

## Providing the Best Interpolation Model for Spatial Distribution of Particulate Matter Smaller Than 2.5 Micrometers in Mashhad

### Maryam Charmzan

M.Sc. Student, Natural Resources, Environmental Engineering, Kheradgarayan Motahar Institute Of Higher Education, Mashhad, Iran

### Reza Esmaili

Ph.D. Climatology, Manager of Environment Pollution Monitoring Center of Mashhad, Mashhad, Iran

### Mitra Mohammadi

\*Assistant Professor, Ph.D. in Environmental Biotechnology, Kheradgarayan Motahar Institute Of Higher Education, Mashhad, Iran. (Corresponding Author):  
Email: mitramohammadi@gmail.com

### Vahid moradnezhad

Ph.D. Agrotechnology, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

Received: 2021/09/16

Accepted: 2021/10/20

**Document Type:** Research article

### ABSTRACT

**Background and Aim:** Air pollution is one of the most important environmental problems in the last century that threatens human health. Particulate matter is one of the deadliest types of air pollution. This study was done to choose the best interpolation algorithm for the spatial distribution of particulate matter smaller than 2.5 micrometers ( $PM_{2.5}$ ) in Mashhad in 2016 by different spatial models.

**Material and Methods:**  $PM_{2.5}$  concentration data were collected from 21 active air quality measuring stations in different parts of Mashhad. Then, IDW, Ordinary Kriging (OK), and Universal Kriging (UK) interpolation models were used to spatially investigate the air pollution situation in Mashhad. The Root Mean Square Error (RMSE) was used to compare the models and select the best model. The standardized RMSE was used to choose the most optimal conditions for running the OK and UK models.

**Results:** The highest seasonal average of  $PM_{2.5}$  pollutants in 2016 was related to autumn ( $40.84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) and the lowest was related to spring ( $27.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Also, the east to the north area of Mashhad had a more unfavorable situation in pollution concentration than the western areas of the city. Comparison of the models using RMSE index showed that the OK model due to having the lowest amount of RMSE for seasonal average and annual concentration of  $PM_{2.5}$  has a lower error in predicted values than the measured values so it has better conditions for intermediation.

**Conclusion:** This research eventually led to the production of maps of the  $PM_{2.5}$  situation in the whole city of Mashhad, which is very useful to identify high-risk areas in the city and use practical measures to reduce air pollution in those areas.

**Keywords:** Air Pollution; Particles; Mashhad; Modeling; GIS

► **Citation:** Charmzan M, Esmaili R, Mohammadi M, Moradnezhad V. Providing the Best Interpolation Model for Spatial Distribution of Particulate Matter Smaller Than 2.5 Micrometers in Mashhad. *Iranian Journal of Research in Environmental Health*. Autumn 2021; 7(3): 201-215.

## ارائه بهترین الگوی درون‌یابی در توزیع مکانی ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون شهر مشهد

### چکیده

**زمینه و هدف:** آلودگی هوا از مهم‌ترین مشکلات زیست محیطی در قرن اخیر است که سلامت انسانها را تهدید می‌نماید و ذرات معلق از مریکبارترین انواع آلودگی هوا محسوب می‌شوند. لذا مطالعه حاضر با هدف انتخاب بهترین الگوریتم درون‌یابی در توزیع مکانی ذرات معلق  $PM_{2.5}$  شهر مشهد در سال ۱۳۹۵ توسط مدل‌های مختلف فضایی انجام شد.

**مواد و روش‌ها:** غلظت ذرات معلق  $PM_{2.5}$  از تعداد ۲۱ ایستگاه فعال سنجش کیفیت هوا در نقاط مختلف شهر مشهد جمع‌آوری و مدل‌های درون‌یابی کریجینگ معمولی، کریجینگ جهانی و تابع فاصله معکوس وزن دار به‌منظور بررسی فضایی وضعیت آلودگی هوای کلان‌شهر مشهد مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای مقایسه مدل‌ها و انتخاب بهترین مدل از ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و برای انتخاب بهینه‌ترین شرایط اجرای دو مدل کریجینگ معمولی و کریجینگ جهانی از ریشه میانگین خطای استاندارد (Standardized RMSE) استفاده گردید.

**یافته‌ها:** بر اساس نتایج، بیشترین میانگین فصلی آلاینده  $PM_{2.5}$  در سال ۱۳۹۵ مربوط به فصل پاییز (۴۰/۸۴ میکروگرم بر متر مکعب) و کمترین آن مربوط به فصل بهار (۲۷/۷۸ میکروگرم بر مترمکعب) بود. همچنین منطقه شرق تا شمال شهر مشهد در وضعیت نامناسب‌تری از نظر غلظت آلاینده نسبت به نواحی غربی این شهر قرار داشت. مقایسه مدل‌ها با استفاده از شاخص ریشه میانگین مربعات خطا نیز نشان داد که مدل کریجینگ معمولی به‌علت دارا بودن کمترین میزان RMSE برای میانگین فصلی و سالیانه غلظت ذرات معلق  $PM_{2.5}$  دارای میزان خطای کمتر در مقادیر پیش‌بینی نسبت به اندازه‌گیری است. لذا دارای شرایط بهتر در میان‌یابی است.

**نتیجه‌گیری:** این پژوهش در نهایت منجر به تولید نقشه‌هایی از وضعیت آلاینده  $PM_{2.5}$  بر روی کل شهر مشهد شد که به‌منظور شناخت مناطق پرریسک در شهر و بکارگیری اقدامات مفید به‌منظور کاهش آلودگی هوا در آن مناطق بسیار سودمند می‌باشد.

**کلیدواژه‌ها:** آلودگی هوا، ذرات معلق، شهر مشهد، مدل‌سازی، GIS

مریم چرم‌زن

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع طبیعی- محیط زیست، مؤسسه آموزش عالی خردگرایان مطهر، مشهد، ایران.

رضا اسماعیلی

دکتری تخصصی آب و هواشناسی، مرکز پایش آلاینده‌های زیست‌محیطی مشهد، مشهد، ایران.

میترا محمدی

\* استادیار، دکتری بیوتکنولوژی محیط زیست، مؤسسه آموزش عالی خردگرایان مطهر، مشهد، ایران. (نویسنده مسئول):

Email: mitramohammadi@gmail.com

وحید مرادنژاد

دکتری آگروتکنولوژی، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۸

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

امروزه، دغدغه بیشتری برای نیل به توسعه پایدار شهری در کشورهای در حال توسعه با توجه به نرخ بالای رشد جمعیت شهری آن‌ها وجود دارد. مقوله محیط زیست و به‌ویژه بحران آلودگی هوا، به‌عنوان یک مانع مهم در جهت تحقق پایداری شهرها، امروزه از مسائل عمده شهرهای بزرگ جهان محسوب می‌شود و به یکی از چالش‌های اصلی مدیریتی در کشور ایران نیز تبدیل شده است. کلانشهر مشهد نیز در سال‌های اخیر با افزایش جمعیت، حجم بالای زائر، افزایش تعداد خودروها، عدم سامان‌دهی حمل‌ونقل شهری و رشد چشم‌گیر صنایع و کارخانجات در سطح شهر مواجه بوده است و این روند وضعیت آلودگی هوای شهر مشهد را تشدید نموده است (۱). مونوکسیدکربن (CO)، دی‌اکسیدکربن (CO<sub>2</sub>)<sup>۲</sup>، اکسیدهای گوگرد (SO<sub>x</sub>)<sup>۳</sup>، اکسیدهای نیتروژن (NO<sub>x</sub>)<sup>۴</sup>، هیدروکربن‌ها (HC)<sup>۵</sup> و ذرات معلق (PM)<sup>۶</sup> به‌عنوان آلاینده‌های اولیه و اوزون (O<sub>3</sub>)<sup>۷</sup> و پراکسی استیل نیترات (PAN)<sup>۸</sup> به‌عنوان آلاینده‌های ثانویه، از مهم‌ترین مواد آلوده کننده هوای محیط‌های شهری می‌باشند (۲). در این بین، ذرات معلق به‌عنوان یکی از آلاینده‌هایی است که بیشترین تهدید را برای شهر مشهد داشته است. ذرات معلق موجود در هوا دارای گستره وسیع اندازه بین ۰/۰۰۰۰۲ تا ۵۰۰ میکرون می‌باشند که در این میان، ذرات معلق با قطر کمتر از ۲/۵ میکرون (PM<sub>2.5</sub>)، دارای بیشترین روزهای ناسالم در طی سال‌های اخیر بوده است. این ذرات ممکن است دارای منشأ طبیعی (گرد گیاهان، هاگ‌ها، باکتری‌ها، ویروس‌ها، تک‌یاخته‌ای‌ها، قارچ‌ها، رشته‌های گیاهی، بقایای زنگ زدگی و غبار ناشی از فعالیت‌های آتشفشانی) و یا انسانی (فعالیت‌های احتراقی، دود ناشی از خاکستر، دود، دوده‌ها، اکسیدهای فلزی، نمک‌ها، قطرات روغنی یا قیری، قطرات

1. Carbon monoxide
2. Carbon dioxide
3. Sulfur oxides
4. Nitrogen oxides
5. Hydrocarbons
6. Particulate Matter
7. Ozone
8. Peroxyacetyl nitrate

اسیدی، سیلیکات‌ها، سایر غبارهای معدنی و دوده‌های غلیظ فلزی) باشند (۳). در دهه‌های اخیر آلودگی هوا در بسیاری از مناطق جهان باعث افزایش نگرانی عمومی در خصوص ایجاد عوارض بهداشتی آن شده است؛ به‌طوری‌که تخمین زده شده است که آلودگی هوا ۱/۴٪ کل مرگ‌ومیرها را در دنیا به‌خود اختصاص داده است (۴). از جمله این آلاینده‌ها که اثرات سوئی بر سلامت انسان‌ها دارد، ذرات معلق می‌باشد. بسیاری از ذرات معلق در مقایسه با آلوده کننده‌های گازی دیگر سبب بروز اختلالات بیشتری در مجاری تنفسی می‌شوند؛ به‌طوری‌که آلاینده‌های PM<sub>2.5</sub> و PM<sub>10</sub> می‌توانند به‌طور عمیقی به داخل شش‌ها نفوذ کرده و اثرات نامطلوبی را بر سلامت انسان وارد نمایند (۵). همچنین مطالعات اپیدمیولوژی متعددی نشان‌دهنده تأثیر مخرب‌تر و جدی‌تر ذرات PM<sub>2.5</sub> در میان سایر ذرات معلق برای عملکرد ریه و مشکلات قلبی-عروقی می‌باشند (۶).

تحقیقات جدید گزارش کردند که سالیانه ۳/۵ میلیون مرگ‌ومیر به‌دلیل بیماری‌های قلبی-عروقی و ۲۲۰۰۰۰ میلیون مرگ‌ومیر نیز به‌دلیل سرطان ریه ناشی از ذرات PM<sub>2.5</sub> در دنیا اتفاق می‌افتد (۷). از این رو با توجه به اثرات سوء بهداشتی آلاینده‌های هوا به‌ویژه ذرات معلق بر سلامت انسان، به‌نظر می‌رسد که افزایش غلظت این آلاینده شاخص به یک چالش بزرگ برای مدیریت کلانشهرهای ایران تبدیل شده است، لذا اطلاع از وضعیت پراکندگی مکانی آلودگی آلاینده‌های هوا در سطح شهر، این امکان را به مدیران کلانشهرها می‌دهد تا با در نظر گرفتن اقداماتی مناسب، میزان خطرات برای مناطق و افراد ریسک‌پذیر را کاهش دهند. این امر از طریق روش‌های درون‌یابی مکانی و مدل‌های تحلیل فضایی امکان‌پذیر می‌باشد، زیرا اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌ها هزینه‌بر بوده و به‌صورت نقطه‌ای انجام می‌گیرد، اما ضرورت ایجاد می‌کند که اطلاعات اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌ها برای تحلیل‌های منطقه‌ای به کل منطقه مورد مطالعه تعمیم داده شوند و توزیع آن‌ها در پهنه شهر ترسیم شود.

در سال‌های اخیر با توسعه روش‌های آماری و مدل‌های زمین آمار، روش‌های وزن دهی معکوس فاصله<sup>۱</sup>، اسپلاین<sup>۲</sup>، درونیابی همسایگی طبیعی<sup>۳</sup> و کریجینگ<sup>۴</sup> برای تحلیل فضایی آلودگی هوا از داده‌های نقطه‌ای به کار می‌روند که در این میان، مدل‌های وزن دهی عکس فاصله و کریجینگ به‌عنوان مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌ها، از اهمیت بالاتری برای پهنه‌بندی آلودگی هوای محیط‌های شهری برخوردارند (۸).

در همین ارتباط در مطالعه برمن و همکاران که به ارزیابی مدل‌های وزن دهی معکوس فاصله، کریجینگ معمولی<sup>۵</sup> و کریجینگ جهانی<sup>۶</sup> برای پهنه‌بندی غلظت  $O_3$  در کشور آمریکا پرداختند، نشان دادند که مدل کریجینگ معمولی از کارایی بالاتری در پهنه‌بندی غلظت آلاینده مذکور برخوردار است (۹). هرچند کومار و همکاران، در بررسی کارایی مدل‌های وزن دهی معکوس فاصله و کریجینگ در مدل‌سازی مکانی آلاینده‌های هوای بندربلر در هند، نشان دادند که مدل وزن دهی معکوس فاصله به دلیل دارا بودن ریشه میانگین مربعات خطای پایین‌تر<sup>۷</sup>، گزینه مناسب‌تری برای میان‌یابی آلاینده‌ها نسبت به مدل کریجینگ است (۱۰). در تحقیقی دیگر پراپاسورنپیتایا و همکاران به منظور بررسی آلودگی هوا در شهر بانگوک تایلند، آلودگی هوا با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی<sup>۸</sup> را مورد پهنه‌بندی قرار دادند (۱۱). در زمینه استفاده از روش‌های نوین آماری در بحث آلودگی هوا در ایران نیز اسماعیل‌نژاد و همکاران با هدف ارزیابی و پهنه‌بندی آلودگی هوای کلانشهر تبریز نشان دادند که مدل کریجینگ معمولی خطای کمتری را نسبت به مدل وزن دهی معکوس فاصله در درون‌یابی آلاینده‌های  $PM_{10}$ ،  $O_3$ ،  $SO_2$ ،  $NO_2$  و  $CO_2$  ارائه می‌دهد (۱۲). نورپور و همکار نیز توانایی مدل کریجینگ را در تعیین تغییرات مکانی

و زمانی آلاینده‌های کلانشهر تهران، بیشتر از سایر روش‌های درون‌یابی اعلام نمودند (۱۳). علاوه بر این نتایج مطالعه نورعبدی در تعیین بهترین الگوریتم درون‌یابی آلودگی هوای شهر تبریز، نشان‌دهنده میزان خطای کمتر روش کریجینگ معمولی نسبت به وزن دهی معکوس فاصله بود (۱۴). در پهنه‌بندی آلاینده‌های  $PM_{10}$ ،  $O_3$  و  $CO$  موجود در هوای شهر تهران با استفاده از مدل‌های مختلف درون‌یابی همچون اسپلاین و کریجینگ معمولی، فتح تبار فیروزچایی و همکاران نیز نشان دادند که روش کریجینگ با توجه به دو شاخص ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین خطای مطلق<sup>۹</sup>، روشی بهینه در میان‌یابی آلاینده‌های مذکور می‌باشد (۱۵). بهارلو قره بلطاقی نیز از روش‌های درون‌یابی کریجینگ و اسپلاین به منظور تغییرات مکانی آلاینده‌های هوای شهر تهران استفاده نمود. نتایج حاصله نشان داد که برای آلاینده  $PM_{10}$  روش اسپلاین نتایج بهتری را ارائه می‌دهد (۱۶).

در کلانشهر مشهد نیز میری و همکاران به منظور تحلیل و پهنه‌بندی آلودگی هوای شهر مشهد با استفاده از مدل‌های مختلف تحلیل فضایی، تکنیک‌های  $IDW$ ،  $OK$  و  $UK$  را مورد ارزیابی قرار دادند که نتایج حاکی از آن بود که مدل  $OK$  نسبت به مدل‌های مورد آزمون، دارای شرایط بهتری در میان‌یابی است. همچنین بر اساس نتایج این مطالعه وضعیت نامطلوب کیفیت هوا در تمام فصول سال ۱۳۹۳ برای کلانشهر مشهد گزارش گردید (۱۷).

اسماعیلی نیز در بررسی نواحی همگن آلودگی هوای شهر مشهد، توزیع فضایی غلظت ذرات معلق  $PM_{2.5}$  را به‌عنوان آلاینده اصلی شهر مشهد با استفاده از قابلیت‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی مورد بررسی قرار داد و براساس نتایج به‌دست آمده، مناطق شرقی شهر مشهد را آلوده‌ترین منطقه از لحاظ آلاینده مزبور اعلام نمود (۱۸). این محقق در تحقیق دیگری نیز با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی، ایستگاه‌های کیفیت هوای شهر مشهد را از لحاظ دو آلاینده  $PM_{2.5}$  و  $CO$  به‌منظور تعیین نواحی همگن آلودگی مورد بررسی قرار داد (۱۹).

1. Inverse distance weighted
2. Splines
3. Natural Neighbor
4. Kriging
5. Ordinary Kriging
6. Universal Kriging
7. Root Mean Squared Error (RMSE)
8. Geographic Information Systems (GIS)

9. Mean Absolute Error

و همچنین تردد بالای وسایل نقلیه موتوری که موجب آلودگی شدید هوای آن به‌خصوص در فصول سرد سال می‌شوند، به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب گردید. شهر مشهد در شمال شرقی ایران با بیشینه و کمینه ارتفاع برابر با ۱۱۵۰ و ۹۵۰ متر قرار دارد و در طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۷۴ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۴ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۸ دقیقه شمالی در حوضه آبریز کشف‌رود و در دشت مشهد بین رشته کوه‌های بینالود و هزار مسجد گسترده شده است.

در این مطالعه از آمار ۲۱ ایستگاه سنجش کیفیت هوا که در سطح شهر مستقر هستند، استفاده شد. بدین‌منظور داده‌های اعتبارسنجی شده ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون ( $PM_{2.5}$ ) برای ایستگاه‌های مورد مطالعه که در شکل ۱ موقعیت و توزیع آنها در سطح شهر نشان داده شده است، از تاریخ ۱۳۹۵/۱/۱ الی ۱۳۹۵/۱۲/۲۹ با مراجعه به مرکز پایش آلاینده‌های زیست‌محیطی شهر مشهد تهیه گردید. صحت و سقم اطلاعات مورد تأیید مرکز پایش آلاینده‌ها بوده و از آنجا که ذرات معلق، جزء آلاینده‌های اصلی به‌شمار می‌رود و توسط همه ایستگاه‌ها پایش می‌گردد، لذا همه ایستگاه‌ها شرایط ورود به مطالعه را دارا بودند.

پس از جمع‌آوری اطلاعات مربوط به غلظت آلاینده‌ها اقدام به تشکیل بانک اطلاعات شد و داده‌ها به‌صورت فصلی و سالانه به تفکیک ایستگاه‌ها دسته‌بندی شدند. سپس داده‌ها به سامانه اطلاعات جغرافیایی، مدل ۱۰/۳ جهت تحلیل فضایی با استفاده از مدل‌های درون‌یابی معکوس وزنی فاصله، کریجینگ معمولی و کریجینگ جهانی منتقل گردید. لازم به ذکر است که قبل از اجرای مدل‌های مذکور در این مطالعه، به‌منظور شناسایی نحوه توزیع داده‌ها جهت تحلیل فضایی از نمودار چندک چندک<sup>۱</sup> و به‌منظور نرمال‌سازی داده‌ها از تابع لگاریتم<sup>۲</sup> استفاده شده است.

در بررسی انجام شده بر روی کیفیت هوای شهر مشهد با استفاده از روش پهنه‌بندی IDW بر اساس شاخص کیفیت هوا (PSI)<sup>۱</sup>، اکبری و همکاران کیفیت هوا در فصل بهار سال ۱۳۹۱ را در وضعیت بسیار ناسالم و خطرناک گزارش کردند (۲۰). در مطالعه دیگری که توسط این محققان بر روی ذرات معلق کمتر از ۱۰ میکرون در شهر مشهد انجام گرفت، بیشترین آلودگی هوا را در اطراف ایستگاه‌های صدف، نخریسی و لشگر معرفی کردند (۲۱). کاظمی و همکاران نیز در ارزیابی آلودگی هوا و چالش‌های مدیریت شهری در کلان‌شهر مشهد، بیشترین میزان آلودگی را در نواحی مرکزی شهری معرفی نمودند (۲۲). در تحلیل زمین آماری آلاینده‌های هوا با هدف آسمان آبی برای کلان‌شهر مشهد، فامیلی و همکاران نواحی جنوبی و مرکزی شهر را دارای بیشترین میزان آلودگی و نواحی غربی را دارای کمترین آلودگی معرفی نمودند (۲۳).

بنابراین با توجه به گزارشات مرکز پایش آلاینده‌های زیست‌محیطی مبنی بر افزایش تعداد روزهای ناسالم در سال‌های اخیر در شهر مشهد به‌عنوان دومین شهر بزرگ ایران که عمدتاً ناشی از ذرات  $PM_{2.5}$  می‌باشد و همچنین عدم وجود تصویر درست و واقعی از غلظت دقیق آلاینده‌های هوا در محیط شهری که به‌دلیل کمبود تعداد ایستگاه‌های پایش اندازه‌گیری آلاینده‌های هوا در سطح این کلان‌شهر می‌باشد، ضرورت انجام مطالعات بیشتر در زمینه وضعیت پراکندگی مکانی این آلاینده خطرناک احساس می‌شود، لذا مطالعه حاضر با هدف شناخت بهترین مدل ارزیابی و پهنه‌بندی ذرات معلق  $PM_{2.5}$  از میان مدل‌های IDW و Kriging به‌منظور شناسایی نحوه توزیع این آلاینده در شهر مشهد در سال ۱۳۹۵ انجام شد.

## روش کار

در این پژوهش شهر مشهد با جمعیتی بالغ بر ۳ میلیون نفر و مساحت ۳۲۸ کیلومتر مربع به‌عنوان دومین کلان‌شهر ایران و مرکز استان خراسان رضوی، به‌علت وجود تعداد زیاد صنایع و کارخانجات

2. Q-Q Plot  
3. Logarithm

1. Pollutant Standards Index

### مدل Kriging

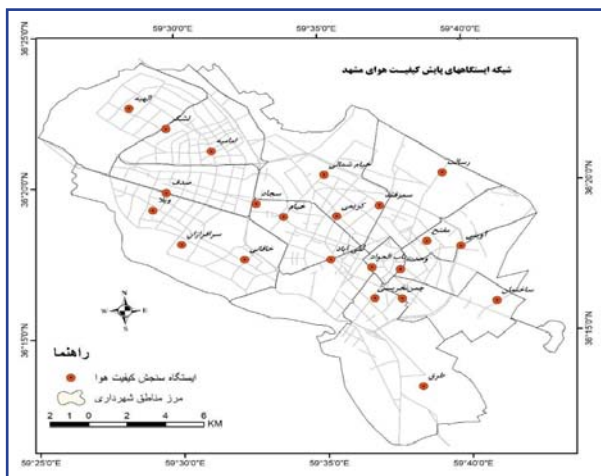
Kriging روش درون‌یابی پیشرفته‌ای است که برای داده‌هایی که دارای روندهای موضعی تعریف شده‌ای باشند، مناسب است. این روش با کمترین واریانس تخمین درون‌یابی می‌کند و میزان خطای آن تابع مشخصات واریوگرام (ساختار فضایی) است. مدل Kriging بر منطق میانگین متحرک وزن‌دار استوار است و معادله آن در حالت کلی به شرح معادله ۲ است (۲۴).

$$Z^*(x_i) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad \text{معادله (۲)}$$

که در آن  $Z^*(x_i)$  = عیار برآوردی  $\lambda_i$  = وزن ایستگاه  $\lambda$  و  $Z(x_i)$  = مقدار متغیر اندازه‌گیری شده می‌باشد.

در روش OK نقاط مجهول با استفاده از ترکیب خطی از نقاط مرجع که در همسایگی آن قرار دارد، به دست می‌آید. تفاوت ماتریس وزنی که در این روش تهیه می‌شود با ماتریس وزنی که در روش IDW استفاده می‌شود، در این است که در ماتریس وزن IDW فقط فاصله مؤثر است، ولی در این ماتریس علاوه بر فاصله، روند موجود در نقاط یا همان همبستگی مکانی بین داده‌ها در نظر گرفته می‌شود. در روش UK نیز علاوه بر مؤلفه همبستگی مکانی بین نقاط، انحراف یا روند نیز در مقادیر  $Z$  وجود دارد که در این صورت Kriging با یک چند جمله‌ای ترکیب می‌شود. روش OK شامل تشکیل سمی واریوگرام<sup>۱</sup> تجربی و برازش مدل مناسب، ایجاد ماتریس، تعیین ماتریس وزن و تخمین نقاط مجهول می‌باشد. روش UK شامل تشکیل سمی واریوگرام تجربی و برازش مدل سمی واریوگرام، تشکیل ماتریس Universal Kriging و تخمین مقادیر می‌باشد.

پس از انتخاب بهترین روند برازش به مدل و لذا کاهش میزان خطای تخمین توسط مدل OK و UK، اقدام به ترسیم نقشه پراکندگی غلظت آلاینده  $PM_{2.5}$  در مقیاس زمانی فصلی و سالیانه توسط مدل‌های مذکور شد. روش و معیار ارزیابی



شکل ۱: موقعیت مکانی ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا در سطح شهر مشهد

### توسعه مدل

#### مدل IDW

در این روش، ارزش یک متغیر بر اساس میانگین همسایه‌ها در محدوده‌ای معین محاسبه می‌شود؛ به این ترتیب که معکوس فواصل از نقاط مجهول وزن‌دهی می‌شود. هرچه فاصله نقطه مجهول از نقاط معلوم کاهش یابد، وزن ارزش آن نقاط افزایش می‌یابد و نقاطی که ارزش آن نامعلوم است، با استفاده از نقاط اطراف در یک شعاع مشخص بر اساس معادله ۱ برآورد می‌شود (۲۴).

$$\lambda_i = (D_i - a) / \sum_{i=1}^n D_i - a \quad \text{معادله (۱)}$$

که در آن  $\lambda_i$  = وزن ایستگاه  $\lambda$ ،  $D_i$  = فاصله ایستگاه  $\lambda$  تا نقطه مجهول و  $a$  = توان وزن‌دهی می‌باشد. عملکرد درون‌یابی به روش IDW به مقدار توان وزن‌دهی وابسته است. این مقدار توسط پارامتر ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) مشخص می‌شود؛ به طوری که مناسب‌ترین توان زمانی است که مقدار RMSE حداقل باشد. پس از انتخاب بهترین توان برای درون‌یابی غلظت آلاینده  $PM_{2.5}$  و لذا کاهش میزان خطای تخمین توسط مدل مذکور، اقدام به ترسیم نقشه پراکندگی غلظت آلاینده  $PM_{2.5}$  در مقیاس زمانی فصلی و سالیانه توسط مدل مذکور شد. لازم به ذکر است که در این مطالعه با توجه به میزان حداقل RMSE از توان ۲ استفاده شد.



غلظت  $PM_{2.5}$  برابر با  $۱۲۲/۳۶$  و  $۱۲/۰۸$  میکروگرم بر متر مکعب به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار این آلاینده را از خود نشان دادند. بررسی مقادیر غلظت  $PM_{2.5}$  ایستگاه‌ها در فصل پاییز نیز حاکی از آن بود که بیشترین غلظت این آلاینده ( $۸۵/۰۹$  میکروگرم بر مترمکعب) مربوط به ایستگاه لشگر و کمترین آن مربوط به ایستگاه خاقانی با مقدار  $۱۹/۳۸$  میکروگرم بر متر مکعب بود. در فصل زمستان نیز بیشترین و کمترین غلظت ذرات معلق مربوط به ایستگاه‌های لشگر و حرم مطهر به ترتیب با مقادیر  $۵۹/۹۰$  و  $۲۵/۰۸$  میکروگرم بر متر مکعب بود. بنابراین می‌توان این‌گونه بیان نمود که ایستگاه‌های خیام شمالی، رسالت و لشگر که بالاترین بار آلودگی را از نظر آلاینده ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در فصول مختلف سال  $۱۳۹۵$  از خود نشان دادند، در شمال تا شرق شهر مشهد قرار دارند. این در حالی است که ایستگاه‌های صدف، ویلا و خاقانی با میزان کمتر آلودگی ذرات معلق در فصول بهار، تابستان و پاییز، در محدوده غرب این کلان‌شهر واقع شده‌اند و تنها ایستگاه حرم مطهر که در فصل زمستان کمترین میانگین غلظت ذرات معلق  $PM_{2.5}$  را از خود نشان داد، در مرکز شهر مشهد قرار گرفته است. همچنین بررسی مقادیر میانگین سالیانه غلظت ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوای کلان‌شهر مشهد در سال  $۱۳۹۵$  حاکی از آن بود که ایستگاه خیام شمالی دارای بالاترین غلظت آلاینده مذکور ( $۵۲/۳۱$  میکروگرم بر متر مکعب) و ایستگاه ویلا ( $۲۱/۱۴$  میکروگرم بر متر مکعب) دارای کمترین غلظت ذرات معلق در سال  $۱۳۹۵$  بودند.

مقادیر حداقل، حداکثر، انحراف معیار و میانگین غلظت سالیانه ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در کل ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوای شهر مشهد در سال  $۱۳۹۵$  و همچنین میانگین فصلی آن در تمامی ایستگاه‌ها در جدول ۱ بیان گردیده است. بر اساس نتایج این جدول، میانگین غلظت سالیانه آلاینده مذکور و همچنین میانگین غلظت آن در فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب برابر  $۳۴/۴۷$ ،  $۲۷/۷۸$ ،  $۳۴/۶۴$ ،  $۴۰/۸۴$  و  $۳۷/۸۳$  بود که نشان‌دهنده وقوع بیشترین میزان آلاینده  $PM_{2.5}$  در فصل

به منظور مقایسه مدل‌های  $IDW$ ،  $OK$  و  $UK$  و انتخاب مدل بهینه در پهنه‌بندی آلاینده  $PM_{2.5}$  در کلان‌شهر مشهد از شاخص  $RMSE$  و برای انتخاب بهینه‌ترین شرایط برای اجرای دو مدل  $OK$  و  $UK$  از  $Standardized RMSE$  استفاده گردید. لازم به ذکر است در مورد مدل  $IDW$  به واسطه غیرآماری بودن این مدل در آن خطای استاندارد پیش‌بینی محاسبه نمی‌شود. روش محاسبه  $RMSE$  و  $Standardized RMSE$  به ترتیب در معادله ۳ و ۴ بیان گردیده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (q_i - \hat{q}_i)^2} \quad (3) \text{ معادله}$$

معادله (۴)

$$Standardized RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{q_i - \hat{q}_i}{\hat{\sigma}_i} \right)^2}$$

که در آن  $n$  تعداد داده‌ها،  $q_i$  مقدار اندازه‌گیری شده،  $\hat{q}_i$  مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل و  $\hat{\sigma}$  خطای استاندارد پیش‌بینی می‌باشد.

### ترسیم نقشه خطای استاندارد پیش‌بینی (Prediction Standard Error Map)

پس از انتخاب بهترین مدل در درون‌یابی غلظت ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در هر یک از فصول و همچنین میانگین سالیانه، اقدام به ترسیم نقشه خطای استاندارد پیش‌بینی توسط مدل مذکور به منظور شناسایی مناطقی که بیشترین خطای پیش‌بینی را ارائه داده‌اند، توسط نرم‌افزار GIS شد.

### یافته‌ها و بحث

بررسی میانگین غلظت فصلی ذرات معلق  $PM_{2.5}$  برحسب میکروگرم بر متر مکعب در سال  $۱۳۹۵$  نشان داد که بیشترین غلظت آلاینده مذکور در فصل بهار مربوط به ایستگاه خیام شمالی با مقدار  $۵۲/۲۷$  میکروگرم بر متر مکعب و کمترین میزان آن مربوط به ایستگاه صدف با غلظت  $۱۲/۴۱$  میکروگرم بر متر مکعب بود. در فصل تابستان نیز ایستگاه‌های رسالت و ویلا با

## پهنه‌بندی غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ توسط مدل‌های OK، IDW،

و UK

نقشه‌های پراکندگی غلظت آلاینده  $PM_{2.5}$  توسط مدل‌های IDW، OK و UK در کلان‌شهر مشهد در مقیاس فصلی و سالیانه در سال ۱۳۹۵ در شکل‌های ۲ تا ۶ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در تمامی نقشه‌های درون‌یابی ترسیم شده در این مطالعه، مناطق با میزان پراکندگی آلودگی پایین با رنگ‌های سرد و مناطق با غلظت‌های بالای آلودگی با رنگ‌های گرم نمایش داده شده است. بررسی نقشه‌های مذکور نشان داد که تراکم غلظت آلاینده مذکور در نواحی شرق و شمال شرقی شهر مشهد و به‌طور خاص ایستگاه‌های خیام شمالی، رسالت و لشگر بالاتر از سایر مناطق است و در وضعیت بدتری نسبت به منطقه غرب کلان‌شهر مشهد (محدوده ایستگاه‌های صدف، ویلا، سرافرازان و خاقانی) قرار دارد. به‌طور کلی می‌توان این‌گونه بیان نمود که نتایج حاصل از پهنه‌بندی غلظت ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در مقیاس فصلی و سالیانه توسط تکنیک‌های درون‌یابی مورد مطالعه با یافته‌های حاصل از بررسی میانگین غلظت فصلی و سالیانه آلاینده مذکور در سال ۱۳۹۵ در مشخص نمودن نقاط بحرانی و مناطق با میزان اندک آلودگی مطابقت دارد. نتایج ارزیابی میری و همکاران در پهنه‌بندی آلودگی هوای شهر مشهد حاکی از آن بود که مناطق شرقی شهر، آلودگی بیشتری را دارا می‌باشند (۱۷). اسماعیلی و همکاران نیز در بررسی نواحی همگن آلودگی هوای شهر مشهد، مناطق شرقی شهر مشهد را آلوده‌ترین منطقه از لحاظ آلاینده  $PM_{2.5}$  اعلام نمودند (۱۸). نتایج قوچانی و همکاران نیز حاکی از آن بود که مناطق شرق تا شمال شهر مشهد دارای بار آلودگی بیشتری نسبت به سایر مناطق می‌باشد (۲۶) که با مطالعه حاضر همخوانی داشت. از سویی دیگر کاظمی و همکاران، در ارزیابی آلودگی هوا و چالش‌های مدیریت شهری در کلان‌شهر مشهد، بیشترین میزان آلودگی را مربوط به نواحی مرکزی شهر دانستند (۲۲). فامیلی و همکاران نیز در تحلیل زمین آماری آلاینده‌های هوا، نواحی جنوبی و مرکزی شهر را آلوده‌ترین مناطق اعلام نمودند (۲۳). همچنین نتایج مطالعه اکبری

پاییز و زمستان بود. این امر می‌تواند ناشی از پایین بودن ارتفاع پایه وارونگی دمایی، ورود سامانه‌های پرفشار به منطقه و همچنین استفاده از وسایل گرمازا در این فصول باشد (۲۵). تعداد وقوع اینورژن‌ها از ۲۳۳ مورد در سال ۱۳۹۴ به ۲۹۵ مورد در سال ۱۳۹۵ افزایش داشته است که این افزایش تقریباً ۲۰ درصدی، نقش بسزایی در افزایش غلظت آلاینده ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در سال ۱۳۹۵ ایفا نموده است. همچنین کاهش میزان نزولات جوی در سال‌های اخیر در این شهر را می‌توان از دیگر عوامل افزایش‌دهنده غلظت ذرات معلق دانست؛ به‌طوری‌که متوسط بارندگی استان در سال ۱۳۹۵ نسبت به سال ۱۳۹۴ حدود ۱۷٪ و نسبت به متوسط دوره ۳۲ ساله حدود ۱۰٪ کاهش داشته است.

جدول ۱. خلاصه آماری وضعیت آلودگی هوای شهر مشهد مربوط به ذرات معلق  $PM_{2.5}$  برحسب میکروگرم بر متر مکعب در سال ۱۳۹۵

پارامتر	غلظت $PM_{2.5}$
حداقل سالیانه کل ایستگاه‌ها	۲۱/۱۴
حداکثر سالیانه کل ایستگاه‌ها	۵۲/۳۱
میانگین سالیانه کل ایستگاه‌ها	۳۴/۴۷
انحراف معیار سالیانه کل ایستگاه‌ها	۱۶/۹۴
بهار	۲۷/۷۸
تابستان	۳۴/۶۴
میانگین فصلی کل ایستگاه‌ها	۴۰/۸۴
پاییز	۳۷/۸۳
زمستان	۳۷/۸۳

با توجه به بالاتر بودن میانگین غلظت سالیانه  $PM_{2.5}$  در ایستگاه‌های مختلف سنجش آلودگی هوای کلان‌شهر مشهد از میزان استاندارد آژانس حفاظت محیط زیست (۱۵ میکروگرم بر مترمکعب) و سازمان جهانی بهداشت<sup>۲</sup> (۱۰ میکروگرم بر مترمکعب)، به پیش‌بینی غلظت آلاینده مذکور در سال ۱۳۹۵ و نحوه توزیع آن در شهر مشهد توسط مدل‌های مختلف تحلیل فضایی IDW، OK Kriging و UK Kriging پرداخته شد.

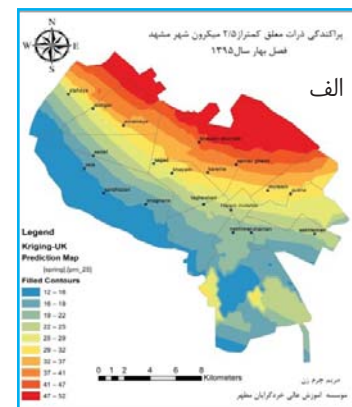
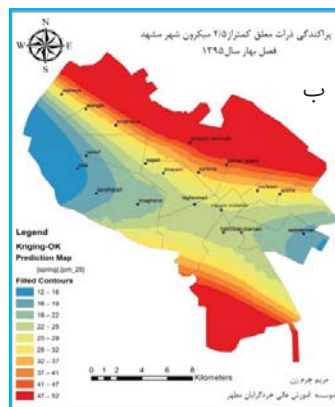
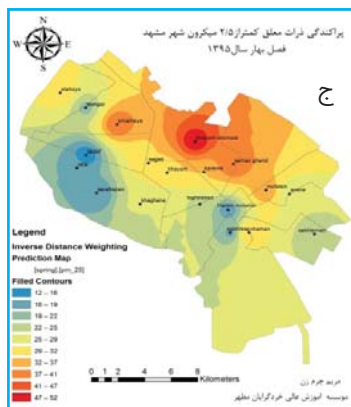
1. Environmental Protection Agency  
2. World Health Organization



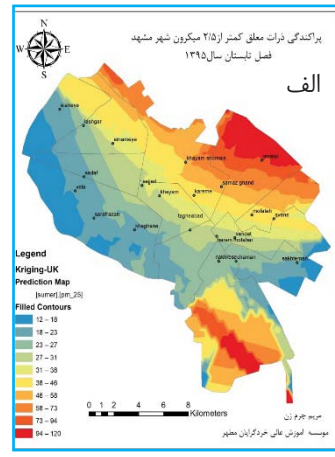
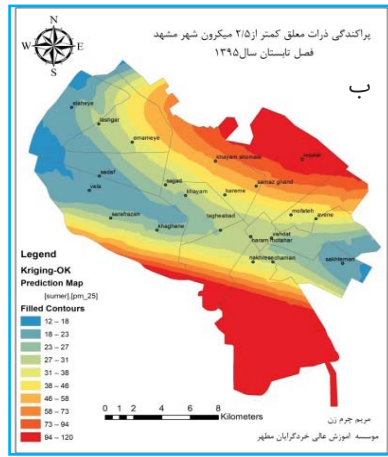
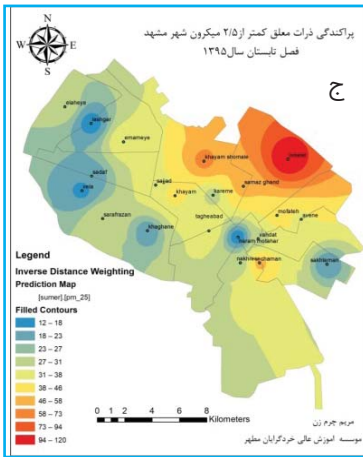
که اغلب آن‌ها در منطقه شرقی شهر تردد می‌کنند. با توجه به اینکه هر موتورسیکلت به اندازه ۱۰ خودرو استاندارد باعث ایجاد آلودگی هوا می‌شود، لذا نقش بسزایی را در آلودگی هوای این بخش از شهر ایفا می‌کنند. از دیگر علل آلودگی هوای بخش شرقی شهر می‌توان به تردد بالایی وسایل نقلیه در اتوبان همت که از شرق تا شمال شرق شهر امتداد دارد، اشاره نمود. وجود فرودگاه شهر مشهد در قسمت شرقی آن و پرواز هواپیماها بر فراز این شهر نیز می‌تواند عامل مهم دیگری در افزایش غلظت ذرات معلق در این ناحیه باشد (۱۷). با توجه به تحقیقات متعدد مشخص شده است که هر هواپیما به‌طور کلی معادل ۶ هزار خودرو آلودگی هوا ایجاد می‌نماید. در هر پرواز داخلی و خارجی به‌ترتیب میزان ۸۰۰ و ۱۲۰۰ لیتر بنزین برای هر فرود و پرواز مصرف می‌شود، لذا بر این اساس میزان ۴۳ میلیون لیتر بنزین به‌طور روزانه در بالایی آسمان شهر مشهد مصرف شده که خود تولید حجم بسیار بالایی از آلاینده‌ها را به‌دنبال دارد. علاوه بر این از دیگر عوامل مهم مؤثر در بروز آلودگی هوا به لحاظ ذرات معلق در شهر مشهد می‌توان به وجود کانون‌های بحرانی ریزگردها در داخل کشور و همچنین خارج از آن در کشورهای همسایه شمالی و شرقی اشاره کرد. در خراسان رضوی ۱۶ کانون بحران گردوغبار وجود دارد که تعدادی از آن‌ها کلان‌شهر مشهد را تحت تأثیر قرار می‌دهند. علاوه بر این دو کانون گردوغبار قره‌قوم در ترکمنستان و نیز کشور افغانستان باعث تشدید وضعیت آلودگی هوای این شهر از لحاظ ذرات معلق می‌شوند (۲۵).

و همکاران بر روی کیفیت هوای شهر مشهد بیانگر بار آلودگی بیشتر در مناطق جنوبی و مرکزی شهر بود (۲۰) که با نتایج مطالعه حاضر همخوانی نداشت.

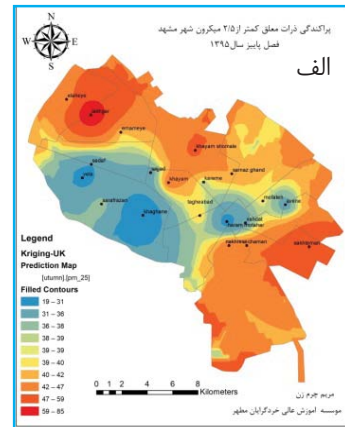
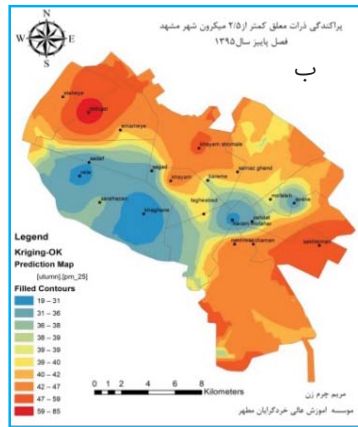
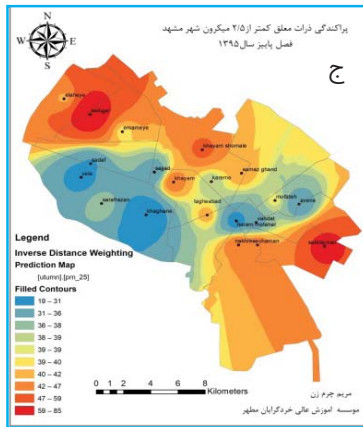
از علل وقوع آلودگی بیشتر ذرات معلق در نواحی شرق و شمال شرقی شهر مشهد، می‌توان به وجود صنایع و معادن در حریم این شهر و به‌خصوص قسمت شرقی آن اشاره نمود. در حال حاضر و طبق آخرین تغییرات، حریم شهر مشهد شامل ۹۱ هزار هکتار مساحت است که متأسفانه بالغ بر ۱۰٪ آن در تصرف کوره‌پزخانه‌ها، واحدهای صنعتی و تولیدی، شن‌شویی‌ها و واحدهای معدنی قرار دارد که خود تأثیر مستقیمی بر افزایش آلودگی ذرات معلق شهر دارد. علاوه بر این ۷۰٪ شن‌شویی‌های مشهد در شرق شهر واقع شده و از طرفی باد غالب نیز از این جهت می‌وزد، لذا این مهم سبب شده تا شهروندان مشهدی در روزهای زیادی از سال، هوایی سرشار از گردوغبار را تنفس نمایند (۲۷). علاوه بر این، نواحی شرقی و شمال شرقی شهر مشهد، پذیرای جمعیت بسیار بالایی از مهاجرینی بوده که از روستاها و شهرستان‌های اطراف در این قسمت سکونت یافته‌اند و در نتیجه جمعیت بالا و بالطبع آن بهره‌برداری بیش از اندازه از سرزمین به‌منظور تأمین نیازهای اولیه آنها موجبات افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی متعددی همچون آلودگی هوا در این منطقه گردیده است. همچنین بر اساس گزارش‌های موجود، ۳۰٪ از تولید ذرات معلق در هوا ناشی از تردد موتورسیکلت‌هاست و این در حالی است که ۳۵۰ هزار موتورسیکلت در مشهد وجود دارد



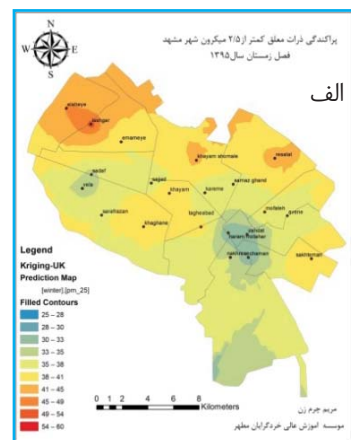
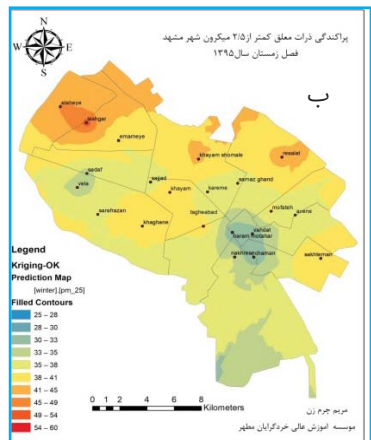
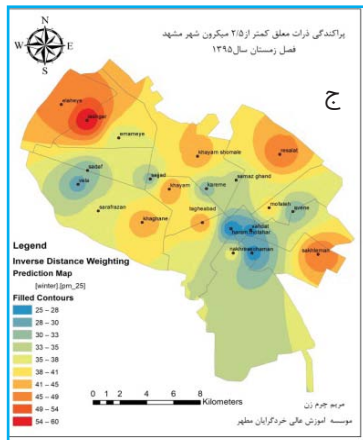
شکل ۲. پهنه‌بندی غلظت آلاینده  $PM_{2.5}$  برحسب میکروگرم بر متر مکعب توسط مدل‌های الف (UK)، ب (OK) و ج (IDW) در کلان‌شهر مشهد در فصل بهار سال ۱۳۹۵



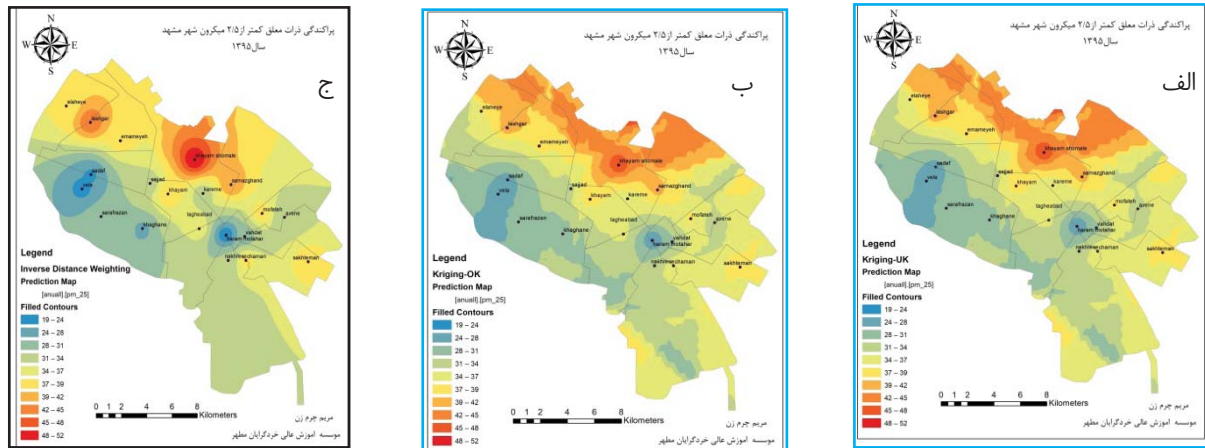
شکل ۳. پهنه‌بندی غلظت آلاینده  $PM_{2.5}$  برحسب میکروگرم بر متر مکعب توسط مدل‌های الف) UK، ب) OK و ج) IDW در کلان‌شهر مشهد در فصل تابستان سال ۱۳۹۵



شکل ۴. پهنه‌بندی غلظت آلاینده  $PM_{2.5}$  برحسب میکروگرم بر متر مکعب توسط مدل‌های الف) UK، ب) OK و ج) IDW در کلان‌شهر مشهد در فصل پاییز سال ۱۳۹۵



شکل ۵. پهنه‌بندی غلظت آلاینده  $PM_{2.5}$  برحسب میکروگرم بر متر مکعب توسط مدل‌های الف) UK، ب) OK و ج) IDW در کلان‌شهر مشهد در فصل زمستان سال ۱۳۹۵



شکل ۶. پهنه‌بندی میانگین سالیانه غلظت آلاینده  $PM_{2.5}$  برحسب میکروگرم بر متر مکعب توسط مدل‌های الف (UK، ب) OK و ج) IDW در کلان‌شهر مشهد در سال ۱۳۹۵

### مقایسه کارایی مدل‌های OK، IDW و UK در پهنه‌بندی غلظت

#### آلاینده $PM_{2.5}$

واریانس برآورد کند. در روش Kriging هر نمونه معلوم در تخمین نمونه مجهول بستگی کامل به ساختار فضایی محیط مربوطه دارد، در حالی که در روش‌های دیگر، وزن‌ها فقط به یک مشخصه هندسی مانند فاصله بستگی دارد و با تغییر ساختار فضایی نمونه‌ها، تغییر نمی‌کند و با ضعیف شدن ساختار فضایی نقش نمونه‌ها کمتر می‌شود. بنابراین می‌توان بیان نمود که مدل Kriging به دلیل اینکه فاقد خطای سیستماتیک بوده و در تخمین‌ها دارای حداقل واریانس می‌باشد، از دقیق‌ترین مدل‌هایی است که در تهیه نقشه‌های پراکندگی به کار می‌رود و امروزه جایگاه ویژه‌ای را در درون‌یابی به دست آورده است. علاوه بر این، در روش Kriging OK شرط برابری مجموع وزن‌ها با یک برای جلوگیری از انحراف در تعیین داده‌ها، در نظر گرفته می‌شود، لذا برازشی با کمترین انحراف ممکن را ارائه می‌دهد (۲۴). اگرچه نتایج حاصل از این مطالعه نشان‌دهنده برتری روش Kriging OK در میان‌یابی غلظت آلاینده ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در سال ۱۳۹۵ در شهر مشهد نسبت به سایر روش‌های مورد آزمون بود، اما نباید از توانایی بالای نقشه‌های میان‌یابی به روش IDW در ارائه آسان و قابل درک برای عموم مردم از وضعیت پراکندگی آلاینده مذکور در پهنه‌های مختلف شهر نیز چشم‌پوشی کرد. نتایج مطالعات اسماعیل نژاد و همکاران، نورپور و همکاران، نورعبدی، فتح‌تبار فیروز جایی و

جدول ۲ مقادیر RMSE و Standardized RMSE را در پهنه‌بندی میانگین فصلی و سالیانه غلظت آلاینده  $PM_{2.5}$  برای هر یک از روش‌های میان‌یابی ارائه می‌دهد. آنچه از مقادیر این جدول محرز می‌شود این است که مدل OK به دلیل دارا بودن RMSE کمتر، گزینه مناسب‌تری از میان مدل‌های مورد آزمون برای میان‌یابی آلاینده  $PM_{2.5}$  می‌باشد؛ به عبارت دیگر مدل OK اختلاف کمتری را در مقادیر برآورد شده (پیش‌بینی شده توسط مدل) نسبت به مقادیر مشاهده‌ای از میان مدل‌های مورد بررسی برای پهنه‌بندی غلظت آلاینده  $PM_{2.5}$  از خود نشان داد (جدول ۲).

روش IDW از جمله روش‌های درون‌یابی است که در آن برآورد پارامتر مورد بررسی بر اساس مقادیر نقاط نزدیک به نقطه برآورد که بنابر عکس فاصله وزنی می‌شوند، انجام می‌گیرد. به عبارت دیگر در این روش میان‌یابی، به نقاط نزدیک به نقطه برآورد وزن بیشتری نسبت به نقاط دورتر داده می‌شود. این روش برخلاف روش Kriging از فرضیات مربوط به ارتباط مکانی بین داده‌ها پیروی نمی‌کند و تنها بر این فرض متکی است که نقاط نزدیک‌تر به نقطه برآورد، شباهت بیشتری به آن نسبت به نقاط دورتر دارند، اما Kriging روش درون‌یابی و برآورد زمین‌آماري است که قادر است بر اساس مدل برازش شده، نقاط نمونه‌برداری نشده را بدون اریب و با حداقل

همکاران و برمن و همکاران در زمینه استفاده از روش های نوین آماری در بحث آلودگی هوا نیز حاکی از میزان خطای کمتر روش Kriging OK نسبت به سایر روش ها بود (۹،۱۵،۱۴،۱۳،۱۲) که با مطالعه حاضر همخوانی داشت، ولی نتایج کومار و همکاران و بهارلو قره بلطاقی در مقایسه روش های میان یابی آلاینده های هوا با نتایج این مطالعه ناهمسو بود (۱۶،۱۰).

جدول ۲. مقایسه کارایی مدل های IDW، OK و UK در پهنه بندی غلظت آلاینده  $PM_{2.5}$  در کلان شهر مشهد در سال ۱۳۹۵

شاخص ارزیابی		مدل درون یابی	مقیاس زمانی
Std.RMSE	RMSE		
—	۱۰/۰۸	distanceWeighted (IDW) Inverse	بهار
۱/۲۶	۸/۳۱	Ordinary Kriging (OK)	
۱/۰۶	۸/۶۲	Universal Kriging (UK)	
—	۲۲/۰۷	distanceWeighted (IDW) Inverse	تابستان
۲/۸۶	۱۵/۰۸	Ordinary Kriging (OK)	
۰/۹۷	۱۹/۷۳	Universal Kriging (UK)	
—	۱۵/۸۱	distanceWeighted (IDW) Inverse	فصلی
۱/۲۱	۱۵/۷۰	Ordinary Kriging (OK)	
۴۴/۶۸	۱۵/۷۰	Universal Kriging (UK)	
—	۹/۶۵	distanceWeighted (IDW) Inverse	پاییز
۱/۰۵	۹/۶۱	Ordinary Kriging (OK)	
۳۷/۰۸	۹/۶۱	Universal Kriging (UK)	
—	۷/۳۸	distanceWeighted (IDW) Inverse	زمستان
۰/۸۰	۷/۳۰	Ordinary Kriging (OK)	
۲۶/۸۲	۷/۳۰	Universal Kriging (UK)	
—	—	—	سالیانه
—	—	—	
—	—	—	

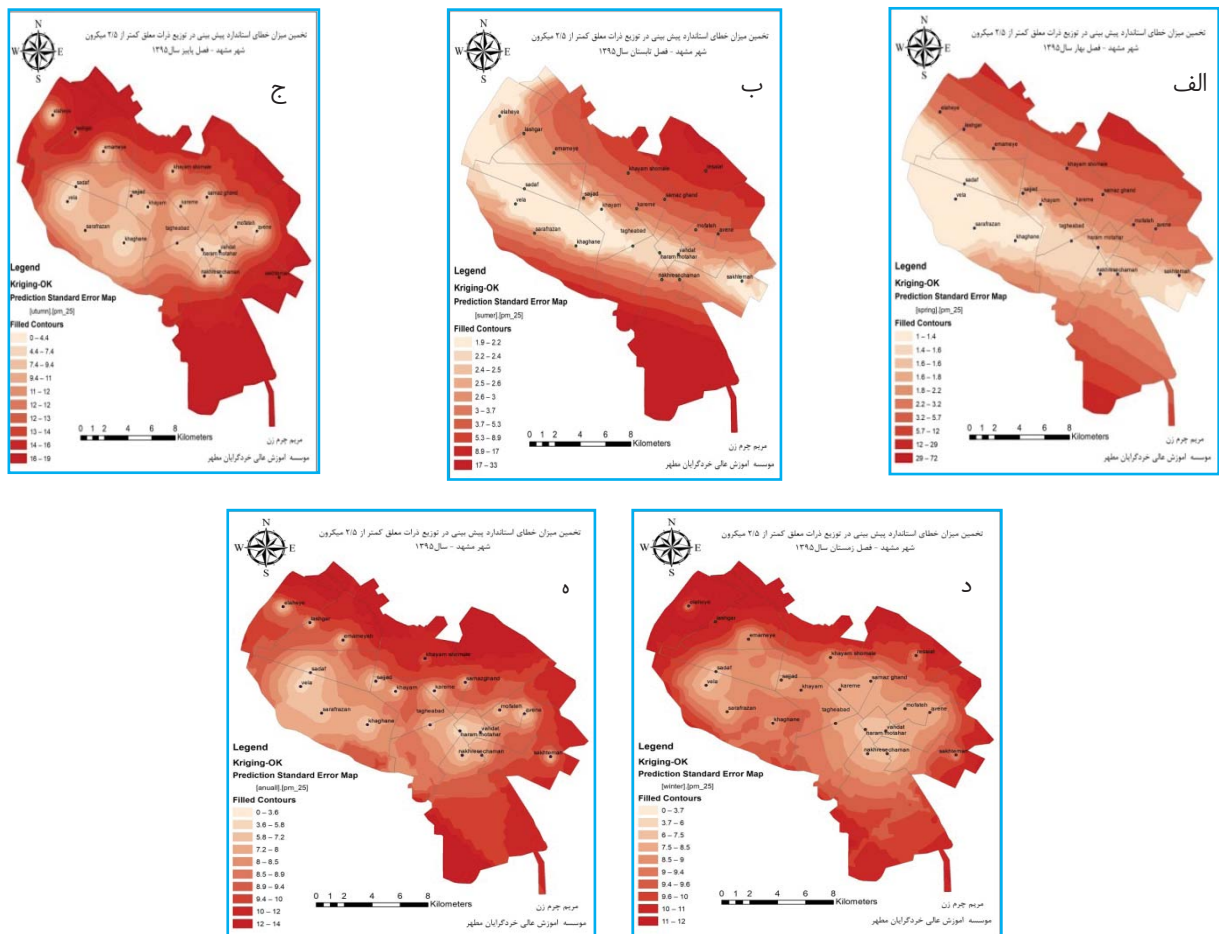
### ترسیم نقشه خطای استاندارد پیش بینی (Prediction)

#### (Standard Error Map)

مقدار پیش بینی در این مناطق بیشتر خواهد بود. بررسی نقشه تخمین میزان خطای استاندارد گویای این امر است که بیشترین خطاهای استاندارد پیش بینی مربوط به مناطقی با فاصله بیشتر از ایستگاه های سنجش آلودگی هوا و همچنین ایستگاه هایی با بار آلودگی بالاتر می باشد؛ چراکه با افزایش فاصله از ایستگاه ها و افزایش بار آلودگی، مسلماً مقادیر با قطعیت کمتری پیش بینی می گردد.

پس از انتخاب مدل OK به عنوان بهترین مدل در درون یابی غلظت ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در سال ۱۳۹۵ در کلان شهر مشهد، نقشه خطای استاندارد پیش بینی برای هر یک از فصول و همچنین میانگین سالیانه حاصل از مدل مذکور نیز تهیه گردید (شکل ۷). هر بخشی از نقشه که میزان خطای استاندارد کمتری را نشان دهد، یعنی در نقشه پیش بینی با قطعیت بالاتری مقادیر برآورد می شود و هرچقدر که میزان خطای استاندارد بالاتر باشد، عدم قطعیت در میزان





شکل ۷. تخمین میزان خطای استاندارد حاصل از مدل OK در پیش‌بینی توزیع میانگین فصلی (الف: بهار، ب: تابستان، ج: پاییز، د: زمستان) و سالیانه (د) ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> در سال ۱۳۹۵ در شهر مشهد

### نتیجه گیری

نتایج حاصل از ارزیابی و مقایسه مدل‌های IDW، OK، Kriging و UK Kriging برای پهنه‌بندی غلظت فصلی و سالیانه ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> در شهر مشهد، توسط پارامترهای RMSE و Std.RMSE نیز نشان داد که مدل OK Kriging برای پهنه‌بندی آلاینده مذکور دارای توانایی برآزش مناسب‌تری با خطای پایین می‌باشد. هرچند نباید از توانایی بالای نقشه‌های میان‌یابی به روش IDW در ارائه آسان و قابل درک برای عموم مردم از وضعیت پراکندگی آلاینده مذکور در پهنه‌های مختلف شهر نیز چشم‌پوشی کرد.

این پژوهش در نهایت منجر به تولید نقشه‌هایی از وضعیت آلاینده PM<sub>2.5</sub> بر روی کل شهر مشهد شد که به‌منظور شناخت

بررسی نقشه‌های میان‌یابی غلظت ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> در سال ۱۳۹۵ و نحوه توزیع آن در شهر مشهد توسط مدل‌های مختلف تحلیل فضایی OK Kriging، IDW و UK Kriging مؤکد این امر بود که منطقه شرق تا شمال شهر مشهد به لحاظ آلاینده مذکور در وضعیت نامناسب‌تری نسبت به منطقه غرب این کلان‌شهر قرار دارد که می‌تواند به‌علت تردد بالای وسایل نقلیه، وجود زمین‌های بایر و زمین‌های کشاورزی، تمرکز واحدهای صنعتی، تولیدی، شن‌شویی‌ها و واحدهای معدنی، وجود نیروگاه‌های مشهد و شرعیتی و همچنین استقرار فرودگاه در این مناطق باشد. همچنین نقشه‌های پهنه‌بندی نشان‌دهنده وقوع بیشترین میزان آلاینده PM<sub>2.5</sub> در فصل پاییز و زمستان بود.

کیفیت هوا، آنالیز هزینه اثر، تدابیر کاهش آلاینده‌ها و مدل‌سازی مناسب آلاینده‌های هوا جهت اطلاع دقیق و سریع از کیفیت هوا جهت حفظ سلامت عموم و جلوگیری از خسارت وارده به اموال و منافع در برابر غلظت‌های زیاد آلاینده‌ها صورت گیرد.

### ملاحظات اخلاقی

نویسندگان کلیه نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. همچنین، هرگونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر نتایج یا تفسیر مقاله تأثیر بگذارد را رد می‌کنند.

### تشکر و قدردانی

این مقاله منتج از پایان نامه کارشناسی ارشد، با عنوان تحلیل و پهنه بندی آلودگی هوای شهر مشهد با استفاده از مدل‌های مختلف تحلیل فضایی در سال ۱۳۹۵ می‌باشد. بدین‌وسیله از مسئولین محترم مرکز پایش آلاینده‌های زیست‌محیطی مشهد در خصوص همکاری در دریافت اطلاعات مربوط به ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوای شهر مشهد، تشکر و قدردانی می‌شود.

مناطق پرریسک در شهر و بکارگیری اقدامات مفید به‌منظور کاهش آلودگی در آن نقاط بسیار سودمند می‌باشد. به‌طور کلی می‌توان بیان کرد که تولید و استفاده از چنین نقشه‌های زمین مرجعی، امکان تجزیه و تحلیل‌های مکانی را به سرعت فراهم می‌آورد؛ چراکه می‌تواند در ترکیب با سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، کاربر را قادر سازد تا تأثیر عوامل مختلف بر غلظت آلاینده‌ها را بررسی کند.

با توجه به یافته‌های این مطالعه و در نظر گرفتن استانداردهای آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا مبنی بر اینکه حداکثر ۱ روز از سال می‌تواند دارای کیفیت هوایی بالاتر از حد استاندارد باشد، مشاهده می‌شود که وضعیت کیفی هوای کلان‌شهر مشهد از لحاظ آلاینده  $PM_{2.5}$ ، از نظر حفظ سلامتی اعضای جامعه به‌ویژه افراد حساس مانند کودکان، افراد مسن و بیماران دارای مشکلات تنفسی، عصبی و قلبی-عروقی از کیفیت مطلوبی برخوردار نبوده و این امر نیازمند توجه بیشتر مسئولان و برنامه‌ریزان شهری است. لذا پیشنهاد می‌گردد که برنامه‌های مدیریتی مناسب مانند ارزیابی

## References

- Shokri P. The effect of spatial distribution of Tabriz urban uses on air pollution. J urban Ecology Res 2011;2(3):75-82(In Persian).
- Atai H. Hashemi Nasab s. Identification and analysis of atmospheric mid-Level patterns affecting air pollution in Isfahan. J urban Res and planning 2011;2(4):97-112(In Persian).
- Bahari R.A. Abaspour R.A. pahlavani p. zoning of particulate Matters (pm) pollution using local statistical Models in GIS (case study: Tehran Metropolises). J Geomatics science and technology 2016;5(3):165-174(In Persian).
- Evans J. Van Donkelaar A. Martin RV. Burnett R. Rainham DG. Birkett NJ. et al. Estimates of global mortality attributable to Particulate air Pollution using Satellite imagery. Environ Res 2013;120:33-42
- Dehghani M. Kamali Y. Shamsedini N. Ghanbarian M. A Study of the Relationship between Indoor/Outdoor Particle Concentration in Dena hospital in shiraz. J Health Res Commun 2015;1(1):49-55(In Persian).
- Zhang A. Qi Q. Jiang L. Zhou F. Wang J. Population Exposure to  $PM_{2.5}$  in the Urban area of Beijing 2013.
- Jorgensen NW. Van Hee VC. Barr RG. O'Neill MS. Herrington DM. Polak JF. et al. Vascular Responses to long-and Short-Term Exposure to Fine Particulate Matter. J Am Coll Cardiol 2012;60(21):2158-2166.
- Fatah Tabar Firooz jaei S. Al sheikh A.A. Rangzan k. chinipardaz R. classification of air pollutants using statistical models and GIS techniques (case study: in Tehran).The Fifth National Conference on Environmental Engineering. Tehran 2011(In Persian).
- Berman JD. Breyse PN. White RH. Waugh DW. Curriero FC. Evaluating methods for spatial mapping: Applications for estimating ozone concentrations across the contiguous United States. Environmental Technology & Innovation. 2015;3:1-10
- Kumar Jha D. Sabesan M. Das A. vinithkumar N.V. Kirubakaran R. Evaluation Of Interpolation Technique for Air Quality Parameters in Port Blair, India. Universal Journal Of Environmenta Research and Technology 2011;1(3):301-310.
- Prapassornpitaya S. Jinsart w. Sanguansintukul S. Mapping of Urban Air Quality by Clustering Analysis and Geographic Information System, CASANZ 2011, July 31.
- Ismail Nejad M. Eskandari Thani M. Barazman S. Evaluation



- and zoning of air pollution in Tabriz metropolis. *J Regional planning*(2015);5(19):173-186. (In Persian).
13. Nour pour A.R. Faiz M.A. Determination of spatial and temporal changes of sulfur dioxide, nitrogen dioxide and suspended solids using GIS techniques in Tehran. *J Environmental science*(2014);40(3):723-738. (In Persian).
  14. Noor Abdi S. Application of gis in determining the best interpolation algorithm for urban air pollution in Tabriz. (M.SC). Iran. Ministry of science, Research and Technology- universitg of Tabriz\_Faculty of Geography 2014. (In Persian).
  15. Fatah Tabar Firooz jaei S. Al sheikh A.A. Rangzan k. chinipardaz R. classification of air pollutants using statistical models and GIS techniques (case study: in Tehran). *The Fifth National Conference on Environmental Engineering*. Tehran 2011(In Persian).
  16. Baharloo Ghara Baltaghi I. Determination of spatial Variations of carbon monoxide and particulate matter pollution in Tehran using interpolation techniques in GIS environment. (M.SC).Iran. Ministry of science, Research and Technology- shahid Beheshti university -Faculty of Earth sciences 2009 (In Persian).
  17. Miri M. Ghaneian M.T. Gholizadeh A.M. Yazdani Avval M. Nikoonahad A. Assessment of spatial Analysis Methods in Mapping of Air pollution in Mashhad. *J Environmental Health Engineering* 2016;3(2):143-154. (In Persian)
  18. Ismaili R. Homogeneous areas of air pollution in Mashhad. *J Natural hazards* 2019;7(16): 227-240. (In Persian).
  19. Ismaili R. Application of cluster Analysis group of stations to measure air pollution case study: the city of Mashhad. the second National conference on Air and Noise pollution Management, Tehran, Radio and Television International conference center 2013. (In Persian)
  20. Akbari E. Mohammadnia M. keshavarz Mozaffari Z. Modeling air pollution in Mashhad using PSI index in GIS environment. National conference on Air Flow and pollution Tehran 2012. (In Persian).
  21. Akbari E. Fakheri M. pour gholam Hassan E. Akbari Z. Monthly zoning of air pollution and its relationship with climatic factors (case study:Mashhad). *J Natural environment*. 2016;68(4):533-547.. (In Persian).
  22. Kazemi kh. shakeri Roush M. Rastegar M. sayadi S. Air pollution And urban management challenges in metropolises (case:mashhad metropolis).sixth National conference on urban planning and Management with emphasis on the components of the Islamic city 2014. (In Persian).
  23. Famili A. Jalali Yazdi A. Hassanpour M. Geo-statistical analysis of air pollutants with the aim of blue sky for the metropolis of mashhad. fifth International conference on Transportation and Traffic Engineering, Tehran 2016
  24. Ghahroudi Tali M. *The Introduction to Geographic Information systems*.1 (ed) payame Noor university:2015
  25. Hosseinzadeh S R.Doostan r. Haghghat Ziabary S M. Haghghat Ziabary S M. *The Study of Synoptic Patterns of Air Pollution in Mashhad Metropolis*. *J of Geography and Regional Development Res*2014 ;11(21):81-101. (In Persian)
  26. GHolamhosein ghochani S. Hoshdar Tehrani Sh. Esmaili R. Study of Spatial Distribution Pattern of Carbon Monoxid in Mashhad City Using Interpolation Methods During. *J of Research in Environmental Health* 2019; 5(1):53-64. (In Persian).
  27. Mehraban Ghezalhesar S. Mafi E. Investigation and analysis of the Share of Pollutant Sources in air Pollution in Mashhad metropolis. *The first Conference on architecture, restoration, urban planning and Sustainable environment* 2014. (In Persian).