

کاربست مدل های زمین آماری در برآورد توزیع فضایی آلاینده های

هوای شهر تهران

منصور حلیمی^{۱*}

geoscience.tmu@gmail.com

زهرا زارعی چقابلی^۲

وحیده صیاد^۳

حسن جمس^۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۷/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۱۱

چکیده

زمینه و هدف: آلودگی هوا یکی از معضلات اصلی شهرهای پرجمعیت و صنعتی می باشد که در مور کلان شهر تهران نیز همواره به چشم میخورد. آگاهی از وضعیت غلظت آلاینده های هوا و توزیع فضایی آن ها در مناطق مختلف شهری امکان برنامه ریزی و مدیریت بهتری را فراهم مینماید. هدف این تحقیق ارایه یک مدل مناسب برای برآورد یک سطح پیوسته بهینه از ۴ آلاینده منو اکسید کربن، دی اکسید ازن، ذرات معلق کمتر از ۱۰ میکرون، در سطح شهر تهران است که از طریق آن بتوان دقیق ترین برآورد را از غلظت هر آلاینده در موقعیت های فاقد ایستگاه کنترل کیفی هوا انجام داد

روش بررسی: در این راستا ابتدا داده آلاینده ها برای ۲۱ ایستگاه سنجش کنترل کیفی هوا از شرکت کنترل کیفیت هوای تهران برای یک دوره دو ساله (۱۳۹۱ تا ۱۳۹۲) برای ساعت 00 UTC اخذ شد. ۴ دسته از مدل های درون یاب زمین آماری به نام های کریجینگ عام، ساده، معمولی و کوکریجینگ با نیم تغییرنمای گاوسین، برای ۴ آلاینده یاد شده، اجرا گردید و در نهایت ۱۶ سطح پیوسته برای آلاینده ها تولید شد. حال برای ارزیابی و گزینش روش برآورد بهینه برای هر کدام از آلاینده ها، از ۳ شاخص اعتبارسنجی آماری خطاهای مطلق و اربیی و جذر مربع خطاها استفاده شد. در نهایت سطوح عدم قطعیت نقشه های برآوردی برای هر آلاینده در سطح اطمینان $(P_value = 0.05)$ / ۹۵ نیز ارایه گردید.

یافته ها: نتایج نشان داد با به کارگیری متغیرهای کمکی که همبستگی معنی داری با دو آلاینده NO_2 و CO دارند، مدل کوکریجینگ معمولی با نیم تغییرنمای گاوسین، به عنوان مدل بهینه برآورد این دو آلاینده انتخاب شد. در حالی که برای دو آلاینده PM_{10} و O_3

۱- * (مسوول مکاتبات): دانش آموخته دکتری گروه آب و هواشناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲- دکترای گروه آب و هواشناسی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران.

۳- کارشناس ارشد گروه آب و هواشناسی دانشگاه تربیت مدرس تهران، تهران، ایران.

۴- کارشناس ارشد گروه جغرافیا، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ایران.

مدل کریجینگ ساده به عنوان مدل بهینه انتخاب گردید. نقشه های برآوردی با استفاده از مدل های بهینه نشان داد که غلظت دو آلاینده NO₂ و CO در مناطق مرکزی و شمالی شهر تهران به ویژه مناطق ۱ تا ۴ بیشتر از سایر نواحی است. در حالی که دو آلاینده O₃ و PM₁₀ در حواشی شهر تهران دارای بالاترین تراکم هستند.

بحث و نتیجه گیری: با به روز کردن داده های این مدل های بهینه می توان از اطلاعات آنها برای برآورد مقادیر آلاینده ها در مکان هایی که فاقد ایستگاه است استفاده نمود.

واژه های کلیدی: آلودگی هوا، مدل های زمین آماری، کریجینگ، اعتبارسنجی، تهران.

Application of geostatistical methods for estimation of Tehran Air pollutants spatial distribution

Mansour Halimi ^{1*}

Navid.dolatabadi@modares.ac.ir

Zahra Zarei Chaghabalaki ²

Vahide Sayad ³

Hasan Jems ⁴

Abstract

Background and Objective: Ambient air quality is a major concern in highly urbanized and industrialized regions such as Tehran.

Method: In this paper, the spatial distribution of 4 air pollutants in Tehran atmosphere was analyzed. The analyzed air pollutants were Carbon monoxide (CO), Nitrogen Dioxide (NO₂), Ozone (O₃) and atmospheric particulate matters less than 10 micrometers in diameter (PM₁₀). For this purpose, 4 common geostatistical interpolation methods namely: Ordinary Kriging (OK), Universal Kriging (UK), Sample Kriging (SK), and Ordinary Cokriging (COK) with Gaussian modeled semivariogram, were used to estimate the continuous surface for the 4 mentioned air pollutants. The data were collected from 21 air quality monitoring stations located in different districts of Tehran during a 2-year period from 2012 to 2013. The Kriging interpolation schemes are stochastic, local, gradual and exact interpolators. After preprocessing the collected data, they were imported to GIS by using metric coordinate system (UTM Zone 39). Finally, the Kriging predicted map was evaluate using 3 statistical indices of validation namely: Mean Absolute Error (MBE), Mean Bias Error (MAE), and Root Mean Square Error (RMSE) that can be divide into systematic and unsystematic errors (RMSEs, RMSEu).

Findings: The results indicated that, using 2 auxiliary variables, the OCK is the optimum schema for spatial estimation of CO and NO₂ pollutants in Tehran. Moreover, SK is found out as the best model for spatial estimation of NO₂ and CO. According to optimal model, the highest concentrations of ozone (O₃) and particulate matters greater than 10 microns (PM₁₀) are observed in the marginal areas of Tehran, while the highest concentrations of CO, NO₂ are observed in the central and northern districts of Tehran such as districts 1 to 4.

Conclusion: The developed optimized model can be used for real time estimation of any pollutants in Tehran atmosphere by updating the observed data.

Keywords: Air pollution, Geostatistical schema, Kriging, Tehran.

1- PhD of Climatology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.* (*Corresponding Author*)

2- PhD of Climatology, Lorestan University, Lorestan, Iran.

3-MSc of climatology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

4- MSc of Geography, Sistan va Balouchestan University, Iran.

مقدمه

ذرات بیولوژیکی و شیمیایی می باشد. تکنیک های زمین آماری مجموعه ای از روش هایی هستند که از طریق آن ها می توان با توجه به ساختار فضایی و الگوی توزیع فضایی متغیر مورد نظر، مقادیر متغیر را در موقعیت های نامعلوم برآورد کرد. با به کارگیری مدل های زمین آماری می توان سطوح پیوسته ای از غلظت آلاینده را ارائه کرد و از طریق آن تغییرات مکانی و زمانی هر آلاینده را در هر موقعیتی پایش نمود. آگاهی از توزیع فضایی غلظت آلاینده های مختلف در هوا، امکان ارائه پیش هشدارها و برنامه ریزی های به موقع تر و دقیق تری را فراهم می سازد. مدل های برآورد فضایی که مبتنی بر تکنیک های زمین آماری هستند تخمین غلظت آلاینده های مختلف را در موقعیت هایی که ایستگاه های کنترل کیفی هوا وجود ندارد، امکان پذیر می کند. از آنجا که در سطح شهر تهران تنها ۲۱ ایستگاه کنترل کیفی هوا وجود دارد (از سال ۱۳۹۱) لذا با توجه به اهمیت و ضرورت آگاهی از وضعیت غلظت آلاینده های مختلف در مناطق مختلف شهری، به عبارت دیگر، لزوم آگاهی از توزیع فضایی آلاینده های مختلف در مناطق مختلف شهر تهران، به کارگیری این مدل های برآورد فضایی تسهیلات فراوانی در تخمین مقادیر آلاینده در مناطق مختلف شهر فراهم کرده و از طریق آن می توان پیش هشدارهای به موقع و برنامه ریزی های دقیق تری را ارائه داد. مطالعات زیادی در زمینه کاربست مدل های زمین آماری برای برآورد فضایی آلاینده های هوای شهری صورت گرفته است که می توان به این موارد اشاره نمود: ونک^۵ و همکاران در سال ۲۰۰۴ چهار روش مختلف درون یابی را برای سنجش غلظت آلاینده های هوا و سنجش کیفیت ازن مناطق مختلف ایالت متحده ی آمریکا مورد ارزیابی قرار دادند. (۸) جربولس^۶ و همکارش در سال ۲۰۱۰ با استفاده از روش های زمین آماری میزان غلظت آلاینده های هوا را در مقیاس های مکانی مختلف در ایتالیا انجام دادند، هدف آنها برآورد میزان استاندارد آلاینده ها در محیط بود تا مکان های مناسب زیست شناسایی گردد. (۹) موسکاتو^۷ و همکاران در سال ۲۰۱۱ میزان آلودگی دی اکسید نیتروژن را با استفاده از روش های زمین آماری برای ارزیابی توزیع فضایی بیوشیمی کارکنان

آلودگی هوا یکی از مشکلات اصلی مناطق شهری پرجمعیت و صنعتی از جمله کلان شهر تهران می باشد. منابع انتشار آلاینده های هوا به دو گروه ثابت و متحرک تقسیم می شود. گروه ثابت شامل صنایع، نیروگاه ها و مراکز تجاری و مسکونی می شود و منابع متحرک انواع وسایل نقلیه از موتور سیکلت تا هواپیما و کشتی را شامل می گردد. آلودگی هوا در صنایع هم به علت مصرف سوخت است و هم نوع فرآیند، در حالی که در منابع متحرک عمدتاً حاصل احتراق سوخت بوده و به صورت گازهای آلاینده و یا ذرات، وارد هوا می شود (۱). در صنایع، علاوه بر آلاینده های ناشی از سوخت و مواد خام، تولیدات میانی و محصول نهایی هم وارد هوا می شود. برای پایش آلودگی هوا از ایستگاه های کنترل کیفی هوا استفاده می گردد که در نقاط مختلف شهر استقرار یافته اند. دی اکسید نیتروژن^۱ منواکسیدکربن^۲، ازن^۳ و ذرات معلق کوچک تر از ده میکرون^۴ از مهمترین آلاینده های جوی هستند که در ارتباط مستقیم با سلامت انسان قرار دارند (۲). مطالعات فراوانی وجود ارتباط معنی داری را بین غلظت آلاینده های منواکسیدکربن، دیاکسیدازت، و ذرات معلق کوچک تر از ده میکرون، و مرگ و میرهای تنفسی و قلبی عروقی، عفونت های ریوی و بیماری های حاد نیازمند بستری، تایید کرده اند (۴،۵،۶).

بررسی Rajara و همکارانش در سال ۲۰۱۰ در هندوستان نشان داد که به ازای افزایش 10 mg/m^3 در آلاینده PM_{10} میزان مرگ و میر کلی ۰/۱۵ درصد افزایش داشته در حالی که به ازای افزایش همین مقدار از دی اکسید ازت، میزان مرگ و میر ۰/۸۴ درصد کل مرگ و میر ثبت شده، افزایش داشته است (۴). مشکلات اجتماعی و فرهنگی آلودگی هوا از جمله ناراحتی های اعصاب و روان و نامطلوب کردن مناظر و چشم اندازهای شهری نیز در کنار هزینه های اقتصادی که تحمیل میکند، همگی از جنبه های منفی آلودگی هوا به حساب می آیند (۷). کلان شهر تهران نیز در رده آلوده ترین شهرهای جهان است که از جمله منابع اصلی آلودگی هوای این شهر، ترافیک شهری، فعالیت های صنعتی، سوخت های فسیلی و

1-Nitrogen Dioxide(NO2)

2-Carbon Monoxide(CO)

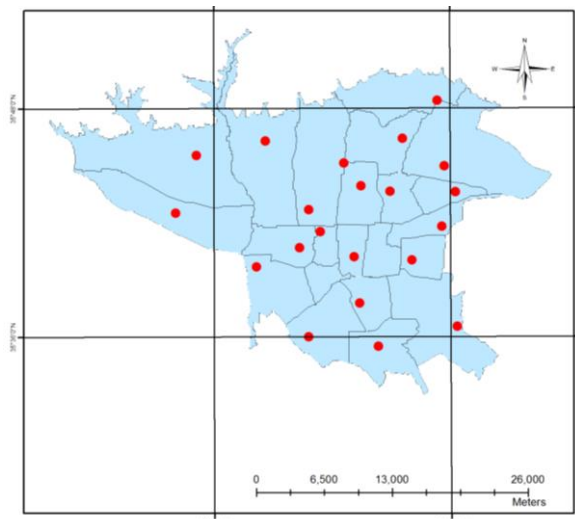
3-Ozone(O3)

4-Atmospheric particulate matter Those less than 10 micrometers in diameter (PM10)

5-Wonq

6-Gerboles

7-Moscato



شکل ۱- ایستگاه های سنجش کیفیت هوای شهر تهران

Figure 1- Air quality monitoring station

بعد از ورود اطلاعات ابتدا پیش پردازش هایی جهت آشکارسازی و حذف روند فضایی و شناسایی توزیع فضایی مشاهدات انجام گردید. برای حذف روند فضایی آشکار شده از داده های این آلاینده ها یا به عبارت دیگر برای ایستاسازی^۸ مشاهدات، از تابع حذف روند^۹ که مرتبه آن با توجه به روند آشکار شده تعیین می شود، استفاده گردید و سپس اقدام به برآورد نقشه آلایندها بر اساس مدل های زمین آماری شد. برای هر کدام از آلاینده ها ۴ مدل زمین آماری جهت برآورد سطح پیوسته، اجرا گردید و در نهایت مجموعاً ۱۶ سطح پیوسته به دست آمد که با به کار گیری شاخص های اعتبار سنجی آماری به ارزیابی این سطوح پیوسته و در نهایت گزینش ۴ سطح بهینه اقدام گردید. برای نیل به این هدف، از تکنیک اعتبارسنجی جانبی^{۱۰} که در آن از طریق حذف متوالی تک تک داده ها و برآورد مقدار متغیر در نقطه حذف شده، ارزش های معادل آن ها در هر مدل درون یابی تخمین زده می شود، استفاده شد. سپس برای اعتبارسنجی مقادیر برآوردی هر مدل و تعیین مدل بهینه، از شاخص های آماری به شرح زیر استفاده گردید: میانگین خطاهای مطلق^{۱۱} و اریب^{۱۲}، میانگین جذر مربع خطاها^{۱۳} که به دو بخش خطای سیستماتیک و غیر

بیمارستان ناشی از این گاز در ایتالیا پهنه بندی کردند و متوجه شدند که غلظت بالای دی اکسید کربن باعث بی هوشی کارکنان شده است. (۱۰) گریچن^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۲ میزان خطای اندازه گیری آلودگی محیطی را با استفاده از روش های زمین آماری انجام دادند، آنها توزیع غلظت ۱۲ آلاینده ی محیطی را در یک دوره ی ۶ ساله و در بیش از ۲۰ منطقه ی شهری در آتلانتا را پهنه بندی کردند. (۱۱). هدف این تحقیق ارایه یک مدل مناسب برای برآورد یک سطح پیوسته بهینه از ۴ آلاینده منو اکسید کربن، دی اکسید ازن، ازن و ذرات معلق کمتر از ۱۰ میکرون، در سطح شهر تهران است که از طریق آن بتوان دقیق ترین برآورد را از غلظت هر آلاینده در موقعیت های فاقد ایستگاه کنترل کیفی هوا انجام داد.

داده ها و روش کار

در این تحقیق با به کارگیری ۴ دسته از عمومی ترین مدل های درون یاب زمین آماری به نام های کریجینگ عام^۲، ساده^۳، معمولی^۴ و کوکریجینگ^۵ با نیم تغییرنمای گاوسین^۶، اقدام به بررسی توزیع فضایی آلاینده مونوکسید کربن(CO)، ازن(O3)، ذرات معلق کمتر از ۱۰ میکرون(PM10)، و دی اکسید نیتروژن(NO2)، که از آلاینده های تاثیرگذار در سلامت انسان هستند، گردید. داده های آلاینده های یاد شده برای ۲۱ ایستگاه سنجش کنترل کیفی هوای تهران همان طور که در نقشه شکل ۱ دیده می شود، از شرکت کنترل کیفیت هوای تهران برای دوره آماری ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۲ برای ساعت 00 UTC اخذ گردید. دلیل استفاده از این ساعت این بود که در این ساعت تاثیرات تصنعی که غلظت آلاینده ها را به صورت موقت در برخی ساعت ها تحت تاثیر قرار می دهند (مانند ساعات پیک ترافیک، یا ساعات فعالیت کارخانه جات آلوده کننده) کم رنگ تر باشد و بیشتر الگوهای طبیعی توزیع آلاینده ها آشکار شود. سپس داده های یاد شده به صورت یک لایه اطلاعات مکان مند با مختصات متریک(UTM زون ۳۹) وارد محیط نرم افزار سیستم های اطلاعات جغرافیایی^۷ گردید.

8-Static Optimization

9-Detrending

10-Cross Validation(CV)

11-Mean Absolute Error(MAE)

12-Mean Bias Error(MBE)

13-Root Mean Square Error(RMSE)

1-Gretchen

2-Universal Kriging(UK)

3-Simple Kriging(SK)

4-Ordinary Kriging(OK)

5-Cokriging

6-Gaussian Semivariogram

7-Geographical Information System(GIS)

تابع خطی کمترین مربعات برای برآورد مقادیر تخمینی هر مدل بر اساس مقادیر مشاهداتی به دست می‌آید. در نهایت خطای سیستماتیک عبارت است از: تفاضل داده‌های برآورد شده تابع خطی، و مقادیر مشاهداتی. حال آنکه خطای غیرسیستماتیک عبارت است از تفاضل داده‌های برآورد شده تابع خطی و مقادیر برآوردی هر مدل درون یاب (روابط ۱۱ و ۱۲).

(۴) خطای سیستماتیک مدل

$$RMSEs = N^{-1} \sum_{i=1}^N [(\hat{P}_i - O_i)^2]^{1/2}$$

$$RMSEu = N^{-1} \sum_{i=1}^N [(\hat{P}_i - \bar{P})^2]^{1/2}$$

(۵) خطای غیر سیستماتیک مدل

که در این روابط $\hat{P} = a + bO_i$ و a و b ضرایب مربوط به تابع خطی بین O و P است.

در نهایت بعد از انتخاب سطوح بهینه برای هر کدام از سطوح زمین آماری بهینه به دست آمده باند عدم قطعیت یا دامنه خطاهای مدل نیز در سطح معنی داری ۰/۹۵ (P_value 0.05) یا $\pm 1/96$ انحراف معیار، به دست آمد:

(۶) دامنه عدم قطعیت برآورد کریجینگ در سطح اطمینان ۰/۹۵

$$KPI = Z(x_0) \pm 1.96(\sigma)$$

که در رابطه فوق $Z(x_0)$ مقدار برآوردی مدل برای موقعیت X_0 و σ نیز عبارت است از انحراف معیار برآورد.

یافته‌ها

نتایج حاصل از پیش پردازش مشاهدات شامل کنترل نرمالیت به مشاهدات و همچنین ایستاسازی آن از طریق آشکار سازی و حذف روند فضایی موجود در آن‌ها است. همان‌طور که در نمودارهای اشکال ۲ و ۳ دیده می‌شود همه آلاینده‌های مورد بررسی دارای روند فضایی خاصی در سطح شهر تهران بودند. بر اساس شکل ۲ که روند فضایی دو آلاینده ازن و منواکسید کربن را نشان می‌دهد، آلاینده ازن دارای رفتار فضایی معکوسی با سایر آلاینده‌های می‌باشد به طوری که کمینه غلظت این آلاینده در مناطق مرکزی شهر تهران مشاهده می‌شود و بالاترین غلظت در حاشیه‌های شمالی و به ویژه شمال شرقی تهران مشاهده می‌گردد. آلاینده منواکسید کربن از شرق به غرب تهران (در راستای محور X نمودار) غلظت آن بالا رفته و در نواحی مرکزی شهر به اوج رسیده و سپس کم می‌شود. از

سیستماتیک قابل تفکیک است. مقادیر خطاهای مطلق و اریبی که به ترتیب برای محاسبه‌ی دقت و انحراف هر مدل درون‌یابی به کار برده می‌شود عبارتند از: (۱۲).

(۱) میانگین خطاهای مطلق

$$MAE = N^{-1} \sum_{i=1}^N |x_o - x_p|$$

(۲) میانگین خطاهای اریبی

$$MBE = N^{-1} \sum_{i=1}^N (x_o - x_p)$$

MAE معرف خطا است که هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد، دقت روش مورد نظر مناسب‌تر است، شاخص MAE معمولاً بر RMSE ترجیح داده می‌شود زیرا MAE نسبت به داده‌های پرت حساسیت کم تری دارد [Anderson, 2005]. مقدار MBE بیانگر میانگین انحراف است که می‌تواند مثبت و یا منفی باشد. این شاخص می‌تواند نشان دهد که مدل به کار گرفته شده، در تخمین متغیر مورد نظر، دچار خطای بیش برآورد^۱ شده است یا خطای کم برآورد^۲.

میانگین جذر مربع خطاها نیز از رابطه ۱۰ محاسبه می‌گردد که مقدار اختلاف بین مقدار پیش‌بینی شده و مقادیر مشاهداتی را نشان می‌دهد (۱۲).

(۳)

$$RMSE = N^{-1} \sum_{i=1}^N \{(x_o - x_p)^2\}^{1/2}$$

در روابط ۸ تا ۱۰، X_0 مقدار مشاهده شده، X_p مقدار برآورد شده برای همان نقطه و n تعداد نقاط است.

خطای جذرمربع میانگین مدل‌ها (RMSE) را می‌توان به دو بخش خطای سیستماتیک (RMSEs) و خطای غیر سیستماتیک (RMSEu)، تجزیه کرد. خطای غیر سیستماتیک، بیانگر خطاهایی است که از لحاظ ریاضی غیر قابل پیش‌بینی هستند، اما خطای سیستماتیک خطاهای قابل پیش‌بینی از لحاظ ریاضی می‌باشند (۱۳). برای محاسبه این دو نوع خطای یک مدل کمترین مربعات ساده^۳ بین داده‌های مشاهداتی و مقادیر برآوردی هر روش درون‌یاب برآورد داده می‌شود. در این مدل‌سازی مقادیر مشاهداتی متغیر (داده‌های ایستگاه‌های کنترل کیفی هوا X_0) به عنوان متغیر مستقل (O) در نظر گرفته شده و مقادیر برآوردی هر مدل (X_p)، به عنوان متغیر وابسته (P) در نظر گرفته می‌شود و یک

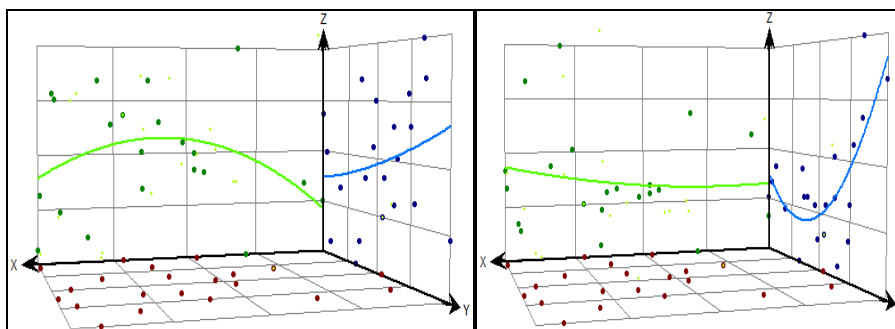
1-Overestimate

2-Underestimate

3-Ordinary Least Square(OLS)

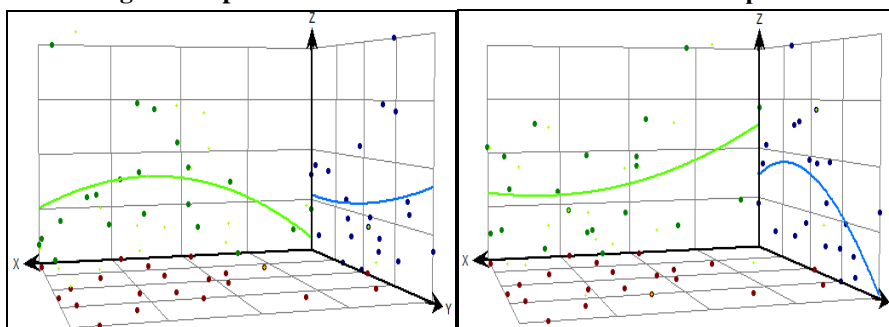
آلاینده دی اکسید نیتروژن تا حد زیادی مشابه دی اکسید کربن است به طوری که از غرب به شرق همان طور که در نمودار شکل ۳ دیده می شود، در مرکز شهر تهران غلظت آن به حداکثر می رسد. در راستای محور Y یعنی از جنوب به شمال تهران نیز روند افزایشی ثابتی در غلظت این آلاینده مشاهده می گردد (نمودار اشکال ۲ و ۳).

جنوب به شمال تهران (راستای محور Y نمودار) نیز این آلاینده افزایش می یابد. به طوری که بالاترین غلظت منواکسید در نواحی شمال مرکز شهر مشاهده می شود. ذرات معلق کوچک تر از ۱۰ میکرون در مناطق شرقی، مرکزی و جنوبی تهران دارای بالاترین تراکم است. به طرف شمال شهر تراکم ذرات معلق به سرعت افت کرده و این روند نزولی به سمت غرب تهران نیز با شدت کم تری مشاهده می شود. رفتار فضایی



شکل ۲- روند فضایی دو آلاینده O3 (راست) و CO (چپ) در سطح شهر تهران (محور X از غرب به شرق، محور Y از جنوب به شمال)

Figure 2- Spatial Trend of O3 and CO in Tehran's atmosphere



شکل ۳- روند فضایی دو آلاینده PM10 (راست) و NO2 (چپ) در سطح شهر تهران (محور X از غرب به شرق، محور Y از جنوب به شمال)

Figure 3- Spatial Trend of PM10 and NO2 in Tehran's atmosphere

از میان ۴ سطح پیوسته تولیدی برای این آلاینده، مدل کوکریجینگ معمولی دارای کم ترین مقدار خطاهای مطلق و اریب و کم ترین RMSE است (۰/۰۵، -، ۰/۶۶ و ۰/۷۸ به ترتیب). مقدار شاخص خطاهای سیستماتیک (RMSEs) یا خطاهای قابل پیش بینی آن بعد از مدل های کریجینگ عمومی و کریجینگ ساده در رده سوم قرار دارد. اما از لحاظ خطاهای غیر قابل پیش بینی یا خطاهای غیر سیستماتیک که دارای درجه اهمیت بالاتری نسبت به خطاهای قابل پیش بینی است، این مدل در رده اول قرار داشته و کم ترین خطای غیر سیستماتیک را داشته است (۰/۵۰). بر اساس نقشه تولیدی

با اعمال توابع حذف روند با درجات مختلف مشاهده شد که تابع حذف روند درجه ۲ روند مشاهده شده را به مناسب ترین وجه حذف می نماید. لذا با به کار گیری تابع حذف روند درجه ۲ مشاهدات موجود ایستاسازی شدند. و از لحاظ توزیع مشاهدات نیز توزیع مشاهدات تا حد قابل قبولی به توزیع نرمال نزدیک بود. آزمون همبستگی آلاینده های مورد، جهت استفاده از مدل کوکریجینگ نیز در جدول ۱ ارایه شده است. نتایج اعمال شاخص های اعتبار سنجی برای هر آلاینده جهت گزینش روش درون یاب بهینه به صورت جدول هایی که در ادامه می آید، اشاره شده است. همان طور که در جدول ۲ مشاهده می گردد

ساعت UT00 برای بخش وسیعی از مرکز تهران در حدود ۲ تا ۴ بخش در میلیون است که در نقشه شکل ۴ ارایه شده است. نقشه عدم قطعیت یا دامنه برآورد مدل، برای آلاینده مونوکسیدکربن به صورت شکل ۵ ارایه شده است. بر اساس این شکل باند عدم قطعیت برآورد مدل، در محدوده وسیعی از شهر تهران بین ± 0.2 تا ± 0.25 قرار دارد. بالاترین میزان خطای برآورد مربوط به غرب تهران می باشد که در حدود ± 0.3 تا ± 0.35 است.

بهینه برای آلاینده مونوکسید کربن که با دخالت دو متغیر کمکی PM_{10} و NO_2 از طریق مدل کوکریجینگ معمولی با نیم تغییرنمای گاوسین در شکل ۴ ارایه شد، بالاترین غلظت دی اکسید کربن در نواحی شمالی و تاحدی مرکزی شهر تهران دیده می شود. غلظت این آلاینده در مناطق شمال مناطق ۴، ۲ و ۵ در حدود ۴ppm تا ۵ بوده است و در بخش های غرب تهران یعنی غرب مناطق ۲۱ و ۲۲ در حدود ۲ppm تا ۱. میانگین ۲ ساله غلظت این آلاینده در

جدول ۱- همبستگی آلاینده های جوی مختلف هوای تهران

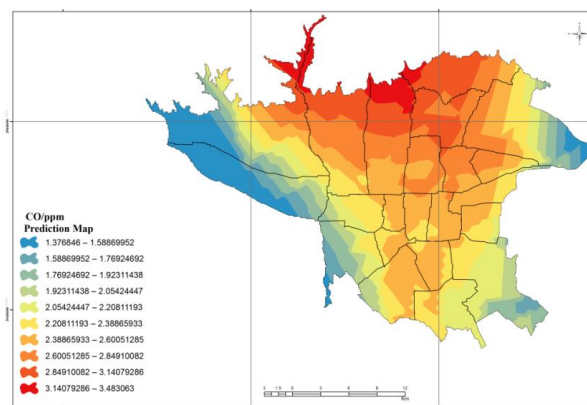
Table 1- Correlation Matrix of seven measured air pollutants (P_value=0.05)

	CO	NO2	NO	NOX	O3	PM10	SO2
CO	۱						
NO2	۰/۵۹	۱					
NO	۰/۱۷	۰/۷۷	۱				
NOX	۰/۳۶	۰/۸۸	۰/۹۷	۱			
O3	۰/۲۱۳	۱/۱۷۶	-۰/۵۷	-۰/۴۴	۱		
PM10	-۰/۶۶	۰/۶۰	-۰/۱۱	۰/۲۴	-۰/۴۲	۱	
SO2	۰/۲۱	۰/۳۶	۰/۴۰	۰/۳۶	۰/۱۳	-۰/۳۶	۱

جدول ۲- نتایج شاخص های اعتبار سنجی برای آلاینده منواکسیدکربن

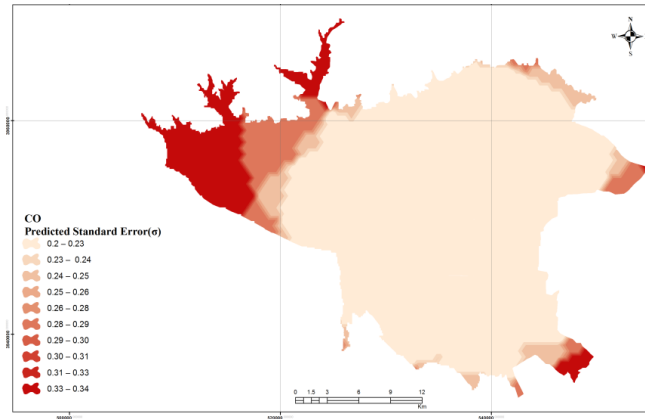
Table 2- Indices of performance evaluating of the interpolation methods for CO

	منواکسیدکربن			
	OK	UK	SK	COK
MBE	-۰/۰۵۶	-۰/۳۹	-۰/۰۵۳	۰/۰۵۰
MAE	۰/۶۷	۱/۱۳	۰/۶۸	۰/۶۶
RMSE	۰/۸۱	۲/۲۶	۰/۸۱۲	۰/۷۸
EMSEs	۰/۵۸۴	۱/۲۷	۰/۵۹	۰/۶۰
RMSEu	۰/۵۷	۱/۸۷	۰/۵۵	۰/۵۰



شکل ۴- سطح بهینه برآورد غلظت منواکسیدکربن براساس مدل کوکریجینگ معمولی

Figure 4- Estimated surface of CO concentration (ppm) in Tehran's atmosphere using COK interpolation schema



شکل ۵- باند عدم قطعیت برآورد مدل کوکریجینگ برای آلاینده منواکسید کربن

Figure 5- Uncertainty band or error surface of estimated CO surface by OCK interpolation schema

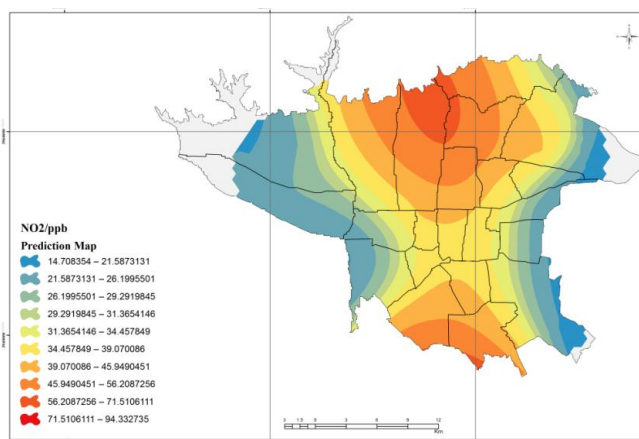
ارایه شده است. بر اساس این شکل وسیع ترین باند عدم قطعیت برآورد مدل (±۶ تا ±۹)، در محدوده ای از شهر تهران است که بالاترین غلظت آلاینده در آنجا متمرکز است، یعنی بخش وسیعی از مناطق شمالی، مرکزی و جنوبی تهران. درحالی که حاشیه های غربی و شرقی شهر دارای کم ترین سطح عدم قطعیت یا خطای برآورد هستند.

جدول ۳- نتایج شاخص های اعتبار سنجی برای آلاینده دی اکسید ازت

Table 3-Indices of performance evaluating of the interpolation methods for NO2

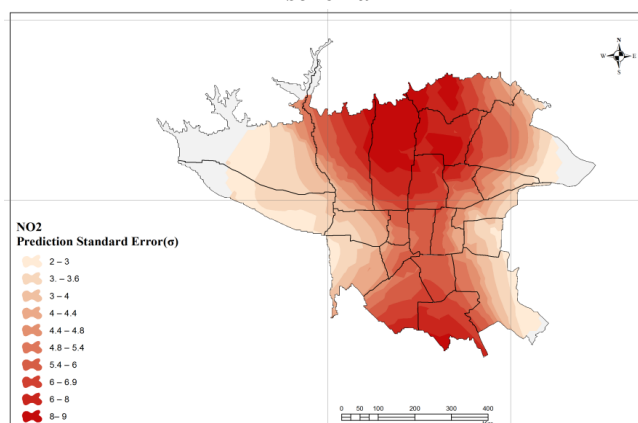
	دی اکسیدازت			
	OK	UK	COK	SK
MBE	-۱/۶	-۵/۴	-۱/۳۷	-۲/۸۲
MAE	۲۱	۳۲/۷	۱۹/۹	۲۲
RMSE	۲۷	۴۰	۲۵	۲۹
EMSEs	۲۰/۴	۶۷	۲۰/۶	۲۱/۴
RMSEu	۱۷	۴۸	۱۶	۱۹

نتایج اعمال شاخص های اعتبار سنجی بر روی ۴ سطح تولیدی برای دی اکسید نیتروژن ، در جدول ۳ ارایه شده است. همانگونه که در این جدول مشاهده می گردد، مدل کوکریجینگ معمولی با نیم تغییرنمای گاوسین دارای بالاترین دقت و کم ترین خطا است. مقدار شاخص های خطای مطلق و اریب و RMSE برای این مدل به ترتیب ۱/۳- ، ۱۹/۸ و ۲۵/۸ می باشد که در قیاس با سایر مدل ها کم ترین خطا را داشته است. از لحاظ شاخص خطاهای سیستماتیک مدل کوکریجینگ بامقدار عددی ۲۰/۶ بعد از مدل کریجینگ معمولی در رده دوم قرار دارد در حالی که از لحاظ خطاهای غیرسیستماتیک کم ترین مقدار خطا را در میان همه مدل ها داشته است (۱۵/۵). بر اساس نقشه برآوردی که در شکل ۶ براساس مدل بهینه کوکریجینگ معمولی ارایه شده است میزان غلظت این آلاینده در مناطق شمالی شهر تهران مانند شمال غرب منطقه ۱، شمال منطقه ۲، به بالاترین حد خود یعنی ۷۰ ppb تا ۹۵ می رسد در نواحی حاشیه های غرب و شرق شهر تهران میزان غلظت این آلاینده حداقل است (۱۴ ppb تا ۲۰). نقشه عدم قطعیت یادمانه برآورد مدل، برای آلاینده دی اکسید ازت به صورت شکل ۷



شکل ۶- برآورد سطح بهینه غلظت دی اکسید نیتروژن براساس مدل کوکریجینگ معمولی

Figure 6- Estimated surface of NO₂ concentration (ppb) in Tehran's atmosphere using SK interpolation schema



شکل ۷- باند عدم قطعیت برآورد مدل کوکریجینگ معمولی برای آلاینده دی اکسید ازت

Figure 7- Uncertainty band or error surface of estimated NO₂ surface

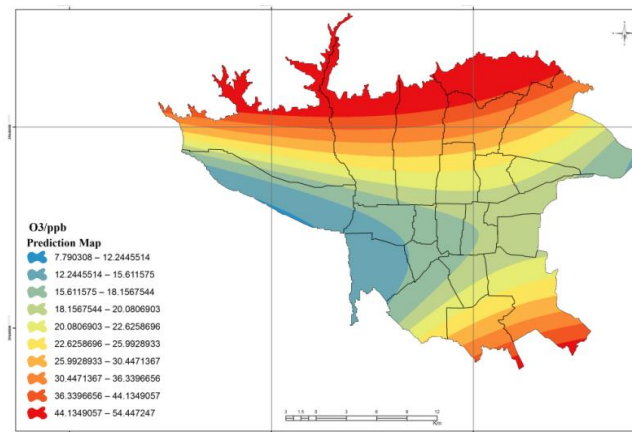
کریجینگ ساده، تولید گردید. بر اساس نقشه تولید شده که در شکل ۸ ارایه شده است، بالاترین غلظت از ن مربوط به حواشی شمالی و جنوبی شهر تهران است. غلظت از ن در حاشیه شمالی شهر تهران یعنی مناطق ۱ شمال منطقه ۲ و ۳ حدود ۴۰ PPb تا ۵۰ می باشد. در حالی که در مرکز شهر غلظت این آلاینده بر خلاف آلاینده هایی مانند منواکسید ازت غلظت آن حداقل است (در حدود ۷ تا ۲۰ ppb). نقشه عدم قطعیت یا دامنه برآورد مدل، برای آلاینده دی اکسید ازت به صورت شکل ۹ ارایه شده است. بر اساس این شکل، برآورد مدل در مناطق مرکزی شهر تهران دارای کمتری خطا یا کوچک ترین باند عدم قطعیت است (حدود $\pm 0/3$ تا $\pm 0/45$). برآورد مدل در حواشی غربی و شرقی و شمالی جنوبی شهر بیشترین میزان خطا را به همراه داشته است.

نتیجه اعمال شاخص های اعتبار سنجی بر سطح تولیدی آلاینده از ن، در جدول ۴ ارایه شده است. همان طور که در این جدول دیده می شود، از میان ۴ مدل درون یاب به کارگرفته شده برای برآورد غلظت این آلاینده در سطح شهر تهران مدل کریجینگ ساده با نیم تغییرنمای گاوسین دارای کم ترین مقدار خطاهای مطلق و اریب و RMSE بود که این مقادیر به ترتیب عبارتند از: ۰/۱۳، ۷ و ۹. مقدار شاخص خطای قابل پیش بینی یا خطای سیستماتیک مدل کوکریجینگ معمولی برای برآورد غلظت این آلاینده در حدود ۶ بود که بعد از مدل های کریجینگ ساده و معمولی در رده سوم قرار داشت. اما از لحاظ شاخص خطای غیرسیستماتیک یا خطاهای غیر قابل پیش بینی، این مدل کم ترین خطاها را دربر داشت. نقشه برآورد غلظت از ن در سطح شهر تهران بر اساس مدل

جدول ۴- نتایج شاخص های اعتبار سنجی برای آلاینده ازن

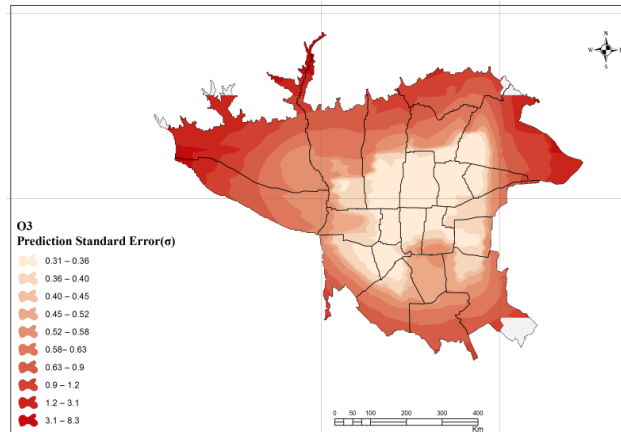
Table 4- Indices of performance evaluating of the interpolation methods for O3

	ازن			
	OK	UK	COK	SK
MBE	-۰/۵۸	۱/۷۷	-۰/۲۲	-۰/۱۲
MAE	۸/۹	۱۲/۶	۸/۲۲	۷/۱۶
RMSE	۱۱/۴۷	۱۵/۵۱	۱۰/۲۲۱	۹/۱۳
EMSEs	۵/۲	۷/۰۲	۴/۵۴	۵/۹۱
RMSEu	۱۰/۲۲	۱۳/۸۳	۹/۱۴	۶/۹۶



شکل ۸- برآورد سطح بهینه غلظت ازن براساس مدل کریجینگ ساده

Figure 8-Estimated surface of O3 concentration in Tehran's atmosphere



شکل ۹- باند عدم قطعیت برآورد مدل کریجینگ ساده برای آلاینده ازن

Figure 9-Uncertainty band or error surface of estimated O3 surface

نتایج اعمال شاخص های اعتبار سنجی آماری بر روی سطوح تولید شده آلاینده PM10، در جدول ۵ نشان داده شده است. همان طور که در این جدول دیده می شود مدل کریجینگ ساده بر اساس شاخص های خطای مطلق و اریب و RMSE در رده اول قرار داشته و دارای کم ترین مقدار خطا است (۱/۵-، ۲۱ و ۲۵ به ترتیب). شاخص خطاهای قابل پیش بینی برای

سطح ازن مدل سازی شده توسط کریجینگ ساده برابر ۱۳ می باشد که در بین سایر مدل ها کمینه است. اما از لحاظ خطاهای غیرقابل پیش بینی این مدل بعد از مدل کوکریجینگ معمولی در رده دوم قرار دارد. سطح برآورد بهینه تراکم ذرات کوچک تر از ۱۰ میکرون در به صورت نقشه شکل ۱۰ نشان داده شده است. بر اساس این نقشه بیشینه تراکم این ذرات در بخش

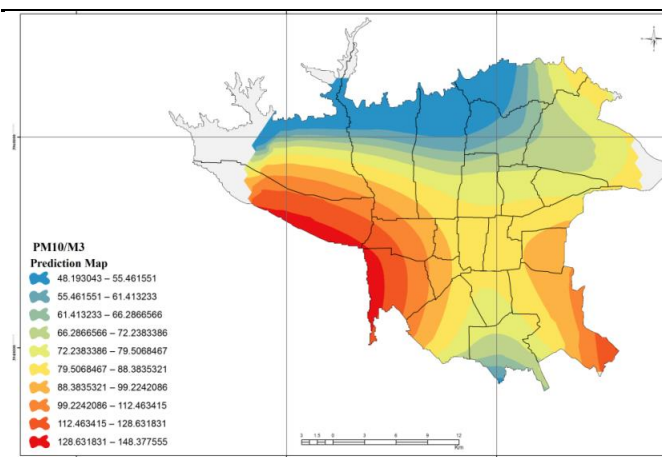
میکرون به صورت شکل ۱۱ ارایه شده است بر اساس این شکل برآورد مدل در مناطق مرکزی شهر تهران دارای کمترین خطا یا کوچکترین باندعدم قطعیت است (حدود ± 0.5 تا ± 1.4). در حالی که در حاشیه های شمالی شهر که از لحاظ تراکم ذرات معلق مقدار کمینه را به خود اختصاص داده است، برآورد مدل بیشترین میزان خطا را به همراه داشته است.

جنوب غرب تهران متمرکز است. تراکم ذرات در این بخش در حدود ۱۲۰ تا ۱۵۰ میلی گرم در مترمکعب حجم هوا می باشد. کمینه تراکم این ذرات معلق در نواحی شمالی شهر تهران به چشم میخورد که حدود ۴۰ تا ۶۵ میلی گرم در مترمکعب واحد حجم هوا می باشد. مناطق مرکزی تهران دارای تراکم متوسط ۷۰ تا ۹۰ میلی گرم در مترمکعب است. نقشه عدم قطعیت یادمانه برآورد مدل، برای آلاینده ذرات معلق کوچکتر از ۱۰

جدول ۵- نتایج شاخص های اعتبار سنجی برای ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون

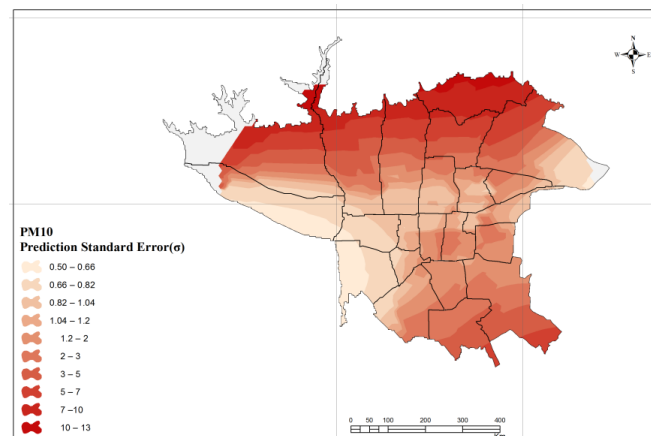
Table 5- Indices of performance evaluating of the interpolation methods for PM10

	PM10			
	OK	UK	SK	COK
MBE	۱/۵۷	-۱۰/۴۲	-۱/۴۹	۳/۰۶
MAE	۲۱/۴۴	۳۶/۴۷	۲۰/۹۷	۲۴/۴۷
RMSE	۲۱/۶۳	۵۸/۴۹	۲۵/۶۷	۲۸/۲۷
EMSEs	۱۹/۷	۱۴	۱۳/۷۱۱	۲۰/۸۱
RMSEu	۲۶	۵۷	۲۱	۱۹/۱۲



شکل ۱۰- برآورد سطح بهینه غلظت ذرات معلق براساس مدل کریجینگ ساده

Figure 10- Estimated surface of PM10 concentration in Tehran's atmosphere

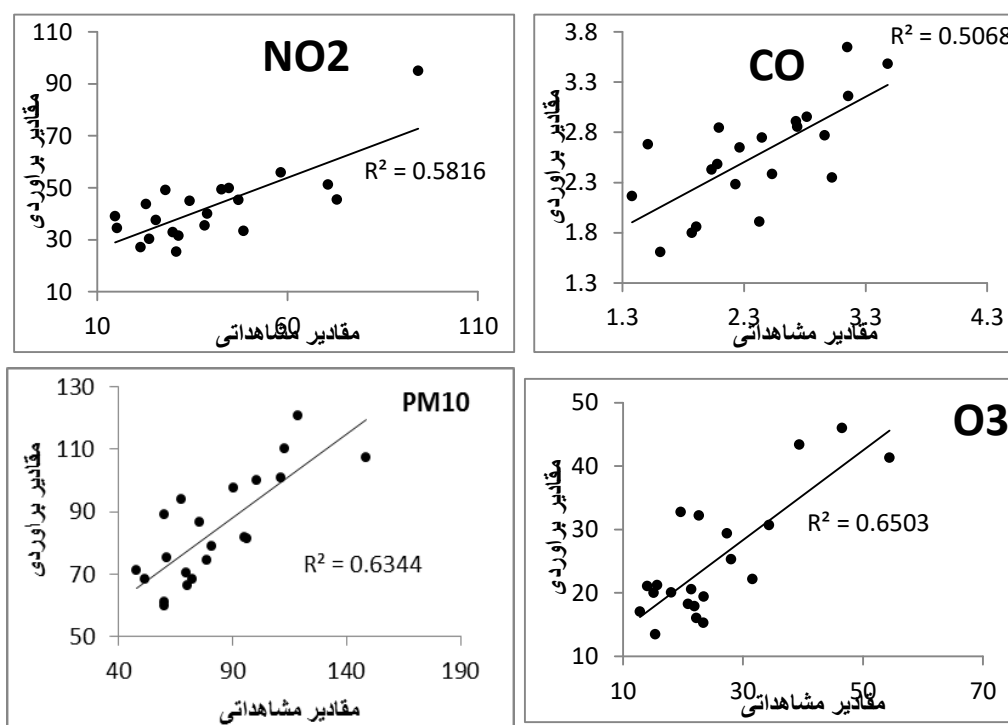


شکل ۱۱- باند عدم قطعیت برآورد مدل کریجینگ ساده برای ذرات معلق

Figure 11- Uncertainty band or error surface of estimated PM10 surface

بالاترین ضریب تعیین (Coefficient of Determination (R²)) را با مقادیر مشاهداتی نشان می‌دهد که برابر ۰/۶۵ می باشد. بعد از آن مقادیر برآوردی آلاینده‌های PM₁₀, NO₂ و CO است که شاخص ضریب تعیین برای آن‌ها به ترتیب برابر ۰/۶۳، ۰/۵۸ و ۰/۵۰ می باشد که همگی در سطح اطمینان ۰/۹۵، معنی دار هستند.

مقایسه مقادیر مشاهداتی که از شرکت کنترل کیفی هوای تهران اخذ گردید و گویایی میانگین وضع موجود توزیع فضایی آلاینده های یاد شده در ساعت UTC00، در جو تهران است، با مقادیر برآوردی توسط مدل های درون یاب بهینه، در نمودارهای شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان طور که در این نمودار ها دیده می شود، مقادیر برآوردی آلاینده ازن، که توسط مدل کریجینگ ساده به عنوان مدل بهینه برآورد گردید،



شکل ۱۲- مقایسه مقادیر مشاهداتی آلاینده ها با مقادیر برآوردی مدل های درون یاب بهینه

Figure 12- Scatter-plot inspection of observed versus estimated concentrations

بحث و نتیجه گیری

مناطق مرکزی و شمالی شهر تهران به ویژه مناطق ۱ تا ۴ بیشتر از سایر نواحی است. مقایسه سطوح تولید شده آلاینده‌ها با وضع موجود توزیع آلاینده ها در شهر تهران همبستگی بالای این مقادیر برآوردی و مشاهداتی را نشان داد. می توان با به روز کردن داده های این مدل های بهینه می توان غلظت هر آلاینده را در هر زمانی در موقعیت های مختلف سطح شهر تهران برآورد کرد و پیش هشدارها و برنامه ریزی های به موقع تر و دقیق تری را در زمینه برنامه ریزی آلودگی هوا ارائه نمود.

در این تحقیق با اعمال ۴ شاخص اعتبار سنجی آماری برای ارزیابی مدل های به کارگرفته شده زمین آماری جهت تولید سطوح پیوسته غلظت آلاینده جوی، CO, NO₂, O₃ و PM₁₀ مشخص گردید که، با دخالت متغیرهای کمکی که همبستگی معنی داری با دو آلاینده NO₂ و CO دارند مدل کوکریجینگ معمولی بانیم تغییرنمای گاوسین به عنوان مدل بهینه در نظر گرفته می شود در حالی که برای دو آلاینده PM₁₀ و O₃ مدل کریجینگ ساده دارای کم ترین خطا و بالاترین دقت در برآورد مقادیر متغیر بود. نقشه های برآوردی با استفاده از مدل های بهینه نشان داد که غلظت آلاینده ها در

- منابع
- 8- Wong D.W., Lester Yuan And Susan A. Perlin, (2004) , Comparison of spatial interpolation methods for the estimation of air quality data, *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*,14, 404–415
 - 9- Gerboles Michel and Reuter Hannes I,(2010), Estimation of the measurement uncertainty of ambient air pollution datasets using geostatistical analysis European Commission, Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability, , Pages 1-37
 - 10- Moscato Umberto, Esposito Teresa, Vanini Giancarlo., (2011), Nitrous oxide pollution: a geostatistical method to assess spatial distribution of anaesthetic gases and hospital staff exposure exposure, human responses and building investigations ,Pages 487-492
 - 11- Gretchen T. Goldman ,James A. Mulholland, Armistead G. Russell, Katherine Gass , Matthew J. Strickland, Paige E. (2012), Tolbert. Characterization of ambient air pollution measurement error in a time-series health study using a geostatistical simulation approach *Atmospheric Environment* Volume 57, September, Pages 101–108
 - 12- Willmott, C. J., (1984). On the evaluation of model performance in physical geography. In *Spatial Statistics and Models*, ed. G. L. Gaile, and C. J. Willmott, pp. 443-460.
 - 13- Sharolyn Anderson , (2004), An Evaluation of Spatial Interpolation Methods on Air Temperature in Phoenix, AZ. G. Lorentz, and e. al, pp. 203-67. New York: Academic Press
 - 1- Stijn Janssen, Gerwin Dumon, Frans Fierens, Clemens Mensink, (2008), Spatial interpolation of air pollution measurements using CORINE land cover data, *Atmospheric Environment* 42 4884–4903
 - 2- Yanosky JD, Paciorek CJ, Schwartz J, Laden F, Puett R, ShuHH.(2008), Spatio-temporal modeling of chronic PM10 exposure for the Nurses' Health Study. *Atmos Environ*;42 (18):4047–62
 - 3- Liang, W., Wei, H. and Kuo, H., (2009). Association between daily mortality from respiratory and cardiovascular diseases and air pollution in Taiwan. *Environmental Research*, 109, pp. 51-58.
 - 4- Hosseinpour, A.R., Forouzanfar, M.H., Yunesian, M., Asghari, F., Holakouie Naieni, K. and Farhood, D., (2005). Air pollution and hospitalization due to angina pectoris in Tehran, Iran: A time-series study. *Environmental Research*,99,pp. 126-131 [In Persian]
 - 5- Ghorbani, M. and Younesian, M., (1389). Research Projects in Air pollution Epidemiology. *Iranian Epidemiology Journal*. 5, pp. 44-52 [In Persian]
 - 6- Rajarathnam, U., Sehgal M., Nairy S., Patnayak R.C., Chhabra S.K., Kilnani, K.V., R and Committee., HHR, (2011). Time Series study on air pollution and mortality in Dehli. *Res Rep Health Eff Inst*,Mar,pp. 47-74
 - 7- D. Vienneau, K. de Hoogh, D. Briggs, (2009), A GIS-based method for modelling air pollution exposures across Europe, *Science of the Total Environment* 408 , 255–266