

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و چهارم، شماره چهار، تیر ماه ۱۴۰۱ (۴۵-۳۱)

بررسی تاثیر ترافیک بر انتشار PM_{2.5} با استفاده از روش رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR) (مطالعه موردی شهر اصفهان)

شراره محمودی^۱

مژگان احمدی ندوشن^{۲*}

m.ahmadi1984@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۴/۱

چکیده

زمینه و هدف: میزان غلظت PM_{2.5} (ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرون) به دلیل مضرات آن بر سلامت انسان، به یک نگرانی عمومی در شهرها مبدل شده است. در این پژوهش، با توجه به اهمیت موضوع آلودگی هوا، اثر شرایط ترافیک شهری بر روی انتشار آلاینده هوای شهری (PM_{2.5}) با استفاده از مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR) و درون‌یابی به روش وزن دهی معکوس فاصله (IDW) با بهره‌گیری از نرم‌افزار ArcGIS 10.5 مورد ارزیابی قرار گرفت.

روش بررسی: داده‌های غلظت PM_{2.5} در سال ۱۳۹۸ از ۹ ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوای شهرداری اصفهان، داده‌های بلوک جمعیتی و میزان تردد خودرو در شهر جمع‌آوری و وارد مدل GWR گردید و تهیه نقشه پهنه بندی غلظت آلاینده (به‌صورت فصلی) به روش IDW انجام گرفت.

یافته‌ها: پس از اجرای رگرسیون وزنی جغرافیایی روی پارامترهای مدل، به منظور ارزیابی اعتبار مدل، مقدار R² محاسبه و به جهت بررسی آزمون خودهمبستگی مکانی از شاخص موران استفاده گردید. نزدیک بودن R² ذرات معلق به عدد ۱ نشان دهنده کارایی بالای مدل است. نتایج شاخص موران نشان داد که مدل GWR مدل خوبی برای بررسی الگوی زمانی مکانی ذرات معلق بوده است.

بحث و نتیجه‌گیری: پس از مقایسه نقشه‌ها و بررسی پارامترهای ضریب تعیین، مشخص گردید که تردد خودرو و جمعیت (متغیرهای مستقل) بر روی افزایش آلاینده PM_{2.5} تأثیر مستقیم دارد. همبستگی بالایی با میزان R²=0.75 بین آلاینده PM_{2.5}، و متغیرهای مستقل، به خصوص در فصل تابستان مشاهده شد.

واژه های کلیدی: ترافیک، اصفهان، PM_{2.5}، رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR)، مدل IDW.

۱- کارشناس ارشد آلودگی محیط زیست، گروه محیط زیست، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.
۲- استادیار گروه محیط زیست، مرکز تحقیقات پسماند و پساب، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران. * (مسئول مکاتبات)

Study the effects of Traffic Conditions on the PM_{2.5} emission Geographically Weighted Regression model (case study: Isfahan city)

Sharareh Mahmoudi¹
Mozhgan Ahmadi Nadoushan^{2*}

m.ahmadi1984@gmail.com

Admission Date: April 6, 2022

Date Received: June 22, 2021

Abstract

Background & Objectives: PM_{2.5} concentration has become a public concern in cities due to its harmful effects on human health. In this study, due to the importance of air pollution, the effect of urban traffic conditions on the emission of urban air pollutants (PM_{2.5}) was studied using geographic weight regression model (GWR) and IDW interpolation method.

Material and Methodology: For this purpose, concentration of PM_{2.5} in 2019 was collected from 9 air pollution monitoring stations of Isfahan Municipality and population data and traffic in the city were collected and entered into the model. Interpolation IDW method was used for preparing seasonal air pollutants dispersion maps. After performing geographical weight regression on the model parameters and in order to evaluate the validity of the model, the RMSE parameter was used, which is obtained from the difference between the actual value of the concentration and the predicted value and indicates the predictive power of the model. Finally, R² values were calculated and Moran's index was used to examine the spatial autocorrelation test.

Findings: After performing geographical weight regression on the model parameters, in order to evaluate the validity of the model, the value of R² was calculated and the Moran index was used to examine the spatial autocorrelation test.

Discussion and Conclusion: According to the amount of R²=0.75 for PM_{2.5}, a direct correlation has been shown between this pollutant and independent variables, especially in the summer. The Moran index results showed that the GWR model was a good model for investigating the spatial temporal pattern of suspended particles.

Key words: Traffic, Isfahan, PM_{2.5}, Geographically weighted regression (GWR), IDW model.

1- Department of environmental sciences, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

2- Assistant Professor, Department of environmental sciences, Waste and Wastewater Research Center, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran. *(Corresponding Author)

مقدمه

ویژگی و موقعیت هر یک از نقاط اندازه‌گیری شده را مشخص نمود (۱۴-۱۲).

در سال‌های اخیر، استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در مباحث گوناگون مرتبط به آلودگی هوا گسترش یافته است. ابزارهای ریاضی و آماری، می‌توانند نقشی کلیدی در از بین بردن چالش‌های زیست‌محیطی شهری ایفا کنند. روش‌های متعددی برای شبیه‌سازی غلظت PM2.5 طی سال‌های اخیر ایجاد شده‌اند که شامل مدل رگرسیون خطی و مدل‌های آماری پیشرفته مانند LME، مدل رگرسیون کاربری اراضی و مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی است (۱۰). روش‌های آمار فضایی یکی از مهم‌ترین بخش‌های تحلیل فضایی هستند و شامل مجموعه‌ای از روش‌ها برای توصیف و مدل‌سازی داده‌های فضایی هستند. از پرکاربردترین روش‌های آمار فضایی که برای مدل‌سازی روابط فضایی بین متغیرهای مختلف استفاده می‌شود می‌توان به روش حداقل مربعات معمولی و روش رگرسیون وزنی جغرافیایی اشاره کرد. در سال‌های اخیر، تکنیکی نو، به نسبت ساده و در عین حال کارا برای بررسی ارتباطات مختلف فضایی-مکانی، به نام رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) ایجاد شده است (۱۵). پژوهش‌های مهم صورت گرفته در این زمینه به شرح ذیل است. Cardoso و همکاران (۲۰۱۹) از روش رگرسیون وزنی جغرافیایی به منظور بررسی اثر آلودگی هوا بر سرطان ریه در منطقه‌ای در پرتغال استفاده کردند. روش رگرسیون وزنی جغرافیایی سه متغیر موثر و معنی‌دار از نظر آماری در ریسک نسبی مرگ و میر ناشی از سرطان ریه را شناسایی کرد که عبارت از میزان PM10، نرخ شهرنشینی و درصد مناطق صنعتی بود (۱۶). Wang و همکاران (۲۰۱۹) از مدل GWR برای بررسی رابطه بین عوامل گوناگون و غلظت PM2.5 در شهرهای چین استفاده کردند. نتایج نشان داد از بین عوامل طبیعی، ارتفاع دارای بالاترین همبستگی آماری و اثر بر روی PM2.5 بوده است و از بین عوامل اجتماعی-اقتصادی، مناطق ساخته شده قوی‌ترین متغیر تاثیرگذار روی غلظت PM2.5 بوده است. مطالعه Luo و همکاران (۲۰۱۷)

امروزه، آلودگی هوا یک مشکل جهانی شده است که سلامت انسان و توسعه پایدار را تهدید می‌کند (۱). افزایش جمعیت، توسعه شهرنشینی و صنایع مختلف را به دنبال داشته که متعاقباً آلودگی محیط زیست و از جمله آلودگی هوا به عنوان مشکل جدی بشر پدیدار شده است. مدیریت آلودگی هوا نیاز به اقدام جدی از سوی مقامات دولتی در سطح ملی، منطقه‌ای و حتی بین‌المللی دارد (۲). آلاینده‌های هوا می‌توانند تا فواصل زیاد جابجا شوند و بر روی سلامت انسان و اکوسیستم در مناطق وسیع اثرگذار باشد (۳). با توجه به وضع کنونی، آلودگی هوا با توجه به پیامدهای زیان‌بار، به یکی از ملموس‌ترین معضلات زیست‌محیطی شهر اصفهان تبدیل شده است (۴). آلودگی ذرات معلق امروزه یک مشکل زیست‌محیطی جدی است که منجر به کاهش کیفیت هوا و سلامت انسان‌ها و تغییر اقلیم جهانی می‌شود (۵). ذرات معلق بر اساس قطر آئرودینامیکی‌شان شناخته می‌شوند و ذرات معلق PM10 و ذرات معلق PM2.5 را شامل می‌شوند. ذرات معلق ریز با قطر آئرودینامیکی کمتر از ۲/۵ میکرومتر، ترکیبی از ذرات معلق مایع یا جامد در هوا است که اثرات منفی گوناگونی بر روی سلامت انسان‌ها بر جای می‌گذارد که شامل افزایش خطر بیماری‌های تنفسی و قلبی عروقی است (۶). PM2.5 زیان‌بارتر از PM10 است زیرا در هنگام دم، ممکن است وارد قسمت‌های محیطی مربوط به نایزه‌ها شده و منجر به اختلال تبادل گازها در شش‌ها گردد (۷). افزایش غلظت PM2.5 ممکن است سبب ایجاد بیماری‌های مزمنی همچون انسداد و سرطان ریه شود، از این رو، این آلاینده می‌تواند به‌عنوان تهدید جدی برای سلامت انسان به شمار آید (۸، ۹). غلظت PM2.5 تحت تاثیر عوامل متعددی مانند شرایط آب و هوایی، تغییرات کاربری اراضی و فعالیت‌های انسانی قرار می‌گیرد (۱۰). ذرات معلق تحت تاثیر تغییرات فضایی و زمانی است و توزیع مکانی و زمانی غلظت این آلاینده تحت تاثیر شدت تغییرات آب و هوایی، شدت ترافیک، فاصله از جاده و منابع انتشار می‌تواند بسیار متغیر باشد (۱۱). از این رو، با اطلاع از توزیع مکانی و زمانی این آلاینده، می‌توان

آلاینده‌های خطرناک قرار دارد (۲۲). تراکم منابع آلاینده در شعاع ۵۰ کیلومتری شهر اصفهان نیز باعث گردیده که این منطقه به منطقه بحرانی استان اصفهان تبدیل گردد؛ به طوری که ۶۵ درصد از شهرک‌های صنعتی و همچنین صنایع مادری نظیر ذوب‌آهن، فولاد مبارکه، پالایشگاه، پتروشیمی، نیروگاه شهید منتظری، پلی‌اکریل، فولاد آلیاژی، سیمان اصفهان، سیمان سپاهان و انرژی اتمی و به‌علاوه، ۴۵۰ کوره آجرپزی، گچ و آهک‌پزی و بیش از ۱۵۰۰ واحد سنگ‌بری (در مجموع، ۶۲ درصد صنایع استان اصفهان) در محدوده شعاع ۵۰ کیلومتری اصفهان استقرار و تمرکز دارند. ضمناً تعداد زیادی از واحدهای صنعتی و خدماتی بدون ملاحظات زیست‌محیطی و رعایت ضوابط استقرار احداث شده‌اند (۲۳).

هدف از این پژوهش بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر غلظت $PM_{2.5}$ در ۴ فصل سال ۱۳۹۸ در شهر اصفهان است. با توجه به همبستگی‌های احتمالی مکانی بین هر منطقه پرتراکم، از روش رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR) برای بررسی رابطه بین غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ (متغیر وابسته) و متغیرهای مستقل (ترافیک و جمعیت) استفاده شده است. در این پژوهش از نرم‌افزار ArcGIS 10.5 و مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی جهت بررسی ارتباط بین متغیرهای ترافیک و جمعیت با $PM_{2.5}$ و روش درون‌یابی IDW که روش مناسبی جهت نمایش الگوی سرتاسری غلظت آلاینده‌ها به شمار می‌آید، استفاده شد (۲۴). جهت بررسی آزمون خودهمبستگی مکانی از شاخص موران استفاده شد.

روش کار

منطقه مورد مطالعه

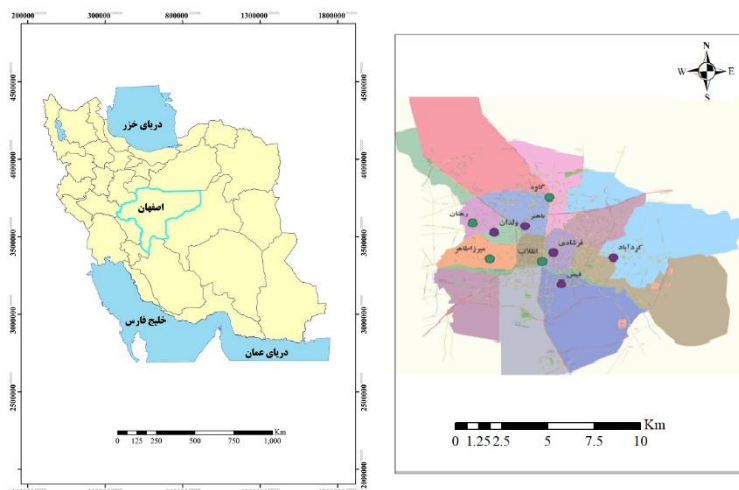
پژوهش حاضر در کلان‌شهر اصفهان صورت گرفته است. این شهر مرکز استان اصفهان و نیز مرکز شهرستان اصفهان است. شهرستان اصفهان مساحتی حدود ۱۰۷۰۱۹ کیلومتر مربع بعد از تهران و مشهد، سومین شهرستان بزرگ ایران است. این شهر بین ۳۰ درجه و ۴۳ دقیق تا ۲۴ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی و ۴۹ درجه و ۳۸ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۳۲ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار گرفته است. ارتفاع شهر اصفهان از سطح عمومی دریاها در نقاط مختلف آن متفاوت

با هدف تعیین الگوی زمانی-مکانی غلظت $PM_{2.5}$ در منطقه ای در چین و آنالیز عوامل اثرگذار بر روی آن با استفاده از مدل GWR نشان داد که جاده، کشاورزی و جمعیت از بین عوامل گوناگون، مهم‌ترین عوامل با تأثیر معنی‌دار بر روی $PM_{2.5}$ هستند. نتایج شاخص موران نشان داد که مدل GWR مدل خوبی برای بررسی الگوی زمانی مکانی ذرات معلق و عوامل تأثیرگذار روی آن بوده است (۱۷، ۱۸). Lin و همکاران (۲۰۱۴) در مقاله‌ای با عنوان تغییرات زمانی-مکانی غلظت $PM_{2.5}$ و روابط آن با فاکتورهای جغرافیایی و اجتماعی-اقتصادی در چین از مدل GWR استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد، که الگوی مکانی $PM_{2.5}$ طی سال‌های مورد مطالعه (۲۰۰۱-۲۰۱۰) ثابت بوده و افزایش غلظت $PM_{2.5}$ در مناطق پرجمعیت مشاهده شد. افزایش جمعیت، رشد اقتصادی و توسعه شهری سه فاکتور عمده تأثیرگذار بر غلظت $PM_{2.5}$ شناخته شدند (۱۹). در پژوهشی دیگر توسط Wang و Fang (۲۰۱۶)، ویژگی‌ها و عوامل زمانی-مکانی $PM_{2.5}$ در شهر Bohai Rim بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که منطقه مورد مطالعه هسته توزیع $PM_{2.5}$ را در چین در سال ۲۰۱۴ تشکیل می‌دهد و همچنین توزیع غلظت $PM_{2.5}$ در فصل زمستان و پاییز بالا و در بهار و تابستان کمتر بود (۲۰). در مقاله‌ای دیگر Bahari و همکاران (۱۳۹۴)، به پهنه‌بندی آلودگی ذرات معلق با استفاده از مدل‌های آماری محلی در شهر تهران پرداختند. در این مقاله به مدل‌سازی مکانی $PM_{2.5}$ با استفاده از روش GWR پرداختند. در نهایت، با توجه به نقشه‌های خروجی حاصل از وضعیت آلاینده $PM_{2.5}$ و همچنین با بررسی پارامترهای آماری مشخص شد که مدل پیشنهادی توانایی بالایی در تخمین غلظت این آلاینده در تمام نواحی شهر تهران دارد (۲۱).

اصفهان، یکی از کلان‌شهرهای مهم ایران است که در بیشتر مواقع سال اتمسفر آن حضور ذرات گرد و غبار را تجربه می‌کند. کلان‌شهر اصفهان به دلیل تراکم تردد وسایل نقلیه، گازهای خروجی از آگروز اتومبیل‌ها، فرسایش سطح آسفالت خیابان، جمعیت روبه رشد، فعالیت‌های صنعتی و مصرف بالای سوخت‌های فسیلی، در معرض بالا رفتن غلظت انواع

PM_{2.5} قرار داشتند، مد نظر قرار گرفتند. بر این اساس مناطق ۳،۲،۶،۸،۹،۱۱،۱۵ مناطق مورد مطالعه در این تحقیق هستند. منطقه‌ی مورد مطالعه و جانمایی ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا در شکل ۱ نشان داده شده است.

است، به طوری که در سواحل رودخانه زاینده رود ۱۵۵۰ متر و در مناطق مرتفع شهر ۱۶۵۰ متر هم می‌رسد. با توجه به ۹ ایستگاه موجود متعلق به شهرداری اصفهان، مناطقی که تحت پوشش داده‌های ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا و غلظت



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در استان اصفهان و جانمایی ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا

Figure 1. Geographical location of the study area in Isfahan province and the location of air monitoring stations

روش تحقیق

معکوس فاصله (IDW) به صورت فصلی در نرم افزار ArcGIS 10.5 بهره گرفته شد. سپس لایه سطح منطقه، برای هر عنصر آلاینده با استفاده از توابع میانجیایی به روش IDW Original تهیه گردیده است. در روش IDW Original فرض بر این است که نقاط نمونه آلاینده‌ی شهر اصفهان از مکان تأثیر می‌پذیرند. در واقع، نقاط نمونه‌ای اثر وزنی دارند؛ به بیان دیگر، پیکسل‌های نزدیک به نقاط نمونه آلودگی اثر بیشتری نسبت به پیکسل‌های دورتر از این نواحی می‌گیرند. پس در این روش با افزایش فاصله از نقاط نمونه آلاینده‌ی، میزان آلودگی کاهش می‌یابد. به منظور ارزیابی اعتبار مدل از پارامتر RMSE که از اختلاف مقدار واقعی غلظت و مقدار پیش‌بینی شده به دست می‌آید و بیانگر قدرت پیش‌بینی مدل است استفاده شده است. در محیط نرم‌افزاری ArcGIS 10.5 توسط افزونه زمین‌آماری در منطقه مورد

در این پژوهش هدف ارزیابی ارتباط بین پارامترهای تردد خودرو و جمعیت بر غلظت PM_{2.5} و مدل‌سازی با استفاده از روش رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) است و جهت تهیه نقشه‌های پراکنش از روش وزن دهی معکوس فاصله (IDW) استفاده شده است. برای دستیابی به این مهم از نرم‌افزار ArcGIS 10.5 استفاده شد. داده‌های مربوط به غلظت آلاینده PM_{2.5} مورد استفاده در این پژوهش توسط ۹ ایستگاه پایش کیفیت هوای مرکز پایش و کنترل کیفیت هوای شهرداری اصفهان به طور ۲۴ ساعته اندازه‌گیری و ثبت شده‌اند. جهت تحلیل فضایی- زمانی آلاینده‌ی مذکور و ترسیم نقشه پراکنش آلاینده از میانگین فصلی غلظت آلاینده در هر ایستگاه پایش استفاده شد. پس از آماده‌سازی داده‌ها، جهت تحلیل فضایی- زمانی و پهنه‌بندی غلظت آلاینده PM_{2.5} در هوای شهر اصفهان از خودهمبستگی فضایی موران و روش وزن دهی

مطالعه (شهر اصفهان) به روش IDW درون‌یابی، پهنه‌بندی و ارزیابی گردید.

آماده‌سازی داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل داده‌های تردد خودرو، جمعیت و غلظت روزانه $PM_{2.5}$ هستند. داده‌های تردد خودرو: داده‌های میزان تردد خودرو در محدوده ۹ ایستگاه سنجش آلودگی هوا از نرم‌افزارهای شبیه‌ساز ترافیکی (EMME4) و همچنین دوربین‌های نظارتی چهارراه‌ها در محدوده ایستگاه‌ها از معاونت حمل و نقل و ترافیک شهرداری اصفهان اخذ گردید. داده‌های جمعیت: میزان جمعیت در بلوک‌های شهری در مناطق اطراف ایستگاه‌ها از واحد آمار و اطلاعات معاونت حمل و نقل و ترافیک شهرداری اصفهان تهیه گردید. داده‌های غلظت آلاینده $PM_{2.5}$: میانگین غلظت روزانه $PM_{2.5}$ که از مرکز پایش و کنترل کیفیت هوای شهرداری اصفهان اخذ گردید و با استفاده از میانگین‌گیری، به صورت ماهیانه برای ۴ فصل سال ۹۸ محاسبه شد. جمعیت و میزان تردد خودرو در اطراف ایستگاه‌ها، با استفاده از اطلاعات بلوک‌های جمعیتی و میزان تردهای دریافت شده از معاونت

حمل و نقل و ترافیک، بر اساس ایجاد بافری در شعاع ۲۰۰ مترمربع اطراف هر ۹ ایستگاه سنجش آلودگی محاسبه گردید. جدول ۱ نام و مختصات جغرافیایی ایستگاه‌ها را نشان داده است. جدول اطلاعات توصیفی بر اساس فایل Excel، تکمیل گردید بدین ترتیب که لایه جمعیت بلوک‌ها، به صورت نقطه‌ای و لایه تردد به صورت لایه خطی همراه با اطلاعات توصیفی تکمیل گردید و درون‌یابی به روش IDW برای شاخص‌های مورد نظر بر اساس فصل انجام شد. برای ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا بافری به شعاع ۲۰۰ مترمربع ایجاد و در محدوده این بافر مجموع تردها و مجموع جمعیت استخراج و به جدول ایستگاه‌ها اضافه شد. با استفاده از رگرسیون وزنی جغرافیایی، شاخص $PM_{2.5}$ به تفکیک به‌عنوان متغیر وابسته و فاکتور جمعیت و میزان تردد به‌عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شد و مقادیر R^2 ، PREDICT و STANDARD RESIDUAL به صورت جداگانه محاسبه گردید و جهت بررسی آزمون خودهمبستگی مکانی از شاخص موران استفاده شد.

جدول ۱- نام و مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های پایش کیفیت هوای شهرداری اصفهان

Table 1. Name and coordinates of air monitoring stations of Isfahan Municipality

منطقه شهری	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	نام ایستگاه
۳	۳۲/۶۴۶۵۱۸	۵۱/۶۶۷۷۹۴	ایستگاه انقلاب
۸	۳۲/۷۰۹۰۹۵	۵۱/۶۷۵۹۰۵	ایستگاه کاهو
۹	۳۲/۶۴۹۴۵	۵۱/۶۱۹۶۰۶	ایستگاه میرزا طاهر
۱۱	۳۲/۶۸۴۰۵۱	۵۱/۶۰۱۰۰۵	ایستگاه رهنان (سازمان بار)
۱۵	۳۲/۶۴۹۵۳۱	۵۱/۷۳۷۹۸۳	ایستگاه جی (ورزشگاه کرآباد)
۸	۳۲/۶۸۱۴۲۶	۵۱/۶۵۰۴۱۱	ایستگاه رباط (مرکز پایش)
۶	۳۲/۶۸۱۷۰۶	۵۱/۶۵۰۴	ایستگاه فیض (خدمات شهری منطقه ۶)
۳	۳۲/۶۵۴۳۷۵	۵۱/۶۷۷۵۲۵	ایستگاه فرشادی (باغ زره‌سازان)
۲	۳۲/۶۷۷۹۴۵	۵۱/۶۲۰۶۱۸	ایستگاه میثاق (ولدان)

روش رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR)

رگرسیون وزنی جغرافیایی یک تکنیک آماری است که به مدل سازی در فرایندهایی که در فضای متفاوت ایجاد می شوند توجه زیادی نشان می دهد (۲۵). این روش مزایای زیادی نسبت به رگرسیون خطی (عمومی) دارد. مزیت عمده GWR در مقابل الگوهای رگرسیون معمولی، توانایی آن در امکان بررسی ناپستی مکانی است (۲۶). ناپستی مکانی نشان می دهد که، اندازه گیری یا تخمین روابط بین متغیرها از محلی به محل دیگر تفاوت می کند. علاوه بر این، رگرسیون وزنی جغرافیایی به ضریب متغیرهای تعیین شده برای اختلاف محلی با دادن ارتباط وزنی بیشتر به مشاهدات جغرافیایی توجه ویژه دارد. رگرسیون وزنی جغرافیایی به آسانی الگوهای فضایی را ترسیم می نماید و در محاسبه و ارزیابی فرضیات فضایی مفید واقع می شود (۲۷). GWR یک معادله رگرسیونی جداگانه را برای هر مشاهده به جای واسنجی یک معادله تولید می کند؛ بنابراین امکان می دهد تا مقادیر پارامتر به صورت پیوسته در فضای جغرافیایی تغییر کنند. چون معادله رگرسیونی به طور غیر مستقل برای هر مشاهده واسنجی شده است یک پارامتر پیش بینی جداگانه مقدار Z و R برای هر مشاهده را محاسبه می کند. معادله رگرسیون فضایی، وزن دار فضایی به صورت رابطه (۱) خواهد بود:

$$y_i(u) = \beta_{0i}(u) + \beta_{1i}(u)x_{1i} + \beta_{2i}(u)x_{2i} + \dots + \beta_{mi}(u)x_{mi}$$

نماد $\beta_{0i}(u)$ نشانگر این است که پارامتر، ارتباطی را در اطراف موقعیت u توصیف می کند که مخصوص همین موقعیت است. معیار آکائیکه نشان می دهد که استفاده از مدل آماری به چه میزان سبب از دست رفتن اطلاعات می شود. به عبارت دیگر، این معیار تعادلی میان صحت مدل پیچیدگی آن برقرار می کند. ارزش کم این معیار نشان دهنده این است که مقدار تخمینی مدل به واقعیت نزدیک است (۲۸).

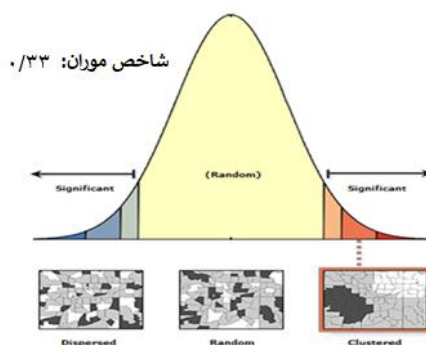
خودهمبستگی فضایی موران

جهت تحلیل فضایی لکه های داغ غلظت PM_{2.5} از تحلیل خودهمبستگی فضایی موران استفاده شد. تحلیل خودهمبستگی فضایی موران می تواند اختلاف فضایی بین همه نمونه ها را اندازه گیری کند. جهت محاسبه ی تحلیل خودهمبستگی فضایی موران ابتدا لازم است نمره استاندارد (Z-score) و P-value به دست آید تا در مرحله ی بعد به ارزیابی و معنادار بودن تحلیل خودهمبستگی فضایی موران پرداخته شود. ارزش تحلیل خودهمبستگی فضایی موران بین ۱ و -۱ متغیر است. زمانی که مشاهدات دارای ارزش های مشابه و الگوی خوشه ای باشند، مقدار P-value نزدیک به عدد +۱ می شود. در غیر این صورت مقدار P-value نزدیک به عدد -۱ بوده و مشاهدات به صورت پراکنده هستند. همچنین در صورتی که الگوی پراکنش مشاهدات به طور تصادفی باشد، همبستگی موران صفر در نظر گرفته می شود (۲۸). مدل همبستگی فضایی موران بر اساس قانون اول جغرافیا مطرح می شود که هر پدیده وابسته به پدیده های دیگر است؛ از این رو، هر چه قدر پدیده ها به یکدیگر نزدیک تر باشند، میزان همبستگی بین آن ها قوی تر است (۲۹، ۳۰). جدول ۲، مقادیر خودهمبستگی فضایی عمومی را برای آلاینده PM_{2.5} در سال ۹۸ را نشان می دهد. بر اساس جدول ۲ با توجه به مقدار مثبت شاخص موران، بزرگ بودن مقدار Z و کوچک بودن P-Value نشانگر خوشه ای بودن نقاط همجوار است؛ بنابراین فرض صفر مبنی بر وجود خودهمبستگی مکانی تأیید می شود و می توان از دو شاخص مورد نظر جهت بررسی ارتباطات مؤثر بر میزان غلظت PM_{2.5} استفاده کرد؛ همچنین در شکل ۲ شاخص موران برای آلاینده PM_{2.5} نشان داده شده است.

جدول ۲- نتایج حاصل از آماره موران جهانی

Table 2. Results of global Moran statistics

P-Value	Z(I)	Moran I	آلاینده
۰/۰۲	۲/۲۸	۰/۳۳	PM _{2.5}



شکل ۲- شاخص موران برای آلاینده $PM_{2.5}$

Figure 2. Moran's index for $PM_{2.5}$

یافته‌ها

نتایج پهنه‌بندی آلاینده $PM_{2.5}$ به روش IDW

در این مطالعه، با توجه به این‌که در بین روش‌های درون‌یابی فضایی، درون‌یابی IDW برای مقیاس منطقه‌ای مناسب است (۲۳) و روش مناسبی جهت نمایش الگوی سرتاسری غلظت آلاینده‌ها به شمار می‌آید (۲۴)، جهت پهنه‌بندی غلظت آلاینده‌ی $PM_{2.5}$ از روش درون‌یابی IDW استفاده شده است. نتایج پهنه‌بندی غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ در هوای شهر اصفهان در فصول مختلف سال ۱۳۹۸، نشان می‌دهد که در فصل بهار، در مناطق غرب شهر اصفهان بالاترین میزان غلظت $PM_{2.5}$ مشاهده شده است. همچنین در فصل گرم تابستان نیز مانند بهار در غرب و شمال شهر بیشترین میزان آلودگی و در مرکز و جنوب غرب شاهد کمترین میزان از غلظت $PM_{2.5}$ مشاهده شد. در فصول سرد سال مانند پاییز و زمستان که معمولاً آلودگی بالاتر از فصول دیگر است، در مناطق شمال، شرق و غرب بیشترین آلودگی و مناطق مرکزی و جنوب غرب کمترین میزان آلودگی $PM_{2.5}$ مشاهده شده است. بررسی آلاینده ذرات معلق $PM_{2.5}$ نشان می‌دهد که در فصل بهار در مناطق غربی شهر اصفهان، شاهد بالاترین میزان غلظت $PM_{2.5}$ بوده است که ایستگاه‌های رهنان، ولدان و تا حدودی ایستگاه کاوه را در بر گرفته است و ایستگاه‌های انقلاب، باهنر و جی کمترین میزان آلودگی را شاهد بوده است. همچنین در فصل گرم تابستان نیز مانند بهار در غرب و شمال شهر یعنی در ایستگاه‌های کاوه و رهنان، ما شاهد بیشترین میزان آلودگی و در مرکز و جنوب غرب که ایستگاه‌های فرشادی و میرزاظاهر را

شامل شده است، دارای کمترین میزان از غلظت ذرات معلق بوده‌ایم. در فصول سرد سال مانند پاییز و زمستان که معمولاً آلودگی بالاتر از فصول دیگر است، در مناطق شمال، شرق و غرب بیشترین آلودگی و مرکز و جنوب غرب دارای کمترین میزان آلودگی $PM_{2.5}$ بوده است. به این صورت که ایستگاه‌های کاوه و جی آلوده‌ترین و ایستگاه‌های فرشادی و میرزاظاهر پاک‌ترین ایستگاه‌ها بوده‌اند. از دلایل مهم تجمع غبارهای معلق و کاهش دید افقی در مناطق شرقی شهر اصفهان را می‌توان وجود مناطق صنعتی، معادن و کوره‌های گچ و آجرپزی دانست که با کمک بادهای غالب غربی به سمت شرق اصفهان هدایت می‌شوند.

بزرگ‌ترین منبع منتشرکننده ذرات معلق با ۸۷ درصد متعلق به صنایع آهن و فولاد بوده است. کارخانه‌های سیمان، وسایل نقلیه سنگین، کوره‌های آجرپزی و کارگاه‌های ریخته‌گری در رتبه‌های بعدی قرار دارند. اگرچه میزان تولید ذرات معلق توسط خودروها کمتر است، اما نکته کلیدی این است که تولید آلاینده‌های آن‌ها دقیقاً در محل زندگی مردم است؛ لیکن میان محل زندگی مردم تا کوره‌های آجرپزی و یا صنایع شیمیایی مسافتی فاصله است. متأسفانه مشخص نیست که تأثیر این فاصله بر ترقیق آلاینده‌ها چیست و دقیقاً چه مقدار از آن‌ها به محل زندگی مردم می‌رسد؛ از طرف دیگر، انتشار آلاینده‌های خودروها کاملاً درون شهر و در ارتفاع پایین است (۳۱)، به همین دلیل هر میزان ذرات معلق که از طریق خودروهای بنزینی و دیزلی در سطح شهر ساطع می‌شود، مستقیم در ریه

بختیاردشت و مشکلات ترافیکی در محدوده اتوبان خرازی، اتوبان امام خمینی و خیابان‌ها و کندروه‌های متصل به آن‌ها از جمله دلایل بارز دیگر افزایش آلودگی این منطقه است.

نتایج مدل‌سازی به روش رگرسیون وزنی جغرافیایی

GWR

همان‌طور که در نقشه‌های خروجی حاصل از پیاده‌سازی روش GWR مشخص است، ارتباط بین متغیرهای مستقل (تردد خودرو و جمعیت) با غلظت ذرات معلق PM_{2.5} بررسی شد. در تحلیل نتایج روش رگرسیون وزنی جغرافیایی، مفاهیم ضریب تعیین محلی (R^2 Local) و باقی‌مانده معادله (Residual) رگرسیونی اهمیت زیادی دارند. ضریب تعیین محلی همان ضریب تعیین در رگرسیون چندمتغیره است. با این تفاوت که در رگرسیون وزنی جغرافیایی شکل محلی و فضایی پیدا می‌کند و از تفاضل بین مقدار مشاهده شده و مقدار پیش‌بینی شده میزان باقی‌مانده به دست می‌آید. مقدار باقی‌مانده می‌تواند مثبت یا منفی باشد. مثبت به معنای این است که میزان واقعی در ناحیه مورد نظر بیشتر از میزانی است که در همان ناحیه از طریق مدل رگرسیون به دست آمده است و منفی به معنای این است که مقدار واقعی در ناحیه مورد نظر کمتر از مقداری است که در همان ناحیه از طریق مدل رگرسیون به دست آمده است (۳۲). در شکل ۳ مقدار باقیمانده معادله (Residual) حاصل از رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی نشان داده شده است. خلاصه‌ای از آمار توصیفی غلظت PM_{2.5} به صورت فصلی و سالانه در جدول ۳ نمایش داده شده است. طبق نتایج این جدول، در سال ۹۸ بیشترین غلظت PM_{2.5} در شهر اصفهان مربوط به فصل پاییز با غلظت $32/46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ و پس از آن فصل‌های زمستان و تابستان می‌باشد. نتایج حاصل از روش GWR در مدل بدین صورت است که بهترین R² برای PM_{2.5} مربوط به فصل تابستان با مقدار ۰/۷۵ است. نزدیک بودن R² ذرات معلق به عدد ۱، کارایی خوب مدل در مدل‌سازی توزیع این آلاینده را نشان می‌دهد. در شکل ۴ مقایسه مدل خروجی نقشه پیش‌بینی و برآورد شده PM_{2.5} حاصل از رگرسیون با خروجی نقشه‌های درون‌یابی در فصل تابستان مشاهده شده است که مدل توانسته همبستگی خوبی بین متغیرهای مستقل و وابسته ایجاد کند.

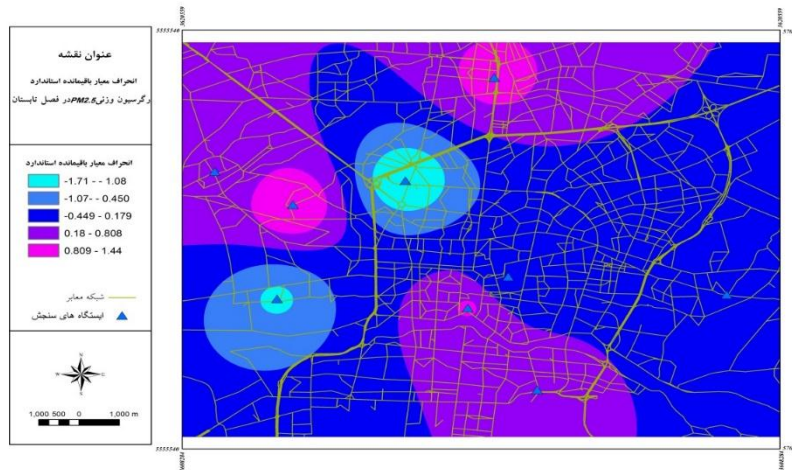
افراد وارد شده و سلامتی افراد را به خطر می‌اندازد و این عامل، اهمیت برنامه‌ریزی در جهت کاهش این آلاینده را دوچندان خواهد کرد. حال با توجه به نتایج پهنه‌بندی، نشان داده شده است که این آلاینده در فصول سرد سال (پاییز و زمستان) به ترتیب با میزان ۳۵/۶۳ میکروگرم بر مترمکعب و ۳۲/۴۶ میکروگرم بر مترمکعب و بر اساس استاندارد EPA آمریکا این غلظت در رده ناسالم برای گروه‌های حساس (دامنه ۱۰۱-۱۵۰) قرار گرفته است (۵). خروجی‌ها نشان می‌دهد که در فصول گرم سال (بهار و تابستان) مناطق ۲، ۷ و ۹ شهر بالاترین میزان آلودگی را دارند و در فصول سرد سال (پاییز و زمستان) مناطق ۷، ۱۵ و ۲ بیشترین غلظت این آلاینده را به خود اختصاص داده‌اند. نتایج مطالعات نشان داده است که، به غیر از منابع ثابت مؤثر و منابع متحرک موجود می‌توان وجود ریزگردها و گردوغبار حاصل از اطراف اصفهان یعنی مناطقی مانند کانون بحران سگری، تالاب گاوخونی، خاک بستر رودخانه زاینده‌رود در زمان خشکی را از عوامل افزایش این آلاینده در این مناطق دانست (۲). منطقه ۷ اصفهان که ایستگاه کاوه در آن واقع است دارای جمعیتی زیاد و در عین حال رو به رشدی است. در این منطقه خیابان کاوه که از اصلی‌ترین مسیرهای شاهین شهر و تهران محسوب می‌شود و ترددی بسیار سنگین دارد واقع شده که سهم بسیاری در افزایش آلودگی ذرات ریز معلق در این منطقه دارد. همجواری با بیابان‌های شمال اصفهان که عاملی برای تولید گرد و غبار است از طرفی و وجود شهرک صنعتی دولت آباد و تصفیه خانه شمال اصفهان و جاده دولت آباد که مسیری برای رسیدن به حبيب آباد و دولت آباد محسوب می‌شود از طرف دیگر، از جمله عوامل دیگر افزایش آلودگی هوا و ذرات ریز معلق این منطقه محسوب می‌شود. در منطقه ۲ اصفهان به دلیل وجود یکی از راه‌های منتهی به خمینی شهر که از آن با عنوان خیابان کهن‌ژاد یاد می‌شود، تردد بسیار سنگین خودروها در این مسیر و همچنین وجود کارگاه‌های صنعتی در مسیر این خیابان، باعث افزایش غلظت ذرات معلق شده و این خیابان را به کانون اصلی آلودگی در این منطقه تبدیل کرده است. آلودگی پالایشگاه و پتروشیمی در محدوده

نقشه‌ها نشان از آن دارند که در هر دو مدل‌سازی مناطق شمال و شمال غربی بالاترین میزان آلاینده‌گی و مناطق جنوب و مرکزی کمترین میزان آلاینده‌گی را شاهد بوده است.

جدول ۳- توصیف آماری غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ (ppm)

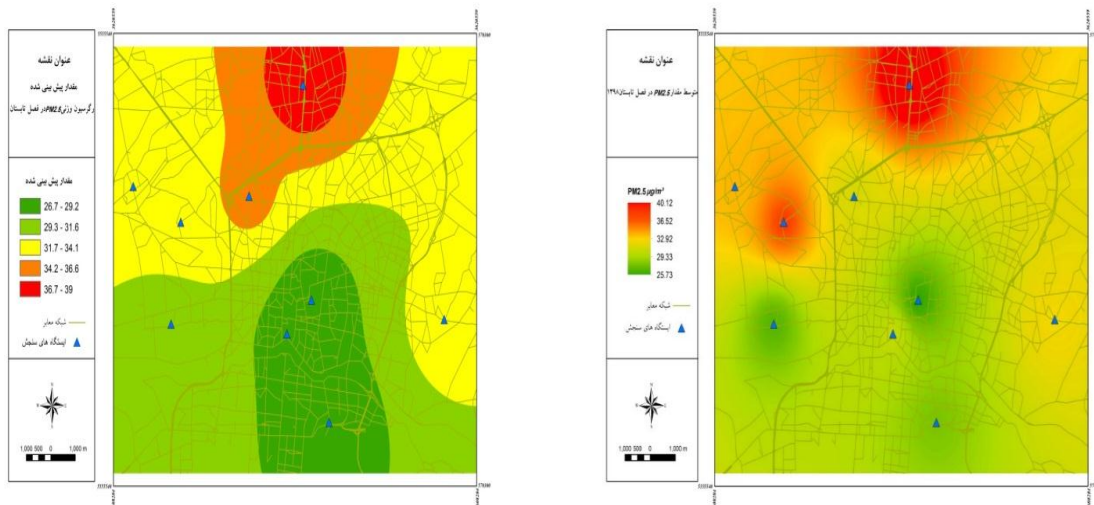
Table 3. Statistical description of $PM_{2.5}$ concentration (ppm)

فصل/سالانه	میانگین غلظت $PM_{2.5}$
بهار	۲۶/۴۱
تابستان	۳۱/۷
پاییز	۳۵/۶۳
زمستان	۳۲/۴۶
سالانه	۳۱/۵۵



شکل ۳- مقدار باقیمانده معادله (Residual) حاصل از رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی

Figure 3. Residual value of Geographically Weighted Regression (GWR)



شکل ۴- مقایسه نقشه پیش‌بینی شده و برآورد شده $PM_{2.5}$ در فصل تابستان ۱۳۹۸

Figure 4. Comparison of predicted and estimated $PM_{2.5}$ in summer of 2019

بحث

روش رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی یک روش آماری است که برای مطالعه الگوهای موضعی ایجاد شده است (۲۱). بنابراین روش مناسبی برای پهنه‌بندی و تخمین داده‌های مکانی به حساب می‌آید. مدل‌های رگرسیون زمین‌آمار مانند مدل GWR غالباً برای آنالیز تغییرات مکانی یا ناهمگنی آلاینده‌های اتمسفری و فاکتورهای اثرگذار بر روی آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل GWR قادر به شناسایی عوامل گوناگون دخیل در آلودگی PM_{2.5} است (۳۳).

نتایجی که از این تحقیق به دست آمد نیز نشان داده است که روش رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی قدرت بالایی در تحلیل مکانی تغییرات غلظت آلاینده PM_{2.5} در شهر اصفهان دارد. پژوهش‌های Cheng و همکاران (۲۰۱۹)، Lin و همکاران (۲۰۱۴) و Soltani و همکاران (۱۳۸۹)، نیز با استفاده از مدل GWR انجام شد و نتایج خروجی از مدل را مورد تأیید قرار دادند (۱۹، ۳۴، ۳۵). آزادی مبارکی و احمدی (۱۳۹۹) در مطالعه خود در رابطه با تغییرات بلندمدت ذرات معلق شهر تبریز با استفاده از داده‌های سنجش از دور به این نتیجه رسیدند که روش GWR مبتنی بر داده‌های سنجش از دور نسبت به سایر روش‌های موجود تهیه نقشه‌های آلودگی هوا برتری دارد. مطالعه انجام شده توسط Zhou و همکاران (۲۰۱۸) در رابطه با به کارگیری روش رگرسیون وزنی جغرافیایی در آنالیز علت آلودگی ریزگرد در چین نشان داد که روش رگرسیون وزنی جغرافیایی نتایج دقیق‌تر و معتبرتری نسبت به رگرسیون حداقل مربعات معمولی (OLS) فراهم کرد. آنها در مطالعه خود بیان کردند روش رگرسیون وزنی جغرافیایی در سال‌های اخیر در مطالعات گوناگون مرتبط با آلودگی هوا مورد استفاده قرار گرفته است و عملکرد خوبی از خود نشان داده است. Zhao و همکاران (۲۰۲۰) از مدل GWR برای آنالیز توزیع مکانی غلظت PM_{2.5} استفاده کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که مدل GWR به طور معنی‌داری دارای عملکرد بهتری نیست به مدل‌های رگرسیون سنتی است (۳۶، ۳۷). نتایج حاصل از مقایسه مقادیر پیش‌بینی و مقادیر

مشاهده شده ایستگاه‌ها نشان داده است که مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی توانایی برآزش مناسب برای آلاینده PM_{2.5} در فصل تابستان را داشته است؛ به طوری که با میزان $R^2=0.75$ در فصل تابستان و با توجه به مقدار مثبت شاخص موران، بزرگ بودن مقدار Z و کوچک بودن P-Value، فرض عدم وجود همبستگی فضایی رد می‌شود که نشان از خوشه‌بندی اطلاعات دارد و همبستگی خوبی بین این آلاینده و متغیرهای مستقل بخصوص در فصل تابستان نشان داده شده است. نتایج این بخش از تحقیق با نتایج Bahari و همکاران (۱۳۹۴)، Sarvar و همکاران (۱۳۹۹) مطابقت دارد (۲۱، ۳۸).

نتیجه‌گیری

PM_{2.5} از آلاینده‌های اصلی هوا برای شهر اصفهان است و اثرات بسیار مخربی بر سلامت انسان دارد. مدل‌سازی و پهنه‌بندی مکانی آلودگی هوا می‌تواند، به مدیران جهت مدیریت و شناسایی مناطق آلوده و به تبع آن، به کارگیری اقدامات مناسب جهت کاهش خطر کمک کند. روش رگرسیون وزن‌دار فضایی به‌عنوان شاخه‌ای جدید از تحلیل رگرسیون، قادر به شناخت و بررسی روابط میان متغیرهاست. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده این است که سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و روش رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی قابلیت بالایی جهت پهنه‌بندی آلودگی هوا و تعیین پارامترهای تأثیرگذار بر آن از جمله پارامترهای تردد و جمعیت را دارد. مدل‌های پهنه‌بندی و درون‌یابی ابزار مفیدی برای شناخت رفتار آلاینده‌های خارج شده از منبع آلاینده بوده و اندازه‌گیری‌های زیاد و پرهزینه را غیرضروری می‌نماید. این مطالعه نشان داد که مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی یک مدل مناسب برای بررسی اثر ترافیک و جمعیت بر انتشار آلاینده PM_{2.5} است. در مجموع با توجه به ارزیابی پیش‌بینی‌های صورت گرفته و مقایسه با نتایج پهنه‌بندی‌ها می‌توان عملکرد مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی را در بررسی ارتباط بین متغیرهای مستقل و وابسته در این تحقیق در مورد آلاینده PM_{2.5} قابل قبول دانست؛ به طوری که

4. Zallaghi, E., Geravandi, S., Nourzadeh Haddad, M., Goudarzi, G., Valipour, L., Salmanzadeh, S., 2015. Estimation of health effects attributed to nitrogen dioxide exposure using the airq model in Tabriz City, Iran. *Health Scope*. Vol. 4. pp. 31-37.
5. Liu, Q., Wu, R., Zhang, W., Li, W., Wang, S., 2020. The varying driving forces of PM_{2.5} concentrations in Chinese cities: Insights from a geographically and temporally weighted regression model. *Environment International*. Vol. 145. pp. 1-10.
6. Zhai, L., Li, S., Zou, B., Sang, H., Fang, X., Xu, S., 2018. An improved geographically weighted regression model for PM_{2.5} concentration estimation in large areas. *Atmospheric Environment*. Vol. 181. pp. 145-54.
7. Mohseni Bandpi, A., Eslami, A., Shamsavani, A., Khodaghali, F., Alinejad, A., 2017. Physicochemical characterization of ambient PM_{2.5} in Tehran air and its potential cytotoxicity in human lung epithelial cells (A549). *Science of the Total Environment*. Vol. 593. pp. 182-90. (In Persian)
8. Rezaei Mofrad, M., HosseinDoost, G., Rangraz Jedi, F., Gilasi, H., Gharlipour, Z., Vafaei, R., 2014. Assessing the awareness of the people of Kashan about the sources, effects and methods of air pollution control. *Scientific Journal of Ilam University of Medical Sciences*. Vol. 22. pp. 52-58. (In Persian)
9. Guo, B., Wang, X., Pei, L., Su, Y., Zhang, D., Wang, Y., 2021. Identifying the spatiotemporal dynamic of PM_{2.5} concentrations at multiple scales using geographically

می‌توان از این مدل به‌عنوان ابزار علمی مناسب برای تجزیه و تحلیل استراتژی‌های کنترل و سیاست‌گذاری برای کاهش و پیشگیری از آلودگی هوا استفاده نمود. نتایج این مطالعه پایه و اساسی برای اقدامات مدیریت کیفیت هوا از بعد PM_{2.5} ایجاد می‌کند. از محدودیت‌های این تحقیق می‌توان به تعداد کم ایستگاه‌های پایش آلاینده و نیز بازه زمانی یکساله مطالعه اشاره کرد که در مطالعات بعدی علاوه بر داده‌های ایستگاه‌های پایش می‌توان از نمونه برداری با دستگاه‌هایی نظیر دستگاه غبارسنج مت‌وان برای نمونه برداری و اندازه‌گیری غلظت PM_{2.5} و نیز از بازه زمانی طولانی‌تری برای بررسی استفاده کرد.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله نویسندگان این مقاله از همکاری بخش پایش و کنترل کیفیت هوای شهرداری اصفهان تقدیر و تشکر می‌نمایند.

References

1. Cao, Q., Rui, G., Liang, Y., 2018. Study on PM_{2.5} pollution and the mortality due to lung cancer in China based on geographic weighted regression model. *BMC public health*. Vol. 18., pp. 1-10.
2. Soleimani, M., Amini, N., Sadeghian, B., Wang, D., Fang, L., 2018. Heavy metals and their source identification in particulate matter (PM_{2.5}) in Isfahan City, Iran. *Journal of environmental sciences*. Vol. 72, pp. 166-75. (In Persian)
3. Wei, Q., Zhang, L., Duan, W., Zhen, Z., 2019. Global and geographically and temporally weighted regression models for modeling PM_{2.5} in Heilongjiang, China from 2015 to 2018. *International journal of environmental research and public health*. Vol. 16., pp. 24.

- geographically weighted regression. Scientific reports. Vol. 7. pp. 1-14.
17. Wang, J., Wang, S., Li, S., 2019. Examining the spatially varying effects of factors on PM2. 5 concentrations in Chinese cities using geographically weighted regression modeling. Environmental pollution. Vol. 248. pp. 792-803.
 18. Lin, G, Fu, J., Jiang, D., Hu, W., Dong, D., Huang, Y., 2014. Spatio-temporal variation of PM2. 5 concentrations and their relationship with geographic and socioeconomic factors in China. International journal of environmental research and public health. Vol. 11. pp. 173-86.
 19. Wang, Z-b., Fang, C-l., 2016. Spatial-temporal characteristics and determinants of PM2. 5 in the Bohai Rim Urban Agglomeration. Chemosphere. Vol. 148. pp. 148-62.
 20. Bahari, R., Abaspour, R., Pahlavani, P., 2016. Zoning of Particulate Matters (PM) pollution using local statistical models in GIS (Case Study: tehran Metropolisies). Journal of Geomatics Science and Technology. Vol. 5. pp. 165-74. (In Persian)
 21. Shirvani, E., Sadeghi, M., Hosseini, SM., Khosravi, A., Rabiei, K., Rahimi, M., 2020. Fine Particle Air Pollution (PM 2.5) and Cardiovascular Hospitalization in Isfahan in 2012: CAPACITY Study. Iranian Heart Journal. Vol. 21. pp.75-81. (In Persian)
 22. Meng, Y., Cave, M., Zhang, C., 2018. Spatial distribution patterns of phosphorus in top-soils of Greater London Authority area and their natural and anthropogenic factors. Applied Geochemistry. Vol. 88. pp. 213-20.
 - and temporally weighted regression model across China during 2015–2018. Science of The Total Environment. Vol. 751. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141765
 10. Chu, H-J., Huang, B., Lin, C-Y., 2015. Modeling the spatio-temporal heterogeneity in the PM10-PM2. 5 relationship. Atmospheric Environment. Vol. 102. pp. 176-82.
 11. O'Leary, B., Reiners Jr, JJ., Xu, X., Lemke, LD., 2016. Identification and influence of spatio-temporal outliers in urban air quality measurements. Science of the Total Environment. Vol. 573. pp. 55-65.
 12. An, X., Hou, Q., Li, N., Zhai, S., 2013. Assessment of human exposure level to PM10 in China. Atmospheric Environment. Vol. 70. pp. 376-86.
 13. Kaufman, YJ., Tanré, D., Boucher, O., 2002. A satellite view of aerosols in the climate system. Nature. Vol. 419. pp. 215-23.
 14. Gao, J., Li, S., 2011. Detecting spatially non-stationary and scale-dependent relationships between urban landscape fragmentation and related factors using Geographically Weighted Regression. Applied Geography. Vol. 31. pp. 292-302.
 15. Cardoso, D., Painho, M., Roquette, R., 2019. A geographically weighted regression approach to investigate air pollution effect on lung cancer: A case study in Portugal. Geospatial health. Vol. 14. pp. 35-45.
 16. Luo, J., Du, P., Samat, A., Xia, J., Che, M., Xue, Z., 2017. Spatiotemporal pattern of PM 2.5 concentrations in mainland China and analysis of its influencing factors using

- Computers and Electronics in Agriculture. Vol. 111. pp. 140-50.
30. Zhang, H., Tripathi, NK., 2018. Geospatial hot spot analysis of lung cancer patients correlated to fine particulate matter (PM_{2.5}) and industrial wind in Eastern Thailand. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 170. pp. 407-24.
31. Hashemi Foumani, M., Motieian, H., 2020. Modeling the prevalence of super-acute avian influenza in Guilan province with data mining models and spatial information system in 2016: An ecological study. *Scientific Journal of Rafsanjan University of Medical Sciences*. Vol. 9. pp. 677-92. (In Persian)
32. Zhao, R., Zhan, L., Yao, M., Yang, L., 2020. A geographically weighted regression model augmented by Geodetector analysis and principal component analysis for the spatial distribution of PM_{2.5}. *Sustainable Cities and Society*. Vol. 56. pp. 102106.
33. Cheng, Y-H., Chang, H-P., Yan, J-W., 2012. Temporal variations in airborne particulate matter levels at an indoor bus terminal and exposure implications for terminal workers. *Aerosol and Air Quality Research*. Vol. 12. pp. 30-38.
34. Soltani, A., Ahmadian, A., Esmaily IY., 2010. GWR Model Application In Investigation of Spatial Variables In An Urban District: Case Study Of Region 7, Municipality Of Tehran. (In Persian)
35. Azadi Mubarak, M., Ahmadi, M., 2020. Long-term variability of particulate matter (PM_{2.5}) in Tabriz using remote sensing data. *Physical Geography Research Quarterly*. Vol. 52. pp. 467-80. (In Persian)
23. Soltani, A., Ahmadian, A., Esmaeli Ayuki, Y., 2010. Application of Spatial Weight Regression Model in Investigating Relationships between Space Variables in Urban Area. *Armanshahr Architecture & Urban Planning Journal*. Vol. 4. pp. 99-110. (In Persian)
24. Liu, L., Duan, Y., Li, L., Xu, L., Yang, Y., Cu, X., 2020. Spatiotemporal trends of PM_{2.5} concentrations and typical regional pollutant transport during 2015–2018 in China. *Urban Climate*. Vol. 34. pp. 100710.
25. Ranjan, AK., Patra, AK., Gorai, A., 2020. A Review on Estimation of Particulate Matter from Satellite-Based Aerosol Optical Depth: Data, Methods, and Challenges. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*. pp. 1-21. DOI:10.1007/s13143-020-00215-0
26. Yoo, D., 2019. Geographically Weighted Regression: A Method for Spatial Analysis in Socio-Historical Research. *Arch Iran Med*. 2019;22(3): 155-160.
27. Wang, Q., Ni, J., Tenhunen, J., 2005. Application of a geographically-weighted regression analysis to estimate net primary production of Chinese forest ecosystems. *Global ecology and biogeography*. Vol. 14. pp. 379-93.
28. Dogru, AO., David, RM., Ulugtekin, N., Goksel, C., Seker, DZ., Sözen, S., 2017. GIS based spatial pattern analysis: Children with Hepatitis A in Turkey. *Environmental research*. Vol. 156. pp. 349-57.
29. Peeters, A., Zude, M., Käthner, J., Ünlü, M., Kanber, R., Hetzroni, A., 2015. Getis–Ord’s hot-and cold-spot statistics as a basis for multivariate spatial clustering of orchard tree data.

37. Sarvar, H., Esmailpour, M., Kirizadeh, M., Amraei, M., 2020. Spatial analysis of factors affecting air pollution in Tabriz city. *Journal of Natural Environmental Hazards*. Vol. 9. pp. 151-72.
36. Zhou, Q., Wang, C., Fang, S., 2019. Application of geographically weighted regression (GWR) in the analysis of the cause of haze pollution in China. *Atmospheric Pollution Research*. Vol. 10. pp. 835-46.