

مدل سازی پراکنش ذرات معلق هوای شهر اصفهان با بهره گیری از روش های

Cokriging و IDW

سحر حیدری اصل^{*۱}

saharheydari931@gmail.com

حسین مرادی^۲

محسن سلیمانی^۳

تاریخ پذیرش: ۹۹/۵/۱۴

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۰/۲۳

چکیده

زمینه و هدف: شهر اصفهان به دلیل شرایط جغرافیایی خاص، توپوگرافی و ازدیاد مواد آلاینده از آلوده ترین شهرهای ایران محسوب می شود. صنایع، ترافیک، آلاینده های خانگی و تجاری از منابع عمده ی آلاینده ی هوای شهر اصفهان به شمار می رود. از روش های رایج برای پیش بینی و برآورد آلودگی هوا روش های درون یابی است. هدف از انجام این مطالعه، بررسی الگوهای پراکنش و مدل سازی ذرات معلق PM_{10} و $PM_{2.5}$ هوای شهر اصفهان با استفاده از روش های درون یابی IDW و Cokriging است.

روش بررسی: در راستای این پژوهش، غلظت آلاینده های PM_{10} و $PM_{2.5}$ در فصول زمستان و تابستان سال های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ در ۱۳۷ نقطه از محدوده ی شهری به صورت مسیری خطی و به وسیله ی دستگاه پرتابل اندازه گیری ذرات معلق آلودگی هوا (مدل CEM) اندازه گیری شد. نقشه های پهنه بندی برای هر آلاینده در دو فصل سرد و گرم در محیط Arc GIS 10.6 تهیه شد. به منظور فرآیند صحت سنجی ۳۰٪ از داده ها به صورت تصادفی کنار گذاشته شد. هم چنین مقادیر RMSE در هر دو روش درون یابی مذکور مورد مقایسه قرار گرفت.

یافته ها: نتایج به دست آمده در مورد توزیع آلاینده ها با منابع انتشار مهم از جمله مناطق با ترافیک بالا و بعضی از مناطق نزدیک به مسیر رودخانه ی زاینده رود مطابقت داشت. روش Cokriging از نظر مقادیر RMSE کم تر از روش IDW عملکرد بهتری داشت اگرچه در فرآیند صحت سنجی، بین برازش روش های IDW و Cokriging اختلاف چندانی مشاهده نشد.

بحث و نتیجه گیری: در نقشه های پهنه بندی، نقاط داغ آلودگی (حداکثر غلظت) در مناطق مرکزی محدوده مطالعاتی مشاهده شد که سهم عمده ای از آن به تردد بسیار وسایل نقلیه در سطح شهر اختصاص دارد.

واژه های کلیدی: درون یابی، پهنه بندی، ذرات معلق، IDW، Cokriging.

۱- کارشناسی ارشد علوم و مهندسی محیط زیست، گروه محیط زیست، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. * (مسئول مکاتبات)

۲- استادیار علوم و مهندسی محیط زیست، گروه محیط زیست، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

۳- دانشیار علوم و مهندسی محیط زیست، گروه محیط زیست، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

Modeling of air particulate matter in the city of Isfahan with the use of IDW and Cokriging methods

Sahar Heidari Asl^{1*}

saharheydari931@gmail.com

Hossein Moradi²

Mohsen Soleimani³

Admission Date: August 4, 2020

Date Received: January 13, 2020

Abstract

Background and Objective: Isfahan is one of the most contaminated cities in Iran due to its special geographical conditions, topography and proliferation of pollutants. Industries, traffic, domestic and commercial pollutants are considered the main sources of air pollutants in Isfahan. The methods used to predict and estimate air pollution are methods interpolation. The aim of this study is to investigate the scattering patterns and modeling of particular matter $PM_{2.5}$ and PM_{10} in the city of Isfahan using interpolation IDW and Cokriging methods.

Material and Methodology: in this study, the concentration of $PM_{2.5}$ and PM_{10} pollutants in winter and summer of 2018 were measured at 137 points of urban area and in linear path by portable device measurement of air pollution (CEM model). Zoning maps for each pollutant in the cold and hot season were in Arc GIS 10.6 environment. In order to verify the accuracy of 30% of the data, the RMSE in both methods was compared.

Findings: the result of pollutants distribution with important emission sources, such as high traffic areas and close areas were consistent with the zayanderood river route. Cokriging method has better performance than IDW method in values of RMSE, although in the validation process, there was little difference between fitting the IDW and Cokriging methods.

Discussion and Conclusion: in the zoning maps, hot spots of pollution (maximum concentration) were observed in central regions of the study area, which is a major contribution to most of the vehicles around the city.

Keywords: Interpolation, Zoning, Particulate matters, IDW, Cokriging.

1- Master of Environmental Science and Engineering, Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. **(Corresponding Author)*

2- Assistant Professor of Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

3- Associate Professor of Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

مقدمه

توسعه شهرها، افزایش بی‌رویه جمعیت، گسترش فعالیت‌های صنعتی و مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی موجب افزایش آلودگی هوا در کلان‌شهرها شده است که در این میان، نقش توسعه شهرنشینی و تأثیر تغییرات زمانی و مکانی در ایجاد آلودگی هوا اهمیت زیادی داشته است (۱). طبق تعاریف، آلودگی هوا عبارت است از حضور مواد نامطلوب در هوا در مدت‌زمان و غلظتی که بتواند اثرات مضر را به وجود آورد (۲). در بین آلاینده‌های اتمسفری، ذرات معلق به علت آثار زیان‌بار قرارگیری طولانی‌مدت در معرض آن‌ها و به مخاطره افتادن سلامت افراد جامعه هم‌چنین اثبات رابطه مستقیم بین افزایش نرخ مرگ‌ومیر و قرار گرفتن طولانی‌مدت در معرض این آلاینده‌ها (۳) بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. به‌طور کلی، ذرات معلق علاوه بر ایجاد مشکلات سلامتی برای انسان، بر مقدار تابش نور خورشید بر زمین، تغییر سیستم زمین و جو، تغییر الگوهای جوی، تغییر دمای سطح زمین، بارش و کاهش دید نیز تأثیر می‌گذارد (۴). از آنجایی که اندازه‌گیری کیفیت هوا در تمام مکان‌های محدوده مطالعاتی امری دشوار است. بنابراین، اغلب برای پیش‌بینی داده‌های کل منطقه از روش درون‌یابی^۱ استفاده می‌شود. هدف درون‌یابی پیش‌بینی مقادیر مکانی اندازه‌گیری‌نشده بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در کل محدوده مطالعاتی است که به‌صورت تصاویر یا نقشه ارائه می‌شود. این روش از موفق‌ترین ابزارهای مدل‌سازی داده‌های مکانی در محیط‌زیست و مدیریت کیفی هوا است (۵). به‌طور عمده، این روش‌ها در مطالعات بررسی بهداشت انسانی و برآورد کیفیت آلودگی هوا کاربرد زیادی دارد (۶و۷). یکی از نمونه‌های درون‌یابی روش IDW^۲ است که در آن فرض بر این است که نقاط نمونه‌برداری از مکان تأثیر می‌پذیرند و نقاط اثر وزنی دارند و در نقشه‌های رستری پیکسل‌های مجاور به نقاط موردنظر، اثر بیش‌تری نسبت به پیکسل‌های دورتر دارند (۸). به‌طور کلی در این روش مقادیر آلاینده بر اساس مقادیر نزدیک به نقطه موردنظر و بر اساس معکوس فاصله‌ی وزنی برآورد

می‌شود و با افزایش فاصله، میزان وزن به‌کاررفته کاهش می‌یابد (۹).

روش Kriging روشی دیگر از درون‌یابی است که در آن فرض بر این است که فاصله و جهت بین نقاط نمونه‌برداری در محدوده‌های ایستگاهی، بر همبستگی مکانی تأثیر می‌گذارد (۱۰) و معمولاً هنگامی استفاده می‌شود که بین داده‌ها همبستگی مکانی وجود داشته باشد (۱۱). شباهت این دو روش در این است که می‌توانند سطوح پیوسته‌ای از فرمت رستری نقاط را به‌صورت مجزا ارائه دهند (۱۲). در سال‌های اخیر مطالعات متعددی در زمینه‌ی پهنه‌بندی آلودگی هوا انجام شده است. به‌عنوان مثال در شهر اصفهان به‌منظور پهنه‌بندی آلودگی هوا با استفاده از روش درون‌یابی IDW در محیط GIS، نقشه‌های پهنه‌بندی آلودگی هوا در بازه‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه تهیه شد که نتایج نشان داد همبستگی خطی معنی‌داری بین آلاینده‌ها وجود دارد (۱۳). در شهر مشهد در پهنه‌بندی ماهانه میزان آلودگی هوا و نحوه‌ی ارتباط آن با عوامل اقلیمی، با استفاده از شاخص استاندارد آلودگی هوا^۳ و روش IDW میزان آلودگی شبیه‌سازی شد و در این راستا پارامترهای اقلیمی مانند سرعت باد، جهت باد و میزان بارش باران نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ارتباط بین عوامل اقلیمی و شاخص استاندارد آلودگی هوا از روش همبستگی پیرسون تا حدی مشهود بود (۹). شهر اصفهان به دلیل شرایط جغرافیایی خاص، حالتی گودال مانند و ازدیاد مواد آلاینده در هوای سطحی و نیز با دارا بودن سهم تولید ۷۰ درصد از مراکز فولاد کشور، ۲۵ درصد از صنعت نساجی و بزرگ‌ترین صنایع پتروشیمی و نیروگاهی، یکی از صنعتی‌ترین شهرهای ایران به شمار می‌رود (۱۴). گردوغبار مناطق بیابانی شرق اصفهان و عوامل متعددی از قبیل ترافیک، اقدامات عمرانی، فعالیت‌های انسانی و مراکز صنعتی موجود در مناطق مختلف شهر منشأ آلودگی‌های ناشی از ذرات معلق است (۱۵). هدف اصلی این مطالعه پهنه‌بندی پراکنش ذرات معلق شهر

1- Interpolation

2- Inverse distance weighted = IDW

3- PSA

شمالی و جنوبی کشور، وجود صنایع سنگین و معادن پیرامون شهر با معضل آلودگی هوا روبروست (۱۶).

روش کار

الف- اندازه‌گیری غلظت ذرات معلق

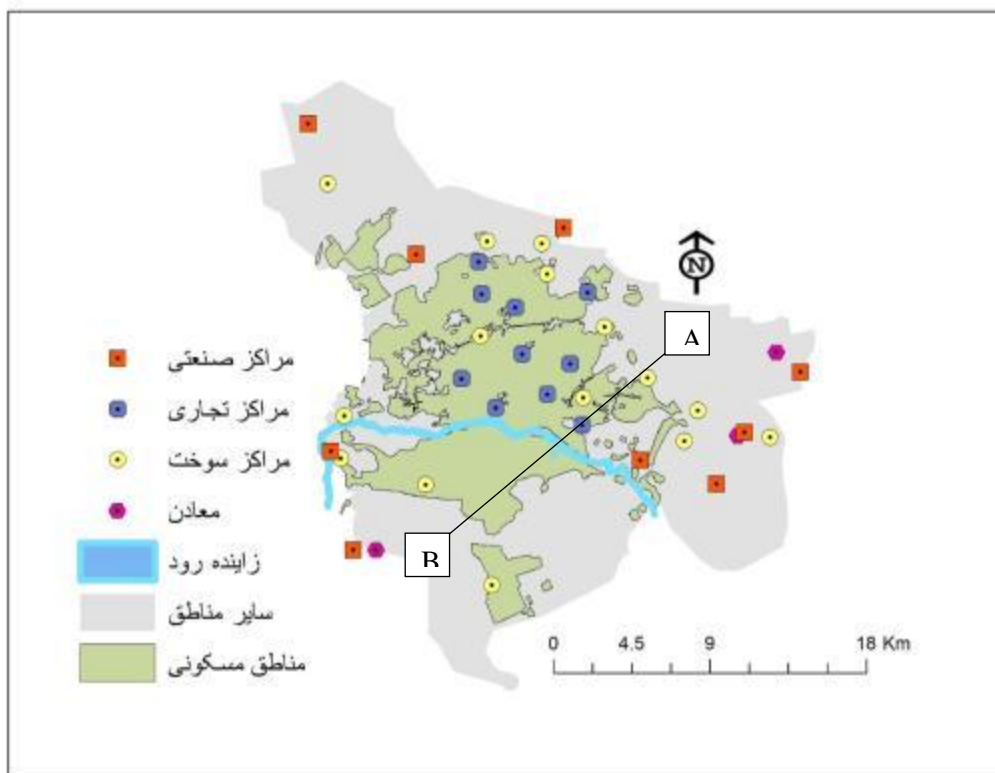
اندازه‌گیری‌ها در دو فصل زمستان (ماه‌های بهمن و اسفند سال ۱۳۹۶) و تابستان (ماه‌های تیر و مرداد سال ۱۳۹۷) و در ۱۳۷ نقطه از محدوده‌ی مطالعاتی با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری ذرات معلق پرتابل مدل CEM برای آلاینده‌های PM_{10} و $PM_{2.5}$ انجام شد. در فرآیند اندازه‌گیری، به‌منظور پوشش دهی حداکثری کل محدوده‌ی مطالعاتی و نیز افزایش دقت محاسبات، در مسیری خطی (ترانسکتی) و از پیش تعیین‌شده با در نظر گرفتن یک مکان مشخص به‌عنوان مبدأ و مکانی دیگر به‌عنوان مقصد در بازه‌های زمانی متناوب ۱۰ دقیقه‌ای در مکان‌های از پیش تعیین‌شده، غلظت ذرات معلق اندازه‌گیری شد. (A-B در شکل ۱ از نمونه مسیره‌های خطی مذکور است). در طول هر مسیر ۱۰ نقطه از محدوده مطالعاتی اندازه‌گیری شد.

اصفهان با استفاده از روش‌های درون‌یابی IDW و Cokriging و نیز مقایسه نتایج حاصل از این روش‌ها از نظر فرآیندهای ریاضی و خروجی است.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه ما در این پژوهش، شهر اصفهان است. این کلان‌شهر با مساحتی برابر ۴۸۲ کیلومترمربع (۰/۰۳ از مساحت کشور) در منطقه‌ای نیمه کوهپایه‌ای و در مجاورت زاینده‌رود در محدوده‌ی $39^{\circ} 30'$ طول شرقی و $32^{\circ} 38'$ عرض شمالی واقع شده است (۱۶) و دارای متوسط بارش سالانه حدود ۱۲۰ میلی‌متر است. در فصل‌های بهار و زمستان بیش‌ترین میزان گردوغبار در مناطق مرکزی و شرق مشاهده می‌شود که با پیشروی به سمت غرب از شدت آن کاهش می‌یابد (۱۷). به دلیل افزایش جمعیت، ازدیاد گردشگری، پایداری هوا در نیمی از روزهای سال، خشک‌سالی، محلی برای مرتبط کردن مناطق



شکل ۱- محدوده‌ی مورد مطالعه در شهر اصفهان

Figure 1. Study area in Isfahan

ب- نقشه پهنه‌بندی

با استفاده از ابزار Geostatistical wizard در Arc GIS 10.6 و در نظر گرفتن پارامترهای غلظت ذرات معلق، تراکم وسایل نقلیه و کاربری‌های اراضی و نیز با اعمال روش‌های Cokriging از نوع Probability و IDW در دو فصل سرد و گرم به‌طور مجزا برای هر یک از آلاینده‌ها، فرآیند درون‌یابی روی نقاط اندازه‌گیری‌شده به‌منظور ساخت نقشه‌های پهنه‌بندی اعمال شد. در روش IDW، پیکسل‌های مجاور به مناطق آلودگی نسبت به پیکسل‌های دورتر با توجه به تأثیر موقعیت مکانی بر نقاط آلاینده و اثرات وزنی آن‌ها، اثر بیش‌تری دارند. بنابراین، با افزایش فاصله از نقاط آلاینده میزان آلودگی کاهش می‌یابد (۱۸ و ۱۹). در این روش با استفاده از یک تابع افت فاصله، میانگین وزنی محاسبه می‌شود (۱۲). به‌طور کلی فرمول درون‌یابی به‌صورت زیر است:

$$W(x,y) = \sum_{i=1}^n \gamma_i w_i$$

که در آن $W(x,y)$ مقادیر برآورد شده در موقعیت $(x$ و $y)$ ، n تعداد نقاط مشخص نزدیک، Y_i وزن اختصاص‌یافته به هر نقطه مشخص است (۲۰). در این روش بر اساس مقادیر مجاور نقاط اندازه‌گیری نشده به هر یک از نقاط اندازه‌گیری مقادیر وزنی داده می‌شود که هرچه نقاط نزدیک‌تر باشند وزن نقاط افزایش می‌یابد (۲۱). برخلاف IDW که بر مبنای میانگین‌گیری ریاضی و روشی جبری است، Cokriging از روش‌های زمین‌آمار است و هدف اصلی آن بررسی اوزان آماری مشاهدات و نمونه‌هاست به‌گونه‌ای که علاوه بر ناریب بودن تخمین، واریانس تخمین نیز حداقل شود. به‌طور کلی، اغلب تخمین‌گرها ماهیتی خطی دارند و از نقطه‌نظر مبانی نظری ناریب می‌باشند. در روش Cokriging یا درون‌یابی بهینه (۲۲) به‌منظور پیش‌بینی مقادیر مکان‌های اندازه‌گیری نشده (نامشخص) از مقادیر مجاور به نقاط آلاینده استفاده می‌شود (۱۸). در این روش، فرض بر این است که فاصله و جهت بین نقاط آلاینده در محدوده نقاط اندازه‌گیری بر همبستگی مکانی تأثیر دارد. به‌طور کلی، این روش، هنگامی که همبستگی فاصله‌ها قابل‌تشخیص است، کارایی بهتری را ارائه می‌دهد (۱۰) و وزن مطابق با روش

حداقل مربعات از نیمه‌واریوگرام (واریوگرام) تعیین می‌شود (۲۳). به‌طور معمول، وزن‌های به‌دست‌آمده بسته به همبستگی مکانی داده‌های اندازه‌گیری‌شده تغییر می‌کند (۲۴). در این پژوهش از روش Cokriging که شکل تعمیم‌یافته‌ی روش kriging است، استفاده شد. به‌طور کلی، روش Cokriging از تجزیه‌ی منحنی‌های kriging در ابعاد نامتناهی بر اساس ضرایب ساخته می‌شود (۲۵).

پ- آنالیزهای آماری

به‌منظور بررسی نرمالیت مجموعه‌ی داده‌های غلظت ذرات معلق در سطح اطمینان ۹۵٪ با استفاده از آزمون کلموگراف-اسمیرنوف مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به کاربرد همبستگی در تعیین ارتباط و نمایش میزان وابستگی متغیرها (۲۶)، ارتباط ذرات معلق در دو فصل سرد و گرم با استفاده از آزمون همبستگی بررسی شد. از آنجایی‌که در روش‌های درون‌یابی امکان پیش‌بینی غلظت‌های آلاینده وجود دارد (۱۰)، نتایج بهینه برای هر دو آلاینده از نظر RMSE مورد بررسی قرار گرفت. هم‌چنین نرمالیت سایر پارامترهای مورد استفاده در پهنه‌بندی از جمله داده‌های ترافیک در سطح اطمینان ۹۵٪ مورد بررسی قرار گرفت.

ت- صحت‌سنجی

در گام اول به‌منظور فرآیند ارزیابی و صحت‌سنجی هر یک از مدل‌ها، به‌صورت تصادفی ۳۰ درصد از مجموعه نقاط اندازه‌گیری‌شده انتخاب شد. پس از ساخت نقشه‌های پهنه‌بندی نقاط انتخاب‌شده در گام اول، با نقشه‌های درون‌یابی روی هم‌گذاری شد و ارزش پیکسل‌های نقشه در نقاط موردنظر استخراج شد. سپس، ارزش‌های مقادیر پیش‌بینی‌شده با ارزش مقادیر اندازه‌گیری‌شده در کل محدوده‌ی مطالعاتی مورد مقایسه قرار گرفت. (اطلاعات تکمیلی در شکل‌های ۶ و ۷).

نتایج و بحث

الف- نقشه‌های پهنه‌بندی

در نقشه‌های ساخته‌شده در فصل سرد، نقاط داغ^۱ آلودگی در مناطقی از جنوب و مرکز شهر مشاهده شد. این روند در فصل گرم اغلب در محدوده‌های مرکزی شهر تمرکز بیشتری داشت. به‌طور کلی، در سال‌های اخیر اصطلاح نقاط داغ، در مطالعات اپیدمیولوژیک آلودگی هوا مرسوم شده است. این اصطلاح، پیش‌تر برای بیان مفاهیم تنوع زیستی به کار می‌رفت. به‌طور معمول، در شهرهای بزرگ، آلودگی‌های بیشینه‌ای که ناشی از منابعی مانند مراکز صنعتی، ترافیک سنگین و سوخت‌های فسیلی است را به‌عنوان نقاط داغ آلودگی مطرح می‌کنند یا به‌عبارت‌دیگر، مناطق محلی با غلظت زیاد یک آلاینده نسبت به سایر مناطق را نقاط داغ آلودگی می‌نامند (۲۷). به نظر می‌رسد در این پژوهش، نقاط داغ (نقاط دارای مقادیر حداکثر غلظت ذرات معلق) مناطق مرکزی عمدتاً به علت وجود تردد زیاد وسایل نقلیه و بزرگراه‌های ارتباط‌دهنده‌ی شمال و جنوب شهر است. هم‌چنین محدودیت آبرسانی به بستر رودخانه‌ی زاینده‌رود و خشک بودن آن در بیش‌تر مواقع سال و در نتیجه سست بودن لایه‌های سطحی بستر آن، از دیگر عوامل تشدید آلودگی‌های ناشی از ذرات معلق هوا به‌ویژه PM₁₀ در مناطق هم‌جوار رودخانه‌ی زاینده‌رود با شروع وزش باد است. وجود مقادیر حداقل آلودگی مناطق مرکزی به علت تردد کم‌تر وسایل نقلیه به‌ویژه در مناطق تاریخی شهر از جمله میدان نقش‌جهان به‌منظور حفظ بافت تاریخی شهر قابل توجه است. وجود نقاط داغ آلودگی مشاهده شده در فصل گرم در برخی از مناطق مرکزی به علت ترافیک‌های سنگین بیش‌تر مشهود است. به‌طور کلی، تمرکز نقاط داغ آلودگی در مناطق مجاور رودخانه‌ی زاینده‌رود در نقشه‌های ساخته‌شده مشهود است، هم‌چنین در فصل گرم مقادیر عمده‌ای از ذرات معلق از مناطق حاشیه‌ی شهر به‌ویژه منطقه‌ی سگری به علت جهت وزش باد غالب (از شرق به غرب) به همراه وزش باد به داخل شهر آورده می‌شود که می‌تواند از عوامل مؤثر در روند صعودی

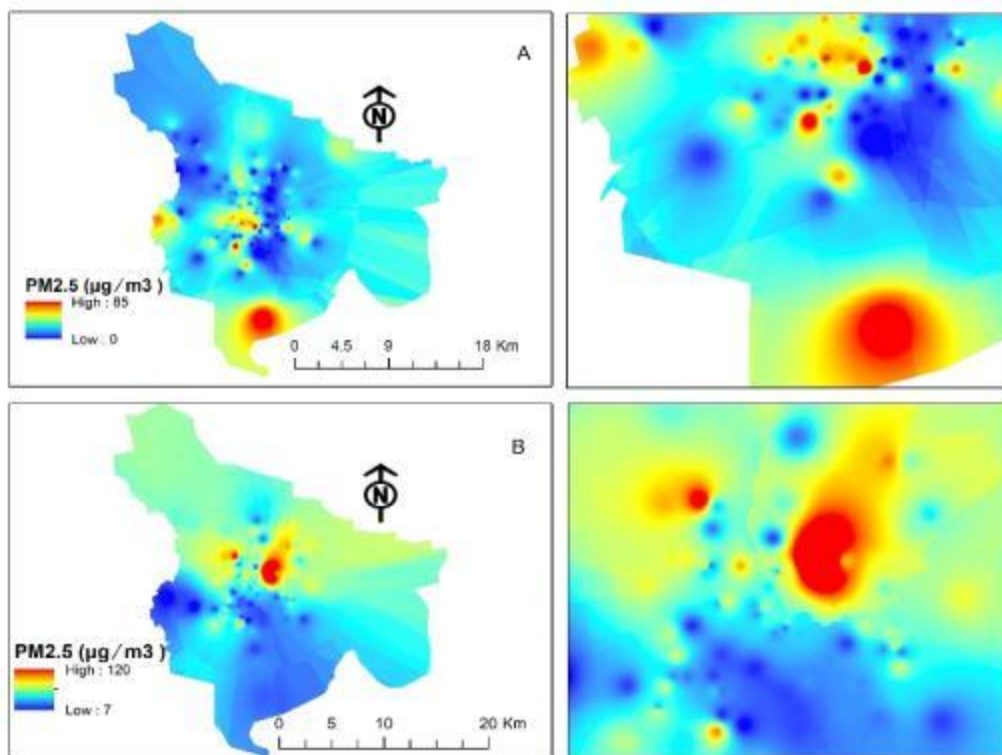
آلودگی هوای مناطق متمایل به شرق باشد. به نظر می‌رسد هر دو روش IDW و Cokriging در نمایش نقاط داغ آلودگی عملکرد خوبی را ارائه داده‌اند. قابل‌ذکر است که به عنوان مثال، در روش Kriging پس از تعیین هر یک از پارامترهایی که نیاز است نوع خاصی (به‌عنوان مثال universal) باشد، می‌توان آن را برای پهنه‌بندی سایر شهرها امتحان کرد و عملکرد این روش را مورد بررسی قرار داد سپس آن را با پارامترهای اولیه مقایسه نمود. در واقع این روش قابلیت استفاده در هر منطقه‌ای را دارد.

ب- آنالیزهای آماری

در بررسی نرمالیت پارامترهای مورد استفاده از جمله داده‌های ترافیک در سطح اطمینان ۹۵٪ از توزیع نرمال تبعیت کردند. نتایج آزمون کلموگراف-اسمیرنوف نیز نشان داد که بین توزیع داده‌های غلظت در هر دو فصل با توزیع نرمال اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. مقادیر همبستگی ذرات معلق با آزمون همبستگی، در دو فصل سرد و گرم به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۸۴ بود که بیانگر همبستگی مناسب بین مقادیر ذرات معلق PM_{2.5} و PM₁₀ در هر دو فصل است. از آن‌جایی که مقادیر RMSE بیانگر دقت روش درون‌یابی مورد استفاده می‌باشند، هرچه این مقادیر به صفر نزدیک‌تر باشند برآوردهای به‌دست‌آمده به مقادیر واقعی نزدیک‌ترند و یا به عبارتی دقت مدل‌سازی بیش‌تر است. با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده RMSE در جدول ۱ مشاهده می‌شود که روش Cokriging به علت خطای درون‌یابی کم‌تر نسبت به روش IDW کارآیی بهتری در نمایش مقادیر حداکثر غلظت آلودگی را دارا می‌باشد. اگرچه هر دو روش درون‌یابی Cokriging و IDW قابلیت پیش‌بینی پراکنش ذرات معلق در محدوده‌ی مورد مطالعه را دارا بودند اما از آن‌جایی که مقادیر کم‌تر RMSE بیانگر عملکرد بهتر آن روش درون‌یابی است (۱۰)، روش Cokriging برای پهنه‌بندی این مجموعه داده روش مناسب‌تری است. هم‌چنین، با افزایش فاصله از هر نقطه اندازه‌گیری، اثر وزنی آن کم‌تر می‌شد. به‌طور کلی، نقاط اندازه‌گیری مجاور نقاط نامعلوم نسبت به نقاط دورتر از آن، بر فرآیند پیش‌بینی تأثیر بیش‌تری داشتند و با توجه به این‌که، شرط کاربردی روش Cokriging وجود

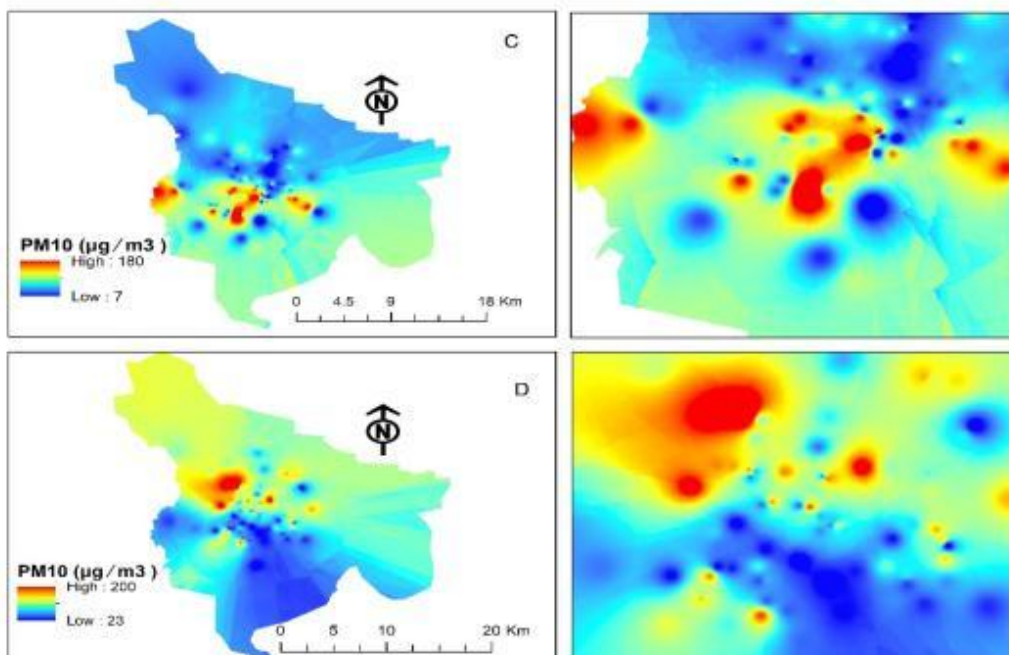
کم‌تر، عملکرد ضعیف‌تری را نشان می‌دهد که با افزایش تعداد نقاط این روند بهبود چشمگیری می‌یابد (۲۹) بنابراین، تعداد نقاط خاصی به‌منظور عملکرد بهینه‌ی مدل مشخص نیست. در روش‌های زمین آماری مانند *Cokriging* به طور معمول، تعداد نقاط زیادی در فرآیند درون‌یابی در نظر گرفته می‌شود، حال آن که روش *IDW* با تعداد نقاط کم‌تر نیز قابل قبول می‌باشد و از آن جایی که هرچه محدوده‌ی مطالعاتی وسیع‌تر و ناهمگن‌تر باشد، به تعداد نقاط بیش‌تری نیازمند است بنابراین، مدل ساخته شده از کلان‌شهر اصفهان که شرایط توپوگرافی خاصی (حالت گودال مانند) را دارا می‌باشد، با تعداد نقاط اندازه‌گیری بیش‌تر عملکرد بهتری را ارائه داد.

ضریب همبستگی نسبتاً بالا (بیش‌تر از ۰/۵) است، در هر دو فصل ضریب همبستگی غلظت ذرات معلق و ترافیک بیش‌تر از ۰/۵ به دست آمد. به منظور بررسی حداقل تعداد نقاط اندازه‌گیری که بتواند تحلیل‌های این پژوهش را توجیه کند، با تعداد کم‌تری از نقاط اندازه‌گیری، فرآیند مدل‌سازی انجام شد که تفاوت معنی‌داری بین دو نقشه (نقشه ساخته شده با ۱۳۷ نقطه و نقشه ساخته شده با تعداد نقاط اندازه‌گیری کم‌تر) مشاهده شد بنابراین، می‌توان به این امر اشاره داشت که از آن جایی که کاهش تعداد نقاط اندازه‌گیری موجب افزایش مقادیر *RMSE* و اریبی در فرآیند صحت‌سنجی می‌شود و نیز تحت تاثیر بودن هر نقطه‌ی اندازه‌گیری از نقاط مجاور با مقادیر بالاتر غلظت (۲۸) مجموعه‌ی صحت‌سنجی داده‌ها، با تعداد نقاط



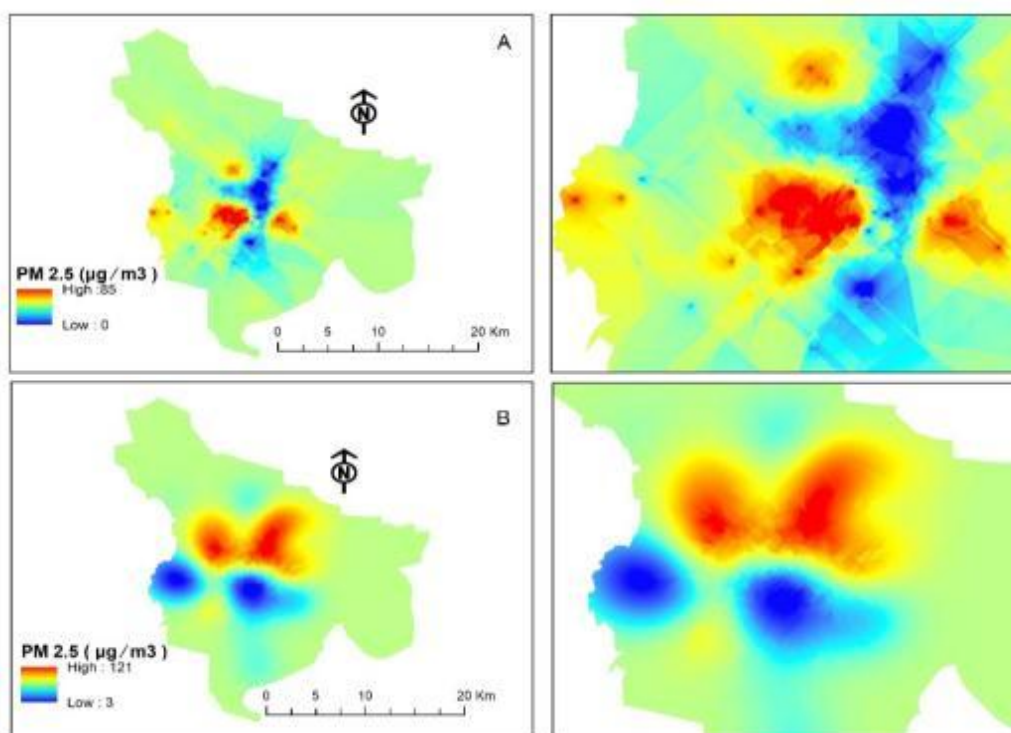
شکل ۲- نقشه‌های درون‌یابی به روش *IDW*: A: پهنه‌بندی $PM_{2.5}$ در فصل سرد، B: پهنه‌بندی $PM_{2.5}$ در فصل گرم

Figure 2. IDW Maps; A: $PM_{2.5}$ zoning in cold season, B: $PM_{2.5}$ zoning in warm season



شکل ۳- نقشه‌های درون‌یابی به روش IDW: C: پهنه‌بندی PM₁₀ در فصل سرد، D: پهنه‌بندی PM₁₀ در فصل گرم

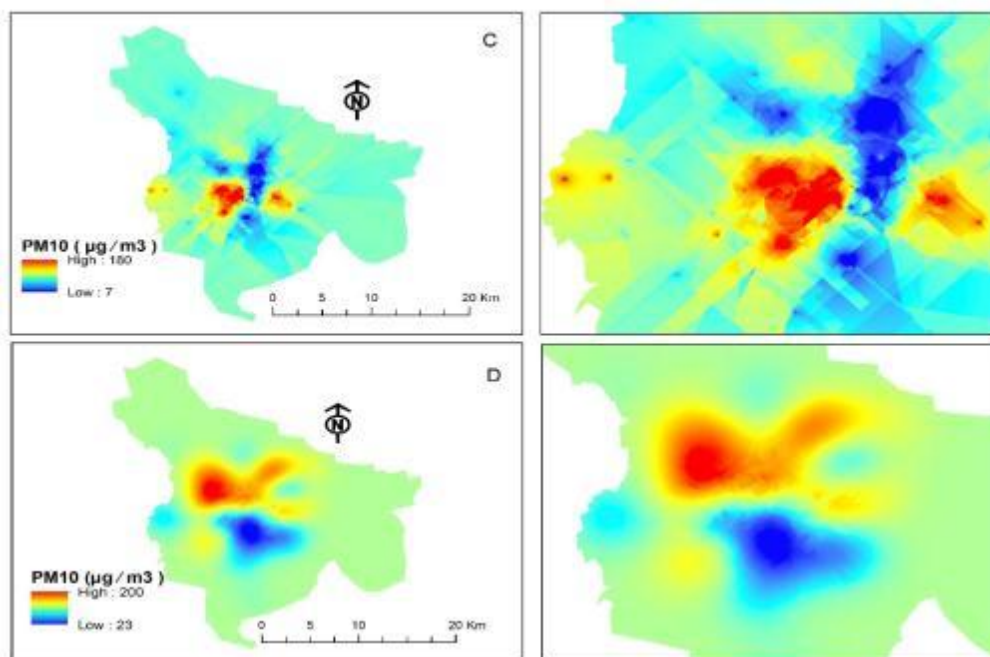
Figure 3. IDW Maps; C: PM₁₀ zoning in cold season, D: PM₁₀ zoning in warm season



شکل ۴- نقشه‌های درون‌یابی به روش Cokriging: A: پهنه‌بندی PM_{2.5} در فصل سرد، B: پهنه‌بندی PM_{2.5} در فصل

گرم

Figure 4. Cokriging maps; A: PM_{2.5} zoning in the cold season, B: PM_{2.5} zoning in the warm season



شکل ۵- نقشه‌های درون‌یابی به روش Cokriging: C: پهنه‌بندی PM₁₀ در فصل سرد، D: پهنه‌بندی PM₁₀ در فصل گرم
Figure 5. Cokriging maps; C: PM₁₀ zoning in the cold season, D: PM₁₀ zoning in the hot season

جدول ۱- مقادیر RMSE هر یک از آلاینده‌ها در دو فصل سرد و گرم

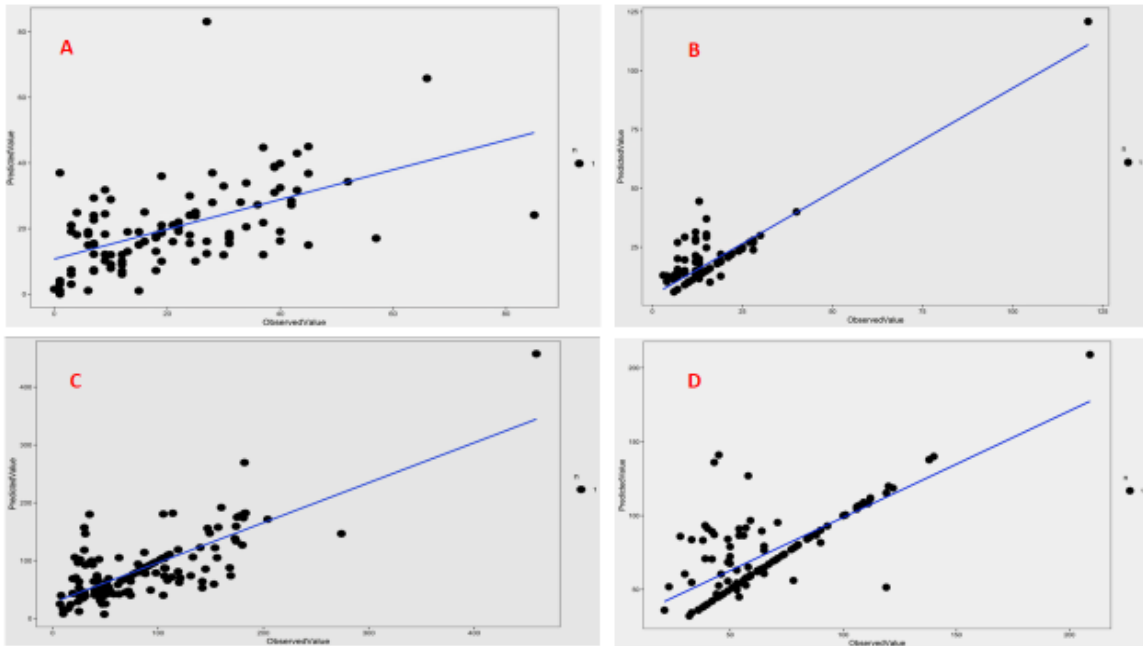
Table 1. Root mean square error values of each contaminant in both hot and cold seasons

IDW		Cokriging		روش فصل
PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	
۱۴/۰۲	۱۷/۴	۰/۹۸	۰/۴۸	سرد
۹/۵	۱۳/۹	۰/۴۷	۰/۴۷	گرم

پ- صحت‌سنجی

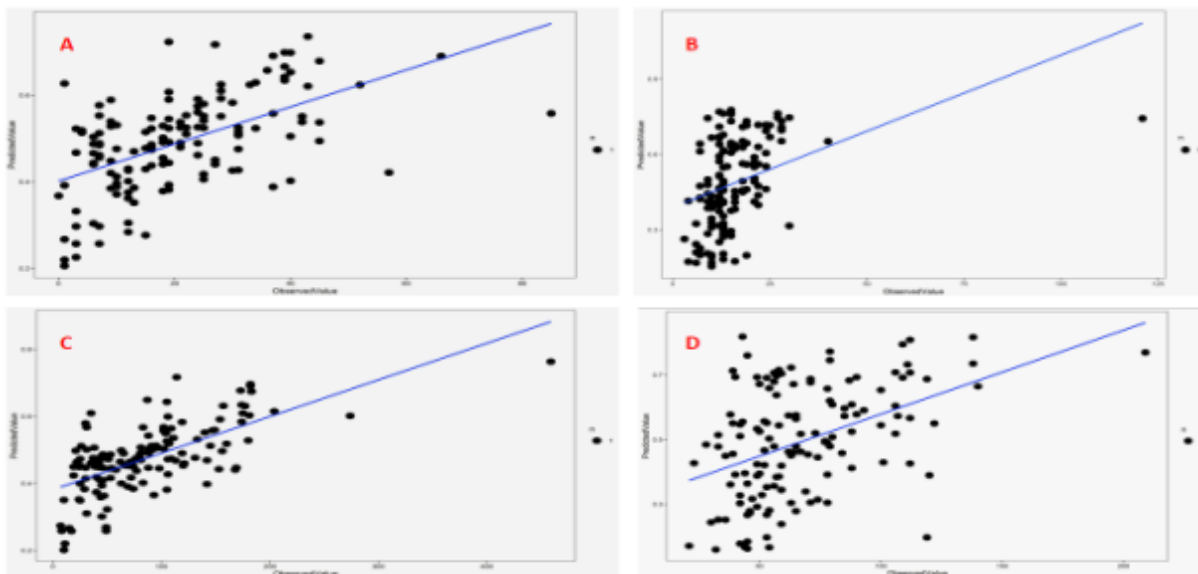
شمار می‌روند. اگرچه بهترین روش برآورد خطی نارایب است، اما پراکنش نقاط اندازه‌گیری در این روش نسبت به مقادیر حقیقی آن، دارای تغییرات کم‌تری است که می‌توان آن را از نقاط ضعف این روش برشمرد (۳۰). لازم به ذکر است که نتایج درون‌یابی ممکن است از همی جهت‌ها با کل نقاط اندازه‌گیری متناسب نباشد و خط رگرسیون از تمام مقادیر نمونه عبور نکند و نیز مقادیر نمونه‌ی اصلی دقیقاً روی سطح درون‌یابی قرار نداشته باشد (۱۲) بنابراین نمی‌توان این امر را دلیلی بر عدم کارایی روش‌های درون‌یابی در پهنه‌بندی آلودگی هوا دانست.

در راستای فرآیند صحت‌سنجی در این پژوهش با وجود این که، روش Cokriging نسبت به روش IDW واریانس برآورد پایین‌تری دارد اما هر دو روش IDW و Cokriging براساس نمودارها در شکل‌های ۶ و ۷ تفاوت زیادی با هم نداشتند و برازش نسبتاً خوبی ارائه دادند. در این نمودارها، محور X ها (افقی) نشان‌دهنده‌ی مقادیر اندازه‌گیری شده و محور Y ها نشان‌دهنده‌ی مقادیر پیش‌بینی شده است. لازم به ذکر است که خطاهای ناشی از روش Cokriging تابعی از مقادیر حقیقی داده‌ها نیست، بلکه ویژگی‌هایی مانند فاصله و پراکنش نقاط اندازه‌گیری از عوامل تأثیرگذار بر مقادیر خطا در این روش به



شکل ۶- صحت سنجی روش IDW؛ A: مقادیر آلایندهی $PM_{2.5}$ در فصل سرد، B: مقادیر آلایندهی $PM_{2.5}$ در فصل گرم، C: مقادیر آلایندهی PM_{10} در فصل سرد، D: مقادیر آلایندهی PM_{10} در فصل گرم

Figure 6. IDW Method Validation: A: $PM_{2.5}$ pollutant values in cold season, B: $PM_{2.5}$ pollutant values in warm season, C: PM_{10} pollutant values in cold season, PM_{10} pollutant values in hot season



شکل ۷- صحت سنجی روش Cokriging؛ A: مقادیر آلایندهی $PM_{2.5}$ در فصل سرد، B: مقادیر آلایندهی $PM_{2.5}$ در فصل گرم، C: مقادیر آلایندهی PM_{10} در فصل سرد، D: مقادیر آلایندهی PM_{10} در فصل گرم

Figure 7. Cokriging Method 1: A $PM_{2.5}$ pollutant values in cold season, B: $PM_{2.5}$ pollutant values in warm season, C: PM_{10} pollutant values in cold season, PM_{10} pollutant values in warm season

نتیجه‌گیری

پهنه‌بندی این محدوده‌ی مطالعاتی است اما در عملیات صحت‌سنجی مدل‌ها (مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده) روش IDW نیز عملکرد آن‌چنان متفاوتی با روش Cokriging نداشت، بنابراین می‌توان با درک و شناخت الگوهای پراکنش مکانی آلاینده‌ها در کاهش اثرات منفی منابع آلاینده‌ها اقدام کرد و به‌منظور روش‌های بهینه‌ی مدیریتی این روش‌های درون‌یابی را مورد استفاده قرار داد. به‌منظور بهبود مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود روابط متغیرها به صورت سالانه و در فصل‌های بهار و پاییز نیز بررسی شود.

Reference

1. Jerrett, M., Arain, A., Kanaroglou, P., Beckerman, B., Potoglou, D., Sahuvaroglu, T., Morrison, J., Giovis, C., 2005. A review and evaluation of intraurban air pollution exposure models. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, Vol. 15, pp. 185.
2. Wang, L.K., Pereira, N.C., Hung, Y.T. eds., 2004. *Air pollution control engineering*. Totowa, NJ: Humana press, London, Vol. 1, pp. 501.
3. Akita, Y., Baldasano, J. M., Beelen, R., Cirach, M., De Hoogh, K., Hoek, G., De Nazelle, A., 2014. Large scale air pollution estimation method combining land use regression and chemical transport modeling in a geostatistical framework. *Environmental science & technology*, Vol. 48, pp. 4452-4459.
4. Gupta, P., Christopher, S. A., 2008. An evaluation of Terra-MODIS sampling for monthly and annual particulate matter air quality assessment over the Southeastern United States. *Atmospheric Environment*, Vol. 26, pp. 6465-6471.

پدیده‌ی آلودگی هوا از معضلات زیست‌محیطی است که در دهه‌های اخیر افزایش بی‌رویه‌ای داشته است و اثرات سوء فراوانی بر جوامع انسانی داشته است. با توجه به مشکلات آلودگی هوای کلان‌شهر اصفهان که عمدتاً ناشی از ذرات معلق $PM_{2.5}$ و PM_{10} است، تعیین غلظت و پایش دقیق این آلاینده‌ها امری ضروری است. در این پژوهش نقشه‌های پهنه‌بندی ذرات معلق با رویکرد بررسی الگوهای پراکنش آن‌ها در محدوده‌ی شهر اصفهان تهیه شد. در راستای ساخت نقشه‌های پهنه‌بندی از پارامترهایی مانند فاصله از مراکز صنعتی و ترافیک استفاده شد و به‌منظور پیش‌بینی پراکنش غلظت‌های آلاینده در هر فصل، از روش‌های درون‌یابی IDW و Cokriging در محیط Arc Map 10.7 استفاده شد. به‌منظور صحت‌سنجی ۳۰ درصد از نقاط به‌صورت تصادفی انتخاب شد و پس از قرارگیری نقاط باقی‌مانده روی نقشه، ارزش پیکسل‌های مورد نظر استخراج و با ارزش مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شد که بین داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده، برازش نسبتاً خوبی مشاهده شد. در این پژوهش مناطق مرکزی و پرتردد دارای مقادیر حداکثر آلودگی است که پیش‌تر در مطالعه‌ی Jafari و همکاران در مورد بررسی ذرات معلق PM_{10} شهر اصفهان در سال ۲۰۱۷، منطقه‌ی احمدآباد (از مناطق مرکزی شهر) از مناطق دارای مقادیر حداکثر آلاینده مشاهده شد. مقادیر RMSE روش IDW در این پژوهش با مطالعه‌ی Jha و همکاران در سال ۲۰۱۱ در بندری در هندوستان، مطابقت نداشت که این امر به علت شرایط توپوگرافی و منابع آلاینده متفاوت قابل توجیه است. هم‌چنین، همانند مطالعه‌ی Miri و همکاران در شهر مشهد (۳۱)، در فصل سرد، مقادیر غلظت میانگین به علت دایر بودن مدارس و افزایش ترافیک شهری بیش‌تر از فصل گرم بود. در فصل گرم وزش باد نقش مهمی در پراکنش ذرات معلق به ویژه PM_{10} داشت که در مطالعه‌ی Alimahmodi و همکاران (۳۲) در شهر اهواز در سال ۲۰۱۸ نیز آلودگی‌های ناشی از PM_{10} با جهت باد همبستگی بالایی داشت. با توجه به مقادیر RMSE به‌دست‌آمده، روش Cokriging به علت خطای درون‌یابی کم‌تر روش بهتری برای

- pollution. Understanding the environment, Vol. 59, pp. 135-148.
12. Shi, X., 2010. Selection of bandwidth type and adjustment side in kernel density estimation over inhomogeneous backgrounds. International Journal of Geographical Information Science, Vol. 24, pp. 643-660.
 13. Salehi, B. Isfahan air pollution zoning. MSc in Environmental Pollution, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Iran, 2011; pp. 100. (In Persian)
 14. Garavandi, S., Zalghi, A., Goodarzi, G., Mohammadi, M., Yari, A., Noorzadeh, H.M., 2015. Exposure to particulate matter less than 10 microns and its effect on the incidence of respiratory and cardiovascular diseases in Isfahan. Journal of Health System Research, Vol. 11, pp.730-725. (In Persian)
 15. Noroozi, S., Khademi, H., 2015. Spatial and temporal variations of dust deposition rate in Isfahan city and its relation to some climatic parameters. Journal of Agricultural Science and Technology, Water and Soil Science, Vol. 72, pp.149-161. (In Persian)
 16. Mohammadi, J., Kanaani, M., 2015. Isfahan Metropolitan Strategic Planning in the Framework of Green City Approach with Emphasis on Air Component. Geographical Space Scientific Quarterly, Vol. 58, pp. 149-168. (In Persian)
 17. Sheikhbeiglo, R., Mohammadi, J., 2010. Analysis of Climatic Elements of Wind and Rainfall with Emphasis on Urban Design Case Study of Isfahan City. Journal of Geography
 5. Goodchild, M. F., 1993. The state of GIS for environmental problem-solving. Environmental modeling with GIS, Vol. 2. 8-15.
 6. Borge, R., Narros, A., Artinano, B., Yague, C., Gómez-Moreno, F. J., de la Paz, D., Quaassdorff, C., 2016. Assessment of microscale spatio-temporal variation of air pollution at an urban hotspot in Madrid (Spain) through an extensive field campaign. Atmospheric environment, Vol. 140, pp. 432-445.
 7. Yuan, T. H., Shie, R. H., Chin, Y. Y., Chan, C.C., 2015. Assessment of the levels of urinary 1-hydroxypyrene and air polycyclic aromatic hydrocarbon in PM2.5 for adult exposure to the petrochemical complex emissions. Environmental research, Vol. 136, pp. 219-226.
 8. Shad, R., Ashoori, H., Afshari, N., 2008. Evaluation of optimum methods for predicting pollution concentration in GIS Environment. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 1, pp. 33-49.
 9. Akbari, A., Fakheri, M., Efatpoor, G., Akbari, Z., 2015. Monthly zoning of air pollution and its relationship with climate factors (Case study: Mashhad). Journal of Natural Environment, Vol. 4, pp. 533-547. (In Persian)
 10. Esmailnejad, M., Eskandari, M., Barzman, S., 2015. Evaluation and Zoning of Tabriz Metropolitan Air Pollution. Regional Planning Quarterly, Vol. 19, pp. 173-186. (In Persian)
 11. Hadipoor, M., Poorebrahim, Sh., 2012. Residential areas in urban transportation planning using GIS and mathematical modeling of air

24. De Mesnard, L., 2013. Pollution models and inverse distance weighting: Some critical remarks. *Computers & Geosciences*, Vol. 52, pp. 459-469.
25. Nerini, D., Monestiez, P., & Mante, C., 2010. Cokriging for spatial functional data. *Journal of Multivariate Analysis*, Vol. 101, pp. 409-418.
26. Belkhiri, L., Boudoukha, A., Mouni, L., 2011. A multivariate statistical analysis of groundwater chemistry data. *International Journal of Environmental Research*, Vol. 52, pp. 537-544.
27. Moran, D., Kanemoto, K., 2016. Tracing global supply chains to air pollution hotspots. *Environmental Research Letters*, Vol. 14, pp.11-16.
28. Singh, V., Carnevale, C., Finzi, G., Pisoni, E., & Volta, M., 2011. A cokriging based approach to reconstruct air pollution maps, processing measurement station concentrations and deterministic model simulations. *Environmental Modelling & Software*, Vol. 26, pp. 778-786.
29. Basagana, X., Rivera, M., Aguilera, I., Agis, D., Bouso, L., Elosua, R., Foraster, M., de Nazelle, A., Nieuwenhuijsen, M., Vila, J. and Kunzli, N., 2012. Effect of the number of measurement sites on land use regression models in estimating local air pollution. *Atmospheric environment*, Vol. 54, pp.634-642.
30. Fadavi, G., Bazrafshan, J., Gahraman, N. 2015. Comparison of regional methods of minimum air temperature estimation (case study: Isfahan province). *Meteorological Journal*, Vol. 3, pp.14-24.
- and Environmental Planning, Vol. 3, pp. 61-82. (In Persian)
18. Jha, D. K., Sabesan, M., Das, A., Vinithkumar, N. V., Kirubakaran, R., 2011. Evaluation of Interpolation Technique for Air Quality Parameters in Port Blair, India. *Universal journal of environmental research & technology*, Vol. 1, pp 2-15.
19. Willmott, C. J., Matsuura, K., 1995. Smart interpolation of annually averaged air temperature in the United States. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 34, pp. 2577-2586.
20. Akhavan, R., Khorramabadi, M. K., Soosani, J., 2012. Application of Kriging and IDW methods in mapping of crown cover and density of coppice oak forests (case study: Kakareza region, Khorramabad). *Iranian Journal of Forest*, Vol. 3, pp. 305-316. (In Persian)
21. Jamei, M. Evaluation of introspection methods in regional estimation of reference evaporation and transference and comparison with the available results from satellite images in the central and northern plains of Khuzestan. *MSc in Agricultural Meteorology*, Islamic Azad University. Tehran Science and Research Branch, Iran, 2009; pp. 102. (In Persian)
22. Tolosana-Delgado, R., Egozcue, J. J., Sacher-Arcilla, A., Gomez, J., 2011. Wave height data assimilation using non-stationary kriging. *Computers & geosciences*, Vol. 37, pp. 363-370.
23. Hengl, T., Heuvelink, G. B., Rossiter, D. G., 2007. About regression-kriging: From equations to case studies. *Computers & geosciences*, Vol. 33, pp. 1301-1315.

32. Alimahmodi, M., Moaeiri, M., Joybari, Sh., Rashki, A., 2018. Estimation of air pollution (PM₁₀) using weather data (Case study: Ahvaz city). *Natural Environment, Natural Resources of Iran*, Vol. 3, pp. 385-397.
31. Miri, M., Ghaneian, M., Gholizadeh, A., Yazdani, M., Nikonahad, A., 2015. Analysis and zoning of air pollution in Mashhad using different models of spatial analysis. *Journal of Environmental Health Engineering*, Vol. 3, pp. 143-154.