تحلیل و پهنه بندی آلودگی هوا شهر مشهد با استفاده از مدل‌های مختلف تحلیل فضایی

محمد میری[1]، محمد تقی قانعیان[2]، عبدالمجید قلیزاده[1*]، محسن یزدانی اول[3]، علی نیکونهاد[1]

۱ دانشجوی دکتری بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی یزد، یزد، ایران

۲ دانشیار گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی یزد، یزد، ایران

۳ دانشجوی دکترای بهداشت محیط، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹٤/۸/۱۶ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹٤/۱۲/۳

چکیده

مقدمه و هدف: این مطالعه به مقایسه و ارزیابی مدل‌های فضایی و آماری برای پیش بینی غلظت PM2.5 در سطح زمین و در مقیاس کلان در شهرستان مشهد می‌پردازد.

روش کار: برای بررسی فضایی وضعیت آلودگی هوای کلان شهر مشهد از سه مدل درون یابی (OK) Ordinary Kriging ، Universal Kriging و وزن دهی معکوس فاصله (IDW) استفاده گردید. برای مقایسه مدل‌ها و انتخاب بهترین مدل از ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی (R2) استفاده گردید. همچنین برای انتخاب بهینه ترین شرایط برای اجرای دو مدل OK و UK از Standardized RMSE استفاده گردید.

یافته ها: نتایج نشان داد که بیشترین میانگین ماهیانه آلودگی PM2.5 مربوط به مهر ماه و ایستگاه «ساختمان» (µg/m3 ۹۵/۱) می‌باشد. کمترین میانگین آلودگی ماهیانه نیز مربوط به ایستگاه «طرق» و در آبان ماه (µg/m3 ۱۵/۵) است. با توجه به داده ها، مدل OK دارای کمترین RMSE (۱۰/٦۰۱) و بیشترین ضریب همبستگی نسبت به مدل UK و IDW داشت. مقدار کمتر RMSE نشان دهنده میزان خطای کمتر در مقادیر پیش بینی نسبت به مقادیر اندازه گیری است. بنابراین مدل OK دارای شرایط بهتر در میان یابی است

نتیجه گیری: در نهایت باید بیان کرد که تولید و استفاده از چنین نقشه های زمین مرجعی امکان تجزیه و تحلیل های مکانی را به سرعت فراهم می آورد، چرا که می تواند در ترکیب با سامانه های اطلاعات جغرافیایی، کاربر را قادر سازد تا تأثیر عوامل مختلف بر غلظت آلاینده‌ها را بررسی کند.

کلمات کلیدی: ذرات معلق، شهر مشهد، مدل سازی، GIS

مقدمه

در دهه های اخیر آلودگی هوا در بسیاری از مناطق جهان باعث افزایش نگرانی عمومی در خصوص ایجاد عوارض بهداشتی شده است.[1] ذرات معلق موجود در هوا دارای گستره وسیع اندازه بین ۰/۰۰۰۰۲ تا ۵۰۰ میکرون می‌باشند (۲). ذرات با قطر کمتر از ده میکرون (PM_{10}) و ذرات با قطر کمتر از ۲/۵

* دانشجوی دکتری بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی یزد، یزد، ایران

ایمیل: gholizadeh_eng@yahoo.com - **شماره تماس:** ۰۹۱۵۹۸٦٦۳٦۰

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.3.2.143]

میکرون ($PM_{2.5}$) می توانند به طور عمیقی بـه داخـل شـش‌هـا نفوذ کرده و اثرات نامطلوبی را بر سلامتی انسان دارد.[۳] بسیاری از ذرات معلق در مقایسه با آلوده کننده های گازی دیگر بیشـتر سبب بروز اختلال در مجاری تنفسی می شود. همچنین بعضـی از ذرات معلق موجود در اتمسفر در اثر تـاثیراتی کـه روی هـم می گذارند، سبب تشدید اثرات سمی بعضی از آلوده کننـده‌هـا می شوند.[٤] تخمین زده شده است که آلودگی هوا ١/٤ درصد کل مرگ و میرها در دنیا را به خود اختصاص داده است.[٥] علاوه بـر منابع انسانی آلودگی هوا از جمله صنایع و حمـل و نقـل، منـابع طبیعی نیز نقش به سزایی در ایجـاد آلـودگی هـوا دارنـد. ذرات $PM_{2.5}$ (ذرات بـا قطـر آئرودینـامیکی کمتـر یـا مسـاوی ٢/٥ میکرومتر) جدی ترین خطرات را برای عملکرد ریه و مشکلات قلبی- عروقی در بر دارند.[٦] مطالعات جدید گـزارش کردنـد کـه سالیانه ٣/٥ میلیون مرگ و میر به دلیل بیماری های قلبی عروقی و ٢٢٠٠٠٠ مرگ نیز به دلیل سرطان ریـه ناشـی از ذرات $PM_{2.5}$ اتفاق می‌افتد.[٧،٨] مطالعات مختلفـی در زمینـه بررسـی وضـعت آلودگی هوای شهرها صورت گرفته است، پـاپ و همکـارانش (٢٠٠٢) چنین نتیجه گیری کرده اند که تماس طولانی مدت بـا ذرات ریز قابل استنشاق احتمال سرطان ریـه و مـرگ ناشـی از عوارض قلبی- ریوی را افزایش می‌دهد.[٩] در مطالعه انجام شده توسط .Chan C که در شهر پکن انجام شد مشخص گردید ٨٦ ٪ نمونه‌های گرفته شده ذرات معلق $PM_{2.5}$ فراتـر از اسـتاندارد حفاظت محیط زیست آمریکا (EPA) بوده اسـت.[١٠] در مطالعـه دیگری در دهلی هند مشخص گردید که حدکثر غلظـت ذرات معلق $PM_{2.5}$ و PM_{10} در زمان اوج ترافیک اتفاق می‌افتد.[١١]

امروزه، روش های مختلفی برای تخمین آلودگی هوا وجود دارد. یکی از این روش‌ها تلفیق اطلاعات ایستگاه های سـنجش آلودگی و روش های تحلیل فضایی است.[١٢] یکی از روش‌هـای تحلیل فضایی روش وزن دهی معکـوس فاصـله (IDW) اسـت که در آن، تنها عامـل مـوثر فاصـله بـرای وزن دهـی اسـت. در روش IDW نیـازی بـه تعیـین الگـوی تغییـرات مکـانی یعنـی تغییرنما نیست. معکوس فاصله یـک روش وزن دهـی متوسـط بوده که در آن داده‌ها از طریق رابطه انحراف معیار یک نقطـه از سایر نقاط با استفاده از گره های شبکه بندی شده و وزن دهـی می‌شوند.[١٣]

یکی دیگر از روش‌های مـورد اسـتفاده در تحلیـل فضـایی استفاده از مدل گریجینگ است. ایـن روش درون یـابی کـه بـر پایه رگرسیون بنا شده است، اختصاص وزن نه تنهـا بـه فاصـله بین نقاط اطراف بلکـه براسـاس همبسـتگی میـان نقـاط انـدازه گیری شده نیز است،[١٤،١٥] اوسطی و سـلاجقه (١٣٨٩) از روش درون یابی کریجینگ معمولی برای پهنـه بنـدی نیتـرات در آب زیرزمینی دشت کردان استفاده کردنـد و اظهـار کـردن کـه ایـن روش بهترین روش درون یابی نیترات بوده اسـت.[١٦] در مطالعـه انجام شده روی کیفیـت هـوای شـهر مشـهد توسـط اکبـری و همکـاران[١٧] بـا اسـتفاده از روش پهنـه بنـدی IDW بـر اسـاس شاخص PSI مشخص شد که در سال ١٣٨٨ فصل بهار کیفیـت هوا در وضعیت بسیار ناسـالم و خطرنـاک و بطـور کلـی کلیـه فصول را با وضـعیت نـامطلوب هـوا گـزارش کردنـد، در ایـن مطالعه از ذرات معلق و مونواکسید کربن برای تعیـین شـاخص PSI استفاده شه بـود. در مطالعـه دیگـر انجـام شـده در مشـهد توسـط جهـان شـیری در سـال ١٣٨٨ غلظـت آلاینـده‌هـای مونواکسید کربن و ذرات معلق بیشـتر از سـایر مـوارد گـزارش گردید.[١٨]

با توجه اهمیت بهداشتی ذرات معلق موجود در هوا و مخصوصا ذرات $PM_{2.5}$ که خطرات بیشتری به همراه دارند به بررسی آن غلظت آن در سال ١٣٩٣ در شهر مشهد به عنوان دومین کلان شهرهای ایران پرداخته شده است. در این راستا روش‌های مختلف تحلیل فضایی (کریجینگ، IDW و UK) مورد بررسی قرار گرفته و بهترین روش برای پهنه بندی غلظت ذرات معلق $PM_{2.5}$ در شهر مشهد انتخاب و ارائه گردیده است. امید است نتایج این مطالعه بتواند به سیاست گزاران برای

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-28]

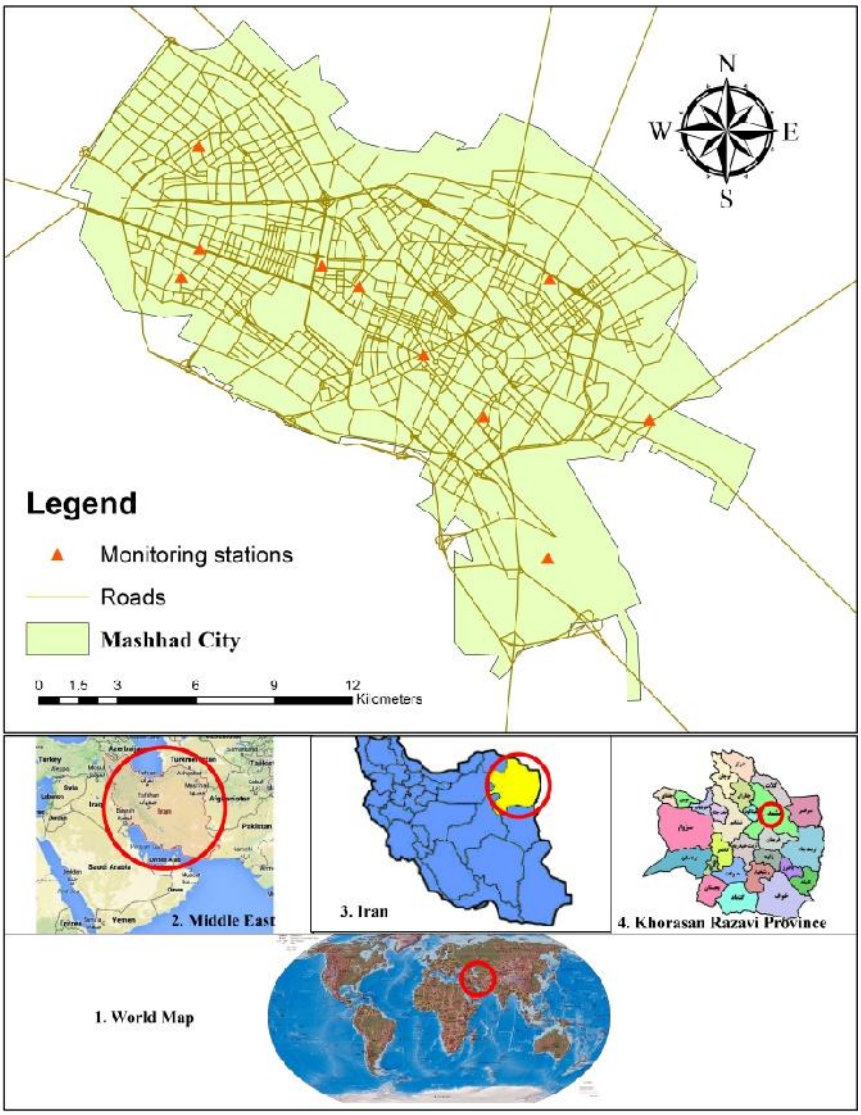
[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.3.2.143]

طراحی مدیریت یکپارچه کیفیت هوا و برنامه‌ریزی جهت آمادگی لازم در مقابله با اثرات این پدیده، کمک نماید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

مشهد به عنوان دومین کلان شهر ایران و مرکز استان خراسان رضوی در شمال شرقی ایران قرار دارد. این شهر در طول جغرافیایی E'۳۵ °۵۹ تا E' ۷٤ °۵۹ و عرض جغرافیایی N'۱٤ °۳٦ تا N'٤۸ °۳٦ واقع شده است. شهر مشهد حدود ۳۲۸ کیلومتر مربع مساحت دارد و جمعیت آن حدود ۲/٦ میلیون نفر می‌باشد. بیشینه ارتفاع شهر مشهد ۱۱۵۰ متر و کمینه آن ۹۵۰ متر است. این شهر یکی از شهرهای صنعتی ایران است و همچنین جز پر تردد‌ترین شهرهای ایران است که سبب آلودگی هوای آن بخصوص در فصول سرد می‌شوند. شکل ۱ نقشه موقعیت شهر مشهد و ایستگاه های سنجش آلودگی هوای این مطالعه را نشان می دهد. که همانطور که در شکل مشخص است ۱۰ نقطه شهر از تمامی جهات برای بررسی غلظت ذرات $PM_{2.5}$ مورد بررسی قرار گرفته است.



[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.3.2.143]

شکل ۱: موقعیت محل مطالعه و جایگاه ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا

جمع‌آوری داده‌ها

این مطالعه از نوع توصیفی مقطعی بوده و در آن به تحلیل فضایی آلاینده $PM_{2.5}$ اندازه گیری شده توسط توسط ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا در شهر مشهد در سال ۱۳۹۳ پرداخته شده است. برای تحلیل فضایی از نرم افزار Arc GIS 10.1 منتشر شده توسط کمپانی ESRI و برای رسم نمودار و سایر تحلیل‌ها روی داده‌ها از نرم افزار Excel 2007 استفاده شد. جهت تحلیل فضایی وضعیت آلودکی هوای کلان شهر مشهد سه مدل درون یابی شامل Ordinary Kriging (OK) ، Universal Kriging (UK) و وزن دهی معکوس فاصله (IDW) بکار گرفته شدند. نهایتا با مقایسه صورت گرفته بین سه مدل بهترین مدل برای پهنه بندی آلودگی هوای شهر مشهد انتخاب شد.

توسعه مدل

مدل (OK): OK عبارت از یک روش برآورد زمین آماری است که بر پایه میانگین متحرک وزن دار استوار می‌باشد. به طوری که می‌توان گفت بهترین برآوردکننده خطی نااریب می‌باشد. این برآورد کننده به صورت زیر تعریف می‌شود(۱۹, ۲۰):

$$Z^*(x_i) = \sum_{(i=1)}^{n} a_i \, z(x_i) \qquad (۱)$$

که در آن $Z^*(x_i)$ عیار برآوردی، λ_i وزن یا اهمیت کمیت وابسته به نمونه i ام و $z(x_i)$ مقدار متغیراندازه گیری شده می‌باشد. این نوع کریجینگ را کریجینگ خطی می‌نامند زیرا ترکیب خطی از n داده است که شرط استفاده از این برآورده کننده این است که متغیر Zدارای توزیع نرمال باشد. در غیر این صورت یا باید از کریجینگ غیرخطی استفاده کرد و یا این که به نحوی توزیع متغیرها را به نرمال تبدیل نمود. در این مقاله از روش خطی استفاده شده است.

مدل UK: در این روش فرض بر این است که علاوه بر مؤلفه ی همبستگی مکانی بین نقاط، انحراف یا روند نیز در مقادیر z وجود دارد. در این صورت، کریجینگ با یک چند جمله ای مرتبه اول یا دوم ترکیب می شود. برای مثال چند جمله ای مرتبه اول به صورت $M=b_1x_i+ b_2y_i$ و یک چند جمله ای مرتبه دوم به صورت $M=b_1x_i+ b_2y_i + b_3x_i^2+b_4x_iy_i+b_5y_i^2$ به مدل اضافه می شود. در اینجا M روند x_i و y_i مختصات نقاط نمونه i و b_iها ضرایب روند می باشند.[۲۱]

همچنین برای دو مدل کریجینگ نقشه «خطای استاندارد پیش بینی» نیز تولید شد.

مدل (IDW): روشIDW برای هر یک از نقاط اندازه گیری، وزنی براساس فاصله بین آن نقطه تا موقعیت نقطه مجهول در نظر می‌گیرد. سپس این وزن‌ها توسط توان وزن دهی کنترل می‌شود. به طوری که توان های بزرگ تر اثر نقاط دورتر از نقطه مورد برآورد را کاهش داده و توان های کوچک تر وزن‌ها را به طور یکنواخت تری بین نقاط هم جوار توزیع می‌کنند. البته این روش بدون توجه به موقعیت و آرایش نقاط، فقط فاصله آن‌ها را در نظر می‌گیرد. یعنی نقاطی که دارای فاصله یکسانی از نقطه برآورد هستند دارای وزن یکسانی می‌باشند. مقدار عامل وزنی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:[۲۲]

$$a_i = (D_i^{-\sim}) / \sum_{i=1}^{n} D_i^{-\sim} \qquad (۲)$$

که در آن λ_i وزن ایستگاه i ام ، D_i فاصله ایستگاه i ام تا نقطه مجهول و α توان وزن دهی می‌باشد.

برای مقایسه مدل‌ها و انتخاب بهترین مدل از ریشه میانگین مربعات خطا Root Mean Square Error (RMSE) استفاده گردید، روش محاسبه RMSE در زیر آورده شده است:[۲۳]

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(q_i - \hat{q}_i)^2} \qquad (۳)$$

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.3.2.143]

همچنین برای انتخاب بهینه ترین شرایط برای اجرای دو مدل OK و UK از Standardized RMSE به همراه RMSE استفاده گردید. فرمول مربوط به standardized RMSE در زیر آورده شده است:

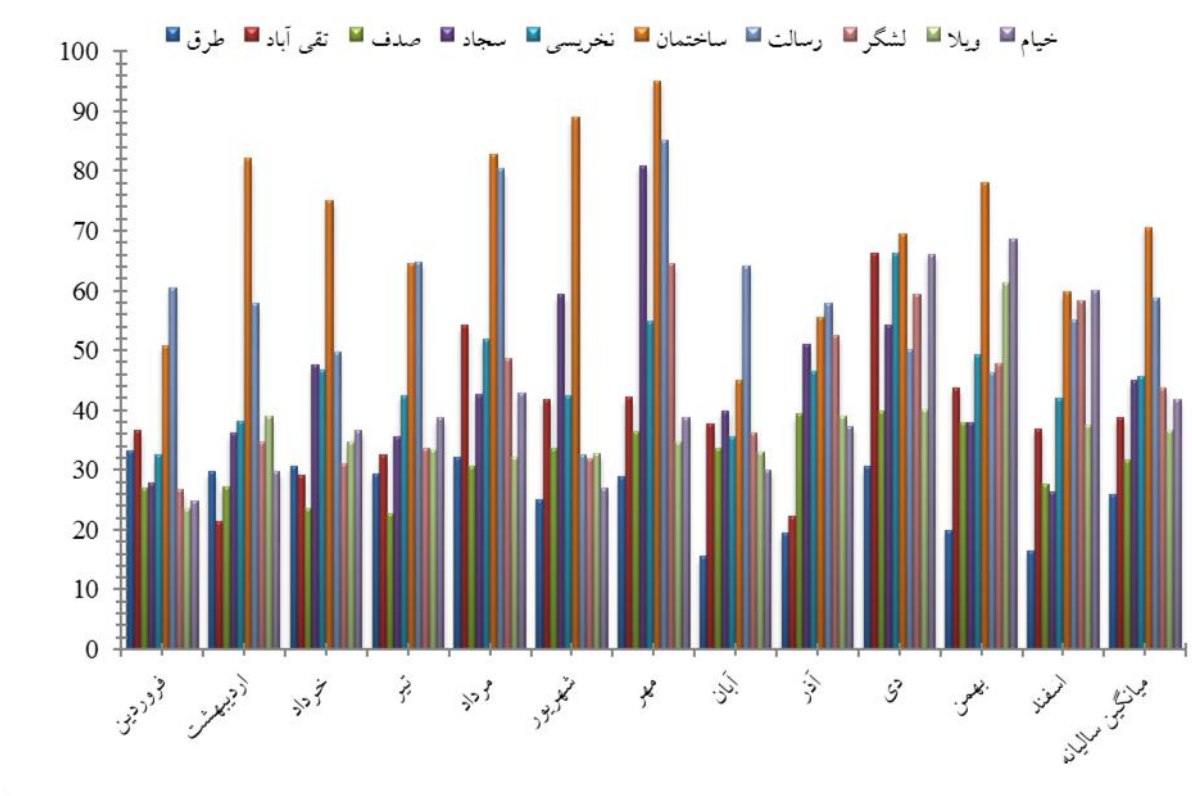
$$\text{Standardized RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{q_i - \hat{q}_i}{\hat{\sigma}_i}\right)^2} \qquad (٤)$$

در فرمول‌های فوق n تعداد داده ها، q_i مقدار اندازه گیری شده، $\hat{q}_i$ مقدار پیش بینی شده توسط مدل و $\pm\hat{\sigma}_i$ خطای استاندارد پیش‌بینی می‌باشد.

نتایج

داده‌های گردآوری‌شده مربوط به ذرات معلق $PM_{2.5}$ از ایستگاههای سنجش آلودگی هوای شهر مشهد در سال ۱۳۹۳ بر حسب میانگین ماهیانه در شکل (۲) آورده شده‌است.

همانگونه در این شکل پیداست بیشترین میانگین ماهیانه آلودگی $PM_{2.5}$ مربوط به مهر ماه سال ۱۳۹۳ و ایستگاه ساختمان (μ/m^3 ۹۵/۱) می‌باشد. کمترین میانگین آلودگی ماهیانه نیز مربوط به ایستگاه طرق و در آبان ماه (μ/m^3 ۱۵/۵) است. میانگین آلودگی مربوط به $PM_{2.5}$ در فصل زمستان بیشتر از سایر فصل ها می‌باشد که انتظار آن نیز می‌رفت. با توجه به میانگین سالیانه نیز ایستگاه «ساختمان» دارای بالاترین غلظت ذرات معلق $PM_{2.5}$ (μ/m^3 ۷۰/۵۷۵) می‌باشد. خلاصه آماری وضعیت آلودگی هوای شهر مشهد مربوط به ذرات معلق $PM_{2.5}$ در جدول (۱) آورده شده است. میانگین فصلی کل ایستگاه‌ها نیز برای فصل بهار برابر با μ/m^3 ۳۸/۱۲۲ ، برای فصل تابستان μ/m^3 ٤۳/٦۹ ، برای پاییز μ/m^3 ٤٥/۰٦۸ و برای زمستان μ/m^3 ٤۸/٤۲۳ بود. داده‌ها حاکی از این است که بیشتریت غلظت میانگین در فصل زمستان بوده است.



[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-28]

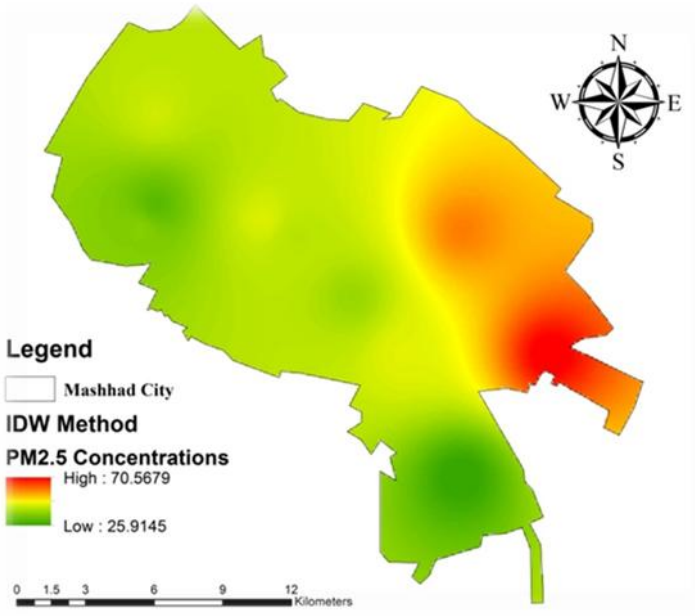
[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.3.2.143]

شکل ۲: نمودار میانگین غلظت ماهیانه ذرات معلق $PM_{2.5}$ در هوای شهر مشهد، سال ۱۳۹۳

جدول ۱: خلاصه آماری وضعیت آلودگی هوای شهر مشهد مربوط به ذرات معلق $PM_{2.5}$ در سال ۱۳۹۳

پارامتر		غلظت $PM_{2.5}$
میانگین سالیانه کل ایستگاه‌ها بر اساس میانگین		٤٣/٨٢٦
انحراف معیار		١٦/٩٤٥
حداقل سالیانه کل ایستگاه‌ها بر اساس میانگین		١٥/٥
حداکثر سالیانه کل ایستگاه‌ها بر اساس میانگین		٩٥/١
میانگین فصلی کل ایستگاه ها	بهار	٣٨/١٢٢
	تابستان	٤٣/٦٩
	پاییز	٤٥/٠٦٨
	زمستان	٤٨/٤٢٣

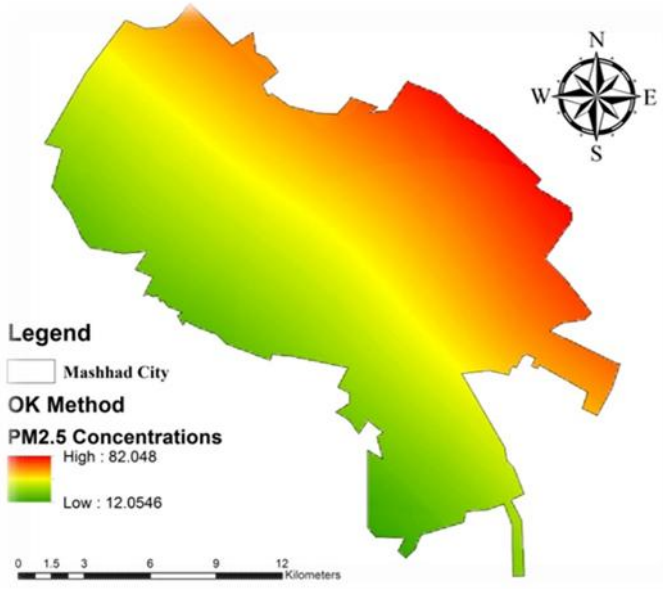
در ادامه نتایج حاصل از استفاده از روش‌های درون یابی UK, OK و IDW در شکل‌های (۳) , (٤) و (٥) آورده شده است. برای انتخاب نوع سمی واریوگرام (semivariogram) برای نرمال سازی مجدد داده‌ها در دو مدل کریجینگ دو پارامتر RMSE و Std. RMSE استفاده گردید و نهایتاً از سمی واریوگرام کروی و Box-Cox با پارامتر توان برابر با یک بعنوان بهترین گزینه‌ها برای اجرای مدل OK و UK استفاده گردید. از واریوگرام به منظور تعیین و تشریح ساختار مکانی داده‌ها استفاده شد. واریوگرافی اولین قدم برای مدلسازی ساختار مکانی به منظور استفاده در کریجینگ است. مدل واریوگرام کروی از مبداء مختصات شروع شده و در نزدیکی مبداء رفتار خطی دارد با افزایش مقدار در جهت محور Xها منحنی به سرعت بسمت مقادیر بیشترمحور Y صعود می‌کند. آنگاه به تدریج از شیب آن کم می شود و در فاصله معینی که دامنه تاثیر نامیده می شود، به سقف خود می رسد و در همین مقدار باقی می ماند. باتوجه به پهنه‌بندی صورت گرفته منطقه شرق که شامل محدوده ایستگاه ساختمان و در امتداد اتوبان همت به سمت شمال و شمال شرقی شهر می‌باشد، نسبت به میانگین سالیانه آلاینده $PM_{2.5}$ بطور کلی غلظت بالاتری از $PM_{2.5}$ را نشان می‌دهد و در وضعیت بدتری نسبت به منطقه غرب کلان شهر مشهد قرار دارد، بنابراین نگرانی‌ها در این منطقه بیشتر است.



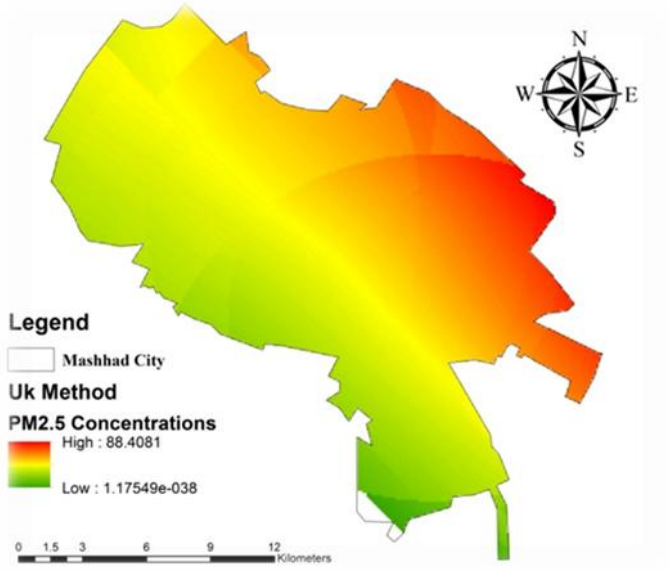
[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.3.2.143]

شکل ۳: پهنه بندی میانگین سالیانه آلاینده $PM_{2.5}$ بر حسب ($\mu g/m^3$) با مدل IDW در کلان شهر مشهد، سال ۱۳۹۳



شکل ٤: پهنه‌بندی میانگین سالیانه آلاینده $PM_{2.5}$ بر حسب ($\mu g/m^3$) با مدل OK در کلان شهر مشهد، سال ۱۳۹۳



شکل ۵: پهنه بندی میانگین سالیانه آلاینده $PM_{2.5}$ بر حسب ($\mu g/m^3$) با مدل UK در کلان شهر مشهد، سال ۱۳۹۳

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.3.2.143]

برای مقایسه مدل‌های IDW ، OK و UK و انتخاب مدل بهینه در پهنه بندی آلاینده هوا $PM_{2.5}$ در کلان شهر مشهد از شاخص RMSE و R^2 استفاده گردید که نتایج حاصل از آن در جدول (۲) آورده شده است:

جدول ۲: مقایسه سه مدل درون یابی

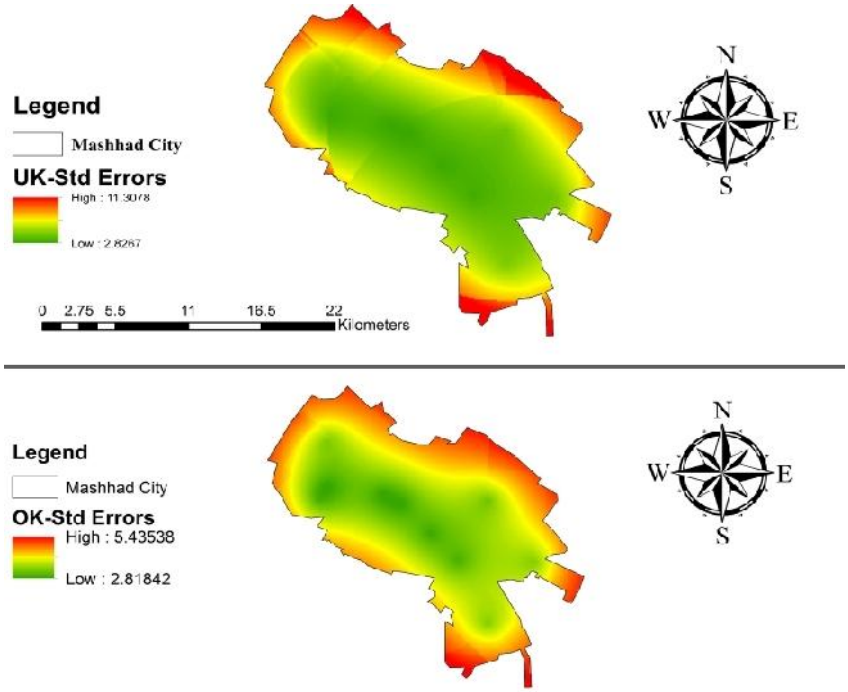
شاخص / مدل مورد استفاده	RMSE	Std. RMSE	R^2
Ordinary Kriging (OK)	۱۰/۶۰۱	۱/۶۰۶	۰/۷۶۵
Universal Kriging (UK)	۱۲/۵۱۱	۱/۳۵۳	۰/۷۲
Inverse Distance Weighted (IDW)	۱۳/۳	–	۰/۶۷

با توجه به داده‌های ارایه شده در جدول فوق مدل OK دارای RMSE برابر با ۱۰/۶۰۱ ، مدل UK دارای RMSE برابر با ۱۲/۵۱۱ و مدل IDW نیز RMSE برابر با ۱۳/۳ دارد. مقدار کمتر RMSE نشان دهنده میزان خطای کمتر در مقادیر پیش بینی نسبت به مقادیر اندازه گیری است. بنابراین مدل OK دارای شرایط بهتر در میان یابی است. همچنین از ضریب همبستگی (R^2) نیز جهت براورد مدل استفاده شده براین اساس مدل OK دارای بیشترین همبستگی نسبت به دو مدل دیگر بود.

برای ارزیابی و مقایسه دو مدل کریجینگ نقشه خطاهای استاندارد پیش بینی (شکل ٦) نیز تهیه گردید. مدل UK میزان بالاتری از این خطا (میانگین برابر با ۵/۱۸ و محدوده ۱۱/۳۱– ۲/۸۳) را نسبت به مدل OK نشان داد. بیشترین خطاهای استاندارد پیش بینی مربوط به مناطقی است که از ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا فاصله بیشتری دارند. در مورد مدل OK میزان کمتر خطای استاندارد پیش بینی (میانگین برابر با $\mu g/m^3$ ۳/۸۹ و محدوده ٥/٤٤–۲/۸۲) مشاهده می‌شود که نشان دهنده عدم قطعیت کمتر در پیش بینی غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ است. درمورد مدل IDW به واسطه غیر آماری بودن این مدل در آن خطاهای استاندارد پیش بینی محاسبه نمی شود.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.3.2.143]



شکل ۶: تخمین میزان خطای استاندارد حاصل از دو مدل UK و OK در پیش بینی غلظت میانگین سالیانه $PM_{2.5}$ در شهر مشهد

بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه تحلیل فضایی میانگین سالیانه غلظت ذرات معلق $PM_{2.5}$ توسط مدل‌های OK، UK و IDW در کلان شهر مشهد مورد بررسی قرار گرفت. روش IDW از جمله روش های درون یابی است که در آن برآورد براساس مقادیر نقاط نزدیک به نقطهٔ برآورد که بنابر عکس فاصله وزن‌دهی می‌شوند، انجام می‌گیرد. به عبارت دیگر، به نقاط نزدیک به نقطهٔ برآورد وزن بیشتری داده می‌شود تا به نقاط دورتر. این روش برخلاف روش کریجینگ از فرضیات مربوط به ارتباط مکانی بین داده‌ها پیروی نمی‌کند (واریوگرام ندارد) و تنها بر این فرض متکی است که نقاط نزدیکتر به نقطهٔ برآورد، شباهت بیشتری به آن دارند تا نقاط دورتر. اما کریجینگ، روش درون یابی و برآورد زمین آماری است که قادر است براساس مدل برازش شده بر واریوگرام تجربی و نمونه های اندازه گیریشده در جامعه، نقاط نمونه‌برداری نشده را بدون اریب و با حداقل واریانس برآوردکند. عمومی‌ترین روش آن که در علوم محیط زیستی نیز کاربرد فراوانی دارد، کریجینگ معمولی است.[۲۴] در روش کریجینگ هر نمونه معلوم در تخمین نمونه مجهول بستگی کامل به ساختار فضایی محیط مربوطه دارد در حالیکه در روش‌های دیگر وزن‌ها فقط به یک مشخصه هنئسی مانند فاصله بستگی دارد و با تغییر ساختار فضایی نمونه‌ها، تغییرنمی‌کند و با ضعیف شدن ساختار فضایی نقش نمونه‌ها کمتر می‌شود. مدل کریجینگ از دقیق ترین مدل‌هایی است که در تهیه نقشه‌های پراکندگی بکار می‌رود. بدلیل اینکه این مدل فاقد خطای سیستماتیک است و در تخمین‌ها دارای حداقل واریانس می‌باشد، جایگاه ویژه ای در درون یابی بدست آورده‌است.

وضعیت آلودگی هوا در محدوده ایستگاه‌های شرق و شمال شرق شهر غلظت بالاتری از آلاینده را نشان داد. علت این امر می‌تواند تردد بالا در اتوبان همت که از شرق تا شمال شرق شهر امتداد دارد و وجود زمین‌های بایر و زمین‌های کشاورزی در منطقه شرقی شهر مشهد باشد. میانگین سالیانه تمامی ایستگاه‌ها از استاندارد EPA که برابر با ۱۵ $\mu g/m^3$ برای میانگین سالیانه $PM_{2.5}$ است بیشتر بود. در مطالعه اکبری و همکاران[۱۷]

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.3.2.143]

نیز وضعیت نامطلوب کیفیت هوا در کلیه فصول ۱۳۸۸ برای کلان شهر مشهد گزارش گردید که با مطالعه حاضر هم خوانی دارد. در مطالعه دیگری که توسط جمشیدی و همکاران بر روی آلودگی هوای شهر گچساران صورت گرفت کیفیت هوا را در فصل تابستان بالاتر از حد مجاز گزارش کردند که با این مطالعه هم خوانی ندارد.[۲۵]

برای مقایسه سه مدل مورد استفاده از شاخص ارزیابی RMSE استفاده شد و شرایط مناسب تر مدل OK را با RMSE برابر با ۱۰/۶۰۱ در پیش بینی غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ نشان داد. هر قدر مقدار RMSE کمتر باشد نشان دهنده اختلاف کمتر مقادیر براورد شده (پیش بینی شده توسط مدل) نسبت به مقادیر مشاهده ای است. همچنین از ضریب همبستگی (R^2) نیز جهت برآورد مدل استفاده شده براین اساس مدل OK دارای بیشترین R^2 نسبت به دو مدل دیگر بود. این بدین معنی است همبستگی بیشتری بین مقادیر مشاهده‌شده و مقادیر پیش‌بینی شده در این مدل نسبت به دو مدل دیگر وجود دارد. در مطالعه انجام شده توسط نورپور و همکاران[۲۶] در کلان شهر تهران که به تعیین تغییرات مکانی و زمانی آلاینده های گوگرد دی‌اکسید، نیتروژن دی‌اکسید و انواع ذرات معلق با استفاده از تکنیک‌های GIS پرداختند مشخص شد که بین مدل‌های مختلف مورد استفاده برای پهنه‌بندی آلودگی هوا توانایی مدل کریجینگ معمولی بیشتر از سایر روش‌ها می‌باشد. در مطالعه انجام شده توسط J.D. Berman و همکاران[۲۷] که به ارزیابی مدل‌های مختلف تحلیل فضایی برای پهنه‌بندی غلظت ازن در کشور امریکا پرداختند، میزان R^2 و RMSE به ترتیب برای مدل IDW و مدل OK برابر با ۰/۷٤، ۸/۱٦۳ و ۰/۷۹، ٦/۹۸۳ و برای مدل UK مقدار ۰/۷۸ و ۷/۲۳ بدست آمد و کارایی بالاتر مدل OK را نشان‌داد که با مطالعه حاضر هم‌خوانی دارد. هر چند در این مطالعه به واسطه کارایی بهتر مدل UK در دخالت دادن سایر پارامترهای محیطی در پیش‌بینی غلظت ازن کارایی آن مشابه OK اعلام‌گردید.

با توجه به میانگین سالیانه غلظت $PM_{2.5}$ در ایستگاه‌های مختلف سنجش آلودگی هوای کلان شهر مشهد و بالاتر بودن آن از میزان استاندارد EPA ($۱۵\ \mu g/m^3$) و WHO ($۱۰\mu g/m^3$) باید به این مساله که خطرات بهداشتی و تاثیر نامطلوب بر ساکنین شهر مشهد دارد توجه بیشتری شود و برای کاهش میزان آلودگی توسط ارگان‌های مربوطه اقدامات لازم صورت‌گیرد. در این راستا می‌توان با افزایش ناوگان حمل و نقل عمومی، افزایش فضای سبز و همچنین کاهش خودروهای فرسوده و افزایش کیفیت سوخت از میزان آلودگی هوای کلان شهر مشهد کاست.

در نهایت باید بیان کرد که تولید و استفاده از چنین نقشه‌های زمین مرجعی امکان تجزیه و تحلیل های مکانی را به سرعت فراهم می آورد، چرا که می تواند در ترکیب با سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، کاربر را قادر سازد تا تأثیر عوامل مختلف بر غلظت آلاینده‌ها را بررسی کند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از سازمان محیط زیست مشهد و سرکار خانم مهندس جعفری بخاطر همکاری در دریافت اطلاعات مربوط به ایستگاههای آلودگی هوای شهر مشهد کمال تشکر و قدردانی را به نمایند.

منابع

1. Teather K, Hogan N, Critchley K, Gibson M, Craig S, Hill J. Examining the links between air quality, climate change and respiratory health in Qatar. Avicenna. 2013:9.

2. Boubel RW, Vallero D, Fox DL, Turner B, Stern AC. Fundamentals of air pollution: Elsevier; 2013.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.3.2.143]

3. 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].

4. Amirbeigi H, Ahmadi Asour A. Air Hygeine and Pollution Control Methods (Environmental &Industrial). Andishe Rafie; 2008 [In Persian].

5. 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.

6. Zhang A, Qi Q, Jiang L, Zhou F, Wang J. Population exposure to PM 2.5 in the urban area of Beijing. 2013.

7. Hao Y, Flowers H, Monti MM, Qualters JR. US census unit population exposures to ambient air pollutants. Int J Health geograph 2012;11(3).

8. 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.

9. Pope III CA, Burnett RT, Thun MJ, Calle EE, Krewski D, Ito K, et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. Jama. 2002;287(9):1132-41.

10. Chan C ,Xu X, Li Y, Wong K, Ding G, Chan L, et al. Characteristics of vertical profiles and sources of PM 2.5, PM 10 and carbonaceous species in Beijing. Atmospheric Environ 2005;39(28):5113-24.

11. Kumar P. Mass and number concentration of Respirable suspended particulate matter (RSPM) on selected corridors of Delhi city. M. Tech. Thesis, Indian Institute of Technology, Delhi; 2005.

12. Basu R, Woodruff TJ, Parker JD, Saulnier L, Schoendorf KC. Comparing exposure metrics in the relationship between PM2. 5 and birth weight in California. J Expo Sci Environ Epidemio 2004;14(5):391-6.

13. Taghizadeh-Mehrjardi R, Zareian-Jahromi M, Mahmoodi S, Heidari A, Sarmadian F. Investigation of Interpolation Methods to Determine Spatial Distribution of Groundwater Quality in Rafsanjan. J Watershed Manage Sci 2009; 2(5): 63-70 [In Persian].

14. Bishop PL. Pollution Prevention: McGraw Hill; 2000.

15. Schabenberger O, Gotway CA. Statistical methods for spatial data analysis: CRC press; 2004.

16. Osati Kh, Salajegheh A, Arekhi S. Spatial variation of nitrate concentrations in groundwater by Geostatistics (Case Study: Kurdan Plain). J Natur Environ 2013; 65(4): 461-72 [In Persian].

17. Akbari E, Mohammadnia M, Keshavarz Mozaffari Z. The modeling of air pollution in the city of Mashhad using SPI index in GIS environment. National Conference on Air Pollution. Tehran 2011, University of Tehran [In Persian].

18. Jahanshiri M. Statistical analysis and synoptic Evaluation of Mashhad air pollution. M.Sc Thesis of Climatology; School of Geography and Environmental Science, University of Hakim Sabzevari, 2010 [In Persian].

19. Peng X, Wang K, Li Q. A new power mapping method based on ordinary kriging and determination of optimal detector location strategy. Ann Nuclear Energy 2014;68(0):118-23.

20. Dai F, Zhou Q, Lv Z, Wang X, Liu G. Spatial prediction of soil organic matter content integrating artificial neural network and ordinary kriging in Tibetan Plateau. Ecol Indicators 2014;45(0):184-94.

21. Liu S, An N, Yang J, Dong S, Wang C, Yin Y. Prediction of soil organic matter variability associated with different land use types in mountainous landscape in southwestern Yunnan province, China. CATENA. 2015;133(0):137-44.

22. Gong G, Mattevada S, O'Bryant SE. Comparison of the accuracy of kriging and IDW interpolations in estimating groundwater arsenic concentrations in Texas. Environ Res 2014;130(0):59-69.

23. Tadić JM, Ilić V, Biraud S. Examination of geostatistical and machine-learning techniques as interpolators in anisotropic atmospheric environments. Atmospheric Environ 2015;111(0):28-38.

24. Akhavan R, Karami Khorramabadi M, Soosani J. Application of Kriging and IDW methods in mapping of crown cover and density of coppice oak forests (case study: Kakareza region, Khorramabad). Iran J Forest 2012; 3(4): 305-16 [In Persian].

25. Jamshidi A, Karimzadeh Shirazi K, Raygan Shirazi A . Particulate Air Pollution Concentration in the City of Gachsaran, 2005-2006. Armaghane danesh. 2007;12(2):89-97 [In Persian].

26. Nourpoor AR, Feiz MA. Determine the spatial and temporal variations pollutants sulfur dioxide, nitrogen dioxide and suspended particles using GIS techniques in Tehran. J Environ Stud 2014; 40(3) 723-38 [In Persian].

27. Berman JD, Breysse 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.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.3.2.143]

Assessment of Spatial Analysis Methods in Mapping of Air Pollution in Mashhad

Mohammad Miri[1], Mohammad Taghi Ghaneian[2], Abdolmajid Gholizadeh[1*], Mohsen Yazdani Avval[3], Ali Nikoonahad[1]

1. Department of Environmental Health Engineering, Shahid Sadoughi Yazd University of Medical Sciences, Yazd, Iran

2. Department of Environmental Health Engineering, Shahid Sadoughi Yazd University of Medical Sciences, Yazd, Iran

3. Department of Environmental Health Engineering, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran

E-mail: gholizadeh_eng@yahoo.com

Received: 7 Nov 2015 ; Accepted: 22 Feb 2016

ABSTRACT

Background: This study aimed to compare and evaluate the spatial and statistical models to predict PM2.5 concentrations at ground level and at the macro scale in Mashhad.

Methods: To investigate the status of air pollution in the metropolis of Mashhad air, three interpolating models including Ordinary Kriging (OK), Universal Kriging (UK) and inverse distance weighting (IDW) were used. Root Mean Square Error (RMSE) and correlation coefficient (R2) were employed to compare three models and choose the best one. As well as to select the most optimal conditions for the implementation of both OK and UK, used from Standardized RMSE.

Results: The results showed that the highest monthly average of PM2.5 was belonged to September and "Sakhteman" station (95.1 μg/m3). Also, the lowest monthly average pollution had happened in "Torogh" station, in November (15.5 μg/m3). According to the data, the OK had the lowest RMSE (10.601) compared to the UK and IDW. Lower RMSE represents lower error between the predicted and measured values. So, OK model selected as better one in interpolation. Also, Judging by correlation coefficient (R2), the highest correlation belonged to OK compared to other two models. UK model showed a greater standard error of predicts than OK. The greatest standard errors of prediction were related to areas that have more distance from air pollution monitoring stations.

Conclusion*:* it should be noted that the production and use of geo-referenced maps could quickly provide spatial analyses, and because it can be combined with GIS, the user is able to investigate the influence the various concentrations of contaminants.

Keywords: Particles, Mashhad, Modeling, GIS

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.3.2.143]