

Spatio-temporal Analysis of PM_{2.5} Pollutant in Tehran Metropolis During the Years 2014-2017

Saeed Motesaddi Zarandi

Associate Professor of Environmental Health Engineering, School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

Rasul Nasiri

* Ph.D. Student, Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran. (Corresponding author):

E-mail address: nasirirasul@gmail.com)

Received: 2020/09/12

Accepted: 2020/10/13

Document Type: Research article

ABSTRACT

Background and Aim: Tehran, as the largest and most populous city in Iran, is encountered many problems, of which air pollution is the most common. In recent years, PM_{2.5} has been the cause of the unhealthiest days in terms of air pollution in Tehran. For this purpose, the present study was conducted to do a Spatio-temporal analysis of PM_{2.5} pollutant in the Tehran metropolis during the years 2014-2017 using GIS.

Materials and Methods: In this study, Inverse Distance Weighting (IDW) and HotSpots methods were used to predict and conduct the zoning of PM_{2.5} concentrations during four consecutive years (2014-2017).

Results: The results of hotspot analysis and Getis-Ord-Gi index showed that the southern and southwestern regions were the most polluted areas with a confidence level above 90% and a concentration of more than 50 µg/m³, followed by the western and central areas to a lesser extent. Also, the concentration of PM_{2.5} pollutant showed an increasing trend from north to south and east to west.

Conclusion: The south, southwest, west, and center were the most polluted areas. However, the present study only showed the zoning of PM_{2.5} concentration and did not identify various factors and the contribution of each of them to the production of this pollutant. It is necessary to conduct studies to identify sources and their contributions to control and reduce the concentration of PM_{2.5} in the Tehran metropolitan.

Keywords: PM_{2.5} Pollutant; IDW; Getis-Ord-Gi Index; Hotspots

► **Citation:** Motesaddi Zarandi S, Nasiri R. Spatio-temporal Analysis of PM_{2.5} Pollutant in Tehran Metropolis During the Years 2014-2017. *Iranian Journal of Research in Environmental Health*. Autumn 2020; 6(3): 211-220.

تحلیل فضایی- زمانی آلاینده $PM_{2.5}$ در کلانشهر تهران طی سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۹۵

چکیده

زمینه و هدف: شهر تهران به‌عنوان بزرگ‌ترین و پرجمعیت‌ترین شهر کشور به مشکلات عدیده‌ای برخورد کرده که آلودگی هوا از معمول‌ترین آن‌هاست. طی سال‌های اخیر آلاینده $PM_{2.5}$ مسبب اکثر روزهای ناسالم از نظر آلودگی هوا در تهران بوده است؛ به‌همین منظور مطالعه حاضر با هدف تحلیل فضایی- زمانی آلاینده $PM_{2.5}$ در کلانشهر تهران طی سال‌های ۱۳۹۲-۹۵ با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی انجام شد.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه از روش‌های درونیابی معکوس فاصله و لکه‌های داغ جهت پیش‌بینی و پهنه‌بندی غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ طی ۴ سال متوالی (۱۳۹۲-۹۵) استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج حاصل از آنالیز لکه‌های داغ و آماره گتیس- ارد جی نشان داد که نواحی جنوب و جنوب غرب با سطح اطمینان بالای ۹۰٪ و غلظت بیش از ۵۰ میکروگرم بر متر مکعب آلوده‌ترین نواحی می‌باشند و به مقدار کمتری نواحی غرب و مرکز در رتبه بعدی قرار دارند؛ همچنین غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ از شمال به جنوب و از شرق به غرب روند افزایشی را نشان داد.

نتیجه‌گیری: مناطق جنوبی، جنوب غرب، غرب و مرکز از آلوده‌ترین مناطق به‌حساب می‌آیند؛ با این حال، مطالعه حاضر فقط پهنه‌بندی غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ را نشان داده و به شناسایی عوامل گوناگون و سهم هر کدام از آن‌ها در تولید این آلاینده نپرداخته است؛ و لازم است مطالعاتی با هدف شناسایی منابع و سهم آن‌ها به منظور کنترل و کاهش غلظت $PM_{2.5}$ در سطح کلانشهر تهران انجام شود.

کلید واژه‌ها: آماره گتیس- ارد جی، درونیابی معکوس فاصله، ذرات معلق، نقاط داغ

سعید متصدی زرنندی

دانشیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.

رسول نصیری

* دانشجوی دکتری مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران. (نویسنده مسئول): ایمیل: nasirirasul@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۲۳

نوع مقاله: مقاله اصیل پژوهشی

یکی از پدیده‌های چالش برانگیز که امروزه زندگی بشر با آن دست به گریبان است، موضوع آلودگی هوا می‌باشد. پدیده آلودگی هوا، یکی از ره‌آورد‌های توسعه صنعتی است که با افزایش جمعیت و گسترش شهرنشینی، توسعه حمل‌ونقل و افزایش میزان سوخت مورد استفاده در شهرها به‌ویژه کلانشهرها روزبه‌روز بر شدت آن افزوده شده است. شهر تهران به عنوان بزرگ‌ترین و پرجمعیت‌ترین شهر کشور به دلیل شرایط خاص جغرافیایی (توپوگرافی و هواشناسی)، اجتماعی (توزیع جمعیت و ترافیک)، فرهنگی (سطح فرهنگ و آموزش مرتبط) و توسعه شهری، دچار معضل آلودگی هوا است (۱). در ایران نیز شهرهای بزرگ به‌ویژه کلانشهرهای آن مانند تهران به علت افزایش ترافیک ناشی از وسایل نقلیه موتوری با بحران آلودگی هوا مواجه می‌باشند. از این رو، نرخ رشد بیماری‌های قلبی - عروقی و مرگ‌ومیرهای زودرس در این شهر با کاهش کیفیت بهداشتی هوای تهران افزایش یافته است (۲، ۳).

امروزه در تهران و بسیاری از شهرهای بزرگ و صنعتی دنیا به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه، آلاینده‌های مختلف از طریق وسایل نقلیه موتوری، صنایع و منابع تجاری و خانگی در هوا تخلیه می‌شود که غلظت بسیاری از این آلاینده‌ها در شهر تهران در طول ساعات مختلف شبانه‌روز بالاتر از حد استاندارد می‌باشد. تهران به علت رشد بی‌رویه جمعیت، مهاجرت، عدم برنامه‌ریزی صحیح و نیز عدم توجه به مسائل زیست‌محیطی، در گسترش و توسعه شهر به مشکلات عدیده‌ای برخورد کرده که آلودگی هوا و ترافیک از معمول‌ترین آن‌هاست (۴)؛ بدین سبب کلانشهر تهران یکی از شهرهایی است که با مسئله بغرنج آلودگی هوا به‌شدت مواجه است و در حال حاضر یکی از مهم‌ترین معضلات زیست‌محیطی شهر تهران نیز همین امر بوده و مقابله و کاهش آن، جز با شناخت آلاینده‌ها، منشأ و عوامل تأثیرگذار بر آن‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد (۱). موقعیت جغرافیایی این شهر که از سمت شمال و شمال شرق به ترتیب توسط ارتفاعات البرز و کوه‌های شرق تهران احاطه شده است، باعث شده تا آلاینده‌های هوا از سطح شهر

خارج نشده و با پدیده آلودگی هوا مواجه باشد (۴، ۵).

بنابر گزارش‌های سازمان ملل متحد، ذرات معلق به‌عنوان مهم‌ترین آلاینده هوا مطرح شده است که بیش‌ترین تهدید را برای کلانشهرها همچون تهران که جمعیت زیادی را در خود جای داده، به همراه داشته است (۶، ۷). ترکیب، تعداد، اندازه و سطح ذرات معلق، نقش مهمی در میزان اثرات مضر آن‌ها بر سلامت انسان ایفا می‌کند. ذرات معلق معمولاً به دو شکل $PM_{2.5}$ و PM_{10} نمایش داده می‌شوند که $PM_{2.5}$ و PM_{10} به ترتیب بیانگر ذرات کوچک‌تر یا مساوی ۲/۵ میکرون و ۱۰ میکرون می‌باشد (۸، ۹).

به‌طور قراردادی $PM_{2.5}$ به ذراتی گفته می‌شود که قطر آن‌رو دینامیکی کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون داشته باشند. $PM_{2.5}$ شامل یک نسبت وسیعی از ماده‌های شبه‌فرار و نمدار می‌باشد که تنوع این توده $PM_{2.5}$ بستگی به نوع منابع، انتشارات، توزیع‌های محلی و منطقه‌ای و وضعیت‌های گوناگون زمانی دارد؛ که این خود نشان از ترکیب شیمیایی متفاوت $PM_{2.5}$ در شرایط و مکان‌های مختلف است که دانستن این موضوع کمک شایانی برای کنترل این آلاینده دارد (۱۰). ذرات معلق با قطر کمتر نسبت به ذرات معلق با قطر بیشتر، از اهمیت بالاتری برخوردار می‌باشند (۸، ۱۱).

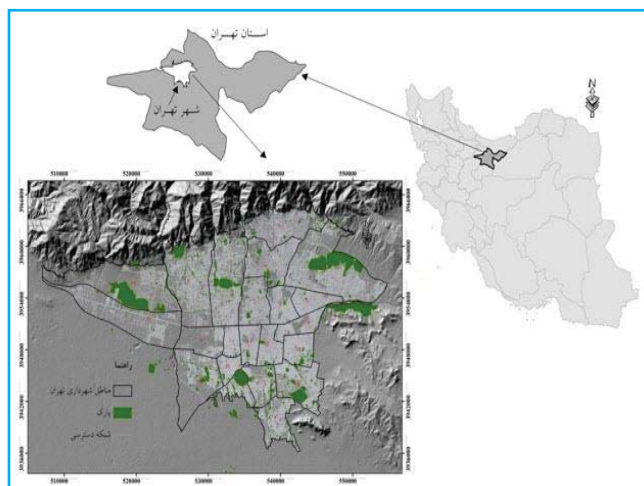
بیش از ۲ میلیون مرگ‌ومیر در سطح جهان به‌عنوان تأثیر مستقیم آلودگی هوا به دلیل خسارات وارده به شش‌ها و سیستم تنفسی در هر سال تخمین زده شده است که از میان این مرگ‌ها، تقریباً ۲/۱ میلیون به $PM_{2.5}$ و ۰/۴۷ میلیون مرگ به ازن نسبت داده می‌شود (۱۲). مطالعات علمی فراوانی، مواجهه با ذرات را به‌عنوان منبع متنوع مشکلات سلامتی شرح داده‌اند که شامل مرگ زودرس مردم با بیماری‌های قلبی یا ششی، حملات قلبی غیرکشنده، ضریان قلب نامنظم، تشدید آسم، کاهش عملکرد شش‌ها و افزایش علائم سیستم تنفسی مانند سوزش راه‌های هوایی، سرفه و سختی تنفس می‌شود (۱۳).

ذرات معلق تحت تأثیر تغییرات فضایی و زمانی می‌باشند. شدت تغییرات آب‌وهوایی، شدت ترافیک، منابع انتشار و حتی

روش کار

معرفی منطقه مطالعاتی

از نظر موقعیت، شهر تهران با وسعتی در حدود ۷۳۳ کیلومتر مربع در منطقه مابین کوه و کویر در دامنه جنوبی البرز مرکزی گسترده شده است و در ۵۱ درجه و ۴ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۳ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۱ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است. این شهر در گستره‌ای بین کوه و کویر در دامنه جنوبی البرز قرار دارد. گستره استقرار تهران از سمت جنوب و جنوب غربی به دشت‌های هموار ورامین و شهریار منتهی می‌شود و در سمت شرق و شمال توسط کوهستان محصور گردیده است.



شکل ۱. نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

این شهر در حال حاضر دارای ۳۸ ایستگاه پایش آلودگی هوا به صورت فعال می‌باشد که ۲۲ ایستگاه تحت نظر شرکت کنترل کیفیت هوا و ۱۶ ایستگاه متعلق به اداره کل حفاظت محیط زیست استان تهران می‌باشد. در این تحقیق از داده‌های آلودگی هوای ۳۸ ایستگاه پایش آلودگی هوا در شهر تهران استفاده شد.

در این مطالعه توصیفی-تحلیلی و مقطعی به تحلیل فضایی آلاینده $PM_{2.5}$ اندازه‌گیری شده توسط ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا در کلانشهر تهران طی سال‌های ۱۳۹۲-۹۵ پرداخته شد. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ طی سال‌های ۱۳۹۲-۹۵ است که توسط ایستگاه‌های پایش

فاصله از جاده می‌تواند شدت این تغییرات را تحت تأثیر قرار دهند (۱۴). بنابراین، می‌توان با آگاهی از توزیع مکانی و زمانی ذرات معلق، ویژگی و موقعیت تمامی نقاط اندازه‌گیری شده را تعیین کرد. تاکنون مطالعات متعددی در ارتباط با تغییرات مکانی و زمانی آلودگی هوا با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) در نقاط مختلف تهران و جهان انجام گرفته است. شرعیپور و بیدختی در مطالعه‌ای نشان دادند که غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ از سمت شمال به جنوب و همچنین از سمت شرق به غرب تهران افزایش می‌یابد. آن‌ها طی مطالعات خود، وزش بادهای غالب با جهت جنوب غربی از نواحی بیابانی اطراف تهران را عامل مؤثر در افزایش لکه‌های داغ ذرات معلق در جنوب تهران معرفی نمودند (۱۵). علیزاده چوباری و همکاران طی مطالعه‌ای در رابطه با تغییرات مکانی - زمانی آلاینده $PM_{2.5}$ ، مناطق جنوبی و غربی تهران را آلوده‌تر از مناطق شمالی و شرقی شناسایی کردند (۱۶). همچنین در مطالعه شهبازی و همکاران، پالایشگاه نفت تهران را به عنوان منبع انتشار آلاینده $PM_{2.5}$ در نواحی جنوبی معرفی کردند (۴). تمامی این مطالعات، تأثیر و اهمیت تغییرات زمانی و مکانی را در روند آلودگی هوا مورد تأکید قرار داده‌اند و به عبارتی مطالعه آلاینده‌ها در هوا را بدون در نظر گرفتن تغییرات فضایی و زمانی را ناممکن دانسته‌اند. با توجه به این مهم، سیستم اطلاعات جغرافیایی می‌تواند جهت نمایش فضایی اطلاعات آلاینده‌ها، تحلیل‌های فضایی و درک بهتر از رفتار آن‌ها را فراهم کند (۳، ۶، ۷، ۱۵).

فنون و مدل‌های تحلیل مکانی اغلب در علوم محیط زیست برای شناسایی ناهنجاری‌های مکانی (لکه‌های داغ) آلاینده‌های مختلف استفاده می‌شوند (۱۷). هر پدیده مکانی می‌تواند توسط سامانه اطلاعات جغرافیایی به عنوان ابزاری کارا و مفید در تصمیم‌سازی‌ها در مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای، ملی و جهانی مورد تحلیل قرار گیرد (۳، ۱۸، ۱۹، ۲۰). بنابراین مطالعه حاضر با هدف تحلیل فضایی- زمانی آلاینده $PM_{2.5}$ در کلانشهر تهران طی سال‌های ۱۳۹۲-۹۵ با استفاده از GIS انجام شد.

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

همچنین جهت توزیع مناسب فضایی نقاط داغ و سرد از آماره گتیس- ارد جی^۳ و Z-Score استفاده گردید؛ زمانی یک عارضه به عنوان یک نقطه داغ شناخته می شود که هم خودش و هم عارضه هایی که در مجاور آن قرار دارند، مقادیر زیادی داشته باشند. زمانی که مقدار آماره گتیس- ارد جی ۱، ۲ و ۳ به دست آید، درصد سطح اطمینان به ترتیب ۹۹٪، ۹۵٪ و ۹۰٪ در نظر گرفته می شود. لازم به ذکر است که مقادیر آماره گتیس- ارد جی با مقادیر به دست آمده از Z-Score برابر است. آماره گتیس- ارد جی به صورت زیر محاسبه می شود (۲۲):

معادله (۲):

$$Gi = \frac{\sum_{j=1}^n Wij X - \bar{x} \sum_{j=1}^n Wij}{S \sqrt{x = \frac{[n \sum_{j=1}^n Wij^2 - (\sum_{j=1}^n Wij)^2]}{n - 1}}}$$

یافته ها

آمار توصیفی غلظت PM_{2.5} به صورت سالانه طی سال های ۱۳۹۲-۹۵ در جدول ۱ آورده شده است. همانطور که در جدول نشان داده شده است، بیشترین غلظت PM_{2.5} در شهر تهران مربوط به سال ۱۳۹۲-۹۳ با غلظت ۵۶ میکروگرم بر متر مکعب می باشد و بعد از آن به ترتیب سال ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ قرار داشتند.

جدول ۱. توصیف آماری غلظت PM_{2.5} (میکروگرم بر متر مکعب) در هوای کلانشهر تهران طی سال های ۱۳۹۲-۹۵

سال	صدک ۲۵	صدک ۷۵	انحراف معیار	میانگین	حداقل	حداکثر
۱۳۹۲	۳۱/۹۴	۴۸/۶۱	۱۳/۸۱	۳۷/۳۴	۱۸	۵۶
۱۳۹۳	۲۸/۴۸	۴۶/۵۵	۱۶/۲۴	۳۶/۵۴	۲۰	۵۶
۱۳۹۴	۲۷/۳۱	۴۵/۹۶	۱۴/۷۳	۳۳/۹۶	۲۱	۵۴/۲۴
۱۳۹۵	۲۶/۷۵	۴۲/۱۳	۱۲/۰۹	۳۲/۷۹	۱۹/۸۵	۵۲/۰۱

بر اساس نتایج پهنه بندی غلظت آلاینده PM_{2.5} در شهر تهران

کیفیت هوای شرکت کنترل کیفیت هوای تهران و همچنین اداره کل حفاظت محیط زیست استان تهران به طور ساعتی اندازه گیری و ثبت شده اند. از آنجا که داده های گرفته شده به صورت ساعتی گزارش شده بودند، جهت تحلیل فضایی-زمانی PM_{2.5} به داده های سالانه تبدیل شدند؛ بدین منظور از ایستگاه هایی که حداقل ۵۰٪ اوقات غلظت PM_{2.5} را ثبت کرده بودند، استفاده گردید و ایستگاه های پایین تر از این مقدار، به علت ایجاد خطا در میانگین سالانه حذف شدند؛ در نهایت از اطلاعات ۳۲ ایستگاه برای انجام این مطالعه استفاده گردید.

پس از آماده سازی داده ها، برای تحلیل فضایی-زمانی آلاینده PM_{2.5} از نرم افزار Arc GIS 10.4 منتشر شده توسط کمپانی ESRI و برای سایر تحلیل ها بر روی داده ها از نرم افزار اکسل استفاده شد. جهت تحلیل فضایی-زمانی وضعیت آلودگی هوای کلانشهر تهران از مدل درون یابی وزن دهی معکوس فاصله (IDW)^۱ و همچنین مدل نقاط داغ و سرد^۲ به کار گرفته شدند. در نهایت پهنه بندی آلودگی هوای کلانشهر تهران توسط مدل IDW و نقاط داغ آلودگی توسط مدل Hot Spot نشان داده شد.

مدل IDW: مدل IDW برای هر یک از نقاط اندازه گیری، وزنی بر اساس فاصله بین آن نقطه تا موقعیت نقطه مجهول در نظر می گیرد، سپس این وزن ها توسط توان وزن دهی کنترل می شود؛ به طوری که توان های بزرگ تر اثر نقاط دورتر از نقطه مورد برآورد را کاهش داده و توان های کوچک تر، وزن ها را به طور یکنواختی بین نقاط هم جوار توزیع می کنند. البته این روش بدون توجه به موقعیت و آرایش نقاط، فقط فاصله آنها را در نظر می گیرد؛ یعنی نقاطی که دارای فاصله یکسانی از نقطه برآورد هستند، دارای وزن یکسانی می باشند. مقدار عامل وزنی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می گردد (۲۱):

معادله (۱):

$$\lambda_i = (D_i - \alpha) / \sum_{i=1}^n D_i - \alpha$$

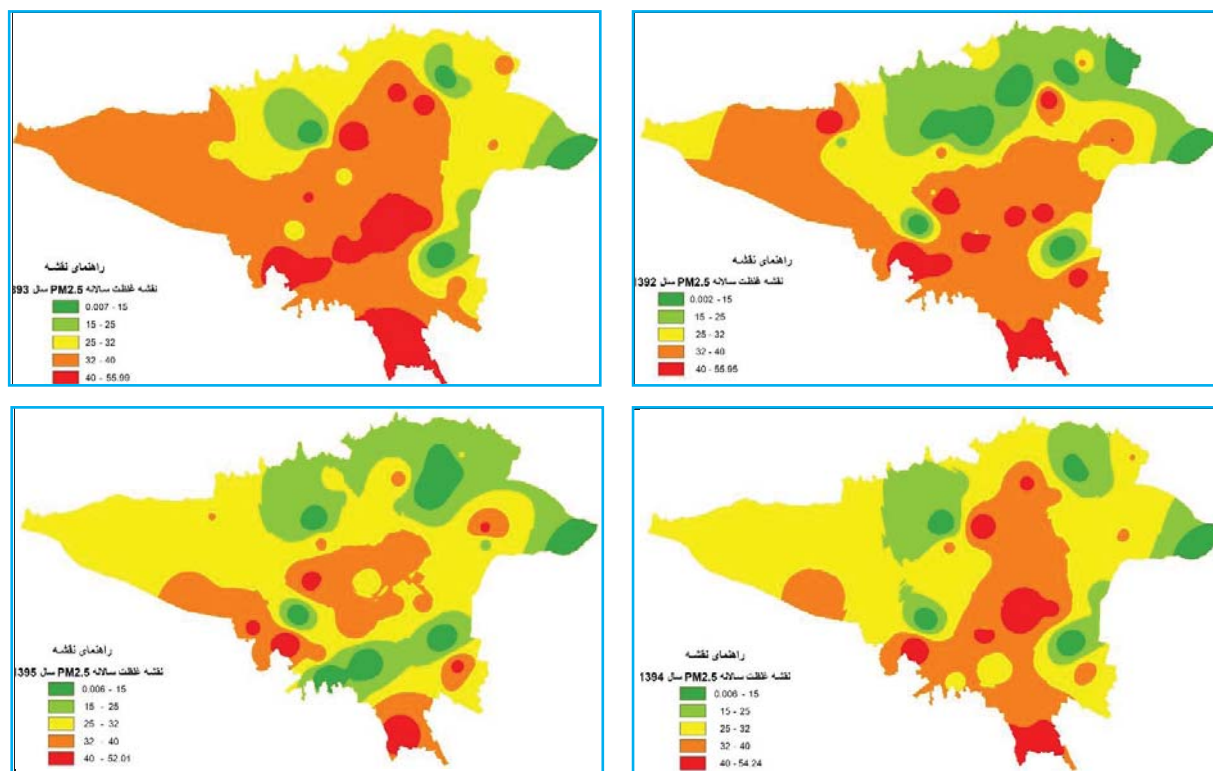
1. Inverse Distance Weighting

2. Hot Spot, Cold Spot

3. Getis-Ord-Gi

ناحیه جنوب غرب و جنوب مشاهده شد. لازم به ذکر است که رنج مقادیر RMSE^۱ و ME^۲ برای مدل IDW به ترتیب بین ۶/۴۳- ۸/۲ و ۰/۶۱-۰/۷۲ به دست آمد.

طی سال‌های ۱۳۹۲-۹۵، نواحی جنوب، جنوب غرب و غرب در سال ۱۳۹۲ بیشترین غلظت این آلاینده را داشتند و طی سال ۱۳۹۳-۹۴ گرایش بیشتری از غرب به سمت جنوب و مرکز نشان داده است، اما مجدداً در سال ۱۳۹۵ بیشترین غلظت این آلاینده در



شکل ۲. پهنه‌بندی غلظت آلاینده PM_{2.5} در شهر تهران

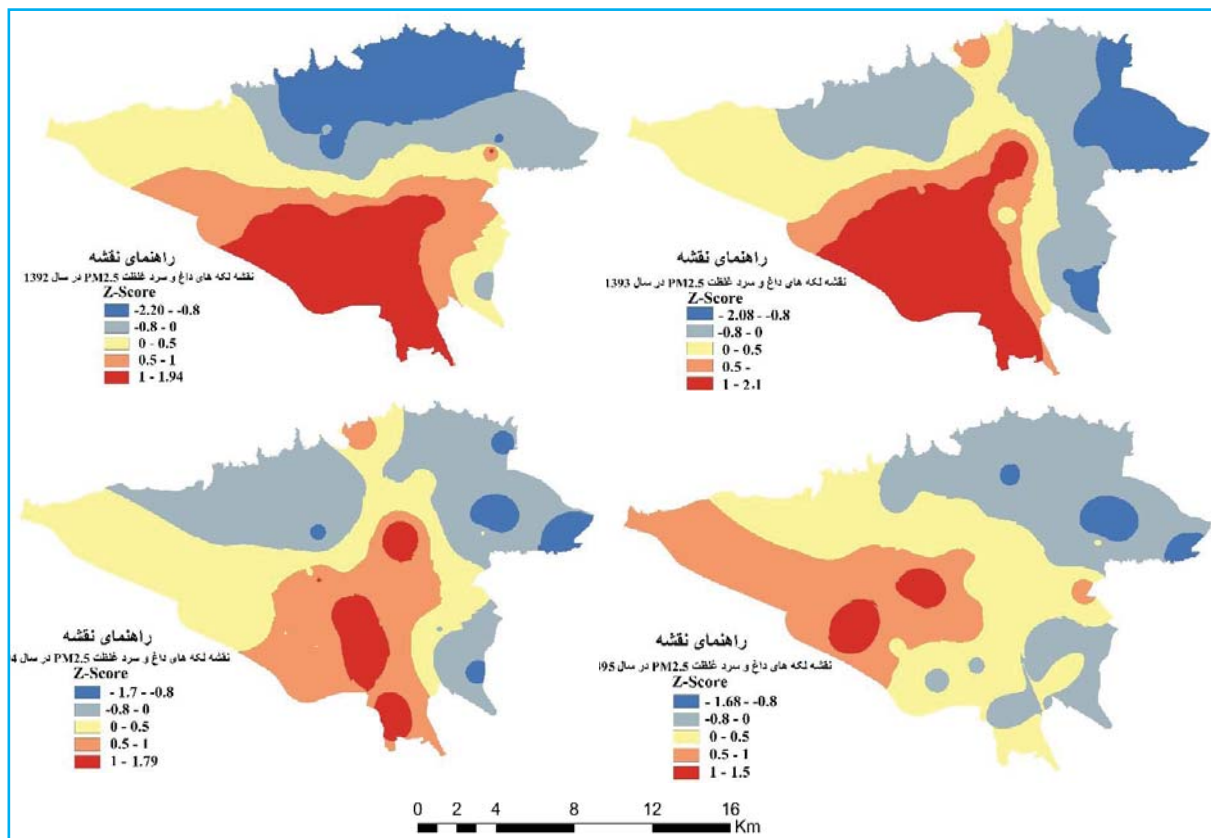
آنالیز لکه‌های داغ

شکل ۳ نتایج به دست آمده از آماره گتیس-ارد جی طی سال‌های ۱۳۹۲-۹۵ در سطوح اطمینان مختلف را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج طی سال ۱۳۹۲، بیشترین لکه‌های داغ با سطح اطمینان ۹۵٪ متعلق به نواحی جنوب و بیشترین لکه‌های سرد با سطح اطمینان ۹۵٪ متعلق به نواحی شمال بود. طی سال ۱۳۹۳ بیشترین لکه‌های داغ غلظت PM_{2.5} با سطح اطمینان ۹۰٪ متعلق به نواحی غرب و بیشترین لکه‌های سرد غلظت PM_{2.5} با سطح اطمینان ۹۰٪ متعلق به نواحی شمال شرق و شرق بود. در نهایت می‌توان گفت که نتایج پهنه‌بندی مقادیر به دست آمده از Z-Score افزایش لکه‌های داغ را از شمال به جنوب و از شرق به غرب نشان می‌دهد.

شکل ۳ نتایج به دست آمده از آماره گتیس-ارد جی طی سال‌های ۱۳۹۲-۹۵ در سطوح اطمینان مختلف را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج طی سال ۱۳۹۲، بیشترین لکه‌های داغ با سطح اطمینان ۹۵٪ متعلق به نواحی جنوب و بیشترین لکه‌های سرد با سطح اطمینان ۹۵٪ متعلق به نواحی شمال بود. طی سال ۱۳۹۳ بیشترین لکه‌های داغ غلظت PM_{2.5} با سطح اطمینان ۹۵٪ متعلق به نواحی جنوب و جنوب غرب و با سطح اطمینان ۹۰٪ متعلق به نواحی غرب بود. همچنین بیشترین لکه‌های سرد غلظت PM_{2.5} با سطح اطمینان ۹۵٪ متعلق به نواحی شرق بود.

در طی سال ۱۳۹۴ بیشترین لکه‌های داغ غلظت PM_{2.5} با

1. Root Mean Square Error
2. Mean Error



شکل ۳. لکه‌های داغ و سرد آلاینده $PM_{2.5}$ در شهر تهران

بحث

در تولید آلاینده $PM_{2.5}$ عوامل متعددی از جمله نوع سوخت‌های مصرفی در صنایع و بخش حمل‌ونقل، حجم ترافیک و به‌دنبال آن مصرف سوخت بیشتر را می‌توان نام برد. آلاینده $PM_{2.5}$ تحت تأثیر نوع منابع قرار دارد و نوع منابع ترکیب و مقادیر اجزای آن را تعیین می‌کند که همین امر نشان از متفاوت بودن ترکیب آن در شرایط مکانی و زمانی مختلف می‌دهد که متناسب با آن، اثرات متنوعی بر سلامت انسان و محیط زیست خواهد داشت. مطالعات مختلفی در تهران و دنیا در ارتباط با غلظت، ترکیب و اثرات آلاینده $PM_{2.5}$ بر سلامت انجام شده است. در مطالعه جین و همکاران در شهر دهلی هند که تنوع فصلی ترکیب شیمیایی و سهم منابع مختلف $PM_{2.5}$ و PM_{10} را از ژانویه ۲۰۱۳ تا دسامبر ۲۰۱۶ بررسی و مقایسه کردند، غلظت متوسط سالانه $PM_{2.5}$ و PM_{10} به ترتیب 131 ± 79 میکروگرم بر متر مکعب (دامنه: ۱۷ -

۴۱۷ میکروگرم بر متر مکعب) و 238 ± 106 میکروگرم بر متر مکعب (دامنه: ۳۴ - ۵۳۷ میکروگرم بر متر مکعب) بود. نمونه‌های $PM_{2.5}$ و PM_{10} برای تعیین و تخمین ترکیب اجزای شیمیایی (برای مثال بخش کربن آلی و عنصری، اجزای یونی غیرآلی محلول در آب، فلزات سنگین و عناصر کمیاب) مورد بررسی قرار گرفتند و از آنالیز فاکتور ماتریس مثبت (PMF)^۱ برای تعیین نوع منابع استفاده کردند که PMF هشت منبع عمده نیترات ثانویه، سولفات ثانویه، انتشار خودروها، سوختن بیومس، گردوغبار خاک، احتراق سوخت فسیلی، نمک‌های سدیم و منیزیم و انتشارات صنعتی را شناسایی کرد. نسبت کل کربن به کل غلظت ۰/۲۸ برای $PM_{2.5}$ و کل کربن به کل غلظت ۰/۲۴ برای PM_{10} بود و از الگوی فصلی پیروی می‌کرد. میزان نیترات و سولفات ثانویه به ترتیب

1. positive matrix factorization

در فصول سردتر و فصول گرم‌تر بیشتر بود، در حالی که میزان انتشارات وسایل نقلیه در فصول مختلف تغییر چشمگیری نداشت؛ همچنین انتشارات حاصل از سوختن بیومس به دلیل شرایط پایدار هواشناسی و سوزاندن بیومس (سوختن بقایای کشاورزی در مناطق اطراف دهلی؛ به‌طور عمده پنجاب و هاریانا) و گرمایش خانگی در طول فصل زمستان، سهم بیشتری در دهلی داشت. همچنین آن‌ها نشان دادند که بادهای شمال غربی سهم بسیار زیادی در توزیع آلاینده‌های $PM_{2.5}$ و PM_{10} در دشت‌های شمال غربی هند داشته است (۲۳). همچنین مطالعه التواویجیری و همکاران که ارتباط بین مواجهه کوتاه‌مدت با منابع مختلف $PM_{2.5}$ و نشانگرهای زیستی انعقاد و التهاب مانند گلبول‌های سفید در دو گروه سنی (افراد مسن و جوان) در مناطق مرکزی تهران را مورد بررسی قرار دادند، نشان داد که منابع مختلف $PM_{2.5}$ سطح التهاب و نشانگرهای زیستی انعقادی را افزایش می‌دهد، اگرچه قدرت و اهمیت این ارتباطات بسته به نوع منابع PM ، مشخصات دموگرافیک، زمان و طول مواجهه متفاوت است (۲۴). در مطالعه تالشی و همکاران در تهران که به بررسی و تجزیه و تحلیل $PAHs$ (هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای) منتسب به $PM_{2.5}$ طی چهار فصل در سال ۲۰۱۸-۲۰۱۹ در سه سایت در تهران پرداختند، ۱۳۵ نمونه با هدف بررسی تغییرات مکانی-زمانی، نوع منبع، سهم منابع، سهم منابع بالقوه محلی و منطقه‌ای و خطرات سرطان ریه منتسب به ۱۶ PAH جمع‌آوری کردند. غلظت $PM_{2.5}$ از $۴۳/۸$ - $۸۰/۳$ میکروگرم بر متر مکعب متغیر بود و بیشترین غلظت $PM_{2.5}$ در تابستان ثبت شده بود. غلظت کل $PAHs$ ها بین $۲۴/۶$ - $۳۸/۹$ نانوگرم بر متر مکعب بود. غلظت‌های اندازه‌گیری شده برای $PAHs$ در فصل پاییز، زمستان، بهار و تابستان به ترتیب $۴۸/۳$ ، $۲۹/۵$ ، $۲۵/۹$ و $۱۶/۱$ نانوگرم بر مترمکعب بود. پنج منبع $PAHs$ به وسیله آنالیز PMF مشخص شد که غلظت $PAHs$ به ترتیب $۲۲/۳$ ، $۱۵/۶$ ، $۷/۵$ و $۳۰/۹$ درصد برای انتشارات سوخت دیزلی، انتشارات نسوخته نفتی-پتروژنیک، انتشارات منابع صنعتی،

انتشارات سوخت بنزین و انتشارات گاز طبیعی- سوختن بیومس و زغال‌سنگ بود. همچنین آن‌ها نشان دادند که منابع $PAHs$ منشأ محلی دارند و با سرعت باد کمتر از ۵ متر بر ثانیه در نزدیکی محل‌های نمونه‌برداری مرتبط است؛ غلظت‌های $PAHs$ منتسب به $PM_{2.5}$ در مناطق شرقی ناشی از مناطق دورتر بوده و به عبارتی مسیر طولانی‌تری را طی کرده‌اند و برای مناطق غربی غلظت‌های $PAHs$ با وزن مولکولی متوسط (۴ حلقه‌ای) و وزن مولکولی بالا (۵-۶ حلقه) حاصل انتشارات محلی در همان مناطق غربی بوده و مسیر زیادی را طی نکرده است (۲۵).

نتایج مطالعه حاضر مشابه تعدادی از مطالعاتی است که در تهران به پراکنش آلاینده $PM_{2.5}$ پرداخته‌اند؛ همگی این مطالعات همچون مطالعه حاضر نواحی جنوبی، غربی و تا حدودی مرکزی را نسبت به نواحی شمالی و شرقی آلوده‌تر دانسته و غلظت بالاتری از $PM_{2.5}$ را طی سال‌های مورد مطالعه برای مناطق جنوبی، غربی و تا حدودی مرکزی گزارش کرده‌اند (۴، ۱۵، ۱۶). آنچه از این مطالعات و مطالعه حاضر برمی‌آید، در تولید آلاینده $PM_{2.5}$ عوامل متعددی از جمله انواع سوخت‌های مصرفی توسط صنایع، وسایل نقلیه، سوخت‌های خانگی و گردوغبار حاصل از انواع کاربری اراضی دخیل هستند. همچنین این مطالعات به سرعت و جهت باد در توزیع این آلاینده پرداخته‌اند؛ به‌طوری‌که سرعت کمتر باد موجب کاهش حمل‌ونقل اتمسفری $PM_{2.5}$ شده و در نتیجه غلظت آن در محل تولید بالا می‌ماند؛ همین امر در تهران موجب شده است که هوای آلوده در محل ساکن مانده و ترقیق نشود. جهت غالب باد برای کلانشهر تهران، غرب به شرق می‌باشد که بلندمرتبه‌سازی‌ها در نواحی غربی موجب بسته شدن مسیر باد ورودی به تهران شده است. همچنین وجود کارخانجات شن و ماسه، شهرک‌سازی‌ها و تغییرات کاربری اراضی در نواحی غربی موجب شده است که غلظت این آلاینده در همان نواحی غربی نسبت به سایر نقاط بالاتر باشد. مطالعه آلودگی هوا در کلانشهر تهران پیچیدگی‌های بسیاری دارد؛ چراکه سوء مدیریت در بخش‌های مختلف، علت اصلی غلظت بالای آلاینده $PM_{2.5}$ در

(گاز، گازوئیل، بنزین، نفت سفید و نفت کوره)، توزیع و تراکم جمعیت، حجم ترافیک، کاربری‌های اراضی و شرایط آب‌وهوایی در سطح کلانشهر تهران و سهم آن‌ها در مقادیر غلظت PM_{2.5} مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. همچنین با توجه به نتایج به‌دست آمده از این مطالعه، به‌نظر می‌رسد عواملی خارج از محدوده شهری تهران در میزان غلظت این آلاینده سهم هستند؛ به‌همین منظور در مطالعات آینده باید نگاه ویژه‌ای به کاربری‌های اراضی و تغییرات این کاربری‌ها در حومه تهران طی سال‌های گذشته شود.

ملاحظات اخلاقی

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

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از سازمان حفاظت محیط زیست کشور و شرکت کنترل کیفیت هوای تهران به‌منظور در اختیار گذاشتن موقعیت ایستگاه‌های پایش کیفیت هوا و داده‌های غلظت آلاینده PM_{2.5} تشکر و قدردانی می‌شود.

تهران می‌باشد. حجم ترافیک و به‌دنبال آن مصرف سوخت بیشتر، وجود خودروهای فرسوده، کیفیت پایین خودروهای داخلی و عدم انطباق آن‌ها با استانداردهای بین‌المللی، استفاده نادرست از زمین و مغایر با کاربری مناسب آن، خشک شدن تالاب‌های جنوب تهران و همچنین زباله‌سوزی (به‌خصوص نواحی جنوبی)، از علل اصلی غلظت بالای آلاینده PM_{2.5} می‌باشد؛ بنابراین برای مدیریت کاهش غلظت این آلاینده به‌خصوص در نواحی جنوبی، مرکزی و غربی، نیاز به هماهنگی و مشارکت بخش‌های مختلف دولتی و خصوصی و سرمایه‌گذاری کلان در این بخش می‌باشد تا به این طریق کیفیت بهداشتی هوای تهران از نظر این آلاینده افزایش یابد.

نتیجه‌گیری

مناطق جنوبی، جنوب غرب، غرب و مرکز، بیشترین غلظت آلاینده PM_{2.5} را طی سال‌های ۱۳۹۲-۹۵ داشته‌اند که می‌تواند دلایل مختلفی داشته باشد. لازم است پژوهش‌هایی در زمینه شناسایی منابع تولید کننده این آلاینده و سهم آن‌ها در کلانشهر تهران انجام شود که بتوان با یک دید سینوپتیکی، استراتژی‌های مؤثری جهت کنترل و کاهش غلظت آلاینده PM_{2.5} ارائه گردد. بهتر است در مطالعات آینده فاکتورهای کلیدی مانند انواع سوخت‌های مصرفی

References

1. Annual Report Of Air Quality Company, Tehran 1393.
2. Amini H, Hosseini V, Schindler C, Hassankhany H, Yunesian M, Henderson SB, Künzli N. Spatiotemporal description of BTEX volatile organic compounds in a Middle Eastern megacity: Tehran Study of Exposure Prediction for Environmental Health Research (Tehran SEPEHR). Environ Pollut. 2017; 226:219-29.
3. Nadian M, Mirzaei R, Soltani Mohammadi S, Application of Moran's I Autocorrelation in Spatial-Temporal Analysis of PM_{2.5} Pollutant (A case Study: Tehran City). Journal of Environmental Health Engineering, May 2018; Vol. 5, No. 3: 197-213.
3. Annual Report Of Air Quality Company, Tehran 1393.
4. Shahbazi H, Taghvaei S, Hosseini V, Afshin H. A GIS based emission inventory development for Tehran. Urban Climate. 2016; 17:216-29.
5. Pahlavani P, Sheikhan H, Bigdeli B. Assessment of an air pollution monitoring network to generate urban air pollution maps using Shannon information index, fuzzy overlay, and Dempster-Shafer theory, A case study: Tehran, Iran. Atmos Environ. 2017; 167:254-69.
6. Arhami M, Hosseini V, Shahne MZ, Bigdeli M, Lai A, Schauer JJ. Seasonal trends, chemical speciation and source apportionment of fine PM in Tehran. Atmos Environ. 2017; 153:70-82.
7. Bahari RA, Abaspour RA, Pahlavani P. Zoning of Particulate Matters (PM) Pollution Using Local Statistical Models in GIS (Case Study: Tehran Metropolis). J. Geomat. Sci. Technol. 2016; 5(3):165-74. [in Persian].
8. Kampa M, Castanas E. Human health effects of air pollution. Environ Pollut. 2008; 151(2):362-7.
9. Sharma M, Maloo S. Assessment of ambient air PM 10 and PM 2.5 and characterization of PM 10 in the city of Kanpur, India. Atmos Environ. 2005; 39(33):6015-26.
10. John H. Seinfeld Spyros N. Pandis. 1997. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. Wiley-VCH: New York. 1997 1326 pp.
11. Fang C, Wang Z, Xu G. Spatial-temporal characteristics of

- PM2. 5 in China: A city-level perspective analysis. *J Geogr Sci.* 2016; 26(11):1519-32.
12. Shah ASV, Langrish JP, Nair H, McAllister DA, Hunter AL, Donaldson K, et al. Global association of air pollution and heart failure: a systematic review and meta-analysis. *The Lancet* 2013;382:1039-48.
13. Cadelis G, Tourres R, Molinie J. Short-term effects of the particulate pollutants contained in Saharan dust on the visits of children to the emergency department due to asthmatic conditions in Guadeloupe (French Archipelago of the Caribbean). *PLoS ONE* 2014;9(3):e91136. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0091136>.
14. Chu HJ, Huang B, Lin CY. Modeling the spatio-temporal heterogeneity in the PM10-PM2. 5 relationship. *Atmos Environ.* 2015; 102:176-82.
15. Sharipour Z, AkbariBidokhti AA. Investigation of spatial and temporal distributions of air pollutants over Tehran in cold months of 2011-2013. *J Environ Sci Technol.* 2014; 16(1):149-166. [in Persian].
16. Alizadeh-Choobari O, Bidokhti AA, Ghafarian P, Najafi MS. Temporal and spatial variations of particulate matter and gaseous pollutants in the urban area of Tehran. *Atmos Environ.* 2016; 141:443-53.
17. Zhang C, Luo L, Xu W, Ledwith V. Use of local Moran's I and GIS to identify pollution hotspots of Pb in urban soils of Galway, Ireland. *Sci Total Environ.* 2008; 398(1):212-21.
18. Fang C, Wang Z, Xu G. Spatial-temporal characteristics of PM2. 5 in China: A city-level perspective analysis. *J Geogr Sci.* 2016; 26(11):1519-32.
19. Peeters A, Zude M, Käthner J, Ünlü M, Kanber R, Hetzroni A, Gebbers R, Ben-Gal A. Getis-Ord's hot-and cold-spot statistics as a basis for multivariate spatial clustering of orchard tree data. *Comput Electron Agric.* 2015; 111:140-50.
20. Wang ZB, Fang CL. Spatial-temporal characteristics and determinants of PM 2.5 in the Bohai Rim Urban Agglomeration. *Chemosphere.* 2016; 148:148-62.
21. 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.
22. Gemmer M, Becker S, Jiang T. Observed monthly precipitation trends in China 1951-2002. *Theor Appl Climatol.* 2004; 77(1):39-45.
23. Jain, S., Sharma, S. K., Vijayan, N., & Mandal, T. K. (2020). Seasonal characteristics of aerosols (PM2. 5 and PM10) and their source apportionment using PMF: A four-year study over Delhi, India. *Environmental Pollution*, 114337.
24. Altuwayjiri, A., Taghvaei, S., Mousavi, A., Sowlat, M. H., Hassanvand, M. S., Kashani, H., ... & Sioutas, C. (2020). Association of systemic inflammation and coagulation biomarkers with source-specific PM2. 5 mass concentrations among elderly and young subjects in central Tehran. *Journal of the Air & Waste Management Association*.
25. Ali-Taleshi, M. S., Moeinaddini, M., Bakhtiari, A. R., Feiznia, S., Squizzato, S., & Bourliva, A. (2020). A one-year monitoring of spatiotemporal variations of PM2. 5-bound PAHs in Tehran, Iran: Source apportionment, local and regional sources origins and source-specific cancer risk assessment. *Environmental Pollution*, 115883.