

بررسی تغییرات زمانی-مکانی ذرات معلق ($PM_{2.5}$ و PM_{10}) شهر تهران با استفاده از GIS (۹۲-۹۹)

مریم انصاری^۱

محمود احمدی^{*۲}

Ma_Ahmadi@sbu.ac.ir

غلامرضا گودرزی^۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۹/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۴/۱۵

چکیده

زمینه و هدف: کلان شهر تهران یکی از آلوده‌ترین شهرهای جهان محسوب می‌شود. هدف اصلی این پژوهش بررسی رفتار زمانی و مکانی ذرات معلق ($PM_{2.5}$ و PM_{10}) شهر تهران در سالهای ۹۹-۹۲ می‌باشد.

روش بررسی: به منظور بررسی تغییرات آلاینده‌های هوا در مقیاس‌های زمانی و مکانی داده‌های ایستگاه‌های آلودگی سنجی شرکت کنترل کیفیت هوا طی دوره آماری (۹۹-۹۲) مورد استفاده قرار گرفت. داده‌ها با استفاده از نرم افزارهای MATLAB و Excel و SPSS، تحلیل و نتایج حاصل از تحلیل‌های آماری توزیع آلاینده‌ها در مقیاس‌های زمانی و مکانی با نرم افزار Arc Gis با تابع تحلیلی درونیابی فاصله معکوس (IDW) به صورت نقشه‌ها، جداول و نمودارها ترسیم شده است. این تحقیق در فصل بهار سال ۱۴۰۰ انجام شده است.

یافته‌ها: نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که ذرات معلق ($PM_{2.5}$ و PM_{10}) در ساعت ۵ و ۶ عصر به حداقل غلظت (۶۵ و $۲۳ \mu g/m^3$) و در ساعت ۱۲ شب تا ۱ بامداد به حداکثر غلظت (۸۱ و $۳۰ \mu g/m^3$) رسیده است. بالاترین غلظت روزانه این آلاینده‌ها مربوط به روز چهارشنبه (۸۱ و $۳۰ \mu g/m^3$) و حداقل غلظت (۷۳ و $۲۳ \mu g/m^3$) را روز جمعه به خود اختصاص داده است. بالاترین غلظت فصلی ذرات معلق (PM_{10}) و ($PM_{2.5}$) را به ترتیب فصل تابستان ($۹۰ \mu g/m^3$) و زمستان ($۳۵ \mu g/m^3$) و کمترین غلظت فصلی هر دو آلاینده مربوط به فصل بهار (۶۵ و $۲۴ \mu g/m^3$) می‌باشد. نتایج حاصل از درونیابی فاصله معکوس (IDW) نشان داد که مناطق غربی، جنوبی و در فصل

۱- دانشجوی دکتری آب و هواشناسی شهری، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲- دانشیار گروه آب و هواشناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. * (مسئول مکاتبات)

۳- دانشیار گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی اهواز، اهواز، ایران مرکز تحقیقات آلودگی هوا، دانشگاه علوم پزشکی اهواز، اهواز، ایران.

تابستان مناطق مرکزی بیشتر از سایر مناطق درگیر ذرات معلق (PM_{10}) می‌باشند اما در همه فصول علاوه بر مناطق غربی و جنوبی، مناطق مرکزی دارای غلظت بالایی از ذرات معلق ($PM_{2.5}$) می‌باشند.

بحث و نتیجه‌گیری: در بعضی از روزها و ماه‌های سال و مناطق خاصی از شهر تهران غلظت ذرات معلق بیشتر از حد مجاز می‌شود، بنابراین باید برنامه‌ریزی جهت مدیریت کنترل ذرات معلق و کاهش آلودگی هوا مورد استفاده برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیرندگان شهری قرار گیرد.

واژه های کلیدی: تغییرات زمانی- مکانی، PM_{10} ، $PM_{2.5}$ ، GIS، تهران.

Investigation of Temporal – spatial variations of particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀) in Tehran city Using GIS (2013-2020)

Maryam Ansari¹

Mahmoud Ahmadi^{2*}

Ma_Ahmadi@sbu.ac.ir

Gholamreza Goudarzi³

Admission Date: December 19, 2021

Date Received: July 6, 2021

Abstract

Background and Objective: Metropolis of Tehran is one of the most polluted cities in the world. The present study aims to analyze the temporal-spatial behavior of particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀) in Tehran city.

Material and Methodology: Thus, pollution- metric station data of Tehran Air Quality Control Company were used for evaluating the variations of air pollutants in temporal-spatial scales during 2013-2020. The results of statistical analysis of pollutant distribution in temporal-spatial scales were provided by using Arc GIS software and analytical function of inverse Distance Weighting interpolation (IDW) as maps, tables and graphs was demonstrated.

Findings: Based on the results, particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) reached the minimum (65 and 23 µg/m³) and maximum concentration (81 and 30 µg/m³) at 18 and 24 p.m., respectively. In addition, maximum (81 and 30 µg/m³) and minimum concentration (73 and 23 µg/m³) of these pollutants was respectively related to Wednesday and Friday. Maximum seasonal concentration of particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) relates to summer (90 µg/m³) and winter (35 µg/m³) respectively and the minimum seasonal concentration (65 and 24 µg/m³) of both pollutants relate to spring. The results of inverse Distance Weighting interpolation (IDW) indicated that west, south and central regions of Tehran in summer season involved with particulate matter (PM₁₀) more than other regions. But in all seasons, except the western and southern regions, the central regions have a high concentration of particulate matter (PM_{2.5}).

Discussion and Conclusion: The particulate matter concentrations is more than its allowable limit in specific regions of Tehran in some yearly days and months. Therefore, city programmers and decision_makers must have schedule table for particulate matter control management and air pollution reduction.

Keywords: Temporal-spatial variations, PM_{2.5}, PM₁₀, GIS, Tehran.

¹ PhD Student of Climatology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

²- Associate Professor, Department of Climatology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. * (Corresponding Author)

³- Associate professor, Department of Environmental Health Engineering, Ahvaz Jundishapur University of Medical Sciences, Ahvaz, Iran.

مقدمه

از آلاینده‌های مهم محیط‌زیستی در مناطق شهری در نظر گرفته شده است (۱۵).

بر اساس آخرین مطالعات، خورشید دوست و همکاران (۱۳۹۶) تغییرات زمانی- مکانی ذرات معلق PM_{10} را در شهر تبریز (۱۶) و اسراری و پایدار (۱۳۹۶) نیز روند تغییرات غلظت ذرات معلق شهر مشهد را طی سال‌های ۹۵-۹۰ مورد بررسی قرار دادند (۱۷). همچنین ذاکری کیا و همکاران (۱۳۹۸) مدل‌سازی و تغییرات زمانی مکانی پراکنش ذرات معلق در سطح شهر تهران را بررسی کردند (۱۸). نتایج هر سه مطالعه نشان داد که غلظت ذرات معلق PM_{10} در فصل تابستان نسبت به فصل‌های دیگر بیشتر است اما ذرات معلق $PM_{2.5}$ در فصل پاییز و زمستان غلظت بیشتری را نشان می‌دهند. سجادی و همکاران (۱۳۹۸) با مطالعه ارزیابی روش‌های قطعی و زمین آمار در پهنه‌بندی غلظت ذرات معلق (PM_{10} و $PM_{2.5}$) شهر سبزه‌وار دریافتند که مناسب‌ترین روش میان‌یابی برای پهنه‌بندی غلظت ذرات معلق روش قطعی با تابع IDW می‌باشد (۱۹). زرنندی و نصیری (۱۳۹۹) با مطالعه تحلیل فضایی-زمانی آلاینده $PM_{2.5}$ شهر تهران به این نتیجه رسیدند که مناطق غربی، جنوب غربی، جنوبی و مرکزی از آلوده-ترین مناطق شهر تهران می‌باشند (۲۰). رئیس پور (۱۴۰۰) به ارزیابی زمانی مکانی غلظت ذرات معلق $PM_{2.5}$ ایران پرداخت. نتایج نشان داد بیشترین و کم‌ترین تراکم ذرات معلق $PM_{2.5}$ به ترتیب در فصل تابستان و زمستان اتفاق افتاده است و از لحاظ توزیع فضایی، بیشترین تراکم ذرات معلق در بخش‌های جنوبی، شرقی و شمال شرق می‌باشد (۲۱). گارسیا و همکاران (۲۰۱۸) تغییرات غلظت PM_{10} و $PM_{2.5}$ را در هوای شهری شمال اسپانیا در مقیاس‌های زمانی مختلف با استفاده از مدل آماری تحلیل واریانس (ANOVA) مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد بالاترین غلظت میانگین‌های ماهانه PM_{10} و $PM_{2.5}$ مربوط به ماه‌های پاییز و زمستان است. (۲۲). گوتام و بریما (۲۰۲۰) تغییرات زمانی مکانی ذرات معلق را در شهر چنای هند طی سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۸ مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد

امروزه هوای بسیاری از شهرهای ایران به‌ویژه کلان‌شهرها، از کیفیت مطلوبی برخوردار نیست (۱). رشد سریع فناوری باعث افزایش بی‌رویه آلودگی هوا در اکثر کشورهای جهان شده است (۲) و متأسفانه با پیشرفت صنعت و با گام برداشتن به سوی مکانیک و ماشین‌آلات آلاینده‌های بسیاری وارد محیط زیست و به طور شدیدی وارد هوای شهرها شده است (۳). آلودگی هوا به‌وسیله ذرات معلق (PM) به تغییر در ترکیبات طبیعی جو به علت ذرات ورودی ناشی از عوامل انسانی و طبیعی مربوط می‌شود. (۴). ذرات معلق شامل مخلوطی از ذرات جامد و مایع است که در شکل، اندازه، تعداد، ترکیب شیمیایی، سطح ناحیه، قابلیت حل و منشأ متفاوت می‌باشند و به علت این تنوع بعضی ذرات اثرات بهداشتی قوی‌تری نسبت به دیگران دارند (۵) و ممکن است از منابع طبیعی و یا منابع انسانی باشند (۶). توزیع مکانی و زمانی غلظت این آلاینده تحت تأثیر شدت تغییرات آب و هوایی، شدت ترافیک، فاصله از جاده و منابع انتشار می‌تواند بسیار متغیر باشد (۷). معمولاً ذرات منتقله توسط هوا دارای اندازه‌ای با رنج ۵۰۰-۰/۰۱ میکرومتر هستند که بخش عمده آن را مواد ذره‌ای در رنج ۱۰-۰/۱ میکرومتر تشکیل می‌دهد (۸). در یک دسته‌بندی این ذرات معلق شامل PM_{10} ، $PM_{2.5}$ ، PM_1 می‌باشند (۹). ذرات ریز آلاینده‌های اصلی تروپوسفر هستند و یکی از شاخص‌های کیفی آنها غلظت توده (PM_{10}) و ($PM_{2.5}$) است (۱۰) و جزء اصلی آلودگی هوا است. اولین باری که $PM_{2.5}$ وارد فرهنگ لغت عمومی شد در سال ۱۹۹۷ بود (۱۱). همچنین این ذرات اثر سمی بر روی سلامتی انسان دارد (۱۲) و همین‌طور باعث کاهش دید، تأثیرگذاری بر تابش خورشید، تغییر در خصوصیات ابر و ... می‌شوند (۱۳). در کلان‌شهرها منابع اصلی PM_{10} و $PM_{2.5}$ ترکیبی از سوخت‌های فسیلی اتومبیل‌ها، تجهیزات ساختمانی، کوره‌ها و نیروگاه‌ها می‌باشد. ذرات ریز مثل ($PM_{2.5}$ و PM_1) از طریق احتراق منتشر می‌شوند در حالیکه ذرات درشت‌تر مانند (PM_{10}) به وسیله فرایندهای مکانیکی به داخل هوا نفوذ می‌کنند (۱۴). بنابراین ذرات معلق به عنوان یکی

روش بررسی

این تحقیق در فصل بهار سال ۱۴۰۰ انجام شده است. داده‌های مورد نیاز شامل داده‌های ساعتی ذرات معلق (PM_{10} و $PM_{2.5}$) سال ۹۹-۹۲ شهر تهران می‌باشد که از شرکت کنترل کیفیت هوا اخذ و با استفاده از دستور کد نویسی در نرم افزار MATLAB داده‌های صفر، منفی و مفقود حذف گردید. سپس میانگین‌های ساعتی، روزانه، هفتگی، ماهانه و فصلی در نرم افزار MATLAB محاسبه شد و گراف‌های مورد نیاز در Excel ترسیم شد و جهت مقایسه با استانداردهای محیط زیستی، استاندارد هوای آزاد EPA^۱ و همچنین استاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO) ملاک عمل قرار گرفت. حداکثر غلظت ۲۴ ساعته استاندارد EPA برای ذرات معلق (PM_{10}) برابر با $150 \mu g/m^3$ و برای ذرات معلق ($PM_{2.5}$) $35 \mu g/m^3$ می‌باشد. حداکثر غلظت سالانه استاندارد EPA برای ذرات معلق ($PM_{2.5}$) نیز برابر با $12 \mu g/m^3$ و حداکثر غلظت سالانه استاندارد WHO برای ذرات معلق (PM_{10}) برابر با $20 \mu g/m^3$ می‌باشد. جهت انجام درون‌یابی روش‌های IDW، Spline و Kriging بر مقادیر غلظت فصلی ذرات معلق (PM_{10} و $PM_{2.5}$) اعمال گردید و میزان خطای RMSE به شرح جدول ۱ مربوط به روش گزارش شد، بنابراین نقشه‌های پهنه‌بندی مکانی غلظت فصلی ذرات معلق با استفاده از نرم افزار Arc Gis با تابع تحلیلی درونیابی فاصله معکوس (IDW) تولید شد.

که غلظت ذرات معلق PM_{10} در مجاورت مناطق صنعتی بالاتر است همچنین در فصل تابستان به علت اثر فصل خشک موسمی باعث می‌شود تا غلظت این ذرات نسبت به دیگر فصل‌ها بیشتر باشد. (۲۳).
ذرات معلق به ویژه ذرات کوچکتر از $5/2 \mu$ به حدی در هوای تهران وجود دارند که در هر ایستگاهی نمی‌توان استاندارد مربوطه را تأیید شده دانست (۲۴). همچنین بسیاری از مطالعات اپیدمیولوژیکی نشان داده است که مواجهه با آلاینده‌های هوا اثرات سوئی را برای سلامتی انسان به دنبال دارد (۲۵). در سال‌های اخیر یکی از آلاینده‌هایی که بیشترین تهدید را برای شهر تهران داشته است ذرات معلق بخصوص ذرات با قطر کمتر از $2/5$ میکرون بوده است (۲۶) که به علت توانایی نفوذ به داخل آلوئول‌های ریوی دارای بیشترین اثرات بهداشتی بوده است. آگاهی از اینکه یکی از معضلات اساسی شهر تهران، آلودگی هوا و افزایش آلاینده‌های مختلف بخصوص ذرات معلق در سال‌های اخیر و همچنین به بار آمدن خسارت‌های مالی، جانی و اجتماعی عمده می‌باشد، باعث شده تا تغییرات زمانی و مکانی ذرات معلق را در آلوده‌ترین شهر ایران شناسایی و پیشنهادها و راهبردهایی را در این زمینه ارائه نماییم.

جدول ۱- میزان خطای RMSE روش‌های مختلف درون‌یابی برای ذرات معلق (PM_{10} , $PM_{2.5}$)Table 1. RMSE values for different interpolation methods of particulate matter (PM_{10} and $PM_{2.5}$)

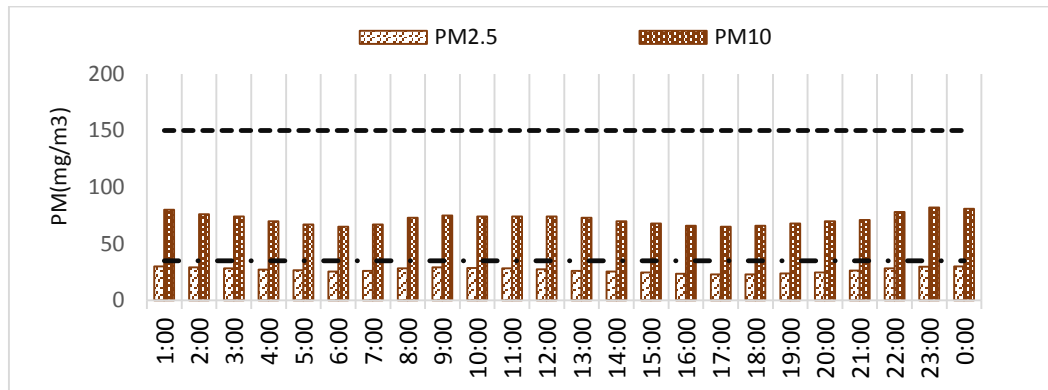
آلاینده هوا	روش درون‌یابی	میزان RMSE
$PM_{2.5}$	IDW	۱/۲۵۰۲
	SPLINE	۵/۹۴۷۶
	ORDINARY KRIGING	۶/۶۷۷۵
PM_{10}	IDW	۱/۰۱۴۲
	SPLINE	۷/۷۵۲۹
	ORDINARY KRIGING	۱۵/۹۷۹۲۱

رابطه بین ذرات معلق (PM_{10} و $PM_{2.5}$) با استفاده از آزمون همبستگی پیرسون (رابطه ۱) طی بازه‌های زمانی مختلف تعیین گردید. به دلیل این‌که مقادیر ذرات معلق (PM_{10} , $PM_{2.5}$) دارای توزیع نسبتاً نرمالی بودند از این آزمون استفاده شده است.

$$r_{xy} = \frac{\sum xy}{\sqrt{\sum x^2 \sum y^2}} \quad (1)$$

یافته‌ها

نتایج حاصل از تغییرات زمانی ذرات معلق (PM_{10}) و ($PM_{2.5}$) شهر تهران نتایج حاصل از تغییرات زمانی (ساعتی، روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه) ذرات معلق (PM_{10} و $PM_{2.5}$) شهر تهران در قالب شکل‌های ۱-۵ نشان داده شده است.

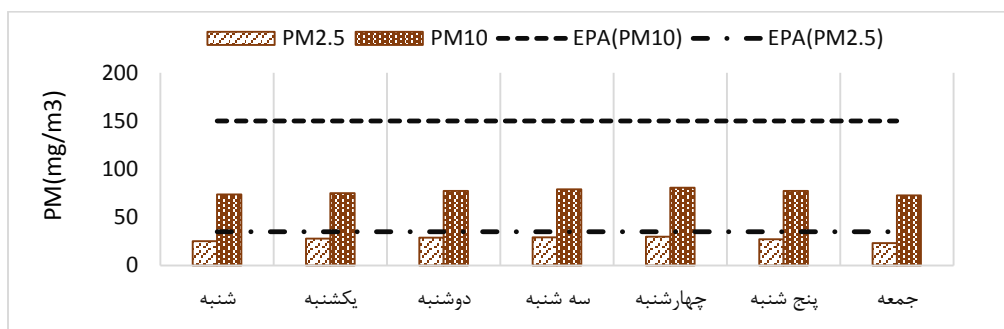


شکل ۱- تغییرات میانگین ساعتی ذرات معلق (PM_{10} و $PM_{2.5}$) در شهر تهران طی سال‌های ۹۹-۱۳۹۲

Figure 1. mean hourly variations of particulate matter concentration (PM_{10} and $PM_{2.5}$) in Tehran during 2013-2020

از ۲/۵ میکرون، اولین نقطه بیشینه در ساعت ۹ صبح به علت ترافیک صبحگاهی بروز نموده است و هم زمان با گرم شدن هوا در ساعات میان روز و کاهش حجم ترافیک، با کاهش غلظت در این ساعات روبرو هستیم. مقایسه تغییرات میانگین ساعتی غلظت ذرات معلق PM_{10} و $PM_{2.5}$ شهر تهران با استاندارد EPA نشان داد که مقادیر ساعتی هر دو آلاینده نسبت به استاندارد EPA پایین‌تر می‌باشد.

مطابق شکل ۱ غلظت هر دو آلاینده از ساعت ۶ تا ۹ صبح افزایشی بوده و از ساعت ۹ صبح روندی کاهشی داشته تا ساعت ۶ عصر که به حداقل غلظت $23 \mu g/m^3$ برای $PM_{2.5}$ و $62 \mu g/m^3$ برای ذرات معلق PM_{10} رسیده است. از ساعت ۶ عصر تا ۱۲ شب روند تغییرات غلظت این دو آلاینده صعودی می‌باشد که به غلظت $30 \mu g/m^3$ برای $PM_{2.5}$ و حدود $81 \mu g/m^3$ برای PM_{10} رسیده است. اساساً به علت اهمیت حمل و نقل در تولید و انتشار آلاینده ذرات معلق با قطر کوچکتر

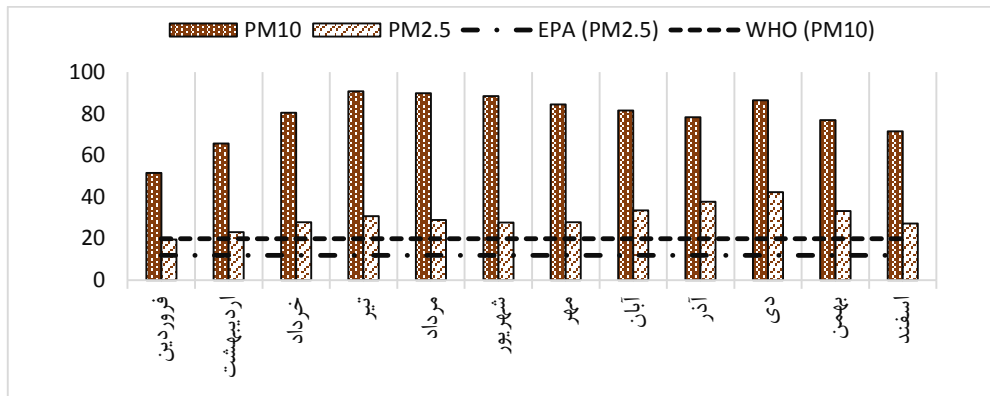


شکل ۲- تغییرات میانگین روزانه غلظت ذرات معلق (PM_{10} و $PM_{2.5}$) در شهر تهران طی سال‌های ۹۹-۱۳۹۲

Figure 2. mean daily variations of particulate matter concentration (PM_{10} and $PM_{2.5}$) in Tehran during 2013-2020

همچنین غلظت آلاینده‌ها از روز چهارشنبه تا روز جمعه روند نزولی داشته و به حداقل غلظت در روز جمعه رسیده است. مقایسه میانگین روزانه غلظت ذرات معلق PM_{2.5} و PM₁₀ شهر تهران با استاندارد EPA نشان داد که مقادیر روزانه هر دو آلاینده نسبت به استاندارد EPA پایین تر می‌باشد.

مطابق شکل ۲ غلظت هر دو آلاینده از روز شنبه تا روز چهارشنبه روند صعودی داشته و از ۲۵ μg/m³ برای PM_{2.5} و ۷۳ μg/m³ برای PM₁₀ در روز شنبه به ۳۰ μg/m³ برای PM_{2.5} و ۸۱ μg/m³ برای PM₁₀ در روز چهارشنبه رسیده است. علت این تغییرات صعودی می‌تواند به دلیل افزایش حجم ترندهای شهری باشد.

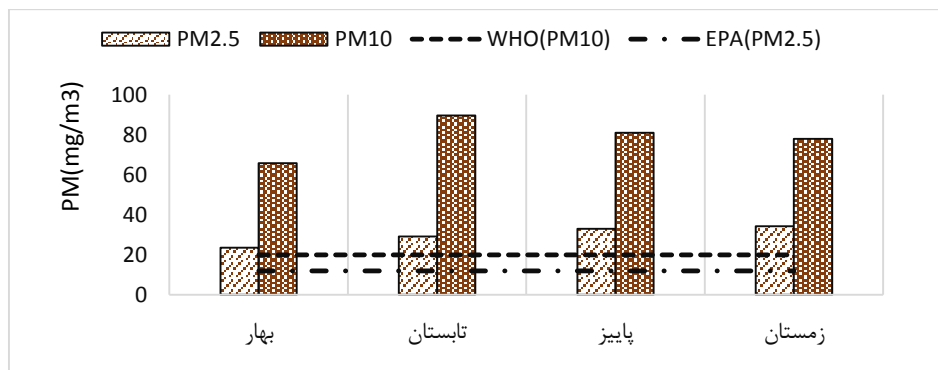


شکل ۳- تغییرات میانگین ماهانه غلظت ذرات معلق (PM_{2.5} و PM₁₀) در شهر تهران طی سال‌های ۹۹-۱۳۹۲

Figure 3. mean monthly variations of particulate matter concentration (PM₁₀, PM_{2.5}) in Tehran during 2013-2020

۹۰ μg/m³ مربوط به تیر ماه و ۴۵ μg/m³ برای دی ماه می‌باشد. فروردین ماه نیز کمترین غلظت ماهانه هر دو آلاینده را دارا می‌باشد. مقایسه میانگین ماهانه غلظت ذرات معلق PM_{2.5} و PM₁₀ شهر تهران با استاندارد EPA (۱۲ μg/m³) و استاندارد WHO (۲۰ μg/m³) نشان داد که مقادیر ماهانه هر دو آلاینده نسبت به استاندارد سالانه EPA و WHO بالاتر است.

مطابق شکل ۳ غلظت هر دو آلاینده از فروردین ماه با افزایش دما سیری صعودی دارد و از ۱۹ μg/m³ برای PM_{2.5} و ۵۳ μg/m³ برای PM₁₀ در فروردین ماه به ۳۰ μg/m³ برای PM_{2.5} و ۵۳ μg/m³ برای PM₁₀ در تیر ماه رسیده است. به‌طور کلی حداکثر غلظت ماهانه PM_{2.5} و PM₁₀ به ترتیب حدود



شکل ۴- تغییرات میانگین فصلی غلظت ذرات معلق (PM_{2.5} و PM₁₀) در شهر تهران طی سال‌های ۹۹-۱۳۹۲

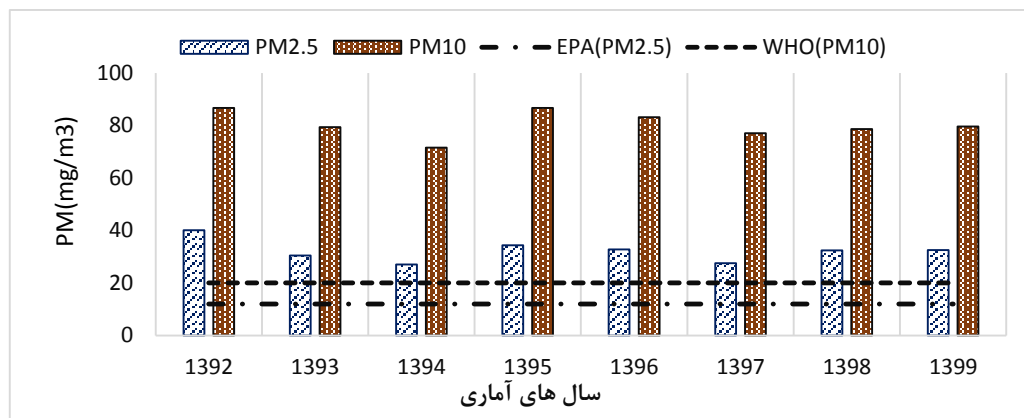
Figure 4. mean Seasonal variations of particulate matter concentration (PM₁₀, PM_{2.5}) in Tehran during 2013-2020

غلظت فصلی (۶۰ μg/m³) این آلاینده مربوط به فصل بهار می‌باشد. تغییرات فصلی ذرات معلق (PM_{2.5}) نشان می‌دهد که حداکثر غلظت فصلی این آلاینده مربوط به ماه زمستان (۳۰ μg/m³)

بر اساس شکل ۴ فصل تابستان حداکثر غلظت فصلی (۹۰ μg/m³) ذرات معلق (PM₁₀) را به خود اختصاص داده است و حداقل

(۲۰ $\mu\text{g}/\text{m}^3$) نشان داد که مقادیر فصلی هر دو آلاینده نسبت به استاندارد سالانه EPA و WHO بالاتر است.

(۳۵) و حداقل غلظت آن مربوط به فصل بهار ($23 \mu\text{g}/\text{m}^3$) می-باشد. مقایسه میانگین فصلی غلظت ذرات معلق PM_{10} و $\text{PM}_{2.5}$ شهر تهران با استاندارد EPA ($12 \mu\text{g}/\text{m}^3$) و استاندارد WHO



شکل ۵- تغییرات میانگین سالانه غلظت ذرات معلق ($\text{PM}_{2.5}$ و PM_{10}) در شهر تهران طی سال های ۹۹-۱۳۹۲

Figure 5. mean annual variations of particulate matter concentration (PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$) in Tehran during 2013-2020

سالانه EPA و WHO نشان داد طی سال های ۹۹-۱۳۹۲ نسبت به استاندارد سالانه EPA و WHO مقادیر بالاتری را نشان می دهد.

بررسی رابطه بین غلظت ذرات معلق ($\text{PM}_{2.5}$ و PM_{10}) با استفاده از آزمون همبستگی پیرسون رابطه بین غلظت ذرات معلق ($\text{PM}_{2.5}$ و PM_{10}) در بازه های زمانی ساعتی، روزانه، ماهانه و فصلی محاسبه شده است. جدول ۲ نتایج حاصل از همبستگی پیرسون بین ذرات معلق شهر تهران را نشان می دهد.

مطابق شکل ۵ میانگین سالانه غلظت ذرات معلق (PM_{10}) طی سال های ۹۹-۱۳۹۲ روند نامنظمی را نشان می-دهند. میانگین غلظت سالانه ذرات معلق (PM_{10}) از حدود $87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ در سال ۹۲ و ۹۵ به کمترین مقدار خود ($71 \mu\text{g}/\text{m}^3$) در سال ۱۳۹۳ رسیده است. همچنین میانگین غلظت سالانه ذرات معلق ($\text{PM}_{2.5}$) از حداکثر مقدار ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) به حداقل میزان ($27 \mu\text{g}/\text{m}^3$) در سال ۱۳۹۲ رسیده است. مقایسه غلظت سالانه ذرات معلق ($\text{PM}_{2.5}$ و PM_{10}) شهر تهران با استاندارد

جدول ۲- نتایج حاصل از همبستگی بین ذرات معلق ($\text{PM}_{2.5}$ و PM_{10})

Table 3. Results of correlation between particulate matter (PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$)

فصلی	ماهانه	روزانه	ساعتی	$\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$
۰/۵۵۲	۰/۵۴۸	۰/۹۰۹	۰/۸۹۰	ضریب همبستگی
۰/۴۴۸	۰/۰۴۶	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰	سطح معناداری

($\text{PM}_{2.5}$) نسبت تغییرات میانگین غلظت ذرات معلق (PM_{10}) خیلی کم می باشد و از طرفی به ازای افزایش یا کاهش میانگین غلظت ذرات معلق ($\text{PM}_{2.5}$)، میانگین غلظت ذرات معلق (PM_{10}) نیز افزایش یا کاهش پیدا می کند، همبستگی مثبت و معناداری بین میانگین غلظت هر دو آلاینده وجود دارد.

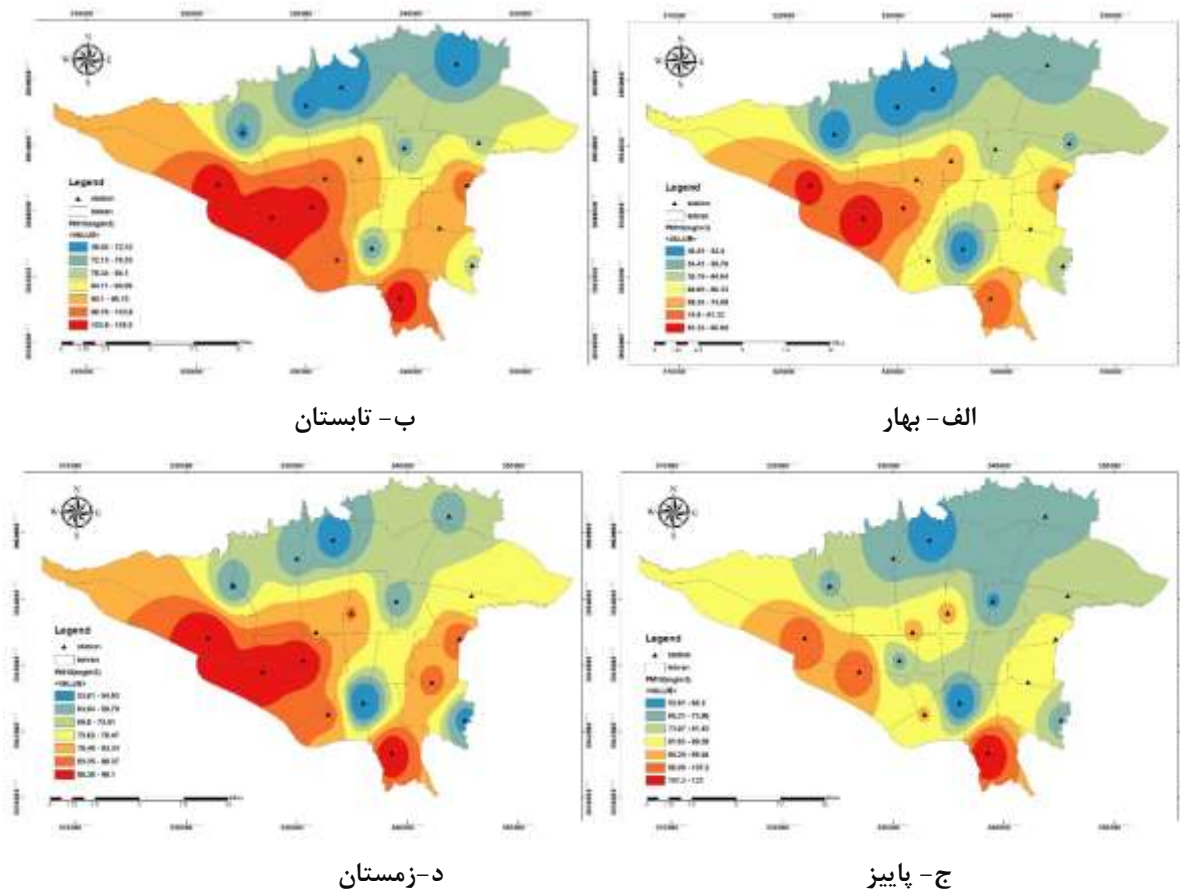
مطابق با جدول ۲ بین ذرات معلق (PM_{10} و $\text{PM}_{2.5}$) در بازه های ساعتی، روزانه و ماهانه با ضریب همبستگی (۰/۸۹۰)، (۰/۹۰۹) و (۰/۵۴۸) با سطح معناداری کمتر (۰/۰۵) همبستگی مستقیمی برقرار هست اما در بازه های فصلی هیچ نوع همبستگی بین این آلاینده ها وجود ندارد. در بازه زمانی ساعتی، روزانه و ماهانه به علت اینکه تغییرات میانگین غلظت ذرات معلق

نتایج حاصل از تغییرات مکانی ذرات معلق (PM_{10}) و

$PM_{2.5}$ شهر تهران

شکل 6 و 7 تغییرات مکانی ذرات معلق ($PM_{2.5}$ و PM_{10}) شهر

تهران را با استفاده از روش IDW نشان می‌دهد.



شکل ۶ - تغییرات مکانی میانگین غلظت ذرات معلق (PM_{10}) در شهر تهران طی سال‌های ۹۹-۱۳۹۲

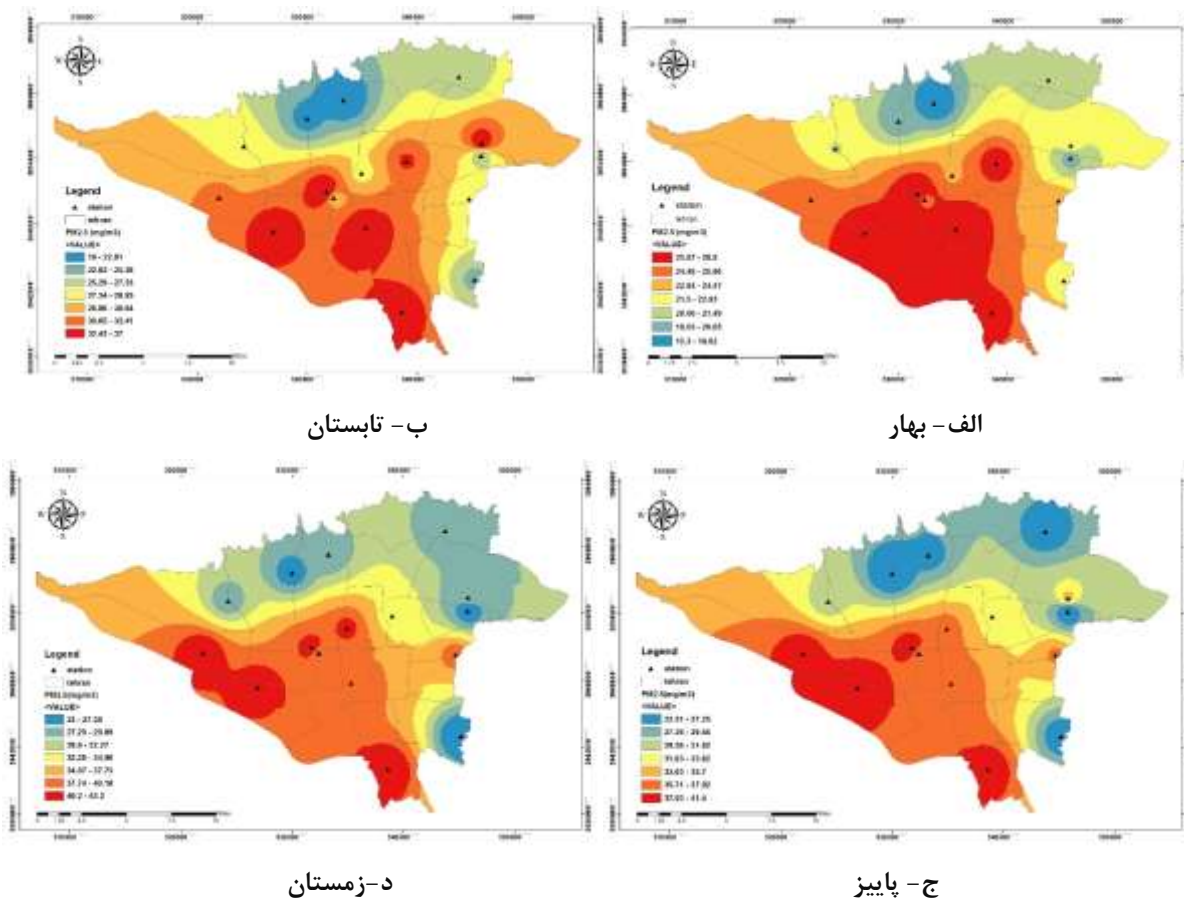
Figure 6. spatial variations of particulate matter concentration mean (PM_{10}) in Tehran during 2013-2020

آلاینده به $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ رسیده است. در فصل زمستان مناطق غربی به سمت مرکز، شمال غربی، ایستگاه شهری و حدودی از مناطق شرقی تهران درگیر غلظت نسبتاً بالای ذرات معلق (PM_{10}) می‌باشند به طوری که غلظت این آلاینده از $107 \mu\text{g}/\text{m}^3$ در شهری و غرب تهران به $88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ در مرکز و به پایین‌ترین حد خود با غلظت $64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ در مناطق شمالی، جنوب شرقی و ایستگاه شهرداری منطقه ۱۹ رسیده است. فصل تابستان ذرات معلق (PM_{10}) فراگیرتر شده و تنها مناطق شمالی شهر تهران غلظت کم‌تر از $72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ را نشان می‌دهد. در ۴ ایستگاه غربی و جنوبی غلظت ذرات معلق (PM_{10}) مقدار $116 \mu\text{g}/\text{m}^3$

مطابق شکل ۶ کم‌ترین توزیع ذرات معلق (PM_{10}) مربوط به فصل پاییز می‌باشد که غالباً تراکم این آلاینده با غلظت $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ مربوط به ایستگاه شهری و سپس $107 \mu\text{g}/\text{m}^3$ در مناطق غربی تهران می‌باشد و به سمت مناطق شرقی و شمال از غلظت ذرات معلق کاسته شده به طوری که در مناطق شرقی از حدود $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ به $66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ در مناطق شمالی رسیده است. در فصل بهار ایستگاه‌های واقع در مناطق شمالی و همین‌طور ایستگاه شهرداری منطقه ۱۶ در پهنه جنوبی با غلظت تقریبی $54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ از کیفیت هوای نسبتاً مطلوبی برخوردار هستند و تنها در مناطق غربی و تا حدی ایستگاه شهری غلظت این

مقایسه غلظت فصلی ذرات معلق (PM_{10}) شهر تهران نسبت به استاندارد سالانه WHO (۲۰ میکروگرم بر متر مکعب) نشان داد که در همه مناطق شهر تهران غلظت ذرات معلق (PM_{10}) نسبت به استاندارد WHO مقدار بالاتری را دارا می‌باشند.

میکروگرم بر متر مکعب را نشان می‌دهد. به‌طور کلی بیشترین غلظت ذرات معلق کمتر از ۱۰ میکرون شهر تهران در مناطقی دیده می‌شود که بیشتر در معرض گرد و غبار با منشأ خارج از شهر هستند. لازم به ذکر است علاوه بر تأثیر ترافیک و پدیده گرد و غبار، فعالیت‌های منابع ساکن آلودگی هوا از جمله فعالیت‌های ساختمانی و پروژه‌های عمرانی در اطراف ایستگاه‌ها نیز در انتشار این آلاینده مؤثر می‌باشند.



شکل ۷- تغییرات مکانی ذرات معلق ($PM_{2.5}$) در شهر تهران طی سال‌های ۹۹-۱۳۹۲

Figure 7. spatial variations of particulate matter concentration mean ($PM_{2.5}$) in Tehran during 2013-2020

آلاینده ذره‌ای ($PM_{2.5}$) محدود به مناطق مرکزی، غربی و جنوبی با غلظت بالای $40 \mu g/m^3$ می‌باشد اما حداقل غلظت این آلاینده در فصل پاییز محدود به مناطق شمالی، شمال شرق و جنوب شرقی با غلظت $27 \mu g/m^3$ می‌باشد. فصل زمستان نیز مانند فصل پاییز ذرات معلق ($PM_{2.5}$) تنها در مناطق مرکزی، غربی و جنوبی شهر تهران توزیع شده اما غلظت این آلاینده به بالاترین حد خود ($43 \mu g/m^3$) نسبت به دیگر فصل‌ها رسیده است. عامل اصلی در تجمع آلاینده مذکور را می‌توان افزایش

بر اساس شکل ۷ بیشترین غلظت ذرات معلق ($PM_{2.5}$) در فصل بهار مربوط به ایستگاه‌های مرکزی، غربی و جنوبی می‌باشد که به غلظت $28 \mu g/m^3$ نیز رسیده و به سمت مناطق شرقی و شمال غربی غلظت ذرات معلق مقدار $24 \mu g/m^3$ را نشان می‌دهد. فصل تابستان نسبت به دیگر فصول، گستره بیشتری از سطح شهر تهران درگیر ذرات معلق ($PM_{2.5}$) می‌باشند به طوری که تنها ایستگاه‌های شمالی از کیفیت هوای نسبتاً خوبی برخوردار هستند. همچنین فصل پاییز مناطق آلوده از منظر

شرق تهران از جمله ایستگاه‌هایی هستند که کمترین مقادیر غلظت ذرات معلق (PM_{2.5}) در آنها به ثبت رسیده است. همین-طور بیشترین غلظت ذرات معلق (PM_{2.5}) مربوط به مناطق مرکزی شهر تهران می‌باشد که این امر می‌تواند بالا بودن حجم ترافیک شهری در مناطق مرکزی، جابجایی جمعیت زیاد در این منطقه، فرایند احتراق خودروها و منابع ساکن شهری، انتشار از منابع طبیعی خارج و داخل شهر و همچنین انتقال از چشمه‌های تولید گرد و غبار در مناطق جنوب و جنوب غربی تهران را تأثیر گذار دانست.

مقایسه میانگین ساعتی و روزانه غلظت ذرات معلق (PM_{2.5}) و (PM₁₀) شهر تهران نسبت به استاندارد EPA (۳۵ و ۱۵۰ میکروگرم بر متر مکعب) نشان داد در همه ساعات شبانه روز و در همه روزهای هفته غلظت ذرات معلق (PM_{2.5}) و (PM₁₀) نسبت به میانگین ۲۴ ساعته استاندارد EPA پایین‌تر است. اما مقایسه میانگین ماهانه، فصلی و سالانه غلظت ذرات معلق (PM_{2.5}) نسبت به استاندارد سالانه EPA و ذرات معلق (PM₁₀) نسبت به استاندارد سالانه WHO نشان داد که در این بازه‌های زمانی غلظت ذرات معلق (PM_{2.5}) و (PM₁₀) نسبت به استاندارد سالانه EPA و استاندارد سالانه WHO بالاتر می‌باشد. نتایج حاصل از همبستگی پیرسون بین ذرات معلق (PM_{2.5}) و (PM₁₀) نشان داد که این آلاینده‌ها در بازه‌های زمانی فصلی هیچ گونه همبستگی ندارند، اما طی روزهای مختلف هفته و بازه زمانی ساعتی و ماهانه با سطح اطمینان ۰.۹۵٪ و ۰.۹۹٪ دارای ارتباط مستقیم و معناداری می‌باشند.

با توجه به این که تمام اهداف پژوهش‌های مرتبط تعیین تغییرات زمانی مکانی ذرات معلق (PM_{2.5} و PM₁₀) می‌باشد، نتایج این تحقیق نیز اکثر نتایج مطروح در پیشینه را تأیید می‌کند. از جمله با نتایج تحقیقات (۱۶)، (۱۷)، (۱۸) و (۲۰) که غلظت ذرات معلق PM₁₀ در فصل تابستان نسبت به فصل‌های دیگر بیشتر است اما ذرات معلق PM_{2.5} در فصل پاییز و زمستان غلظت بالاتری را نشان می‌دهد مطابقت دارد. همچنین نتایج پژوهش (۱۹) که دریافتند مناسب‌ترین روش میان‌یابی برای پهنه‌بندی غلظت ذرات معلق روش قطعی با تابع IDW می‌باشد و همین‌طور

برقراری شرایط جوی پایدار در سطح منطقه، احتمال وقوع وارونگی دمای شدید در لایه نزدیک سطح زمین و ازدیاد حجم تردد خودروها طی ماه‌های سرد سال دانست. به طور کلی غلظت فصلی ذرات معلق (PM_{2.5}) در همه مناطق شهر نسبت به استاندارد سالانه EPA (۱۲ μg/m³) مقادیر بالاتری را نشان می‌دهند.

بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر تغییرات زمانی- مکانی ذرات معلق (PM₁₀) و (PM_{2.5}) شهر تهران را طی دوره آماری ۹۹-۹۲ مورد بررسی قرار داد. نتایج حاصل از تغییرات زمانی ذرات معلق نشان داد تغییرات ساعتی ذرات معلق (PM_{2.5} و PM₁₀) با هم منطبق هستند. پیک این دو آلاینده در ساعات ۱۲ شب تا ۱ بامداد می‌باشد و در ساعات ۵ و ۶ عصر به حداقل خود کاهش می‌یابند. طی روزهای اوایل هفته به تدریج بر غلظت ذرات معلق (PM₁₀) و (PM_{2.5}) افزوده شده و سرانجام در پایان هفته با کاهش حجم ترافیک و تردد‌های شهری میزان غلظت این آلاینده‌ها نیز به حداقل رسید. تغییرات فصلی ذرات معلق شهر تهران نشان داد بیشترین غلظت فصلی ذرات معلق (PM_{2.5} و PM₁₀) را به ترتیب فصل تابستان و زمستان به خود اختصاص داده است و حداقل غلظت هر دو آلاینده مربوط به فصل بهار می‌باشد. در مجموع فصل تابستان مناطق بیشتری از شهر تهران درگیر ذرات معلق (PM₁₀) می‌باشند. شهر تهران از سمت جنوب به‌طور عمده با بیابان‌های رسی و زمین‌های نمکی احاطه شده است. این بیابان‌ها که در حاشیه شمالی کویر مرکزی ایران واقع شده‌اند، نقش قابل ملاحظه‌ای بعنوان کانون ریزگرد برای شهر تهران دارند. بطور معمول در فصل تابستان، وجود اختلاف دما (گرادیان فشار) بین مناطق کویری واقع در جنوب شهر تهران با اقلیم خشک و نیمه خشک شهر تهران، باعث وزش بادهای شمال‌سو در این منطقه می‌شود. که قابلیت تولید ریزگرد و ذرات معلق از کانون‌های واقع در جنوب شهر تهران و انتقال آن‌ها به جو این شهر را دارند. تجمع ذرات معلق (PM_{2.5}) در شهر تهران طی فصول مختلف شامل مناطق غربی، جنوبی و بخصوص مناطق مرکزی شهر تهران می‌باشد. ایستگاه‌های شمالی، شرقی و جنوب

- Medical Sciences, 19(12), 78-88. (In Persian)
- Golbaz S, Farzadkia M, Kermani M, (2010) Determination of Tehran air quality with emphasis on air quality index (AQI); 2008-2009, J Iran Occupational Health 6(4): 59-65. (In Persian)
 - Nourpoor AR, Feiz SMA (2014) Determination of the Spatial and Temporal Variation of SO₂, NO₂ and Particulate Matter Using GIS Techniques and Estimation of Concentration Modeling with LUR Method, Case Study: Tehran City, J Environmental Studies 40(3): 723-738. (In Persian)
 - Garcia, M.A.; Sanchez, M. L.; Rois, A.; Peres, L. A.; Pardo, N.; (2018) Analysis of PM₁₀ and PM_{2.5} Concentrations in an Urban Atmosphere in Northern Spain, Archives of Environmental Contamination and Toxicology, pp-1-15.
 - Goudarzi, G.H., Shirmardi, M., Abolfazl Naimabadi, A., Ata Ghadiri, A., Sajedifar, J., (2019) Chemical and organic characteristics of PM_{2.5} particles and their in-vitro cytotoxic effects on lung cells: The Middle East dust storms in Ahvaz, Iran, Science of the Total Environment, 655: 434-445.
 - Joanna, K., Mariusz, G., Lechosław, D, (2018) Characteristics of air quality and sources affecting high levels Of PM₁₀ and PM_{2.5} in Poland, Upper Silesia urban area, Environ Monit Assess, 190, 515-525.
 - Nadian, M Mirzaei R, Soltani Mohammadi S, (2018) Application of Moran's I Autocorrelation in Spatial-Temporal Analysis of PM_{2.5} Pollutant (A case Study: Tehran City) J

نتیجه تحقیق (۹) که مناطق غربی، جنوب غربی، جنوبی و مرکزی از آلوده‌ترین مناطق شهر تهران می‌باشند را مورد تأیید قرار می‌دهد. نتایج این مطالعه همچنین با نتایج تحقیق (۲۲) و (۲۳) که نشان داد بالاترین غلظت میانگین ماهانه PM_{2.5} مربوط به ماه‌های پاییز و زمستان است مشابهت دارد و با نتایج پژوهش (۲۱) هیچ گونه مطابقتی ندارد.

در مقایسه با دیگر مطالعاتی که در نقاط مختلف جهان صورت گرفته است در شهر تهران تنها ذرات معلق (PM_{2.5}) به عنوان آلاینده مسئول آلودگی هوای شهر تهران شناخته شدند که گسترش بیشتری در سطح شهر داشتند و توزیع غلظت این ذرات در مناطق جنوبی، غربی و مرکزی شهر تهران بیشتر بوده است. این آلاینده که نماینده طیف وسیعی از ذرات بسیار ریز با سایزهای متفاوت با قطر کمتر از ۲/۵ میکرون می‌باشد. این آلاینده در صورت حاکمیت شرایط جوی پایدار برای چند روز متوالی و همچنین وقوع پدیده گرد و غبار، در هوای شهر انباشت شده و در اکثر قریب به اتفاق روزهای آلوده، آلاینده شاخص شهر تهران به شمار می‌رود. این امر ممکن است که باعث اثرات زیان آوری بر روی سلامت افراد جامعه به خصوص کودکان و افراد مسن شود. توصیه می‌شود مدیریت کیفیت هوا در تمام مناطق شهری قسمتی از برنامه‌های توسعه و عمران شده و به توسعه فضای سبز و جلوگیری از تخریب آن اهمیت داده شود. نتایج حاصل می‌تواند در بحث مدیریت آلودگی هوا بخصوص برنامه-ریزی جهت مدیریت کنترل ذرات معلق و کاهش آلودگی هوا مورد استفاده برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیرندگان شهری قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از شرکت کنترل کیفیت هوای تهران جهت در اختیار گذاشتن داده‌های مورد نیاز این تحقیق سپاسگزاری می‌نمایند.

Reference

- Kermani M, Dowlati M, Fallah S, Aghaei M, Bahrami Asl F, Karimzadeh S (2017) Study of Air Quality Health Index and its Application in Seven Cities of Iran in 2011, J Arak University

- (Deepawali festivals) in megacity Delhi, *Nat Hazards*, 61:521–531.
15. Gadass, R., Mirjana, C., kovic, A., Kres, I., (2012) Winter Mass Concentrations of Carbon Species in PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ in Zagreb Air, Croatia, *Bull Environ Contam Toxicol* , 89:1087–1090.
 16. Khorshiddoust AM, Valizadeh KH, Ghasemi Baghtash A (2017) Analysis of temporal- spatial distribution of dangerous contaminants in Tabriz with emphasis on PM₁₀, *J Physical Geography Research* 49(4): 585-602. (In Persian)
 17. Asrari E, Paydar M (2018) Investigation of the airborne particulate matter concentration trend changes in Mashhad by using meteorological data during 2010-2015. *Iranian Journal of Research in Environmental Health*; 4 (1): 58-65. (In Persian)
 18. zakeri KIA, S., Aghamohammadi, H., behzadi, S., azizi, Z. (2020). Modeling and Spatio -Temporal Analysis of the Distribution of Particulate Matter in Tehran City Based on Spatial Analysis in GIS Enviroment. *Journal of Environmental Science and Technology*, 21(11), (In Persian)
 19. Sajjadi, S., Delsouz, M., Zolfaghari, G. (2019). Evaluatin of Deterministic and Geostatistics Methods for Particulate Matter Concentration (PM_{2.5} and PM₁₀) Zoning Using GIS: case study, Sabzevar City. *Journal of Environmental Science and Technology*, 21(10), 1-13. (In Persian)
 20. Mirakbari, M., Ebrahimi Khusfi, Z. (2020). Investigation of spatial and temporal changes in atmospheric aerosol using aerosol optical depth in Southeastern Iran. *Journal of RS and Environmental Health Engineering* 5(3): 213-197. (In Persian)
 8. Gholampour A, Nabizadeh R, Hassanvand MS, Taghipour H, Faridi S, Mahvi AH (2013) Investigation of the ambient particulate matter concentration changes and assessing its health impacts in Tabriz, *J Health & Environ* 7(4): 541-556. (In Persian)
 9. Leali M, Nadafi K, Nabizadeh R, Youneseian M, Mesdaghineia AR, Nazmara SH(2011) Particulate Matter Concentrations and The Air Quality Index In The Central Part Of Tehran City, Tehran, Iran, *J School of Public Health And Institute of Public Health Research*, 1(7): 57-67. [In Persian]
 10. Wu Z, Liu F, Fan, W (2015) Characteristics of PM₁₀ and PM_{2.5} at Mount Wutai Buddhism Scenic Spot Shanxi, China, *J Atmosphere* 6(8): 1195–1210.
 11. Pui, D. H.Y., Chen, S. C., Zhili, Z., (2014) PM_{2.5} in China: Measurements, sources, visibility and health effects, and mitigation. *Particuology*, 13:1–26.
 12. Bravao, M, & Bella, M, (2011). Spatial heterogeneity of PM₁₀ and O₃ in São Paulo, Brazil, and implications for human health studies. *The Air & Waste Management Association*, 66(1), 69–77.
 13. Bayraktar , H., Sezer , F., Tuncel, G., (2010) Average mass concentrations of TSP, PM₁₀ and PM_{2.5} in Erzurum urban atmosphere, Turkey, *Stoch Environ Res Risk Assess* , 24:57–65.
 14. Tiwari, S., Chate, D. M., Srivastava, M. K., Safai, P. D, (2012) Statistical evaluation of PM₁₀ and distribution of PM₁, PM_{2.5}, and PM₁₀ in ambient air due to extreme fireworks episodes

24. Gholizadeh MH, Farajzadeh M, Darand M (2009) the Correlation between Air Pollution and Human Mortality in Tehran, *Hakim Research Journal*; 12(2): 65- 71. (In Persian)
25. Mousavi F, Jahed S. A, Rajab A, Nikuo Sokhantabar A. K, Kashi G, Tabatabaee R(2013)Survey Of Air Pollution Effect On Variation Of Glycosylated Hemoglobin A1c (Hba1c) Level In Diabetic Patients In Tehran, *Iranian Journal Of Health And Environment*, 6(1), 123-132. (In Persian)
26. Bahari RA, Abaspour RA, Pahlavani P (2015) Zoning of Particulate Matters (PM) Pollution Using Local Statistical Models in GIS (Case Study: Tehran Metropolisies) *J Geomatics Science and Technology* 5(3):165-173. (In Persian)
27. Safavi SY, alijani B (2007) Studying geographical factors in Tehran air pollution, *J Geography Research* (58):99-112. (In Persian)
- GIS for Natural Resources*, 11(3), 87-105. (In Persian)
21. Raispour, K. (2021). Evaluation of Spatiotemporal Column Particulate Matter Concentration (PM2.5) Due to Dust Events in Iran Using Data from NASAN / MERRA-2 Reanalysis Model. *Journal of the Earth and Space Physics*, 47(2), 333-354. doi: 10.22059/jesphys.2021.316499.1007273. (In Persian)
22. Garcia, M.A.; Sanchez, M. L.; Rois, A.; Peres, L. A.; Pardo, N.; (2018) Analysis of PM10 and PM2.5 Concentrations in an Urban Atmosphere in Northern Spain, *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, pp-1-15.
23. Gautam S. and Brema J., Spatio-temporal variation in the concentration of atmoSP particulate matter: A study in fourth largest urban agglomeration in India. *Environmental Technology & Innovation* (2019), doi: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100546>.