# تحلیل و مدلسازی اثرات محیطی مؤثر بر آلاینده PM2.5 با استفاده از روش رگرسیون کاربری اراضی در شهر تهران


## چکیده

امروزه آلودگی هوا یکی از معضلات توسعه صنعتی است که با افزایش جمعیت، گسترش شهرنشینی و توسعه حمل‌ونقل، روز به روز برشدت آن افزوده می‌شود. شهر تهران به‌عنوان بزرگ‌ترین و پرجمعیت-ترین شهر کشور به‌دلیل شرایط خاص جغرافیایی، اجتماعی، فرهنگی و توسعه شهری دچار معضل آلودگی هواست. در این پژوهش با استفاده از داده‌های سه روز متوالی از ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا در زمستان ۹۱ و فصل‌های بهار، تابستان و پاییز سال ۹۲، با به‌کارگیری روش رگرسیون کاربری اراضی مبتنی بر رگرسیون خطی چندمتغیره، به پیش‌بینی غلظت آلاینده PM2.5 در شهر تهران پرداخته شده است. همچنین با ترکیب غلظت آلاینده مزبور با پارامترهای محیطی مؤثر از قبیل انواع کاربری زمین، شبکه راه‌ها، ارتفاع، تراکم جمعیت و پارامترهای هواشناسی، نقشه‌هایی از چگونگی وضعیت توزیع مکانی آلودگی هوا تهیه شد. نتایج حاصل از مدل نشان می‌دهد بیشترین و کمترین عامل مؤثر بر غلظت آلاینده PM2.5 ، به ترتیب شبکه راه‌ها و کاربری نظامی می‌باشد. همچنین بررسی پارامترهای آماری نشان داد ضریب تعیین مدل پیشنهادی($R^2$=0.61-0.72) در مقایسه با سایر مطالعات داخلی و خارجی انجام گرفته در این حوزه($R^2$=0.61-0.69)، از توانایی مناسبی در تخمین غلظت آلاینده PM2.5 در شهر تهران برخوردار است.



**واژه‌های کلیدی:** آلودگی هوا، رگرسیون کاربری اراضی، آلاینده PM2.5، سیستم‌های اطلاعات مکانی.


## ۱ – مقدمه

ورود ذرات، مولکول‌ها و مواد مضر به جو زمین را آلودگی هوا می‌گویند که می‌تواند موجب بیماری و مرگ انسان‌ها و موجودات زنده از قبیل حیوانات، محصولات کشاورزی و حتی تخریب منابع طبیعی(زیست‌محیطی) و منابع مصنوعی(آثار باستانی) شود[۱]. قرار گرفتن طولانی مدت در معرض آلودگی هوا با اثرات زیان‌بار مختلفی از قبیل کاهش طول عمر، مشکلات تنفسی، قلبی و عروقی، اختلال در تولید مثل و مشکلات دستگاه گوارش و دستگاه عصبی در ارتباط است[۲, ۳]. آلودگی هوا در شهر تهران عمدتاً مصنوعی و ناشی از فعالیت وسایل نقلیه است به‌طوریکه روزانه حدود ۳۰ تن را به کام مرگ می‌فرستد. تردد بسیار زیاد وسایل نقلیه ، ترافیک‌های سنگین، مصرف زیاد انرژی، وضعیت توپوگرافی و جغرافیایی خاص و فراوانی سامانه‌های پایدار جوی موجب شده است که این شهر در ردیف آلوده‌ترین شهرهای جهان قرار گیرد[۴].

بررسی‌ها و تحقیقات همه‌گیرشناسی در مسئله‌ی آلودگی هوا ثابت کرده شهرها و مناطق آلوده در مقایسه با مناطقی که از آلودگی کمتری برخوردارند، دارای نرخ بیماری و مرگ و میر بیشتری هستند[۵]. به عبارت دیگر در مناطقی که تعداد روزهای بیشتری کیفیت هوا ناسالم گزارش شود، به شکل معناداری تعداد مرگ و میرها نیز افزایش یافته و هرچه هوای شهرها در یک بازه زمانی سالم‌تر باشد، امکان کاهش مرگ و میر شهروندان نیز به وقوع می‌پیوندد.

طی چند سال اخیر آلاینده ذرات معلق، به‌ویژه ذرات معلق با قطر کوچکتر از ۲/۵ میکرون(PM2.5) به عنوان آلاینده شاخص شهر تهران مطرح شده و طی سال ۱۳۹۳، ۱۱۶ روز به لحاظ آلاینده PM2.5 و ۹ روز از منظر آلاینده ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون(PM10) در وضعیت نامطلوب قرار داشته است[۶]. این ذرات که می‌توانند تا اعماق ریه و دستگاه تنفسی نفوذ کنند، زمانی‌که با آلاینده‌های گازی همراه شوند به مراتب خطرناک‌تر خواهند بود. بنابراین باتوجه به اندازه و نوع آن‌ها، به راحتی در بدن جذب شده و به همین علت می‌توانند بسیار آسیب‌رسان باشند[۷, ۸].

به منظور مشخص کردن اثرات نامطلوب آلودگی هوا، به اطلاعات دقیقی در مورد غلظت آلاینده‌های محیط در قدرت تفکیک مکانی مناسب نیاز است. از این‌رو ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا به منظور ارائه‌ی تخمین‌های مکانی در

مقیاس مناسب، فاقد تعداد کافی و پوشش لازم می‌باشند و روش‌های مبتنی بر درونیابی غلظت آلاینده‌ها، بر مبنای میزان فاصله از ایستگاه‌های سنجش ، مقدار خطای زیادی در مقایسه با روش‌های مدلسازی پیشرفته‌تر ایجاد می-کنند[۹].

مدل‌های رگرسیون کاربری اراضی[۱] تخمین‌های مکانی مناسبی از آلودگی هوا ارائه می‌دهد. این مدل‌ها از طریق ترکیب اطلاعات محیطی(از قبیل اماکن صنعتی، تراکم جمعیت و حجم ترافیک) با داده‌های غلظت آلاینده‌های جمع‌آوری شده از ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا، می‌توانند در مطالعات بهداشت و سلامت جامعه و تعیین میزان قرار گرفتن افراد در معرض آلودگی هوا مورد استفاده قرار بگیرند که در ادامه توضیح داده خواهد شد[۱۰, ۱۱].

## ۲ - پیشینه تحقیق

در این بخش چندین مورد از تحقیقات انجام گرفته در حوزه مدلسازی مکانی آلودگی هوا بررسی می‌گردد:

در سال ۱۳۸۸ متکان و همکاران و در سال ۱۳۹۳ نورپور و فیض و در سال ۲۰۱۵ میلادی زو[۲] و همکاران، به ترتیب به تعیین تغییرات مکانی و زمانی آلاینده‌های CO, PM10 و SO2, NO2, PM2.5, PM10 و آلاینده PM2.5 با استفاده از روش‌های مختلف درونیابی و مدل LUR به کمک پارامترهای کاربری اراضی، حجم ترافیک، ارتفاع، جمعیت و راه پرداختند. در نهایت محققان با توجه به آماره خطای میانگین مربعات[۳]، به این نتیجه رسیدند به‌منظور درونیابی آلاینده-های PM10, PM2.5 روش اسپیلاین[۴] و آلاینده‌های NO2, SO2, CO روش کوکریجینگ[۵] همراه با سه پارامتر دما، جهت و سرعت باد مناسب‌ترین روش است. همچنین نتایج حاصل از مدل LUR نشان داد مؤثرترین عامل بر آلاینده-هایSO2, NO2, PM2.5, CO حجم ترافیک بوده است در حالیکه مهم‌ترین عامل مؤثر بر آلاینده PM10 اماکن صنعتی موجود می‌باشد. به‌علاوه مطالعات زو نشان داد روش LUR در مقایسه با روش درونیابی کریجینگ معمولی[۶]، از دقت بالاتری در مدلسازی غلظت PM2.5 برخوردار است. بدین صورت که نرخ خطای مدل LUR برابر ۶/۱۳ درصد در مقابل خطای ۷/۰۱ درصدی روش کریجینگ معمولی می‌باشد[۱۲-۱۴].

در سال ۲۰۱۳ رابینسون[۷] و همکاران، در پژوهشی به منظور مدلسازی آلاینده NO2 در انگلستان سه تکنیک مکانی را با هم مقایسه و ارزیابی نموده‌اند. برای این منظور از اطلاعات غلظت NO2 ایستگاه‌های سنجش استفاده شد و سه روش مورد استفاده عبارتند از: کریجینگ ساده[۸]، کریجینگ معمولی و کریجینگ ساده با میانگین تغییریافته موضعی[۹]. دو روش اول تنها از متغیر اولیه استفاده می‌کنند. اما در روش سوم از داده‌های ثانویه‌ای به منظور بهبود و کاهش عدم اطمینان به منظور تخمین و ارائه مدل پراکنش استفاده می‌کنند. این داده ثانویه NOx می‌باشد که از مدل‌های پراکنش استخراج شده است[۱۵].

---

[۱] Land use regression(LUR)

[۲] Zou, B

[۳] Mean Square Error

[۴] Spline

[۵] Co-kriging

[۶] Ordinary Kriging (OK)

[۷] Robinson, D. P.

[۸] Simple kriging

[۹] Simple kriging with a locally varying mean

در سال ۱۳۹۴ بهاری و همکاران و در سال ۲۰۱۵ میلادی برتازون[۱] و همکاران، به‌منظور مطالعه و بررسی تغییرات مکانی آلاینده NO2 و PM2.5 از روش رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی استفاده نمودند. آن‌ها در این مطالعه از روشی جدید برای بررسی تأثیرات مکانی در مدل LUR استفاده کردند. بدین صورت که با اضافه کردن پارامترهای سرعت و جهت باد به یک مشخصه وزندار جغرافیایی، تا حد زیادی عملکرد مدل را بهبود بخشیده و همچنین به‌طور هم‌زمان دو منبع عمده‌ی خطا در رابطه با واریانس خطای مکانی از قبیل خودهمبستگی و عدم ایستایی مکانی در مدل LUR را برطرف کردند[۱۶, ۱۷].

تحقیقات نشان می‌دهد علی‌رغم کاربرد متعدد رگرسیون کاربری اراضی در بررسی و مدلسازی انواع آلاینده‌ها در دنیا و همچنین اثرات زیان‌بار آلاینده PM2.5، این روش از سوی محققان داخلی کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

## ۳ - مواد و روش‌ها

شهر تهران در دامنه‌ی جنوبی رشته‌کوه البرز و در حد فاصل طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۲ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۶ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی، با حدود ۷۳۰ کیلومتر مربع مساحت گسترده شده است. ارتفاع شهر در بلندترین نقاط شمالی به حدود ۲۰۰۰ متر و در جنوبی‌ترین نقاط به ۱۰۵۰ متر از سطح دریا می‌رسد[۱۸]. تهران با ۸/۲ میلیون سکنه پرجمعیت‌ترین شهر ایران است که به دلیل مهاجرت‌های صورت گرفته از شهرهای اطراف در طول روز، جمعیتش به بیش از ۱۰ میلیون نفر می‌رسد. با توجه به مناطق صنعتی طبقه‌بندی نشده به‌خصوص در غرب تهران، سرعت پایین باد و جهت نامناسب آن(جهت غالب غربی یا غرب به شرق)، تراکم جمعیت و طبعاً ترافیک‌های بسیار سنگین در اکثر ساعت‌های شبانه‌روز، امروزه آلودگی هوا به یکی از معضلات اساسی این شهر تبدیل شده است.

اولین گام در راستای حل هر مشکل شناخت کامل و درست آن مسئله می‌باشد. لذا به منظور کنترل آلودگی هوا نیز نیازمند اطلاع از چگونگی توزیع دقیق آلاینده‌ها در منطقه موردنظر هستیم. در این تحقیق جهت انجام بررسی و مدلسازی آلودگی هوا، روش رگرسیون کاربری اراضی مبتنی بر رگرسیون خطی چندگانه مورد استفاده قرار گرفت. در این روش از رگرسیون خطی با هدف تخمین میزان غلظت آلاینده‌ها در سطح شهر استفاده می‌شود. برای این منظور مقادیر غلظت اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های سنجش به عنوان متغیر وابسته و پارامترهای محیطی نظیر نوع کاربری، ترافیک، ارتفاع، تراکم جمعیت و پارامترهای هواشناسی به‌عنوان پارامتر مستقل در مدلسازی و توسعه معادلات رگرسیونی در نظر گرفته می‌شوند. در واقع این مدل، ترکیبی از سیستم اطلاعات مکانی و روش‌های رگرسیونی چند متغیره خطی می‌باشد.

### ۳-۱ آماده‌سازی داده‌های مورد استفاده

در این بخش در نظر داریم تا پارامترهایی که اطلاعات واقعی آن‌ها در دسترس بودند را جهت مدلسازی، وارد مدل ارائه شده نماییم. این پارامترها عبارتند از: کاربری اراضی، ارتفاع، شبکه راه‌ها و معابر، جمعیت و پارامترهای هواشناسی.

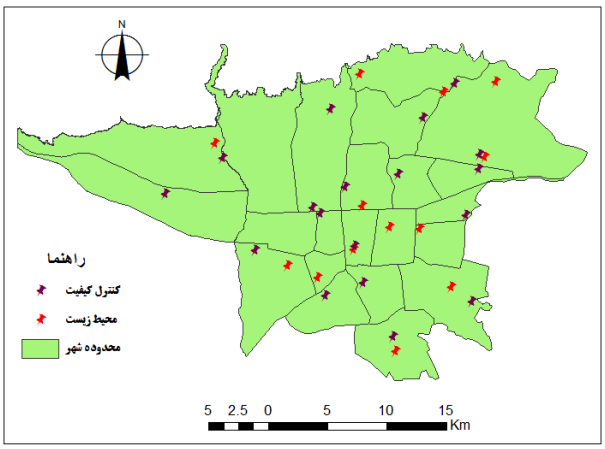
در ادامه درمورد پارامترها و نحوه آماده‌سازی آن‌ها توضیح داده شده است.

#### ۳-۱-۱ آلاینده PM2.5

در بیشتر مطالعات صورت گرفته در حوزه مدلسازی آلودگی هوا، میانگین غلظت آلاینده‌ها بین یک تا چهارده روز به عنوان پارامتر وابسته درنظر گرفته شده است. در این پژوهش با توجه به داده‌های مورد دسترس از غلظت آلاینده PM2.5، میانگین ۲۴ساعته از مقادیر غلظت ایستگاه‌های سنجش حاوی اطلاعات متعلق به دو سازمان حفاظت از محیط‌زیست و شرکت کنترل کیفیت هوای شهر تهران در حدود ۲۵ ایستگاه، برای مدت زمان سه روز متوالی در هر

[۱] Bertazzon, S.

فصل در روزهای ۱۳تا۱۵ بهمن ماه سال ۹۱ و ۵تا۷ فروردین، ۱تا۳ مرداد و ۱۷تا۱۹ آذر سال ۹۲ درنظر گرفته شده و سپس وارد مدل گردید. شکل (۱) موقعیت مکانی این ایستگاه‌ها را نمایش می‌دهد.




**شکل ۱: موقعیت ایستگاه‌های سنجش آلاینده‌ی PM2.5 در شهر تهران**

### ۳-۱-۲ کاربری اراضی

به منظور ارزیابی اثرات کاربری زمین بر روی میزان غلظت آلاینده‌ی ذرات معلق و پهنه‌بندی این آلاینده، نقشه کاربری اراضی شهر در مقیاس ۱:۲۰۰۰ که توسط مرکز اطلاعات جغرافیایی شهرداری تهران تهیه گردیده مورد استفاده قرار گرفت. این نقشه شامل ۹ زیرگروه مسکونی، صنعتی، اداری و تجاری، فضای سبز، بایر، حمل و نقل، خدماتی و تاسیساتی، نظامی و کشاورزی می‌باشد. در این تحقیق مساحت هر کاربری در حریم‌هایی[۱] به شعاع‌های ۱۵۰ ، ۳۰۰ ، ۶۰۰ ، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ متر در اطراف هر ایستگاه محاسبه شده و نتایج آن وارد مدل شد. بررسی مطالعات پیشین حاکی از آن است که انتخاب شعاع‌های بیش از ۲۰۰۰ متر در فضای شهری، نمی‌تواند نتایج قابل قبولی ارائه نماید[۳, ۱۱].

### ۳-۱-۳ ارتفاع

ارتفاع یکی از پارامترهای محیطی است که با توجه به شکل‌گیری پدیده وارونگی دمایی در کلان‌شهرها نقش قابل توجهی در میزان در معرض قرارگیری افراد در برابر آلاینده‌های هوا دارد. در همین راستا مدل رقومی ارتفاعی منطقه با قدرت تفکیک ۳۰ متر از سنجنده Landsat 7 استخراج گردیده و ارتفاع بدست آمده از آن به عنوان یک پارامتر مستقل وارد مدل گردید.

### ۳-۱-۴ شبکه راه‌ها و معابر

اطلاعات راه‌های شهر تهران در سه زیرگروه بزرگراه، شریانی درجه یک و شریانی درجه دو تقسیم‌بندی شده و به منظور شناسایی اثر شبکه راه‌ها، مجموع طول هر یک از آن‌ها در حریم‌های در نظر گرفته شده اطراف هر ایستگاه سنجش محاسبه گردید.

### ۳-۱-۵ جمعیت

با توجه به نقش جمعیت در ایجاد و افزایش آلاینده‌های هوا، بنابراین تراکم جمعیت نیز به عنوان یکی از پارامترهای مستقل در حریم‌های در نظر گرفته شده در اطراف هر ایستگاه سنجش محاسبه و وارد مدل گردید.

---

[۱] Buffer

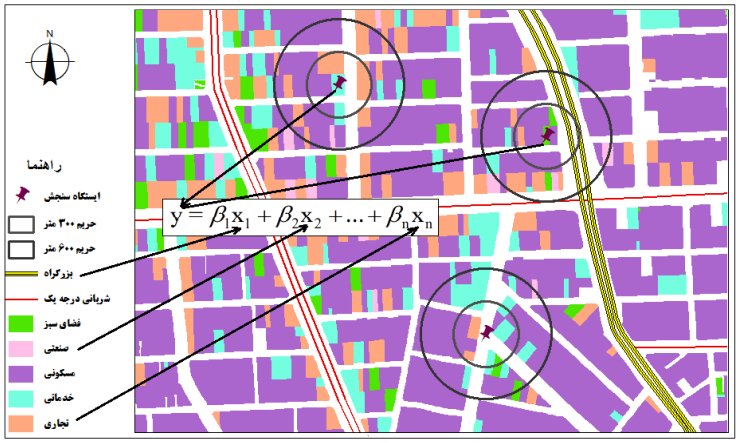
### ۳-۱-۶ پارامترهای هواشناسی

در این تحقیق به‌منظور تخمین پارامترهایی هواشناسی از قبیل دما، سرعت و جهت باد برای هر ایستگاه سنجش آلودگی در هر دوره، میانگین این پارامترها برای پنج ایستگاه هواشناسی شهر تهران محاسبه و به کمک روش کریجینگ[۱] درونیابی گردید. درنهایت مقدار این پارامترها برای ایستگاه‌ها و نقاط شبکه استخراج و وارد مدل شد.

### ۳-۲ روش رگرسیون کاربری اراضی مبتنی بر رگرسیون خطی چندمتغیره

مدل‌های رگرسیون کاربری اراضی در صورتیکه داده‌های ایستگاه‌های سنجش، داده‌های حمل‌ونقل و ترافیک، ارتفاع و انواع کاربری‌های اراضی در دسترس باشند قادرند تخمین‌های نسبتاً ارزان قیمت و قابل اعتمادی از میزان آلودگی هوای ناشی از ترافیک ارائه دهند. روش LUR بر اساس ویژگی‌های محیطی و ترافیکی پیرامون ایستگاه‌های سنجش، غلظت آلودگی هوا را پیش‌بینی می‌کند. به عبارت دیگر، این روش با استفاده از غلظت آلاینده‌های اندازه‌گیری شده(y) در ایستگاه‌ها(s) به عنوان متغیر وابسته و انواع کاربری‌های اراضی و راه‌ها($x_i$) در حریم‌هایی در اطراف ایستگاه‌ها به عنوان متغیر مستقل، سعی در ایجاد مدلی به منظور تخمین میزان آلودگی در سایر مناطق دارد. این روش همچنین می‌تواند متغیرهایی که بیشترین تأثیر را روی غلظت آلاینده‌ها می‌گذارند شناسایی می‌کند[۱۰].

شکل (۲) نمایی از مدل LUR را در حریم‌هایی با شعاع‌های متفاوت در اطراف هر ایستگاه سنجش نمایش می‌دهد.




**شکل ۲: عناصر یک مدل LUR شامل متغیر وابسته y و متغیرهای مستقل x**

به‌منظور پیاده‌سازی روش موردنظر از رگرسیون خطی چند متغیره[۲] استفاده کردیم. این روش، جهت تحلیل مشارکت فردی و اجتماعی دو یا چند متغیر مستقل در تغییرات یک متغیر وابسته مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین صورت که هدف، محاسبه‌ی تأثیر چندین متغیر مستقل بر روی یک متغیر هدف به‌طور همزمان می‌باشد. شکل کلی این مدل به صورت زیر تعریف می‌شود[۱۹]:

$$y = \beta_0 + \sum_{k=1}^{p} \beta_k \chi_k + \varepsilon \qquad (۱)$$

در رابطه (۱) $y$ متغیر وابسته، $\beta_0$ عرض از مبدأ، $\beta_k$ ضرایب مدل رگرسیون، $\chi_k$ متغیرهای مستقل، $\varepsilon$ خطای برازش منحنی و $k$ تعداد متغیرهای مستقل می‌باشند.

به‌منظور به دست آوردن ضرایب رگرسیون از روش کمترین مربعات استفاده شد، چرا که رایج‌ترین روش مورد استفاده در برازش خط رگرسیون به مشاهدات است به گونه‌ای که خطی مستقیم و با بهترین برازش به داده‌های مشاهداتی را از طریق کمینه کردن مجموع مربعات انحرافات قائم مربوط به هر نقطه تا خط رگرسیون محاسبه می‌کند[۱۹].

---

[۱] Kriging

[۲] Multi Linear Regression

### ۳-۳ معیارهای ارزیابی مدل

پارامترهای ارزیابی متعددی به‌منظور ارزیابی و اعتبارسنجی روش‌های آماری نظیر رگرسیون خطی وجود دارند. با توجه به آنکه اغلب مطالعات مدلسازی مکانی توزیع آلاینده‌ها از دو پارامتر $R^2$ و RMSE که به ترتیب ضریب تعیین[۱] و خطای جذر میانگین مربعات[۲] نام دارند؛ استفاده نموده‌اند[۳, ۱۱] در این پژوهش نیز دو پارامتر مذکور که به ترتیب در روابط ۲ و ۳ تعریف شده‌اند به کار گرفته شد:

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n \times \sigma_x \sigma_y}\right)^2 \quad (۲)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{\mathrm{n}}\sum(y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (۳)$$

که در روابط فوق $n$ تعداد مشاهدات مورد استفاده در مدل، $x_i$ مقدار $x$ برای $i$مین مقدار مشاهداتی، $\bar{x}$ میانگین مقدار مشاهدات، $y_i$ مقدار $y$ برای $i$مین غلظت پیش‌بینی شده، $\bar{y}$ میانگین غلظت‌های پیش‌بینی شده، $\hat{y}_i$ مقدار $i$مین غلظت پیش‌بینی شده ، $\sigma_x$ انحراف معیار مقادیر مشاهداتی و $\sigma_y$ انحراف معیار مقادیر پیش‌بینی شده می‌باشد.

### ۴ - نتایج و بحث

در این قسمت به منظور پهنه‌بندی آلاینده PM2.5 و ارزیابی دقت مدل پیشنهادی، غلظت‌ها در مدت زمان سه روز متوالی در زمستان سال ۹۱ و فصل‌های بهار، تابستان و پاییز سال ۹۲ به گونه‌ای انتخاب شد که ایستگاه‌ها، حاوی حداکثر اطلاعات بوده و عمل پیاده‌سازی مدل با بهترین ساختمان رگرسیون برای هر فصل به صورت مجزا انجام گرفت. بدین صورت که با توجه به محدوده اثرگذاری هر پارامتر در اطراف ایستگاه‌های سنجش، به محاسبه پارامترهای مربوطه در هر محدوده پرداخته و سپس میزان تأثیرگذاری هر پارامتر بر آلودگی هوا شناسایی شده و ضرایب هر یک با استفاده از روش‌های کمترین مربعات حاصل گردید. به‌منظور تخمین غلظت آلودگی هوا در شبکه‌ای از نقاط با فواصل ۷۰۰ متر بر روی محدوده شهر، معادله‌ای حاصل شد(جدول۱) که با استفاده از آن غلظت آلاینده موردنظر در تمامی نقاط شبکه در راستای بیشترین تأثیر هر متغیر به دست آمد. در نهایت مقدار غلظت ذرات معلق، از درونیابی مقادیر حاصل از نقاط شبکه و بر اساس برازش رویه‌ای بر سطح شهر، حاصل شد.

جهت انجام اعتبارسنجی مدل، در هر فصل به طور متوسط ۲۵ درصد از ایستگاه‌های سنجش، به‌طور تصادفی از مرحله مدلسازی حذف شده تا به‌عنوان مجموعه داده‌های تست در ارزیابی کارایی مدل پیشنهادی مورد استفاده قرار گیرند(جدول ۲). همچنین میزان تأثیرگذاری هر متغیر از طریق پارامتر آماری P-value مشخص می‌گردد. بدین صورت که هرچه مقدار این پارامتر بیشتر باشد، تأثیر متغیر بر افزایش غلظت آلودگی کمتر خواهد بود(جدول ۳).

معادله رگرسیونی و ارزیابی مدل پیشنهادی به ترتیب در جداول (۱) و (۲) و پهنه‌بندی غلظت آلاینده PM2.5 در فصول چهارگانه در اشکال (۳) تا (۶) نشان داده شده است.

---

[۱] Coefficient of determination

[۲] Root Mean Square Error(RMSE)

**جدول ۱: معادله رگرسیون کاربری اراضی[۱] در تخمین غلظت آلودگی هوا**

| دوره‌های زمانی | معادله مدل |
|---|---|
| زمستان | $-26.27 + 3.87\times10^{-5}\times Com_1500 + 6.98\times10^{-6}\times Res_300 + 0.0015\times Trans_150 + 2.5\times10^{-5}\times Cul_1500 + 0.048\times Hgt$ |
| بهار | $18.86 - 4.18\times10^{-6}\times Com_1000 + 3.66\times10^{-5}\times Res_300 + 3.8\times10^{-6}\times Uti_1500 - 0.00031\times Bar_150 + 0.013\times Pri_150$ |
| تابستان | $52.5 + 3.24\times10^{-5}\times Com_1500 - 1.946\times10^{-5}\times Mil_1000 + 1.62\times10^{-5}\times Res_1000 + 2.90\times10^{-5}\times Bar_1500 - 7.49\times10^{-5}\times Cul_1000 + 0.08\times Pri_150 - 0.029\times Hgt$ |
| پاییز | $25.08 + 6.9\times10^{-6}\times Trans_1500 - 5.74\times10^{-5}\times Uti_300 - 1.43\times10^{-5}\times Bar_1000 + 0.0018\times Cul_150$ |

سمت چپ علامت زیرخط نشان‌دهنده نوع متغیر و سمت راست آن بیانگر شعاع حریم می‌باشد. مثلا Com_1500 به معنای مساحت منطقه برای کاربری تجاری در حریم ۱۵۰۰ متری است.

**جدول ۲: ارزیابی و مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهداتی توسط پارامترهای آماری**

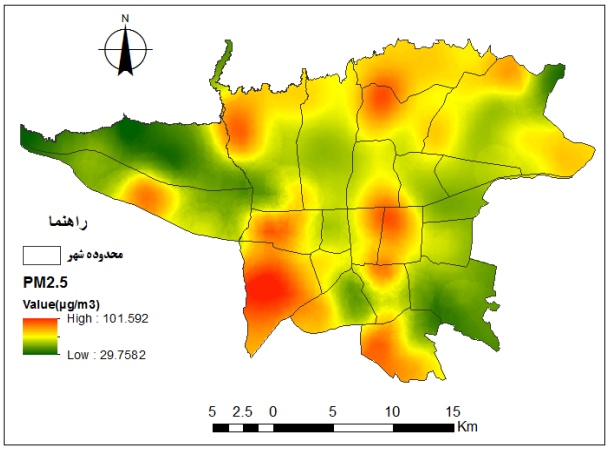
| دوره‌های زمانی | $R^{2*}$ | $R^{2**}$ | RMSE(µg/m3) |
|---|---|---|---|
| زمستان | ۰/۶۱ | ۰/۶۴ | ۶/۸۳ |
| بهار | ۰/۶۳ | ۰/۵۹ | ۴/۰۶ |
| تابستان | ۰/۷۲ | ۰/۷۳ | ۷/۸۲ |
| پاییز | ۰/۶۹ | ۰/۶۳ | ۶/۴۵ |

$R^{2*}$ بیانگر ضریب تعیین مدل و $R^{2**}$ نشان‌دهنده ضریب تعیین ایستگاه‌های تست می‌باشد.

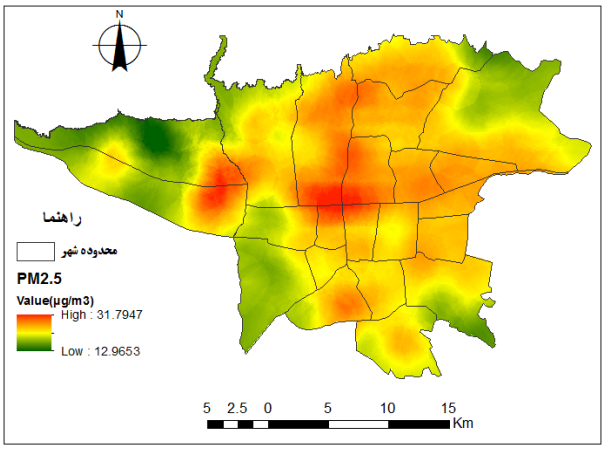
**جدول ۳: همبستگی میان آلاینده PM2.5 و پارامترهای مؤثر بر آلودگی هوا**

| پارامترهای موثر | P-value |
|---|---|
| تجاری | ۰/۲۲۸ |
| مسکونی | ۰/۱۷۵ |
| حمل‌ونقل | ۰/۰۶۹ |
| کشاورزی | ۰/۰۸۱ |
| خدماتی | ۰/۱۴۲ |
| بایر | ۰/۱۲۹ |
| نظامی | ۰/۲۵۶ |
| شریانی درجه یک | ۰/۰۰۱ |
| ارتفاع | ۰/۲۳۲ |

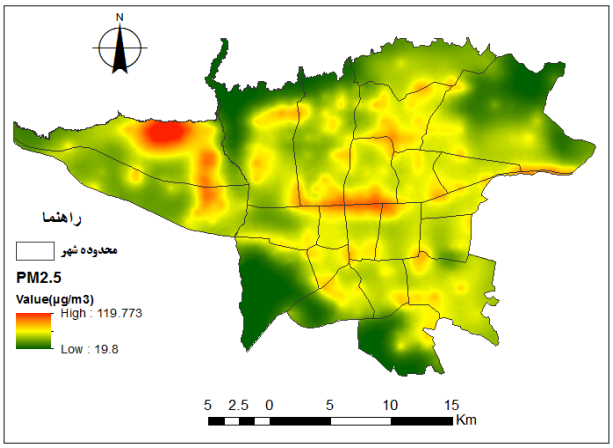
[۱] Com: commercial, Res: residential, Trans: transportation, Cul: cultivation, Uti: utility, Bar: barren, Mil: military, Pri: primary road, Hgh: Height



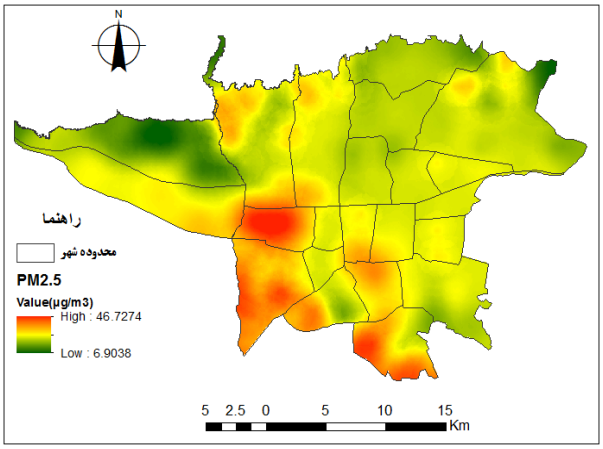

شکل ۳: غلظت آلاینده PM2.5 در فصل زمستان سال ۹۱




شکل ۴: غلظت آلاینده PM2.5 در فصل بهار سال ۹۲




شکل ۵: غلظت آلاینده PM2.5 در فصل تابستان سال ۹۲




شکل ۶: غلظت آلاینده PM2.5 در فصل پاییز سال ۹۲

بررسی پارامترهای آماری حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد مدل رگرسیون کاربری اراضی مبتنی بر رگرسیون خطی چندگانه که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت، دارای توانایی برازش ۰/۶۱ تا ۰/۷۲ تغییرات را نشان می‌دهد که در مقایسه با سایر تحقیقات صورت گرفته (۰/۶۱ تا ۰/۶۹)، از عملکرد بهتری برخوردار است[۱۳, ۱۴, ۲۰].

از جمله مهم‌ترین نتایج این پژوهش می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

با توجه به معادله حاصل از رگرسیون کاربری اراضی، مدل به درستی نشان داده در فصل زمستان به دلیل رخ دادن پدیده وارونگی دما، غلظت آلاینده‌ها در زیر لایه‌ی اینورژن به دام افتاده و بنابراین با افزایش ارتفاع به دلیل فاصله‌ی کمتر با لایه اینورژن، میزان غلظت آلودگی هوا نیز افزایش یافته است.

در فصل‌های بهار و تابستان که زمین‌های زراعی و مناطق کشاورزی دارای محصول می‌باشند، میزان غلظت PM2.5 در آن مناطق کاهش یافته و بالعکس در فصل‌های پاییز و زمستان به دلیل عدم وجود محصولات زراعی، غلظت آلاینده موردنظر با افزایش مواجه شده است. همچنین نتایج حاصل از مدل (جدول ۳) نشان می‌دهد بیشترین و کمترین عامل مؤثر بر غلظت آلاینده PM2.5 ، به ترتیب شبکه راه‌ها و کاربری نظامی می‌باشد.

## ۵-نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین ابزارها برای مدیریت وضعیت آلودگی هوا، مدل‌های مکانی توزیع آلاینده‌های هواست. با توجه به هزینه‌ی بالای تهیه و نگهداری ایستگاه‌های سنجش، طبیعتاً مدلسازی مکانی توزیع آلاینده‌ها تا حدودی با مشکل روبرو می‌شود. از این‌رو در این تحقیق با استفاده از روش‌های رگرسیونی که کارایی خوبی در تخمین غلظت آلاینده‌های ناشی از عوامل محیطی از خود نشان داده‌اند به کمک پارامترهای محیطی از قبیل کاربری اراضی، تراکم جمعیت، شبکه راه‌ها و معابر، ارتفاع و پارامترهای هواشناسی، به مدلسازی آلاینده PM2.5 و شناسایی عوامل موثر بر افزایش غلظت آلاینده‌ی مذکور در مدت زمان سه روز متوالی در هر فصل پرداختیم. درنهایت پهنه‌بندی توزیع مکانی غلظت آلاینده PM2.5 در شهر تهران، برای چهار دوره زمانی مورد نظر به دست آمد و مشاهده شد که مدل پیشنهادی در مقایسه با سایر تحقیقات صورت گرفته از عملکرد مناسبی برخوردار می‌باشد($R^2$=0.61-0.72).

با توجه به اینکه کاربری اراضی در تمامی فصل‌های سال یکسان ولی البته دارای تأثیری متفاوت است، اما عامل اصلی تغییرات غلظت آلاینده‌ها، پارامترهای هواشناسی و عوامل جوی می‌باشد. پیشنهاد می‌شود از تلفیق مدل‌های هواشناسی دینامیک و روش رگرسیون کاربری اراضی در مدلسازی دقیق‌تر و پویاتر آلودگی هوا استفاده شود.

## مراجع


[1] D. A. Vallero, "1 - The Changing Face of Air Pollution," in *Fundamentals of Air Pollution (Fourth Edition)*, ed Burlington: Academic Press, pp. 3-51, 2008.

[2] G. G. Kaplan, D. Tanyingoh, E. Dixon, M. Johnson, A. J. Wheeler, R. P. Myers, *et al.*, "Ambient ozone concentrations and the risk of perforated and nonperforated appendicitis: a multicity case-crossover study," *Environ Health Perspect,* vol. 121, pp. 939-43, 2013.

[3] P. H. Ryan, G. K. Lemasters, P. Biswas, L. Levin, S. Hu, M. Lindsey, *et al*" ,.A comparison of proximity and land use regression traffic exposure models and wheezing in infants," *Environ Health Perspect,* vol. 115, pp. 278-84, 2007.

[4] A. Ranjbar SaadatAbadi, L. Mohammadian,"Study of Mean Pressure Patterns Based on Different Levels of Occurrence of CO Pollutant in Tehran for the Summer and Autumn Seasons", *Physical Geography Research Quarterly*, vol. 42, pp. 111-28, 2010 (in Persian).

[5] S. Hankey, J. D. Marshall, and M. Brauer, "Health impacts of the built environment: within-urban variability in physical inactivity, air pollution ,and ischemic heart disease mortality," *Environ Health Perspect,* vol. 120, pp. 247-53, 2012.

[6] S. Ahmadi, M. Roshani, M. Naderi, "Annual report of air quality in Tehran in 2014", Tehran Air Quality Control Company, 2015 (in Persian).

[7] J. Kaiser, "How dirty air hurts the heart," *Science,* vol. 307, pp. 1858b-1859b, 2005.

[8] R. A. Silva, J. J. West, Y. Zhang, S. C. Anenberg, J.-F. Lamarque, D. T. Shindell, *et al.*, "Global premature mortality due to anthropogenic outdoor air pollution and the contribution of past climate change," *Environmental Research Letters,* vol. 8, 2013.

[9] J. Gulliver, K. de Hoogh, D. Fecht, D. Vienneau, and D. Briggs, "Comparative assessment of GIS-based methods and metrics for estimating long-term exposures to air pollution," *Atmospheric Environment,* vol. 45, pp. 7072-7080, 2011.

[10] M. Jerrett, A. Arain, P. Kanaroglou, B. Beckerman, D. Potoglou, T. Sahsuvaroglu, *et al.*, "A review and evaluation of intraurban air pollution exposure models," *J Expo Anal Environ Epidemiol,* vol. 15, pp. 185-204, 2005.

[11] G. Hoek, R. Beelen, K. de Hoogh, D. Vienneau, J. Gulliver, P. Fischer, *et al.*, "A review of land-use regression models to assess spatial variation of outdoor air pollution," *Atmospheric Environment,* vol. 42, pp. 7561-7578, 2008.

[12] A.A. Matkan, A.R. Shakiba, S.H. Purali, I. Baharloo, "Determination Of Spatial Variation of CO And PM10 Pollutants, Using GIS Techniques (Case Study: Tehran, Iran) ", *Scientific Information Database*, vol. 1, pp. 57-72, 2009 (in Persian).

[13] A. Noorpoor, S.M.A. Feiz," Determination of the Spatial and Temporal Variation of SO2, NO2 and Particulate Matter Using GIS Techniques and Estimation of Concentration Modeling with LUR Method, Case Study: Tehran City", *University of Tehran Science Journal,* vol. 40, pp. 723-738, 2014 (in Persian).

[14] B. Zou, Y. Luo, N. Wan, Z. Zheng, T. Sternberg, and Y. Liao, "Performance comparison of LUR and OK in PM2.5 concentration mapping: a multidimensional perspective," *Sci Rep,* vol. 5, p. 8698-8705, 2015.

[15] D. P. Robinson, C. D. Lloyd, and J. M. McKinley, "Increasing the accuracy of nitrogen dioxide (NO2) pollution mapping using geographically weighted regression (GWR) and geostatistics," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,* vol. 21, pp. 374-383, 2013.

[16] R.A. Bahari, R. Ali Abaspour, P. Pahlavani, "Spatial modeling of PM2.5 Pollution in Tehran with Geographically Weighted Regression model", *Conference On Environmental Science, Engineering & Technologies(CESET),* Tehran, 2015 (in Persian).

[17] S. Bertazzon, M. Johnson, K. Eccles, and G. G. Kaplan, "Accounting for spatial effects in land use regression for urban air pollution modeling," *Spatial and Spatio-temporal Epidemiology,* vol. 14–15, pp. 9-21, 2015.

[18] A.A. Mahmoudian, "Look at the Tehran since the beginning of", Tehran, *Gitashenasi Geographical & Cartographic Institute*, 2008 (in Persian).

[19] S. Ganesh, "Multivariate Linear Regression A2 - Peterson ,Penelope," in International Encyclopedia of Education (Third Edition), E. Baker and B. McGaw, Eds., ed Oxford: Elsevier, 2010, pp. 324-331.

[20] Z. Ross, M. Jerrett, K. Ito, B. Tempalski, and G. D. Thurston, "A land use regression for predicting fine particulate matter concentrations in the New York City region," Atmosph Environ, vol. 41, 2007.