛ برای مثال متوسط روزانه تعداد کامیون‌ها (به‌جای وسایل نقلیه شخصی) و مسیر اتوبوس در تحقیق ریان و دیگران برای آلاینده ECAT مناسب است (Ryan, et al., 2007). از دیگر محدودیت‌های بالقوه مدل LUR، میزان داده‌های در دسترس و کیفیت آن‌هاست. داده‌های مربوط به شمارش ترافیک اغلب به سازمان‌های وابسته به دولت محلی (شهرداری) مربوط بوده و ممکن است زودتر از داده‌های نمونه‌گیری جمع‌آوری شده باشد. از این میان، ایده‌آل‌ترین داده‌های مربوط به شمار ترافیک، داده‌هایی است که به‌طور هم‌زمان با داده‌های نمونه‌گیری انجام می‌شود.

میزان حجم ترافیک از مهم‌ترین متغیرهای مستقل در بیشتر پژوهش‌های ذکر شده است که اهمیتش در تمام آن‌ها مشاهده می‌شود. براور و دیگران در تحقیق خود به‌ترتیب ترافیک کل در نزدیک‌ترین معبر، شدت ترافیک در ۵۰ تا ۲۵۰ متری ایستگاه‌های سنجش آلودگی و تعداد معابر با ترافیک بالا را در فاصله کمتر از ۲۵۰ متری ایستگاه‌های سنجش آلودگی از مهم‌ترین متغیرهای وابسته در مدل LUR برای ناحیه شهری استکهلم، مونیخ و هلند ذکر کرده‌اند. همین‌طور در مدل‌های LUR مونترال و ناحیه شهری سان‌دیگو، شمار ترافیک در نزدیک‌ترین بزرگراه و حجم ترافیک در فاصله ۴۰ تا ۳۰۰ متری از مهم‌ترین متغیرهای مستقل است. در مدل سین‌سیناتی اگرچه تعداد و شمار کامیون‌ها یکی از متغیرهای مستقل مهم است، ارتفاع مهم‌ترین متغیر مستقل به‌شمار می‌رود.

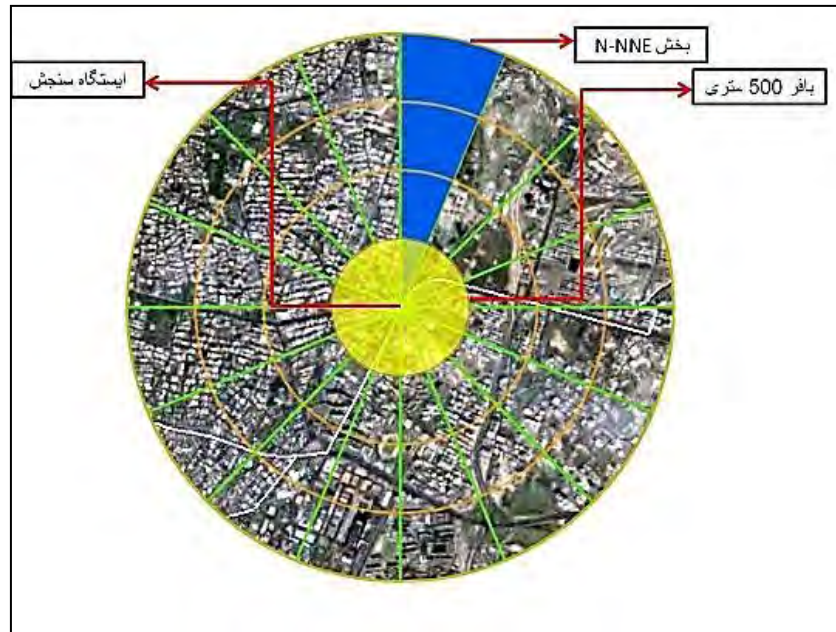
در مطالعه متکان و دیگران درخصوص شهر تهران، متغیرهای مستقلی که برای پیش‌بینی آلاینده‌های CO و PM10 استفاده شد شامل حجم ترافیک، راه، کاربری اراضی، جمعیت و ارتفاع است. در این پژوهش حجم ترافیک، راه و کاربری اراضی در بافر ۵۰۰ متری و جمعیت در بافر ۱۰۰۰ متری اطراف ایستگاه‌های سنجش آلودگی استخراج، و در ساخت مدل رگرسیونی استفاده شد (متکان و دیگران، ۱۳۹۰).

به‌منظور اعتبارسنجی مدل LUR، متکان و دیگران از رابطه همبستگی میان برآوردهای صورت‌گرفته آلاینده‌ها در مکان‌هایی که ایستگاه‌های سنجش آلودگی وجود داشت و در مدل استفاده نشده بود، همچنین از آلاینده‌های ثبت‌شده در این ایستگاه‌ها استفاده کردند که ضرایب آن برای آلاینده‌های CO و PM10 به‌ترتیب با ۰/۵۰ و ۰/۵۹ برابر بوده است. تهران، پایتخت و بزرگ‌ترین شهر کشور جایگاه سیاسی، اقتصادی و فرهنگی مسلطی در سطح کشور دارد، این جایگاه که در اثر تحولات سیاسی، اجتماعی و اقتصادی در سال‌های گذشته به‌دست آمده، سبب بروز مشکلات عمده‌ای مانند اسکان غیر رسمی، بافت‌های فرسوده، فقر، ترافیک و انواع آلودگی‌ها شده است.

گفتنی است کیفیت هوای شهر تهران طی چند دهه اخیر یکی از چالش‌های اصلی فراروی مدیریت شهری بوده که سالیانه خسارت‌های زیادی را وارد کرده است. هدف اصلی این پژوهش پیش‌بینی توزیع آلاینده‌های NO2، CO و PM10 با استفاده از مدل رگرسیونی کاربری اراضی (LUR) است.

روش پژوهش

مدل‌های LUR بر پایه سیستم بافرینگ ساخته شده‌اند. مبنای اولیه این روش در شکل زیر نشان داده شده است. یک بافر از رینگ‌های متوالی $r=I-R$ ساخته و به بخش‌هایی مجزا (S) تقسیم شده است.



شکل ۱. سیستم بافرینگ و بخش‌بندی در مدل LUR

اگرچه تمام ایستگاه‌های سنجش آلودگی این پژوهش در داخل مرزهای شهر تهران واقع شده‌اند، تمرکز ثبت‌شده آلاینده‌ها در هریک از این ایستگاه‌ها در مقایسه با ایستگاه‌های دیگر متفاوت است که دلیل آن تغییرات در شدت انتشار ترافیک و کاربری‌های اراضی داخل بافرهاست. برای آشکارسازی تأثیرات حمل‌ونقل و کاربری اراضی بر روی تمرکز آلاینده، از طول شبکه معابر و کاربری اراضی، همچنین برخی عناصر اقلیمی به‌عنوان متغیرهای توضیحی (مستقل) استفاده شده است. براساس مدل مقطعی^۱ با استفاده از روش LUR میانگین تمرکز آلاینده‌ها برای دوره‌ای خاص با روش زیر محاسبه شده است:

$$C_{pi} = \frac{1}{N_h} \times \sum_t C_{pit}$$

در این معادله

C_{pi} : میانگین تمرکز آلاینده‌ها در یک ساعت خاص؛

C_{pit} : تمرکز آلاینده در یک ساعت خاص؛

N_h تعداد ساعت‌های استفاده‌شده برای محاسبه میانگین تمرکز آلاینده‌ها.

به‌دلیل اینکه میانگین تمرکز آلاینده‌ها در دوره مطالعه استفاده شده است، تأثیرات زمانی متغیرهای هواشناسی به‌جز مسیر باد حذف می‌شود. مسیر جهت وزش باد Fwd ، بیانگر بسامد جهت باد درون هر بخش از یک بافر است. متغیرهای توضیحی مثل کاربری اراضی (LU) می‌توانند با $FWDs$ به‌صورت زیر وزن‌دهی شوند:

$$LU_{iar} = \sum_t FWD_s \times LU_{iars}$$

در این معادله LU_{iars} مساحت کاربری اراضی a اندازه‌گیری‌شده در رینگ r و بخش s اطراف ایستگاه سنجش i

است سپس مدل مقطعی دیگری به‌صورت فرمول زیر ارائه می‌شود:

$$C_{pi} = F_p(RL_{ir}, LU_{iar} | r = 1 \rightarrow R, a = 1 \rightarrow A)$$

البته باید این فرض را نیز در نظر داشت که داخل رینگ‌های بافر تأثیرات اضافی از نظر RL و LU بر روی تمرکز آلاینده‌ها وجود دارد؛ بنابراین، معادله بالا به صورت زیر ارائه می‌شود:

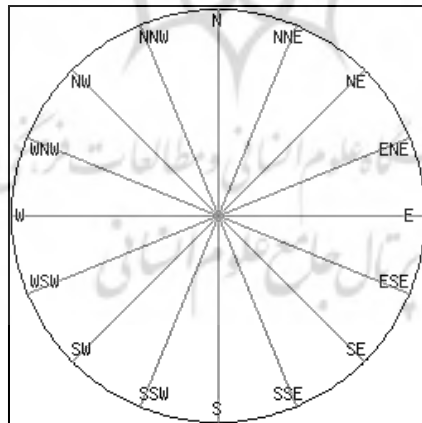
$$C_{pi} = a + \sum_{r=1}^R \beta_r RL_{ir} + \sum_{a=1}^A \sum_{r=1}^R \gamma_{ar} LU_{iar} + \varepsilon_{pi}$$

همان‌طور که پیش از این بررسی شد عوامل هواشناسی تأثیرات عمده‌ای بر تمرکز آلاینده‌ها دارند. معادله‌ای که در بالا ارائه شد در جایی که C_{pi}^h نشان‌دهنده میانگین تمرکز ساعتی در یک فصل است، به مدل پانل سری‌های زمانی کیفیت هوا تبدیل می‌شود. برای ورود بسامد جهت باد در هر فصل به مدل، ارزش‌های RL و LU دوباره محاسبه می‌شوند. برای فرموله کردن مدل پانل فصلی-ساعتی، میانگین تمرکز آلاینده‌ها در طول هر فصل برای یک ساعت مشخص، و عوامل هواشناسی نیز به همین صورت محاسبه شده است.

مجموعه داده‌های پانل برای هر فصل شامل ۳۸۴ مشاهده (۱۶ ایستگاه ضرب در ۲۴ ساعت) است و به دلیل اینکه داده‌های VKT و شمارش ترافیک موجود نبوده، از طول معابر (RL) به عنوان شاخص جایگزین استفاده شده است که در طول ۲۴ ساعت هیچ تغییری نمی‌کند، همچنین به دلیل دسترسی نداشتن به نیمرخ فعلیتی برای کاربری اراضی، LU نیز در طول ۲۴ ساعت ثابت است. مدل پانل فصلی/ساعتی نهایی به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$C_{pi}^h = F_p(RL_{ir}^h, MET^h, LU_{iar} | r = 1 \rightarrow R, a = 1 \rightarrow A)$$

بخش‌بندی بافرها که در این تحقیق برای وزن‌دهی کاربری‌ها، شبکه معابر و شاخص‌های فرم شهری براساس جهت وزش غالب باد استفاده شده، براساس جهت‌های جغرافیایی است که در زیر ارائه شده است:



شکل ۲. بخش‌بندی سیستم بافرینگ در مدل LUR

روش مدل

چهار بافر دایره‌ای شکل با شعاع‌های متفاوت (از ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر) و هشت بخش (sector) براساس جهت‌های مختلف جغرافیایی برای هر بافر در اطراف هر ایستگاه سنجش آلودگی تعریف شده است سپس مساحت کاربری‌های اراضی، طول معابر به تفکیک درجات و شاخص‌های فرم شهری برای هر بافر و بخش به صورت جداگانه در نرم‌افزار ARC GIS10 استخراج شده و این متغیرها و شاخص‌ها براساس درصد وزش باد وزن‌دهی شده است.

WLU = کاربری اراضی وزن‌دهی شده براساس جهت وزش باد

WRL = طول معابر وزن‌دهی شده براساس جهت وزش باد

مهم‌ترین متغیرهای توضیحی (مستقل) استفاده‌شده در مدل رگرسیونی این پژوهش عبارت است از: کاربری اراضی به تفکیک مسکونی، تجاری-اداری، صنعتی، شبکه معابر و فضای سبز و باز به طول شبکه معابر به تفکیک شریانی درجه یک، شریانی درجه دو، جمع و پخش‌کننده، محلی و متغیرهای هواشناسی. میانگین متغیرهای هواشناسی ساعتی و آلاینده‌ها در طول هر فصل نیز محاسبه شده است. در مجموع چهار مدل رگرسیونی، فرمول‌بندی، ارائه و نتایج آن مقایسه شده است، همچنین متغیرهای کاربری اراضی و طول معابر وزن‌دهی شده برای هر فصل محاسبه شده است برای معادله رگرسیونی نیز مناسب‌ترین شعاع برای متغیر مورد نظر (بهترین نتیجه) به کار رفته است. مدل رگرسیونی پیشنهادی به صورت زیر است:

$$C_{it}^p = a + \sum_{j=1}^j \beta_{ji} \times X_{ijt} + \sum_{j=1}^j \gamma_{jt} (X_{ijt}) + \sum_{j=1}^j \delta_{it} (X_{ijt}) - u_{it}$$

در این معادله:

P = نوع آلاینده

i = مشاهدات مقطعی (۱ تا ۱۶ ایستگاه سنجش)

t = مشاهدات سری زمانی (۱ تا ۲۴ ساعت)

C = تمرکز آلاینده‌ها

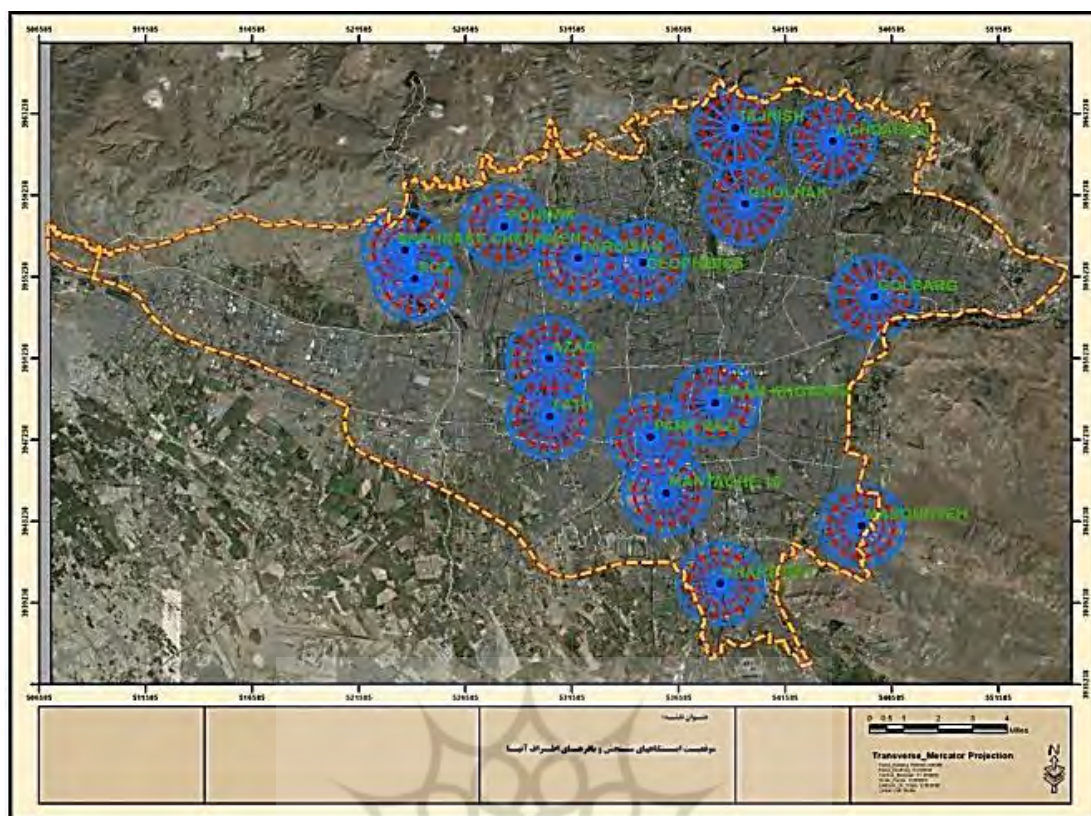
X = متغیرهای توضیحی (کاربری اراضی، طول معابر، ارتفاع و هواشناسی)

u_{it} = خطای ایستگاه سنجش i و زمان t.

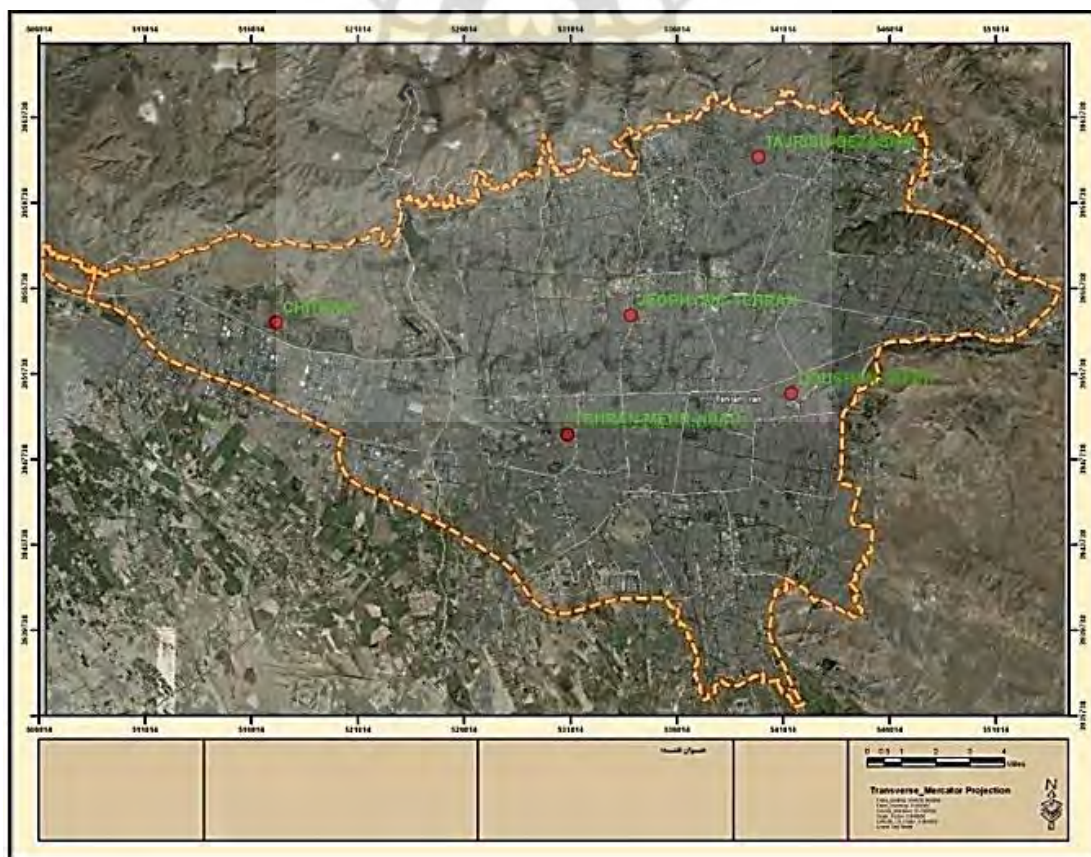
داده‌های مورد استفاده در این مدل‌سازی به سال ۲۰۱۰ میلادی مربوط است که از سازمان‌های مختلف مثل شهرداری و شرکت کنترل کیفیت هوای شهر تهران، اداره کل هواشناسی کشور و سازمان محیط زیست استان تهران گرفته شده است.

شکل ۳ بیانگر موقعیت ایستگاه‌های سنجش مورد مطالعه در این تحقیق است. در انتخاب این ایستگاه‌ها، ایستگاه‌هایی مورد نظر بود که داده‌های آماری مربوط به آن‌ها طی دوره زمانی مورد مطالعه کامل‌تر بوده و در ضمن از نظر توزیع فضایی نماینده موقعیت‌های مختلف عملکردی در بافرهای اطراف (مراکز تجاری، صنعتی-کارگاهی، مسکونی و...) است. در نهایت ۱۶ ایستگاه سنجش آلاینده برای مطالعه انتخاب شد که ۷ ایستگاه تحت نظارت اداره کل محیط زیست استان تهران، و ۹ ایستگاه تحت نظارت شرکت کنترل کیفیت هوای شهر تهران قرار داشتند.

در شکل ۴ نیز موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه در این تحقیق نشان داده شده است. این ایستگاه‌ها از نوع سینوپتیک بوده و برای اخذ داده‌های جو سطح زمین استفاده شده است. اسامی این ایستگاه‌ها عبارت‌اند از: شمال تهران، ژئوفیزیک، چیتگر، دوشان‌تپه و مهرآباد. داده‌های جو بالا نیز از سایت دانشگاه وایومینگ^۱ اخذ شده و داده‌های مربوط به جو بالای ایستگاه مهرآباد تهران از این سایت استخراج و استفاده شده است.



شکل ۳. نقشه موقعیت ایستگاه‌های سنجش آلودگی مورد مطالعه و بافرها و بخش‌های اطراف آنها



شکل ۴. نقشه موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه

بحث و یافته‌ها

یافته‌های مربوط به آلاینده CO

این آلاینده با وسایل نقلیه موتوری و سوخت‌های فسیلی مصرفی در بخش‌های مسکونی و تجاری و... شهر تولید می‌شود. نتایج مربوط به مدل‌سازی این آلاینده به تفکیک فصل در جدول شماره ۲ نشان داده شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، رابطه میان طول شبکه معابر اصلی (شیرانی درجه یک و دو) و تمرکز CO در تمام فصول مثبت است که نشان‌دهنده نقش مثبت جریان‌های ترافیکی بر تولید آلاینده CO است.

جدول ۲. تحلیل رگرسیونی آلاینده CO و متغیرهای مؤثر بر تمرکز این آلاینده

فصل			بهار			تابستان			پاییز			زمستان		
ضرایب	T value	پ.ن.	pr	T value	پ.ن.	pr	T value	پ.ن.	pr	T value	پ.ن.	pr	T value	پ.ن.
ضریب ثابت	۱۴/۲۳	۱۶/۰۶	۰/۰۰۰۱	-۱۸/۹۶	-۴/۳۶	۰/۰۰۰۱	۵/۴۷	۳/۱۱	۰/۳۱۴	۱۸/۴۵	۱۲/۳۴	۰/۰۰۰۱		
معابر شیرانی درجه ۱ در بافر ۱۰۰۰	۳/۴۸	۵/۸۴	۰/۰۰۰۱	۲/۱۴	۴/۲۶	۰/۰۰۰۱	۴/۶۲	۲۹/۸۲	۰/۰۰۰۱	۶/۱۲	۹/۲۰	۰/۰۰۰۱		
معابر شیرانی درجه ۲ در بافر ۱۵۰۰	۱/۸۹	۱۲/۳۶	۰/۰۰۰۱	۰/۵۷	۱/۸۵	۰/۰۰۰۱	۲/۵۸	۳/۱۵	۰/۰۰۰۱	۲/۸۴	۲۲/۴۶	۰/۰۰۰۱		
کاربری مسکونی در بافر ۲۰۰۰	۰/۳۶	۱۳/۳۲	۰/۰۰۰۱	۱/۱۸	۲۲/۴۶	۰/۰۰۰۱	۰/۸۷	۴/۵۵	۰/۰۰۰۱	۰/۷۹	۴/۳۰	۰/۰۰۰۱		
کاربری سبز و باز در بافر ۱۵۰۰	-۶/۴۱	-۵/۸۷	۰/۰۰۰۱	-۷/۳۱	-۲/۳۵	۰/۰۰۰۱	-۱/۲۳	-۳۰/۹۱	۰/۰۰۰۱	-۰/۵۴	-۴/۲۵	۰/۰۰۰۱		
درجه حرارت	-۱/۱۴	-۲۵/۶۳	۰/۰۰۰۱	-۲/۰۲	-۸/۵۶	۰/۰۰۰۱	-۳/۱۴	-۵/۸۵	۰/۰۱۹	-۲/۱۰	-۲۹/۱۲	۰/۰۰۰۱		
سرعت باد	-۲/۱۰	۳/۲۵	۰/۰۰۰۱	-۱/۸۵	-۱۲/۲۴	۰/۰۰۰۱	-۰/۹۷	-۱/۳۴	۰/۰۰۴	-۰/۷۱	-۴/۲۱	۰/۰۰۰۱		
رطوبت	-۰/۲۴	-۲/۲۳	۰/۰۰۰۱	۰/۲۵	۳/۲۱	۰/۰۰۰۱	-۰/۷۸	-۶/۴۷	۰/۱۴۷	-۰/۲۹	-۸/۰۴	۰/۰۰۰۱		
شاخص جو بالا	۰/۹۶	۱/۱۳	۰/۰۰۰۱	۰/۸۲	۴/۲۱	۰/۰۰۰۱	۱/۲۳	۱۶/۵۴	۰/۰۰۰۱	۱/۸۷	۲/۵۸	۰/۰۰۰۱		
R2	۰/۹۹۱			۰/۹۴۱			۰/۹۴۹			۰/۹۱۰				

منبع: شرکت کنترل کیفیت هوای شهر تهران، اداره کل محیط زیست استان تهران، اداره کل هواشناسی کشور، مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران، سایت دانشگاه وایومینگ، محاسبات نگارندگان

ضرایب برآوردشده برای درجه حرارت و تمرکز آلاینده CO نیز در تمام فصول منفی است. براساس مبانی تئوریک مطرح‌شده، تأثیر درجه حرارت بر تمرکز CO از دو طریق صورت می‌گیرد. نخستین تأثیر این متغیر بر تمرکز CO در نتیجه تغییرات مصرف سوخت‌های فسیلی در بخش‌های مختلف است که سبب افزایش و کاهش انتشار آلاینده CO از این منابع می‌شود. دومین تأثیر این متغیر بر تمرکز CO در نتیجه تأثیر مثبت اشعه‌های خورشیدی بر تولید OH است. CO در اثر واکنش با HO به CO2 و HO2 تبدیل شده است و از بین می‌رود؛ بنابراین، نتایج به‌دست‌آمده درخصوص متغیر درجه حرارت در تطابق کامل با مطالب گفته شده است.

تأثیر کاربری‌ها بر تمرکز آلاینده CO در فصول مختلف متفاوت است. کاربری‌های مسکونی به دلیل اینکه تولیدکننده آلاینده CO هستند، ضرایب مثبتی را در تمام مدل‌ها به خود اختصاص داده‌اند. البته میزان ضرایب به‌دست‌آمده در فصل زمستان به دلیل افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی از سایر فصول بیشتر است. کاربری فضای سبز و باز به دلیل جذب آلاینده CO سبب کاهش این آلاینده می‌شود. با توجه به اینکه فعالیت گیاهان در فصول بهار و تابستان بیشتر از سایر فصول است، ضرایب به‌دست‌آمده برای این کاربری در تمام فصول منفی و فصل بهار و تابستان این ضرایب قابل توجه است. سایر کاربری‌ها مثل تجاری-اداری و صنایع به دلیل تأثیر بسیار کم در این مدل حذف شده‌اند.

در خصوص متغیر سرعت باد نیز ضرایب به‌دست‌آمده در مدل‌ها منفی است که نشان‌دهنده کاهش تمرکز CO با افزایش سرعت باد است. به دلیل اینکه سرعت باد در بهار و تابستان بیشتر از پاییز و زمستان است، ضرایب این فصول چشمگیرتر است. ضرایب به‌دست‌آمده برای رطوبت نسبی نیز در تمام فصول به‌جز فصل تابستان منفی است که نشانگر تأثیر منفی رطوبت موجود در جو بر تمرکز CO است. به‌منظور نشان‌دادن تأثیر جو بالا بر تمرکز آلاینده CO نیز از شاخص شولتر^۱ استفاده شده است. همان‌طور که در مطالعات فصل‌های قبل اشاره شد، هرچه قدر میزان این شاخص کاهش یابد، نشان‌دهنده ناپایداری بیشتر جو بالاست. ضرایب به‌دست‌آمده برای این شاخص در تمام مدل‌های رگرسیونی CO، نشان‌دهنده رابطه مثبت میان شاخص شولتر و تمرکز CO است.

یافته‌های مربوط به آلاینده PM10

آلاینده PM10 یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های محیط شهری است که طی سال‌های اخیر در شهر تهران یکی از آلاینده‌های اصلی هوای این شهر بوده است. ضرایب به‌دست‌آمده در مدل رگرسیونی PM10 در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، ضرایب به‌دست‌آمده برای طول شبکه معابر (شریانی درجه یک، شریانی درجه دو و جمع و پخش‌کننده) در هر چهار مدل مثبت است. گفتنی است وسایل نقلیه علاوه بر انتشار مستقیم این آلاینده به‌طور غیرمستقیم و از طریق ایجاد گردوغبار ناشی از حرکت در معابر سبب ایجاد ذرات معلق می‌شود. ضرایب به‌دست‌آمده برای درجه حرارت در فصل زمستان منفی، و در سایر فصول مثبت است. تأثیر درجه حرارت بر تمرکز PM10 را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

تغییرات درجه حرارت با تأثیر بر مصرف سوخت‌های فسیلی، بر کمیت آلاینده PM10 به‌ویژه در فصول سرد سال تأثیر می‌گذارد که نتایج ضریب به‌دست‌آمده برای فصل زمستان این موضوع را نشان می‌دهد. در ضمن تغییرات درجه حرارت با اثرگذاری بر فعالیت‌های انسانی مثل ساخت‌وساز در فصول گرم، که تأثیر مثبتی بر تمرکز PM10 دارد، همچنین با تأثیر بر فعالیت گیاهان که تأثیر منفی بر تمرکز PM10 دارد، بر میزان غلظت این آلاینده در محیط شهر تأثیرگذار است.

رطوبت نسبی نیز با جذب و شست‌وشو سبب کاهش تمرکز PM10 می‌شود و ضرایب منفی به‌دست‌آمده برای چهار مدل رگرسیونی این امر را تأیید می‌کند. ضرایب به‌دست‌آمده برای متغیر سرعت باد در فصول بهار و تابستان منفی و در فصول پاییز و زمستان مثبت است. در شهر تهران سرعت وزش بادها در بهار و تابستان بالا و در پاییز و زمستان پایین است، همچنین در پاییز و زمستان پایداری هوا و کاهش حرکات عمودی جو نیز مشهود است که یکی از علل افزایش تمرکز PM10 در این فصول به‌شمار می‌آید.

کاربری‌های مسکونی و تجاری- اداری نیز به دلیل تأثیر بسیار اندک بر تمرکز PM10 از مدل حذف شده است. ضرایب به‌دست‌آمده برای سایر کاربری‌ها نیز به‌صورت زیر است:

ضرایب کاربری صنعتی-کارگاهی و معابر در تمام مدل‌ها مثبت است که نشان‌دهنده نقش مثبت این دو کاربری در تولید و انتشار این آلاینده‌ها طی چهار فصل است. ضرایب به‌دست‌آمده برای کاربری فضای سبز و باز در تمام مدل‌ها منفی است. براساس مباحث تئوریک مطرح‌شده تأثیر پوشش گیاهی بر تمرکز PM10 دوجانبه است، این کاربری از یک‌سو با جذب این آلاینده نقشی کاهنده در تمرکز آن دارد و از سوی دیگر با انتشار BVOC نقشی افزایش‌دهنده را برای

۱. یکی از شاخص‌های جو بالا که پایداری و ناپایداری سطوح بالایی جو را نشان می‌دهد. جهت اطلاعات بیشتر به سایت زیر مراجعه شود.
<http://weather.cod.edu/sirvatka/si.html>

PM10 ایفا می‌کند. در این بین، نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده غالب بودن نقش کاهنده این کاربری بر تمرکز PM10 است.

به‌منظور نشان‌دادن تأثیر جو بالا بر تمرکز آلاینده PM10 از شاخص شولتر استفاده شده است. همان‌طور که در مطالعات فصل‌های پیش اشاره شد، هرچقدر میزان این شاخص کاهش یابد، نشان‌دهنده ناپایداری بیشتر جو بالاست. ضرایب به‌دست‌آمده برای این شاخص در تمام مدل‌های رگرسیونی PM10 نشان‌دهنده رابطه مثبت میان شاخص شولتر و تمرکز PM10 است.

جدول ۳. تحلیل رگرسیونی آلاینده PM10 و متغیرهای مؤثر بر تمرکز این آلاینده

زمستان			پاییز			تابستان			بهار			ضرایب
pr	T value	β	pr	T value	β	pr	T value	β	pr	T value	β	
0/0001	30/14	157/87	0/0001	-2/47	-25/48	0/0001	-3/14	-187	0/0001	14/20	38/17	ضریب ثابت
0/0001	17/41	7/01	0/0001	9/14	6/47	0/0001	12/69	4/09	0/0001	11/24	4/17	معابر شریانی درجه ۱ در بافر ۲۰۰۰
0/0001	22/47	3/14	0/0001	7/12	2/8	0/0001	14/21	1/95	0/0001	5/63	2/41	معابر شریانی درجه ۲ در بافر ۲۰۰۰
0/0001	4/57	0/94	0/0001	18/23	0/89	0/0001	25/31	0/74	0/0001	12/57	0/94	معابر جمع و پخش‌کننده در بافر ۱۵۰۰
0/0001	2/58	4/09	0/0001	4/14	3/14	0/0001	5/24	1/23	0/0001	2/39	1/45	کاربری صنعتی - کارگاهی در بافر ۲۰۰۰
0/0001	-7/89	-0/85	0/0001	-20/14	-1/08	0/0001	-34/17	-2/35	0/0001	-36/17	-4/57	کاربری سبز و باز در بافر ۱۵۰۰
0/0001	21/47	1/87	0/0001	14/27	1/56	0/0001	2/14	0/83	0/0001	1/36	1/23	درجه حرارت
0/0001	-13/24	0/51	0/0001	-12/35	-0/74	0/0005	-14/72	-1/24	0/0001	-14/32	-1/42	سرعت باد
0/0001	-8/91	-0/82	0/0001	-1/78	-0/78	0/0001	-2/47	-0/12	0/0001	-18/27	-0/17	رطوبت
0/0001	7/12	0/74	0/0001	7/45	1/24	0/0001	1/28	0/74	0/0001	11/03	0/42	شاخص‌های جو بالا
	0/935			0/943			0/924			0/991		R2

منبع: شرکت کنترل کیفیت هوای شهر تهران، اداره کل محیط زیست استان تهران، اداره کل هواشناسی کشور، مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران، سایت دانشگاه وایومینگ، محاسبات نگارندگان

یافته‌های مربوط به NO2

همان‌طور که در فصول پیشین عنوان شد، مهم‌ترین منبع انتشار NOx ها در هوای شهرها وسایل نقلیه است. NO2 منتشرشده از این وسایل و سایر منابع انتشار کم است و مهم‌ترین عواملی که به شکل‌گیری NO2 کمک می‌کند، واکنش NO با O3، رادیکال‌های پروکسی ارگانیک و رادیکال‌های هیدروپروکسی موجود در جو است. این دو رادیکال از طریق اکسیداسیون VOC های با منشأ فعالیت‌های انسانی و VOC های با منشأ طبیعی به‌وجود می‌آید.

نور خورشید نیز بر تمرکز NO2 تأثیر منفی دارد و سبب تجزیه آن در طول روز می‌شود. ضرایب برآوردشده برای درجه حرارت در تمام مدل‌ها (فصول) منفی و چشمگیر است. البته میزان ضریب برآوردشده درجه حرارت در زمستان به‌دلیل کاهش میزان این درجه از سایر فصول کمتر است. البته درجه حرارت علاوه بر تأثیر منفی بر تمرکز NO2، به‌دلیل تأثیر بر میزان مصرف سوخت‌های فسیلی به‌دنبال کاهش دما سبب افزایش میزان NOx ها و در نتیجه افزایش NO2 در فصول سرد سال می‌شود.

ضرایب برآوردشده برای متغیر طول معابر شریانی درجه یک و دو نیز در تمام مدل‌ها مثبت و معنادار، و نشان‌دهنده تأثیر مثبت و قوی این متغیرها بر تشکیل NO₂ است، همچنین در اثبات این تئوری که نواحی کنار معابر اصلی شرایط مساعدی برای تشکیل NO₂ فراهم می‌کنند، یاری‌رسان است. درضمن، معابر جمع و پخش‌کننده و محلی به‌دلیل تأثیر ناچیز از مدل حذف شده‌اند.

باید توجه داشت رابطه میان کاربری‌های معابر، مسکونی، تجاری-اداری، صنعتی و معابر و تمرکز NO₂ در تمام مدل‌ها به‌جز برای کاربری مسکونی در مدل تابستان مثبت است؛ زیرا این کاربری‌ها تولیدکننده NO_x ها هستند. دلیل منفی بودن رابطه میان کاربری مسکونی و تمرکز NO₂ در فصل تابستان کاهش سوخت‌های فسیلی واحدهای مسکونی در این فصل، و به‌دنبال آن کاهش چشمگیر انتشار NO_x ها از این منابع است. تأثیر سرعت باد بر تمرکز NO₂ نیز با مبانی تئوریک تطابق ندارد. همان‌طور که درخصوص آلاینده ازن نیز گفته شد، وزش باد با سرعت کم سبب تسهیل واکنش‌های شیمیایی و تمرکز بیشتر آلاینده می‌شود و برعکس وزش بادهایی با سرعت زیاد آلاینده‌ها را پراکنده و تمرکز آن‌ها را کمتر می‌کند. البته ضرایب به‌دست‌آمده درخصوص تمرکز NO₂ در مدل‌های رگرسیونی با این گفته تطابق ندارد و تمام ضرایب به‌دست‌آمده مثبت است، این ضرایب برای درصد رطوبت موجود در جو نیز در تمام مدل‌ها منفی است که نشانگر تأثیر منفی این متغیر بر تمرکز آلاینده NO₂ است.

به‌منظور نشان دادن تأثیر جو بالا بر تمرکز آلاینده NO₂ نیز از شاخص شولتر استفاده شده است. همان‌طور که در مطالعات فصل‌های قبل اشاره شد، هرچه‌قدر میزان این شاخص کاهش یابد، نشان‌دهنده ناپایداری بیشتر جو بالاست. ضرایب به‌دست‌آمده برای این شاخص در تمام مدل‌های رگرسیونی NO₂ نشان‌دهنده رابطه مثبت میان شاخص شولتر و تمرکز NO₂ است.

در پایان، با توجه به یافته‌های رگرسیونی، آلاینده‌ها به تفکیک فصول برای سال ۲۰۱۰ در چهار ایستگاه (برای اعتبارسنجی مدل انتخاب شده بودند) پیش‌بینی شد و نتایج به‌دست‌آمده با مقادیر واقعی اندازه‌گیری و در ایستگاه‌ها مقایسه شد تا اعتبار مدل سنجیده شود.

جدول ۴. تحلیل رگرسیونی آلاینده NO₂ و متغیرهای مؤثر بر تمرکز این آلاینده

فصل			بهار			تابستان			پاییز			زمستان			
ضرایب			pr	T value	تجزیه	pr	T value	تجزیه	pr	T value	تجزیه	pr	T value	تجزیه	
ضریب ثابت			۰/۰۰۰۱	-۱۲/۳۵	-۱۳۰	۰/۰۰۰۱	-۲۴۷/۱۲	-۲۰/۱۴	۰/۰۰۰۱	-۹۲/۳۶	-۱۴/۲۵	۰/۰۰۰۱	۳۵/۶۳	۱۲/۳۷	۰/۰۰۰۱
معابر شریانی درجه ۱			۰/۰۰۰۱	۲۱/۴۱	۵/۴۱	۰/۰۰۰۱	۶/۲۱	۲۴/۱۰	۰/۰۰۰۱	۶/۸۷	۱۲/۲۴	۰/۰۰۰۱	۵/۱۴	۳/۶۲	۰/۰۰۰۱
معابر شریانی درجه ۲			۰/۰۰۰۱	۱۸/۷۱	۳/۲۷	۰/۰۰۰۱	۲/۸۷	۱۲/۵۰	۰/۰۰۰۱	۲/۶۴	۸/۶۷	۰/۰۰۰۱	۱/۴۲	۲۱/۹۷	۰/۰۰۰۱
کاربری مسکونی در			۰/۰۰۰۱	۵/۳۴	۱/۷۴	۰/۰۰۰۱	-۰/۴۸	-۹/۳۴	۰/۰۰۰۱	۲/۱۴	۴/۶۸	۰/۰۰۰۱	۰/۱۰	۰/۴۵۸	۰/۰۰۰۱
کاربری تجاری-اداری			۰/۰۰۰۱	۱۰/۶۸	۱/۳۶	۰/۰۰۰۱	۱/۱۲	۱۷/۴۳	۰/۰۰۰۱	۱/۰۴	۵/۲۷	۰/۰۰۰۱	۰/۹۸	۶/۹۰	۰/۰۰۰۱
کاربری صنعتی-			۰/۰۰۰۱	۳۱/۲۳	۲/۱۲	۰/۰۰۰۱	۱/۶۸	۱۱/۶۷	۰/۰۰۰۱	۱/۸۳	۲۳/۷۴	۰/۰۰۰۱	۱/۴۳	۹/۷۵	۰/۰۰۰۱
کاربری سبز و باز در			۰/۰۰۰۱	-۱/۴	-۰/۴۱	۰/۰۰۰۱	-۰/۵۴	-۱۱/۳۲	۰/۰۰۰۱	-۰/۲۴	-۳۰/۹۲	۰/۰۰۰۱	-۰/۲	-۰/۸۷	۰/۰۶۸
درجه حرارت			۰/۰۰۰۱	۲۰/۱۵	-۳/۱	۰/۰۰۰۱	-۴/۲	-۲۰/۳۵	۰/۰۰۰۱	-۲/۶۵	-۱۵/۴۳	۰/۰۰۰۱	-۱/۵۶	-۵/۷۱	۰/۰۳۴
سرعت باد			۰/۰۰۰۱	۱۲/۲۴	۱/۳	۰/۰۰۰۱	۰/۱۸	۵/۳۶	۰/۰۰۰۱	۱/۳۶	۲/۲۶	۰/۰۰۰۱	۱/۷۹	۱۰/۸۷	۰/۰۰۰۱
رطوبت			۰/۰۰۰۱	-۱۵/۴۳	-۰/۸۲	۰/۰۰۰۱	-۱/۷۴	۱۴/۳۲	۰/۰۰۰۱	-۲/۱۶	-۶/۰۸	۰/۰۰۰۱	-۰/۳۳	-۱۷/۸۶	۰/۰۰۰۱
شاخص‌های جو بالا			۰/۰۰۰۱	۳/۹۷	۱/۳۴	۰/۰۰۰۱	۱/۲۵	۱۲/۹۷	۰/۰۰۰۱	۲/۴۲	۵/۳۶	۰/۰۰۰۱	۳/۴۱	۳۵/۷۷	۰/۰۰۰۱
R2			۰/۹۶۵			۰/۹۸۱			۰/۹۶۹			۰/۹۴۴			

منبع: شرکت کنترل کیفیت هوای شهر تهران، اداره کل محیط زیست استان تهران، اداره کل هواشناسی کشور، مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران، سایت دانشگاه وایومینگ، محاسبات نگارندگان

جدول ۵. اعتبارسنجی مدل رگرسیونی به تفکیک آلاینده‌ها و فصل‌ها

آلاینده	فصل	میانگین آلاینده پیش‌بینی شده				میانگین آلاینده مشاهده شده				تفاوت میان میانگین پیش‌بینی شده و میانگین مشاهده شده			
		استاندارد	منطقه ۴	منطقه ۱۱	منطقه ۱۹	استاندارد	منطقه ۴	منطقه ۱۱	منطقه ۱۹	استاندارد	منطقه ۴	منطقه ۱۱	منطقه ۱۹
CO	بهار	۶/۴۲	۲/۰۸	۳/۵۲	۳/۱۴	۵/۱۵	۲/۳۶	۲/۹۵	۳/۷۳	۱/۲۷	-۰/۲۸	-۰/۵۷	-۰/۵۹
	تابستان	۷/۰۴	۳/۴۷	۲/۲۶	۳/۱۲	۵/۴۶	۲/۷۵	۳	۳/۹۲	۱/۵۸	۰/۷۲	-۰/۷۴	-۰/۸
	پاییز	۸/۱۴	۴/۰۸	۳/۱۹	۵/۱۴	۶/۸۴	۳/۸۷	۳/۷۷	۴/۶۱	۱/۳	۰/۲۱	-۰/۵۸	۰/۵۳
NO2	بهار	۸/۷۴	۳/۸۹	۳/۰۸	۵/۲۶	۷/۳۶	۳/۱۵	۳/۴۶	۴/۲۹	۱/۳۸	۰/۷۴	-۰/۳۸	-۰/۹۷
	تابستان	۶۱/۲۴	۸۳/۱۲	۴۲/۸۷	۳۸/۴۷	۵۹/۰۳	۸۳/۷۲	۴۴/۵۶	۳۷/۳۲	۲/۲۱	-۰/۶	-۱/۶۹	۱/۱۵
	پاییز	۵۰/۰۸	۹۱/۱۵	۴۵/۶۸	۳۸/۷۸	۴۸/۰۵	۹۲/۰۷	۴۷/۸۹	۳۷/۶۲	۲/۰۳	-۰/۹۲	-۲/۲۱	۱/۱۶
PM10	بهار	۶۹/۴۷	۱۱۰/۲۴	۶۵/۲۷	۵۵/۱۸	۶۸/۷۰	۱۱۵/۲	۶۸/۴۱	۵۷/۱۴	۰/۷۷	-۴/۹۸	-۳/۱۴	-۱/۹۶
	تابستان	۵۹/۴۱	۹۵/۰۲	۴۷/۴۵	۴۴/۲۱	۵۸/۳۷	۹۵/۶۹	۴۸/۳۰	۴۳/۷۷	۱/۰۴	-۰/۶۷	-۰/۸۵	۰/۴۴
	پاییز	۱۱۰/۴۱	۷۹/۵۸	۸۱/۲۴	۹۸/۱۴	۱۲۸/۵۵	۸۵/۵۷	۸۹/۵۷	۱۱۸/۵۴	-۱۸/۱۴	-۵/۹۹	-۸/۳۳	-۲/۰۴
PM10	بهار	۱۱۲/۰۷	۸۱/۴۵	۹۴/۲۳	۹۸/۷۴	۱۲۰/۷۱	۸۰/۹۵	۹۰/۷۲	۱۰۷/۶۲	-۸/۶۴	۰/۵	۳/۵۱	-۸/۸۸
	تابستان	۱۰۴/۲۴	۷۴/۵۸	۱۱۰/۲۴	۱۳۱/۲	۱۰۸/۸۵	۸۸	۱۰۶/۳۴	۱۵۱/۷۹	-۴/۶۱	-۱۳/۴۲	۳/۹	-۹/۵۹
	پاییز	۷۸/۲۴	۸۴/۲۴	۷۹/۲۴	۹۷/۴۵	۸۸/۹۸	۸۹/۴۴	۸۷/۱۶	۱۰۸/۱۷	-۱۰/۷۴	-۵/۲	-۷/۹۲	-۱۰/۷۲

منبع: شرکت کنترل کیفیت هوای شهر تهران، اداره کل محیط زیست استان تهران، اداره کل هواشناسی کشور، مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران، سایت دانشگاه وایومینگ، محاسبات نگارندگان

در جدول شماره ۵ تفاوت‌هایی میان پیش‌بینی مدل و اندازه واقعی آلاینده‌ها به تفکیک آلاینده‌ها و فصل‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، پیش‌بینی آلاینده‌های NO₂، CO در مقایسه با آلاینده PM₁₀، همچنین پیش‌بینی‌های صورت گرفته در فصول بهار و تابستان در مقایسه با پاییز و زمستان دقت بیشتری دارد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش هدف اصلی پیش‌بینی توزیع فضایی آلاینده‌های NO₂، CO و PM₁₀ با استفاده از مدل رگرسیون کاربری اراضی (LUR) است؛ به همین دلیل پس از جمع‌آوری داده‌ها و ارائه مدل رگرسیونی، اعتبارسنجی مدل صورت گرفت که نتایج آن درخصوص آلاینده‌های NO₂ و CO به‌ویژه در فصول گرم سال حکایت از قابلیت زیاد آن در پیش‌بینی این آلاینده‌ها دارد. البته پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده در این خصوص دوره طولانی‌تری برای مدل‌سازی انتخاب شود تا کارایی مدل در دوره‌های بلندمدت نشان داده شود.

سپاسگزاری

در پایان لازم می‌دانم از حمایت مالی مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران و مدیریت این مرکز تشکر و قدردانی لازم را به‌جا آورم.

منابع

۱. اداره کل محیط زیست استان تهران، ۱۳۸۹، **داده‌های مربوط به ایستگاه‌های سنجش آلودگی شهر تهران**.
۲. اداره کل هواشناسی کشور، ۱۳۸۹، **داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی مربوط به ایستگاه‌های سینوپتیک شهر تهران**.
۳. شرکت کنترل کیفیت هوای شهر تهران، ۱۳۸۹، **داده‌های مربوط به ایستگاه‌های سنجش آلودگی شهر تهران**.
۴. عرفان‌منش، مجید و مجید افیونی، ۱۳۸۵، **آلودگی محیط زیست آب، خاک و هوا**، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان.
۵. متکان، علی‌اکبر و دیگران، ۱۳۸۹، **کاربرد مدل LUR در تخمین آلاینده‌های CO و PM10 (مطالعه موردی: شهر تهران)**، همایش ملی ژئوماتیک، سازمان نقشه‌برداری، تهران.
۶. مهرگان، نادر و حسن دلیری، ۱۳۸۹، **کاربرد استاتا در آمار و اقتصادسنجی**، انتشارات نور علم و دانشکده علوم اقتصادی، تهران.
۷. مرکز مطالعات برنامه‌ریزی شهر تهران، ۱۳۸۵، **نقشه کاربری اراضی و معابر شهر تهران** Tehran urban planning and research centre Urban land use map of Tehran, 2006, Tehran. *(In Persian)*
8. Tehran environmental organization. Tehran air pollution monitoring station data. 2010, Tehran *(In Persian)*.
9. Iran metrological organization, Tehran synoptic metrological stations data. 2010, Tehran *(In Persian)*
10. Tehran air quality monitoring organization. Tehran air pollution monitoring data. 2010, Tehran *(In Persian)*
11. ErfanManesh, M., and Afioni, M., Environmental pollution, water, soil and air, Isfahan industrial university, 2006, Isfahan. *(In Persian)*
12. Matkan, A, et al., 2010, **Application of LUR model in estimating of CO and PM10 (case study: Tehran city)**, International Geomatics conference, Survey organization of Iran, Tehran. *(In Persian)*
13. Mehregan, N., and, Deliri H., 2010, **Application of STATA in statistic and Econometric**, Noore Elm and faculty of economic science publication, 2010 , Tehran. *(In Persian)*
14. Briggs DJ, et al., 1997, **Mapping urban air pollution using GIS: a regression-based approach**, Int J Geogr Inform Sci, Vol. 11 , Issue.7 , pp. 699° 718.
15. Briggs DJ, et al., 2000, **A regression-based method for mapping traffic-related air pollution: Application and testing in four contrasting urban environments**, Sci Total Environ, Vol.253 , Issue1-3, pp.151° 167. [PubMed: 10843339]
16. Gilbert NL, et al., 2005, **Assessing spatial variability of ambient nitrogen dioxide in Montreal, Canada, with a land-use regression model**, J Air Waste Manage Assoc, Vol.55 , Issue 8 , pp.1059° 1063.
17. Jerrett M, et al., 2005, **A review and evaluation of intraurban air pollution exposure models**. J Expos Anal Environ Epidemiol, Vol. 15 , Issue 2, pp.185° 204.
18. Jerrett M., and Finkelstein, M.M, 2007, **inkelstein,Modelling the intra-urban variability of ambient traffic pollution in torento**, Canada, J Toxicol Environ Health A, Vol.70, No.3-4, pp. 12-200.
19. Ross Z, et al., 2006, **Nitrogen dioxide prediction in Southern California using land use regression modeling: Potential for environmental health analyses**. J Expos Sci Environ Epidemiol, Vol.16, Issue 2, pp.106° 114.
20. Ryan P.H, 2007, **A comparison of proximity and land use regression traffic exposure models and wheezing in infants**, Environ Health Perspect, Vol.??? No.115, pp.278° 284. [PubMed: 17384778]
21. Zhu Y, et al., 2002, **Concentration and size distribution of ultrafine particles near a major highway**. J Air Waste Manage Assoc, Vol.52 , Issue. 9, pp.1032° 1042.