

# تعیین تغییرات مکانی و زمانی آلاینده‌های گوگرد دی‌اکسید، نیتروژن دی‌اکسید و انواع ذرات معلق با استفاده از تکنیک‌های GIS در شهر تهران

علیرضا نورپور<sup>۱\*</sup>، سیدمحمدعلی فیض<sup>۲</sup>

۱. دانشیار گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران sma.feiz@alumni.ut.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۲/۲

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۷

## چکیده

یکی از معضلات اساسی کلان‌شهر تهران آلودگی هواست. مهم‌ترین آلاینده‌های تهران ذرات معلق  $PM_{10}$  و  $PM_{2.5}$ ،  $CO$ ،  $O_3$ ،  $SO_2$  و  $NO_2$  است. از این رو، در تخمین حاضر ابتدا روش‌های مختلف درون‌یابی جهت تولید نقشه‌های کیفیت هوای حاصل از آلاینده‌های ذرات معلق، دی‌اکسید گوگرد و دی‌اکسید نیتروژن ارزیابی شد. سپس، با استفاده از روش‌های درون‌یابی بهینه، نقشه‌های کیفیت هوای حاصل از این آلاینده‌ها برای همه روزهای سال ۱۳۹۱ تولید شد. همچنین، از آنجا که آلودگی هوا با عوامل متعددی از قبیل توپوگرافی، اقلیم، جمعیت، شبکه حمل و نقل و حجم ترافیک در ارتباط است، با استفاده از روش LUR مهم‌ترین عوامل مؤثر در تولید هر یک از این آلاینده‌ها تعیین شد و در ادامه با استفاده از همین روش به مدل‌سازی آن‌ها در فصل بهار پرداخته شد. نتایج حاصل نشان داد که برای درون‌یابی داده‌های آلاینده‌های دی‌اکسید گوگرد و دی‌اکسید نیتروژن روش کوکریجینگ همراه با سه پارامتر دما، جهت باد و سرعت باد مناسب‌ترین روش است، درحالی‌که برای آلاینده‌های ذرات معلق  $PM_{10}$  و  $PM_{2.5}$  روش Spline نتایج بهتری می‌دهد. همچنین، نتایج حاصل از مدل LUR نشان داد که مهم‌ترین عامل مؤثر بر روی آلاینده‌های  $SO_2$ ،  $NO_2$  و ذرات معلق  $PM_{2.5}$  حجم ترافیک است، درحالی‌که مهم‌ترین عامل مؤثر بر آلاینده ذرات معلق  $PM_{10}$  موجود در اماکن صنعتی است.

## کلیدواژه

آلودگی هوا، درون‌یابی، ذرات معلق، رگرسیون کاربری اراضی، GIS.

## ۱. سرآغاز

را بر آلودگی هوا نشان داده‌اند، به طوری که تمامی این تحقیقات به نتایج مشابهی در مورد تأثیرات تغییرات زمانی، مکانی و درون‌شهری بر آلودگی هوا اشاره کردند (Jerrett et al., 2005; Miller et al., 2007).

امروزه، روش‌های مختلفی برای تخمین آلودگی هوا وجود دارد. یکی از این روش‌ها تلفیق اطلاعات ایستگاه‌های سنجش آلودگی و روش‌های درون‌یابی است.

رشد سریع فناوری باعث افزایش بی‌رویه آلودگی هوا در اکثر کشورهای جهان شده است. از آنجا که آلودگی هوا تأثیر مستقیمی بر روی سلامت انسان‌ها و جانوران و گیاهان می‌گذارد، در نتیجه باعث توجه بیشتر مدیران و محققان و افراد مرتبط با آلودگی به این معضل شده است. مطالعات اخیر نقش مهم و اساسی تغییرات درون‌شهری

است. در واقع، با استفاده از روش درون‌یابی تغییرات زمانی و مکانی آلودگی هوا برای کلیه روزهای سال ۱۳۹۱ بررسی شد. سپس، با استفاده از روش رگرسیون کاربری اراضی تأثیر هر یک از عوامل کاربری اراضی، حجم ترافیک، جمعیت و غیره در ایجاد این آلاینده‌ها بررسی و در نهایت در بهار به مدل سازی این آلاینده‌ها پرداخته شد.

## ۲. مواد و روش بررسی

### ۲.۱. متغیرهای مورد استفاده در روش رگرسیون کاربری اراضی

روش LUR ترکیبی از سامانه اطلاعات مکانی با روش‌های رگرسیون چند متغیره است، به طوری که ابتدا مقدار آلاینده مورد نظر در یک مکان تعیین سپس، در بافرهای متفاوتی میزان هر یک از متغیرهای حجم ترافیک، کاربری اراضی، جمعیت و غیره در اطراف نقاط نمونه‌برداری شده اندازه‌گیری می‌شود. در نهایت، با استفاده از روش‌های رگرسیونی چند متغیره و روش‌های قدم‌به‌قدم<sup>۲</sup>، ورود رو به جلو<sup>۳</sup> و حذف رو به عقب<sup>۴</sup>، ارتباط بین آلاینده مورد نظر به عنوان متغیر وابسته و سایر متغیرها به عنوان متغیر مستقل استخراج شد. در این تحقیق نمونه‌های انتخاب‌شده مقدار آلودگی حاصل از آلاینده‌های گوگرد دی‌اکسید، نیتروژن دی‌اکسید و انواع ذرات معلق برای هر یک از ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا به شمار می‌روند. با فرض اینکه هر ایستگاه سنجش آلودگی نماینده ۱۰۰۰ متر اطراف خود باشد، پس تمامی بافرها ۵۰۰ متر در نظر گرفته شدند و از آنجا که جمعیت جزء عوامل متحرک است، در بافر ۱۰۰۰ متری اطراف ایستگاه‌ها سنجیده شد. جدول ۱ متغیرهای مورد استفاده در مدل کاربری اراضی را نشان می‌دهد. در این جدول منظور از (\*) ارتفاع محل نصب ایستگاه‌ها از سطح دریا و منظور از (\*\*\*) فاصله ایستگاه سنجش آلودگی تا نزدیک‌ترین نوع راه است.

با استفاده از این روش تلفیقی می‌توان تغییرات زمانی آلودگی هوا را در هر زمان نشان داد، اما قدرت تفکیک مکانی این روش تلفیقی به دلیل محدود بودن تعداد ایستگاه‌ها کم است (Basu et al., 2004).

روش دیگر برای تخمین آلودگی هوا استفاده از روش رگرسیون کاربری اراضی (LUR)<sup>۱</sup> است. این روش قدرت تفکیک مکانی بالایی دارد، اما نقطه‌ضعف این روش در پایین بودن قدرت تفکیک زمانی آن است. همچنین با استفاده از این روش می‌توان تأثیر عوامل مختلفی همچون کاربری اراضی، ترافیک، جمعیت و نظایر این‌ها را بر آلودگی ارزیابی کرد (Brauer et al., 2003; Cyrus et al., 2005; Henderson et al., 2007; Moore et al., 2007).

یکی از روش‌های پیش‌بینی انتشار ذرات معلق با استفاده از مدل‌سازی نرم‌افزاری است و به‌کارگیری مدل ADMS-Urban نتایج نسبتاً قابل قبولی در این زمینه ارائه کرده است (عتابی و همکاران، ۱۳۸۶).

روش دیگر برای تخمین آلودگی هوا روش پخششی است که قدرت تفکیک زمانی بالا و قدرت تفکیک مکانی متوسط دارد. ولی این روش نیازمند پارامترها و مؤلفه‌های ورودی زیاد و کارشناسان خبره است (Jerrett et al., 2005; Knowlton et al., 2004).

مطالعه تعیین مکانی و زمانی آلاینده ذرات معلق و گاز مونوکسید کربن با استفاده از GIS در تهران و سایر شهرهای ایران انجام شده است (متکان و همکاران، ۱۳۸۸). در سال‌های اخیر کار مشابهی روی توزیع ذرات PM<sub>10</sub> منطقه‌ای در مالزی صورت گرفته که از روش GIS در اینجا نیز استفاده شده است (Amanollahi, Abdullah, & Farzanmanesh, 2011).

در این تحقیق از دو روش درون‌یابی و رگرسیون کاربری اراضی برای برآورد توزیع آلودگی هوای حاصل از آلاینده‌های گوگرد دی‌اکسید، نیتروژن دی‌اکسید، ذرات معلق PM<sub>10</sub> و PM<sub>2.5</sub> در کلان‌شهر تهران استفاده شده

جدول ۱. متغیرهای مورد استفاده در مدل کاربری اراضی

متغیر	زیرگروه	اندازه بافر	واحد اندازه‌گیری	منبع اخذ داده‌ها
کاربری اراضی	مسکونی	۵۰۰	کیلومتر مربع	مرکز سامانه اطلاعات جغرافیایی تهران
	صنعتی	۵۰۰	کیلومتر مربع	مرکز سامانه اطلاعات جغرافیایی تهران
	اداری - تجاری	۵۰۰	کیلومتر مربع	مرکز سامانه اطلاعات جغرافیایی تهران
	نظامی	۵۰۰	کیلومتر مربع	مرکز سامانه اطلاعات جغرافیایی تهران
	فضای سبز	۵۰۰	کیلومتر مربع	مرکز سامانه اطلاعات جغرافیایی تهران
	حمل و نقل	۵۰۰	کیلومتر مربع	مرکز سامانه اطلاعات جغرافیایی تهران
حجم ترافیک	ترافیک	۵۰۰	حجم هم‌سنگ سواری	سازمان مطالعات جامع حمل‌ونقل و ترافیک
ارتفاع	ارتفاع	*	متر	مدل ارتفاع رقومی DEM تهران
جمعیت	جمعیت	۱۰۰۰	تعداد نفر در هر کیلومتر مربع	مرکز سامانه اطلاعات جغرافیایی تهران
راه	بزرگراه	**	متر	مرکز سامانه اطلاعات جغرافیایی تهران
	راه اصلی	**	متر	مرکز سامانه اطلاعات جغرافیایی تهران
	راه فرعی	**	متر	مرکز سامانه اطلاعات جغرافیایی تهران

## ۲.۲ روش کار

ایستگاه‌های هواشناسی مقدار آلودگی هر یک از آلاینده‌های اصلی را به صورت ساعت به ساعت اندازه‌گیری می‌کنند.

بعد از کسب اطلاعات از این سه سازمان، از آنجا که هدف این تحقیق تعیین نقشه‌های آلاینده‌های گوگرد دی‌اکسید، نیتروژن دی‌اکسید و ذرات معلق است به صورت زیر عمل شد. طبق شاخص AQI<sup>۵</sup> برای محاسبه گوگرد دی‌اکسید (SO<sub>2</sub>) و ذرات معلق باید از میانگین ۲۴ ساعته و برای نیتروژن دی‌اکسید باید از میانگین یک ساعته و یا سالانه استفاده کرد. در نتیجه، برای تمامی ۴۲ ایستگاه میانگین غلظت روزانه طی سال ۱۳۹۱ محاسبه شد. قبل از تولید نقشه‌های آلودگی ابتدا باید بهترین روش درون‌یابی برای هر یک از این آلاینده‌ها تعیین شود، چون مقدار این آلاینده‌ها برای هر یک از روزهای سال متفاوت است؛ به طور مثال، در فصل بهار به دلیل کم‌بودن مقادیر این آلاینده‌ها دامنه تغییرات برای هر یک از آن‌ها کم است و این موضوع باعث کمتر شدن خطا می‌شود. در فصل تابستان

در کل، ۴۲ ایستگاه سنجش آلودگی هوا طی سال ۱۳۹۱ در کلان‌شهر تهران وجود داشت که از این تعداد ۲۱ ایستگاه زیر نظر سازمان محیط‌زیست و ۲۱ ایستگاه زیر نظر شرکت کنترل کیفیت هوای شهر تهران وابسته به شهرداری تهران است. ایستگاه‌های زیر نظر سازمان محیط‌زیست عبارت‌اند از آزادی، بهمن، دانشگاه شهید بهشتی، شهرداری منطقه ۱۵، چشمه، دانشگاه علم و صنعت، امام خمینی، قائم، قلهک، پردیس، پردیسان، پاسداران، پونک، رازی، سلامت، شهری، شکوفه، سرخه‌حصار و سوهانک. ایستگاه‌های زیر نظر شرکت کنترل کیفیت هوای تهران نیز عبارت‌اند از شهرداری منطقه ۴، شهرداری منطقه ۷، شهرداری منطقه ۱۰، شهرداری منطقه ۱۱، شهرداری منطقه ۱۶، شهرداری منطقه ۱۹، اقدسیه، بهارن، دروس، فتح، گلبرگ، ژئوفیزیک، محلاتی، مسعودیه، پارک رز، پیروزی، پونک، ستاد بحران، شادآباد، شهری، شریف، تربیت مدرس و تهرانسر و نیز ۵ ایستگاه هواشناسی دیگر شامل اقدسیه، چیتگر، دوشان تپه، ژئوفیزیک و مهرآباد می‌باشند. کلیه این ایستگاه‌ها به جز

کوکریجینگ برطرف می‌کند. اولین کار برای استفاده از روش کوکریجینگ بررسی همبستگی بین متغیرهای کمکی با آلاینده‌هاست. برای بررسی همبستگی بین متغیرها روش‌های مختلفی مانند همبستگی پیرسن، اسپیرمن، و کدال از جمله مهم‌ترین روش‌ها به شمار می‌آیند. در این تحقیق به دو دلیل زیر از همبستگی اسپیرمن استفاده شد.

۱. همبستگی پیرسن روشی پارامتریک است که در آن باید داده‌ها از توزیع نرمال یا توزیع نزدیک به نرمال پیروی کنند. همچنین، این همبستگی تنها رابطه خطی بین متغیرها را نشان می‌دهد. این در حالی است که همبستگی اسپیرمن روشی ناپارامتریک و مستقل از توزیع متغیرهاست. از آنجا که توزیع داده‌ها را نمی‌دانیم و نوع ارتباط بین متغیرهای اصلی و کمکی مشخص نیست، در نتیجه آماره اسپیرمن برای بررسی همبستگی مطمئن‌تر است.

۲. چون یکی از پارامترهای کمکی جهت باد و متغیری رتبه‌ای است، در نتیجه برای بررسی همبستگی این متغیر باید آماره اسپیرمن استفاده شود.

#### ۴.۲ شاخص کیفیت هوا (AQI)

شاخص کیفیت هوا استاندارد است که برای گزارش روزانه کیفیت هوا و برای بیان آلودگی هوا از مقدار ۵ آلاینده کربن مونواکسید، ازن، نیتروژن دی‌اکسید، گوگرد دی‌اکسید و ذرات معلق استفاده می‌کند. با توجه به غلظت آلاینده‌ها و استانداردهای بهداشتی، این شاخص غلظت آلاینده‌ها را به مقیاس عددی بین ۰ تا ۵۰۰ مطابق با جدول ۲ تبدیل می‌کنند. شاخص کیفیت هوا از این نظر اهمیت دارد که غلظت آلاینده‌ها را بر اساس مقیاس واحدی می‌سنجد. در جدول ۲ چنانچه میزان غلظت ازن ۸ ساعته از ۰/۳۷۴ بیشتر شود، باید ازن ۱ ساعته استفاده شود. همچنین، در این جدول برای مقادیر خالی ستون مربوط به نیتروژن دی‌اکسید عبارت هشدار درج نشده و فقط برای AQI بیشتر از ۲۰۰ درج شده است. جدول ۳ طبقه‌بندی شاخص AQI برای بیان وضعیت هوا را نشان می‌دهد.

و پاییز چون دامنه تغییرات زیاد می‌شود، در نتیجه مقدار خطا نیز افزایش می‌یابد. به همین علت برای به دست آوردن مقدار خطا برای هر یک از آلاینده‌ها ابتدا از هر ماه ۲ روز آن انتخاب شد. در نتیجه به صورت کاملاً تصادفی ۲۴ روز از کل سال انتخاب گردید. با استفاده از تمامی روش‌های درون‌یابی شامل ۳۶ روش متفاوت، تمامی نقشه‌های آلودگی برای این ۲۴ روز تهیه شد. در نتیجه هر یک از روش‌های درون‌یابی که کمترین مقدار خطا (کمترین مقدار  $RMSE^2$ ) را نشان داد، روش اصلی برای تعیین نقشه‌های آلودگی استفاده شد. همچنین، هنگام استفاده از روش کوکریجینگ علاوه بر اینکه از اطلاعات این ۴۲ ایستگاه استفاده می‌شود، از اطلاعات ۵ ایستگاه هواشناسی اقدسیه، چیتگر، دوشان تپه، ژئوفیزیک و مهرآباد نیز استفاده شد. در نتیجه، برای تعیین بهترین روش درون‌یابی برای هر یک از آلاینده‌ها تمامی روش‌های درون‌یابی برای این ۲۴ روز اجرا شد و بعد از انتخاب بهترین روش درون‌یابی به کمک آماره  $RMSE$  باید نقشه‌های روزانه را به وسیله بهترین روش تولید کرد. برای آلاینده‌های مذکور نقشه غلظت روزانه از میانگین داده‌های ۲۴ ساعته برای هر یک از ایستگاه‌ها حاصل می‌شود. سپس نقشه‌های تولیدشده بر اساس شاخص AQI طبقه‌بندی می‌شوند.

بعد از تعیین نقشه‌های آلودگی، با استفاده از روش رگرسیون کاربری اراضی به بررسی تأثیر عواملی از قبیل حجم ترافیک، کاربری اراضی، جمعیت و نظایر این‌ها روی این آلاینده‌ها پرداختیم. در نهایت، با استفاده از همین روش، آلاینده‌های مذکور در فصل بهار مدل‌سازی شدند.

#### ۳.۲ آماره اسپیرمن

چون در این تحقیق روش کوکریجینگ نیز استفاده شده است، لذا پارامترهای هواشناسی دما، جهت باد و سرعت باد پارامترهای کمکی استفاده شده‌اند. اطلاعات دما، جهت باد و سرعت باد ساعت به ساعت برداشت شد و این خود مشکل هم‌زمانی داده‌ها را برای استفاده در روش

جدول ۲. طبقه‌بندی کیفیت هوا بر اساس شاخص AQI

AQI	CO (ppm) ۸ ساعته	NO <sub>2</sub> (ppm)	SO <sub>2</sub> (ppm) ۲۴ ساعته	PM <sub>2.5</sub> μg/m <sup>3</sup> ۲۴ ساعته	PM <sub>10</sub> μg/m <sup>3</sup> ۲۴ ساعته	O <sub>3</sub> (ppm) ۸ ساعته	O <sub>3</sub> (ppm) ۱ ساعته
۰-۵۰	#####	**	۰/۰۰۰-۰/۰۳۴	۰/۰-۱۵/۴	۰-۵۴	۰/۰۰۰-۰/۰۶۹	-
۵۱-۱۰۰	۴/۵-۹/۴	**	۰/۰۳۵-۰/۱۴۴	۱۵/۵-۶۵/۴	۵۵-۱۵۴	۰/۰۷۰-۰/۰۸۴	-
۱۰۱-۱۵۰	۹/۵-۱۲/۴	**	۰/۱۴۵-۰/۲۲۴	۶۵/۵-۱۰۰/۴	۱۵۵-۲۵۴	۰/۰۸۵-۰/۰۱۴	۰/۱۲۵-۰/۱۶۴
۱۵۱-۲۰۰	۱۲/۵-۱۵/۴	**	۰/۲۲۵-۰/۳۰۴	۱۰۰/۵-۱۵۰/۴	۲۵۵-۳۵۴	۰/۱۰۵-۰/۱۲۴	۰/۱۶۵-۰/۲۰۴
۲۰۱-۳۰۰	۱۵/۵-۳۰/۴	۰/۶۵-۱/۲۴	۰/۳۰۵-۰/۶۰۴	۱۵۰/۵-۲۵۰/۴	۳۵۵-۴۲۴	۰/۱۲۵-۰/۳۷۴	۰/۲۰۵-۰/۴۰۴
۳۰۱-۴۰۰	۳۰/۵-۴۰/۴	۱/۲۵-۱/۶۴	۰/۶۰۵-۰/۸۰۴	۲۵۰/۵-۳۵۰/۴	۴۲۵-۵۰۴	*	۰/۴۰۵-۰/۵۰۴
۴۰۱-۵۰۰	۴۰/۵-۵۰/۴	۱/۶۵-۲/۰۴	۰/۸۰۵-۱/۰۰۴	۳۵۰/۵-۵۰۰/۴	۵۰۵-۶۰۴	*	۰/۵۰۵-۰/۶۰۴

جدول ۳. طبقه‌بندی شاخص AQI برای بیان وضعیت هوا

AQI	وضعیت هوا	رنگ
۰-۵۰	پاک	سبز
۵۱-۱۰۰	سالم	زرد
۱۰۱-۱۵۰	ناسالم برای گروه‌های حساس	نارنجی
۱۵۱-۲۰۰	ناسالم	قرمز
۲۰۱-۳۰۰	بسیار ناسالم	بنفش
بزرگتر یا مساوی ۳۰۱	خطرناک	خرمایی

جدول ۴. نتایج همبستگی اسپیرمن

جهت باد	سرعت باد	دما	
-۰/۰۸۵	-۰/۰۸۱	-۰/۰۸۳	SO <sub>2</sub>
۰/۰۵	۰/۰۵۰	۰/۰۵۰	Sig.
-۰/۰۹۸	-۰/۳۰۲	-۰/۳۲۰	NO <sub>2</sub>
۰/۰۴۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	sig.
-۰/۰۰۸	-۰/۰۱۲	۰/۰۵۵	PM <sub>10</sub>
۰/۱۳۱	۰/۰۰۰	۰/۳۱۹	sig.
-۰/۰۰۲	-۰/۰۵۰	-۰/۱۰۹	PM <sub>2.5</sub>
۰/۷۳۱	۰/۳۶۱	۰/۴۹۰	sig.

درون‌یابی برای انتخاب روش درون‌یابی بهینه نشان داده

می‌شود. به دلیل اینکه تنها پارامتر کمکی سرعت باد با

۳. نتایج

۳.۱. نتایج مقایسه روش‌های مختلف درون‌یابی

در این قسمت نتایج حاصل از مقایسه روش‌های مختلف

آماره RMSE برای تمام آلاینده‌ها زمانی است که توان بیشتر از ۲ باشد. در تمامی روش‌های به کار گرفته شده برای تعیین جهت ناهمسان گردی از جهت باد استفاده شد.

### ۳.۳. نتایج روش تابع چندجمله‌ای جهانی<sup>۱</sup>

با توجه به جدول ۶ مشاهده می‌شود که کمترین مقدار آماره RMSE برای آلاینده‌ها زمانی است که توان در روش چندجمله‌ای جهانی برابر یک باشد.

آلاینده‌های ذرات معلق همبستگی دارد، در نتیجه از انجام روش درون‌یابی کوکریجینگ برای این متغیر صرف‌نظر شد. در این تحقیق برای انتخاب بهترین روش درون‌یابی از آماره RMSE استفاده شده است. مقدار این آماره برای هر روش درون‌یابی که کمتر باشد، نشان‌دهنده بهتر بودن آن روش است. جدول ۴ نتایج همبستگی اسپیرمن را برای آلاینده‌های انتخابی نشان می‌دهد.

### ۳.۲. نتایج روش وزن‌دهی عکس فاصله (IDW)<sup>۲</sup>

با توجه به جدول ۵ مشاهده می‌شود که کمترین مقدار

جدول ۵. نتایج روش وزن‌دهی عکس فاصله IDW

MSE	تعداد نقاط همسایگی	حالت	توان در روش IDW	نوع آلاینده	MSE	تعداد نقاط همسایگی	حالت	توان در روش IDW	نوع آلاینده
۲۷/۲۱	۴۲	همسان گرد	۱	NO <sub>2</sub>	۱۹/۳۱	۴۲	همسان گرد	۱	SO <sub>2</sub>
۲۷/۸۷	۱۰	ناهمسان گرد			۱۹/۴۵	۱۰	ناهمسان گرد		
۲۷/۸۵	۴۲	همسان گرد	۲		۱۸/۸۰	۴۲	همسان گرد	۲	
۲۸/۰۱	۱۰	ناهمسان گرد			۱۸/۷۰	۱۰	ناهمسان گرد		
۲۷/۲۰	۴۲	همسان گرد	بیشتر از ۲		۱۸/۰۱	۴۲	همسان گرد	بیشتر از ۲	
۲۷/۹۱	۱۰	ناهمسان گرد			۱۸/۴۷	۱۰	ناهمسان گرد		
۱۷/۸۲	۴۲	همسان گرد	۱	PM <sub>2.5</sub>	۳۸/۲۳	۴۲	همسان گرد	۱	PM <sub>10</sub>
۱۷/۸۷	۱۷	ناهمسان گرد			۳۸/۹۱	۲۰	ناهمسان گرد		
۱۷/۸۵	۴۲	همسان گرد	۲		۳۶/۷۱	۴۲	همسان گرد	۲	
۱۸/۰۹	۱۷	ناهمسان گرد			۳۶/۱۵	۲۰	ناهمسان گرد		
۱۷/۸۱	۴۲	همسان گرد	بیشتر از ۲		۳۴/۲۴	۴۲۰	همسان گرد	بیشتر از ۲	
۱۷/۹۸	۱۷	ناهمسان گرد			۴۳/۵۳	۲۰	ناهمسان گرد		

جدول ۶. نتایج روش چندجمله‌ای جهانی

نوع آلاینده	توان در روش Global	MSE	نوع آلاینده	توان در روش Global	MSE	نوع آلاینده	توان در روش Global	MSE	نوع آلاینده	توان در روش Global	MSE
SO <sub>2</sub>	۱	۲۵,۱۴	PM <sub>10</sub>	۱	۴۲,۰۴	NO <sub>2</sub>	۱	۳۰,۵۰	PM <sub>2.5</sub>	۱	۲۳
	۲	۴۲,۱۵		۲	۵۶		۲	۴۶,۰۴		۲	۳۵
	بیشتر از ۲	بزرگ تر از ۶۰		بیشتر از ۲	بزرگ تر از ۸۵		بیشتر از ۲	بزرگ تر از ۷۰		بیشتر از ۲	بزرگ تر از ۵۰

۴.۳. نتایج روش تابع چندجمله‌ای محلی<sup>۹</sup>

مقدار آماره RMSE برای آلاینده‌ها زمانی اتفاق می‌افتد که توان در این روش نیز برابر یک باشد.

همچنین، با توجه به جدول ۷، ملاحظه می‌شود که کمترین

جدول ۷. نتایج روش چندجمله‌ای محلی

نوع آلاینده	توان در روش Local	حالت	تعداد نقاط همسایگی	RMSE	نوع آلاینده	توان در روش Local	حالت	تعداد نقاط همسایگی	RMSE		
SO <sub>2</sub>	۱	همسان گرد	۴۲	۲۳/۱۰	NO <sub>2</sub>	۲	همسان گرد	۴۲	۳۰		
		ناهمسان گرد	۱۰	۲۲/۵۰			ناهمسان گرد	۱۰			
	۲	همسان گرد	۴۲	۳۴/۴۵		بیشتر از ۲	همسان گرد	۴۲	بزرگتر از ۴۰	۴۲	
		ناهمسان گرد	۱۰	۳۶/۲۱			ناهمسان گرد	۱۰	بزرگتر از ۵۰	۱۰	
	PM <sub>10</sub>	۱	همسان گرد	۴۲		۴۰/۴۲	PM <sub>2.5</sub>	۲	همسان گرد	۴۲	۴۶/۸۵
			ناهمسان گرد	۱۷		۴۰/۲۸			ناهمسان گرد	۲۰	۲۷
۲		همسان گرد	۴۲	۶۰/۶۰	بیشتر از ۲	همسان گرد		۴۲	بزرگتر از ۶۰	۴۲	
		ناهمسان گرد	۱۷	۲۰/۱۸		ناهمسان گرد		۲۰	بزرگتر از ۳۵	۱۷	

۳.۵. نتایج روش تابع چند جمله ای هموار<sup>۱۰</sup>

با توجه به جدول ۸ مشاهده می شود که کمترین مقدار آماره RMSE برای آلاینده های گوگرد دی اکسید و انواع ذرات معلق و متعلق به روش «چند جمله ای نواری کاملاً هموار»<sup>۱۱</sup> و کمترین مقدار این آماره برای آلاینده نیتروژن دی اکسید متعلق به روش «نواری با کشش کم ضخامت»<sup>۱۲</sup> است.

۳.۶. نتایج روش کریجینگ<sup>۱۳</sup>

با توجه به جدول ۹ مشاهده می شود که کمترین مقدار آماره RMSE برای آلاینده ها به ترتیب مربوط به سمی واریوگرام کروی با حالت ناهمسان گردی و سپس همسان گردی است. روش کریجینگ روش تخمینی خطی متغیر وزن دار است.

جدول ۸. نتایج روش Spline

RMSE	تعداد نقاط همسایگی	نوع روش RBF	نوع آلاینده	RMSE	تعداد نقاط همسایگی	نوع روش RBF	نوع آلاینده
۲۹/۵۱	۴۲	Completely Regularized Spline	NO <sub>2</sub>	۲۳/۴۶	۴۲	Completely Regularized Spline	SO <sub>2</sub>
۲۹/۴۰	۴۲	Spline with Tension		۲۲/۲۲	۴۲	Spline with Tension	
۳۰/۱۵	۴۲	Multiquadric		۳۳	۴۲	Multiquadric	
۲۹/۲۰	۴۲	Inverse Multiquadric		۲۵/۶۱	۴۲	Inverse Multiquadric	
۳۲	۴۲	Thin Plate Spline		۳۱	۴۲	Thin Plate Spline	
۱۶/۵۰	۴۲	Completely Regularized Spline	PM <sub>2.5</sub>	۳۰/۳۰	۴۲	Completely Regularized Spline	PM <sub>10</sub>
۱۷/۲۰	۴۲	Spline with Tension		۳۱/۲۵	۴۲	Spline with Tension	
۱۷/۹۰	۴۲	Multiquadric		۳۲/۱۷	۴۲	Multiquadric	
۱۷/۵۰	۴۲	Inverse Multiquadric		۳۲/۲۵	۴۲	Inverse Multiquadric	
۱۶/۸۰	۴۲	Thin Plate Spline		۳۱/۸۹	۴۲	Thin Plate Spline	

جدول ۹. نتایج روش کریجینگ معمولی

RMSE	حالت	نوع سمی واریوگرام	نوع آلاینده	RMSE	حالت	نوع سمی واریوگرام	نوع آلاینده		
۲۷/۴۰	همسان گرد	دایره ای	NO <sub>2</sub>	۱۸/۵۶	همسان گرد	دایره ای	SO <sub>2</sub>		
۲۷/۳۱	ناهمسان گرد			۱۸/۴۹	ناهمسان گرد				
۲۷/۲۱	همسان گرد	کروی		۱۸/۴۶	همسان گرد	کروی			
۲۷/۱۸	ناهمسان گرد			۱۸/۴۳	ناهمسان گرد				
۲۷/۵۱	همسان گرد	نمایی		۱۸/۶۰	همسان گرد	نمایی			
۲۷/۴۸	ناهمسان گرد			۱۸/۵۲	ناهمسان گرد				
۲۷/۶۵	همسان گرد	گوسی		۱۸/۷۱	همسان گرد	گوسی			
۲۷/۴۹	ناهمسان گرد			۱۸/۶۲	ناهمسان گرد				
۱۷/۶۳	همسان گرد	دایره ای		PM <sub>2.5</sub>	۳۵/۵۱	همسان گرد		دایره ای	PM <sub>10</sub>
۱۷/۶۰	ناهمسان گرد				۳۵/۲۰	ناهمسان گرد			
۱۷/۵۹	همسان گرد	کروی	۳۴/۰۵		همسان گرد	کروی			
۱۷/۴۷	ناهمسان گرد		۳۳/۸۶		ناهمسان گرد				
۱۷/۸۰	همسان گرد	نمایی	۳۵/۹۴		همسان گرد	نمایی			
۱۷/۷۵	ناهمسان گرد		۳۵/۸۴		ناهمسان گرد				
۱۷/۹۰	همسان گرد	گوسی	۳۶		همسان گرد	گوسی			
۱۷/۸۸	ناهمسان گرد		۳۵/۹۸		ناهمسان گرد				



## ۷.۳. نتایج روش کوکریجینگ

نقشه کیفیت هوای حاصل از آلاینده‌های ذرات معلق در مهر نشان داده می‌شود. شکل ۱ نشان‌دهنده نقشه میانگین غلظت آلاینده‌های ذرات معلق در مهر ۱۳۹۱ است. با استفاده از روش درون‌یابی بهینه، نقشه‌های کیفیت هوای حاصل از آلاینده‌ها برای تمامی روزهای سال ۱۳۹۱ تولید شد. سپس، تمامی نقشه‌های تولیدشده بر اساس AQI طبقه‌بندی شدند. جدول ۱۱ نتایج طبقه‌بندی کیفیت هوا بر اساس AQI برای هر ماه را نشان می‌دهد.

با توجه به مقدار آماره RMSE به دست آمده از جدول ۱۰ برای داده‌های آلاینده‌های گوگرد دی‌اکسید و نیتروژن دی‌اکسید می‌توان دریافت که روش کوکریجینگ با یک سمی‌واریوگرام کروی که ناهمسان‌گردی آن را جهت باد تعیین می‌کند، بهترین روش برای درون‌یابی آلاینده‌های مذکور موجود در هواست.

## ۸.۳. طبقه‌بندی نقشه‌های کیفیت هوا

به دلیل تعداد زیاد نقشه‌های تولیدی، در این قسمت فقط

جدول ۱۰. نتایج روش کوکریجینگ

RMSE	حالت	نوع سمی‌واریوگرام	نوع آلاینده	RMSE	حالت	نوع سمی‌واریوگرام	نوع آلاینده
۲۷/۱۸	همسان گرد	دایره‌ای	NO <sub>2</sub>	۱۷/۹۶	همسان گرد	دایره‌ای	SO <sub>2</sub>
۲۷/۱۵	ناهمسان گرد			۱۷/۹۳	ناهمسان گرد		
۲۷/۰۹	همسان گرد	کروی		۱۷/۹۲	همسان گرد	کروی	
۲۷/۰۵	ناهمسان گرد			۱۷/۹۱	ناهمسان گرد		
۲۷/۱۹	همسان گرد	نمایی		۱۷/۹۳	همسان گرد	نمایی	
۲۷/۱۷	ناهمسان گرد			۱۷/۹۰	ناهمسان گرد		
۲۷/۲۵	همسان گرد	گوسی		۱۷/۹۴	همسان گرد	گوسی	
۲۷/۲۲	ناهمسان گرد			۱۷/۹۲	ناهمسان گرد		

جدول ۱۱. نتایج طبقه‌بندی نقشه‌ها بر اساس شاخص AQI

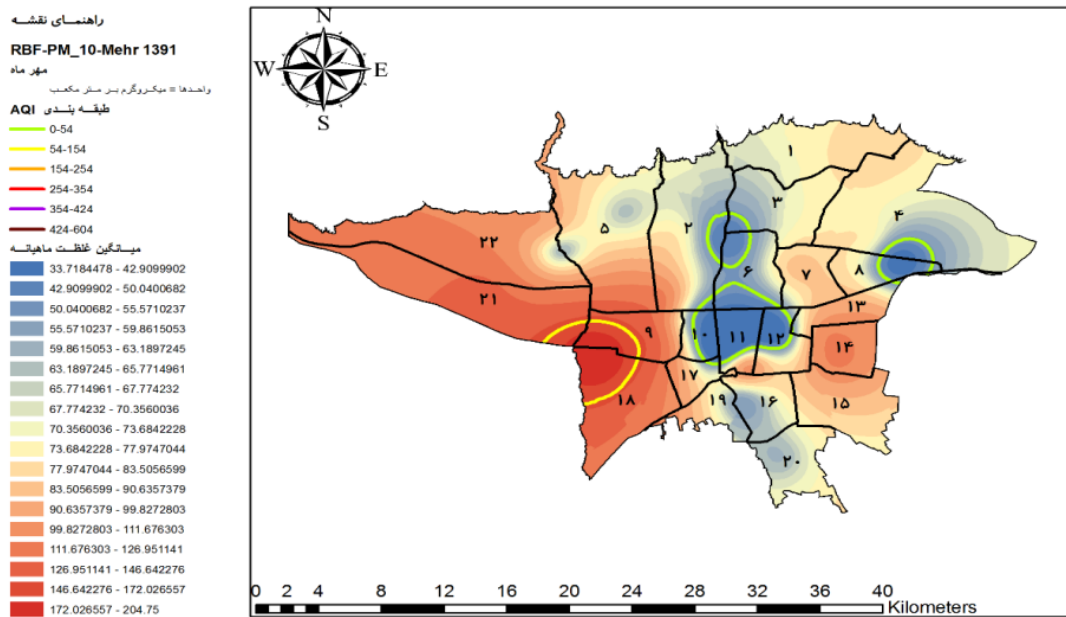
وضعیت کیفیت هوا بر اساس AQI						آلاینده	ماه
خطرناک	بسیار ناسالم	ناسالم	ناسالم برای گروه‌های حساس	سالم	پاک		
۰	۰	۰	۰	۳۱	۰	گوگرد دی‌اکسید	فروردین
۰	۰	۰	۳	۲۲	۶	نیتروژن دی‌اکسید	
۰	۰	۰	۸	۲۳	۰	ذرات معلق PM <sub>10</sub>	
۰	۰	۶	۲۲	۳	۰	ذرات معلق PM <sub>2.5</sub>	
۰	۰	۰	۰	۳۱	۰	گوگرد دی‌اکسید	اردیبهشت
۰	۰	۰	۴	۱۹	۸	نیتروژن دی‌اکسید	
۰	۲	۲	۵	۲۲	۰	ذرات معلق PM <sub>10</sub>	
۰	۰	۱۵	۱۵	۱	۰	ذرات معلق PM <sub>2.5</sub>	
۰	۰	۰	۰	۲۹	۲	گوگرد دی‌اکسید	خرداد
۰	۰	۰	۰	۲۳	۸	نیتروژن دی‌اکسید	
۱	۰	۱	۱۳	۱۶	۰	ذرات معلق PM <sub>10</sub>	
۰	۱	۱۹	۱۱	۰	۰	ذرات معلق PM <sub>2.5</sub>	

ادامه جدول ۱۱. نتایج طبقه‌بندی نقشه‌ها بر اساس شاخص AQI

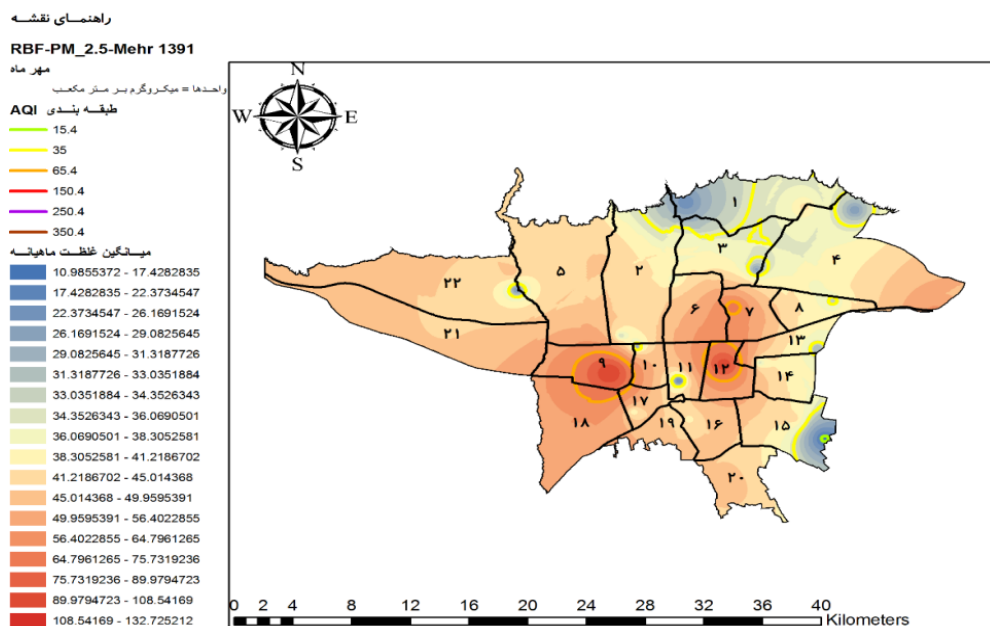
وضعیت کیفیت هوا بر اساس AQI					آلاینده	ماه	
خطرناک	بسیار ناسالم	ناسالم	ناسالم برای گروه‌های حساس	پاک			
۰	۰	۰	۰	۳۰	۱	گوگرد دی‌اکسید	تیر
۰	۰	۰	۵	۲۳	۲	نیترژن دی‌اکسید	
۰	۰	۰	۱۰	۲۱	۰	ذرات معلق $PM_{10}$	
۰	۰	۱۳	۱۷	۱	۰	ذرات معلق $PM_{2.5}$	
۰	۰	۰	۲	۲۹	۰	گوگرد دی‌اکسید	مرداد
۰	۰	۰	۲۱	۱۰	۰	نیترژن دی‌اکسید	
۰	۰	۰	۸	۲۳	۰	ذرات معلق $PM_{10}$	
۰	۰	۸	۲۳	۰	۰	ذرات معلق $PM_{2.5}$	
۰	۰	۰	۰	۳۱	۰	گوگرد دی‌اکسید	شهریور
۰	۰	۰	۸	۲۳	۰	نیترژن دی‌اکسید	
۰	۰	۰	۱۴	۱۷	۰	ذرات معلق $PM_{10}$	
۰	۰	۲۵	۶	۰	۰	ذرات معلق $PM_{2.5}$	
۰	۰	۰	۰	۳۰	۰	گوگرد دی‌اکسید	مهر
۰	۰	۰	۱۶	۱۳	۰	نیترژن دی‌اکسید	
۰	۰	۳	۲۵	۲	۰	ذرات معلق $PM_{10}$	
۰	۲	۲۸	۰	۰	۰	ذرات معلق $PM_{2.5}$	
۰	۰	۰	۰	۳۰	۰	گوگرد دی‌اکسید	آبان
۰	۰	۰	۱۲	۱۷	۰	نیترژن دی‌اکسید	
۰	۰	۱	۱۸	۱۰	۱	ذرات معلق $PM_{10}$	
۰	۱	۱۷	۱۱	۱	۰	ذرات معلق $PM_{2.5}$	
۰	۰	۰	۰	۳۰	۰	گوگرد دی‌اکسید	آذر
۰	۰	۰	۱۷	۱۳	۰	نیترژن دی‌اکسید	
۱	۱	۶	۹	۱۲	۱	ذرات معلق $PM_{10}$	
۰	۴	۲۲	۴	۰	۰	ذرات معلق $PM_{2.5}$	
۰	۰	۰	۰	۳۰	۰	گوگرد دی‌اکسید	دی
۰	۰	۰	۲۵	۵	۰	نیترژن دی‌اکسید	
۰	۱	۵	۲۰	۴	۰	ذرات معلق $PM_{10}$	
۰	۲	۲۴	۴	۰	۰	ذرات معلق $PM_{2.5}$	
۰	۰	۰	۰	۳۰	۰	گوگرد دی‌اکسید	بهمن
۰	۰	۰	۹	۲۰	۰	نیترژن دی‌اکسید	
۰	۰	۲	۱۶	۱۱	۱	ذرات معلق $PM_{10}$	
۰	۱	۲۱	۷	۱	۰	ذرات معلق $PM_{2.5}$	
۰	۰	۰	۰	۳۰	۰	گوگرد دی‌اکسید	اسفند
۰	۰	۰	۱	۲۹	۰	نیترژن دی‌اکسید	
۰	۰	۰	۸	۲۲	۰	ذرات معلق $PM_{10}$	
۰	۰	۷	۱۹	۴	۰	ذرات معلق $PM_{2.5}$	

وضعیت ناسالم برای گروه‌های حساس و سه روز در وضعیت ناسالم قرار داشت. با توجه به همین جدول مشاهده می‌شود که بیشترین روزهایی که کیفیت هوای حاصل از آلاینده‌ها از حد استاندارد تجاوز کرده متعلق به ماه‌های دی و مهر بوده است.

در جدول ۱۱ اعداد نوشته‌شده در داخل هر واحد، طبقه‌بندی کیفیت هوای حاصل از آلاینده مربوط بر اساس AQI برای آن ماه را نشان می‌دهد. به طور مثال، در مهر ماه کیفیت هوای حاصل از آلاینده ذرات معلق  $PM_{10}$  در هیچ روزی پاک نبود و در دو روز در وضعیت سالم، ۲۵ در روز



شکل ۱. الف) میانگین غلظت انواع آلاینده‌های ذرات معلق  $PM_{10}$  در مهرماه ۱۳۹۱



شکل ۱. ب) میانگین غلظت انواع آلاینده‌های ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در مهرماه ۱۳۹۱

### ۹.۳. بررسی همبستگی بین داده‌ها

چون در تولید هر یک از آلاینده‌ها عوامل مهمی همچون ترافیک، کاربری اراضی، جمعیت و مانند این‌ها نقش اساسی ایفا می‌کنند، در این قسمت نتایج حاصل از بررسی همبستگی بین هر یک از آلاینده‌ها با هر کدام از متغیرها در جدول ۱۲ نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری تأثیر هر یک از این متغیرها روی آلودگی، از روش رگرسیون کاربری اراضی استفاده شد. در واقع، میزان هر یک از

متغیرهای مؤثر در بافرهای اطراف هر یک از ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا (جدول ۱) اندازه‌گیری شدند. در جدول ۱۲ منظور از هر یک از انواع راه‌ها فاصله هر ایستگاه تا نزدیک‌ترین نوع هر یک از انواع راه است. با توجه به مقدار P-Value موجود در جدول ۱۲، هرگاه مقدار P-Value از ۰/۰۵ بزرگ‌تر باشد، آنگاه بین دو متغیر مذکور همبستگی وجود ندارد.

جدول ۱۲. همبستگی بین آلاینده‌های انتخابی با متغیرهای مؤثر بر آلودگی هوا

گروه	زیرگروه	SO <sub>2</sub>	P-Value	NO <sub>2</sub>	P-Value	PM <sub>10</sub>	P-Value	PM <sub>2.5</sub>	P-Value
کاربری اراضی	مسکونی	۰/۳۸۰	۰/۰۳۹	۰/۴۴۱	۰/۰۳۱	۰/۳۵۵	۰/۰۳۴	۰/۴۵۱	۰/۰۴۴
	صنعتی	۰/۴۵۱	۰/۰۴۷	۰/۴۴۷	۰/۰۳۰	۰/۶۱۲	۰/۰۰۱	۰/۵۷۰	۰/۰۰۱
	اداری - تجاری	۰/۴۶۲	۰/۰۰۶	۰/۴۱۷	۰/۰۲۰	۰/۳۸۱	۰/۰۲۵	۰/۴۰۱	۰/۰۴۸
	نظامی	۰/۰۲۵	۰/۸۷۱	۰/۰۱۴	۰/۹۵۱	۰/۰۱۹	۰/۹۲۵	۰/۰۱۷	۰/۹۵۴
	فضای سبز	۰/۲۸۷	۰/۰۹۵	۰/۲۰۷	۰/۲۶۱	۰/۳۱۲	۰/۱۲۳	۰/۲۰۸	۰/۲۶۰
	حمل و نقل	۰/۲۵۶	۰/۱۷۰	۰/۰۷۷	۰/۶۸۵	۰/۲۲۰	۰/۱۵۴	۰/۰۶۸	۰/۶۸۱
حجم ترافیک	ترافیک	۰/۵۱۲	۰/۰۰۲	۰/۵۷۱	۰/۰۰۱	۰/۵۲۴	۰/۰۰۲	۰/۶۱۰	۰/۰۰۱
	ارتفاع	۰/۰۳۷	۰/۷۷۹	۰/۳۴۱	۰/۰۴۲	۰/۰۲۹	۰/۷۱۷	۰/۳۲۸	۰/۰۴۲
	جمعیت	۰/۳۸۲	۰/۰۲۱	۰/۵۶۱	۰/۰۰۲	۰/۴۷۰	۰/۰۰۶	۰/۵۱۲	۰/۰۵۸
راه	بزرگراه	۰/۲۸۰	۰/۰۲۴	۰/۴۲۱	۰/۰۱۷	۰/۰۸۲	۰/۵۴۱	۰/۴۲۰	۰/۰۱۸
	راه اصلی	۰/۴۵۰	۰/۰۰۷	۰/۵۱۱	۰/۰۰۱	۰/۱۳۴	۰/۳۸۵	۰/۵۶۸	۰/۰۱۲
	راه فرعی	۰/۰۳۱	۰/۸۷۵	۰	۰/۳۴۹	۰/۰۴۶	۰/۸۵۰	۰/۱۷۱	۰/۳۲۸

نشان می‌دهد.

### ۱۰.۳. نتایج خروجی از مدل رگرسیونی

همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شد، برای انجام مدل LUR ابتدا در اطراف هر یک از ایستگاه‌ها مقدار متغیرهای موجود در جدول ۱ در بافرهای مختلفی محاسبه شد. سپس، با استفاده از روش‌های رگرسیون چندگانه و روش‌های قدم‌به‌قدم، ورود رو به جلو و حذف رو به عقب به مدل‌سازی این آلاینده‌ها در فصل بهار پرداخته شد. جدول‌های ۱۳ تا ۱۷ نتایج حاصل از انجام مدل LUR را

جدول ۱۳. آمار توصیفی مدل

آلاینده	R <sup>2</sup>	تعدیل شده R <sup>2</sup>
SO <sub>2</sub>	۰/۴۷	۰/۴۲
NO <sub>2</sub>	۰/۵۱	۰/۴۸
PM <sub>10</sub>	۰/۷۰	۰/۶۶
PM <sub>2.5</sub>	۰/۶۴	۰/۵۹

جدول ۱۴. ضرایب رگرسیونی برای آلاینده ذرات معلق  $PM_{10}$

ضرایب استاندارد نشده	ضرایب استاندارد نشده	پارامترهای مدل
Beta	B	
***	۶۷/۵۲	عرض از مبدأ
۰/۴۱۵	۰/۲۵	حجم ترافیک
-۰/۳۹۲	-۰/۰۰۱	جمعیت
۰/۶۵۸	۱۳/۹۶	صنعتی
-۰/۳۲۶	-۵/۵۶	اداری - تجاری

جدول ۱۵. ضرایب رگرسیونی برای آلاینده ذرات معلق  $PM_{2.5}$

ضرایب استاندارد شده	ضرایب استاندارد نشده	پارامترهای مدل
Beta	B	
***	۳۰/۱۵	عرض از مبدأ
۰/۵۲۸	۰/۱۲۲	حجم ترافیک
۰/۳۸۵	۵/۰۸	صنعتی
-۰/۲۷۴	-۰/۰۵۲۶	ارتفاع
-۰/۳۰۲	-۰/۰۳۴۱	بزرگراه
-۰/۲۸۹	-۰/۰۶۴۸	راه اصلی

جدول ۱۶. ضرایب رگرسیونی برای آلاینده نیتروژن دی‌اکسید

ضرایب استاندارد شده	ضرایب استاندارد نشده	پارامترهای مدل
Beta	B	
***	۲۵/۲۷	عرض از مبدأ
۰/۵۷۸	۰/۱۱۲	حجم ترافیک
۰/۲۲۹	۰/۰۰۶۵۷	جمعیت
-۰/۲۴۹	-۰/۰۴۳۸	بزرگراه
-۰/۳۹۸	-۰/۰۷۰۲	راه اصلی

جدول ۱۷. ضرایب رگرسیونی برای آلاینده گوگرد دی‌اکسید

ضرایب استاندارد شده	ضرایب استاندارد نشده	پارامترهای مدل
Beta	B	
***	۱۸/۵۱	عرض از مبدأ
۰/۵۰۵	۰/۱۰۷	حجم ترافیک
۰/۳۳۴	۴/۶۸	اداری - تجاری
۰/۲۴۹	۰/۰۰۵۷۶	جمعیت
-۰/۳۲۴	-۰/۰۶۴۲	راه اصلی

آلاینده در وضعیت ناسالم برای گروه‌های حساس، ۲۰ روز در وضعیت ناسالم، ۴ روز در وضعیت بسیار ناسالم و ۲ روز در وضعیت خطرناک قرار گرفته است. ۴. به طور کلی، در سال ۱۳۹۱ کیفیت هوای حاصل از آلاینده<sub>PM<sub>2.5</sub></sub> در ۳۵۵ روز از سال بالاتر از حد استاندارد بوده است. این در حالی است که در ۱۳۹ روز از این ایام کیفیت هوای حاصل از این آلاینده در وضعیت ناسالم برای گروه‌های حساس، ۲۰۵ روز در وضعیت ناسالم و ۱۱ روز در وضعیت بسیار ناسالم و ۲ روز در وضعیت خطرناک قرار گرفته است. نکته قابل توجه این است که هیچ روزی نبوده که وضعیت هوا در حالت خطرناک قرار بگیرد. ۵. بیشترین تعداد روزهایی که کیفیت هوا در کل، از حد استاندارد فراتر رفته است، متعلق به فصل پاییز و سپس زمستان است و بیشترین تعداد روزهایی که کیفیت هوای حاصل از آلاینده ذرات معلق  $PM_{10}$  در وضعیت ناسالم یا بسیار ناسالم قرار گرفت، متعلق به فصل پاییز با ۱۲ روز و سپس زمستان با ۸ روز بوده است. همین طور برای آلاینده ذرات معلق  $PM_{2.5}$  بیشترین تعداد روزهایی که کیفیت هوای حاصل از این آلاینده در وضعیت ناسالم یا بسیار ناسالم قرار گرفته، مربوط به فصل پاییز با ۷۴ روز و سپس زمستان با ۵۵ روز است. ۶. بیشترین ماه‌هایی که کیفیت هوای حاصل از آلاینده  $NO_2$  از حد استاندارد تجاوز کرده است، متعلق به فصل پاییز و آذرماه با ۱۷ روز، سپس مهرماه با ۱۶ روز و در آخر آبان‌ماه با ۱۲ روز است. ۷. چون کاربری اراضی برای تمامی فصل‌های سال یکسان است، مهم‌ترین علت تغییرات در مقادیر این آلاینده‌ها پارامترهای هواشناسی، عوامل جوی و شرایط هواشناختی است. ۸. با توجه به نقشه‌های درون‌یابی شده برای کل سال ۱۳۹۱ مشاهده می‌شود که بیشترین میزان تراکم

رابطه‌های (۱) تا (۴) معادلات رگرسیونی به دست آمده برای آلاینده‌های گوگرد دی‌اکسید، نیتروژن دی‌اکسید و ذرات معلق  $PM_{10}$  و ذرات  $PM_{2.5}$  در فصل بهار را نشان می‌دهد.

رابطه (۱)

$$SO_2 = 18.51 + 0.107 (T) + 4.68 (ET) + 0.00576 (P) - 0.0642 (DMR)$$

رابطه (۲)

$$NO_2 = 25.27 + 0.112 (T) + 0.00657 (P) - 0.0702 (DMR) - 0.0438 (DH)$$

رابطه (۳)

$$PM_{10} = 67.52 + 0.25 (T) + 5.56 (ET) - 0.001 (P) + 13.96 (I)$$

رابطه (۴)

$$PM_{2.5} = 30.15 + 0.122 (T) + 5.08 (I) - 0.0341 (DH) - 0.0526 (E) - 0.0648 (DMR)$$

T: Traffic ; ET: Edari\_Tejari ; P: Population ; DMR: Distance of Major Road ; DH: Distance of Highway ; I: Industrial

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

با استفاده از نتایج به دست آمده از نقشه‌های کیفیت هوای روزانه و مدل LUR، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. به طور کلی، در سال ۱۳۹۱ کیفیت هوای حاصل از آلاینده  $SO_2$  در دو روز از سال بالاتر از حد استاندارد بوده است. این دو روز نیز در مردادماه و فقط در وضعیت ناسالم برای گروه‌های حساس بوده است.
۲. به طور کلی، در سال ۱۳۹۱ کیفیت هوای حاصل از آلاینده  $NO_2$  در ۱۲۱ روز از سال بالاتر از حد استاندارد بوده است. نکته قابل توجه این است که در تمام این روزها وضعیت هوا در حالت ناسالم برای گروه‌های حساس قرار داشت و آلودگی حادی ایجاد نشده است.
۳. به طور کلی، در سال ۱۳۹۱ کیفیت هوای حاصل از آلاینده  $PM_{10}$  در ۱۷۵ روز از سال بالاتر از حد استاندارد بوده است. این در حالی است که در ۱۵۴ روز از این ایام کیفیت هوای حاصل از این

آلاینده ذرات معلق  $PM_{10}$  کاربری‌ها و اماکن صنعتی و مهم‌ترین عامل مؤثر بر آلاینده ذرات معلق  $PM_{2.5}$  حجم ترافیک است.

۱۱. با توجه به نقشه‌های شبکه حمل‌ونقل و راه‌های اصلی می‌توان مشاهده کرد که تراکم راه‌ها در مناطق ۶، ۷، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ از بقیه مناطق بیشتر است. نتایج حاصل از نقشه‌های درون‌یابی نیز نشان داد که این مناطق آلوده‌ترین مناطق از نظر تجمع اکثر آلاینده‌ها هستند. نتایج حاصل از روش‌های رگرسیونی هم این نظریه را تأیید کرد. در مورد آلاینده  $PM_{10}$  نیز مهم‌ترین عامل، اماکن صنعتی معرفی شد. تمرکز اماکن صنعتی در مناطق ۶، ۷، ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ نسبت به بقیه مناطق بیشتر بوده و نتایج حاصل از نقشه‌های درون‌یابی هم نشان داد که این مناطق آلوده‌ترین مناطق از نظر تجمع آلاینده  $PM_{10}$  است. نتایج حاصل از روش‌های رگرسیونی نیز این نظریه را تأیید و مهم‌ترین عامل را در آلاینده  $PM_{10}$  اماکن صنعتی معرفی کرد.

۱۲. همان‌طور که در جدول ۱۲ مشاهده شد، بعضی متغیرها وجود دارند که با آلاینده‌های انتخابی همبستگی دارند ولی در مدل رگرسیونی حضور ندارند. در واقع، این امر هیچ‌گونه تناقضی به وجود نیاورده و این‌گونه توجیه می‌شود که مثلاً در حضور متغیر مستقل جمعیت، کاربری مسکونی نمی‌تواند تأثیر زیادی بر متغیر وابسته انتخابی داشته باشد. در اصل، هنگامی که از روش‌های رگرسیونی چندگانه استفاده می‌کنیم، متغیرهایی می‌توانند وارد مدل شوند که حضور متغیرهای دیگر بر آن‌ها تأثیر زیادی نگذارند. همچنین، حضور آن متغیر بتواند تغییرات قابل توجهی در مقدار  $R^2$  ایجاد نماید.

##### ۵. پیشنهادها

روش کوکریجینگ نشان داد می‌توان از سه پارامتر کمکی دما و جهت باد و سرعت باد، به عنوان روشی مناسب برای درون‌یابی آلاینده‌های گوگرد دی‌اکسید و نیتروژن دی‌اکسید استفاده کرد. به این ترتیب، برای کسب نتایج

غلظت آلاینده  $PM_{10}$  متعلق به مناطق ۹، ۱۶، ۱۷، ۱۸ و ۲۱ است. همین‌طور بیشترین مقدار تراکم غلظت آلاینده  $PM_{2.5}$  متعلق به مناطق ۶، ۷، ۱۱ و ۱۲ است. در واقع، مهم‌ترین علت تفاوت در مقادیر تراکم غلظت ایستگاه‌ها، کاربری اراضی و حجم ترافیک مربوط به مناطق نام‌برده است.

۹. بعد از اجرای روش رگرسیون، یکی از موضوعاتی که دانستن آن برای محققان مهم است، این است که با استفاده از متغیرهای مستقل و این مدل رگرسیونی انتخاب شده چند درصد از تغییرات متغیر وابسته را می‌توان پیش‌بینی کرد. در جدول ۱۳ یکی از آماره‌های مهم،  $Adjusted R^2$  است. مقدار این آماره برای آلاینده‌های  $SO_2$ ،  $NO_2$ ،  $PM_{10}$  و  $PM_{2.5}$  به ترتیب ۰/۴۲، ۰/۴۸، ۰/۶۶ و ۰/۵۹ است. به عبارت دیگر با استفاده از مدل رگرسیونی انتخابی و متغیرهای مستقل می‌توان ۴۲ درصد از تغییرات غلظت آلاینده دی‌اکسید گوگرد، ۴۸ درصد از تغییرات غلظت آلاینده دی‌اکسید نیتروژن، ۶۶ درصد از تغییرات غلظت آلاینده ذرات معلق  $PM_{10}$  و ۵۹ درصد از تغییرات غلظت آلاینده ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در منطقه مورد مطالعه را بررسی کرد. به مفهوم دیگر، با استفاده از این چهار مدل رگرسیونی می‌توانیم به ترتیب ۰/۴۲، ۰/۴۸، ۰/۶۶ و ۰/۵۹ از مقدار غلظت آلاینده‌های مذکور را پیش‌بینی کنیم. از آنجا که در اکثر تحقیقات انجام شده با استفاده از این روش، مقدار  $R^2$  بین ۰/۴۵ - ۰/۷۵ به دست آمده است، در نتیجه مقدار  $R^2$ ‌های تعدیل شده مربوط در حد مطلوبی قرار دارند. همچنین، با توجه به اینکه این مدل برای اولین بار برای آلاینده‌های  $SO_2$ ،  $NO_2$  و  $PM_{2.5}$  در ایران به کار رفته، نتایج این مدل‌ها نیز برای این آلاینده‌ها قابل قبول است.

۱۰. مهم‌ترین عامل مؤثر بر آلاینده گوگرد دی‌اکسید حجم ترافیک، مهم‌ترین عامل مؤثر بر آلاینده نیتروژن دی‌اکسید نیز حجم ترافیک، مهم‌ترین عامل مؤثر بر

## یادداشت‌ها

1. Land Use Regression
2. Stepwise
3. Forward
4. Backward
5. Air Quality Index
6. Root Mean Square Error
7. Inverse Distance Weighted
8. Global Polynomial
9. Local Polynomial
10. Spline
11. Completely Regularized Spline
12. Spline with Tension
13. Kriging Method

بهتر، پیشنهاد می‌شود از متغیرهایی مانند وارونگی دما، فشار، رطوبت و سایر پارامترهای هواشناسی به عنوان پارامتر کمکی استفاده شود.

با توجه به اینکه باد غالب در تهران از سمت غرب به شرق می‌وزد و اکثر صنایع در قسمت غرب تهران قرار گرفته‌اند، به نظر می‌رسد که در مکان‌گزینی مراکز صنعتی عمده در شهر تهران، کارشناسی لازم صورت نگرفته است. بدین ترتیب، می‌توان با استفاده از سامانه اطلاعات مکانی، محل‌های مناسبی را برای تأسیس اماکن صنعتی در حال احداث تعیین کرد.

## منابع

- عتابی، ف، عباسپور، م، کرباسی، ع، حاجی سید میرزاحسینی، س.ع. ۱۳۸۶. مدلسازی انتشار ذرات معلق با بکارگیری مدل ADMS-Urban، علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره نهم، شماره ۱.
- متکان، ع، شکیب، ع، پور علی، س.ح، بهارلو، الف. ۱۳۸۸. تعیین تغییرات مکانی و زمانی آلاینده‌های گوگرد دی اکسید، نیتروژن دی اکسید و انواع ذرات معلق با استفاده از تکنیک‌های GIS در شهر تهران، سنجش از دور و GIS ایران، سال اول، شماره اول.
- Amanollahi, J., Abdullah, A. M., Farzanmanesh, R., Ramli, M. F., Pirasteh, S. 2011. PM10 Distribution using Remotely Sensed Data and GIS Techniques; Klang Valley, Malaysia. *Journal of EnvironmentAsia*, Vol.4, No. 1, Pages: 47-52.
- Basu, R., Woodruff, T.J., Parker, J.D., Saulnier, L., Schoendorf, K. C. 2004. Comparing Exposure Matrices in the Relationship between PM2.5 and Birth Weight in California. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, Vol.14, Pages: 391-396.
- Brauer, M., Hoek, G., Smith, J., Jongste, J.C., Postma, D.S., Gerritsen, J., Kerkhof, M., Brunekreef, B. 2007. Air Pollution and the Development of Asthma, Allergy and Respiratory Infections in a Birth Cohort. *European Respiratory*, Vol.29, Pages: 879-888.
- Cyrys, J., Hochadel, M., Gehrang, U., Heck, G., Diegmann, V., Brunekreef, B., Heinrich, J. 2005. GIS-Based Emission of Exposure to Particulate Matter and NO<sub>2</sub> in an Urban Area: Stochastic Versus Dispersion Modeling. *Journal of Environment Health Perspective*, Vol.113, Pages: 987-992.
- Henderson, S.B., Bekkerman, B., Jerrett, M., Brauer, M. 2007. Application of Land Use Regression to Estimate Long-Term Concentration of Traffic-Related Nitrogen Oxides and Fine Particulate Matter. *Journal of Environmental Science and Technology*, Vol.41 (7), Pages: 2422-2428.
- Jerrett, M., Aram, A., Kanaroglou, P., Beckerman, B., Potoglou, D., Sahsuvaroglu, T., Morrison, J., Giovis, C. 2005. A Review and Evaluation of Intra Urban Air Pollution Exposure Models. *Journal of Exposure Analysis and Environmental*, Vol.15, Pages: 185-204.
- Kashima, S., Yorifuji, T., Tsuda, T., Doi, T. 2009. Application of Land Use Regression to Regulatory Air Quality Data in JAPAN. *Journal of Science of the Total Environment*, Vol.36, Pages: 137-146.
- Knowlton, K., Rosenthal, J.E., Hogrefe, C., Lynn, B., Gaffin, S., Civerolo, K., Ku, J.Y., Kinney, P.L. 2004. Assessing Ozone-Related Health Impacts under a Changing Climate. *Environmental Health Perspectives*, Vol.112, Pages: 1557-1563.
- Miller, K.A., Siscovick, D.S., Sheppard, L., Shepherd, K., Sullivan, J.H., Anderson, G.L., Kaufman, J.D. 2007. Longterm Exposure to Air Pollution and Incidence of Cardiovascular Events in Women. *New England Journal of Medicine*, Vol.356, Pages: 447-458.
- Moore, D.K., Jerrett, M., Mack, W.J., Kunzli, N. 2007. A Land Use Regression Model for Predicting Ambient Fine Particulate Matter across Los Angeles. *Journal of Environmental Monitoring*, Vol.9, Pages: 246-252.
- Wheeler, A.J., Smith-Doirim, M.X., Gilbert, N.L., Brook, J.R. 2007. Intra Urban Variability of Air Pollution in Windsor, Ontario: Measurement and Modeling for Human Exposure Assessment. *Journal of Environment Resource*, Vol.106, Pages: 7-16.