

تحلیل فضایی آلاینده PM_{2.5} و همبستگی آماری آن با پارامترهای هواشناسی (شهر تهران)

ابوالفضل قنبری^{۱*}، وحید کاکاپور^۲، حسین فکرت^۲، مریم صادقی^۲

۱. استاد گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تبریز، ایران
۲. دانشجوی دکتری، رشته سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تبریز، ایران

تاریخ تصویب: ۱۴۰۲/۰۸/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۹

چکیده

امروزه آلودگی هوا به‌عنوان یکی از معضلات مهم شهرنشینی و زندگی صنعتی مطرح می‌باشد هدف از این تحقیق، تحلیل فضایی آلاینده PM_{2.5} و بررسی ارتباط آماری آن با پارامترهای جوی در محدوده کلان‌شهر تهران می‌باشد. جهت رسیدن به این اهداف از ۲ سری داده استفاده شده است: ۱. داده‌های غلظت روزانه PM_{2.5} که از شرکت کنترل کیفیت هوا تهیه شد و ۲. داده‌های روزانه پارامترهای هواشناسی (مقدار بارندگی، تبخیر، سرعت حداکثر باد، کمینه رطوبت نسبی، ساعت آفتابی، بیشینه رطوبت نسبی، کمینه دما، بیشینه دما) که از سازمان هواشناسی تهیه و مرتب شدند. برای پهنه‌بندی غلظت PM_{2.5}، از روش وزن دهی معکوس فاصله، استفاده شد. نتایج مدل روش درون‌یابی معکوس فاصله نشان می‌دهد که مناطق ۹، ۱۶، ۱۹ و ۲۰ دارای بالاترین مقدار آلودگی ذرات معلق و مناطق ۸، ۱۵ و ۲۲ نیز دارای کمترین مقدار غلظت هستند. جهت برقراری ارتباط آماری بین آلاینده PM_{2.5} و پارامترهای هواشناسی از آزمون همبستگی پیرسون و رگرسیون خطی چندگانه استفاده شد. نتایج همبستگی پیرسون نشان داد که PM_{2.5} با حداکثر دما و ساعات آفتابی همبستگی مستقیم و با سرعت باد حداکثر و مقدار بارندگی همبستگی منفی دارد. ارتباط بین PM_{2.5} به‌عنوان متغیر وابسته و پارامترهای جوی به‌عنوان متغیرهای مستقل توسط دو مدل رگرسیون خطی (Enter و Stepwise) برقرار گردید. نتایج این ارتباط نشان داد که ضریب رگرسیون در مدل Enter، ۰/۶۰ و در مدل Stepwise مقدار ۰/۵۶ به دست آمد. این مقادیر تقریباً یکسان نشان از عملکرد خوب دو مدل در پیش‌بینی مقدار غلظت PM_{2.5} دارد. در نهایت جهت انتخاب مدل مناسب‌تر، مقدار خطای استاندارد تخمینی بین دو مدل با هم مقایسه گردید، که با توجه به کمتر بودن مقدار مدل Stepwise (۵/۸۴) نسبت به مدل Enter (۶/۰۰)، مدل Stepwise مناسب‌تر است.

کلیدواژه‌ها: آلودگی هوا، پارامترهای هواشناسی، غلظت PM_{2.5}، رگرسیون خطی، همبستگی پیرسون.



سراغاز

هوا بدون شک به‌عنوان یکی از نیازهای اساسی و مهم حیات موجودات زنده اعم از انسان، حیوان و گیاه می‌باشد به‌طوری‌که بدون آن لحظه‌ای زندگی ممکن نیست. اهمیت استنشاق هوای پاک و توجه به آنچه از طریق تنفس وارد بدن خود می‌کنیم، روزبه‌روز نمود بارزتری پیدا می‌کند. امروزه آلودگی هوا یکی از بغرنج‌ترین مشکلاتی است که بشر با آن روبرو است و یکی از مظاهر تمدن بشر محسوب می‌شود و متأسفانه روزبه‌روز با توسعه صنعتی و تراکم جمعیت در شهرها شدیدتر می‌شود و به‌صورت جزء لاینفک زندگی صنعتی درآمد است (Kiker et al., 2015). تحقیقات انجام شده در نقاط مختلف جهان نشان داده اند که قرار گرفتن در معرض آلاینده های هوا، اثر منفی بر سلامت انسان دارد (SousaSIV et al., 2008). یکی از مهمترین آلاینده ها، ذرات معلق موجود در جو هستند. ذرات معلق PM^(۱) اشاره به یک مخلوط پیچیده‌ای از آلاینده های متشکل از دود، گردوغبار و انواع مواد جامد و مایع دارد که در واسطه گازی قرار گرفته اند مطالعات نشان می دهند که ذرات معلق با قطر کمتر از ۲/۵ میکرون PM_{2.5} سلامت انسان‌ها را به شدت تهدید می کنند به طوری که PM_{2.5} می‌تواند اثرات حاد و مزمن بر روی سیستم تنفسی و قلبی عروقی داشته باشد (Ketabi et al., 2015). گردوغبار علاوه بر تأثیراتی که بر سلامت دارد، می‌تواند منجر به تغییرات اقلیم در مقیاس جهانی و محلی، تغییر در چرخه بیولوژیکی، زمین شناسی، شیمیایی و یا محیط زیست انسان گردد (McKendry, 2000). پارامترهای هواشناسی تأثیرگذار بر مسئله آلودگی هوا را می‌توان به دو دسته اولیه و ثانویه تقسیم‌بندی کرد. پارامترهای اولیه شامل: جهت و سرعت باد، دما، ارتفاع آمیختگی و پارامترهای ثانویه شامل: بارش، رطوبت، تابش و شعاع دید می‌باشند. این پارامترها به طور قابل ملاحظه‌ای تابع عرض جغرافیایی، فصل و توپوگرافی هستند (Goudie, 2006). عوامل مختلفی مانند انتشار، پارامترهای هواشناسی و واکنش های فیزیکی و شیمیایی به طور مشترک بر شدت آلودگی PM_{2.5} تا حد زیادی تأثیر می‌گذارند (Ju Wang et al., 2023). در رابطه با وضعیت غلظت آلاینده‌ها و اثر پارامترهای هواشناسی بر روی آنها، مطالعات متعددی صورت گرفته است. در مطالعه تیان و همکاران که به بررسی ارتباط بین غلظت PM₁₀ با عوامل هواشناسی توسط آنالیز موجک و تجزیه و تحلیل خاکستری پرداختند، بین عوامل هواشناسی و PM₁₀ ارتباط

منفی و معناداری وجود داشت (Tian et al., 2012). در مطالعه کوا و همکاران که با کاربرد رگرسیون خطی و شاخص همبستگی پیرسون به بررسی اثر عوامل آلودگی هوا و متغیرهای هواشناسی بر روی غلظت PM_{2.5} پرداختند، بین غلظت CO، SO₂ و NO₂ با مقدار PM_{2.5} ارتباط افزایشی وجود داشت، و سرعت باد از عوامل کاهش دهنده PM_{2.5} بود (Kuo C-Y et al., 2008). در مطالعه اسکاپ و همکاران تأثیر فاکتورهای هواشناسی بر روی غلظت ذرات معلق و NO_x در مالزی نشان داد NO_x با سرعت باد رابطه معکوس دارد درحالی‌که ذرات معلق با سرعت باد و رطوبت نسبی ارتباط منفی دارد (Schaap et al., 2016). در مطالعه آنوساسانان و همکاران به بررسی ارتباط بین PM_{2.5} و متغیرهای هواشناسی (بارندگی و دما) طی سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۲۰ پرداختند، به طوری که همبستگی بین PM_{2.5} و بارش در فصل مرطوب سال کمتر از فصل خشک سال بود و همچنین یک ضریب همبستگی ثابت بین پارامتر PM_{2.5} و دما ثبت گردید و مقدار غلظت PM_{2.5} در طول روز کمتر از مقدار آن در طول شب بود (Anusasananan et al., 2022). در مطالعه نظری و همکاران در بررسی تغییرات زمانی غلظت PM₁₀ در کرمانشاه تیر ماه حداکثر غلظت و دی ماه حداقل مقدار را به خود اختصاص دادند (نظری و همکاران، ۱۳۹۲) در مطالعه نجف پور و همکاران که بر روی ۵ آلاینده شاخص کیفیت هوا در کلان شهر تهران طی سال‌های (۸۸-۱۳۸۰) انجام شد، مشخص گردید که متغیرهای هواشناسی می‌توانند در میزان آلودگی هوای شهر تهران مؤثر واقع شوند. همچنین از دیگر نتایج مهم این تحقیق می‌توان به روند کاهشی آلاینده (PM₁₀، CO، NO₂) در طی سنوات مورد مطالعه اشاره کرد (نجف‌پور و همکاران، ۱۳۹۰) در مطالعه رضایی و همکاران در بررسی کمی و کیفی وضعیت آلودگی هوا و ارتباط آن با عوامل اقلیمی در شهر بیرجند نشان داد، آلاینده‌ها ۱۶ روز از حد استاندارد تجاوز کرده است. PM₁₀ و CO به‌عنوان آلاینده مسئول آلودگی هوای شهر بیرجند محسوب می‌شوند. همچنین تجزیه و تحلیل آماری بیان‌کننده رابطه مستقیم و معنی‌دار بین PM₁₀ با سرعت باد می‌باشد (رضایی، ۱۳۹۱). در مطالعه رحیمی و همکاران بررسی آلودگی هوای شهر سمنان با تأکید بر تغییرات زمانی غلظت ذرات معلق نشان داد، بین میانگین دمای ماهیانه و شاخص ذرات معلق همبستگی مستقیمی وجود دارد، به‌طوری‌که در دوره مطالعه، بیشترین میزان ذرات معلق، مربوط به ماه‌های می تا جولای بوده

جنوب آن) و از شرایط نامناسب بافت شهری برخوردار است و وسایل نقلیه زیادی در طول شبانه‌روز در آن به فعالیت مشغول‌اند. بادهای غربی در تمام طول سال دود کارخانجات و سایر عوامل آلاینده را به سطح شهر تهران وارد می‌سازند، در مجموع دارای شرایط نامساعد محیط‌زیستی بوده و آلودگی هوای آن در سال‌های اخیر با محتوای گازهای سمی به‌صورت خطرناک عمل می‌نماید که منجر به ایجاد تغییرات بسیار چشمگیر محیطی و اقلیمی در آن شده است (نصیب‌لونیا و همکاران، ۱۳۹۷).

روش انجام کار

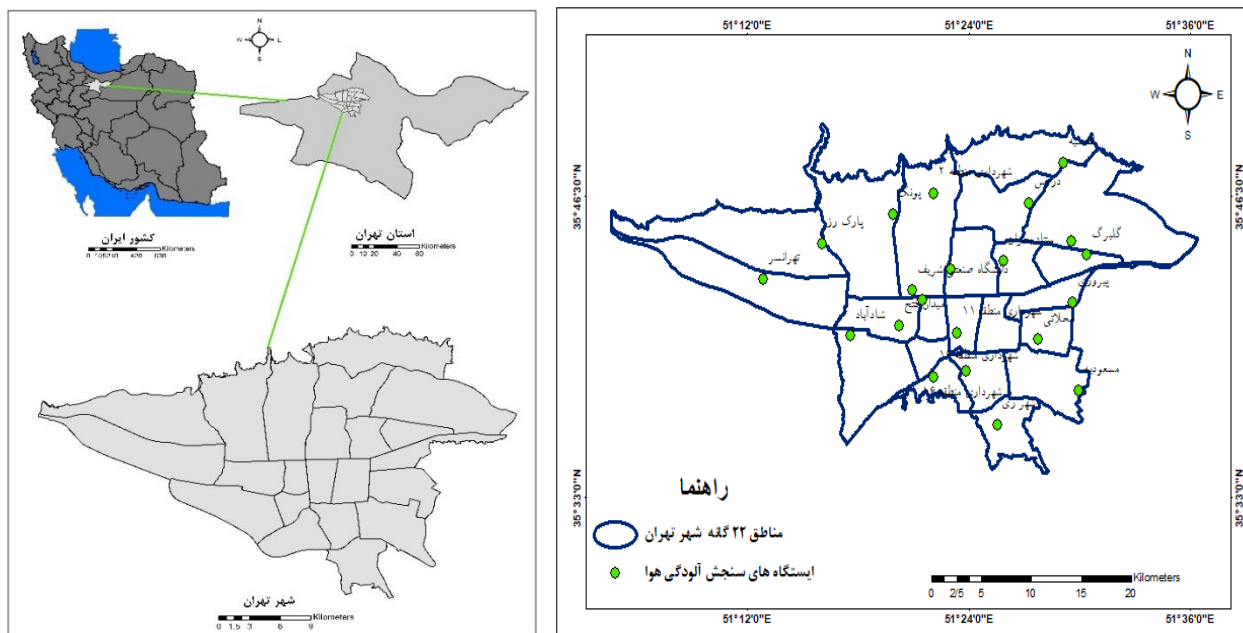
در پژوهش موردنظر، از داده‌های غلظت روزانه PM_{2.5} طی سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ استفاده شد این داده‌ها توسط شرکت کنترل کیفیت در ۲۱ ایستگاه سنجش آلودگی در محدوده شهر تهران ثبت شده‌اند که موقعیت ایستگاه‌های مذکور در شکل (۱) مشاهده می‌گردد. جهت ترسیم نمودارهای (۸ تا ۱۰) ابتدا میانگین داده‌های روزانه به صورت فصلی و ماهانه در نرم‌افزار Excel محاسبه شد سپس نمودارهای مربوطه ترسیم گردیدند. برای پهنه‌بندی و درون‌یابی غلظت PM_{2.5} از نرم‌افزار ARC GIS نسخه 10.8 استفاده شد. در مرحله بعدی تحلیل و رابطه آماری بین غلظت‌های PM_{2.5} ایستگاه‌ها و پارامترهای هواشناسی (اندازه‌گیری شده توسط سازمان هواشناسی) توسط نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ بررسی شد. پارامترهای هواشناسی مورد استفاده در این پژوهش عبارتند از: دمای حداقل، دمای حداکثر، بیشینه و کمینه رطوبت، مقدار بارندگی، ساعت آفتابی، تبخیر و سرعت باد. شکل (۲) مدل مفهومی از مراحل انجام کار را نمایش می‌دهد. داده‌های روزانه غلظت آلاینده PM_{2.5} در این پژوهش به‌عنوان متغیر وابسته و متغیرهای هواشناسی به‌عنوان متغیر مستقل موردبررسی قرار گرفتند. برای تعیین همبستگی بین این متغیرها از آزمون همبستگی پیرسون استفاده شد. در مباحث آماری، ضریب همبستگی پیرسون یا ضریب همبستگی حاصل‌ضرب- گشتاور پیرسون میزان همبستگی خطی بین دو متغیر تصادفی را می‌سنجد. مقدار این ضریب بین ۱- تا ۱ تغییر می‌کند که عدد ۱ به معنای همبستگی مثبت کامل، عدد صفر به معنی عدم همبستگی و نهایتاً عدد ۱- به معنی همبستگی منفی کامل است. این ضریب که کاربرد فراوانی در آمار دارد احتمالاً، گسترده‌ترین کاربرد شاخص آماری همبستگی دو متغیری، ضریب همبستگی

است. همچنین یک همبستگی معکوس بین میانگین رطوبت نسبی ماهیانه و شاخص ذرات معلق دیده شد (رحیمی و همکاران، ۱۳۹۵). در مطالعه نورپور و همکاران بررسی همبستگی آماری پراکنش آلاینده‌های CO و PM₁₀ با تغییرات سرعت باد در شهر تهران نشان داد، در همه ایستگاه‌ها در ۴۶/۶ درصد همبستگی منفی معنی‌داری بین کاهش غلظت CO با افزایش سرعت باد و ۳۰ درصد همبستگی معنی‌داری بین کاهش غلظت PM₁₀ و افزایش سرعت باد وجود دارد (نورپور و همکاران، ۱۳۹۵). با توجه به این که ذرات معلق، اثرات منفی بسیاری برسلامتی انسان‌ها و گیاهان و همچنین نقش بسیار مهمی در تغییرات آب و هوای جهانی دارند، در مطالعه حاضر به بررسی تغییرات مکانی غلظت ذرات PM_{2.5} در شهر تهران پرداخته شد. همچنین با توجه به این که پارامترهای هواشناسی می‌توانند بر میزان غلظت و پراکنش آلاینده‌ها از جمله ذرات معلق مؤثر باشند، در این پژوهش به بررسی پراکنش مکانی PM_{2.5} در مناطق مختلف کلان شهر تهران و رابطه بین غلظت PM_{2.5} و پارامترهای هواشناسی با استفاده از آزمون همبستگی پیرسون و رگرسیون خطی چندگانه نیز پرداخته شد. بنابراین مطالعه حاضر با هدف بررسی تغییرات روزانه، ماهانه و فصلی غلظت PM_{2.5} در فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان و بررسی تأثیر پارامترهای هواشناسی بر میزان غلظت PM_{2.5} در فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان انجام شد.

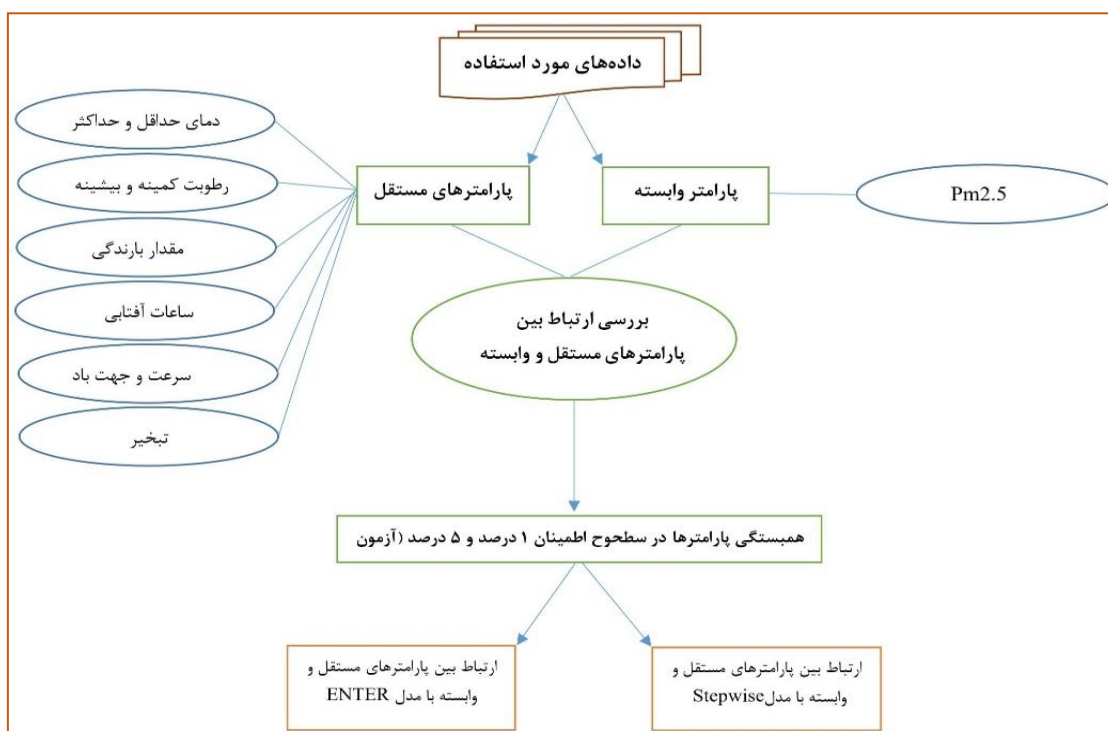
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

کلان‌شهر تهران، پایتخت ۲۰۰ ساله ایران در کوهپایه‌های جنوبی رشته‌کوه البرز در حد فاصل طول ۵۱ درجه و ۵ دقیقه شرقی تا ۵۱ درجه و ۵۳ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه شمالی تا ۳۵ درجه و ۵۹ دقیقه شمالی با حدود ۷۰۰ کیلومتر مربع مساحت گسترده شده است (شکل ۱). این شهر از شمال به سلسله جبال البرز، از شرق به لواسانات و از غرب به کرج و از جنوب به ورامین محدود می‌شود. ارتفاع شهر در بلندترین نقاط شمال به ۲۰۰۰ متر و در جنوبی‌ترین نقاط به ۱۰۵۰ متر از سطح دریا می‌رسد. شهر تهران با جمعیتی نزدیک به ۱۲ میلیون نفر (به همراه شهرهای اقماری خود) ۱۲ درصد جمعیت کل کشور را به خود اختصاص داده است. با توجه به این که شهر تهران دارای موقعیت خاص جغرافیایی است (اختلاف ارتفاع زیاد در شمال و



شکل (۱): موقعیت ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا در شهر تهران



شکل (۲): مدل مفهومی پژوهش

فاصله‌ای / نسبی باشند. البته زمانی که متغیرها از نوع شبه‌فاصله‌ای باشند (هر متغیر ترکیبی از چند متغیر ترتیبی باشد که اصطلاحاً به آن مقیاس‌های تراکمی می‌گویند)، برخی از پژوهشگران از ضریب پیرسون استفاده می‌کنند. برخی از نویسندگان استفاده از ضریب پیرسون برای یک متغیر دو ارزشی و یک متغیر فاصله‌ای / نسبی

گشتاوری پیرسون است که به‌طور معمول همبستگی پیرسون نامیده می‌شود. علامت اختصاری آن r است. ضریب پیرسون نشان می‌دهد که تا چه اندازه بین متغیرهای کمی رابطه خطی وجود دارد. کاربرد اصلی ضریب پیرسون زمانی است که متغیرها از نوع پارامتری باشند؛ بدین معنا که توزیع نرمال داشته باشند و در سطح

است. نسبت کاهش وزن بستگی به مقدار m دارد. اگر $m=0$ در نظر گرفته شود؛ در این صورت کاهش در وزن با فاصله ایجاد نمی‌شود؛ بنابراین وزن در سطح فضا برابر فرض می‌شود با افزایش مقدار m وزن برای نقاط دورترها سرعت بیشتر کاهش می‌یابد اگر مقدار m خیلی بزرگ باشد تنها نقاط مشاهده در پیش‌بینی تأثیر خواهد داشت. شکل (۱) تأثیر تغییرات m را بر تغییرات مقادیر پیش‌بینی بر اساس فاصله از ایستگاه‌ها نشان می‌دهد. در مطالعات معمولاً این مقدار برابر با ۲ در نظر گرفته می‌شود، ولی الزاماً نیازی نیست تنها استفاده شود بلکه متناسب با نیاز و ماهیت اطلاعات و تغییرات فضایی آن باید مقدار m تعیین شود (Xing-Ming, & An-Hua, 2016).

یکی دیگر از عوامل مؤثر در IDW تعداد و موقعیت نقاط مجاور و به عبارتی وضعیت واحدهای همسایگی است. از آنجایی که چیزهایی که نزدیک‌تر هستند شباهت بیشتری دارند. مکان‌های دورتر تأثیر کمتر داشته و می‌توان آن‌ها را از محاسبات خارج نمود تا سرعت محاسبات افزایش یابد؛ بنابراین انتخاب و محدود کردن تعداد نقاط مجاور و به عبارتی پنجره جستجو برای نقاط مجاور در تحلیل‌ها مهم می‌باشند (Tor et al., 2015). از آنجایی که انتخاب روش مناسب برای پهنه‌بندی و میان‌یابی غلظت آلاینده‌ها در نتایج داده‌ها از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است؛ بنابراین، با توجه به هدف مطالعه و همچنین مساحت منطقه مطالعاتی و تعداد نمونه‌های کم از روش معکوس وزنی فاصله استفاده شد.

نتایج

پس از جمع‌آوری داده‌های مربوط به نوع و غلظت مواد آلاینده، مرتب‌سازی داده‌ها بر اساس میانگین روزانه، ماهیانه، فصلی و سالیانه انجام و در ادامه در محاسبات آماری مورد استفاده قرار گرفتند

تحلیل فضایی

نتایج مدل (IDW) در شکل (۳) نشان داد که بیشترین غلظت آلاینده PM_{2.5} در سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ در بخشی از مناطق ۹، ۱۶، ۱۹ و ۲۰ قرار گرفته است و کمترین غلظت مربوط به بخشی از مناطق ۸، ۱۵ و ۲۲ می‌باشد.

را هم مجاز شمرده‌اند. تفسیر همبستگی پیرسون زمانی که یکی از متغیرها دو ارزشی (فقط شامل دو سطح) اما متغیر دیگر کمی است نیز می‌تواند منطقی باشد. این ضریب همبستگی میزان ارتباط خطی بین کمیت‌ها را نشان می‌دهد (نورپور و همکاران، ۱۳۹۵). آزمون فرضیه این پژوهش از نوع پارامتری است، به معنای آن که توزیع آماره آن مشخص است به دلیل وجود هم خطی بین متغیرهای مستقل (دمای حداقل، دمای حداکثر، بیشینه و کمینه رطوبت، مقدار بارندگی، ساعت آفتابی، تبخیر و سرعت باد) از رگرسیون خطی^(۲) برای ارتباط بین PM_{2.5} و پارامترهای هواشناسی استفاده گردید. برای پیش‌بینی PM_{2.5} از دو روش رگرسیون چندگانه^(۳) شامل روش وارد کردن^(۴) و گام‌به‌گام^(۵) استفاده شد. تفاوت دو روش در این است که در روش وارد کردن، در مقابل متغیر وابسته (در این تحقیق غلظت PM_{2.5} روزانه) تمامی متغیرهای مستقل (پارامترهای هواشناسی) انتخاب می‌شوند و در پیش‌بینی تأثیر دارند اما در روش گام‌به‌گام تمام متغیرها را می‌توان وارد کرد ولی بسته به اهمیتشان ممکن است از مدل حذف شوند؛ بنابراین، فقط آن دسته از متغیرهایی که تأثیر بیشتری بر متغیر وابسته دارند در مدل رگرسیون مشاهده می‌شوند (Wu, Dan et al., 2015).

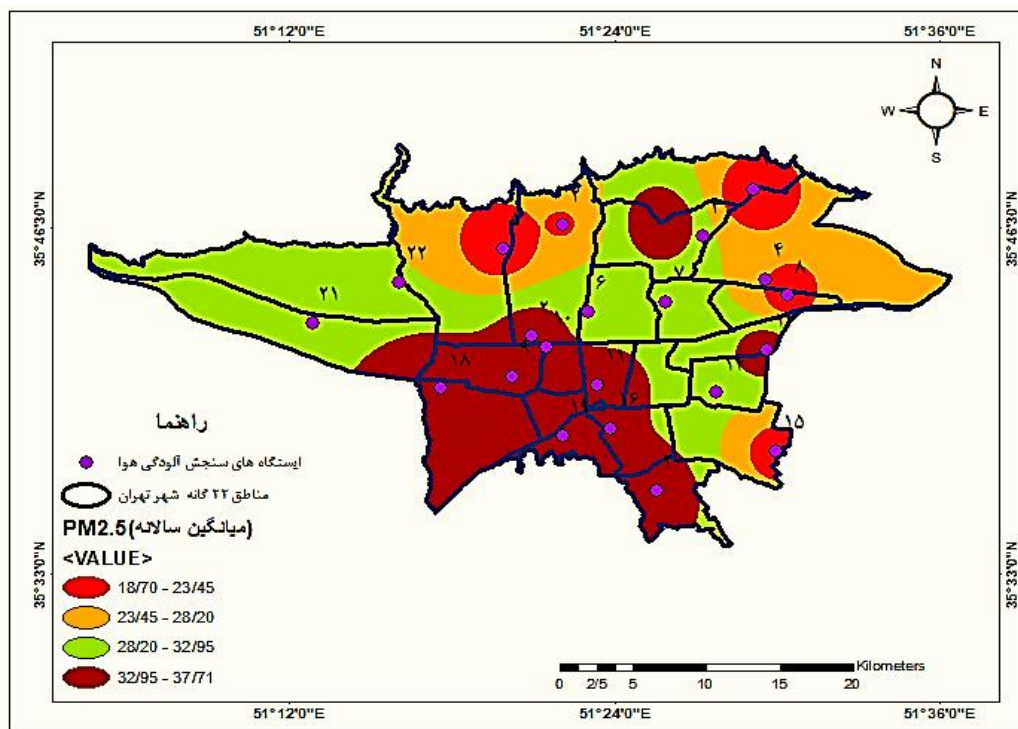
درون‌یابی^(۶) با روش معکوس وزنی فاصله^(۷)

روش معکوس فاصله یکی از روش‌هایی است که در مطالعات جغرافیایی از آن زیاد استفاده می‌شود. فرض اساسی این روش بر آن است که با افزایش فاصله میزان تأثیر پارامترها در برآورد واحد سطح کاهش می‌یابد. برای پیش‌بینی در مکان‌هایی که داده‌های آن‌ها اندازه‌گیری نشده است از مقادیر اندازه‌گیری شده پیرامون محل استفاده می‌شود. در پیش‌بینی، عامل وزن بر اساس فاصله نقاط از یکدیگر تعیین می‌شود. به نقاط نزدیک محل نمونه وزن بیشتر و به نقاط دورتر وزن کمتر اختصاص می‌یابد. با استفاده از تابع شماره ۱ می‌توان مقادیر مربوط به نقاط مختلف را به دست آورد (An-Hua & Xing-Ming, 2016).

رابطه (۱)

$$Z = \sum_{i=1}^N (z_i / d_i) / \sum_{i=1}^N (1 / d_i)$$

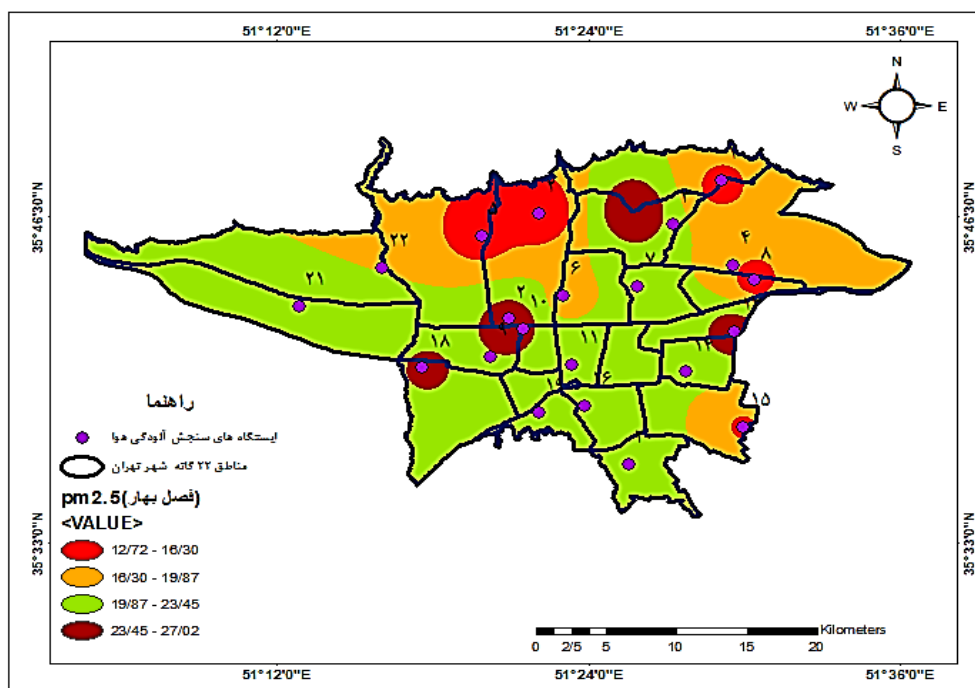
که در آن z_i مقادیر نمونه، d_i فاصله اقلیدسی هر مکان تا محل نمونه، m عامل توان (اصطلاحاً فاصله) و n تعداد نقاط نمونه



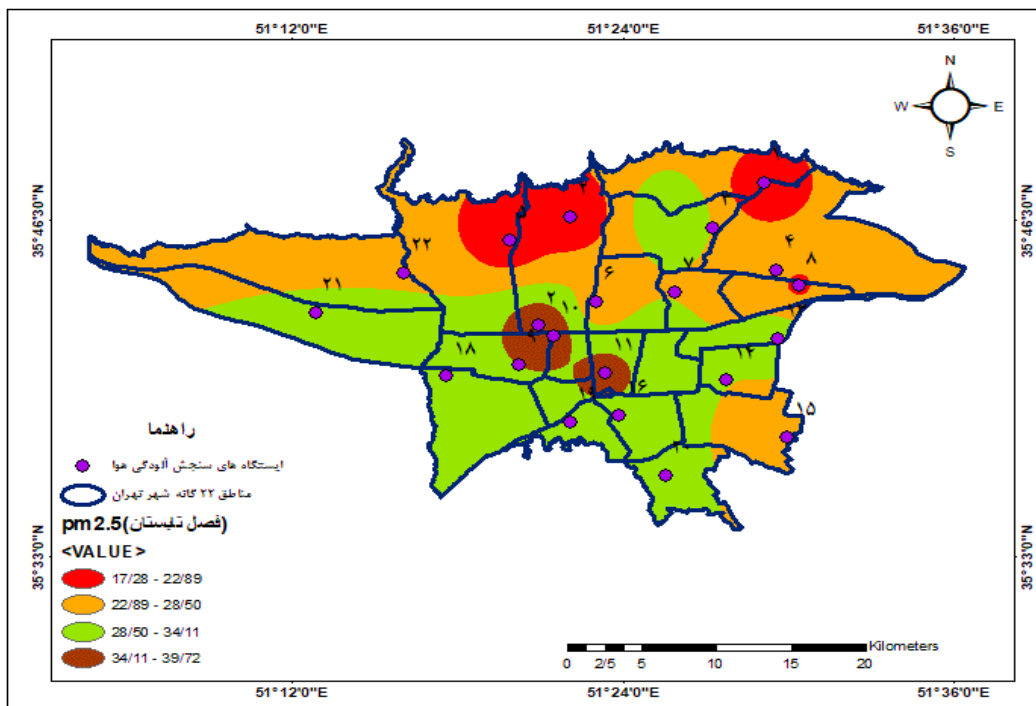
شکل (۳): میانگین غلظت سالانه آلاینده PM 2.5 در طول سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰

این فصل قرار داشته است و بیشترین میزان تغییرات آلودگی هم به ترتیب مربوط به فصل پاییز و زمستان می‌باشد هر چند که مساحت مناطق با تنش بسیار بالای آلودگی در فصل پاییز بالاترین رقم می‌باشد.

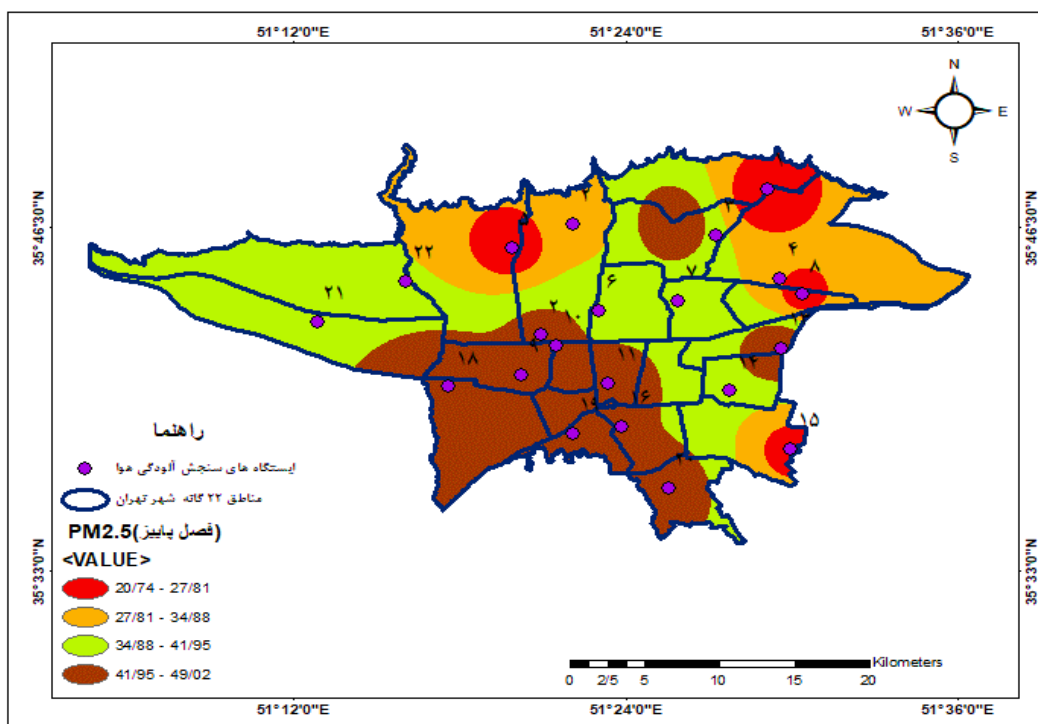
مقایسه شکل‌های پهنه‌بندی غلظت آلاینده PM 2.5 در فصول بهار (شکل ۴)، تابستان (شکل ۵)، پاییز (شکل ۶) و زمستان (شکل ۷) نشان می‌دهد که کمترین بازه تغییرات مربوط به فصل بهار می‌باشد به این معنی که در سال‌های موردنظر سالم‌ترین روزها در



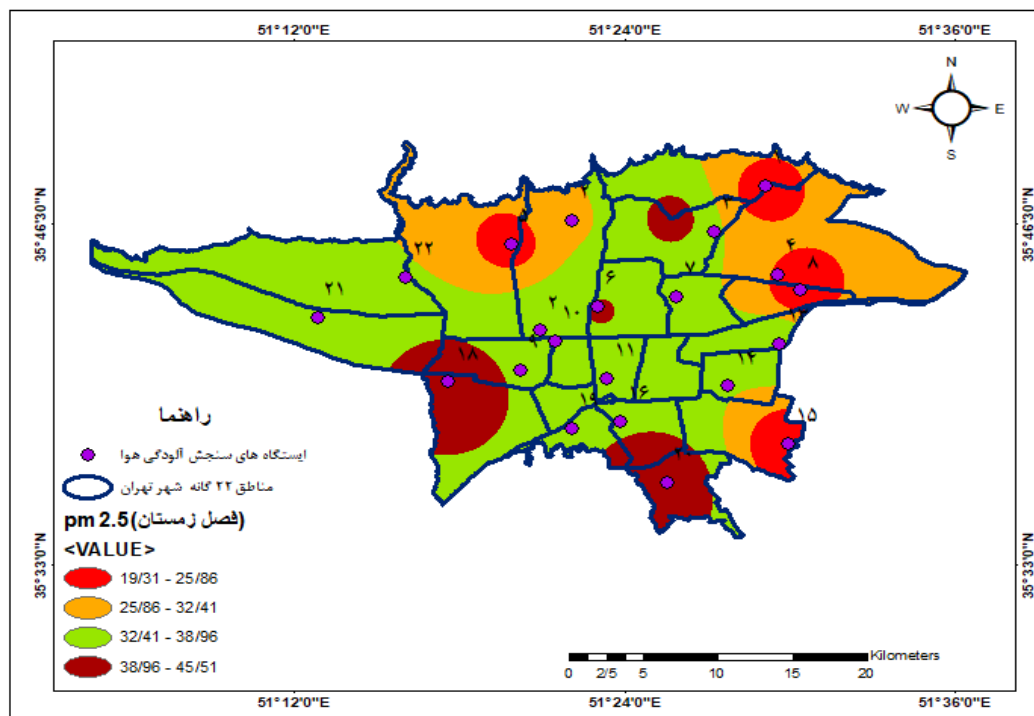
شکل (۴): میانگین غلظت آلاینده PM 2.5 در فصل بهار طی سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰



شکل (۵): میانگین غلظت آلاینده PM_{2.5} در فصل تابستان طی سالهای ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰



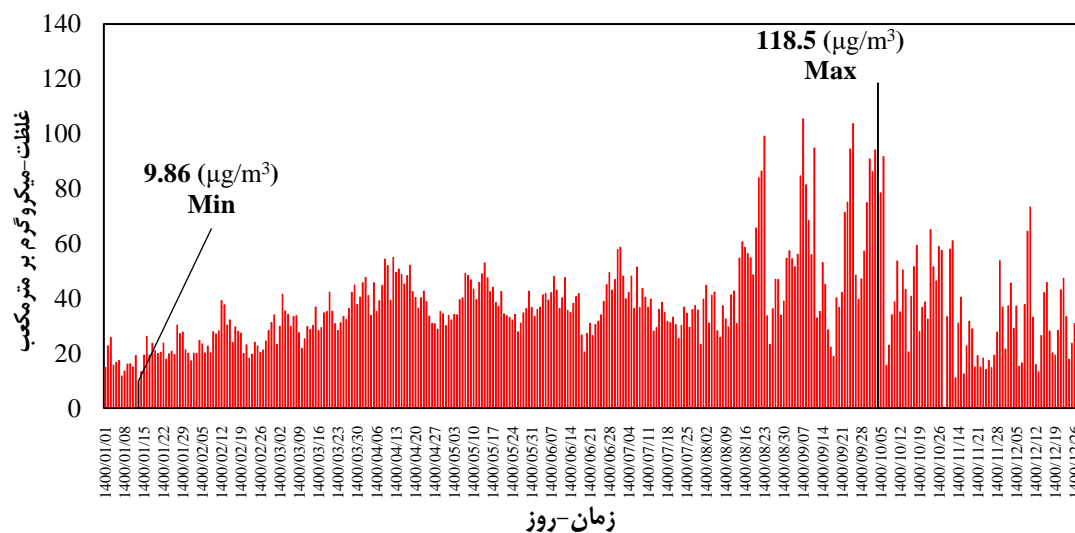
شکل (۶): میانگین غلظت آلاینده PM_{2.5} در فصل پاییز طی سالهای ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰



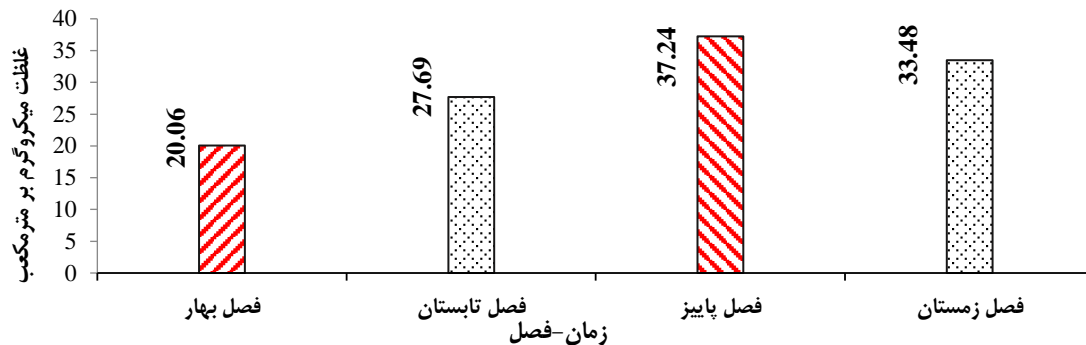
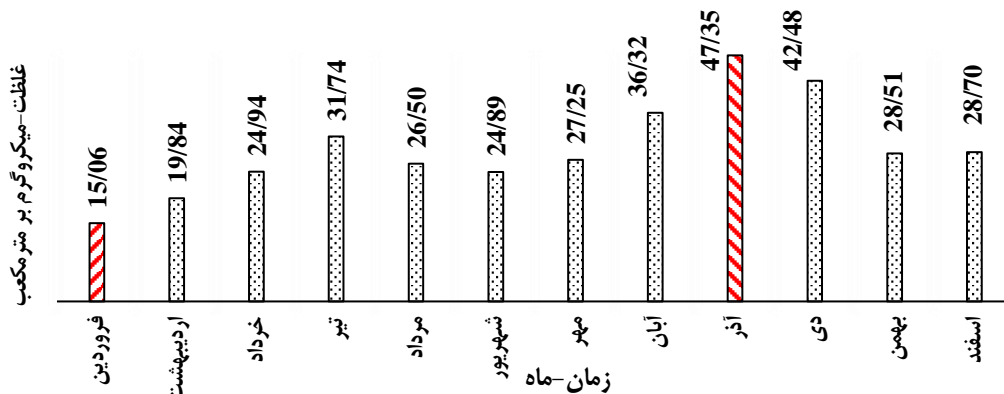
شکل (۷): میانگین غلظت آلاینده PM_{2.5} در فصل زمستان طی سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰

آذر و دی و کمترین غلظت در ماه فروردین ثبت گردیده است (شکل ۹). نمودار فصلی هم بیانگر آن است که بیشترین غلظت در فصل پاییز و کمترین غلظت در فصل بهار به وقوع پیوسته است (شکل‌های ۹ و ۱۰).

همان‌طور که مشاهده می‌شود غلظت‌های فصلی و روزانه و ماهانه آلاینده PM_{2.5} آورده شده است. بررسی شکل (۸) نشان می‌دهد که بیشترین غلظت در ۵ دی ماه و کمترین غلظت در ۲۱ فروردین اتفاق افتاده است. نمودار ماهیانه نشان داد که بیشترین غلظت در



شکل (۸): نمودار غلظت روزانه PM_{2.5} برحسب (µg/m³) در سال ۱۴۰۰

شکل (۹): نمودار غلظت فصلی PM_{2.5} برحسب (۳ μg/m³) در طی سالهای ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰شکل (۱۰): نمودار غلظت ماهانه PM_{2.5} برحسب (۳ μg/m³) در طی سالهای ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰

دمای حداکثر، ساعات آفتابی، جهت باد، تبخیر و کمینه رطوبت دارای همبستگی مستقیم (با افزایش ذرات و غبار مقادیر این پارامترها نیز افزایش می‌یابد و بر عکس با کاهش مقدار ذرات گردوغبار این مقادیر هم کاهش پیدا می‌کنند) و با بیشینه رطوبت، مقدار بارندگی و حداکثر سرعت باد دارای همبستگی معکوس می‌باشد (جدول ۱). ستون P-Values (مقدار احتمال)، سطح معنی‌داری بین متغیرها رو نمایش می‌دهد، مقدار بارندگی دارای حداکثر سطح معنی‌داری می‌باشد به این دلیل که مقدار احتمال آن از ۰/۰۱ کمتر می‌باشد (در سطح یک و پنج درصد معنی‌دار می‌باشد). دما (حداقل و حداکثر)، ساعات آفتابی و سرعت حداکثر باد در سطح ۵ درصد معنی‌دار می‌باشد و متغیرهای رطوبت (بیشینه و کمینه)، تبخیر و جهت باد معنی‌دار نمی‌باشند (در هیچ سطحی). تک‌ستاره به معنی معنی‌دار بودن در سطح ۵ درصد و دو ستاره بودن به معنی معنی‌دار بودن در هر دو سطح یک و پنج درصد می‌باشد (جدول ۱). همچنین جدول (۲) آنالیز واریانس در مدل Enter را نشان می‌دهد که مربوط به خروجی آزمون تحلیل

در فصل تابستان به دلیل این که مقدار بارش‌ها به کمترین و تبخیر به حداکثر خود می‌رسد که باعث خشک شدن خاک و در نتیجه عمل فرسایش بادی می‌شود که سبب حرکت ذرات معلق به مسافت‌های طولانی می‌گردد. منشأ بسیاری از این ذرات معلق بعضی مناطق کشور عراق می‌باشد (نصیب‌لونیا و همکاران، ۱۳۹۷).

مقدار استاندارد PM_{2.5}، ۱۵ میکروگرم بر مترمکعب می‌باشد (طبق استاندارد ملی کیفیت هوای آمریکا) که متأسفانه نمودارهای فصلی و ماهانه ترسیم شده برای شهر تهران حاکی از بالاتر بودن این مقدار از حد استاندارد در تمامی ماه‌ها و فصول می‌باشد.

آزمون همبستگی

برقراری رابطه همبستگی بین غلظت ذرات گردوغبار و پارامترهای هواشناسی با استفاده از نرم‌افزار SPSS26 در سال آماری ۱۴۰۰ انجام گرفته است. نتایج همبستگی پیرسون با پارامترهای هواشناسی نشان داد که PM_{2.5} (ذرات گردوغبار) با دمای حداقل،

میانگین در بین پارامترهای مستقل رد می‌شود. مقدار معنی داری (sig) کمتر از ۰/۰۵ بوده است. در نتیجه، حداقل بین دو پارامتر مستقل (هواشناسی) اختلاف معنی‌داری وجود دارد.

واریانس می‌باشد. این خروجی مهمترین قسمت در آنالیز واریانس یا ANOVA است. در ستون آخر و همچنین آماره f که جدول (۲) دیده می‌شود، مشخص است که فرض صفر یعنی برابری

جدول (۱): همبستگی پیرسون بین PM 2.5 و پارامترهای هواشناسی

تعداد مشاهدات	P-Values	ضریب همبستگی پیرسون	پارامترهای هواشناسی
۳۶۵	۰/۰۲۸	*۰/۱۱۸	دمای حداقل
۳۶۵	۰/۰۱۴	*۰/۱۳۲	دمای حداکثر
۳۶۵	۰/۶۷۱	۰/۰۲۳	کمینه رطوبت
۳۶۵	۰/۱۱۱	-۰/۰۸۶	بیشینه رطوبت
۳۶۵	۰/۰۰۰	**۰/۲۷۹	مقدار بارندگی
۳۶۵	۰/۰۱۷	*۰/۱۲۸	ساعات آفتابی
۳۶۵	۰/۲۷۶	۰/۱۸۴	تبخیر
۳۶۵	۰/۰۴۶	*۰/۱۱۱	سرعت باد (حداکثر)
۳۶۵	۰/۸۸۲	-۰/۰۰۸	جهت باد

آلودگی ذرات معلق به پارامترهای جوی وابسته است.

همچنین به منظور بررسی تأثیر معنادار متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته از رگرسیون استفاده شد. بر اساس نتایج رگرسیون خطی،

جدول (۲): آنالیز واریانس در مدل Enter

Sig	f	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	
۰/۰۰۱	۵/۰۶۱	۱۸۲/۷۴۴	۸	۱۴۶۱/۹۵۱	مجموع مربعات رگرسیونی
		۳۶/۱۰۷	۲۷	۹۷۴/۹۰۲	مجموع مربعات خطا
			۳۵	۲۴۳۶/۸۵۲	مجموع مربعات کل

متغیر وابسته: PM 2.5 متغیرهای مستقل: تمامی متغیرهای هواشناسی

رگرسیونی توانسته درصد بیشتری از تغییرات متغیر وابسته را تحت پوشش قرار داده یا بیان کند. توجه به نتایج جدول (۳) و ضریب تشخیص به دست آمده در این مدل مشاهده می‌گردد ۶۰ درصد از تغییرات PM 2.5 به وسیله پارامترهای هواشناسی در نظر گرفته شده، در این مدل تشریح می‌گردد.

مطابق با نتایج موجود در جدول (۳) از آنجایی که ضریب همبستگی (R=0/77) و ضریب تعیین (R Square=0/6) و همچنین «ضریب تعیین اصلاح شده (Adjusted R Square=0/48) محاسبه شده است، به نظر می‌رسد که مدل رگرسیونی مناسب است. هر چه این مقادیرها به ۱ نزدیک‌تر باشند، مدل بیانگر رابطه بیشتری بین متغیر وابسته و مستقل است. به بیان دیگر مدل

جدول (۳): خلاصه مقادیر به دست آمده از مدل (Enter)

مدل	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
۱	۰/۷۷۵	۰/۶	۰/۴۸۱	۶/۰۰۸

a. Predictors: (Constant), سرعت حداکثر باد، تبخیر، سرعت حداکثر باد، کمینه رطوبت نسبی، ساعت آفتابی، بیشینه رطوبت نسبی، کمینه دما، بیشینه دما

عدد در جدول آنالیز واریانس (۴) فرض خطی بودن پارامترها رو هم تایید می‌کند.

جدول (۴) آنالیز واریانس نشان می‌دهد که ارتباط معناداری (در سطح ۱ درصد) بین آلاینده PM_{2.5} و پارامترهای هواشناسی وجود دارد به این علت که مقدار احتمال آن کمتر از ۰/۰۱ می‌باشد. این

جدول (۴): ضرایب همبستگی خطی در مدل Enter

Sig	آزمون آماره t	ضرایب پیش‌بینی‌شده در حالت غیراستاندارد			ضریب ثابت	کیفیت های رگرسیونی
		ضرایب استاندارد	Std. Error	ضرایب B		
۰/۲۸۳	۱/۰۹۶		۱۲/۸۵۲	۱۴/۰۸۴	ضریب ثابت	
۰/۳۱۱	-۱/۰۳۲	-۰/۴۹۱	۰/۹۰۵	-۰/۹۳۴	کمینه دما (T min)	
۰/۲۱	۲/۴۴۱	۱/۲۳۰	۰/۸۴۳	۲/۰۵۹	بیشینه دما (T max)	
۰/۱۵۱	-۱/۴۷۶	-۰/۲۱۵	۰/۲۶۷	-۰/۳۹۴	کمینه رطوبت نسبی (H min)	
۰/۴۷۸	-۰/۷۱۹	-۰/۱۲۱	۰/۱۲۹	-۰/۰۹۳	بیشینه رطوبت نسبی (H max)	
۰/۸۹۲	-۰/۱۳۷	-۰/۰۲۶	۰/۸۱۲	-۰/۱۱۱	ساعت آفتابی (SH)	
۰/۰۰۵	-۳/۰۶۰	-۰/۵۵۴	۰/۵۱۶	-۱/۵۷۸	تبخیر (EV)	
۰/۰۱۴	-۲/۶۴۰	-۰/۳۳۸	۰/۲۲۳	-۰/۵۹۰	سرعت حداکثر باد (WS max)	
۰/۴۸۹	-۰/۷۰۱	-۰/۰۹۵	۰/۰۱۵	-۰/۰۱۰	سمت حداکثر باد (WD)	

با مقدار ۱۳/۶۰۷ ظاهر شده است. ستون Unstandardized Coefficients که ضرایب واقعی را نشان می‌دهد با توجه به واحد اندازه‌گیری هر یک از متغیرها ایجاد شده‌اند. بنابراین نمی‌توان بر اساس بزرگی هر یک از ضرایب اهمیت متغیر مربوطه در مدل رگرسیونی را تشخیص داد. به این منظور از ستون Standardize Coefficients Beta استفاده می‌کنیم. هر ضریبی که دارای Beta بزرگتری باشد، در مدل رگرسیونی از اهمیت بیشتری نیز برخوردار است. به این ترتیب مشخص می‌شود که متغیر مستقل بیشینه دما (Beta= ۰/۸۱۵) در این مدل هم بهترین متغیر برای پیش‌گویی متغیر وابسته است. معادله خطی به روش Stepwise استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

رابطه (۲)

$$\text{Stepwise} = 13/607 + T_{\max} (1/364) + H_{\min} (-0/490) + EV (-1/574) + WS_{\max} (-0/585)$$

در روش گام‌به‌گام^(۸) همان‌طور که قبلاً ذکر شد از همه متغیرهای مستقل استفاده می‌کند اما متغیرهایی با حذف گام‌به‌گام متغیرهای مستقل بهترین ترکیب از متغیرها رو انتخاب می‌کند که در این تحقیق همان‌طور که از جدول (۶) مشخص است بهترین ترکیب از متغیرهای مستقل در مقابل متغیر وابسته (PM_{2.5}) عبارت است از: بیشینه دما، سرعت حداکثر باد و کمینه رطوبت نسبی؛ که دارای بالاترین ضریب همبستگی (R=۰/۷۷۵) و ضریب تعیین (R=۰/۵۶۵) و همچنین ضریب تعیین اصلاح شده (۰/۵۰۹)

در جدول (۴)، برآورد ضرایب و خصوصیات مربوط به آزمون آن‌ها دیده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، مقدار ثابت در مدل با مقدار ۱۴/۰۸۴ ظاهر شده است. همچنین جدول (۵) آنالیز واریانس در مدل Stepwise را نشان می‌دهد. مقدار معنی‌داری (sig) کمتر از ۰/۰۵ بوده است. در نتیجه، حداقل بین دو پارامتر مستقل اختلاف معنی‌داری وجود دارد.

ستون Unstandardized Coefficients که ضرایب واقعی را نشان می‌دهد با توجه به واحد اندازه‌گیری هر یک از متغیرها ایجاد شده‌اند بنابراین نمی‌توان بر اساس بزرگی هر یک از ضرایب اهمیت متغیر مربوطه در مدل رگرسیونی را تشخیص داد. به این منظور از ستون Standardize Coefficients Beta استفاده می‌کنیم. هر ضریبی که دارای Beta بزرگتری باشد، در مدل رگرسیونی از اهمیت بیشتری نیز برخوردار است. به این ترتیب مشخص می‌شود که متغیر بیشینه دما (Beta = ۱/۳۶۴) بهترین متغیر برای پیش‌گویی متغیر وابسته است. معادله خطی به روش Enter با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

رابطه (۱)

$$\text{Enter} = 14/084 + T_{\min} (-0/934) + T_{\max} (2/059) + H_{\min} (-0/394) + H_{\max} (-0/093) + SH (-0/111) + EV (-1/578) + WS_{\max} (-0/590) + WD (-0/010)$$

در جدول (۶)، برآورد ضرایب و خصوصیات مربوط به آزمون آن‌ها دیده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، مقدار ثابت در مدل

تغییرات $PM_{2.5}$ به‌وسیله پارامترهای هواشناسی در نظر گرفته شده، در این مدل تشریح می‌گردد. (Adjusted R Square=) نتایج جدول (۷) و با توجه به ضریب تشخیص در این مدل مشاهده می‌گردد که حدود ۵۷ درصد از

جدول (۵): آنالیز واریانس در مدل Stepwise

Sig	آماره f	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	
.۰۰۰	۱۰/۰۶۱	۳۴۴/۱۳۳	۴	۱۳۷۶/۵۳۱	مجموع مربعات رگرسیونی
		۳۲/۲۰۴	۳۱	۱۰۶۰/۳۲۱	مجموع مربعات خطا
			۳۵	۲۴۳۶/۸۵۲	مجموع مربعات کل

متغیر وابسته: $PM_{2.5}$ متغیرهای مستقل: بیشینه دما؛ تبخیر؛ سرعت حداکثر باد؛ کمینه رطوبت نسبی

جدول (۶): ضرایب همبستگی خطی در مدل Stepwise

Sig	آزمون t آماره t	ضرایب استاندارد	ضرایب پیش‌بینی شده در حالت غیراستاندارد			کمیت‌های رگرسیونی
		Beta	Std. Error	ضرایب B		
.۰۱۵۱	۱/۴۷۲		۹/۲۴۳	۱۳/۶۰۷	ضریب ثابت	
.۰۰۰	۴/۸۳۷	.۰/۸۱۵	.۰/۲۸۲	۱/۳۶۴	بیشینه دما (T max)	
.۰۰۳۹	-۲/۱۵۲	-۰/۲۶۸	.۰/۲۲۸	-۰/۴۹۰	کمینه رطوبت نسبی (H min)	
.۰۰۰۲	-۳/۳۲۵	-۰/۵۵۲	.۰/۴۷۳	-۱/۵۷۴	تبخیر (EV)	
.۰۰۰۸	-۲/۸۲۱	-۰/۳۳۶	.۰/۲۰۸	-۰/۵۸۵	سرعت حداکثر باد (WS max)	

جدول (۷): خلاصه مقادیر به‌دست‌آمده از مدل (Stepwise)

Std. Error of the Estimate	Adjusted R Square	R Square	R	مدل
۷/۲۶	.۰/۲۴۱	.۰/۲۶۳	.۰/۵۱۳ ^a	۱
۶/۶۵	.۰/۳۶۴	.۰/۴۰۱	.۰/۶۳۳ ^b	۲
۶/۱۷	.۰/۴۵۳	.۰/۵۰۰	.۰/۷۰۷ ^c	۳
۵/۸۴	.۰/۵۰۹	.۰/۵۶۵	.۰/۷۵۲ ^d	۴

بحث

در دوره مطالعه با برخی از مطالعات انجام شده در جهان شباهت داشت به طوری که غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ در فصل پاییز و زمستان بیشترین مقدار و در فصل بهار کمترین مقدار را نشان می‌دهد که با مطالعه آنوساسانان و همکاران در ارتباط با همبستگی بین $PM_{2.5}$ پارامترهای هواشناسی در شهر چپانگ می و همچنین مطالعه کرمانی و همکاران در بررسی ارتباط بین پارامترهای هواشناسی در ۱۷ نقطه شهر کرج مطابقت دارد (Anusasanan et al., 2022; Majid Kermani et al., 2021). مطالعه جی یوو و همکاران در خصوص کربن آلی و کربن عنصری ذرات $PM_{2.5}$ و PM_{10} در تیانجین چین نشان داد که میزان $PM_{2.5}$ در فصل زمستان ۲۲۸/۱ و در فصل پاییز ۲۰۳/۴ به دست آمد وی این تغییرات فصلی به اثرات هم‌افزایی ناشی از تغییرات میزان انتشار و

بر اساس استاندارد ملی کیفیت هوای محیط (NAAQS)، استاندارد اولیه و ثانویه سالانه ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/۵ میکروگرم بر مترمکعب ($PM_{2.5}$) ۱۲ و ۱۵ میکروگرم بر مترمکعب می‌باشد و بیشترین مقدار غلظت ذرات معلق در سال‌های اخیر در نواحی غربی و جنوبی کشور که منشأ آن کشور عراق می‌باشد، اتفاق افتاده است (Schaap, 2019). بر مبنای این استاندارد، غلظت ماهانه $PM_{2.5}$ در تمامی ماه‌های مورد مطالعه بالاتر از استاندارد بوده است همچنین تغییرات $PM_{2.5}$ در مناطق مختلف شهر تهران از نظر ماه و فصل اختلاف معنی داری را نشان می‌دهد که با مطالعه احمدی و همکاران در شهر سندج همخوانی دارد (احمدی و همکاران، ۱۳۹۷). همچنین تغییرات غلظت $PM_{2.5}$

پیش‌بینی مقدار PM_{2.5} دارند به این معنی که در مدل Enter ۶۰ درصد از تغییرات PM_{2.5} و در مدل Stepwise حدود ۵۷ درصد از تغییرات PM_{2.5} به وسیله پارامترهای هواشناسی بیان می‌شود. روش Stepwise هم نشان داد که از بین پارامترهای مستقل انتخابی تنها بیشینه دما دارای تأثیر مثبت بر مقدار آلاینده می‌باشد یعنی با افزایش دمای حداکثر مقدار غلظت PM_{2.5} نیز افزایش پیدا می‌کند اما پارامترهای تبخیر، سرعت باد حداکثر و رطوبت مینیمم بر مقدار غلظت آلاینده تأثیر معکوس می‌گذارند یعنی با افزایش این پارامترهای جوی مقدار غلظت PM_{2.5} کاهش پیدا می‌کند.

نتیجه‌گیری

این مطالعه تلاشی جهت تعیین رابطه بین غلظت ذرات معلق PM_{2.5} و پارامترهای هواشناسی در شهر تهران می‌باشد در نهایت جهت انتخاب مدل مناسب‌تر، مقدار خطای استاندارد تخمینی بین دو مدل را باهم مقایسه کرد که با توجه مقدار آن برای مدل Stepwise که ۵/۸۴ می‌باشد و کمتر از مقدار خطای مدل Enter (۶/۰۰) می‌باشد لذا مدل Stepwise مناسب‌تر است. با توجه به بالاتر بودن غلظت PM_{2.5} در ایستگاه‌های مختلف سنجش آلودگی هوای کلان‌شهر تهران، با توجه به این که هر ۱۰ میکروگرم افزایش ذرات معلق موجب ۱ تا ۳ درصد افزایش مرگ‌ومیر خواهد شد. باید به این مسئله که خطرات بهداشتی و تأثیر نامطلوب بر ساکنین شهر تهران دارد، توجه بیشتری شود و برای کاهش میزان آلودگی، توسط ارگان‌های مربوطه اقدام‌های لازم صورت گیرد. در این راستا می‌توان با افزایش ناوگان حمل‌ونقل عمومی، افزایش فضای سبز و همچنین کاهش خودروهای فرسوده و افزایش کیفیت سوخت از میزان آلودگی هوای کلان‌شهر تهران کاست.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان تمام 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.

تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله از سازمان کنترل کیفیت هوای شهر تهران و همچنین سازمان هواشناسی کشور جهت در اختیار گذاشتن داده‌های مورد نیاز جهت انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

شرایط جوی فصلی (کاهش اختلاط لایه‌های بالایی - تکرر پدیده وارونگی هوا) (Gu J et al., 2017). مطالعه هوراک و همکاران نشان داد که میزان PM₁₀ در تابستان ۱۷/۳۶ μg/m³ و در زمستان ۲۱/۰۳ μg/m³ بوده است (Horak et al., 2012). مطالعه واسیلاکس و همکاران در یونان نشان داد که بیشترین و کمترین میزان متوسط ماهیانه غلظت PM₁₀ در شهر آتن به ترتیب در فصول پاییز، زمستان و تابستان بوده است. در شهر زسالونوکی بیشترین و کمترین میزان متوسط ماهیانه PM₁₀ به ترتیب مربوط به پاییز و تابستان بوده و از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ روند کاهشی داشته است (Vassilakos et al., 2005). نتایج پهنه‌بندی غلظت PM_{2.5} به‌روشنی دور نیایی معکوس فاصله در فصول مختلف نشان داد که مساحت مناطق با سطح تنش بسیار بالا از نظر آلودگی PM_{2.5} به ترتیب در فصول پاییز، زمستان، بهار و تابستان مشاهده می‌شود. همچنین از مقایسه همزمان نقشه میانگین غلظت سالانه PM_{2.5} و مناطق ۲۲ گانه شهر تهران می‌توان متوجه شد که مناطق ۹، ۱۶، ۱۹ و ۲۰ دارای بالاترین مقدار آلودگی ذرات گردوغبار و مناطق ۸، ۱۵ و ۲۲ نیز دارای کمترین مقدار غلظت می‌باشند. در تحقیق انجام شده جهت بررسی رابطه بین PM_{2.5} و پارامترهای هواشناسی از آزمون همبستگی پیرسون و روش‌های رگرسیون خطی چندگانه استفاده گردید.

بررسی آزمون پیرسون بین متغیر وابسته (PM_{2.5}) و متغیرهای مستقل جوی نشان داد که ذرات معلق با حداقل و حداکثر دما و ساعات آفتابی در سطح ۵ درصد همبستگی مستقیم دارد (به احتمال ۹۵ درصد) و با سرعت باد حداکثر در سطح ۵ درصد و با مقدار بارندگی در سطح ۱ درصد (احتمال ۹۹ درصد) همبستگی منفی دارد. که با نتایج تحقیق «رحیمی و همکاران در تحقیقی که در شهر سنجید صورت گرفت» مطابقت دارد (رحیمی و همکاران، ۱۳۹۴).

در مرحله بعدی، به‌منظور بررسی ارتباط بین PM_{2.5} و پارامترهای هواشناسی از معادلات ۲ روش رگرسیون خطی استفاده شد. در روش Enter مشخص شد که از بین پارامترهای جوی تنها دمای حداکثر دارای تأثیر مثبت روی غلظت PM_{2.5} می‌باشد یعنی با افزایش دمای حداکثر مقدار PM_{2.5} نیز زیاد می‌شود و باقی پارامترها دارای تأثیر معکوس روی میزان غلظت ذرات معلق می‌باشند مقدار ضریب همبستگی در این روش ۰/۶ و در روش Stepwise، ۰/۵۶ می‌باشد نزدیکی مقادیر ضریب همبستگی در هر دو روش نشان می‌دهد که دو مدل تقریباً عملکرد یکسانی در

یادداشت‌ها

- | | |
|------------------------------|------------------------|
| 4. Enter | |
| 5. Stepwise | |
| 6. Interpolation | 1. Particulate Matter |
| 7. Inverse distance weighted | 2. Linear regression |
| 8. Stepwise | 3. Multiple regression |

منابع

- Ahmadi, H.; Ahmadi, T.; Shahmoradi, B.; Mohammadi, S. & Kohzadi, S. 2018. The effect of climatic parameters on air pollution in Sanandaj, Iran. *Journal of Advances in Environmental Health Research*, 3(1): 49-61.
- Ju Wang, Jiatong Han, Tongnan Li, Tong Wu, Chunsheng Fang. 2023 Impact analysis of meteorological variables on PM2.5 pollution in the most polluted cities in China. *Heliyon VOLUME 9, ISSUE 7, E17609, JULY*.
- Goudie AS, Middleton N. *Desert Dust in the Global System*. Springer 2006; 1st ed. Berlin: 278-153.
- Gu J, Bai Z, Liu A, Wu L, Xie Y, Li W. 2017. Characterization of Atmospheric Organic Carbon and Element Carbon of PM2.5 and PM10 at Tianjin, China. *Aerosol Air Qual Res*. 10:167-76.
- Horak FSM, Gartner C, Spengler JD, Tauber E, Urbanek R, Veiter A, Fischer T. 2012. Particulate matter and lung function growth in children: a 3-yr follow-up study in Austrian schoolchildren. *Eur Respir J*. 19:838-45.
- Kermani, M., Jonidi Jafari, A., Gholami, M., Fanaei, F., Arfaeinia, H. 2021. Association between Meteorological Parameter and PM2.5 Concentration in Karaj, Iran *International Journal of Environmental Health Engineering*.
- Ketabi, D., Esmaili, R., Alidadi, H., Peirovi, R. & Joulaei, F. 2015. Evaluation of Mashhad City Air Quality based on Air Quality Index (AQI). *Journal of Research in Environmental Health*; 2(3): 236-228. (Persian)
- Kiker. G. A., Bridges, T. S., Varghese, A., Seager, T. P., & Linkovjj, I. 2015. Application of multicriteria decision analysis in environmental decision making. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 1(2), 95-108.
- Kuo, C-Y., Chen, P-T., Lin, Y-C., Lin, C-Y., Chen, H-H. & Shih, J-F. 2008. Factors affecting the concentrations of PM10 in central Taiwan. *Chemosphere*. 70(7):1273-9.
- Rahimi, M., Yazdani, M., Asadi, R. M., & Haydari, M.T. 2016. Investigating the Air Pollution of Sanandaj whit emphasis on temporal variation of PM10 concentration. *Urban Ecological Research*, 6(1):99-116
- McKendry IG. 2000. PM10 levels in the Lower Fraser Valley, British Columbia, Canada: an overview of spatiotemporal variations and meteorological controls. *Journal of the Air & Waste Management Association*; 50(3): 452-443
- Najafpoor, A.; Jonidi Jafari, A. & Doosti, S. 2015. Analysis of the trend of changes in the concentration of five pollutants of air quality index in Tehran metropolis and their relationship with meteorological data during the years of 2001-2009. *Health Journal of Shaheed Beheshti, University of Medical Sciences, Faculty of Health*. 3 (2):17-26 (in Persian).
- Nasibulina, A. 2015. Education for Sustainable Development and Environmental Ethics. Available online at www.sciencedirect.com, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 214- 1082.
- Nasibulina, An. 2019. Education for Sustainable Development and Environmental Ethics. Available online at www.sciencedirect.com, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*,

- Nazari, Z.; Khorasani, N.; Feyznia, S. & Karami, M. 2013. Investigation of changes in the concentration of PM₁₀ and the effect of meteorological parameters on it during the years 2005-2010. *Natural Environment Journal*. 66 (1):101-11 (in persian).
- Nourpoor, A. & Feyz, A. 2014. Determination of spatial and temporal variations of sulfur dioxide, nitrogen dioxide and various suspended particles by using GIS techniques in Tehran. *Journal of Environmental Studies*. 40 (3):723-738 (in persian).
- Anusasananan, P., Morasum, D., Suwanaratand, S., Thangprasert, N. 2022. Correlation between PM_{2.5} and meteorological variables in Chiang Mai, Thailand. *Journal of Physics: Conference Series* 2145. 012045.
- Rahimi, M.; Yazdani, M.; Asadi, M. & Heydari, M. 2015. Investigation of Sanandaj air pollution with emphasis on time variation of PM₁₀ concentration. *Two letters of research on urban ecology*, 6 (1):99-116 (In Persian).
- Rezaei, A.; Sayadi, M. & Rezaei, M. 2013. Quantitative and qualitative study of air pollution and its relation with climate factors of Birjand city in 2012. *Short report of community health*. 7 (4):62-65 (in Persian).
- Robles, L. A., Ortega, J. C., Fu, J. S., Reed, G. D., Chow, J. C., Watson, J. G. & Herrera, J. A., 2008. A hybrid ARIMA and artificial neural networks model to forecast particulate matter in urban areas: The case of Temuco, Chile, *Atmospheric Environment*, 42: 8331- 8340. 18.
- Sandstrom, T. FB. 2008. Desert dust, an unrecognized source of dangerous air pollution, *Epidemiology*, 19: 808-9.
- Schaap, M. G., 2016. Using neural network to predict soil water retention and soil hydraulic conductivity, *Soil and till Research*, 47: 37- 42.
- Sousa SIV, Martins FG, Pereira MC, Alvim-Ferraz MCM, Ribeiro H, Oliveira M et al. 2008. Influence of atmospheric ozone, PM₁₀ and meteorological factors on the concentration of airborne pollen and fungal spores. *Atmospheric Environment*; 42(32): 7464-7452.
- Shahsavani, A., Yarahmadi, M., Mesdaghinia, A., Younesian, M., Jaafarzadeh, N., Naimabadi, M., et al. 2011. Analysis of Dust Storms Entering Iran with Emphasis on Khuzestan Province. *Hakim Research Journal*; 15(3): 202-192.
- Wu, Dan, Xu, Yuan, Zhang, Shiqiu. 2015. Will joint regional air pollution control be more cost effective? An empirical study of China's Beijing Tianjin Hebei region. *Journal of Environmental Management*, 2015, 149 (2015) 27e36
- Tian, G., Qiao, Z., Xu, X. Characteristics of particulate matter (PM 10) and its relationship with meteorological factors during 2001–2012 in Beijing. *Environmental Pollution*.
- Tecer, L. H.; Süren, P.; Alagha, O.; Karaca, F. & Tuncel, G. 2018. Effect of meteorological parameters on fine and coarse particulate matter mass concentration in a coal-mining area in Zonguldak, Turkey. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 58(4): 543-552.
- Tor, H. O., Markey, j., Kathy, T., & Lsaac N, L. 2015. Assessing traffic and industrial contributions to ambient nitrogen dioxide and volatile organic compounds in a low pollution urban environment, *Science of The Total Environment*, Volume 529, pp.149–157.
- Xing-Ming., X. & P. An-Hua. 2016. Material selection using PROMETHEE combined with analytic network process under hybrid environment. *Material and Design*., 47., 643-652.
- Vassilakos, C., Saraga, D., Maggos, T., Michopoulos, J., Pateraki, S., Helmis, C. 2005. Temporal variations of PM_{2.5} in the ambient air of a suburban site in Athens, Greece. *Science of the Total Environment*.; 349(1):223-31.

Spatial Analysis of PM_{2.5} and Its Statistical Correlation with Meteorological Parameters in Tehran

Abolfazl Ghanbari^{*1}, Vahid Kakapour², Hossein Fekrat², Maryam Sadeghi²

1. Full Professor, Department of Remote Sensing and Geographical Information System, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
2. Ph.D. Student in RS & GIS, Department of Remote Sensing and Geographical Information System, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

(Received: 2024/02/12

Accepted: 2023/11/01)

Abstract

Air pollution has become one of the major challenges associated with urbanization and industrialization. This study aims to conduct a spatial analysis of PM_{2.5} pollution and examine its statistical relationship with meteorological parameters in the metropolitan area of Tehran. To achieve these objectives, two data sets were utilized: (1) daily PM_{2.5} concentration data obtained from the Air Quality Control Company and (2) daily meteorological data (including rainfall, evaporation, maximum wind speed, minimum and maximum relative humidity, sunshine hours, and minimum and maximum temperatures) provided by the Meteorological Organization. The inverse distance weighting (IDW) method was used to map the spatial distribution of PM_{2.5} concentrations. The IDW results revealed that regions 16, 19, 20, and 9 had the highest levels of particulate matter pollution, while regions 8, 22, and 15 had the lowest concentrations. Pearson correlation and multiple linear regression analyses were used to investigate the statistical relationship between PM_{2.5} levels and meteorological parameters. The Pearson correlation results indicated a positive correlation between PM_{2.5} and minimum/maximum temperature, as well as sunshine hours, and a negative correlation with maximum wind speed and rainfall. Two linear regression models (Enter and Stepwise) were employed to establish the relationship between PM_{2.5} (dependent variable) and meteorological parameters (independent variables). The results showed regression coefficients of 0.6 for the Enter model and 0.565 for the Stepwise model, indicating that both models performed well in predicting PM_{2.5} concentrations. To determine the more suitable model, the estimated standard error was compared, with the Stepwise model showing a lower error (5.84) than the Enter model (6.0089). Therefore, the Stepwise model was deemed more appropriate for predicting PM_{2.5} concentrations.

Keywords: Meteorological parameters, Air pollution, PM_{2.5}, concentration, Linear regression, Pearson correlation, Tehran.

* Corresponding author:

DOI: 10.22034/eiat.2025.217693

Email: a_ghanbari@tabrizu.ac.ir